Polychlorierte Biphenyle : 25 Jahre "klassische" Umweltchemikalien

Walter Giger*

Polychlorierte Biphenyle (abgekürzt PCBs) gehören heute zu den am besten untersuchten organischen Umweltschadstoffen. Ein Vierteljahrhundert nach ihrer Entdeckung als persistente "Umweltchemikalien" sollen einige umweltchemische und ökotoxikologische Aspekte diskutiert werden, die über die PCBs hinaus von allgemeiner Bedeutung sind. Die physikalisch-chemischen und biologischen Eigenschaften der sogenannten Umweltchemikalien prägen sowohl deren Verhalten in der Umwelt als auch die Auswirkungen auf die Umwelt. Die Zusammenhänge zwischen chemischer Struktur und Wirkung sind wesentlich und können zum Teil durch die heute zur Verfügung stehenden umweltwissenschaftlichen Konzepte erfaßt werden.

Abstract : Polychlorinated biphenyls (PCBs) have been discovered 25 years ago as persistent environmental pollutants. In the meantime the results of many field and laboratory studies have shown that these chemicals must be considered as first-priority pollutants. Several aspects of the environmental chemistry and toxicology of the PCBs demand a lot of attention. The great variety of the PCBs individual molecular characteristics causes problems for the analytical chemistry on one side and for toxicological and ecotoxicological assessment on the other side. In addition, contaminations contained in commercial mixtures and products of pyrolytic processes are of major importance. The problem of choosing suitable substitutes is shortly discussed in the light of risk assessment during the use of the chemicals and regarding their environmental acceptability.

Im Jahre 1966 berichtete Sören Jensen erstmals über die polychlorierten Biphenyle als eine neu entdeckte Gruppe von persistenten organischen Umweltchemikalien, deren verbreitetes Vorkommen er in Fischen und in Adlern nachweisen konnte^[1,2]. Aufgrund der im Laufe der seither vergangenen zweieinhalb Jahrzehnte gewonnenen Erkenntnisse müssen

die PCBs (siehe Figur 1) als Umweltchemikalien der allerersten Priorität eingestuft werden. Zahlreiche Feldstudien und Laboratoriumsexperimente führten zu Einsichten in das Umweltverhalten sowie das Zustandekommen human- und ökotoxikologischer Effekte der PCBs^[3-9]. Tatsächlich weist diese Substanzklasse eine ganze Reihe von Eigenschaften auf, welche sie als sozusagen archetypische Umweltchemikalien auszeichnen. Im folgenden werden einige Aspekte erörtert, die mir für das Verständnis der Bedeutung der PCBs wichtig scheinen. Manches davon läßt sich auch für andere Klassen von Umweltchemikalien verallgemeinern.

Zufallsentdeckung durch umweltanalytische Untersuchungen

Die PCBs wurden durch puren Zufall entdeckt, gleichsam als Nebenprodukt von Umweltanalysen, deren eigentliches Ziel die als Insektizide angewendeten chlorierten Kohlenwasserstoffe (DDT und ähnliche) waren. Tauchten die PCBs nicht im gleichen Zielbereich ("analytisches Fenster") auf wie die damals bereits als Umweltchemikalien erkannten DDT-artigen Chlorverbindungen, so wären sie wahrscheinlich noch längere Zeit unentdeckt geblieben. Diese Tatsache zeigt den Vorteil von nicht allzu

»Umweltchemikalien sind Stoffe, die durch menschliches Zutun in die Umwelt gebracht werden und in Mengen oder Konzentrationen auftreten können, die geeignet sind, Lebewesen, insbesondere den Menschen, zu gefährden.
... Der Begriff Lebewesen umfaßt in diesem Zusammenhang den Menschen und seine belebte Welt einschließlich Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen«^[10].

eng ausgerichteten umweltanalytischen Methoden. In guten umweltanalytischen Netzen bleiben oft auch Fische hängen, mit denen man nicht von vornherein gerechnet hat.

