

Isophoron – Produkt einer Verlegenheit

Die Wiege der industriellen Produktion des Aceton-Trimerisats steht in Herne

Wolfgang Hasenpusch, Universität Siegen

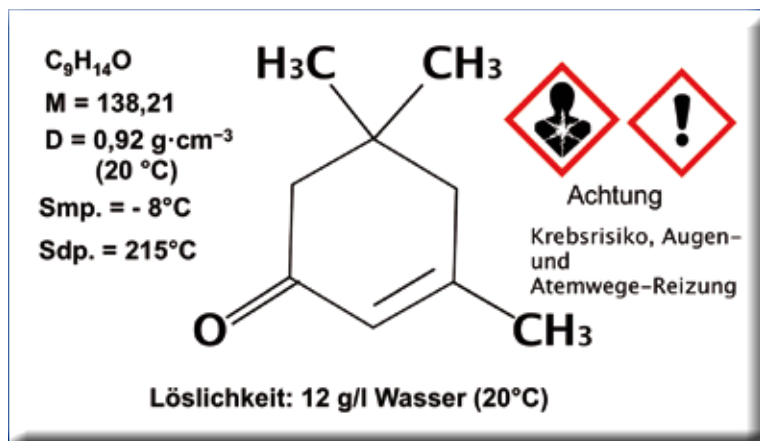


Abbildung 1: Isophoron (3,5,5-Trimethylcyclohex-2-enon), Struktur und Stoff-Parameter.

Isophoron war einst als Aceton-Trimerisat ein Weg, um eine Alternative für das überschüssige Aceton zu haben, dass bei der Phenol-Synthese nach dem industriell gängigen Cumol-Verfahren als Nebenprodukt entsteht. Heute hat das Isophoron, trotz seiner bedenkenswerten Gefahrstoff-Eigenschaften, vielfache Einsatzgebiete gefunden. Aber es bleibt wie viele ein Produkt, das in einem Netzwerk weltwirtschaftlicher Imponderabilien hängt.

Vom Aceton zum Isophoron – Eigenschaften und Bedeutung

Im Jahre 1606 stellte der Universalgelehrte, Philosoph, Arzt und Chemiker Andreas Libavius (1555-1616), Autor der „Alchemia“ 1697, das Aceton zum ersten Mal her, indem er Blei(II)acetat, $Pb(OOC-CH_3)_2$, erhitzte. 1661 konnte der irische Naturforscher Robert Boyle (1626-1691) das Aceton durch „trockene Destillation“ aus dem Holz gewinnen, und

Der Autor



Prof. Dr. Wolfgang Hasenpusch hält eine Honorar-Professur an der Universität Siegen in Industrieller Anorganischer Chemie mit den Schwerpunkten Innovationsmanagement, Recycling und Bionik. Das weite Spektrum an bearbeiteten Themen resultiert aus der vielfachen Dozenten-Tätigkeit am Deutschen Institut für Betriebswirtschaft, den Schulen der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI) sowie Universitäten.

bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts diente die „Aceton-Butanol-Fermentation“, die Umsetzung von Zucker mittels anaerober Bakterien (*Clostridium acetobutylicum*) als Herstellungs-Verfahren für das Aceton.

Dieses Verfahren ließ sich der Chemiker Charles Weizmann (1874-1952), noch im Dienste der britischen Krone, patentieren. Nach Gründung des Staates Israel wurde Weizmann erster Präsident.

Im 1. Weltkrieg hatte das Aceton große Bedeutung. Es diente zur Herstellung des kampfentscheidenden Militär-Sprengstoffs „Kordit“, einem mit Aceton gelierenden Explosivstoff aus Nitrozellulose, Nitroglycerin und Vaseline [1].

Aceton ist ein dünnflüssiges, farbloses Universal-Lösungsmittel mit sehr niedrigem Siedepunkt (56 °C), niedrigem Flammpunkt (< 20 °C) und hohem Dampfdruck bei Raumtemperatur (246 hPa). Mit Wasser und zahlreichen Lösungsmitteln ist es mischbar.

Aceton findet seine Verwendung als gutes Lösungsmittel für Harze, Fette, Öle, Kolophonium, Celluloseacetat, Klebstoffe sowie als entsprechendes Reinigungsagens.

Jährlich gelangen über 3 Mio. t an Aceton auf den Weltmarkt.

Für zahlreiche Synthesen lässt sich Aceton als Basis-Chemikalie heranziehen. So beispielsweise zur Herstellung von Plexiglas (Acrylgas, Polymethylmethacrylat, PMMA) durch zunächst Anlagerung von Blausäure, gefolgt von Hydrolyse und Veresterung mit Methanol [2].

