

11.8.1998

DAS BRANDVERHALTEN VON ELASTOMERSCHÄUMEN

-DIE ENTSTEHUNG VON DIOXINEN UND FURANEN-

Dr. H.P.Wöss/Dr. Volland

1. VORBEMERKUNG

Gesundheitsschäden oder Todesfälle bei Bränden müssen in viel geringerem Maße dem eigentlichen "Feuer" zugeschrieben werden als man gemeinhin annimmt. Die Hauptgefahr sind gesundheitsschädlicher Rauch und Gase, in der Hauptsache Kohlenmonoxid, die bei Bränden entstehen. Die in Deutschland üblichen Brandverhaltensprüfungen für Baustoffe, die diese in A1, A2, B1 oder B2 einordnen, tragen diesem Umstand unzureichend Rechnung.

Im nachfolgenden Artikel soll die mögliche Bildung gesundheitsschädlicher Gase bei der Brandbelastung von Elastomerschäumen diskutiert werden. Dabei wird zum besseren Verständnis die heute in der Literatur zum Thema der Bildung von polyhalogenierten Dibenzodioxinen und Dibenzofuranen allgemein übliche Sprachvereinfachung auf "Dioxine" und/oder "Furane" beibehalten.

Die chemische Grundstruktur dieser Stoffklasse wird mit Abbildung 1 gezeigt.

2. EINLEITUNG

Werkstoffe und/oder Fertigprodukte im Bauwesen müssen für die meisten Anwendungsfälle oder Einbauzustände brandschutztechnische und damit sicherheitstechnische Anforderungen erfüllen, u.a. hinsichtlich Entflammbarkeit oder Brennbarkeit. Normalerweise werden allein denjenigen Stoffen Flammenschutzmittel zugesetzt, die unter den Begriff "brennbare Baustoffe" fallen [1]. Nur mit Flammenschutzmitteln können diese Stoffe die entsprechenden Prüfanforderungen erfüllen und eine definierte "Brennbarkeitsklasse", in Deutschland z. B. "B1", erreichen.

Selbstverständlich ist, daß auch Kunststoffe für gewisse Anwendungsgegenstände wie Fernsehgehäuse, Computergehäuse und dergleichen ein definiertes Maß an brandschutztechnischen Eigenschaften aufweisen müssen.

Auch solchen Kunststoffen werden vor der Verarbeitung zum Gebrauchsgegenstand entsprechende Flammenschutzmittel zugesetzt.

Bei den gebräuchlichsten Flammenschutzmittelsystemen handelt es sich um halogen-, phosphor- oder stickstoffhaltige organische Verbindungen sowie um eine Reihe anorganischer Stoffe wie z.B. das bekannte Aluminiumoxydtrihydrat.

Innerhalb der halogenorganischen Flammenschutzmittel kommt den bromierten Verbindungen die größte Bedeutung zu. Bei ihnen ist oft eine relativ hohe Konzentration im Produkt erforderlich, um die angestrebte Brandklasse zu erreichen.

Es muß bereits an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß hohe Flammenschutzmittelkonzentrationen nicht gleichzusetzen sind mit einem hohen Sicherheitsniveau!

Die zumeist länderspezifischen Prüfmethode zur Flammausbreitung, die als Grundlage der Klassifizierung des Baustoffes dienen, liefern ohne zusätzliche Hinweise auf Rauch- und Gasentwicklung nur sehr unvollkommene Anhaltswerte für das Sicherheitsniveau eines Baustoffes, gleichgültig ob für sich alleine, also als Einzelteil oder "im Einbauzustand", also als Bestandteil eines Verbundes, geprüft.

Unterschiedliche Prüfmethode benötigen unterschiedliche Flammenschutzmittelkonzentrationen zur Erfüllung der jeweiligen Anforderungen. Ein Umstand, der hoffentlich durch die EU-Harmonisierung des Prüfaufbaues und einheitlichen Klassifizierungskriterien beseitigt werden wird. Einheitliche und dem tatsächlichen Gefahrenpotential brennender Baustoffe besser gerecht werdende Prüfmethode kämen sicherlich auch dem Umweltschutz zugute.

