

KFK-208

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Januar 1964

KFK 208

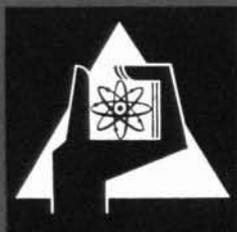
Institut für Kernverfahrenstechnik

Direkte Umwandlung von Kernenergie
in chemische Energie

U. Schindewolf

Gesellschaft für Kernforschung
Zentralbücherei

1. Juli 1964



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

SONDERDRUCK aus der Zeitschrift

CHEMIE-INGENIEUR-TECHNIK

Zeitschrift für technische Chemie, Verfahrenstechnik und Apparatewesen

36. Jahrgang 1964

Heft 1

Seite 15-23

Verlag Chemie GmbH · Weinheim/Bergstr.

Direkte Umwandlung von Kernenergie in chemische Energie

Von Dr. U. Schindewolf

Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Kernverfahrenstechnik der T. H. Karlsruhe

Gesellschaft für Kernforschung m. b. H.
Zentralbücherei

1. Juli 1964

Büroexemplar

Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. Karlsruhe

Nr.

2

Direkte Umwandlung von Kernenergie in chemische Energie

VON DR. U. SCHINDEWOLF

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE,
INSTITUT FÜR KERNVERFAHRENSTECHNIK DER T. H. KARLSRUHE

Durch strahlenchemische Prozesse lassen sich endotherme chemische Reaktionen erzwingen, in denen die Strahlenenergie teilweise in chemische Energie umgewandelt wird. Dadurch lassen sich aus einfachen Ausgangsstoffen wertvollere Produkte gewinnen. Als wirtschaftliche Strahlenquellen kommen hierfür nur Kernreaktoren (Chemie-Kernreaktoren) in Frage. Da jedoch nur wenige Prozente der gesamten Reaktorenergie als chemische Energie gebunden werden, muß auch die verbleibende Reaktorenergie genützt werden. Ein Chemie-Kernreaktor wird nur dann wirtschaftlich arbeiten, wenn der Wert des erzeugten chemischen Produktes mit dem Wert der erzeugten Energie mindestens vergleichbar ist.

Die unvermeidlichen radioaktiven Verunreinigungen der erzeugten chemischen Verbindungen dürften der großtechnischen Anwendung von Chemie-Kernreaktoren enge Grenzen ziehen.

Nach einer Betrachtung der Grundlagen chemonuclearer Prozesse werden die technischen Möglichkeiten und die wirtschaftlichen Aussichten der Synthese von Glykol aus Methanol und von Stickoxyden aus Luft diskutiert.

In allen hochindustrialisierten Ländern ist der Wert der chemischen Produkte, die durch endotherme, also Energie verbrauchende Reaktionen gewonnen werden, fast zehnmal höher als der Wert der erzeugten elektrischen Energie. Neben der Umwandlung von Kernenergie in elektrische Energie sind deshalb auch Verfahren von Interesse, die die direkte Umwandlung von Kernenergie in chemische Energie ermöglichen. Ein solches Verfahren setzt voraus, daß man die bei Kernumwandlungen frei werdenden energiereichen Kernstrahlen, also die α -, β - und γ -Strahlen, Röntgenstrahlen, Rückstoßkerne der Kernspaltung und schnellen Neutronen, direkt auf chemische Systeme einwirken lassen kann und dadurch chemische Reaktionen erzwingt, die von allein aus energetischen Gründen nicht ablaufen können¹⁾.

Strahlenchemische Reaktionen, die nur unter ständiger Aufnahme von Energie verlaufen (in der Literatur auch chemonucleare Reaktionen genannt), wie z. B. die Radiolyse des Wassers



sind seit der Entdeckung der Radioaktivität bekannt²⁾; es wird heute sogar angenommen, daß die erste Synthese komplizierterer organischer Verbindungen, z. B. Aminosäuren, Nucleinsäuren usw., auf der Erde durch die Einwirkung von UV-Strahlen, Glimmentladungen und Kernstrahlen auf die damals herrschende Atmosphäre aus Wasser, Wasserstoff, Methan, Ammoniak, Kohlenoxyden, Schwefelwasserstoff usw. ausgelöst wurde³⁾. Denn man konnte im Laboratorium durch Bestrahlen der einfachsten Ausgangsverbindungen eine

¹⁾ Von den Betrachtungen sollen exotherme Reaktionen ausgeschlossen werden, da diese meist als Kettenreaktionen ablaufen und durch Strahleneinwirkungen ebenso wie durch einmalige Zufuhr thermischer Energie oder durch Zugabe eines Katalysators induziert werden können; siehe z. B. die Äthylbromid-Produktion aus Äthylen und Bromwasserstoff, die durch γ -Strahlen induziert wird⁴⁾.

Reihe von Aminosäuren, Purinbasen usw. im Submikrogramm-Maßstab herstellen⁴⁾.

Seit Strahlenquellen hoher Intensität zur Verfügung stehen, ist die Möglichkeit für strahlenchemische Reaktionen zur Erzeugung energiereicher chemischer Produkte auch im technischen Maßstabe gegeben. Ob solche Verfahren allerdings mit den altbekanntesten technischen Prozessen konkurrieren können, läßt sich heute noch nicht mit Sicherheit vorhersagen.

Allgemeine Voraussetzungen

An dem folgenden, bewußt ungünstig ausgewählten Beispiel soll abgeschätzt werden, von welchen Faktoren die Wirtschaftlichkeit strahlenchemischer Prozesse in technischem Maßstabe abhängt und was für Produkte man herstellen kann. Es sei zunächst die Herstellung von Wasserstoff nach Reaktion (1) durch Einwirkung von γ -Strahlen einer ⁶⁰Co-Quelle auf Wasser betrachtet.

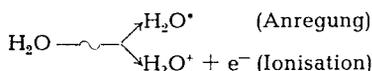
Der G-Wert⁵⁾ für die Bildung von Wasserstoff ist etwa 0,5 Molekeln je 100 eV⁵⁾, d. h. 200 eV müssen für die Bildung einer Molekel oder 4600 kcal für die Bildung eines Mols Wasserstoff aufgewandt werden (1 eV/Molekel \approx 23 kcal/Mol), während die Wärmetönung der Reaktion nur 182,4 kcal/Mol ist. Der energetische Wirkungsgrad der Radiolyse des Wassers ist ebenso wie der der meisten anderen endothermen, durch Kernstrahlen ausgelösten Reaktionen sehr klein (< 5%). Warum das so ist, kann man leicht verstehen, wenn man die während der Bestrahlung ablaufenden Reaktionen kennt. Die Strahlung verliert durch Wechselwirkung mit den Elektronen der durchlaufenden Materie ihre Energie. Die Elektronen werden dabei, je

⁵⁾ Der G-Wert gibt an, wieviel Molekeln einer Substanz je 100 eV im chemischen System absorbiertes Energie gebildet werden.

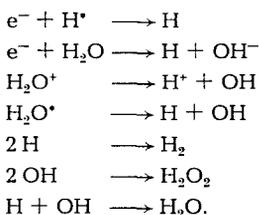
nach der übertragenen Energie, auf höhere Energieniveaus gehoben oder ganz aus dem Atom- oder Molekelverband entfernt. Die herausgeschlagenen Elektronen können ihrerseits, wenn sie genügend Energie haben, weitere Anregungs- und Ionisierungsprozesse auslösen. Die absorbierte Energie wird dabei zu etwa gleichen Teilen zur Anregung und zur Ionisierung verbraucht. An diese energieverbrauchenden Primärreaktionen schließen sich die exothermen Folgereaktionen (Dunkelreaktionen) an, die zur Bildung neuer Molekeln führen.