In einigen Ländern dient Aceton als Treibstoff-Zusatz (0,2 bis 0,5 %), um eine vollständigere Verbrennung zu erreichen.

Bei der photochemischen Herstellung von Leiterplatten besorgt Aceton das abschließende Reinigen und auch in der Zahnmedizin findet es seine Anwendung zum Reinigen von Dentinflächen und Wurzelkanälen.

Aber auch die Herstellung der als Gefahrstoff geächteten Verbindung Bisphenol A, beruht auf einer Umsetzung von Aceton mit Phenol. Sie hat vor allem als Ausgangsstoff zur Synthese polymerer Kunststoffe auf der Basis von Polyestern, Polysulfonen, Polyetherketonen, Polycarbonaten und Epoxidharzen eine sehr große wirtschaftliche und technische Bedeutung [3]. Am 26. November 2010 gab der „Ständige Ausschuss für die Lebensmittelkette und Tiergesundheit“ der

EU bekannt, dass ab 1. März 2011 die Produktion und ab 1. Juni 2011 der Verkauf von Babyflaschen aus Bisphenol A-haltigem Polycarbonat in der Europäischen Union verboten wird. Seit dem 1. Juni 2011 müssen Händler entsprechende Flaschen aus den Regalen entfernen. Die Hersteller hatten diese Säuglingsflaschen, bereits vorab freiwillig vom Markt genommen [4, 5].

Da die Isophoron-Kapazitäten weltweit ausgebaut werden, lohnt sich besonders ein Blick auf dieses Aceton-Folgeprodukt.

Eigenschaften des Isophorons

Isophoron ist der Name für die chemische Verbindung 3,5,5-Trimethyl-2-cyclohexen-1-on, einer farblosen bis gelblichen Flüssigkeit mit charakteristischem Geruch, die als Lösungsmittel und als Synthese-Zwischenprodukt verwendet wird (Abb. 1). Sie entsteht durch katalysierte Trimerisation von Aceton (Abb. 2).

Die Gefahrstoff-Kennzeichnung mit ihren Risikosätzen nach der aktuellen europäischen CLP-Verordnung (Classification, Labelling and Packaging of Chemicals) verweist auf folgende Gefahren:

- Kann vermutlich Krebs erzeugen (H 351)
- Gesundheitsschädlich bei Hautkontakt (H 312)
- Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H 302)
- Verursacht schwere Augenreizungen (H 319)
- Kann die Atemwege reizen (H 335).

Zudem galt vor 2005 eine Maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK) von 2 ml/m³ oder 11 mg/m³ [6].

Die Produktion des Lösungsmittels Isophoron nahm 1962 das Stickstoffwerk Herne der Hibernia AG auf. Die Entwicklung des neuen Lösungsmittels war bei der Suche nach Entsorgungs- bzw. Weiterverwertungsmöglichkeiten von Aceton entstanden. 1967 kam die Isophoron-Fertigung in das heutige Evonik-Werk Herne, dem damaligen Werk Herne I der Hibernia.

Als die erste Produktionsanlage 1967 anliefe, war dies der Beginn der Aceton-Chemie in Herne, die den Standort für die Zukunft neu aufstellen sollte und bis heute sichert (Abb. 3). Im Rahmen der Neuordnung der Chemie-Aktivitäten der Veba übernahm die damalige Hüls AG 1979 die Werkgruppe Herne und somit die Isophoron-Produktfamilie. Seit 1992 werden Isophoron-Folgeprodukte und seit 1999 Isophoron auch am heutigen US-amerikanischen Standort Mobile, Alabama, der Evonik hergestellt. Produktionsanlagen in China sind in der Planung.

Bedeutung des Isophorons

Isophoron besitzt ein hervorragendes Lösevermögen für zahlreiche Bindemittel, Harze und Chemieprodukte. Es wird daher als hochsiedendes Lösemittel in der Lack-, Druckfarben- und Klebstoffindustrie ein-