Die Entdeckung der PCBs machte schon sehr früh deutlich, wie wichtig die Verfügbarkeit von empfindlichen und selektiven Nachweismethoden für die mittels Chromatographie getrennten Umweltchemikalien ist. Der Elektroneneinfang-Detektor (*electron capture detector*, ECD) mit seiner hohen Empfindlichkeit für polychlorierte Verbindungen spielt eine Hauptrolle in der Untersuchung der als persistente Umweltchemikalien der ersten und zweiten Generation auftretenden polychlorierten Kohlenwasserstoffe (DDT-artige und PCBs). Der Erfinder dieses Detektors war der englische Arzt und Naturforscher James E. Lovelock, der später mit seiner "Gaia-Hypothese" den Anstoß zu einer weit über die Wissenschaft hinausgreifenden Diskussion gab.

Komplexe Zusammensetzung und analytische Schwierigkeiten

Die komplizierte Zusammensetzung der PCB-Gemische stellt hohe Anforderungen an die Einzelstoff-Analytik. Allzulange wick man dieser Schwierig-

polychlorierte Biphenyle
PCBs

Figur 1. Strukturformel der PCBs. Die Eckpunkte der abgekürzten Strukturformel repräsentieren Kohlenstoffatome. Dieses sogenannte aromatische Biphenyl-Gerüst kann ein bis zehn Chloratome als Substituenten für je ein Wasserstoffatom tragen. Die durch solche Substitution gebildeten PCB-Moleküle werden als Kongenere bezeichnet. Insgesamt sind 209 PCB-Kongenere möglich.

* Postadresse : Prof. Dr. W. Giger
Abteilung Chemie
Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung,
Abwasserreinigung und Gewässerschutz
(EAWAG)
CH-8600 Dübendorf (Schweiz)

keit aus und bestimmte mit ungenügenden Trennmethode Gesamt-PCB-Gehalte. Die dabei verwendeten Kalibrierungsmethoden sind ein Alptraum für jeden gut erzogenen Analytiker. Obwohl die notwendigen Verfahren mit genügender Trennleistung (Kapillargaschromatographie) im Prinzip zur Verfügung standen, wurden sie wegen ihrer hohen technischen Anforderungen lange Zeit nicht benutzt. Erst die benutzerfreundlichen, nicht zerbrechlichen Quarzkapillaren haben der hochauflösenden Gaschromatographie zum Durchbruch verholfen (Figur 2).

Die systematische Bezeichnung der einzelnen PCB-Kongeneren durch Ballschmitter und Zell^[11] brachte auch eine Nomenklatur-Ordnung in die komplexen PCB-Gemische, die eine Voraussetzung für kongener-spezifische Studien war und die später von der IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) übernommen wurde. Als PCB-Kongeneren werden PCB-Moleküle bezeichnet, die sich in Anzahl und/oder Position der Chloratome am Biphenyl-Gerüst aus Kohlenstoffatomen (siehe Figur 1) unterscheiden. Obwohl bis heute schon viele Studien mit Hochleistungs-Trennverfahren durchgeführt worden sind,

Walter Giger: Geboren 1943 in Zürich. Studium der Chemie an der ETH Zürich; Promotion 1971. Gastwissenschaftler am Meeresforschungsinstitut in Woods Hole, Massachusetts (1972–1973) und am Geologischen Institut der Stanford University, California (1978–1979). Langjährige Forschungs- und Lehrtätigkeit über organi-

sche Verbindungen in der Umwelt und in der Geosphäre. Entwicklung analytischer Methoden für organische Umwelt- und Geochemikalien; Untersuchungen in der aquatischen, atmosphärischen und terrestrischen Umwelt sowie der Abwasserreinigung und der Trinkwasseraufbereitung; Arbeiten über Kohlenwasserstoffe als Molekülfossilien und deren Verwendung als Diagenese-Indikatoren. 1991 amtierender Leiter der Fachabteilung Chemie an der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG), Lehrbeauftragter an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, an der Universität Zürich und an der Universität Karlsruhe (Ernennung zum Honorarprofessor). Beratung und Gutachten für kantonale Gewässerschutzämter, Kantonschemiker und das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft sowie für das Umweltbundesamt Berlin. Mitarbeit im Leitungsausschuss des Rhine Basin Program, eines Europäischen Umweltschutz-Forschungsprogramms.

