

# Die Alkoholsynthese nach W. Reppe

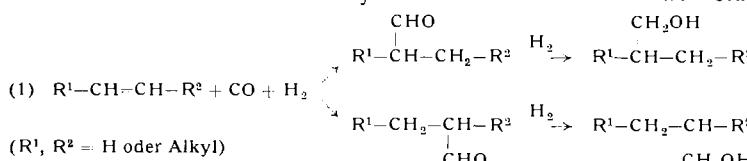
Von Dr. NIKOLAUS von KUTEPOW und Dr. HUBERT KINDLER

Badische Anilin- & Soda-Fabrik AG, Ludwigshafen am Rhein

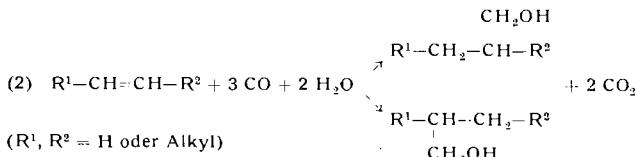
Bei der Alkoholsynthese nach W. Reppe läßt man Olefine, Kohlenmonoxyd und Wasser in Lösung miteinander reagieren. Als Katalysator dienen tertiäre Ammoniumsalze von mehrkernigen Eisen-carbonylhydriden. Ein kontinuierliches Verfahren zur Herstellung von Butanol aus Propylen, Kohlenmonoxyd und Wasser im technischen Maßstab wird beschrieben.

## Einleitung

Die Entwicklung der Petrochemie führte dazu, Olefine in größerem Umfang zur Gewinnung von Alkoholen heranzuziehen. Das älteste technische Verfahren beruht darauf, Wasser an Olefine anzulagern<sup>1)</sup>. K. Ziegler<sup>2)</sup> entwickelte ein Verfahren zur Herstellung von höheren, primären Alkoholen, bei dem Aluminiumtrialkyle mit höheren Alkylresten aus niederen Olefinen aufgebaut und anschließend zu den entsprechenden Alkoholaten oxydiert werden. Bei den sogenannten Carbonylierungsverfahren, der Oxo-reaktion und der Alkoholsynthese nach W. Reppe, erhält man aus Olefinen die um ein C-Atom reicherer, primären Alkohole. Nach dem Oxoverfahren<sup>3)</sup> werden Olefine bei 110 — 190 °C und etwa 200 atü in Gegenwart von Kobalt-carbonyl-Katalysatoren zunächst mit Kohlenmonoxyd und Wasserstoff zu einem Gemisch der isomeren Aldehyde umgesetzt und diese in einer zweiten Stufe bei 180 °C und 200 atü zu den isomeren Alkoholen hydriert:



Die Alkoholsynthese, die W. Reppe<sup>4)</sup> 1942 entdeckte, geht von Olefinen, Kohlenmonoxyd und Wasser aus. Dieses Verfahren unterscheidet sich vom Oxo-Verfahren dadurch, daß in einer Reaktionsstufe bei niedrigem Druck und niedriger Temperatur Alkohole gebildet werden.



Die Reaktion verläuft unter milden Bedingungen. Äthylen und Propylen lassen sich bereits bei etwa 80 °C und Atmosphärendruck — wenn auch sehr langsam — umsetzen. Die günstigsten Reaktionsbedingungen sind 10 bis 15 atü Druck und 90 bis 110 °C. Höhere Olefine erfordern höhere Temperaturen und Drucke. An der Doppelbindung verzweigte Olefine sind der Umsetzung schwer zugänglich.

Ähnlich wie beim Oxoverfahren kann sich das Kohlenmonoxyd an beide C-Atome der Doppelbindung anlagern, so daß sich gegebenenfalls zwei isomere Alkohole bilden (vgl. Gl. 2), doch ist der Anteil an i-Alkohol geringer, z. B. bei Butanol etwa 15%.

Als Katalysatoren werden Derivate von Eisencarbonylwasserstoffen verwendet, die sich unter den Reaktionsbedingungen aus Eisenpentacarbonyl, einem Amin und Wasser bilden. Der Katalysator ist in einer wasserhaltigen

<sup>1)</sup> Überblick s. P. W. Sherwood, Chem. Age 72, 481 [1955].

