

G. G. Devjatych

Zur Chemie anorganischer Reinstoffe*

Ein wissenschaftlicher Begriff vom Reinheitsgrad eines Stoffes entstand in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zusammen mit der endgültigen Anerkennung der atomistischen Theorie des Stoffaufbaus. D. I. Mendeleev schreibt in seiner Arbeit „Grundlagen der Chemie“, die in den Jahren 1869 bis 1871 entstand: „Die Chemie untersucht hauptsächlich einzelne Reinstoffe und beschreibt deren Eigenschaften und Reaktionen“.

Schon frühzeitig wurde die Wichtigkeit der Erzeugung reiner Stoffe erkannt. Der Begründer der weltbekannten deutschen Firma E. Merck schrieb im Jahre 1851: „Ich garantiere die Reinheit aller meiner Reagenzien und trage die ganze Verantwortung für jeden unerwünschten Effekt, der mit Verunreinigung verbunden werden kann“.

Im breiten Sinne versteht man unter dem Begriff Reinstoffe solche Stoffe und Materialien, in denen der Gehalt an Verunreinigungen wesentlich niedriger ist als in den Stoffen, mit denen wir täglich zu tun haben. In der Reinstoffchemie verwendet man gewöhnlich für die Bezeichnung der Verunreinigungskonzentration die Fachausdrücke part pro million (ppm), was einem Wert von 10^{-6} des Molenbruchs einer Verunreinigung entspricht, part pro billion (ppb, 10^{-9} des Molenbruchs), part pro trillion (ppt, 10^{-12} des Molenbruchs). Unter dem Begriff Molenbruch einer Verunreinigung (m.b.) versteht man das Verhältnis der Molzahl einer Verunreinigung n_v zur Gesamt molzahl n_g aller Komponenten, die sich in der gegebenen Menge eines Stoffes befinden (m.b. = $n_v / n_v + n_g$).

Die quantitative Charakteristik des Begriffes „reiner Stoff“ verändert sich mit der Zeit. Heutzutage gilt als Reinstoff ein solcher Stoff, in dem der Gesamtgehalt an Verunreinigungen nicht größer als 1 ppm ist (bei der Konzentration einzelner Verunreinigungen tausendmal niedriger). Da die Zusammensetzung eines Stoffes neben Temperatur und Druck zu seinen Hauptparametern gehört, sollte für eine genaue Betrachtung stets der hochreine Zustand herangezogen werden.

* Vortrag, gehalten im Plenum der Leibniz-Sozietät am 15. Dezember 1994

Der Inhalt der Chemie der Reinststoffe ist bestimmt vom Komplex der Fragen und Probleme, die mit der Erzeugung, Analyse, Untersuchung der Eigenschaften sowie mit der praktischen Verwendung der Stoffe mit äußerst niedrigem Gehalt an Verunreinigungen verbunden sind. Die Entwicklung des Sortiments an Reinststoffen im Laufe der Zeit ist in Abb. 1 dargestellt.

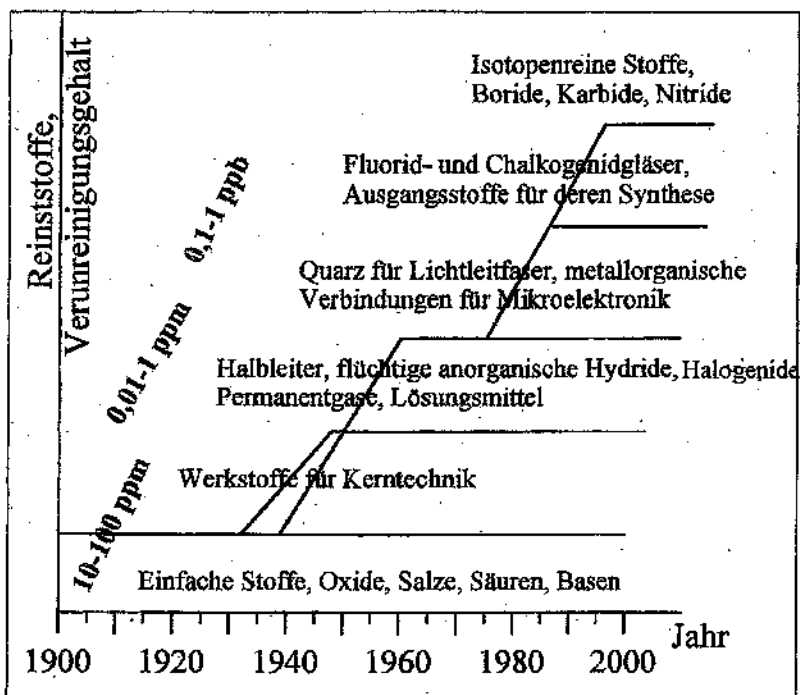


Abb. 1 Die Entwicklung des Sortiments an Reinststoffen im Laufe der Zeit

In den 40er Jahren dieses Jahrhunderts bildete sich die erste Entwicklungsstufe der modernen Reinststoffchemie heraus, als im Zusammenhang mit Untersuchungen zu physikalisch-chemischen Eigenschaften von Materialien (darunter einfache Stoffe, Oxide, Salze, Basen) die Konzentrationen einzelner Verunreinigungen auf das Niveau 10 bis 100 ppm gesenkt wurden bei einem Gesamtgehalt von 1000 ppm.