Figur 2. Gaschromatogramme eines handelsüblichen "technischen" PCB-Produkts. A: Gaschromatographie mittels einer gepackten Trennsäule; B: hochauflösende Gaschromatographie mittels einer Trennkapillare. – Die beiden Chromatogramme illustrieren deutlich das Nichtgenügen der Gaschromatographie mit gepackten Säulen für die Einzelstoffbestimmung von PCB-Kongeneren: Hinter jedem Einzelsignal (Peak) des Chromatogramms A verbergen sich mehrere Kongenere, wie das Chromatogramm B kenntlich macht.

gelten verlässliche Bestimmungen einzelner PCB-Kongeneren immer noch als äußerst anspruchsvolle umweltanalytische Aufgaben^[12]. Die synthetische Herstellung einzelner PCB-Kongeneren ermöglichte schließlich kongener-spezifische Laboruntersuchungen des Umweltverhaltens sowie der toxikologischen und ökotoxikologischen Auswirkungen der chlorhaltigen Biphenylderivate.

Biopersistentes Verhalten und Anreicherung in der Bio- und Geosphäre

Die sehr geringe biologische Abbaubarkeit und die physikalisch-chemischen Eigenschaften der PCBs lassen diese Substanzen sich in den unpolaren Umweltkompartimenten anreichern, insbesondere in den Fettphasen der Biosphäre sowie in den Feststoffphasen der Hydro- und Atmosphäre (zum Beispiel in Klärschlämmen, Sedimenten oder im Luftstaub). In dieser Hinsicht sind die PCBs weitgehend mit den als Insektiziden verwendeten chlorierten Kohlenwasserstoffen vergleichbar. Die komplexe Zusammensetzung der in die Um-

welt gebrachten PCBs hat zur Folge, daß Verteilungs- und Umwandlungsprozesse in der Natur oft zu Verschiebungen der ursprünglichen Zusammensetzung führen. Deswegen kann aus Umweltanalysen häufig nicht mehr auf das primäre Kongeneren-Gemisch rückgeschlossen werden. Die PCBs zeigen beträchtliche Unterschiede im Anreicherungsverhalten: Höher chlorierte Kongenere, vor allem Biphenyl-Moleküle mit fünf bis sieben Chloratomen, werden wesentlich stärker angereichert.

Globale Verteilung durch Lufttransport

Die schlechte Wasserlöslichkeit und die "mittelhohe" Flüchtigkeit der PCBs bewirken, daß diese Chemikalien via Atmosphäre und somit über weite Distanzen verteilt werden können. Daraus folgt die globale Problematik der Umweltbelastung durch die PCBs. Ganz klar kommt hier die Bedeutung des atmosphärischen Transports für das Umweltverhalten einer Verunreinigungssubstanz zum Ausdruck. In diesem Zusammenhang kann die Atmosphäre mit einem Förderband für Verunreinigungssubstanzen verglichen werden.

In der Atmosphäre ergibt sich eine Verteilung zwischen gasförmigen und partikelgebundenen PCBs, die durch die Anzahl Chloratome beeinflusst wird. Daraus ist zu schließen, daß die PCBs auf verschiedene Art aus der Atmosphäre entfernt werden: entweder durch Gasaustausch mit Wasser oder durch Einfangen der Luftpartikel in den Niederschlägen. Es gibt aber auch Hinweise auf einen Transfer der PCBs von der Hydrosphäre in die Atmosphäre. Mit anderen Worten, die PCBs zeigen in der Umwelt ein sehr vielfältiges Transport- und Transferverhalten.

Verunreinigungen und toxikologische und/oder ökotoxikologische Auswirkungen

Im Jahre 1968 erlitten in Japan bei einem schweren Unfall ungefähr 1850 Personen akute Vergiftungen durch Reisöl, das mit PCBs verunreinigt worden war. Dieser sogenannte Yusho-Unfall (japanisch *Yusho* heißt Ölkrankheit) lenkte die Aufmerksamkeit der Weltöffentlichkeit auf die Giftigkeit dieser als nicht brennbare Substanzen geschätzten Chemikalien. Elf Jahre später ereignete sich auf Taiwan ein ähnlicher Vorfall (chinesisch *Yu-Cheng* heißt Ölkrankheit), von dem etwa 2000 Personen betroffen

waren. In der Folge wurden sehr viele toxikologische Untersuchungen durchgeführt, bei welchen von den für technische Zwecke verwendeten PCB-Gemischen ausgegangen wurde [6, 8, 13]. Die Möglichkeit einer toxikologischen Wirkung von Verunreinigungssubstanzen, die in den handelsüblichen "technischen" Gemischen enthalten sind, muß als relativ hoch eingestuft werden. Die sogenannten technischen PCBs enthalten unterschiedliche Anteile von polychlorierten Dibenzofuranen (PCDFs), die bei der PCB-Synthese als Nebenprodukte entstehen. Einige Vertreter dieser wiederum sehr komplex zusammengesetzten PCDFs sind enorm giftig, vergleichbar mit den polychlorierten Dibenzodioxinen (PCDDs).