<sup>2)</sup> K. Ziegler, F. Krupp u. K. Zosel, Angew. Chem. 67, 425 [1955].

<sup>3)</sup> Überblick in Houben-Weyl: Methoden der organischen Chemie, Georg Thieme, Stuttgart 1954, Bd. VII/1, S. 55.

<sup>4)</sup> W. Reppe u. H. Vetter, Liebigs Ann. Chem. 582, 133 [1953].

Reaktionsmischung gelöst, in der der erzeugte Alkohol und überschüssiges Amin, z. T. als Carbonat und Formiat<sup>5)</sup>, als Lösungsvermittler wirken.

Als basische Komponente des Katalysators kommen für die Alkoholsynthese nur wenige Amine in Frage. Primäre und sekundäre Amine werden unter den Bedingungen der Alkoholsynthese zu tertiären Aminen alkyliert. (Auf dieser Reaktion beruht eine Methode zur Herstellung von alkylierten Aminen aus Olefinen, Kohlenmonoxyd, Wasser und Ammoniak bzw. primären oder sekundären Aminen<sup>6)</sup>). Die neu eingetretenen Alkylreste sind um ein C-Atom reicher als das verwendete Olefin). Auch können die Alkylgruppen am Stickstoff gegen den Alkylrest des entstehenden Alkohols ausgetauscht werden.

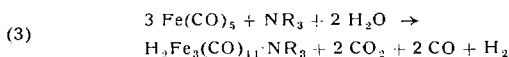
Wir fanden schließlich, daß sich Pyrrolidin-Derivate besonders leicht mit Eisencarbonylen umsetzen, und daß der Pyrrolidin-Ring gegen eine Umalkylierung bemerkenswert stabil ist. Wir verwenden deshalb ein N-Alkylpyrrolidin

d. n., dessen Alkylrest die gleiche C-Zahl wie der entstehende Alkohol besitzt, im Falle der Butanol-synthese also N-Butylpyrrolidin. Arbeitet man ohne Amin, so kann sich das Carbonylferrat nicht bilden. Die Reaktion führt dann zu Carbonsäuren, in Analogie zu der Umsetzung von Olefinen mit Kohlenmonoxyd und Wasser in Gegenwart von Nickelcarbonyl als Katalysator<sup>7)</sup>.

## Katalytisch wirksame Eisencarbonyl-Komplexe

Die Umsetzungen zwischen Metallcarbonylen und Alkalien bzw. Aminen sind aus den grundlegenden Untersuchungen von W. Hieber<sup>8)</sup> unter dem Namen Basenreaktion bekannt. Die Säurenatur der Metallcarbonylwasserstoffe wurde von Reppe entdeckt<sup>4)</sup> und von Hieber näher untersucht.

1952 fanden wir<sup>9)</sup>, daß bei der Umsetzung von Eisenpentacarbonyl mit Aminen in Gegenwart von Wasser neuartige Carbonylkomplexe entstehen, die sich als identisch mit den bei der Alkoholsynthese wirksamen Katalysatoren erwiesen. Ihre Bildung läßt sich, wie sich aus der Analyse des Komplexes und der bei der Reaktion entstehenden Gase schließen läßt, durch Gl. (3) wiedergeben.



Die neuen Eisencarbonyl-Komplexe bilden tiefrote, schwarz glänzende Kristalle, die sich in polaren organischen Lösungsmitteln mit tief dunkelroter Farbe gut lösen; in Wasser sind sie unlöslich. An der Luft sind sie in reinem, kristallisiertem Zustand recht beständig. Ihre Lösungen wirken sehr stark reduzierend; sie werden bereits durch

<sup>5)</sup> W. Reppe, N. v. Kutepow u. M. Heintzeler, DBP 874301 (1951), BASF.

<sup>6)</sup> W. Reppe, DBP 839800 (1943), BASF.

<sup>7)</sup> W. Reppe u. H. Kröper, Liebigs Ann. Chem. 582, 38 [1953].