Beim Brand bzw. der thermischen Zersetzung (Pyrolyse) des Produktes treten in Relation und Abhängigkeit zum chemischen Aufbau unterschiedliche Zersetzungsprodukte in der Gasphase, im

Rauchkondensat oder auch in der Asche auf. Die allgemeine oder spezifische Toxizität dieser Zersetzungsprodukte ist von größter Bedeutung für die Sicherheit der betroffenen Menschen, da sie über die Atmungswege während eines Brandes sehr direkt auf den menschlichen Organismus einwirken.

So kann es z. B. im Falle der Anwesenheit von chlor- oder bromhaltigen Materialien beim Brand zur Bildung von polychlorierten oder polybromierten Dibenzofuranen und Dibenzo(p)dioxinen kommen [2, 3, 4, 6].

Ähnliches Verhalten weisen Kunststoffe mit halogenhaltigen Zusätzen, oder, wie hier diskutiert, geschlossenzellige Elastomerschäume, die für die Isolierung betriebstechnischer und industrieller Anlagen Verwendung finden, auf [4, 5, 6,].

Die Entstehung solcher toxikologisch und damit gesundheitlich relevanter Zersetzungsprodukte, Dioxine/Furane, ist nicht allein auf den Brandfall beschränkt. Untersuchungen von Fertigprodukten aus Kunststoffen, denen bromaromatische Flammschutzmittel aus sicherheitstechnischen Gründen zugesetzt worden waren, haben ergeben, daß diese bereits herstellungsbedingt- das heißt: nicht erst, wenn sie brennen - mit erheblichen Mengen polybromierter Dibenzofurane und Dibenzodioxine belastet sein können [2, 4, 6, 7]. Auf diesen Umstand soll im folgenden nicht weiter eingegangen werden.

Als besonders kritisch im Brandfall haben sich polybromierte Dibenzodiphenyloxyde (PBDPO) erwiesen, da sich diese Verbindungen bei der thermischen Zersetzung in Prozentausbeute in die - langfristig toxisch wirkenden - Dioxine/Furane umsetzen können.

Diese Erkenntnisse haben in der Bundesrepublik Deutschland eine weitreichende umweltpolitische Diskussion hinsichtlich der Verwendung von halogenierten Werkstoffen und Additiven in den verschiedensten Bereichen - Bauwesen, Elektrotechnik, Verkehrswesen - ausgelöst, die bis heute andauert und die zu einer Reihe von Regelungen und Beschränkungen geführt hat. So wurde im Rahmen der Chemikalien-Verbotsverordnung (Chem.Verb.V) u.a. das Inverkehrbringen von Stoffen und Erzeugnissen geregelt, die die Dioxine und Furane enthalten, indem strikte zulässige Höchstwerte für solche chlorierten und bromierten Dioxine und Furane festgelegt wurden.

Auch in anderen Verordnungen fanden Grenzwerte für diese Stoffe Eingang, z. B. in die Gefahrstoffverordnung und die Gefahrstoffverordnung Straße. Aufgrund der extrem hohen Tendenz zur Bildung solcher chlorierten und bromierten Dioxine und Furane, die bromierte Diphenyloxyde im Brandfall aufweisen, entschloß sich das Deutsche Institut für Bautechnik, Berlin, Decabromdiphenyloxid als Flammschutzmittel in Bauprodukten im Rahmen des Produkt-Zulassungsverfahrens nicht mehr zu akzeptieren!

3. GESETZESLAGE, EMPFEHLUNGEN UND RICHTLINIEN

"Im Juli 1976 gerät in Seveso eine chemische Reaktion in einem sogenannten Reaktor außer Kontrolle. Tetrachlordibenzodioxin (TCDD), das sogenannte "Seveso Gift" [2, 3, 7, 8] verseucht ein größeres Gelände."

Als Konsequenz dieses Unfalls wurden bereits im Juli 1978 im Bundesgesetzblatt einschneidende Verwendungsbeschränkungen für die Klasse der Verbindungen "polychlorierte Biphenyle" (PCB) erlassen und veröffentlicht.