Entsprechend der unterschiedlichen Wechselwirkungswahrscheinlichkeit der einzelnen Kernstrahlenarten mit den Elektronen der Materie unterscheiden sich die Strahlen in der je Weg-Einheit abgegebenen Energie und damit in der Dichte der in einer Strahlenspur erzeugten angeregten Molekeln und Ionen. Deshalb mag die Ausbeute einzelner Produkte von der Strahlenart abhängen, es werden dabei aber keineswegs verschiedenartige Reaktionen ablaufen oder verschiedenartige Produkte gebildet.

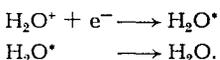
Der strahlenchemische Primärvorgang der Radiolyse des Wassers kann durch



beschrieben werden^{5,6}). In den sich anschließenden Reaktionen entstehen H- und OH-Radikale, die in verschiedener Weise rekombinieren und H₂O₂ und H₂ bilden oder auch in Umkehrung ihrer Entstehung Wasser zurückbilden.



Leider geht ein Teil der Radikale durch die letzte Reaktion wieder verloren, wobei die in den Radikalen gespeicherte Energie in Wärme verwandelt wird. Aber auch die von den primär gebildeten, angeregten und ionisierten Molekeln aufgenommene Energie kann, ohne zu weiteren Reaktionen verbraucht zu werden, durch Desaktivierung als Wärme abgegeben werden:



Schließlich kann der entstandene Wasserstoff durch Angriff eines Radikals wieder zerstört werden:



Aus diesen Gründen, also wegen der unerwünschten Radikalrekombination, der Desaktivierung der angeregten Molekeln und der Zerstörung des Reaktionsproduktes durch weitere Strahleneinwirkungen sind die strahlenchemischen Prozesse vom energetischen Standpunkt aus nicht sehr ergiebig.

4600 kcal, die zur Erzeugung 1 Mols Wasserstoff durch γ -Strahlen aufgewandt werden müssen, entsprechen einer Energie von 5,3 kWh (10^8 kcal = 1,16 kWh). Da die Energie der γ -Strahlen je nach Größe der Strah-

Tabelle 1. Strahlungskosten technischer Strahlenquellen

Strahlenquelle	Strahlung	Energie	Strahlungsleistung	Strahlungskosten DM/kWh
Beschleuniger ⁷⁾	Elektronen	bis 10 MeV	3 bis 100 kW	34 bis 8
⁶⁰ Co-Quelle ⁷⁾	γ	1,17 u. 1,33 MeV	3 bis 30 kW	38 bis 13
¹³⁷ Cs-Quelle ⁷⁾	γ	0,66 MeV	3 bis 30 kW	46 bis 17
Chemie-Kernreaktor ⁸⁾	Neutronen + γ	bis 10 MeV	1 bis 4 MW	0,5 bis 0,05
Chemie-Kernreaktor ⁹⁾	Spaltbruchstücke	85 MeV	bis 200 MW	0,1 bis 0,02

lungsquelle 13 bis 38 DM/kWh kostet, Tabelle 1, ist der so erzeugte Wasserstoff mit Kosten von 70 bis 200 DM je Mol belastet. Wasserstoff, der durch Elektrolyse, Kohlenmonoxyd-Konvertierung oder aus Erdgas hergestellt wird, kostet nicht mehr als 0,5 Pfg./Mol, ist also wenigstens zehntausendmal billiger als der durch Radiolyse von Wasser mit γ -Strahlen erzeugte Wasserstoff.

Dieser bewußt ungünstig ausgewählte Vergleich soll zeigen, welche Bedingungen an die ökonomische Ausnutzung der Kernenergie zur Erzeugung energiereicher chemischer Produkte geknüpft sind. Zunächst muß eine billigere Strahlenquelle herangezogen werden

Um mit konventionellen Kraftwerken konkurrieren zu können, darf die in Kernkraftwerken erzeugte elektrische Energie mit nur zwei bis drei Pfennigen je kWh belastet sein. Folglich kann auch die Strahlenenergie in einem Kernreaktor, der als Großstrahlenquelle (Chemiereaktor) dienen kann, nicht teurer sein, Tabelle 1. Dabei kann man entweder die γ -Strahlen und schnellen Neutronen, also die sog. Reaktormischstrahlung, mit Energien bis zu 10 MeV, oder die sehr energiereichen Spaltbruchstücke, die aus dem gespaltenen Kern entstehen und eine Energie von fast 85 MeV mit sich führen, ausnützen, Tabelle 2. Wie dies geschehen könnte, soll weiter unten gezeigt werden. Alle anderen Strahlungsquellen, wie Teilchenbeschleuniger oder natürlich radioaktive Nuclide, sind sicher zu teuer. Es bleibt abzuwarten, ob radioaktive Spaltprodukte, die als lästiges Nebenprodukt bei der Kernenergiegewinnung entstehen, in geeigneter Form zu so niedrigen Preisen angeboten werden können, daß sie als wirtschaftliche Strahlenquelle ausgenützt werden können.

Dann muß man sich auf ein Produkt spezialisieren, das in großen Mengen verbraucht wird, einen genügend

Tabelle 2. Verteilung der bei der Spaltung von ²³⁵U mit langsamen Neutronen freiwerdenden Energie⁹⁾

Spaltbruchstücke, kin. Energie	168 MeV	83,5%
Neutronen, kin. Energie	5 MeV	2,5%
prompte γ -Strahlung	5 MeV	2,5%
γ -Strahlung der Spaltbruchstücke	6 MeV	3,0%
β -Strahlung der Spaltbruchstücke	7 MeV	3,5%
Neutrinos	10 MeV	5,0%
Insges. je Spaltung freiwerdende Energie	201 MeV	

hohen Wert besitzt und schließlich auch mit hoher Strahlenausbeute aus billigen Ausgangsstoffen hergestellt werden kann.

Auf strahlenchemischem Wege Verbindungen komplizierterer Struktur herzustellen, ist sehr unökonomisch, da die Bildungswahrscheinlichkeit oder Ausbeute solcher Molekeln außerordentlich gering ist. Denn bei strahlenchemischen Prozessen muß man es meist dem Zufall überlassen, wie die primär gebildeten Radikale oder Ionen reagieren. Die Bildung komplizierterer Molekeln ist dabei aus statistischen Gründen unwahrscheinlich. Demnach scheint vom wirtschaftlichen Standpunkt aus nur die strahlenchemische Synthese einfacher, aber wertvoller Verbindungen in einem Kernreaktor unter Ausnutzung der Energie der Reaktormischstrahlung oder der Spaltfragmente interessant. Als Ausgangsstoffe kommen dabei allerdings keine Stoffe in Frage, die infolge eines großen Neutroneneinfangquerschnittes ihrer Elemente die Neutronenökonomie des Reaktors gefährden und gleichzeitig wegen des Neutroneneinfangs stark radioaktive Verbindungen bilden. Dadurch wird die Anwendbarkeit eines Kernreaktors für strahlenchemische Reaktionen beschränkt auf Ausgangsmaterialien, die hauptsächlich Wasserstoff, Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff enthalten. Das ist aber kein großer Nachteil, da ein wesentlicher Teil der Grundchemikalien der chemischen Industrie nur aus Stoffen mit den genannten Elementen besteht: Wasser, Ammoniak, Kohlenoxyde, Stickoxyde, Kohlenwasserstoffe und ihre Oxydationsprodukte, Amine usw.