<sup>8)</sup> W. Hieber, Angew. Chem. 61, 465 [1952]; ebenda 72, 795 [1960]; W. Hieber, J. Seldmeyer u. R. Werner, Chem. Ber. 90, 278 [1957].

<sup>9)</sup> M. Heintzeler u. N. v. Kutepow, DBP 948058 (1952), BASF.

Luft rasch zersetzt. Durch Säuren, ebenso durch Alkohole in der Wärme, werden sie langsam zu Eisentetracarbonyl neben Eisenpentacarbonyl und Eisen(II)-Ionen abgebaut, wobei sich Kohlenmonoxyd und Wasserstoff entwickeln. Mit konzentrierter Ameisensäure bildet sich bei Zimmertemperatur in nahezu quantitativer Ausbeute Eisentetracarbonyl<sup>10</sup>); diese Reaktion eignet sich zur präparativen Darstellung dieser Verbindung.

Die Struktur der beschriebenen Eisencarbonyl-Amin-Verbindungen konnte durch physikalisch-chemische Untersuchungen aufgeklärt werden. Leitfähigkeitsmessungen zeigten, daß die Komplexe starke Elektrolyte sind. Nach Überführungsmessungen ist das Kation ein Ammonium-Ion, während das Anion das gesamte Eisen enthält. Danach sind die Verbindungen als Ammoniumsalze eines trimeren Eisencarbonylwasserstoffs aufzufassen.



Nach den Ergebnissen der potentiometrischen Titration ist der trimere Eisencarbonylwasserstoff  $\text{H}_2\text{Fe}_3(\text{CO})_{11}$  eine zweiprotonige Säure mit einer starken ersten und einer sehr schwachen zweiten Dissoziationsstufe.

UV- und IR-Aufnahmen (Abb. 1) zeigen, daß der aus den Komponenten hergestellte und der in der tiefroten Reak-

seits dient er als CO-Überträger, andererseits wirkt er als hydrierendes Agens. Aldehyde und Ketone werden nämlich bei erhöhter Temperatur durch Lösungen von Carbonyl-triferraten glatt zu Alkoholen hydriert; durch molekularen Wasserstoff werden sie dagegen unter den Synthesebedingungen nicht hydriert.

### Mechanismus der Alkoholbildung

Über den Reaktionsmechanismus der durch Metalcarbonyle katalysierten Alkoholsynthesen sind mehrfach Überlegungen angestellt worden. Eine der Theorien<sup>11</sup>) geht davon aus, daß aus dem Olefin und Eisencarbonylwasserstoff ein substituiertes Eisencarbonylhydrid entsteht, das in einem weiteren Reaktionsschritt Kohlenmonoxyd zu einem Acyl-derivat des Eisencarbonylwasserstoffs addiert. Durch Aufnahme eines Hydrid-Ions und weitere Einwirkung von Wasserstoff entsteht der Alkohol. Eine andere Theorie<sup>12</sup>) nimmt an, daß das Olefin primär an ein Metalcarbonyl anlagert wird, so daß es räumlich und bindungsmäßig zur Addition einer CO-Gruppe aus diesem Carbonylkomplex befähigt ist.

Auf Grund der experimentellen Befunde und theoretischer Überlegungen haben wir über den Mechanismus der Alkoholsynthese nach *Reppé* folgende Vorstellung:

Wir gehen von der Annahme einer Sechsring-Struktur (I) für Eisentetracarbonyl aus, die mit den röntgenographischen Untersuchungen von *Dahl* und *Rundle*<sup>13</sup>) in Einklang steht. Da  $\text{Fe}_3(\text{CO})_{12}$  mit Amin und Wasser besonders leicht Carbonyl-triferrate  $[\text{NR}_3\text{H}]^+ [\text{HFe}_3(\text{CO})_{11}]^-$  bildet, könnte diesem Anion eine analoge Ringstruktur (II) zukommen, in der eine CO-Brücke (Einelektronenbindungen) durch eine Wasserstoffbrücke ersetzt ist.