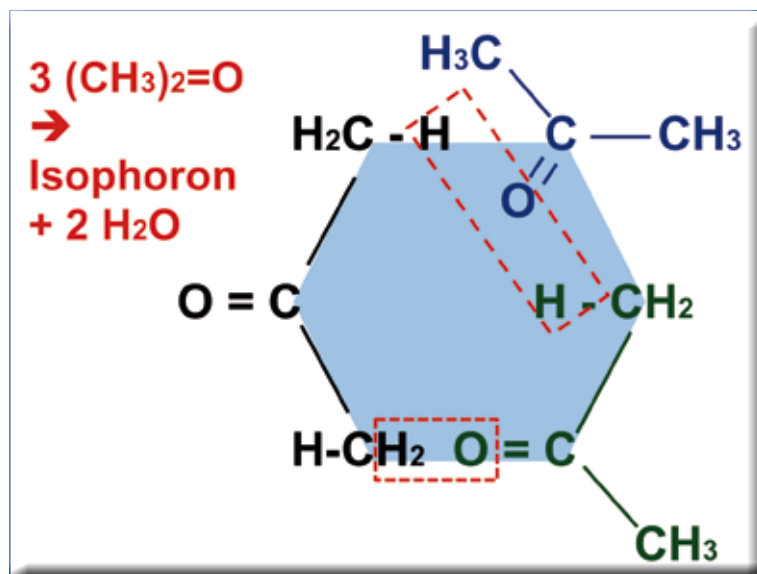


Abbildung 2:
Entstehung von
Isophoron aus
Aceton (Modell).

gesetzt. In der Farben- und Lackindustrie verbessert Isophoron die Fließeigenschaften der Farben und Lacke und erhöht deren Glanz. Aufgrund seiner besonderen chemischen Struktur dient Isophoron auch als Rohstoff zur Herstellung weiterer chemischer Produkte, die auf anderem Wege nur schwer zugänglich sind. Diese Isophoron-Folgeprodukte kommen in den unterschiedlichsten Bereichen zum Einsatz: In der Bauindustrie dienen sie beispielsweise als Korrosionsschutz bei Brücken, Gerüsten oder Schleusen. Sie sind in Holzschutzmitteln ebenso enthalten wie in Versiegelungs-Lösungen von Fußböden.

Isophoron-Folgeprodukte

Zwei klassische Isophoron-Folgeprodukte stellen das Isophoron-Diamin sowie das daraus weiter entwickelte Isophoron-Diisocyanat dar.

Isophoron-Diamin

Isophoron-Diamin ist eine farblose, hygroskopische Flüssigkeit mit schwachem Amingeruch. Kommerziell

Abbildung 3:
Isophoron-
Produktion 1986
in Herne.



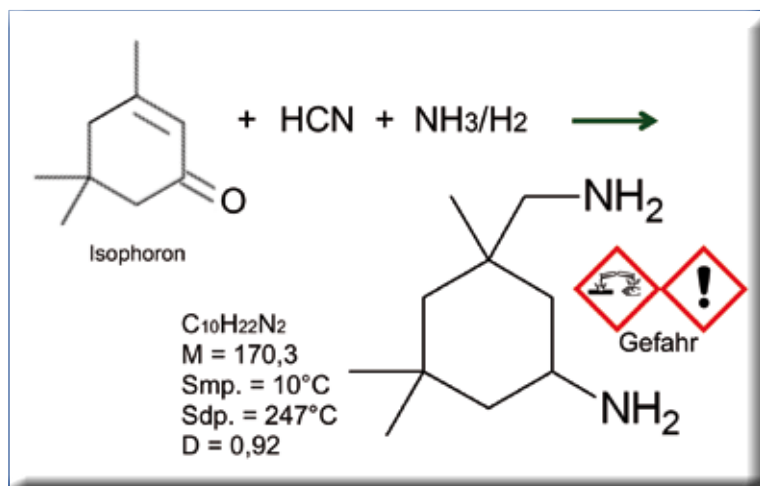


Abbildung 4:
 Synthese von
 Isophoron-diamin
 aus Isophoron
 über Isophoron-
 dinitril.

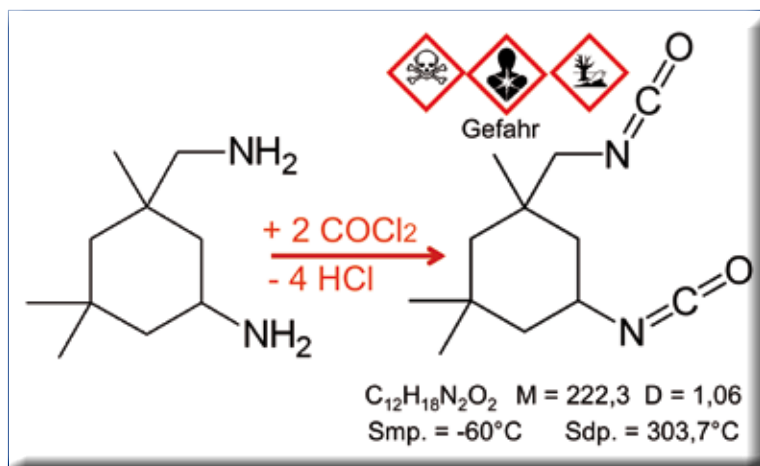
wird ein Gemisch der cis- und trans-Diastereomeren vertrieben, wobei das überwiegend enthaltene cis-Isomer reaktiver ist. Sie ist mischbar mit Wasser. Ihre wässrigen Lösungen reagieren stark alkalisch. Die Verbindung hat eine Viskosität von 18 mPa·s bei 20 °C. Bei Temperaturen über 260 °C zersetzt sie sich (Abb. 4).

