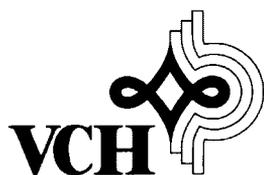


Joachim Roll

Entsorgungs- technik

Chemie und Verfahren



Weinheim · New York
Basel · Cambridge · Tokyo

This Page Intentionally Left Blank

Joachim Roll

Entsorgungstechnik



© VCH Verlagsgesellschaft mbH, D-69451 Weinheim (Bundesrepublik Deutschland), 1996

Vertrieb:

VCH, Postfach 101161, D-69451 Weinheim (Bundesrepublik Deutschland)

Schweiz: VCH, Postfach, CH-4020 Basel (Schweiz)

Großbritannien und Irland: VCH (UK) Ltd., 8 Wellington Court,
Cambridge CB1 1HZ (England)

USA und Canada: VCH, 220 East 23rd Street, New York, NY 10010-4606 (USA)

Japan: VCH, Eikow Building, 10-9 Hongo 1-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

ISBN 3-527-28711-6

Joachim Roll

Entsorgungs- technik

Chemie und Verfahren



Weinheim · New York
Basel · Cambridge · Tokyo

Prof. Dr. Joachim Roll
Fachhochschule Gelsenkirchen
Neidenburger Str. 10
D-45877 Gelsenkirchen

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autor und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Lektorat: Dr. Barbara Böck
Herstellerische Betreuung: Claudia Grössl

Das Titelbild zeigt einen Teil der neuen FCKW-Spaltanlage im Werk Hoechst zur Zerlegung von Fluorkohlenwasserstoffen. Die gewonnenen Chemikalien können in die Stoffkreisläufe der Produktion zurückgeführt werden.

© Hoechst AG, Frankfurt

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Roll, Joachim:

Entsorgungstechnik : Chemie und Verfahren / Joachim Roll. –
Weinheim ; New York ; Basel ; Cambridge ; Tokyo : VCH, 1996
ISBN 3-527-28711-6

© VCH Verlagsgesellschaft mbH, D-69451 Weinheim (Bundesrepublik Deutschland), 1996

Gedruckt auf 100% Altpapier, unter Verwendung von Druckfarben aus nachwachsenden Rohstoffen.

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, daß diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publishers. Registered names, trademarks, etc. used in this book, even when not specifically marked as such, are not to be considered unprotected by law.

Satz: Kühn & Weyh Software GmbH, D-79015 Freiburg

Druck: betz-druck GmbH, D-64291 Darmstadt

Bindung: Großbuchbinderei J. Schäffer, D-67269 Grünstadt

Vorwort

Die Weiterentwicklung des allgemeinen Abfallrechts, hat dazu geführt, daß parallel dazu die Entsorgungstechnik als Teilbereich des technischen Umweltschutzes eine rasante Entwicklung genommen hat. Aspekte der Entsorgungstechnik wie Abfallwirtschaft, Recycling oder Deponietechnik sind feste Bestandteile unterschiedlichster Hochschulstudiengänge.

Mit der Einrichtung eines Studiengangs Entsorgungstechnik wurde an der Fachhochschule Gelsenkirchen erstmals der Versuch unternommen, die auf verschiedene Disziplinen verteilten Aspekte zusammenzufassen. Die drei Studienschwerpunkte Abfallbehandlungstechnik, Recyclingtechnik und Entsorgungswirtschaft lassen eine unterschiedliche Orientierung zu. Neben der Anwendung von abfallwirtschaftlichen und logistischen Maßnahmen zur Abfallvermeidung steht eine moderne Entsorgungstechnik in erster Linie für eine unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten sinnvolle Verwertung von Reststoffen und Abfällen. Die diesen Ansprüchen genügenden Verfahren beinhalten die Anwendung von physikalischen, chemischen und biologischen Grundoperationen. Im Sinne einer Kreislaufwirtschaft sind darunter auch Verfahren zu verstehen, die die Gewinnung von Sekundärrohstoffen und die Sanierung von Altlasten zum Ziel haben.