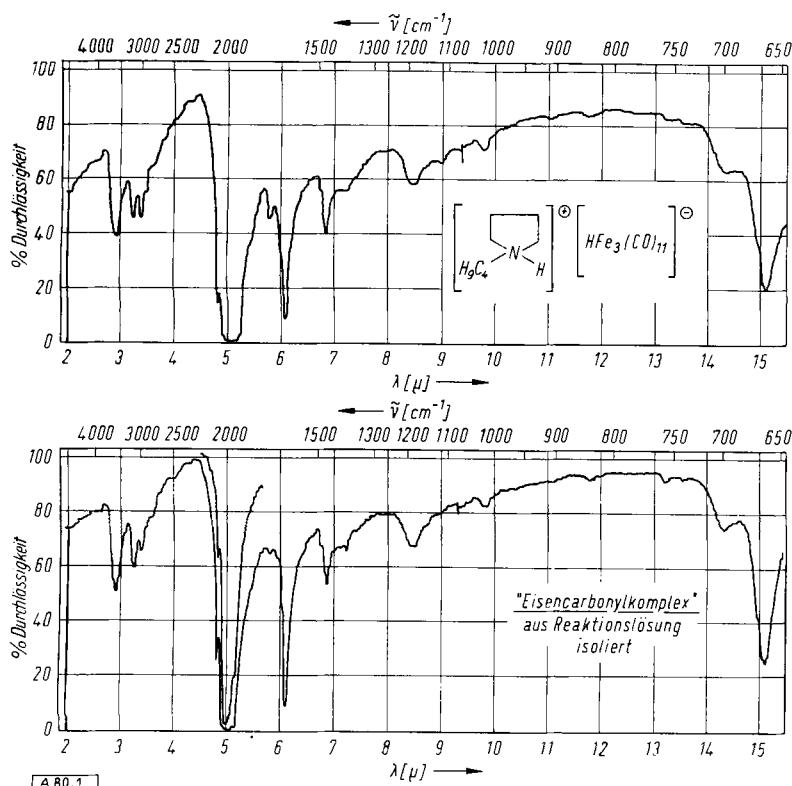
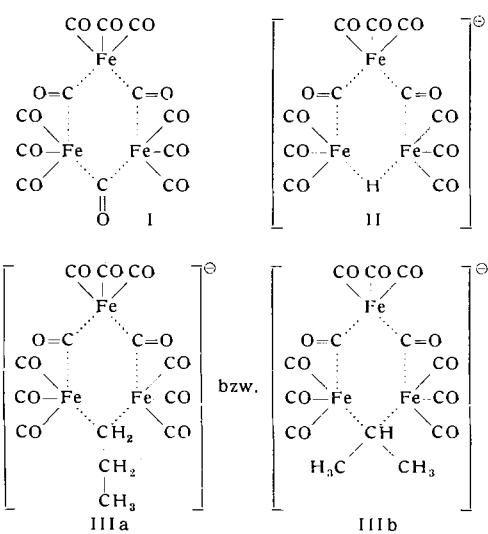


Abb. 1. IR-Spektren: N-Butyl-pyrrolidinium - hydrogen-undecacarbonyl triferrat (oben); Eisencarbonyl-Komplex, aus Reaktionslösung der Butanolsynthese isoliert (unten)

tionslösung der Alkoholsynthese vorliegende Komplex, der aus dieser Lösung auch in kristallisierter Form säulenchromatographisch isoliert werden konnte, identisch sind. Man kann dieses Salz des trimeren Eisencarbonylwasserstoffs in Abwesenheit von Kohlenmonoxyd mit Olefin und Wasser bei 90 bis 100 °C umsetzen und erhält so in rascher Reaktion die entsprechenden Alkohole; der Komplex wird hierbei zu Eisen(II), kleineren Mengen Eisenpentacarbonyl und  $\text{CO}_2$  abgebaut.

Der als Katalysator wirksame Eisencarbonylwasserstoff-Komplex erfüllt gleichzeitig zwei Funktionen: einer-

<sup>10</sup>) M. Heintzeler, DBP 928044 (1953), BASF.