Inzwischen wurde hinsichtlich möglicher Verseuchung mit polyhalogenierten Dibenzodioxinen/Furanen im Zusammenhang mit Bränden, bei denen halogenhaltige Materialien betroffen waren, eine Reihe von Empfehlungen und Richtlinien von verschiedensten Institutionen erlassen, die sich auch auf erforderliche Schutzmaßnahmen im Umgang mit kalten Brandstellen bezogen:

Empfehlungen zur Reinigung von Gebäuden nach Bränden, Bundesgesundheitsamt (BGA), Bundesgesundheitsblatt 1/90 [8];

TRGS 524, Sanierung und Arbeiten in kontaminierten Bereich, Bundesarbeitsblatt März 1998 [9];

VDS-Richtlinie zur Brandschadensanierung, Verband der Sachversicherer e.V. (VDS), April 1998 [10];

Entscheidung des Institut für Bautechnik, Produkten, die Decabromdiphenyloxid als

Flammschutzmittel enthalten, die Produktzulassung zu verwehren;

Chemikalien Verbotserverordnung für Fertigprodukte mit Zusätzen, die im Brandfall zur Bildung von Dioxinen und Furanen führen.

4. TOXIKOLOGIE DER POLYHALOGENIERTEN DIBENZO-P-DIOXINE/FURANE

Die akute und/oder chronische Toxizität der Vielzahl von Einzelverbindungen der Klasse der halogenierten Dioxine und Furane - bereits in der Gruppe der chlorierten gibt es 210 unterschiedliche chemische Verbindungen - ist sehr verschieden und kann erheblich variieren. Dies gilt für chlorierte und bromierte Verbindungen gleichermaßen. Es sind noch nicht alle Einzelheiten erforscht und bekannt.

Zur Abschätzung der Toxizität - insbesondere auch der unerforschten Verbindungen - wurden sogenannte Toxizitätsequivalenzfaktoren (TE) eingeführt. Das "Seveso-Gift" [2, 3, 7, 8] TCDD, als Vertreter mit der höchsten Giftigkeit, wurde mit dem TE von "1" versehen. Zur Abschätzung der Toxizität eines Gemisches werden die den einzelnen im Gemisch vorhandenen Verbindungen zugeordneten TE mit den Anteilen der jeweiligen Verbindung am Gemisch multipliziert und die Summe gebildet:

$$\sum TE_i = \sum \text{Konz}_i \times TE_i$$

Das "Seveso-Gift" selbst, TCDD, gehört mit dem TE = 1 zur Gruppe III A2 der krebserzeugenden Stoffe.

III ® Krebserzeugende Arbeitsstoffe (eindeutig erwiesen und begründet verdächtig);

A ® als krebserzeugend ausgewiesene Arbeitsstoffe;

2 ® Stoffe, die sich bislang nur in Tierversuchen nach Meinung der Kommission eindeutig als krebserzeugend erwiesen haben und zwar unter Bedingungen, die der möglichen Exposition des Menschen am Arbeitsplatz vergleichbar sind, oder aus denen Vergleichbarkeit abgeleitet werden kann.

Bei dieser Einstufung wird ein MAK- Wert (maximale Arbeitsplatzkonzentration) nicht festgelegt, da sich Krebs erst nach Jahren manifestiert, und es keine "Grenzwerte" gibt, diesseits deren ein so klassifizierter Stoff als "ungefährlich" gelten könnte.

Bei der allgemeinen toxikologischen Beurteilung von Dioxin-/Furanverbindungen steht daher die Langzeitwirkung im Vordergrund, da im Gegensatz zur akuten Wirkung von bestimmten Bestandteilen von Pyrolysegasen, wie z. B. des Kohlenmonoxids, die Wirkungen der dioxin- und furankongenären Konzentrationen in der Luft in der Regel nicht akut lebensbedrohend sind .

Jedoch ist die Aufnahme und Speicherung im Körper von großer Relevanz und daher zu berücksichtigen, da bei Absorption "größerer" Mengen langfristig eine Schädigung der Betroffenen zu erwarten ist.

Bei der Betrachtung eines einzelnen, isolierten Brandes ist jedoch nicht zu erwarten, daß derartige kritische Akkumulationsmengen auf einmal über die Atemwege aufgenommen werden können, da sich selbst in solchen Fällen die Konzentrationen der halogenierten Furane/Dioxine im Rauch nur im 1-stelligen %-Bereich bewegen.

Bei den Dioxinen und Furanen handelt es sich um sogenannte persistente Umweltschadstoffe mit einer langen, nach mehreren Jahren zählenden biologischen Halbwertszeit im tierischen bzw. menschlichen Körper. Die Betrachtung der einmaligen zusätzlichen Belastung in einem Brandfall ist daher auf die gesamte Lebenszeit zu beziehen.