Komplexe Zusammensetzung und toxikologische und/oder ökotoxikologische Auswirkungen

Die für Biochemie und Toxikologie enorm wichtigen Struktur-Aktivitätsbeziehungen sind zwar für isolierte Moleküle schon gut dokumentiert, aber bei toxikologischen Studien an Substanzgemischen nur mit Vorsicht zu gebrauchen. Untersuchungen einzelner PCB-Kongener haben gezeigt, daß es sehr große Unterschiede in der toxikologischen Wirkung der verschiedenen PCB-Verbindungen gibt [14]. Man findet starke Hinweise auf eine erhöhte Toxizität derjenigen PCB-Kongener, die eine relativ planare Struktur besitzen und die in ihrer geometrischen Form den vierfach chlorierten Dibenzodioxinen 2,3,7,8-TCDD und Dibenzofuranen 2,3,7,8-TCDF ähnlich sind. Die Giftigkeit dieser sogenannten koplanaren PCBs ist tatsächlich in der gleichen Größenordnung wie die der zuvor genannten polychlorierten Verbindungen, die als hochgiftige Umweltchemikalien gelten. Daraus läßt sich ableiten, daß auch im Falle der PCBs eine strukturspezifische Beurteilung der toxikologischen und wohl auch der ökotoxikologischen Auswirkungen erforderlich ist.

Schwierigkeiten der ökotoxikologischen Beurteilung: PCBs als Ursache für den Rückgang der Fischotter in Europa, auch in der Schweiz

Mehrere Wissenschaftler befürworten, die Hypothese, daß der Rückgang der Fischotterpopulationen in Europa auf die steigenden PCB-Gehalte in Fischen zurückzuführen sei (Figur 3). Begründet

wird diese These durch die Ergebnisse von Laboratoriumsversuchen mit amerikanischen Nerzen, die dem Fischotter verwandt sind. Bei diesen Untersuchungen waren Reproduktionsausfälle schon dann beobachtet worden, wenn die PCB-Konzentrationen in den als Nahrung dienenden Fischen kleiner sind, als sie in Gebieten mit Fischotterrückgang gemessen werden. Ein direkter Kausalzusammenhang ist daraus aber kaum ableitbar – schon gar nicht, wenn andere Begleitumstände des Fischotterrückgangs berücksichtigt werden. Dazu gehören jahrelange, zum Teil staatlich geförderte Ausrottungskampagnen und Flußverbauungen, die eine starke Störung des Lebensraumes der Fischotter bewirken. In der Schweiz wurde 1990 beschlossen, auf eine Wiedereinbürgerung der Fischotter zu verzichten, weil unter anderem wegen der hohen PCB-Belastung der Fische die Chancen für eine erfolgreiche Fortpflanzung dieser fischfressenden Tiere sehr unwahrscheinlich sei.

Folgeprodukte nach der Verbrennung

In Laboratoriumsexperimenten wurde 1978 gezeigt, daß bei hohen Temperaturen aus den PCBs die giftigeren PCDFs entstehen können. Im gleichen Jahre ereignete sich in Nortalje, Schweden, ein Kondensatorbrand und 1981 in Binghampton im Staate New York ein Transformatorbrand, bei denen PCDFs nachgewiesen werden konnten. In den folgenden zehn Jahren wurde über mehr als 30 solche Brände berichtet (Figur 4), bei denen eine hohe Gefährdung von Menschen angenommen werden muß und wohl signifikante Mengen der PCDFs in die Umwelt gelangten [6].

Gleichermaßen unerwünscht ist aber auch die diffus erfolgende Verbrennung von PCBs, die im Kehrriech enthalten sind. Typischerweise ist nicht nur der Gebrauch der PCBs an und für sich umweltgefährdend, sondern auch die Entsorgung dieses Produkts führt zu ähnlich schwierigen Problemen.