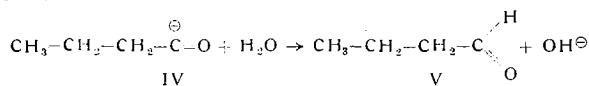
Das Hydrid II addiert Propylen unter Bildung eines Olefin-Eisencarbonyl-Komplexes (III). Diese Anlagerung kann man sich in der Weise vorstellen, daß das Propylen ( $\text{CH}_3-\overset{\oplus}{\text{CH}}-\overset{\ominus}{\text{CH}}_2 \leftrightarrow \text{CH}_3-\overset{\ominus}{\text{CH}}-\overset{\oplus}{\text{CH}}_2$ ) den Brückenwasserstoff nucleophil substituiert und anschließend das Hydrid-Ion am positiv geladenen Kohlenstoffatom addiert. Die überwiegende Bildung von n-Butanol erklärt sich einmal durch die Reaktion der bevorzugten mesomeren Grenz-

<sup>11</sup>) H. Kröper, in *Houben-Weyl*: Methoden der organischen Chemie, Georg Thieme, Stuttgart 1955, Bd. IV/2, S. 392.

<sup>12</sup>) H. W. Sternberg, R. Markby u. I. Wender, J. Amer. chem. Soc. 79, 6116 [1957].

<sup>13</sup>) L. F. Dahl u. R. E. Rundle, J. chem. Physics 26, 1751 [1957].

form des Propylen, zum anderen durch die sterische Begünstigung der Form IIIa. Aus dem Komplex III wird das Carbenat-Ion IV abgespalten, das mit Wasser Butyraldehyd (V) bildet:



Der Aldehyd wird schließlich durch ein weiteres Molekül II zum Alkohol hydriert.

Aus dem Katalysatorrest bildet sich mit Kohlenmonoxid und Wasser die Verbindung II zurück. Diese Regenerierung läuft nicht ganz vollständig ab, so daß ein kleiner Teil des Katalysators durch Disproportionierung Eisen(II)-Ionen bildet.

### Technisches Verfahren zur Herstellung von Butanol

In den letzten Jahren wurde die Synthese von Butanol aus Propylen, Kohlenmonoxid und Wasser zu einem kontinuierlichen Verfahren entwickelt. Die Arbeitsweise umfaßt folgende Verfahrensstufen:

1. Synthese
2. Abtrennung des Butanols
3. Abtrennung der gasförmigen Nebenprodukte
4. Reinigung des Rohbutanols.

#### 1. Synthese

Die Apparatur zur Herstellung von Butanol ist in Abb. 2 vereinfacht dargestellt.

In einem Druckbehälter werden Eisenpentacarbonyl, N-Butylpyrrolidin und Wasser als Komponenten des Katalysators und außerdem Butanol als Lösungsmittel eingefüllt. Beim Erhitzen auf 190 °C entsteht innerhalb von 2 bis 4 Stunden die homogene Katalysatorlösung, die neben Eisenpentacarbonyl das Butylpyrrolidinium-Salz des Carbonyltriferrats enthält. Leitet man Kohlenoxyd und Propylen ein, so setzt alsbald bei erhöhtem Druck die Bildung von Butanol ein.

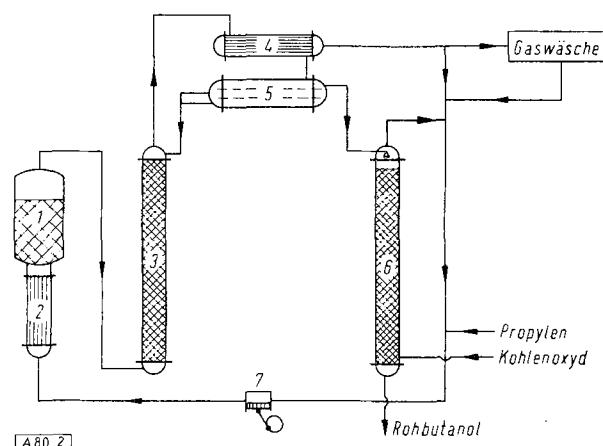


Abb. 2. Apparatur zur Synthese und Abtrennung von Butanol  
1 = Reaktionsbehälter mit Katalysatorlösung, 2 = Vorwärmer, 3 = Glockenbodenkolonne zur Entfernung von Butylpyrrolidin aus dem dampfhaltigen Kreisgas, 4 = Wasserkühler, 5 = Trenngefäß, 6 = Druckkolonne zur Abtrennung von Eisenpentacarbonyl, 7 = Gasumlaufpumpe

Man läßt die Reaktion bei einem Druck von 15 atü ablaufen. Propylen und Kohlenmonoxid müssen vor der Umsetzung in Lösung gehen und mit der Katalysatorlösung innig durchmischt werden.