Eine neue Etappe in der Herstellung reiner Stoffe ist mit der intensiven Entwicklung der Atomphysik, Festkörperphysik und Optik und mit der Schaffung neuer Techniken innerhalb dieser Wissenschaftszweige ver-

bunden. Es stellte sich heraus, daß die Wechselwirkung der Kernstrahlung mit einzelnen Stoffen als auch das Verhalten der Ladungsträger in Festkörpern empfindlich vom Verunreinigungsgehalt abhängen und die physikalisch-chemischen Eigenschaften eines Stoffes stärker bestimmen als intermolekulare Wechselwirkungen. Wie damals durchgeführte sowie moderne Untersuchungen zeigen, werden bestimmte Kern-, elektrophysikalische und optische Eigenschaften eines Stoffes nur bei Senken des Verunreinigungsgehaltes auf 0,01 ppm bis 0,01 ppb erreicht, in einigen Fällen sogar bei noch niedrigerer Konzentration. Diese Verunreinigungen werden limitierende genannt, da ihr Gehalt die Tauglichkeit eines Stoffes zum angestrebten Verwendungszweck bestimmt.

Für die Halbleiterelektronik und die Kerntechnik waren Stoffe einschließlich verwendeter chemischer Reagenzien mit einem Niveau an limitierenden Verunreinigungen von 0,01 bis 1 ppm und manchmal auch noch darunter erforderlich. Solche Materialien wurden erstmals offiziell Reinstoffe genannt und in den 50er Jahren hergestellt. Der Gesamtgehalt an Verunreinigungen in diesen Stoffen konnte 100 ppm einschließlich nicht limitierender Fremdstoffe betragen.

Die Entwicklung der Faseroptik erforderte die Herstellung von Quarzglas und einer Reihe anderer Materialien mit Konzentrationen an limitierenden Verunreinigungen von 1 ppb. In den letzten Jahren zeigt sich ein großes Interesse an Lichtleitfasern aus Fluorid- und Chalkogenidgläsern, was zu einer neuen Erweiterung des Sortiments an Reinstoffen und Materialien mit erhöhter Forderung für den Verunreinigungsgehalt von 0,1 bis 1 ppb führte.

In der letzten Zeit entstand ein Bedarf an hochreinen Boriden, Karbiden und Nitriden. Immer häufiger erscheinen auch wissenschaftliche Berichte über interessante Eigenschaften von isotoopenreinen Stoffen. Es zeigte sich z.B., daß die Wärmeleitfähigkeit eines isotoopenreinen Diamanten (Gehalt an ^{12}C 99,93 %) 50 % höher liegt als die Wärmeleitfähigkeit eines Naturdiamanten (Gehalt an ^{12}C 99 %). Aus den Arbeiten zur Herstellung eines einkristallinen ^{28}Si wird erwartet, daß durch Messung der Gitterperiode in diesem Material die Avogadro'sche Zahl genauer bestimmt werden kann als durch andere Methoden.

Aus Abb. 1 folgt, daß die Erhöhung des Reinheitsgrades zur Entdeckung neuer Eigenschaften der Stoffe führt und zu einer besseren Ausprägung schon bekannter Eigenschaften. Das sind Grundlagenaspekte der

Reinstoffchemie, mit denen sich unsere Kenntnisse über die Materie erweitern.

Ende der 70er Jahre entstanden neue Forderungen an den Reinheitsgrad bestimmter Stoffe. Nicht nur die limitierenden Verunreinigungen, sondern alle Fremdstoffe sollten auf ein möglichst niedriges Niveau gesenkt werden. Damit ist das Bestreben verbunden, echte Stoffeigenschaften festzustellen, die nicht durch Verunreinigungen maskiert sind, und Materialien zu erhalten, deren Eigenschaften keine Veränderungen mit der Zeit erfahren. Das ist die heutige Situation der Reinstoffchemie.

Auf dieser Basis finden mehr als 2000 hochreine Stoffe und Materialien Verwendung als Halbleiter, als Materialien für die Mikroelektronik und Elektrotechnik, als Werkstoffe für die Kerntechnik, auch optische Materialien sowie chemische und biochemische Reagenzien zählen dazu. Praktisch alle Klassen an chemischen Verbindungen sind in dieser Hinsicht gefragt (Elementarstoffe, Oxide, Säuren, Basen, flüchtige anorganische Hydride, Halogenide, metallorganische Verbindungen usw.).

Innerhalb jeder Kategorie der Materialien kann man Gruppen mit enger Zweckbestimmung hervorheben. Zum Beispiel unterteilt man optische Materialien in Stoffe für Faseroptik, Lasermaterialien und Substanzen für optische Medien. Im Rahmen jeder Gruppe gibt es Materialien, die eine führende Stellung einnehmen, so Si, Ge, GaAs in der Halbleitertechnik und Mikroelektronik, Quarzglas in der Faseroptik.

Die zur Zeit geltenden Anforderungen an den Verunreinigungsgehalt in hochreinen Materialien sind meistens experimentell festgelegt (Tabelle 1). Die zulässige Konzentrationsgrenze an elektroaktiven Verunreinigungen liegt für Halbleiter bei 0,1 ppb. An Gesamtverunreinigungen werden für diese Gruppe 0,1 bis 10 ppb erlaubt.

Die Technologie der Halbleiterelemente und Erzeugnisse für die Mikroelektronik ist mehrstufig und sieht die Verwendung zahlreicher chemischer Reagenzien, Lösungsmittel und Gase vor. Nach Kontaktierung mit ihnen können sich auf der Oberfläche eines Reinstoffherzeugnisses Verunreinigungen (z. B. durch Adsorption) abscheiden, die sich im weiteren in das Volumen des Materials einlagern. Deshalb muß die Konzentration der limitierenden Verunreinigungen in den Hilfsmaterialien genau so niedrig wie im Grundstoff oder sogar noch niedriger sein. So läßt man in Reinstsäuren und -alkalien 20 bis 30 Verunreinigungen zu, dabei 60 bis 80 % auf einem Niveau von 1 ppb.