Aussichtsreiche strahlenchemische Synthesen

Gegenwärtig werden strahlenchemische Prozesse zur großindustriellen Erzeugung von Glykol, Phenol, Stickstoffdioxid, Kohlenmonoxyd und Hydrazin diskutiert^{10,11}), Tabelle 3. Diese Substanzen und die dazugehörigen Ausgangschemikalien erfüllen die Voraussetzungen, die vorher genannt worden sind.

Die Phenol-Synthese, die als schwach exotherme Reaktion verläuft, ist eigentlich kein Beispiel für die Umwandlung von Kernenergie in chemische Energie. Sie ist hier jedoch zum Vergleich aufgeführt. Ihr hoher G-Wert weist auf eine Kettenreaktion hin, ähnlich wie sie bei der γ -strahleninduzierten Polymerisation von Acetylen ($G = 75$) oder Äthylen ($G = 6500$) oder bei der strahlenchemischen Chlorierung von Benzol zu Hexachlorocyclohexan ($G = 85000$) beobachtet wird.

Die strahlenchemische Hydrazin-Synthese erscheint zunächst wegen des gegenwärtigen hohen Hydrazin-Preises (etwa 10 DM/kg) vom wirtschaftlichen Standpunkt aus besonders attraktiv. Es ist aber mit Sicherheit anzunehmen, daß bei größerem Bedarf an Hydrazin (z. B. als Treibmittel für Raketen) billigere Produktionsverfahren entwickelt werden, die die alte, über Chloramin verlaufende Synthese nach Raschig verdrängen werden. Das heißt, daß ein wegen des jetzigen hohen Hydrazin-Preises wirtschaftliches strahlenchemisches Verfahren zur Hydrazin-Synthese nicht unbedingt auch in der Zukunft von wirtschaftlichem Vorteil sein muß. — Diese Einschränkungen gelten nicht für die anderen in Tab. 3 aufgeführten Stoffe, da bei diesen wegen der ohnehin niedrigen Preise nicht mit neuen, stark kostensenkenden Verfahren gerechnet zu werden braucht.

Im folgenden sollen die Grundlagen sowie die technischen und wirtschaftlichen Aspekte der chemonuclearen Glykol-Synthese und der Stickstoff-Fixierung in einem Chemie-Kernreaktor unter Ausnutzung der Energie der Reaktormischstrahlung bzw. der kinetischen Energie der Spaltprodukte besprochen werden.

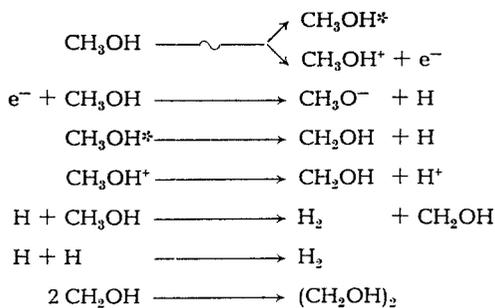
Reaktionen bei der Bestrahlung von Methanol und Stickstoff/Sauerstoff-Mischungen

Die Reaktionen, die bei der Bestrahlung von Methanol und Stickstoff/Sauerstoff-Mischungen ablaufen, sind wegen der Vielzahl der möglichen Reaktionsprodukte unübersichtlicher als die Radiolyse des Wassers; denn außer den gewünschten Produkten entstehen eine Anzahl weiterer Verbindungen wie Methan, Formaldehyd, Ameisensäure, höhere Polymere, Kohlenmonoxyd und Kohlendioxyd im ersten Falle und die Stickoxyde vom Distickstoffoxyd bis zum Stickstoffpentoxyd und Ozon im zweiten Falle. Deshalb sind die Mechanismen der Reaktionen, die zum Glykol bzw. Stickoxyd führen, noch nicht sicher aufgeklärt.

Der bei der Synthese von Glykol aus flüssigem Methanol diskutierte Mechanismus^{27,28}) schließt sich eng an den für die Radiolyse des Wassers an: die primär ionisierten und angeregten Methanol-Molekeln dissoziieren und bilden CH_2OH -Radikale und H-Atome, die zu Glykol und Wasserstoff rekombinieren. Ein einzelnes H-Atom kann durch Reaktion mit einer Methanol-Molekel ein weiteres CH_2OH -Radikal bilden, das auch zur Glykol-Bildung zur Verfügung steht:

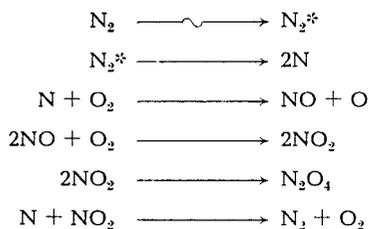
Tabelle 3. Aussichtsreiche strahlenchemische Reaktionen im Kernreaktor

Produkt	Glykol ¹²⁻¹⁴)	Phenol ^{13,15})	Hydrazin ¹⁶⁻¹⁹)	Stickstoffdioxid ²⁰⁻²⁵)	Kohlenmonoxyd ^{21,26} .
Ausgangsstoffe	flüssig. Methanol	Benzol + Luft in Wasser	flüssig. Ammoniak	Luft	Kohlendioxyd mit 1% NO_2
Summenreaktion	$2 \text{CH}_3\text{OH} \rightarrow (\text{CH}_2\text{OH})_2 + \text{H}_2$	$\text{C}_6\text{H}_6 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$	$2 \text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2\text{H}_4 + \text{H}_2$	$1/2 \text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2$	$\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + 1/2 \text{O}_2$
Reaktionswärme [kcal/Mol]	3,6	-1,9	48	8,1	67,6
$G_{\gamma+N}$	3	> 30	0,1	5	—
$G_{\text{Spaltfragmente}}$	1	—	1,9	7,5	10



Da der Temperaturkoeffizient der Geschwindigkeit der Reaktion eines Wasserstoff-Atoms mit einer Methanol-Molekel größer ist als der der Wasserstoff-Rekombination¹⁸⁾, wird die erstere gegenüber der zweiten bei höheren Temperaturen begünstigt. Deshalb ist eine erhöhte Temperatur zur Erzielung größerer Glykol-Ausbeuten bei der Bestrahlung von Methanol vorteilhaft.

Die Stickstoff-Fixierung wird eingeleitet durch Anregung einer Stickstoff-Molekel und anschließende Dissoziation in Stickstoff-Atome^{20,21)}. Diese setzen sich mit Sauerstoff-Molekeln zu Stickstoffmonoxyd und weiter zu Stickstoffdioxyd um, das in einer Gleichgewichtsreaktion Stickstofftetroxyd bildet. — Der Angriff von Stickstoff-Atomen auf Stickstoffdioxyd, der teilweise zu molekularem Stickstoff, dem Ausgangsstoff, führt, bedeutet eine storende Ausbeuteverminderung der Stickstoff-Fixierung.



Der Abbau des durch strahlenchemische Reaktionen gebildeten Produkts bei weiterer Strahleneinwirkung ist immer zu befürchten und wegen der damit verbundenen Ausbeuteverminderung unerwünscht. Da der Abbau natürlich mit steigender Konzentration des Produktes im Strahlungsraum immer schneller wird, muß man durch laufende Abtrennung des gewünschten Produktes seine Konzentration so niedrig halten, daß die Abbaureaktionen die Ausbeute nicht mehr merklich verringern. Dies geschieht bei der Stickstoff-Fixierung sehr leicht, da bei Anwendung höherer Drucke Stickstoffdioxyd in Stickstofftetroxyd übergeht, das auskondensiert und damit aus der Gasphase ausscheidet.

Im angegebenen Reaktionsschema verläuft die Stickstoff-Fixierung ausschließlich über primär gebildete Stickstoff-Atome. Sauerstoff-Atome, die durch strahleninduzierte Dissoziation des molekularen Sauerstoffs oder in anderen Sekundärreaktionen entstehen, können Stickstoff-Molekeln nicht aufspalten und haben damit keinen Einfluß auf die Ausbeute bei der Stickstoff-Fixierung. Das ist bedingt durch die extreme Stabilität der Stickstoff-Molekel.