Einfache und komplexe chemische Reaktionen spielen bei vielen Verfahren in der Entsorgungstechnik eine Schlüsselrolle. Die Anwendung einer Naturwissenschaft wie der Chemie in der Entsorgungstechnik ist nicht ohne die Einbeziehung von ingenieurwissenschaftlichen Aspekten insbesondere aus der Verfahrenstechnik möglich. Neben dem Aufzeigen von verfahrenstechnischen Problemlösungen ist für eine Beurteilung und einen Verfahrensvergleich die Kenntnis der chemischen Grundoperationen, die speziell in der Entsorgungstechnik Anwendung finden, notwendig. Diese Grundoperationen werden anhand unterschiedlicher Beispiele aus der Praxis erläutert. Schwerpunkte sind die Behandlung von Abfällen, die notwendige Abgasreinigungstechnik und die Sanierung von Altlasten. Neben chemischen und verfahrenstechnischen Gesichtspunkten werden auch ökologische und ökonomische Aspekte der Verfahren diskutiert.

Das vorliegende Buch befaßt sich mit diesem Teilaspekt der Entsorgungstechnik. Mit den Kapiteln Abfallbehandlung, Abgasreinigung und Altlastensanierung liegen dem Buch Inhalte der Lehrveranstaltungen Chemie in der Entsorgung und Abgasreinigungstechnik zugrunde. Das Buch wendet sich an einen interdisziplinären Leserkreis von Chemikern, Verfahrenstechnikern, Maschinenbauern und anderen Naturwissenschaftlern und Ingenieuren.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herr Dipl.-Ing. Enrico Obst, der mich bei der Erstellung des Manuskriptes unterstützt hat. Dieses gilt insbesondere für die Bearbeitung der Abbildungen und die Erstellung des Kapitels Altlastensanierung, zu dem er wesentlich beitrug. Des weiteren möchte ich Frau Dr. Barbara Böck von der VCH Verlagsgesellschaft für die Durchsicht des Manuskriptes und zahlreiche Anregungen danken.

März 1996

Joachim Roll

Inhalt

1	Abfallbehandlung	1
1.1	Definition und Klassifizierung von Abfall	1
1.2	Zielsetzung der Abfallbehandlung	5
1.3	Chemisch/physikalische Behandlungsmethoden	6
1.3.1	Zerstörung von Organochlorverbindungen	7
1.3.2	Zerstörung von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW)	18
1.3.3	Kunststoffabfälle	23
1.3.4	Zerstörung von Asbest	35
1.4	Thermische Abfallbehandlung	39
1.4.1	Verbrennung	39
1.4.2	Inertisierung von Verbrennungsrückständen	47
1.4.3	Pyrolyse von Abfällen	58
1.4.4	Kombinierte Verfahren zur Siedlungsabfallbehandlung	70
2	Abgasreinigung	73
2.1	Abgase aus der thermischen Abfallbehandlung	75
2.1.1	Entfernung von Schwefeldioxid und Halogenwasserstoffen	76
2.1.2	Entfernung von Stickoxiden	85
2.1.3	Entfernung von Dibenzodioxinen und -furanen	89
2.2	Lösungsmittelhaltige Abluftströme	91
2.2.1	Adsorption	93
2.2.2	Kondensation	96
2.2.3	Absorption	99
2.2.4	Membran-Gastrennung	103
2.2.5	Nachverbrennung	105
2.2.6	Biologische Abluftreinigung	110

VIII Inhalt

3	Altlasten und Bodensanierung	117
3.1	Altlasten	117
3.1.1	Definition und Klassifizierung	117
3.1.2	Erkundung und Bewertung von Altlasten	119
3.1.3	Sanierungsziele und Verfahrensauswahl	122
3.2	Grundlagen der Bodenchemie	128
3.3	Bodensanierungsverfahren	133
3.3.1	Bodenwaschverfahren	133
3.3.2	Bodenluftabsaugung	141
3.3.3	Biologische Verfahren	146
3.3.4	Thermische Behandlung	152
	Literaturverzeichnis	159
	Register	167

1 Abfallbehandlung

1.1 Definition und Klassifizierung von Abfall

Der Begriff *Abfall* wird sehr unterschiedlich definiert. Er unterliegt zur Zeit in der nationalen und internationalen Gesetzgebung einem Wandel. Auch innerhalb der Europäischen Union bestehen noch Differenzen im Hinblick auf eine einheitliche Definition.