Tabelle 1
Anforderungen an den Reinheitsgrad von Reinstoffen

Stoffe	Verunreinigungen	Gehalt an limitierenden Verunreinigungen
Halbleiter	elektroaktive Verunreinigungen	0.1 ppb
Säuren, Alkalien	Metalle	1 ppb
Flüchtige anorganische Hydride, Halogenide, metallorganische Verbindungen	Nichtflüchtige Verbindungen der Metalle	0.1 ppb
	Wasser	1 ppm
	Kohlenwasserstoffe	0.1 - 1 ppm
Quarz- und Fluoridgläser	Färbende Verunreinigungen (Fe, Ni, ...)	0.1 - 1 ppba
	OH-Gruppen	10 ppb
Chalkogenidgläser	Metalle Si	<10 ppb
	H	0.1 - 1 ppb
	C, O	<0.1 ppm

Flüchtige Verbindungen der Elemente, die für die Herstellung hochreiner Materialien und Epitaxieschichten (darunter Hydride, Halogenide, metallorganische Verbindungen) verwendet werden, müssen minimale Konzentrationen an nichtflüchtigen Metallverbindungen, Wasser und Kohlenwasserstoffen aufweisen.

Unter den verschiedenen optischen Materialien werden die höchsten Anforderungen an Materialien für Faseroptik gestellt. In Siliciumdioxid für Lichtleitfasern mit niedrigen optischen Verlusten muß der Gehalt an

„färbenden“ Verunreinigungen (Eisen-, Nickel-, Chromverbindungen und einer Reihe anderer Elemente) weniger als 0,1 bis 1 ppb und der Gehalt an OH-Gruppen weniger als 10 ppb betragen. Überschreitung dieser Grenzen führt zur bedeutenden Vergrößerung optischer Verluste. Noch mehr einschränkende Anforderungen werden an Fluorid- und Chalkogenidgläser für Faseroptik gestellt.

Die Forderungen an hochreine Materialien für die Industrie erweitern sich sowohl in Richtung auf eine Sortimentsvergrößerung als auch auf eine Erhöhung des Umfangs kontrollierbarer Verunreinigungen und die Herabsetzung ihrer Konzentrationsgrenzen.

Unter den Anforderungen an hochreine Materialien nimmt in den letzten Jahren die Homogenität einen besonderen Platz ein, die meistens mit dem Gehalt an Spurenelementen verbunden ist. Die in den 70er Jahren durchgeführten Untersuchungen machten auf eine neue Klasse an Verunreinigungen aufmerksam: schwebende Teilchen von Mikron- und Submikrongröße. Diese Teilchen bestehen aus Verbindungen, die sich in dem Material nicht lösen. Ihr Verhalten kann sich während der Feinreinigung wesentlich vom Verhalten der im Grundstoff gelösten Teilchen unterscheiden. In flüssigen Reinstoffen, die speziell nicht von schwebenden Teilchen gereinigt sind, kann der Gehalt an letzteren 10^{-6} pro Milliliter und höher betragen. Die schwebenden Teilchen sind äußerst unerwünschte Verunreinigungen in Halbleiter- und optischen Materialien. In Hilfsreagenzien (Gase, Lösungsmittel, Ätzlösungen) muß der Gehalt an schwebenden Teilchen extrem niedrig sein, damit sich der Gehalt an Mikroheterogen-Einschlüssen nach dem Kontakt dieser Reagenzien mit der Oberfläche eines Reinstoffes nicht vergrößert. Ein aktives Element mit einem solchen Einschluß kann sich als nicht funktionsfähig erweisen, was bei der sehr hohen Bauelementdichte in Erzeugnissen der modernen Mikroelektronik zu größeren Störungen führt.

Es ist besonders zu betonen, daß die zulässige Konzentration der Verunreinigungen im Endprodukt vorhanden sein muß. Daher ist es sinnvoll, eine Komplexanalyse des gesamten technologischen Prozesses zu betrachten und nicht nur die Erhöhung der Anforderungen an die Reinheit der Ausgangsmaterialien festzulegen. Eine Anreicherung von Verunreinigungen im Endprodukt wird damit unterbunden.

Es gibt zwei Produktionswege für Reinstoffe. Der erste ist die Hochreinigung eines Stoffes selbst, der zweite die Darstellung eines Reinstoffes durch Zersetzung einer flüchtigen Verbindung. Den zweiten Weg

wählt man dann, wenn die direkte Hochreinigung eines Materials wegen hoher Schmelz- und Siedetemperatur Schwierigkeiten bereitet.

Die Grundverfahren der Hochreinigung sind Destillation und Kristallisation. Man verwendet diese Methoden für die Hochreinigung flüchtiger Verbindungen, aus denen später einfache oder zusammengesetzte Festkörper abgeschieden werden.