Die Herstellung erfolgt in einem zweistufigen Prozess, bei dem zunächst Isophoron mit Blausäure zu Isophoron-Dinitril umgesetzt wird, das in einem weiteren Schritt mit Ammoniak und Wasserstoff zu Isophoron-Diamin reagiert [7].

Isophoron-Diamin dient als Zwischenprodukt zur Herstellung von Härtern für Epoxidharze und Beschichtungen (z.B. Isophoron-Diisocyanat) und wird selbst auch direkt als Härter eingesetzt. Weitere Anwendungen sind Beschichtungen mit hervorragenden Korrosionsschutz-Eigenschaften für Metalle und Klebstoffverbindungen. Es wird ferner als Kettenverlängerer bei Polyurethanen und als Zwischenprodukt zur Herstellung von Farbstoffen verwendet.

Auch beim Isophoron-Diamin handelt es sich um eine gefährliche Verbindung mit zahlreichen Risiken.

Abbildung 5: Synthese von Isophoron-diisocyanat aus Isophoron-diamin mit Phosgen und anschließender Destillation.



Isophoron-Diisocyanat

Isophoron-Diisocyanat ist eine farblose bis gelbliche Flüssigkeit mit stechendem Geruch, die in zwei Isomeren Formen vorkommt. Sie zersetzt sich langsam in Wasser sowie oberhalb von 260 °C, wobei Nitrose Gase und Cyanwasserstoff entstehen.

Mit Aminen reagiert sie heftig. Sie besitzt eine ölige Konsistenz mit einer Viskosität von 13–15 mPa·s bei Raumtemperatur.

Die Gewinnung von Isophoron-Diisocyanat erfolgt durch Umsetzung von Isophoron-Diamin mit Phosgen (Abb. 5). Die Isomere lassen sich durch Destillation trennen. Das kommerziell verfügbare Produkt liegt als cis/trans-Gemisch im Verhältnis 3:1 vor [8].

Isophoron-Diisocyanat wird als Härter in Zweikomponentenlacken verwendet und ist in Flüssig- und Pulverlacken enthalten. Es dient auch zur Herstellung anderer Polyisocyanate sowie von Polyurethanen.

Die Gefahrstoff-Eigenschaften übersteigen in ihrem Umgangs-Risiko noch die der Ausgangs-Verbindungen.

Netzwerk der Alternativen

Wie oft in der Chemie und seiner weltweiten Marktwirtschaft, hängt der Herstell- und Vertriebs-erfolg von vielen Unwegbarkeiten ab. Am deutlichsten zeigte sich das in den vergangenen Jahren am Edelmetall: kein Mensch auf der Welt war in der Lage, die Weltmarktpreise ein Jahr vorausschauend anzugeben, nicht einmal ob sie steigen oder fallen werden.

Die unvorhersehbare Acetonitril-Verknappung, die Sorge um die Seltenen Erden oder die zunehmende Bedeutung der Uran-armen Phosphate führen uns die mehrdimensionalen Netzwerke vor Augen, die für den Chemikalien-Markt kennzeichnend sind.

Aceton und seine Folgeprodukte befinden sich in einem ähnlichen Netzwerk aus Rohstoff-Angebot und Bedarf, der sich wiederum aus den Aceton-freisetzenden Verfahren, den Alternativen sowie den Bedürfnissen und Alternativen auf den Folgeprodukt-Stufen ergibt.

Alternativen zum Cumol-Verfahren

Die viel verwendete Grundchemikalie Phenol stellt die chemische Industrie überwiegend nach dem Cumolhydroperoxid-Verfahren her. Die Synthese aus dem Jahr 1944 ist nach Prof. Dr. Heinrich Hock (1887-1971) auch als „Hock-Verfahren“ bekannt (Abb. 6).

Benzol und Propen werden zunächst durch eine Friedel-Crafts-Alkylierung im Sauren in Isopropylbenzol (= „Cumol“) überführt. Cumol wird durch Luftsauerstoff zum Hydroperoxid oxidiert, welches durch saure Aufarbeitung unter Umlagerung zu Phenol und Aceton zerfällt [9] (Abb. 7).