Man wählt die Reaktionsbedingungen so, daß Propylen und Kohlenmonoxid in einem Durchgang nur teilweise umgesetzt werden, und läßt die Gase wiederholt durch die Reaktionslösung kreisen. Auf diese Weise ist es möglich, das Konzentrationsverhältnis der Gase möglichst konstant zu halten. Diese Konstanz ist wünschenswert, weil Änderungen, z. B. des Kohlenmonoxid-Par-

tialdrucks, das Mengenverhältnis von Eisenpentacarbonyl und Carbonyltriferrat verschieben und damit die Reaktion beeinflussen. Aus dem Katalysator bildet sich in geringem Ausmaß Eisen(II), das mit Kohlensäure in Eisencarbonat übergeht. Das Eisencarbonat scheidet sich feinkristallin ab und kann entfernt werden.

#### 2. Abtrennung des Butanols

Wegen der Eigenschaften des Eisencarbonyl-Komplexes ist es vorteilhaft, das gebildete Butanol in Gegenwart von Kohlenmonoxid unter erhöhtem Druck aus der Reaktionslösung abzdestillieren, wobei das Kohlenmonoxid die Carbonyle stabilisiert. Besonders einfach gelingt dies, wenn man bei Synthesedruck und -temperatur arbeitet und das Kreisgas als kohlenmonoxydhaltiges Schutzgas benutzt<sup>14)</sup>.

Das Kreisgas strömt nach Verlassen des Reaktionsraums bei Synthesedruck durch eine Glockenbodenkolonne. In dieser Kolonne wird das Amin als die Komponente mit dem niedrigsten Dampfdruck durch Stoffaustausch mit der Rücklaufflüssigkeit im unteren Kolonnteil zurückgehalten und gelangt wieder in den Reaktionsraum. Das vom Kopf der Kolonne abströmende Gas enthält die Dämpfe von Butanol, Wasser und Eisenpentacarbonyl, die durch Kondensation vom Gasstrom abgetrennt werden. Das Kondensat fließt in ein Trenngefäß, das Gas kehrt über die Kreisgaspumpe in das Reaktionsgefäß zurück.

Das Kreisgaskondensat bildet bei Raumtemperatur ein dreischichtiges Gemisch, das im Trenngefäß in die einzelnen Phasen zerlegt wird. Die untere Schicht besteht im wesentlichen aus Eisenpentacarbonyl, die mittlere Schicht aus Wasser. In der oberen butanolreichen Schicht ist Eisenpentacarbonyl und Wasser gelöst. Diese wird einer weiteren, unter Synthesedruck betriebenen Kolonne zugeleitet, durch die das für die Butanolbildung benötigte frische Kohlenmonoxid strömt. Durch die gegenläufige Bewegung der beiden Phasen wird das Eisenpentacarbonyl aus dem Gemisch abgetrennt.

#### 3. Abtrennung der gasförmigen Nebenprodukte<sup>15)</sup>

Aus der im Syntheseteil zirkulierenden Gasphase werden laufend die weiteren Reaktionsprodukte Kohlendioxid, Wasserstoff und Propan von dem nicht umgesetzten Propylen und Kohlenmonoxid getrennt. Dazu wird ein Teilstrom des Kreisgases in eine Druckwasserwäsche eingeschleust und nach dem Gegenstromprinzip in einer Reihe von Waschtürmen zerlegt. Die wiedergewonnenen gasförmigen Ausgangsstoffe gehen in die Synthese zurück.