Im Abfallgesetz in der Fassung vom 27.8.1986 wird in §1 der Begriff Abfall grob vereinfacht als eine Sache definiert, derer sich der Besitzer entledigen will und deren geordnete Entsorgung zum Schutz der Menschen und der Umwelt geboten ist.

Verwertbare Stoffe, sogenannte Reststoffe, sind demnach kein Abfall. Die Absicht einen solchen Reststoff wirtschaftlich zu nutzen steht dem Abfallbegriff entgegen. Dennoch hat in solchen Fällen die zuständige Aufsichtsbehörde ein verständliches Interesse, über das Verbleiben eines solchen Stoffes informiert zu sein, er ist dem Abfallrecht (Reststoffüberwachungsverordnung) zugeordnet. Eindeutig ausgenommen vom Abfallrecht sind Abluft und Abwasser.

Im Gegensatz zum Abfallgesetz von 1986 zählen nach EU-Recht auch wiederverwertbare Stoffe zu den Abfällen. Die EG-Richtlinie 75/442, zuletzt geändert durch die Richtlinie 91/156 vom 18.3.91, zählt sechzehn verschiedene Produktions- oder Verbrauchsrückstände, Produkte, Rückstände, Stoffe und chemische Elemente auf. Der geforderten Zuordnung von Rückständen zum Abfallrecht trägt das neue Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG), verabschiedet am 5.10.94 als 5. Novelle des Abfallgesetzes, Rechnung. Das Gesetz unterscheidet in Reststoffe, Altstoffe und Abfälle.

Reststoffe sind demnach Stoffe, die bei der Energieumwandlung oder Herstellung, Bearbeitung, Verarbeitung oder einer anderen Behandlung von Stoffen anfallen, ohne dass der Zweck des Anlagenbetriebs hierauf gerichtet ist,

zum Beispiel Rückstände aus der Abgasreinigung eines Kraftwerkes. Altstoffe sind Stoffe, deren ihrem ursprünglichen Zweck entsprechende Verwendung entfällt.

Abfälle werden in zwei Kategorien eingeteilt:

- *Abfälle* zur Verwertung
- *Abfälle* zur Beseitigung.

Allgemein sind Abfälle im Sinne dieses Gesetzes alle beweglichen Sachen, deren sich ein Besitzer entledigen will oder entledigen muß.

Die Abfallgruppen sind in Anhang I KrW-/AbfG aufgelistet. Diese Abfallgruppen entsprechen denjenigen nach EU-Recht. In der Kurzfassung sind dieses:

- Q 1 Nachstehend nicht näher beschriebene Produktions- oder Verbrauchsrückstände
- Q 2 Nicht den Normen entsprechende Produkte
- Q 3 Produkte, bei denen das Verfalldatum überschritten ist
- Q 4 Unabsichtlich betroffene Produkte oder kontaminierte Stoffe, Anlagenteile
- Q 5 Absichtlich kontaminierte oder verschmutzte Stoffe (Verpackungen usw.)
- Q 6 Nichtverwendbare Elemente (Altbatterien und -katalysatoren usw.)
- Q 7 Unverwendbar gewordene Stoffe (Lösungsmittel, Härtesalze usw.)
- Q 8 Rückstände aus industriellen Verfahren (z. B. Schlacken)
- Q 9 Rückstände aus Reinigungsverfahren (Filterrückstände, Waschschlämme usw.)
- Q 10 Bei maschineller Formgebung anfallende Rückstände (Metallspäne usw.)
- Q 11 Rückstände aus der Rohstoffförderung und- aufbereitung
- Q 12 Kontaminierte Stoffe (z. B. PCB verschmutzte Öle)
- Q 13 Stoffe oder Produkte aller Art, deren Verwendung gesetzlich verboten ist
- Q 14 Produkte, die vom Besitzer nicht oder nicht mehr verwendet werden (Landwirtschaft, Büros etc.)
- Q 15 Kontaminierte Stoffe oder Produkte, die bei der Bodensanierung anfallen
- Q 16 Stoffe oder Produkte aller Art, die nicht einer der oben erwähnten Gruppen angehören

Das neue Abfallrecht tritt 1996 in Kraft.