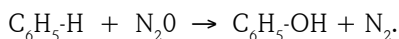
Eine weitere Darstellungsmöglichkeit besteht im Zusammenschmelzen des Natriumsalzes der Benzolsulfonsäure mit Alkalihydroxid, ohne dass dabei Nebenprodukte auftreten. Diese energiereiche Synthese bei ca. 450 °C kann sicherlich nur an Orten durchgeführt werden, wo Energie hinreichend preiswert zur Verfügung steht (Abb. 8, Nr. 1).

Neben dem Cumol-Verfahren (Abb. 8, Nr. 4) haben die Synthesen über das Anilin (Abb. 8, Nr. 2) und durch Extraktion aus dem Steinkohlenteer (Abb. 8, Nr. 3) heute keine größere industrielle Bedeutung.

Der Raschig-Hooker-Prozess ist ein weiteres großtechnisches Verfahren zur Herstellung von Phenol. Er wurde erstmals 1939 von Fritz Raschig publiziert und stellte eine Alternative zum „Sulfosäure-Verfahren“ und der „Chlorbenzol-Druckverseifung“ $C_6H_5-Cl + NaOH \rightarrow C_6H_5-OH + NaCl$ dar.

Auch die Synthese über Acetophenon, nachfolgender Baeyer-Villiger-Oxidation und Hydrolyse des entstehenden Arylacetats ist nur dort denkbar, wo Acetophenon in großem Überschuss zur Verfügung steht.

Die Direkt-Oxidation von Benzol mit Lachgas könnte sich als eine sehr nachhaltige Synthese entwickeln:



Bis zum Einsatz der petrochemischen Grundstoffe folgte die Phenol-Synthese der Extaktion aus dem

Abbildung 7: Anlage zur Phenol-Herstellung.

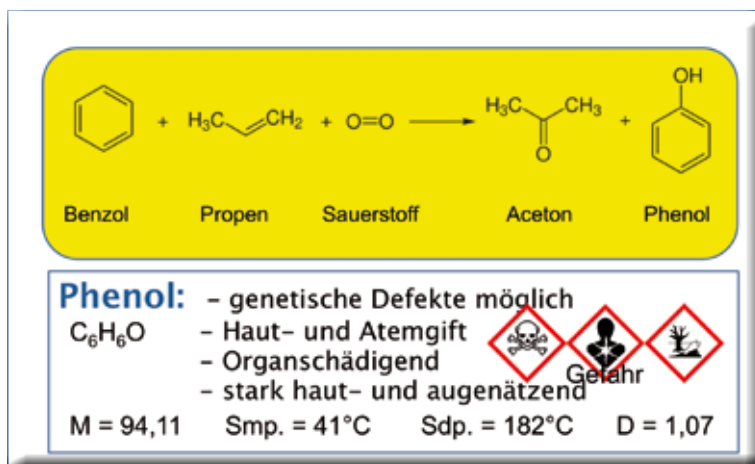


Abbildung 6: Cumolhydroperoxid-Verfahren (Hock-Verfahren) und Eigenschaften von Phenol.

Steinkohlenteer, wie es Friedlieb Ferdinand Runge (1794-1867) seit 1834 praktizierte.

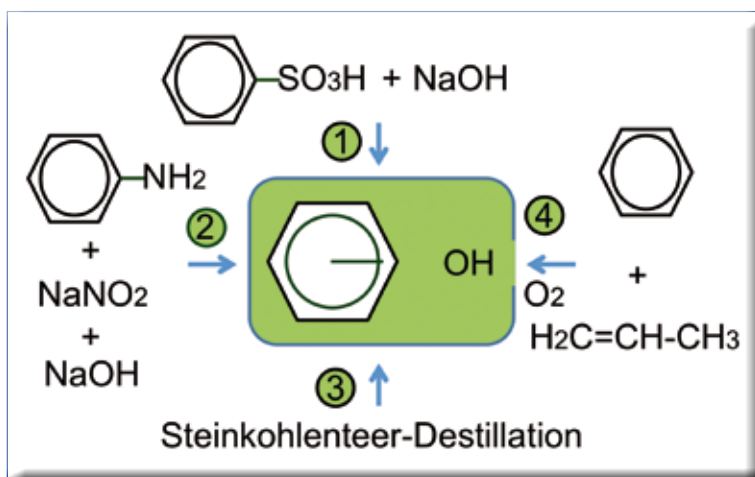
Rohöl enthält ebenfalls Phenol, das sich bedarfsgerecht isolieren lässt.