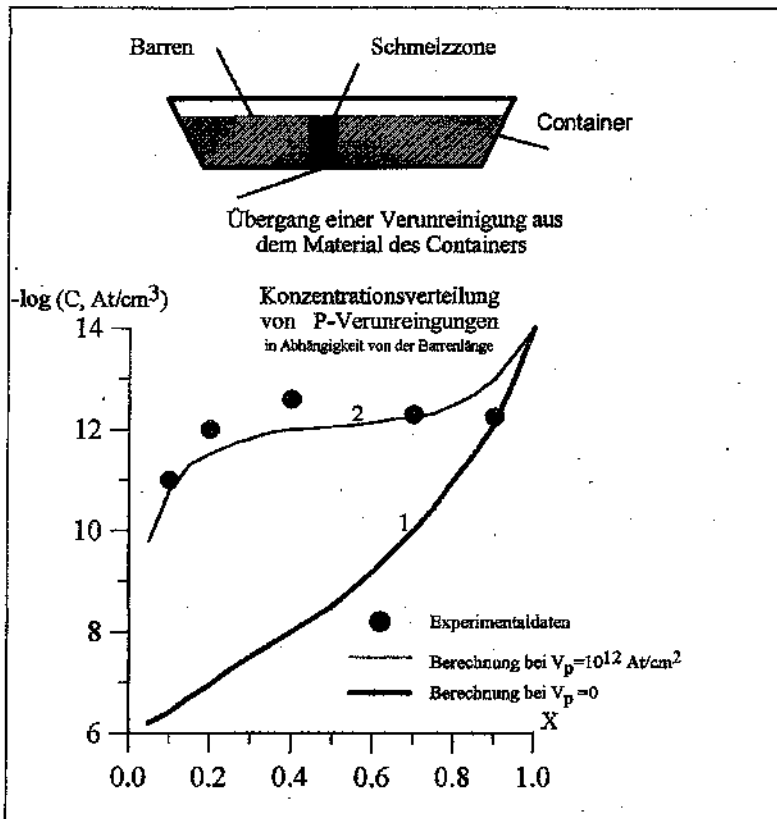


Abb. 2 Das Schema der Zonenschmelze unter Berücksichtigung des Überganges von Verunreinigungen aus dem Container

Die Effektivität einzelner Hochreinigungsmethoden kann durch den Übergang von Verunreinigungen aus dem Material der Apparatur stark begrenzt werden. Abbildung 2 zeigt die Verteilung von Verunreinigungen in Abhängigkeit von der Ge-Barrenlänge beim Zonenschmelzen.

Kurve 1 wurde berechnet ohne Berücksichtigung des Übergangs von P-Verunreinigungen aus dem Material des Containers. Kurve 2 folgt aus einer Berechnung mit einer angenommenen Übergangsgeschwindigkeit von 10^{12} Atomen P/cm². Man kann sehen, daß der Übergang der P-Verunreinigungen die Ergebnisse der Ge-Reinigung um 3 bis 4 Größenordnungen verschlechtert.

Die Besonderheit der Verunreinigungswirkung der Apparatur besteht darin, daß die Verlängerung der Apparatur in Achsenrichtung mit beachtlicher Erhöhung des Trennvermögens nicht die Konzentration der Verunreinigung im Endprodukt erniedrigt.

Tabelle 2

Das Verhältnis von Al- und Cu-Verunreinigungen in verschiedener Form in Reinstgermanium

Verunreinigung	Atmosphäre der Züchtung	Gesamtgehalt	elektroaktiver Teil	elektroaktiver Teil/Gesamtgehalt
Al	H ₂	$8 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{12}$	0.05
Cu	H ₂	$4 \cdot 10^{12}$	$1.3 \cdot 10^{10}$	0.003
Cu	Vakuum	$4 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{10}$	0.025

Die Verunreinigungen in Reinststoffen kommen in verschiedenen Formen vor. Aus dem Vergleich der Analysenergebnisse folgt, daß im Reinstgermanium, hergestellt im Kontakt zu Quarzglas, das Verhältnis von Aluminium in elektroaktiver Form zu Gesamtaluminium etwa 1 : 20 beträgt. Noch kleiner ist dieses Verhältnis für Kupfer. Beim Glühen führen elektroaktive Kupfer-Wasserstoff-Komplexe zunächst zu einem elektroaktiven Kupfer in Form einer Substitutionsstörstelle, die dann in eine nicht elektroaktive Form übergeht.

Zur Beurteilung des heutigen Niveaus für den Reinheitsgrad der Stoffe ist festzustellen, daß der objektive Vergleich des Reinheitsgrades verschiedener Stoffe ziemlich schwierig ist und nur im Rahmen der statistischen Behandlung der Gesamtkonzentrationsbestimmung in einem Stoff

möglich wird. Dabei wird ein Histogramm der Verteilung von Verunreinigungen als Funktion der Konzentration in einem analysierten Stoff dargestellt (Abb. 3). Dieses Histogramm zeigt, welcher Teil der Verunreinigungen in einem bestimmten Konzentrationsbereich liegt. Als Verteilungsgrößen gelten ein mittlerer Konzentrationswert ($\log C$), der angibt, wie der Gehalt an Grundverunreinigungen ist, und außerdem eine Verteilungsdispersion, aus der die Streuung der Verunreinigungen in Abhängigkeit von der Konzentration hervorgeht. Aus den Verteilungsparametern ergibt sich die Gesamtkonzentration der Verunreinigungen in einem Stoff. Aus Abb. 3 ist zu ersehen, daß für diese Probe von hochreinem Zinn etwa 30 Verunreinigungen bestimmt wurden. Ihr Konzentrationsmittelwert liegt bei 0,1 ppm. Die Streuung des Verunreinigungsgehaltes zu diesem Mittelwert beträgt etwa eine Größenordnung.