Sowohl die gültige Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen und biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen (TA-Abfall) in der Fassung vom 1.4.1991 als auch die Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen vom 28.5.1993 (TA-Siedlungsabfall) verwenden weiterhin den Begriff Abfall im Sinne des alten, bis 1996 gültigen, Abfallgesetzes.

Für die weiteren Betrachtungen soll der Unterschied in der Definition von Abfall und Reststoff keine Rolle spielen. Wir sprechen im Folgenden daher auch von Abfällen, wenn es sich um im Prinzip wiederverwertbare Reststoffe handelt.

Um sich leichter einen Überblick über die Vielfalt der Behandlungsverfahren verschaffen zu können, ist es sinnvoll eine Unterteilung nach Abfallarten vorzunehmen. Hier bietet sich die Orientierung am Abfallartenkatalog der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) an. Dieser Katalog ist weitgehend identisch mit dem Katalog der besonders überwachungsbedürftigen Abfälle der TA-Abfall, Anhang C. Der Katalog ist nach einem gemischten System gegliedert.

Es bezieht sich auf

- Eigenschaften
- Zusammensetzung
- Aggregatzustand
- Herkunft

der Abfallarten.

Jeder Abfallart wird eine fünfstellige Schlüsselnummer zugeordnet.

Nach übergeordneten Sortierbegriffen werden die Abfälle stufenweise in drei aufeinanderfolgende Kategorien eingeordnet:

- Obergruppe (einstellige Nummer)
- Gruppe (zweistellige Nummer)
- Untergruppe (dreistellige Nummer)

Verwendet werden zur Zeit nur die Obergruppen 1, 3, 5 und 9. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sollen hier nur die Obergruppen und Gruppen des Katalogs für besonders überwachungsbedürftige Abfälle genannt werden:

1 *Abfälle pflanzlichen und tierischen Ursprungs sowie Veredelungsprodukte*

- 11 Nahrungs- und Genußmittelabfälle
- 12 Abfälle aus der Produktion pflanzlicher und tierischer Erzeugnisse
- 13 Abfälle aus Tierhaltung und Schlachtung
- 14 Häute- und Lederabfälle
- 17 Holzabfälle
- 18 Cellulose-, Papier- und Pappeabfälle

3 *Abfälle mineralischen Ursprungs sowie von Veredelungsprodukten*

- 31 Abfälle mineralischen Ursprungs (ohne Metallabfälle)
- 35 Metallhaltige Abfälle
- 39 Andere Abfälle mineralischen Ursprungs sowie von Veredelungsprodukten

5 *Abfälle aus Umwandlungs- und Syntheseprozessen (einschl. Textilabfälle)*

- 51 Oxide, Hydroxide, Salze
- 52 Säuren, Laugen, Konzentrate
- 53 Abfälle von Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmitteln sowie von pharmazeutischen Erzeugnissen
- 54 Abfälle von Mineralöl und Kohleveredelungsprodukten
- 55 Organische Lösungsmittel, Farben, Lacke, Klebstoffe, Kitte und Harze
- 57 Kunststoff- und Gummiabfälle
- 58 Textilabfälle
- 59 Andere Abfälle chemischer Umwandlungs- und Syntheseprodukte

9 *Siedlungsabfälle (einschl. ähnlicher Gewerbeabfälle)*

- 94 Abfälle aus Wasseraufbereitung, Abwasserreinigung und Gewässerunterhaltung
- 95 Flüssige Abfälle aus Behandlungs- und Beseitigungsanlagen
- 97 Krankenhausspezifische Abfälle

Bei den Siedlungsabfällen, die nicht alle unter die besonders überwachungsbedürftigen Abfälle fallen, nennt die TA-Siedlungsabfall zusätzlich folgende Zuordnungsbegriffe:

- Wertstoffe
- Bioabfälle
- Sperrmüll
- schadstoffbelastete Produkte
- Altmedikamente
- hausmüllähnliche Gewerbeabfälle
- Garten- und Parkabfälle
- Marktabfälle
- Straßenkehrschutt
- Bauabfälle
- Klärschlämme
- Fäkalien und Fäkalschlämme

Die Stoffe, die beispielhaft bei der Erläuterung der unterschiedlichen Abfallbehandlungsverfahren genannt werden, sind zum größten Teil Sonderabfälle. Das heißt, daß sie dem Katalog für besonders überwachungsbedürftige Abfälle zugeordnet werden können. Bei der Nennung von Beispielen wird daher neben den Substanznamen im folgenden auch die entsprechende Schlüsselnummer des Abfalls angegeben.