5. DIE PYROLYSE VON ELASTOMERSCHÄUMEN

Bereits die vorstehenden Ausführungen und besonders ein Studium der dazugehörigen Literatur zeigen, wie wichtig eine sorgfältige Beurteilung der Pyrolyseprodukte von Baustoffen ist [11, 12].

Eine der sechs "wesentlichen Anforderungen" der Bauproduktenrichtlinie in der Europäischen Union,

"Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz" fordert hier insbesondere eine Analyse zur Gefahrenabwehr.

Bereits viel früher wurde die toxikologische Beurteilung der Brandgase von sogenannten A2-Baustoffen vorgeschrieben und wird heute noch praktiziert. Allerdings waren Analysen auf Dioxine und Furane nicht mit in die Beurteilung eingeflossen.

Die geschlossenzelligen Elastomerschäume, die seit einigen Jahren in der Bauindustrie eine bedeutende Rolle spielen, fallen jedoch nicht in eine der "A"-Baustoffklassen (A1 nicht brennbar; A2 nicht brennbar, jedoch mit brennbaren Bestandteilen), es sind regelmäßige "B"-Baustoffe.

Mit ihnen werden Wasserleitungen, Heizungs- und Sanitäranlagen, Kälteanlagen in der Industrie, Klimaanlage usw. weltweit vornehmlich isoliert. Dies hat physikalische Gründe. Die für Kälteisolierungen unerlässliche Geschlossenzelligkeit ist in anderen Produkten in der Regel nicht mit einem vergleichbar hohen Wasserdampfdiffusionswiderstand - der für Kälteisolierungen ausschlaggebend ist - gekoppelt, wie bei den Elastomerschäumen. Der einzige in "beiden Aspekten" - Geschlossenzelligkeit und Wasserdampfdiffusionswiderstand - vergleichbare Baustoff - Schaumglas - ist ungleich schwieriger zu verlegen/zu montieren und kann in vielen Fällen auch aus ökonomischen Gründen, nicht als universell verwendbar gelten.

Ursprünglich, noch vor wenigen Jahren, wurde die Zusammensetzung der Polymerbasis dieser Elastomerschäume von praktisch allen Herstellern mit NBR/PVC angegeben, das heißt, unabhängig von anderen Zuschlagsstoffen war zumeist PVC und damit Chlor vorhanden. Hinzu kamen anorganische Flammschutzmittel, aber oft auch bromhaltige Substanzen, damit die in Europa geforderten Brandklassen erreicht werden konnten.

Heute kommen auch andere Polymersysteme zum Einsatz, jedoch auch sie lösen das Problem der Dioxin-/Furanbildung im Brandfall in der Regel nicht. Dabei sind die chemischen Zusammenhänge komplex: Die alleinige Anwesenheit von PVC oder anderen chlorhaltigen oder bromhaltigen Substanzen steht nicht in direkter Beziehung zu einer Dioxin-/Furanbildung im Brandfall. Das heißt, das Vorhandensein solcher Stoffe führt nicht zwangsläufig im Brandfall zur Dioxin-/Furanverseuchung der Asche, der Pyrolysegase oder der Kondensate, die sich beim Brand auf benachbarten Oberflächen niederschlagen.

Weitere chemische Voraussetzungen für die Bildung dieser Stoffe müssen gegeben sein. Wegen der Komplexität der chemischen Vorgänge kann nur die Analyse des Endproduktes darüber Aufschluß geben, welche toxisch kontaminierten Aschen, Gase oder Kondensate im Brandfall entstehen.

Mehr als ein halbes Duzend verschiedener Elastomerschäume mit unterschiedlichem Aufbau wurden auf Dioxin-/Furanbildung im Brandfall hin untersucht. Die angewandte Analysentechnik ist genormt. Sie verwendet die Standard - VCI-Apparatur mit 800°C Pyrolysetemperatur.

Die nachfolgend tabellarisch dargestellten Teilergebnisse der Analysen (Gehalte von *Sevesogift*, Summe aller *chlorierten und bromierten* Verbindungen) beziehen sich immer auf alle Zersetzungsprodukte als Summe (Asche, Pyrolysegase und Kondensate) [Tabelle 2].