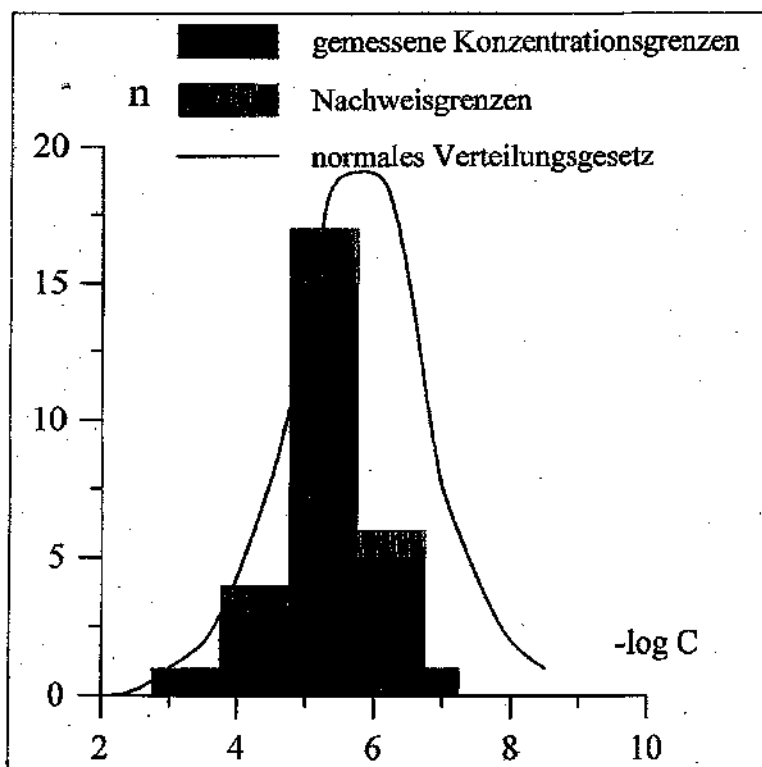


Abb. 3 Die Verteilung von Verunreinigungen in Abhängigkeit von der Konzentration im Reinstzinn

Tabelle 3

Die Ausstellung von Reinstoffen im Institut für Chemie hochreiner Materialien der Russischen Akademie der Wissenschaften in Nishnij Novgorod

Stoffklasse	Gesamtmenge der repräsentierten Stoffproben	Menge der repräsentierten Stoffproben
Einfache Stoffe, darunter:	345	75
Festkörper	316	68
Gase	19	7
Standardproben	10	6
Flüchtige Verbindenen, darunter:	136	65
Halogenide	76	27
Hydride	17	7
metallorganische Verbindungen	39	29

Anzahl der durchgeführten Analysen: 1493

Anzahl der Analyseergebnisse: 37336

Der Reinheitsgrad der in den GUS-Ländern produzierten Reinstoffe geht aus den Angaben zur ständigen Ausstellung von Reinstoffen im Institut für Chemie hochreiner Materialien der Russischen Akademie der Wissenschaften (Nishnij Novgorod) hervor. Diese Daten stammen von Reinstoffen, die im wesentlichen unter Laborbedingungen hergestellt wurden. Zur Zeit verfügt die Ausstellung über mehr als 500 Versuchsproben und gewährleistet eine ständige Kontrolle des Untersuchungsstandes zum Problem der Reinstoffe in unserem Lande sowie einen

Vergleich mit dem Niveau der Reinstoffproduktion und -analyse im Ausland.

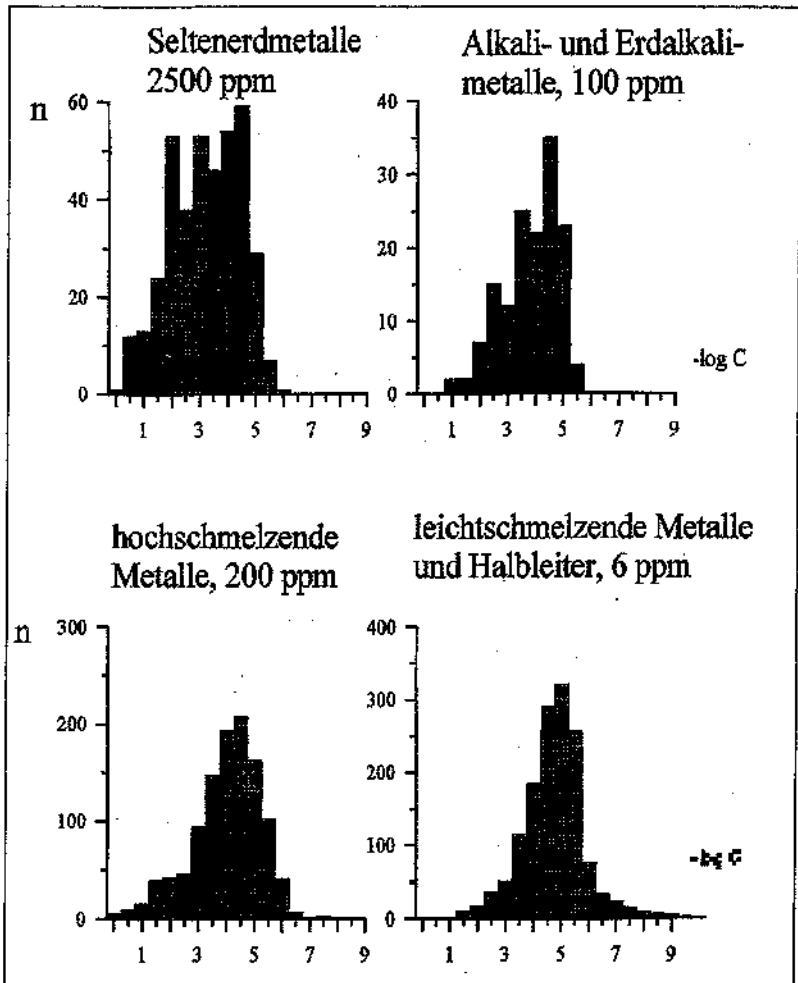


Abb. 4 Die Verteilung der gemessenen Konzentrationen an Verunreinigungen

Abb. 4 zeigt die Verteilung der Verunreinigungen als Funktion der Konzentration in verschiedenen Gruppen von Elementen. Die Gesamtkonzentration der Verunreinigungen in Seltenerdmetallen beträgt durchschnittlich 2500 ppm, in Alkali- und Erdalkalimetallen 100 ppm, in

hochschmelzenden Metallen (mit einer Schmelztemperatur höher als 1200 °C) 200 ppm.