Das Reaktionsschema berücksichtigt nicht die Ionenreaktionen, die neben den Radikalreaktionen ablaufen und auch zur Stickstoff-Fixierung beitragen (wie z. B.

$\text{N}_2^+ + \text{O}_2 \longrightarrow \text{NO} + \text{NO}^+$) und läßt außerdem die Bildung der anderen Stickoxyde außer acht. Das Schema ist also bei weitem nicht vollkommen. Einige Aussagen über die günstigsten Bedingungen bei der Stickstoff-Fixierung lassen sich aber doch daraus ableiten²¹⁾. Da bei Drucksteigerung das Gleichgewicht zwischen Stickstoffdioxyd und Stickstofftetroxyd zugunsten des Tetroxyds, das auskondensiert, verschoben wird, ist ein hoher Druck im Strahlungsraum vorteilhaft. Weiterhin ist ein Sauerstoff-Uberschuß günstig, da damit die Wahrscheinlichkeit der Reaktion der Stickstoff-Atome mit Sauerstoff-Molekeln gegenüber der mit Stickstoffmonoxyd oder Stickstoffdioxyd, also die Aufbaureaktion gegenüber der Abbaureaktion, begünstigt wird. Den gleichen Effekt hat auch eine erhöhte Temperatur (z. B. > 250 °C), da die Aktivierungsenergie der Aufbaureaktion größer ist als die der Abbaureaktion.

Die Stickstoff-Fixierung würde man vorteilhafter unter Ausnützung der Rückstoßenergie der Spaltfragmente durchführen. Bei der Glykol-Synthese würde man dagegen die Reaktormischstrahlung heranziehen, da die schon verhältnismäßig komplizierte Methanol-Molekel gegen die Rückstoß-Spaltkerne sehr viel anfälliger ist als gegen die Reaktormischstrahlung. Denn bei der durch die Rückstoß-Spaltfragmente induzierten Glykol-Synthese werden je gebildete Glykol-Molekel nahezu zehn Methanol-Molekeln unter Bildung von Kohlenmonoxyd, Methan und Formaldehyd zerstört, während bei der Reaktormischstrahlung außer den zur Glykol-Bildung verbrauchten zwei Methanol-Molekeln nur ein weiteres zerstört wird¹⁴⁾.

Möglicher Aufbau von Chemie-Kernreaktoren

Ausnutzung der Reaktormischstrahlung

Wenn die Reaktormischstrahlung zur Durchführung der chemischen Synthesen verwendet werden kann, dürften sich über die üblichen Probleme des Reaktorbaus hinaus keine wesentlichen technischen Schwierigkeiten ergeben. Hierbei wird allerdings nur ein geringer Teil der Reaktorenergie ausgenutzt, denn je Spaltung werden nur etwa 8% der gesamten Spaltenergie von 200 MeV als γ -Strahlen und schnelle Neutronen frei, Tabelle 2; der Hauptanteil, nämlich nahezu 85% der Spaltenergie, entfällt auf die kinetische Energie der Spaltfragmente, die vollständig in den Brennelementen absorbiert wird. Von den 8% Mischstrahlung steht uns höchstens die Hälfte, also etwa 4% der Gesamtenergie zur Verfügung. Der Rest wird in den Brennelementen selbst, im Kühlkreislauf, von den Reaktor-Konstruktionsmaterialien und evtl. im Neutronen-Moderator absorbiert.

Kerntechnisch und konstruktiv könnte jeder organisch moderierte Reaktor bereits als Chemie-Kernreaktor für die Synthese organischer Verbindungen verwendet werden. In organisch moderierten Reaktoren ist z. B. Diphenyl als Moderator vorgesehen, eine gegen Kernstrahlung außerordentlich resistente Verbindung. Ohne wesentliche Abänderung des Reaktors, d. h. ohne getrennte Bestrahlungs Kanäle einzubauen, könnte man das Diphenyl gegen flüssiges Methanol oder andere flüssige organische Systeme austauschen und damit im Moderatorkreislauf die angegebenen Synthesen ablauf-

fen lassen. In enger Anlehnung an die technischen und betrieblichen Erfahrungen, die die Atomic International mit dem OMR (organisch moderiertem Reaktor) gemacht hat, wurde von derselben Firma²⁹⁾ eine 1 MW-Versuchsanlage projektiert, in der 3,5% der thermischen Leistung des Reaktors als Reaktormischstrahlung im chemischen Reaktionsgemisch absorbiert werden.

Das Reaktionsgemisch wird dabei an den Brennelementen vorbeigeleitet, aber von diesen durch den Kühlmittelkreislauf getrennt. Die Konstruktion eines solchen Chemie-Kernreaktors folgt aus Abb. 1. Das einzelne Brennstoffelement ist aus konzentrischen Zylindern einer Uran-Legierung mit auf 3,5% angereicherter ²³⁵U aufgebaut, die mit Aluminium verkleidet sind. Durch die zylindrischen Spalten wird das Kühlmittel, Kohlendioxyd oder Diphenyl, gepumpt, während das Reaktionsgemisch durch das Zentrum und am Außenumfang des Brennelementes vorbeifließt. 19 solcher Brennelemente sind im Core von 60 cm Höhe und 70 cm Durchmesser zwischen zwei Tragplatten angeordnet. Der Materialfluß und Kühlmittelfluß sind aus der Abbildung zu entnehmen.

Ausnutzung der Rückstoßenergie der Spaltfragmente

Ganz andersartige Konstruktionsprinzipien müssen gewählt werden, wenn die Rückstoßenergie der Spaltfragmente, die 85% der Gesamtsplattenergie ausmacht, ausgenutzt werden soll; denn ihre Reichweite, die in flüssigen und festen Medien kleiner als 30 μm ist, verbietet die Verwendung von kompakten Brennelementen. Der Brennstoff muß vielmehr ohne Verkleidung in feinsten Verteilung im chemischen Reaktionsraum untergebracht werden. Die ideale Form scheint zunächst die homogene, molekularisperse Verteilung zu sein, also Anwendung von gasförmigem Uranhexafluorid, das bei Gasreaktionen (z. B. der Stickstoff-Fixierung) der Gasphase zugesetzt wird, oder von löslichen Uran-Verbindungen bei Reaktionen in flüssiger Phase (z. B. Urannitrat bei der Hydrazin-Synthese in flüssigem Ammoniak). Unter diesen Bedingungen könnte die Rückstoßenergie der Spaltfragmente vollständig im chemischen Reaktionsgemisch absorbiert werden. Da aber die genannten Uran-Verbindungen sehr wenig strahlenresistent sind, ist schon nach kurzem Betrieb mit der Ausscheidung fester Uran-Verbindungen zu rechnen. Außerdem dürfte die erforderliche kontinuierliche Abtrennung des Kernbrennstoffs vom chemischen Reaktionssystem ziemlich aufwendig sein. Deshalb ist es vorteilhafter, selbst unter Verlust eines Teils der Rückstoßenergie ein heterogenes System von fein verteiltem Brennstoff und chemischem Reaktionsgemisch vorzusehen.