#### 4. Reinigung des Rohbutanols

Das aus der Syntheseapparatur ablaufende Rohbutanol enthält neben 7% Wasser kleine Mengen Butylpyrrolidin und Spuren Eisenpentacarbonyl. Das Amin wird auf chemischem Weg entfernt. Das Eisencarbonyl wird oxydierend, z. B. durch Luft, zerstört. Anschließend wird zunächst das restliche Wasser abdestilliert und dann das Isomergemisch durch Destillation in reines Isobutanol und Normalbutanol zerlegt.

#### Ausbeute und Nebenprodukte

Die Butanolausbeute, bezogen auf Propylen, beträgt ca. 90%. 4% des eingesetzten Propylen werden zu Propan hydriert. In der gleichen Höhe von 90% liegt die Butanolausbeute bezogen auf Kohlenmonoxid. Auf eingesetztes Kohlenoxyd berechnet, entstehen etwa 6% Wasserstoff.

<sup>14)</sup> W. Büche u. H. Kindler, DAS 1016235 (1955), BASF.

<sup>15)</sup> H. Kindler, DAS 1067434 (1956), BASF.

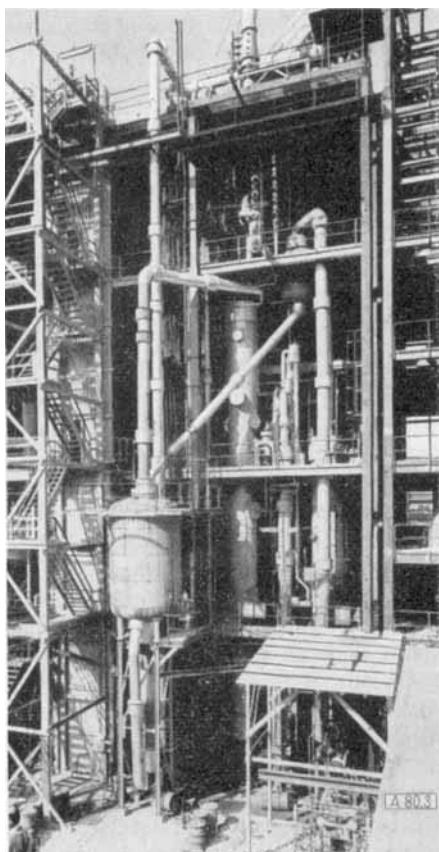


Abb. 3. Versuchsanlage für die Butanolsynthese

Infolge der milden Reaktionsbedingungen bilden sich nur etwa 0,2% flüssige Nebenprodukte. Der Anteil an C<sub>4</sub>-Äthern und Aldehyden im Rohbutanol liegt insgesamt unter 0,1%. Das Verfahren nach Reppe ist besonders darin anderen Butanolsynthesen überlegen.

Die Verluste an Butylpyrrolidin und Eisenpentacarbonyl sind gering. Die Haltbarkeit der Katalysatorlösung ist gut. Man kann sie mindestens ein halbes Jahr ohne Regenerierung verwenden; wenn erforderlich, läßt sie sich auf einfache Weise regenerieren<sup>16)</sup>. Verunreinigungen der Ausgangsgase durch Schwefelverbindungen, Kohlendioxyd, Wasserstoff und Propan beeinflussen die Reaktion nicht.

In der BASF wird seit längerer Zeit mit gutem Erfolg in einem Versuchsbetrieb (Abb. 3) nach dem beschriebenen Verfahren gearbeitet. Als Niederdruckverfahren, das zudem keinerlei Korrosionsprobleme stellt, läßt es sich apparativ einfach gestalten und sicher betreiben. Der Energiebedarf ist gering, das Verfahren daher sehr wirtschaftlich.

Prof. Dr. W. Reppe hat die von ihm gefundene Alkoholsynthese mit einer Reihe von Mitarbeitern bis zur technischen Reife gebracht. Besonderen Anteil an der Entwicklung der Synthese hatten Dr. M. Heintzeler bei der Bearbeitung der Katalysatoren, ferner Dr. W. Pfab, Dr. H. Detzer und Dr. K. Dettke durch ihre physikalisch-chemischen und analytischen Untersuchungen. An der Erprobung und Entwicklung des Verfahrens waren besonders Dr. W. Büche, Dr. K. Eisfeld und Dr. H. Jenne beteiligt.