Weltweiter Phenol-Verbrauch

Phenol kann ungeachtet seines hohen Gefahren-Potentials für den Menschen ein weites Anwendungsspektrum aufweisen. Wenn es auch heute seltener als Desinfektionsmittel in Gebrauch ist, so ist es doch Ausgangsstoff zahlreicher Synthesen, wie beispielsweise nach der Kolbe-Synthese zu Acetylsäure, oder zu Unkraut-Vernichtungsmitteln, Holzschutz oder Kunstharzen. Das Polykondensat aus Phenol und Formalin, das Bakelit, fand bis in die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts weitreichende Anwendung.

Infolge der schwierigen Wirtschaftslage ist das weltweite Produktionsvolumen 2008 gesunken und betrug 7,2 Millionen Tonnen. 2009 betrug das Gesamtvolumen der Produktionskapazität weltweit gut 11,2 Millionen Tonnen. Marktführer in der Herstellung von Phenol sind USA, Taiwan und China. Die führende Region ist Asien (40 % vom globalen Pro-

Abbildung 8: Synthese-Wege für Aceton.



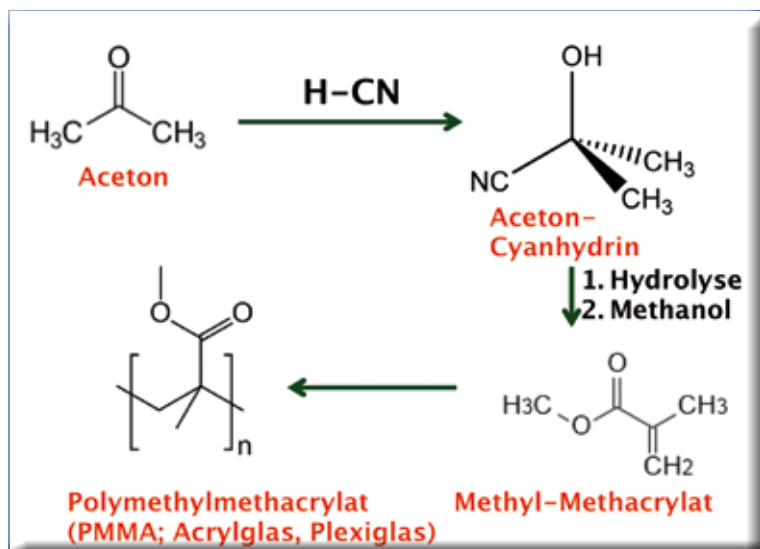


Abbildung 9:
Aceton als
Ausgangsstoff für
Plexiglas.

duktionspotenzial), die Anteile von Europa und Nordamerika betragen 30,17 % und 26,7 % entsprechend.

Der größte Hersteller von Phenol und Aceton ist das Unternehmen INEOS Phenol mit Produktionsanlagen in Deutschland, Belgien und Alabama, USA.

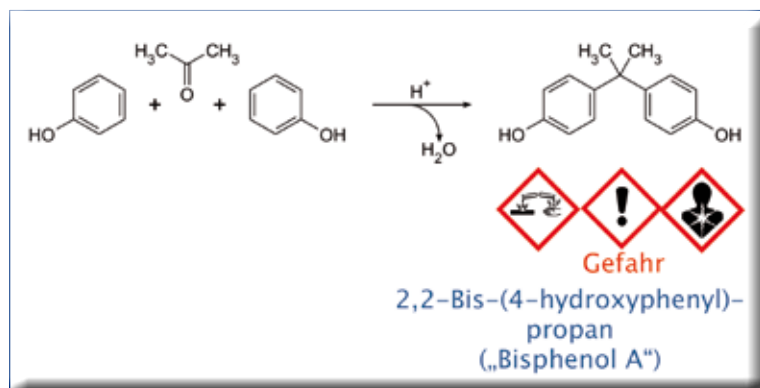
In den nächsten Jahren wird der Produktionsanstieg von Phenol mit einem Anstieg von jährlich 1 % erwartet, dann bei 2,9-3,8 %. Bis 2015 werden die Gesamtkapazitäten um 4 Millionen Tonnen pro Jahr wachsen. Das Wachstum wird größtenteils in Asien erfolgen, das die führende Position im Konsum ausbauen will.

Die Hauptregionen im Konsum von Phenol sind asiatische Länder mit 39 % (Japan: 10 %), USA: 25 % und Westeuropa: 26 %.

Wachstum kommt hauptsächlich aus dem Bisphenol A-Bereich mit insgesamt 45 % des Phenol-Verbrauchs sowie aus dem Bedarf an Phenolformaldehyd-Harzen.