1.2 Zielsetzung der Abfallbehandlung

Stoffe, die am Ende von Produktion als unerwünschte Nebenprodukte anfallen, die während ihrer Verwendung mit anderen Stoffen kontaminiert wurden oder die am Ende von Verwendungsketten stehen, können oder müssen mit unterschiedlicher Zielsetzung behandelt werden:

- um Gefährdungen für Mensch und Umwelt abzuwenden = Entfernen, Zerstören oder Immobilisierung von Schadstoffen
- um sie deponieren zu können = Volumenreduzierung, Verfestigung, Immobilisierung von Schadstoffen
- um sie als Sekundärrohstoff einsetzen zu können = Entfernen von Schadstoffen, Reinigung, Aufbereitung

Das Ziel der Abfallbehandlung bestimmt die Vorgehensweise und den Aufwand.

Um die Gefährdung, die von einem hochtoxischen Sonderabfall ausgehen kann, zu beseitigen, sind unter Umständen sehr aufwendige und kostspielige Verfahren notwendig.

Behandlungsschritte, die eine Deponierung oder eine Verwendung des Abfalls als Sekundärrohstoff zum Ziel haben, sind immer auch auf ihre Wirtschaftlichkeit im Vergleich mit anderen Entsorgungswegen zu prüfen. Noch umfassender wird die Betrachtung bei Einbeziehung von Investitionen, die zu einer Vermeidung des Abfalls notwendig sind oder bei Aufstellung einer Energiebilanz, die Erzeugung und Verwertung des Stoffes umfaßt.

TA-Abfall und TA-Siedlungsabfall nennen bindende Zuordnungskriterien für die Verwertung eines Abfalls. Demnach sind Abfälle einer Verwertung zuzuführen, wenn

- dies technisch möglich ist
- die hierbei entstehenden Mehrkosten im Vergleich zu anderen Verfahren der Entsorgung nicht unzumutbar sind
- für die gewonnenen Produkte ein Markt vorhanden ist oder geschaffen werden kann
- sich das Verwertungsverfahren insgesamt vorteilhafter auf die Umwelt auswirkt als andere Entsorgungsverfahren

Technisch möglich ist die Verwertung, wenn ein praktisch geeignetes Verfahren zur Verfügung steht. Dabei sind grundsätzlich alle in Frage kommenden Verwertungsmöglichkeiten auszuschöpfen. Folgende Fragen sollten im Rahmen einer Verfahrensauswahl zur Abfallbehandlung beantwortet werden:

- Welche Produkte entstehen bei der Abfallbehandlung?
- Sind es toxische Produkte oder verwertbare Produkte?
- Sind die stofflich verwertbaren Produkte auch vermarktbar?
- Werden zusätzliche Chemikalien benötigt?
- Wie groß ist der Energiebedarf?
- Wie groß ist der apparative Aufwand?
- Welche weiteren Entsorgungsmaßnahmen wie z.B. Abluft- oder Abwasserreinigung macht der Prozeß erforderlich?

1.3 Chemisch/physikalische Behandlungsmethoden

Die TA-Abfall regelt die Behandlung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen, den Sonderabfällen. Genannt werden als chemisch/physikalische Verfahren unter anderem:

- Destillation
- chemische Emulsionsspaltung
- Adsorption
- Extraktion
- thermische Spaltung
- Neutralisation
- Fällung
- Oxidation
- Reduktion
- Entwässerung

Ziel der dort beschriebenen chemisch/physikalischen Behandlung ist das Erreichen einer Deponiefähigkeit. Eine modernere Abfallwirtschaft muß jedoch dort, wo es wirtschaftlich und ökologisch Sinn macht, auch Möglichkeiten zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen schaffen. Neben einer ablagerungsorientierten Behandlung, muß es auch eine verwertungsorientierte Behandlung geben.