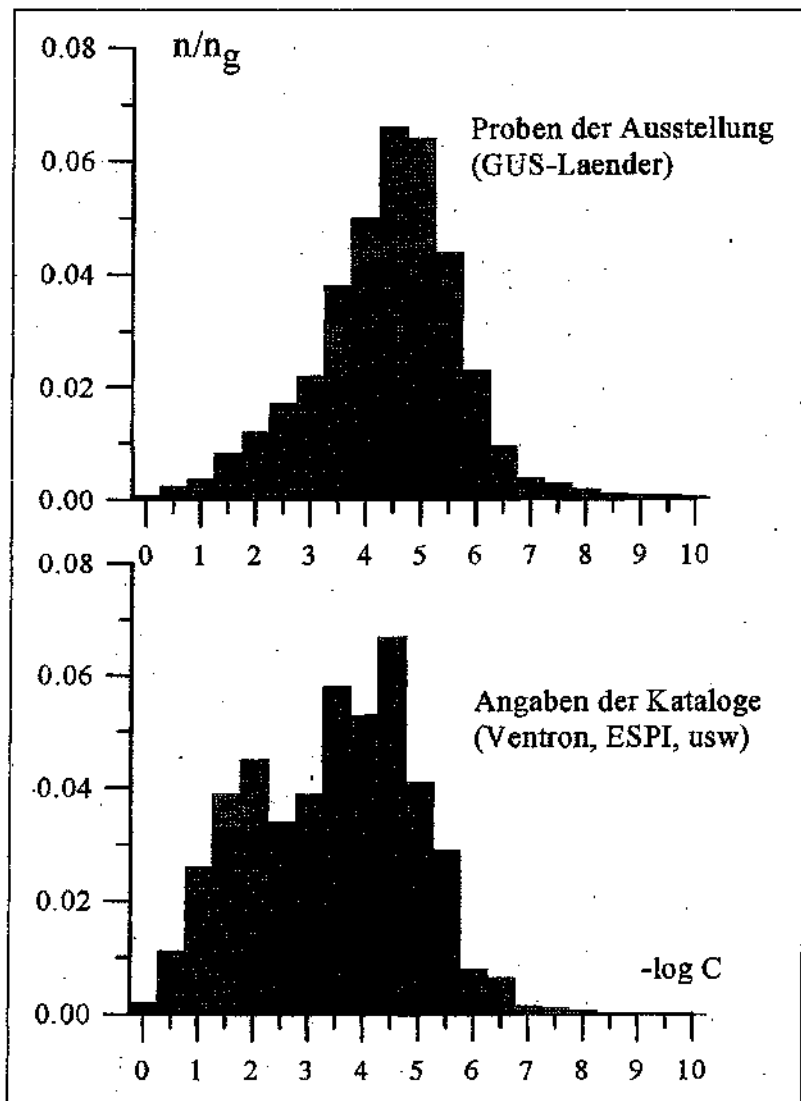


Abb. 5 Die Verteilung der Konzentration von Verunreinigungen bei einfachen Festkörpern

In Elementarleitern und leichtschmelzenden Elementarstoffen liegt die Gesamtkonzentration der Verunreinigungen bei ca. 6 ppm. Als ein höchstreiner Stoff unter den Elementen gilt Germanium, bei dem 5 Verunreinigungen mit einer Gesamtkonzentration von 0,1 ppm bestimmt wurden. Berücksichtigt man aber die Konzentration jedes von restlichen 45 Elementen entsprechend der jeweiligen Nachweisgrenze, so erreicht die Gesamtkonzentration 5 ppm.

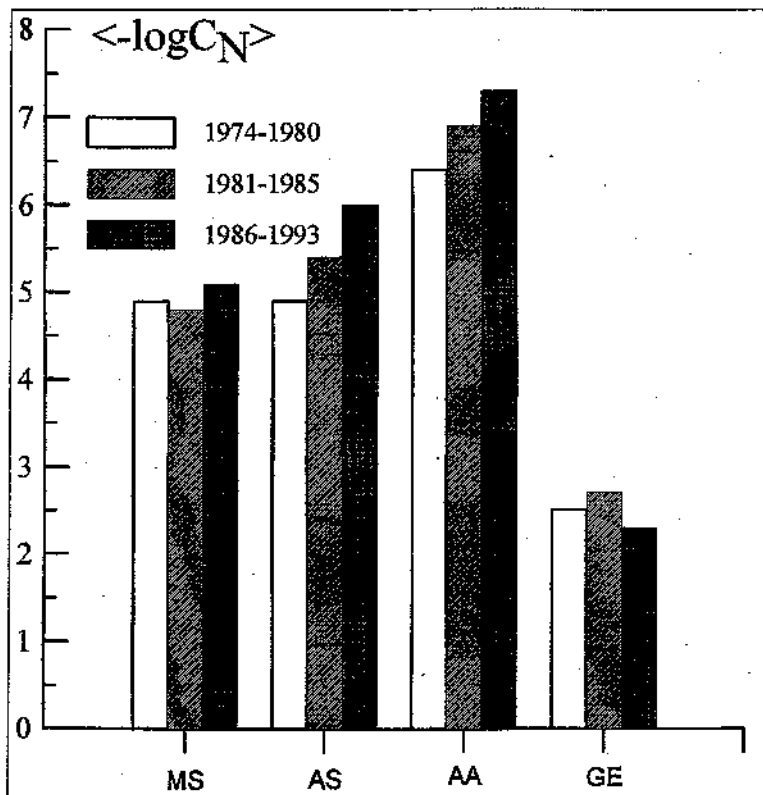


Abb. 6 Die Dynamik der Nachweisgrenzen an Verunreinigungen in Reinstoffen. Analysenmethoden der einfachen Festkörper
 MS - Massenspektroskopie
 AS - Atomspektroskopie
 AA - Aktivierungsanalyse
 GE - Analysenmethoden für gasbildende Elemente

Ein Vergleich der Reinheitsgrade von Stoffen im In- und Ausland ergibt sich aus Abb. 5. Oben wird ein Histogramm der Verteilung von Verun-

reinigungen in einfachen Stoffen aus der Ausstellung der Reinstoffe in Nishnij Novgorod, unten nach Angaben der Kataloge ausländischer Firmen (hauptsächlich VENTRON, ESPI) gezeigt.