Aber auch der bekannte Perlon-Faden hat seinen Ursprung im Phenol: über Cyclohexanon, Cyclohexanon-oxim und Caprolactam. Wie entwickeln sich die Märkte der Polyamide Perlon, Nylon (aus Benzol gewonnen!), Dederon oder die der kompakten Polyamide?

Abbildung 10: Aus zwei Äquivalenten Phenol und einem Äquivalent Aceton wird das toxische Bisphenol A hergestellt (Katalysator: HCl oder Polystyrolsulfonat).



Alternativen der Aceton-Verwendung

Alternativ zum Einsatz des Acetons als Lösungs- und Reinigungsmittel oder zur Isophoron-Synthese ist hauptsächlich die Verwendung zur Herstellung von Polymethylmethacrylat (PMMA; Acrylglas, Plexiglas).

Dazu wird das Aceton zunächst durch Addition von Blausäure in das Aceton-Cyanhydrin überführt, das im sauren Milieu leicht Wasser abspaltet. Das entstehende 2-Methylpropennitril erfährt durch Zugabe eines Gemisches aus konzentrierter Schwefelsäure und Methanol eine Umsetzung zu Methylmethacrylat, das mit Peroxiden leicht zum Acrylglas polymerisiert (Abb. 9).

Sowohl Aceton als auch Phenol sind Ausgangsstoffe für die Bisphenol A-Synthese (Abb. 10). Innerhalb Deutschlands werden jährlich ca. 410 000 Tonnen vermarktet. Bisphenol A kann sich bei Kontakt mit Lebensmitteln aus dem Produkt lösen und ist dann in diesen nachweisbar. Der mittlere Gehalt an Bisphenol A im menschlichen Blut hat mittlerweile besorgniserregende Konzentrationen angenommen, denn diese Verbindung gehört zu den hormonellen Schadstoffen, die bereits in winzigen Mengen in unseren sexuellen Hormonhaushalt eingreifen können. Weltweit wird mit einer Produktionssteigerung dieses Schadstoffes gerechnet.

In einigen Ländern dient Aceton im Verhältnis 1:2000 bis 1:5000 als Treibstoff-Additiv, um eine vollständige Verbrennung des Kraftstoffs zu erreichen.

Durch die „Sauerland-Terroristen“ wurde 2007 auch der brisante Einsatz von Aceton und Wasserstoffperoxid bekannt [11]. Anfänger in der Chemie seien davor gewarnt, beide Stoffe zu vereinen.

Alternative Aceton-Synthesen

Eine Alternative zur Aceton-Synthese nach dem Cumol-Verfahren (Abb. 11, Nr. 4) ist die Herstellung über die Acetate (Abb. 11, Nr. 1): Bei der thermischen Zersetzung von Kalziumacetat entsteht Aceton und Kalziumcarbonat, das wieder mit Essigsäure zum Kalziumacetat als Ausgangsstoff überführbar ist. Das Verfahren geht auf die historische Synthese von Libavius 1606 zurück.

Großtechnisch kommt auch die Isopropanol-Oxidation durch Oxi-Dehydrierung zum Einsatz (Abb. 11, Nr. 2), ein Verfahren, bei dem eine Dehydrierung bei gleichzeitiger Oxidierung erfolgt.

Schließlich sei noch die trockene Holz-Destillation zitiert, die besonders in Kriegszeiten geringe Mengen an Aceton zur Verfügung stellte (Abb. 11, Nr. 3).

Alternativen durch Substitution

Isophoron, sowie viele Folge-, Einsatz- und Nebenprodukte zählen zu den üblen Stoffen der „Chemieküchen“. Das Substitutionsgebot der Che-

mikalien-Gesetzgebung kann kreative Köpfe auf die Idee bringen, weniger gefährliche Stoffe oder nachhaltigere Verfahren anzudenken.

War einst das Isophoron durch Trimerisierung des Acetons aus der Not des Überschusses an Aceton geboren, so kann sich der Weltmarkt durch viele unübersehbare Teil-Entwicklungsschritte auch wieder in die entgegengesetzte Richtung, einer Aceton-Verknappung, entwickeln.

Wenn sich beispielsweise die Lachgas-Synthese von Phenol durchsetzt oder sich eine vergleichbar elegante Variante in Zukunft behauptet, so entfällt das Aceton als billiger Rohstoff.

Auch bei der Frage nach dem Komponenten-Einsatz für Polyurethane kann sich der Mix der in Frage kommenden Diisocyanate ändern. Derzeit sind die gängigen Komponenten:

- Diphenylmethandiisocyanat (MDI) Polymeres
- Diphenylmethandiisocyanat (PMDI)
- Toluylendiisocyanat (TDI)
- Naphthylendiisocyanat (NDI)
- Hexamethylendiisocyanat (HDI)
- Isophorondiisocyanat (IPDI)
- 4,4'-Diisocyanatodicyclohexylmethan (H12MDI).