Die hierfür diskutierten Reaktorformen sind der Festbett-Reaktor und der Staubphasen-Reaktor. Als Festbett-Reaktor hat wahrscheinlich der Glasfaser-Reaktor^{21,30,31)} die größte Chance. Hier soll bis zu 50% hochangereichertes Uranoxyd enthaltende Glaswolle mit einem Durchmesser von weniger als 5 μm als Brennstoff verwendet werden. Die Glasfaser soll fest im Reaktorcore eingebaut und vom flüssigen oder gasförmigen Reaktionsgemisch umströmt werden. Mit dieser Anordnung sollen bis zu 50% der Rückstoßenergie

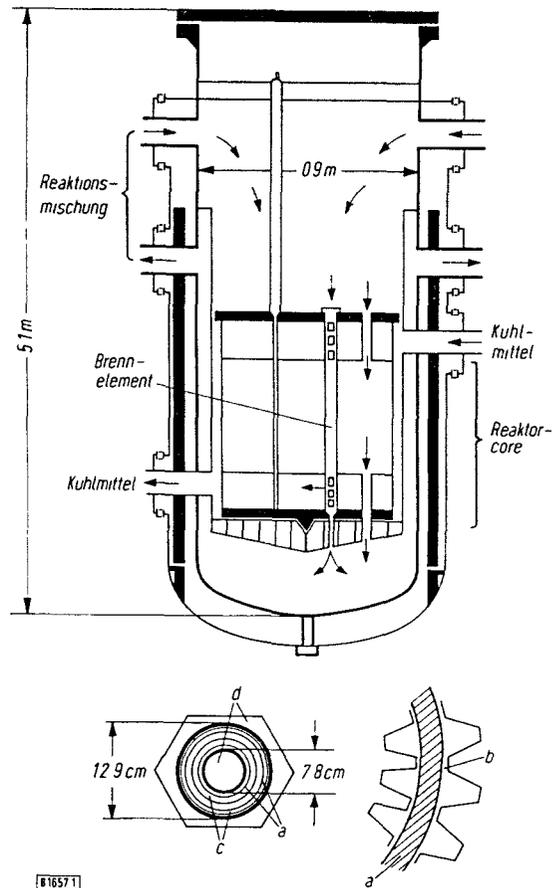


Abb. 1. Querschnitt durch einen Chemie-Kernreaktor zur Ausnutzung der Reaktormischstrahlung (schematisch)

Darunter: Einzelheiten eines Brennelementes²⁹⁾.

a Uran-Molybdän-Aluminium-Legierung, b Aluminium-Umhüllung, c Kühlmittel, d Reaktionsmischung

der Spaltfragmente für chemische Zwecke zur Verfügung stehen.

Beim Staubphasen-Reaktor wird vorausgesetzt, daß das Brennmaterial als Uranoxyd in Staubform mit Partikeln von Durchmessern bis herab zu 1 μm eingesetzt und vom Strom des gasförmigen oder flüssigen Reaktorgemischs aufgewirbelt und getragen wird^{24,32,33)}. Hierbei sollen bis zu 95% der Spaltfragmentenergie ausgenutzt werden können.

Ein vom Brookhaven National Laboratory geplanter Staubphasen-Reaktor³³⁾ sieht ein zylindrisches Core von 2,5 \times 2,5 m vor, das vom Graphit-Reflektor umgeben ist, Abb. 2. Die Reaktorummhüllung ist für einen Gasdruck bis zu 100 at ausgelegt. Das Innere des Core ist zu 80% mit langgezogenen Graphit-Blöcken (Moderator) ausgefüllt. Von unten tritt das gasförmige Reaktionsgemisch, bei der Stickstoff-Fixierung eine Stickstoff/Sauerstoff-Mischung, im einfachsten Falle Luft, unter einem Druck von 100 at zusammen mit dem staubförmigen Brennstoff ein; oben ist die Austrittsöffnung. Die Kühlung des Reaktors wird hier, wie auch beim Glasfaser-Reaktor, von den Reaktionsgasen übernommen. Gaseintrittstemperatur ist 290 °C, die Austrittstemperatur 600 °C.

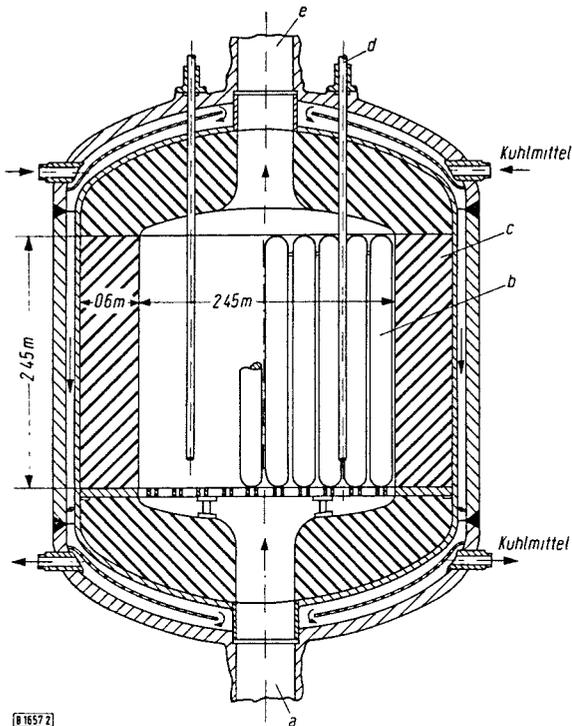


Abb. 2. Querschnitt durch einen Chemie-Kernreaktor zur Ausnutzung der Rückstoßenergie der Spaltfragmente. Als Kernbrennstoffmaterial ist Uran-dioxyd-Staub vorgesehen²³⁾.

a Eintritt für Reaktionsmischung und Brennstoff-Staub, b Graphit-Moderator, c Graphit-Reflektor, d Kontroll-Stab, e Austritt für Reaktionsprodukt und Brennstoff-Staub.

Vergleich der Chemie-Kernreakortypen

Aus der Gegenüberstellung der zwei Chemie-Kernreakortypen, die die Energie der Reaktormischstrahlung bzw. der Rückstoßenergie der Spaltfragmente ausnutzen, können wir leicht ihre Vor- und Nachteile ableiten: im ersten Reaktortyp steht nur ein kleiner Teil, nämlich bis zu 4% der gesamten Reaktorenergie zur Absorption im chemischen System zur Verfügung. Abgesehen von der Aktivierung durch Neutronen ist das Reaktionsprodukt aber sauber. Im zweiten Reaktortyp können bis zu 80% der Reaktorenergie im chemischen System absorbiert werden. Der Wirkungsgrad dieses Reaktors für chemische Synthesen ist also sehr viel größer. Da aber die Spaltfragmente im chemischen Produkt eingefangen werden, ist dieses hochgradig radioaktiv, und zu seiner Reinigung müssen ähnliche Anlagen erstellt werden wie zur Aufarbeitung von Reaktor-brennstoffen.

Der Festbett- und der Staubphasen-Reaktor haben ebenfalls ihre gegeneinander abzuwägenden Vor- und Nachteile, die wir am Beispiel der Stickstoff-Fixierung diskutieren wollen. Ein Festbett-Reaktor ist bei störungsfreiem Betrieb leichter zu kontrollieren als ein Staubphasen-Reaktor, bei dem Inhomogenitäten der Staubphase leicht zu Reaktivitätsänderungen des Reaktors führen können. Außerdem tritt im Staubphasen-Reaktor der staubförmige Brennstoff zusammen mit dem Reaktionsgut an der Entnahmeseite aus und muß von diesem mechanisch, z. B. durch Zyklone, abgetrennt und den reinen Reaktionsgemischen wieder zugesetzt werden. — Wenn die Spaltfragmente ihre Energie mög-

lich vollständig an das gasförmige Reaktionsgemisch abgeben sollen, muß ihre Reichweite im Gas kleiner sein als der mittlere Abstand zweier Staubteilchen oder Glasfasern, da sonst ein Teil der Energie wieder im Brennstoff absorbiert wird. Das kann man durch Anwendung genügend hoher Gasdrucke, z. B. 100 at, erreichen. Da hierbei bis zu 7% der bei der Spaltung frei werdenden Neutronen vom Stickstoff eingefangen werden (n,p-Reaktion), setzt die Regelung des Reaktors eine in engen Grenzen gleichbleibende Stickstoff-Konzentration voraus. Wenn durch eine Undichtigkeit im Gaskreislauf der Stickstoff-Druck plötzlich abnimmt, kann ein Festbett-Reaktor durch die plötzliche Reaktivitätssteigerung außer Kontrolle geraten. — Beim Staubphasen-Reaktor ist dagegen bei einem Bruch im Leitungssystem damit zu rechnen, daß gleichzeitig mit dem Gas ein Teil des Brennstoffstaubes mit herausgerissen und damit eine gefährliche Reaktivitätssteigerung verhütet wird.