Die vollständige Übersicht der Grenzwerte nach Chemikaliengesetz kann der Leser der Tabelle 1 entnehmen.

Die wesentlichen Erkenntnisse bzw. Hinweise aus den erhaltenen Analysedaten können in etwa wie folgt zusammengefaßt werden:

Es scheint möglich PVC haltige Produkte im Sinne der Sicherheit dioxin-/furanfrei auch für den Brandfall herstellen zu können. Die Vergleiche der Ergebnisse von Muster 1 und 2 mit Produkt 3 und 5 unterstützt diese Aussage.

Im übrigen bedeuten diese Ergebnisse keinesfalls eine Überraschung. In der Literatur wird des öfteren darauf hingewiesen, daß PVC a l l e i n e nicht als der auslösende Faktor für die Dioxin-/Furanbildung zu bezeichnen ist.

Nicht nur Decabromdiphenyloxid führt im Brandfall zur Dioxin-/Furanbildung. Auch die Anwesenheit anderer aromatisch halogener Strukturen führt voraussichtlich zu erhöhten

Dioxin-/Furanbildungsraten (Proben 2 und 4 im Vergleich zu den Ergebnissen 5 bis 10).

Möglicherweise, unter anderem, bei Verzicht auf bestimmte bromierte Verbindungen im Flammenschutzmittelsystem können eventuell Elastomerschäume hergestellt werden, die auch im Brandfall keine dioxin-/furanhaltigen Aschen, Pyrolysegase oder Kondensate entwickeln (Muster 4 und 6 bis 11).

Der Verzicht auf halogenierte Weichmacher - genauso wie der Verzicht auf PVC - hat keinen wesentlichen Einfluß auf die Dioxin-/

Furanbildung im Brandfall.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Artikel beleuchtet die Komplexität der möglichen Ursachen für das Bildungspotential von Dioxinen/Furanen durch Elastomerschäume in brennenden Gebäuden.

Als Zersetzungsmodell wurde die sogenannte VCI-Apparatur bei 800°C Pyrolysetemperatur eingesetzt. Sie ist für derartige Untersuchungen Standard.

Frühere Untersuchungen hatten bereits gezeigt, daß die Analysenergebnisse unter Anwendung des Quarzrohres nach DIN 53436 im Vergleich zur VCI-Apparatur keine relevanten Unterschiede aufwiesen .

Eine Beurteilung der Analysenergebnisse von 10 hier beispielhaft dargestellten Produkten läßt den Schluß zu, daß einfache Voraussagen zur Dioxin-/Furanbildung im Brandfall nicht zulässig sind. Hierzu sind die verschiedenen Einflüsse verschiedener chemischer Zusammensetzung von Elastomerschäumen zu komplex. Dies ist ein zweifelsfreies Ergebnis der vorliegenden Untersuchungen.

Die Untersuchungsergebnisse lassen hoffen, trotz noch unerforschter Teilaspekte, daß heute technisch hochwertige Elastomerschäume für die Isolierung von betriebstechnischen Anlagen hergestellt werden können, die auch im Brandfall dioxin-/furanfrei bleiben! Weitere detaillierte Untersuchungen zur Untermauerung der wissenschaftlichen Ergebnisse sind unerlässlich.

Sicherheitsbehörden, Planer und Isolierbetriebe sollten sich der Gefährdung durch Dioxine und Furane, bewußt sein, die von Elastomerschäumen im Falle brennender Gebäude oder Anlagen ausgehen können. Aber auch der heutigen Vermeidbarkeit dieser Gefahr!

Vor Einsatz solcher Produkte sollten entsprechende - gewährleistungsfähige! - Detailangaben beim Hersteller angefordert werden.

Literaturverzeichnis

[1] Troitzsch, J.: Brandverhalten von Kunststoffen, Carl Hanser Verlag München, München, 1981, auch DIN 4102.

[2] Umweltbundesamt: Sachstand Polybromierter Dibenzodioxine (PBDD), Polybromierter Dibenzofurane (PBDF), Berlin 1989.

[3] Funcke, W., Theisen, J. Balfanz, E. und König, J.: Bildung halogenerter Substanzen in Brandfällen: VDI Bericht, Nr. 745, 1989.