Es ist zu sehen, daß ein Teil der Verunreinigungen mit hohem Gehalt in den Ausstellungsproben etwas niedriger liegt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Ausstellungsproben hauptsächlich unter Laborbedingungen erzeugt wurden und in den Katalogen der ausländischen Firmen die Warenproduktion dargestellt ist.

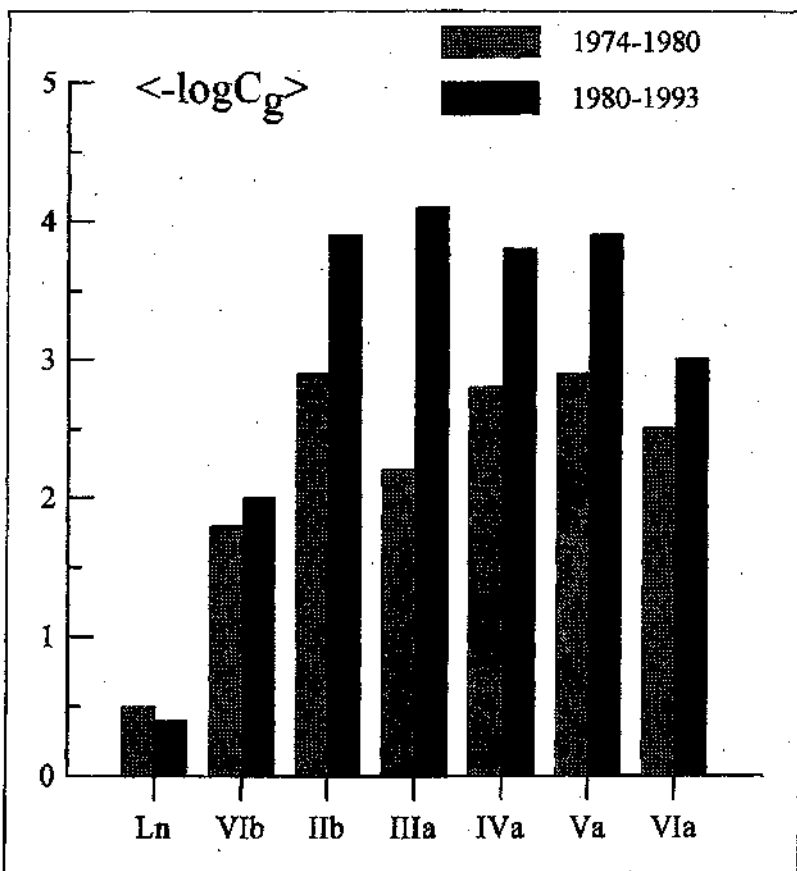


Abb. 7 Die Zeitabhängigkeit der Gesamtkonzentration an Verunreinigungen in einfachen Festkörpern bei Nebengruppen des Periodensystems

Die Daten der Ausstellung ermöglichen es, die Zeittendenzen der Entwicklung hochempfindlicher Analysemethoden in den letzten 20 Jahren zu beurteilen. Aus Abb. 6 geht hervor, wie sich die Werte der Nachweisgrenzen verschiedener Analysemethoden veränderten. Außer bei Massenspektrometrie und der Analyse für gasbildende Elemente, die auf gleichem Stand blieben, haben sich die Nachweisgrenzen bei Atomspektroskopie und Aktivierungsanalyse um eine Größenordnung verbessert, bei der Gaschromatographie überstreicht die Verbesserung eine bis zwei Größenordnungen. In Spektralmethoden wurde dieser Fortschritt mit der Entwicklung von Anreicherungsmethoden bei niedrigem Hintergrund, in der Gaschromatographie mit der Verwendung neuer Detektoren sowie der Kapillarchromatographie, in der Aktivierungsanalyse mit dem Einsatz von Hochflußreaktoren erreicht.

Abb. 7 stellt die Erhöhung des Reinheitsgrades einfacher Festkörper für eine Reihe von Nebengruppenelementen des Periodensystems dar. Für reine Stoffe der Nebengruppen IIb, IIIa bis VIa ist eine größere Veränderung des Reinheitsgrades ersichtlich.

Die Perspektiven der Entwicklung der Reinststoffchemie werden durch drei Faktoren beschrieben: N = Menge der Stoffe in hochreinem Zustand; n = Mittelwert der zu kontrollierenden Verunreinigungen in diesen Stoffen; C = Mittelniveau der Konzentration von Verunreinigungen. Für die Beurteilung der Entwicklung der Reinststoffchemie wollen wir deren Entwicklungsindex einführen, der nach

$$\text{Index} = Nn/C$$

berechnet wird. Dieser Index ist umso größer, je höher die Menge der in hochreinem Zustand erzeugten Stoffe und der zu kontrollierenden Verunreinigungen ist und je niedriger die Mittelwerte der Verunreinigungskonzentrationen liegen.