Bei den geplanten Chemie-Kernreaktoren kann nur ein Teil, nämlich je nach Typ 4 bis 80%, der gesamten Spaltenergie ins chemische System eingestrahlt werden. Der Rest geht durch Absorption in den Brennelementen, den Reaktormaterialien usw. verloren. Von der im chemischen System absorbierten Strahlenenergie wird — wie am Beispiel der Radiolyse des Wassers gezeigt worden ist — wiederum nur ein kleiner Teil in chemische Energie umgewandelt. Trotzdem ist ein solcher Reaktor für chemonucleare Reaktionen nicht unbedingt unwirtschaftlich. Denn die verbleibende thermische Energie kann zur Erzeugung elektrischer Energie weitergegeben werden. Die Hauptkosten der Strahlung können damit vom chemischen Produkt abgewälzt werden, sie müssen vom Stromverbraucher mitgetragen werden. Deshalb werden bei den folgenden Kostenabschätzungen nicht die Investitionskosten des Kernreaktors allein, sondern die einer vollständigen Energieerzeugungsanlage eingesetzt.

Obwohl nach den vorhergehenden Betrachtungen das chemische Produkt vom energetischen Standpunkt aus nur ein Nebenprodukt der Energieerzeugung darstellt, dürfte ein Chemie-Kernreaktor doch nur wirtschaftlich arbeiten, wenn der Wert des erzeugten chemischen Produktes mit dem Wert der gleichzeitig erzeugten Energie vergleichbar ist.

Abschätzung der Größe der Chemie-Kernreaktoren und der Kosten der chemischen Produkte

Glykol-Synthese

Chemische Fabriken konventioneller Art, die Glykol aus Äthylen, Äthylenoxyd oder Dichloräthylen herstellen, haben eine Jahreskapazität von 10 000 bis 50 000 t. Für die weiteren Betrachtungen (Tab. 4) soll eine Kapazität von 10 000 t/Jahr zugrunde gelegt werden. Der G-Wert der Glykol-Synthese aus Methanol mit der Reaktormischstrahlung ist etwa 3 Molekeln je 100 eV, d. h. 33 eV müssen je entstandener Glykol-Molekel von Methanol absorbiert werden. Das entspricht einer Energie von 14,2 kWh/kg. Im Jahr mit 8000 Betriebsstunden sollen 10 000 t Glykol hergestellt werden; die dazu benötigte Leistung ist $14,2 \text{ kWh/kg} \times 10^7 \text{ kg/8000 h} = 17,75 \text{ MW}$. Von der Gesamtenergie des

Reaktors mögen 4% in Form der Mischstrahlen zur Synthese zur Verfügung stehen, so daß der Reaktor zur Produktion von 10 000 t Glykol pro Jahr eine Leistung von etwa 450 MW (th) haben sollte. Das ist eine durchaus realisierbare Größe.

Nach amerikanischen Angaben³⁴⁾ aus dem Jahre 1961 belaufen sich die Investitionskosten für einen Kernreaktor mit angeschlossenem Kraftwerk mittlerer Größe auf 700 bis 1200 DM je kW(e). Hier soll der für deutsche Verhältnisse sicher nicht zu pessimistische Preis von 1400 DM/kW(e) eingesetzt werden, in dem eventuelle Besonderheiten des Chemie-Kernreaktors schon berücksichtigt sein sollen.

Ein 450 MW(th)-Reaktor, der bei einer günstig angenommenen 30proz. Energieumwandlung 135 MW(e) liefert, würde daher etwa 190 Mill. DM kosten. Für die angeschlossene chemische Fabrik zur Reindarstellung des Glykols sollen 10 Mill. DM angenommen werden. Jährliche Amortisation, Versicherung und Steuern müssen mit 15% der Investitionskosten angesetzt werden. Die Kosten für den laufenden Betrieb, das sind die Kosten für Brennelemente und ihre Wiederaufarbeitung, Unterhaltung und Reparaturen, Löhne und Aufarbeitung des chemischen Reaktionsproduktes werden ebenfalls mit 15% der Investitionskosten veranschlagt, so daß der jährliche Betrieb 60 Mill. DM kostet. Dazu kommen etwa 3 Mill. DM für die 15 000 t Methanol (0,2 DM/kg), die bei der Synthese von 10 000 t Glykol verbraucht werden.

Da durch die chemischen Prozesse nur etwa 1% der Gesamtenergie des Reaktors verbraucht wird, stehen noch 445 MW thermischer Energie oder bei der angenommenen 30proz. Umwandlung noch 134 MW elektrischer Energie zur Verfügung. Bei 8000 Betriebsstunden pro Jahr können damit $1,07 \cdot 10^9$ kWh abgegeben werden, die bei einem Preis von 3 Pfg. je kWh nahezu 33 Mill. DM einbringen. Damit belaufen sich die Kosten für die Produktion von 10 000 t Glykol auf 30 Mill. DM oder 3,00 DM je kg. Da die Gesteungskosten des Glykols nach konventionellen Produktionsmethoden etwa sechsmal niedriger sind, ist das diskutierte Verfahren zur Glykol-Synthese nach dem jetzigen Stand der Technik nicht konkurrenzfähig. — Das folgt auch bereits daraus, daß der tatsächliche Wert des erzeugten Glykols nur etwa 15% des Wertes der elektrischen Energie ausmacht (5 gegenüber 33 Mill. DM).

Stickstoff-Fixierung

Wie durch Tab. 4 gezeigt werden soll, sind die ökonomischen Aspekte für die chemonucleare Stickstoff-Fixierung günstiger. Hierbei soll die Rückstoßenergie der Spaltfragmente ausgenutzt werden. Entsprechend einem G-Wert von 7 für die Stickstoffdioxid-Bildung aus Luft müssen 8,3 kWh Strahlung je kg Stickstoffdioxid absorbiert werden. Wenn eine Produktionskapazität von 500 000 t pro Jahr angenommen wird, wird hierzu eine Strahlungsleistung von 520 MW benötigt. Da bei Ausnützung der Rückstoßenergie der Spaltfragmente etwa 70% der gesamten Reaktorenergie zur Verfügung stehen, muß der Chemie-Kernreaktor für eine Leistung von 740 MW(th) ausgelegt werden, was bei einem optimalen Wirkungsgrad von

Tabelle 4. Abschätzung der Größe von Chemie-Kernreaktoren und der Herstellungskosten der darin erzeugten Produkte