Strategische Wege und Irrwege

Für die Zukunft einer Grundchemikalie, wie das Isophoron, sind Überlegungen und in Form einer Mindmap oder eines Polyeders ebenso von Bedeutung wie sorgfältig professionell erstellte Trend-Recherchen von Wirtschafts-Instituten.

Wo gehen die Produktions-Mengen und Verfahrens-Varianten beim Aceton, Phenol und Isophoron selbst hin? Wie entwickelt sich ihr Anwendung-Spektrum? Zumindest für die Trend-Betrachtung aus der Rückschau, aber auch mit Prognosen, bietet der Markt umfangreiche Erhebungen und Trend-Aktualisierungen an, die zwar teuer zu bezahlen sind, aber dafür auch einen bestmöglichen Boden für eigene Planungen gewähren.

Schon oft haben zu oberflächliche, zu selektive, wenig professionelle „Orakel-Studien“ oder die Beschränkung auf ein- oder zweidimensionale Betrachtungen ohne die Verzahnungen und internen Abhängigkeiten zu vermeidbaren Irrwegen geführt.

Der Münchner Biochemiker Prof. Dr. Frederic Vester (1925 – 2003) stellte bereits 1999 Ideen und Werkzeuge für den Umgang mit Komplexität durch vernetztes Denken zur Verfügung, von dem der erfahrene Unternehmensberater und Verkaufschef bei Renault, Ford und VW Daniel Goeudevert (* 1942) behauptet, dass dieser biokybernetische Denkansatz der einzig richtige Weg in die Zukunft sei [12].

Dieser Ansatz des vernetzten Denkens kann auch für die Zukunft des Lösungsmittels Isophoron von entscheidender Bedeutung sein. **CLB**

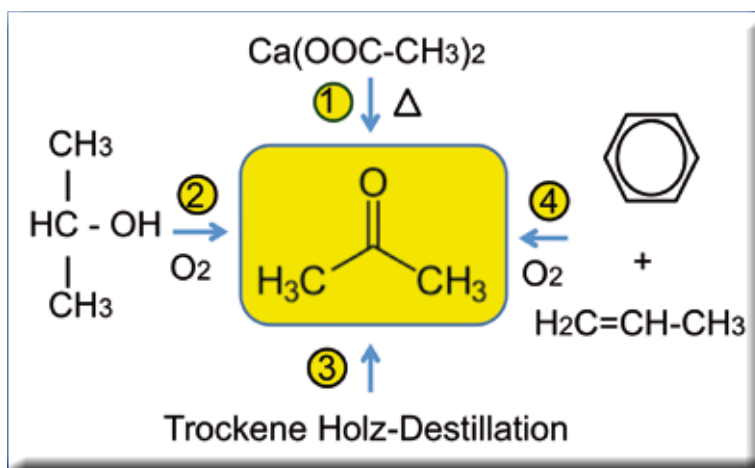


Abbildung 11: Synthese-Wege für Aceton.

Literatur

- [1] <http://de.wikipedia.org/wiki/Aceton>
- [2] <http://de.wikipedia.org/wiki/Polymethylmetacrylat>
- [3] http://de.wikipedia.org/wiki/Bisphenol_A
- [4] EU-Koordination Deutscher Naturschutzring (DNR): EU-weites Verbot für Bisphenol A in Babyflaschen ab Juni 2011. Meldung vom 26. November 2010.
- [5] Pressemitteilung der Europäischen Kommission vom 31. März 2011: EU-weites Verbot von Giftstoff in Babyflaschen ab dem 1. Juni
- [6] GESTIS-Stoffdatenbank des IFA
- [7] <http://de.wikipedia.org/wiki/Isophorondiamin> und US Patent 7256313
- [8] <http://de.wikipedia.org/wiki/Isophorondiisocyanat>
- [9] <http://de.wikipedia.org/wiki/Phenol>
- [10] <http://de.marketpublishers.com/lists/7431/news.html>
- [11] <http://de.wikipedia.org/wiki/Sauerland-Gruppe>
- [12] Frederic Vester, „Die Kunst vernetzt zu denken“, DVA, 1999, erweiterte Taschenbuch-Ausgabe: 2002, 7. Aufl. 2008 (dtv)

Abbildung 12: Abhängigkeiten der Isophoron-Herstellung von Rohstoffen, Bedarf und Synthese-Alternativen.