Entsorgungsprobleme

Schon in vielen Ländern wird verlangt, daß PCB-haltige Einrichtungen durch PCB-freie ersetzt werden. Dadurch steigt die Nachfrage nach sicheren Entsorgungswegen. PCB-Abfälle können eigentlich nur durch Hochtemperatur-Verbrennung oberhalb 1 200 °C unschädlich gemacht werden. Vielerorts, auch in der Schweiz, fehlen aber entweder dafür geeignete Verbrennungsanlagen (Sondermüllverbrennungsöfen) oder stehen aus politischen Gründen nicht zur Verfügung (Zementöfen). Oft wird in dieser Situation die Lösung des Problems im Export der Abfälle gesucht, was natürlich ein sehr umstrittener Ausweg ist. Noch problematischer sind jedoch schwach mit PCBs belastete Materialien (zum Beispiel kontaminierte Böden, Klärschlamm), bei denen eine Hochtemperatur-Verbrennung kaum in Frage kommt. Aus solchen diffusen Quellen können die PCBs immer wieder in die Umwelt gelangen.

Problematik der Ersatzstoffe

Die Frage nach geeigneten Ersatzstoffen stellt sich bei den PCBs fürwahr als Austreiben des Teufels mit dem Beelzebub, also Beseitigung eines Übels

Figur 3. Der Fischotter (*Lutra lutra*) lebt vom Fisch. Die Verseuchung der Fische durch PCBs ist wahrscheinlich eine Ursache seines Aussterbens. Bildquelle: Dr. K. Robin, Zernez.

Figur 4. Chronik der PCBs als Umweltchemikalien.

durch ein anderes, wie dies oft für Umweltchemikalien zutrifft. Als PCB-Ersatzstoffe in Frage kommende Chemikalien müssen unbedingt äußerst sorgfältig auf ihre Umweltverträglichkeit überprüft werden, weil die PCB-charakteristischen Eigenschaften (hohe chemische Stabilität, Nichtbrennbarkeit) im Prinzip auch für ihr schlechtes Umweltverhalten die Ursache sind. Zudem bringen manche der vorgeschlagenen Ersatzstoffe, vor allem solche für die Verwendung als Transformatorenöle und als dielektrische Kondensatorflüssigkeiten, wieder erhöhte Brandgefahren mit sich. Besonders kritisch sind die Fälle, in denen PCBs und besser brennbare Ersatzstoffe nebeneinander verwendet werden.

Die immer noch im Gebrauch befindlichen PCB-Mengen sind nach wie vor groß. Allein in der Stadt Zürich sind zur Zeit noch ungefähr 40 Tonnen PCBs in Kondensatoren und in Transformatoren enthalten, wobei in ersteren kleine Teilmengen breit verteilt sind^[15]. Mehr Sorgen macht jedoch die Situation im Untertagebergbau, wo für die PCB-Hydrauliköle nach wie vor keine anderen Stoffe eingesetzt werden können, die den Brandschutz-Forderungen genügen.

Eine wichtige Lehre, die aus den 25 Jahren zunehmender Erfahrung im Umgang mit polychlorierten Biphenylen gezogen werden sollte, ist die Forderung nach einer Umweltverträglichkeitsprüfung für neue Chemikalien, die in großen Mengen produziert und verwendet werden sollen. Sowohl das Umweltverhalten als auch toxikologische und ökotoxikologische Aspekte müssen hierfür einbe-

zogen werden. Ferner müssen dafür auch umweltanalytische Methoden bereits zur Verfügung stehen, um mögliche Restkonzentrationen der Stoffe und ihrer Umwandlungsprodukte in Feldstudien bestimmen zu können. Diese Anliegen sind die Grundlagen für die Testverfahren für Chemikalien, die im Rahmen der OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) ausgearbeitet wurden. Es muß unbedingt angestrebt werden, daß durch vorbeugende Maßnahmen zukünftige Probleme mit Umweltchemikalien möglichst verhindert werden können.