Abb. 8 zeigt Indexwerte im Laufe dieses Jahrhunderts nach Literaturdaten. Für intensiv entwickelte wissenschaftliche Disziplinen ist ein lineares Wachstum des Indexes in halblogarithmischen Koordinaten charakteristisch. Das gilt auch für die Reinststoffchemie, die in drei Etappen zu gliedern ist. Die erste umfaßt die Jahre, als die quantitativen Daten über den Reinheitsgrad der Reagenzien nicht erwähnt wurden (Bücher von Korenblit und Merck). Die zweite Etappe (Bücher von Karjakin) umfaßt die Periode, in der die Nachschlagwerke quantitative Daten des Reinheitsgrades bereits enthalten. Die letzte Etappe beginnt in den 60er Jahren und ist gekennzeichnet durch verschiedene technische Zweckbe-

stimmungen von Reinstoffen und einer Erweiterung des Sortiments. Von diesem Zeitpunkt an beginnt die moderne Geschichte der Reinstoffchemie. Die Entwicklung der Reinstoffchemie bestimmt in vielen Fällen das moderne Tempo und Niveau des wissenschaftlich-technischen Fortschrittes.

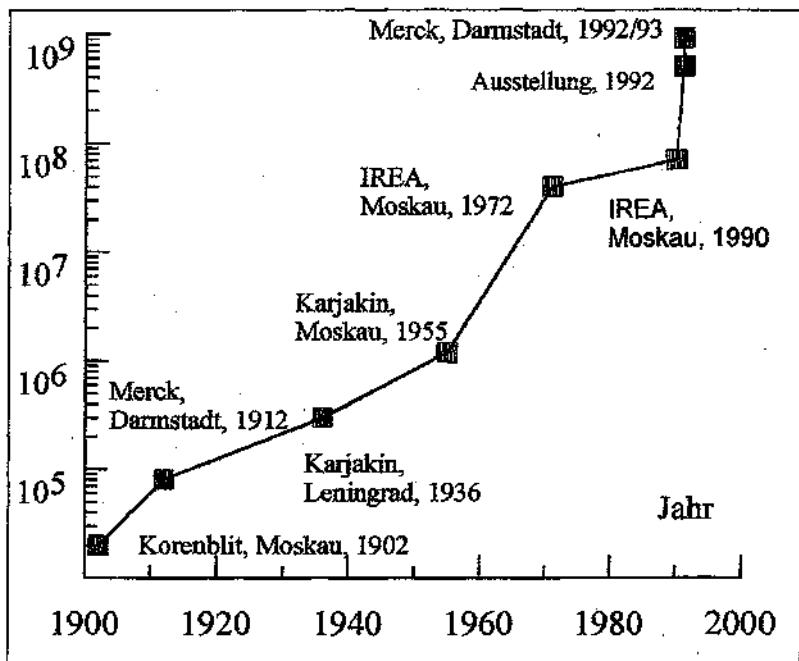


Abb. 8 Index der Entwicklung der Reinstoffchemie
n - Mittelwert an Verunreinigungen
N - Mittelwert an Reinstoffen
C - Mittelkonzentration an Verunreinigungen

Die schnelle Realisierung der industriellen Fertigung eines Reinstoffes ist immer mit großen Schwierigkeiten verbunden. Zunehmend werden für die Durchführung eines technologischen Prozesses Stoffe gefordert, deren Eigenschaften noch wenig erforscht sind. Es muß auch betont werden, daß die Produktion der Reinstoffe investitionsintensiv ist. Die Kosten für die Einheit eines Betriebsraumes zur Produktion von Reinstoffen sind etwa 5 bis 10mal höher als für herkömmliche Betriebsräume.

Die weitere Entwicklung der Reinststoffchemie wird zu einer höheren Spezialisierung führen. Die Darstellung immer reinerer Stoffe wird zunehmend komplizierter und spezifischer. Es ist zu erwarten, daß sich die Anzahl der Betriebe in der Reinststoffindustrie erhöht. Ein Teil dieser Betriebe wird sich in einer Kleinproduktion auf die Herstellung weniger chemischer Klassen von Verbindungen spezialisieren. Diese Betriebe müssen zu einer schnellen Technologieänderung fähig sein. Zur Zeit werden in der Welt Reinststoffe von etwa 200 Firmen produziert.

Erforderlich ist auch eine Spezialisierung und Verbesserung der Apparaturen für die Reinststoffherzeugung mit Konstruktionsmaterialien, die selbst hochrein sind. Ein Teil der Prozesse muß im Hoch- und Ultrahochvakuum durchgeführt werden unter Bedingungen, die eine Kontaktierung des zu reinigenden Stoffes mit der Apparatur möglichst gering halten. Die Lösung dieser komplizierten Probleme wird den Fortschritt auf dem Gebiet der Reinststoffproduktion bestimmen.

Literatur

- Mendeleev, D. I., Grundlagen der Chemie, Gesammelte Werke, Band 13, 14, Akademie der Wissenschaften der UdSSR, Leningrad-Moskau 1949 (in Russisch)
- Korenblit, A. I., Chemische Reagenzien, deren Darstellung, Eigenschaften, Prüfung und Verwendung, 2. Auflage, Moskau 1902 (in Russisch)
- Merck, E., Prüfung der chemischen Reagenzien auf Reinheit, 2. Auflage, Darmstadt 1912
- Karjakin, Ju. V., Reine chemische Reagenzien. Anleitung zur Vorbereitung der anorganischen Präparate unter Laborbedingungen, Abteilung für wissenschaftlich-technische Information, Leningrad 1936 (in Russisch)
- Merck, E., Reagents, Diagnostics, Chemicals, 1992/93
- Devjatych, G. G., Yankov, S. V., 1994: Die ständige Ausstellung der Reinststoffe, Nachrichten der Akademie der Wissenschaften, Chemische Reihe, Heft 8, S. 1512 - 1520 (in Russisch)
- Goldina, O. A., Kuznetsova, Ju. S., Ivanova, T. G., Chemische Reagenzien und Reinststoffe, Katalog, Verlag Chemie, Moskau 1990 (in Russisch)