[4] Hamm, S. und Theisen, J.: Weiterführende Untersuchungen zur Bildung von polybromierten Dioxinen und Furanen bei der thermischen Belastung flammgeschützter Kunststoffe und Textilien. UBA-Forschungsbericht Nr.104 03 364/02, Umweltbundesamt, Berlin, 1991.

[5] Hutzinger, O.: Untersuchung der möglichen Freisetzung von polybromierten Dibenzodioxinen und Dibenzofuranen beim Brand flammgeschützter Kunststoffe. UBA-Forschungsbericht Nr.104 03

362, Umweltbundesamt, Berlin, 1990.

[6] BMU: Polybromierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane (PBDD/PBDF) aus bromhaltigen Flammenschutzmitteln- Risikoabschätzung und Maßnahmenvorschläge. Bericht der UMK-Arbeitsgruppe "Bromhaltige Flammenschutzmittel an die Umweltministerkonferenz", Bonn, 1989.

[7] Donnelly, J.R., Grange, A.H., Nunn., N.J., Sovocool, G.W., Brumley, W.C.

und Mitchum, R.K.: Analysis of Thermoplastic Resins for Brominated

Dibenzofurans. Biomed. Environ. Mass. Spectrom, 18, 884-896, 1989.

[8] Empfehlungen zur Reinigung von Gebäuden nach Bränden, Bundesgesundheitsamt (BGA), Bundesgesundhbl. 1/90.

[9] TRGS 524, Sanierung und Arbeiten in kontaminierten Bereichen,

Bundesarbeitsblatt, März 1998.

[10] VDS Richtlinien zur Brandschadenssanierung, Verband der Sachversicherer e.V. (VdS), April 1998.

[11] Theisen, J., Funcke, W. und Hamm, S.: Untersuchung der möglichen Umweltgefährdung beim Brand von Kunststoffen, UBA-Forschungsbericht 104 0922, Umweltbundesamt, Berlin, 1991.

[12] Zier, B., Lahaniatis, E.S., Bienick, D. und Kettrup, A.: Formation of brominated Dibenzodioxins and -Furans by Thermolysis of Polybutylen-Terephthalate containing Decabromdiphenylether-Influence of Temperature, Antimony Trioxide and Water - Dioxin 1990 - EPRI Seminar, Hrsg.: Hutzinger, O., Fiedler, H., Ecoinforma Press, Bayreuth, 381-384 (1990).

[13] Wöss, H.P.: Eigenschaften, Herstellung und Anwendung von Elastomerschäumen für die Isolierung von betriebstechnischen Anlagen, VDI Verlag, 1995.

[14] Wöss, H.P.: Insulation of Refrigeration Plants, New Scientific Results, The European Technical Harmonisation, International Congress of Refrigeration in Den Hague in August 1995.

Grenzwerte für polychlorierte und polybromierte Dioxine und Furane

entnommen aus Chemikaliengesetz Ausgabe 1994

TABELLE 1

		Grenzwert ChemVerbotsV
	Dimension	µg/kg
RN 2601 25 a I	2378-TetraCDD 12378-PentaCDD 2378-TetraCDF 23478-PentaCDF	
	Summe gem. RN 2002 15 a	1
RN 2601 25 a II	123478-HexaCDD 123678-HexaCDD 123789-HexaCDD	

	12378-/12348-PentaCDF ^a 123478-/123479-HexaCDF ^a 123678-HexaCDF 123789-HexaCDF 234678-HexaCDF	
	Summe gem. RN 2002 15 b	5
RN 2601 25 a III	1234678-HeptaCDD OctaCDD 1234678-HeptaCDF 1234789-HeptaCDF OctaCDF	
	Summe gem. RN 2002 15 c	100
RN 2601 25 a IV	2378-TetraBDD ^c 12378-PentaBDD ^c 2378-TetraBDF ^c 23478-PentaBDF ^c	
	Summe gem. RN 2002 15a	1
RN 2601 25 a V	123478-/123678-HexaBDD ^{b,c} 123789-HexaBDD ^c 12378-PentaBDF ^c	
	Summe gem. RN 2002 15 b	5

a gaschromatographisch an der GC Phase SP- 2331 nicht trennbare Isomere

b gaschromatographisch an der GC Phase DB-5 nicht trennbare Isomere

c Maximalwert; eine Coelution mit weiteren Kongeneren dieser Homologengruppe ist nicht auszuschließen