Aerobe und anaerobe Biotransformation

In einem Übersichtsartikel werden Hans-Peter Kohler, Doris Kohler-Staub und Alfredo Alder in der nächsten Ausgabe von GAIA über mikrobielle Transformationen von polychlorierten Biphenylen berichten. Obwohl die PCBs eigentlich durch ihre sehr schlechte biologische Abbaubarkeit gekennzeichnet sind, hat intensive Forschungsarbeit im Laufe der letzten Jahre sehr interessante Befunde erbracht. Vor allem haben auch die Untersuchungen der anaeroben Biotransformationen gezeigt, daß sich diese chlorierten Kohlenwasserstoffe sehr speziell verhalten, wie dies auch für andere Vertreter dieser Substanzklasse (zum Beispiel für Tetrachlorethylen, "Per") schon nachgewiesen worden ist. Hervorzuheben ist auch die Tatsache, daß an und für sich Umwandlungs- und Abbaumöglichkeiten der PCBs doku-

mentiert sind. Dennoch zeigen die Ergebnisse der Umweltanalysen eindeutig eine enorm schlechte Abbaubarkeit der PCBs. Mögliche Gründe für diese Diskrepanz werden im Beitrag von Kohler et al. diskutiert.

Literaturverzeichnis

- [1] S. Jensen: "A New Chemical Hazard", *New Scientist* 32 (1966) 612.
- [2] S. Jensen: "The PCB Story", *Ambio* 1 (1972) 123.
- [3] Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG): *Polychlorierte Biphenyle – Bestandsaufnahme über Analytik, Vorkommen, Kinetik und Toxikologie*, Mitteilungen der Senatskommission zur Prüfung von Rückständen in Lebensmitteln, VCH, Weinheim (1988).
- [4] S. W. Hooper, C. A. Pettygrew, G. S. Saylor: "Ecological Fate, Effects and Prospects for the Elimination of Environmental Polychlorinated Biphenyls (PCBs)", *Environmental Toxicology and Chemistry* 9 (1990) 655–667.
- [5] O. Hutzinger, S. Safe, V. Zitko: *The Chemistry of PCB's*, CRC Press, Boca Raton FL (1974).
- [6] R. D. Kimbrough, A. Jensen (Ed.): *Halogenated Biphenyls, Terphenyls, Naphthalenes, Dibenzodioxins and Related Products*, Vol. 4, 2nd Edition, Topics in Environmental Health, Elsevier, Amsterdam (1989).
- [7] H. Lorenz, G. Neumeier (Ed.): *Polychlorierte Biphenyle (PCB) – Ein gemeinsamer Bericht des Bundesgesundheitsamtes und des Umweltbundesamtes*, Vol. 4/83, BGA Schriften, MMV Medizin Verlag München, München (1983).
- [8] S. Safe, O. Hutzinger (Ed.): *Polychlorinated Biphenyls (PCBs): Mammalian and Environmental Toxicology*, Environmental Toxin Series 1, Springer-Verlag, Berlin (1987).
- [9] J. S. Waid (Ed.): *PCBs and the Environment*, Vol. I–III, CRC Press, Boca Raton FL (1986).
- [10] Umweltbundesamt: *Umweltchemikalien – Prüfung und Bewertung von Stoffen auf ihre Umweltverträglichkeit im Sinne des neuen Chemikaliengesetzes*, Berlin (1980).
- [11] K. Ballschmitter, M. Zeller: "Analysis of Polychlorinated Biphenyls (PCB) by Glass Capillary Gas Chromatography – Composition of Technical Arochlor- and Clophen-PCB Mixtures", *Fresenius Zeitschrift für Analytische Chemie* 302 (1980) 20.
- [12] M. D. Erickson: *Analytical Chemistry of PCBs*, Butterworth, Boston MA (1986).
- [13] R. D. Kimbrough: "Human Health Effects of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) and Polybrominated Biphenyls (PBBs)", *Annual Review of Pharmacology and Toxicology* 27 (1987) 87.
- [14] V. A. McFarland, J. U. Clarke: "Environmental Occurrence, Abundance, and Potential Toxicity of Polychlorinated Biphenyl Congeners: Considerations for a Congener-Specific Analysis", *Environmental Health Perspectives* 88 (1989) 225.
- [15] Kantonales Laboratorium Zürich: *Jahresbericht* (1990), p. 61.

(Eingeladener Beitrag;
eingegangen am 5. September 1991)