1.3.1 Zerstörung von Organochlorverbindungen

1.3.1.1 Definition und Beispielverbindungen

Nach chemischer Klassifizierung handelt es sich bei Organochlorverbindungen im wesentlichen um aliphatische und aromatische halogenierte Kohlenwasserstoffe und deren Derivate.

Wir wollen unser besonderes Augenmerk zunächst auf die Chlorkohlenwasserstoffe richten. Eine besondere Gefährdung geht hier von den hochchlorierten Verbindungen, das heißt den Substanzen mit hohem Chlorgehalt, aus.

Einzelne Vertreter dieser Stoffgruppe weisen eine deutliche chronische Humantoxizität auf. Darüber hinaus sind sie biologisch kaum abbaubar und reichern sich daher in der Umwelt an. Es besteht ein beachtliches Potential zur Bildung von polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen bei thermischen Prozessen.

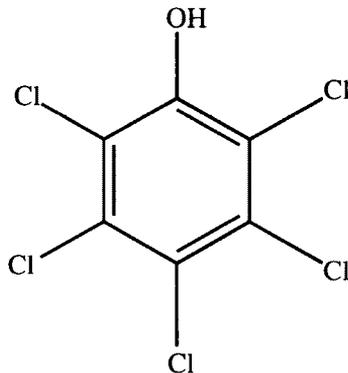
Flüssige Chlorkohlenwasserstoffe zeigen im Vergleich zu anderen Lösungsmitteln ein deutlich aggressiveres Verhalten gegenüber Abdichtungsmaterialien wie Stahl und Beton. Beispiele für chlorhaltige Abfälle werden im LAGA-Katalog unter folgenden Bezeichnungen genannt:

Abfallschlüssel: 531.. Abfälle von Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmitteln (siehe auch: Pflanzenschutzgesetz PflSchG vom 15.9.86)

Beispiel:

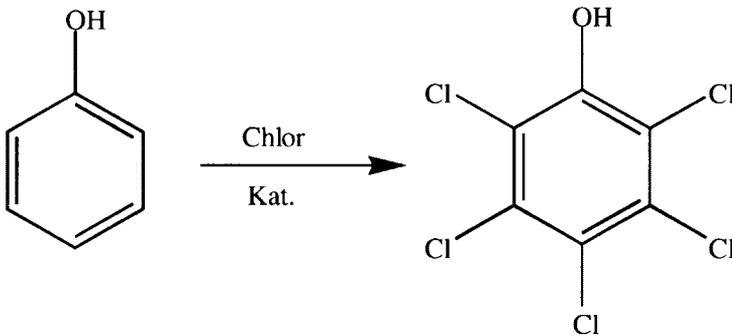
Pentachlorphenol (PCP)
Summenformel: C_6HCl_5O

Strukturformel:



Der farblose, kristalline Feststoff (Schmp.: 174 °C) wurde vor allem als Fungizid zur Pilzbekämpfung in Holzschutzmitteln eingesetzt. Das Herstellen und die Verwendung von PCP ist seit dem 12.12.1989 in Deutschland untersagt. Die Weltproduktion lag 1984 noch bei 40 000 t [1]. Bei seiner Herstellung kam es schon 1976 im norditalienischen Seveso durch einen Störfall zu einer furchtbaren Umweltkatastrophe. Die Analyse dieses Störfalls macht deutlich, wie gefährlich nicht nur die Produktion dieser speziellen Verbindung ist, sondern welche Risiken eine thermische Behandlung aromatischer Chlorverbindungen birgt.

Die Herstellung von PCP erfolgt durch Hydroxylierung von Hexachlorbenzol oder durch katalytische Chlorierung von Phenol:



Eine Zwischenstufe der Chlorierung ist 2,4,5-Trichlorphenol. Bei Reaktionstemperaturen über 160 °C entsteht durch intermolekulare HCl-Abspaltung 2,3,7,8,-Tetrachlor-dibenzo-p-dioxin (TCDD):