Eingegangen am 31. August 1960 [A 80]

<sup>16)</sup> H. Kindler u. H. G. Trieschmann, DAS 1088038 (1959), BASF.

## Über die Ganglioside des Gehirns

Von Prof. Dr. RICHARD KUHN\*) gemeinsam mit Dipl.-Chem. H. EGGE sowie mit Dr. Dr. R. BROSSMER, Dr. ADELIN GAUHE, Dr. P. KLESSE, W. LOCHINGER, E. RÖHM, H. TRIESEHMANN und DOROTHEA TSCHAMPEL

Max-Planck-Institut für Medizinische Forschung, Heidelberg, Institut für Chemie

Das Gangliosid aus Rinderhirn ließ sich chromatographisch in zwei kristallisierende Komponenten zerlegen. Das schneller wandernde Gangliosid (G<sub>1</sub>) ist aus je 1 Mol Stearinsäure, Sphingosin, Glucose, Galaktose, Acetylgalaktosamin und Lactamsäure (N-Acetyl-neuraminsäure) aufgebaut. Die Verknüpfungsweise der 6 Bausteine wird aus Ergebnissen der Permethylierung mit CH<sub>3</sub>I und BaO + Ba(OH)<sub>2</sub> bzw. SrO + Sr(OH)<sub>2</sub> in Dimethylformamid und partieller Acetolysen abgeleitet. Dabei zeigt sich, daß ein aus der Kuhmilch schon früher isoliertes Trisaccharid auch Baustein des Gangliosids G<sub>2</sub> aus Rinderhirn ist. Aus Frauenmilch konnten neue saure Oligosaccharide gewonnen werden. Das Gangliosid G<sub>1</sub> ist komplizierter gebaut und vermutlich noch nicht einheitlich. — An physiologischen Eigenschaften der Ganglioside G<sub>1</sub> und G<sub>2</sub> werden besprochen: die Steigerung der Körpertemperatur; die Erhöhung der Resistenz gegenüber Coli-Infektionen; das Bindungsvermögen für Tetanustoxin; die Spaltbarkeit durch Influenzavirus und durch das receptor destroying enzyme (RDE).

Wir leben im Zeitalter der Elektronik. Elektronische Rechenmaschinen, Elektronengehirne, wie man auch sagt, sind in der Lage, blitzschnell Rechenoperationen durchzuführen, zu denen man mit Bleistift und Logarithmentafel kaum vorstellbare Zeiten benötigen würde. Mit der rapiden Entwicklung der Elektronik hat die Erforschung des menschlichen Gehirns nicht Schritt gehalten.

Eine elektronische Rechenmaschine vom Typ einer IBM-Maschine besteht im wesentlichen aus einem Zylinder, der z. B. 40 Ringe mit je 50 Speicherzellen trägt. Jede ein-

zelne dieser Speicherzellen vermag eine 10stellige Zahl aufzunehmen, das sind 40 · 50 = 2000 zehnstellige Zahlen. Demgegenüber beträgt die Zahl der Ganglienzellen im menschlichen Gehirn — sie ist noch von niemandem genau gezählt worden, aber man kann sie abschätzen — etwa 12–14 Milliarden. Diese Einheiten haben stofflich gar nichts mit denen der Rechenmaschinen gemeinsam. Auf alle Fälle sind aber die Ganglienzellen des Gehirns, wenn auch nicht alle, so doch ein großer Teil von ihnen, notwendig, um derartige elektronische Rechenmaschinen zu konstruieren. Und überdies muß das menschliche Gehirn diesen Rechenmaschinen ständig die sogenannte Programmierung zuschieben, das heißt das, was sie auf Grund ihrer Automatik in Blitzschnelle zahlenmäßig weiter verarbeiten können.

\*) Nach einem Vortrag auf der X. Tagung der Nobelpreisträger in Lindau am 6. Juli 1960. Die hauptsächlichen Ergebnisse waren auch Inhalt der Robert-Gnehm-Vorlesung in Zürich am 24. Juni 1960.