Produkt	Glykol	Stickstoffdioxid
Ausgangsstoff	Methanol	Luft
Strahlung	γ -n-Mischstrahlung	Spaltfragmente
Jahreskapazität	10 000 t	500 000 t
G (Produkt)	3 Molek./100 eV	7 Molek./100 eV
Absorbierte Energie	33 eV/Molek. 14,2 kWh/kg	14,3 eV/Molek. 8,3 kWh/kg
Absorbierte Strahlenleistung	17,75 MW	520 MW
Strahlenausnutzung	4%	70%
Reaktorleistung bei 30proz. Wirkungsgrad	450 MW (th) 135 MW (e)	740 MW (th) 222 MW (e)
Investitionskosten		
spez. Kernkraftwerk	1400 DM/kW (e)	1200 DM/kW (e)
Reaktorkraftwerk, gesamt	190 Mill. DM	265 Mill. DM
Chem. Fabrik	10 Mill. DM	100 Mill. DM
Gesamt	200 Mill. DM	365 Mill. DM
Jährliche Belastung (Amortisation, Versicherung, Steuer, Betriebskosten, Personalkosten, Verwaltung)		
Ausgangsprodukt	3 Mill. DM	—
Gesamt	63 Mill. DM	110 Mill. DM
Abgegebene elektr. Energie	$1,1 \cdot 10^9$ kWh	$1,7 \cdot 10^9$ kWh
Gutschr. 0,03 DM/kWh	33 Mill. DM	52 Mill. DM
Produktionskosten		
(nucl.)	3,0 DM/kg	0,116 DM/kg
(konv.)	0,5 DM/kg	0,12 DM/kg

30% einer Anlage von 222 MW (e) entspricht. Infolge der mit steigender Anlagegröße sinkenden spezifischen Anlagekosten können wir hier mit etwas niedrigeren spezifischen Investitionskosten als im vorigen Fall rechnen, nämlich mit etwa 1200 DM/kW (e). Es wird wieder vorausgesetzt, daß die Investitionskosten eines Chemiereaktors nicht wesentlich höher sind als die eines normalen Leistungsreaktors. Der Reaktor würde einschließlich Turbinen für die Erzeugung elektrischer Energie aus der Restenergie des Reaktors etwa 265 Mill. DM kosten. Wegen der starken Verunreinigung des chemischen Produktes wird noch eine Dekontaminierungsanlage benötigt, die mit 100 Mill. DM eingesetzt wird, so daß die Gesamtinvestitionskosten etwa 365 Mill. DM betragen. Die jährlichen Festkosten und Betriebskosten können wie im vorigen Falle mit zusammen 30% der Investitionskosten, also mit 110 Mill. DM angenommen werden. Durch Stromgutschrift aus dem Verkauf von 1,7 Mrd. kWh elektrischer Energie werden 52 Mill. DM gewonnen, so daß sich die Produktionskosten auf 58 Mill. DM je 500 000 t = 0,116 DM je kg Stickstoffdioxid belaufen. Der Herstellungspreis in konventionellen Anlagen gleicher Größe wird mit 0,12 DM je kg Stickstoffdioxid angegeben. Das chemonucleare Verfahren zur Stickstoff-Fixierung würde demnach wirtschaftlich arbeiten, obwohl auch

hierbei nur ein geringer Teil (2,5%) der Strahlungsenergie des Reaktors in chemische Energie umgewandelt wird. — Etwas weniger günstig sind die Vergleiche von Steinberg¹¹⁾, der für eine Reihe verschiedener Anlagen zu einem Verhältnis von 1 bis 2,9 der chemonuclearen und konventionellen Produktionskosten kommt. — Fixierter Stickstoff wird hauptsächlich als Düngemittel in Form von Ammoniumsulfat oder Ammoniumnitrat und nicht als Salpetersäure abgegeben. Auf dieser Basis sind die Kosten des nach konventionellen Methoden fixierten Stickstoffs sicher um den Faktor zwei niedriger als die des in Kernreaktoren fixierten Stickstoffs, selbst wenn das chemonucleare Verfahren so günstig ist, wie in der vorausgegangenen Diskussion angenommen wurde.

Die aufzuwendende Reaktionswärme für $1/2 \text{ N}_2 + \text{O}_2 \longrightarrow \text{NO}_2$ ist 8,1 kcal/Mol, entsprechend 0,2 kWh/kg NO_2 . Im direkten Chemonuclear-Verfahren benötigen wir unter den gegebenen Bedingungen nahezu 12 kWh Reaktorenergie je kg NO_2 (Tab. 4), d. h. der Wirkungsgrad ist etwa 2,0%. Aber auch das konventionelle Verfahren, das über die Ammoniak-Synthese nach Haber-Bosch mit anschließender Verbrennung des Ammoniaks verläuft, erreicht nur einen energetischen Wirkungsgrad von 2%. Noch schlechter schneidet der Birkeland-Eyde-Prozeß ab, bei dem die Stickoxyd-Synthese aus Luft in einem Lichtbogen erzwungen wird. Der Wirkungsgrad ist hier nur 0,4%.

Ausblick

Es ist natürlich einstweilen kein großer Anreiz, nach einem völlig neuartigen, bisher unerprobten Verfahren die Kernenergie in chemische Energie umzuwandeln und damit ein Produkt herzustellen, das mit konventionellen Mitteln billiger oder zumindest nicht teurer zu produzieren wäre.

Damit erhebt sich die Frage, durch welche Entwicklungen die Kosten eines im Chemie-Kernreaktor erzeugten Produktes gesenkt werden können. Es ist bekannt, daß die spezifischen Investitionskosten einer Anlage mit der Größe der Anlage abnehmen. Eine Vergrößerung der vorher diskutierten chemonuclearen Stickoxyd-Fabrik auf die zehnfache Jahreskapazität wäre durchaus möglich und würde eine stärkere Verringerung des Produktionspreises nach sich ziehen, als es bei einer entsprechenden Vergrößerung einer konventionellen Anlage zu erwarten wäre. Bei zu großen Anlagen tritt aber die Schwierigkeit des Absatzes und des Transports solch großer Mengen eines Produktes auf, und die Erniedrigung der Produktionskosten dürfte durch die Erhöhung der Transportkosten kompensiert werden.

Da die Probleme des Chemie-Kernreaktors aufs engste mit den Problemen der Kernenergie-Erzeugung verbunden sind, werden die Fortschritte auf dem Gebiet der Kernenergie auch die wirtschaftlichen Grundlagen der Chemie-Kernreaktoren günstig beeinflussen. Von dieser Seite ist sicher eine Verbesserung zu erhoffen.

Schließlich sind auch günstige Momente aus der Grundlagenforschung der Strahlenchemie zu erwarten. Einige der bekannten strahlenchemischen Reaktionen werden in Gegenwart geringer Mengen eines Zusatzstoffes, der wie ein Katalysator wirkt, beschleunigt,

verlangsamt oder in andere Richtungen gelenkt. Z. B. erhöht die Zugabe von 1% Tetrachlorkohlenstoff die Glykol-Ausbeute bei der Bestrahlung von Methanol in der Gasphase auf das Doppelte¹²⁾. Ein anderes Beispiel ist Kohlendioxyd, das gegen Strahleneinwirkung so resistent ist, daß es als Kühlmittel im Reaktorkreislauf eingesetzt werden kann. In Gegenwart von nur 1% Stickstoffmonoxyd oder Stickstoffdioxyd wird es jedoch mit einem G-Wert von 9 in Kohlenmonoxyd und Sauerstoff gespalten²¹⁾. Durch Zusatzstoffe können demnach die Ausbeuten einiger chemonuclearer Reaktionen beträchtlich erhöht werden, und es ist zu hoffen, daß die weiteren Untersuchungen von strahlenchemischen Systemen Wege eröffnen, die die Wirtschaftlichkeit der diskutierten Verfahren verbessern.

Vielleicht werden auch neuartige Verbindungsklassen von technischem Interesse durch strahlenchemische Prozesse zugänglich: z. B. läßt sich unter gewissen Bestrahlungsbedingungen aus Kohlenoxyd Kohlensuboxyd ($\text{O}=\text{C}=\text{C}=\text{C}=\text{O}$) herstellen²¹⁾, dessen Bedeutung für die chemische Industrie noch nicht abgeschätzt werden kann, da dieses Produkt in technischem Maßstab noch nirgends zur Verfügung steht. Als sehr energiereiche und reaktionsfreudige Verbindung würde sie sicher eine gute Zukunft haben.

Schließlich sei noch die strahlenchemische Reaktion zwischen Stickstoff und Kohlendioxyd erwähnt²¹⁾, die eine Kombination der Stickstoff-Fixierung und Kohlenoxyd-Bildung ist:



Bei einem G-Wert von annähernd 10 werden bei dieser Reaktion nahezu 33% der im gasförmigen System absorbierten Strahlenenergie gespeichert, so daß man in diesem Falle wirklich von einer lohnenden Umwandlung von Kernenergie in chemische Energie sprechen könnte.

Beim gegenwärtigen Stand der Technik scheint der Einsatz von Chemie-Kernreaktoren noch nicht sehr verheißungsvoll. Auch wenn durch weitere Erfahrungen und neuere Erkenntnisse die eigentlichen Herstellungskosten einiger Produkte unter die konventionellen Herstellungskosten gesenkt werden könnten, so wird noch immer die radioaktive Verseuchung der chemischen Reaktionsprodukte die Anwendbarkeit der Chemie-Kernreaktoren hemmen. Die radioaktiven Spaltprodukte, die im Glasfaser- oder Staubphasenreaktor vom chemischen Reaktionsgut eingefangen werden, kann man wahrscheinlich weitgehend entfernen. Allerdings müssen die extrem hohen Dekontaminationsfaktoren, die bei der Aufarbeitung der Kernbrennelemente gefordert werden (10^7 bis 10^8), noch weit überschritten werden, wenn man das Reaktionsprodukt nicht bis zum weitgehenden Zerfall der aktiven Spaltprodukte, d. h. bis zu 20 Jahren, lagern will. Aber noch schwieriger oder sogar unmöglich dürfte die Reinigung aller kohlenstoffhaltigen Verbindungen sein, die bei diesen die durch Neutronen-Einfang gebildeten aktiven ^{14}C -Atome (Halbwertszeit 5600 Jahre) teilweise fest in die Molekeln eingebaut und damit nicht abtrennbar sind. Bei den sehr strengen Bestimmungen der Strahlenschutzverordnung in Deutschland dürfte damit der Vertrieb solcher Substanzen nahezu unmöglich sein.

Literatur

- 1) *Nucleonics* 20, Nr. 12; 18 (1962).
- 2) *F. Giesel*, Verh. dtsh. physik. Ges. 2, 9 [1900], Ber. dtsh. chem. Ges. 35, 3608 [1902]; *P. Curie* u. *A. Debierne*, C. R. heb. Séances Acad. Sci. 132, 770 [1901]; *H. Becquerel*, C. R. heb. Séances Acad. Sci. 133, 709 [1901]; *W. Ramsay* u. *F. Soddy*, Proc. Roy. Soc. [London], 72, 204 [1903].
- 3) S. z. B. Nachr. aus Chemie und Technik 3, 151 [1955].
- 4) S. z. B. Nachr. aus Chemie und Technik 6, 297 [1958].
- 5) *A. O. Allen*: The Radiation Chemistry, of Water and Aqueous Solutions, Princeton, N. J., 1961.
- 6) *D. Schulte-Frohlinde* u. *K. Eiben*, Z. Naturforsch. 17a, 445 [1962].
- 7) Radiation, a Tool for Industry, A. D. Little Corp., Cambridge, Mass., 1959.
- 8) *H. Krauch*, Kerntechnik 3, 1; 4 [1961].
- 9) *S. Glasstone*: Principles of Nuclear Reactor Engineering, Princeton, N. J., 1955.
- 10) *H. Krauch*, *W. Baur*, *K. Jechl* u. *W. Kunz*: Chemie-Kernreaktoren, Dechema-Monographie, Bd. 42, S. 145, Weinheim/Bergstr. 1962.
- 11) *M. Steinberg*, Advances in Nucl. Sci. Technology 1, 247 [1963].
- 12) *A. K. Wiebe*, *W. P. Conner* u. *G. W. Kinzer*, Nucleonics 19, Nr. 2, 50 [1961].
- 13) *M. Steinberg* u. *L. Green*, Brookhaven Nat. Lab., Bericht BNL 5755 (1960).
- 14) *D. A. Landsman* u. *J. E. Butterfield*, Atomic Energy Research Establ., Bericht AERE-R-3625 (1961).
- 15) *N. A. Proskurnin* u. *Y. M. Kolotyrlin*, Proc. 2nd. Intern. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy, Geneva 1958, 29, 52 [1959]; *E. V. Barelko*, *L. I. Kartashova*, *P. N. Komarow* u. *N. A. Proskurnin*, Large Radiation Sources in Industry, Intern. Atomic Energy Agency, Wien 1960, Bd. 1, S. 407
- 16) *D. Cleaver*, *E. Collinson* u. *F. S. Daynton*, Trans Faraday Soc. 56, 1640 [1960].
- 17) *C. P. Fritsch*, *J. Cusak*, *R. I. Miller* u. *M. R. Gustavson*, Chem. Engng. Progr. 57, Nr. 3, 37 [1961].
- 18) *Y. A. Sorokin* u. *S. Y. Pshezhetskii*, Ber. Akad. Wiss. UdSSR 138, 880 [1961].
- 19) *D. A. Landsman*, Nuclear Engng. 7, Nr. 69, 50 [1962].
- 20) *D. Harteck* u. *S. Dondes*, Nucleonics 14, Nr. 7, 22 [1956].
- 21) *D. Harteck* u. *S. Dondes*, Z. Elektrochem., Ber. Bunsenges phys. Chem. 64, 983 [1960]; *D. Harteck*, *S. Dondes* u. *D. E. Neil*, Large Radiation Sources in Industry, Intern. Atomic Energy Agency, Wien 1960, Bd. 1, S. 231.
- 22) *R. F. R. Coekelbergs* u. Mitarb., ebenda, Bd. 1, S. 191.
- 23) *J. K. Dawson* u. *F. Moseley*, ebenda, Bd. 1, S. 223.
- 24) *M. Steinberg*, *L. Green* u. *J. R. Powell*, A. I. Ch. E. Journal 7, 329 [1961].
- 25) Siehe auch Nucleonics 19, 2, 47 [1961].
- 26) *P. Harteck* u. *S. Dondes*, J. chem. Physics 23, 902 [1955]; 26, 1727 [1957].
- 27) *J. G. Burr*, Atomics International, Bericht NAA-SR 5350 VII-37 (1960).
- 28) *E. Hayon* u. *J. J. Weiss*, J. chem Soc [London] 1961, 3970
- 29) *L. E. Crean*, *L. S. Nims* u. *J. J. Martin*, Chem Engng Progr. 56, Nr. 10, 72 [1960].
- 30) *P. Harteck* u. *S. Dondes*, Nucleonics 15, 8; 94 [1957].
- 31) *G. Lellouche* u. *M. Steinberg*, Brookhaven Nat. Lab., Bericht BNL 574 (1959).
- 32) Aerojet-General Nucleonics, Bericht AGN 3048 (1959)
- 33) *M. Steinberg*, *J. R. Powell* u. *L. Green*, Brookhaven Nat. Lab., Bericht BNL 602 (1962).
- 34) *J. E. Ullmann*, Advances in Nucl. Sci. Technology 1, 225 [1962].