

# ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN DER SYSTEMTHEORIE BEIM UNTERRICHT DER CHEMISCHEN TECHNOLOGIE\*

Von

T. BLICKLE

Forschungsinstitut für Technische Chemie der Ungarischen Akademie der Wissenschaften,  
Veszprém

Eingegangen am 20. Mai 1980

Vorgelegt von Prof. Dr. I. SZEBÉNYI

In den letzten Jahrzehnten zeigt sich in der chemischen und verwandten Industrie immer mehr die Tendenz, eine neue chemische Verbindung oder ein neues Produkt möglichst schnell nach der Herstellung im Laboratorium auch im industriellen Maßstabe zu erzeugen. Diese Tendenz bringt beim Unterricht der chemischen Technologie zwei neue Gesichtspunkte mit sich:

1. Bei der großen Anzahl der Technologien ist ihre lexikale Beschreibung und ihr Unterricht im einzelnen schon unmöglich geworden.
2. Die Studenten müssen es erlernen, schnell und ökonomisch neue Technologien auszuarbeiten.

Außer obigen Gesichtspunkten ergeben sich auch solche Forderungen, die sich nicht auf einzelne Technologien, sondern auf die chemische Technologie im allgemeinen beziehen. Solche sind z. B.:

- a) Intensifikation der Technologien, Umformen von intermittierenden zu kontinuierlichen Technologien.
- b) Herabsetzen des Energiebedarfs.
- c) Ausarbeitung umweltfreundlicher, abfallarmer Technologien.
- d) Komplexe Bearbeitung der Rohstoffe, Verwendung von Rohstoffen minderer Qualität.
- e) Untersuchung der Möglichkeiten eines den weltweiten Änderungen der Wirtschaftslage schnell folgenden Rohstoffwechsels.
- f) Erzeugung von Produkten von speziellen, streng eingehaltenen physikalischen und chemischen Eigenschaften.

Es ist jedoch schwierig, den Hörern diese Gesichtspunkte bereits bei den einzelnen Technologien beizubringen, und dies würde auch das Volumen des Lehrstoffes fast unerträglich erhöhen.

\* Vortrag gehalten an der III. Konferenz der Lehrstühle für chemische Technologie der sozialistischen Länder, am 14-ten April 1980, in Balatonfüred.

Beim Unterricht der chemischen Technologie ist es also notwendig, eine grundsätzlich neue Anschauungsweise einzunehmen. Als eine Möglichkeit dies zu verwirklichen, ergibt sich die Anwendung der System- und Strukturtheorie. Im folgenden möchte ich einige diesbezügliche Möglichkeiten und Gedanken anführen.

Die Systemtheorie hat sich als Wissenschaft in den vergangenen Jahrzehnten entwickelt und ist gegenwärtig eher eine Anschauungsweise als ein konkreter spezieller Wissensstoff. Ihr Wesen besteht darin, daß man die allgemeinen, von ihrer Spezialität unabhängigen Eigenschaften und Gesetzmäßigkeiten der Systeme untersucht. Hier ergibt sich bereits das erste Problem: Was nennt man ein System? Fast könnte man sagen, es gibt darauf ebensoviele Antworten als Forscher der Systemtheorie. Eine mehrere Ansichten zusammenfassende Synthese ist die folgende: Ein System besteht aus einem solchen — je nach dem Gesichtspunkt der Untersuchung abgegrenzten — Teil der Welt, welcher mit der Umgebung durch Input- und Output-Signale verbunden ist, und je nach Änderung der Inputsignale verändern sich sowohl sein Zustand wie seine Output-Signale. Das System besteht aus Subsystemen, Elementen, die einander beeinflussen und miteinander in hierarchischer Beziehung stehen.

Die chemischen Technologien können folglich als Systeme betrachtet werden.

Die Strukturtheorie ist noch jünger als die Systemtheorie [1]. Ihr Wesen besteht darin, daß sie die Dinge, Begriffe, Prozesse durch ihre Eigenschaften kennzeichnet. Man sucht für ein gegebenes Gebiet die Haufen der Eigenschaften, die vom Gesichtspunkt der Untersuchung aus gesehen wesentlich sind, ihre charakteristischen Klassen, die Möglichkeiten und Unmöglichkeiten des gemeinsamen Vorkommens der Eigenschaften, und ordnet die Gesamtheit der zulässigen Eigenschaften zu den Dingen, Begriffen, Prozessen, die dadurch charakterisiert werden.

Zur Behandlungsweise der Systemtheorie und der Strukturtheorie gehört mathematischer Formalismus und die Möglichkeit der Algorithmisierung mit Rechnern, wodurch statt der einfachen Beschreibung eine konstruktive, vergleichende Untersuchung und eine organisierte Arbeit ermöglicht wird.

Wie kann diese Anschauungsweise im Unterricht der chemischen Technologie angewandt werden?

Das Wesen der chemischen Technologie besteht darin, daß an Stoffen seltener physikalische, hauptsächlich aber chemische Veränderungen durchgeführt werden. Der erste Gesichtspunkt ist also die unterschiedliche Klassifizierbarkeit der Stoffe in den chemischen Technologien. Nach einer Klassifizierungsweise kann man folgende Einteilung unternehmen:

Technologischer Stoff, der verwertbar und transportierbar ist, und inter-

mediärer Stoff, für den obiges nicht zutrifft, z. B. pirolytisches Gas,  $\text{SO}_2$  Röstgas, Aluminatlauge.

Eine nächste Klassifizierungsweise: *Rohstoffe*. Zu besprechen sind eingehend ihre Herkunft: Produkte des Bergbaus, der Landwirtschaft; ihre Eigenschaften; ihr Vorkommen; ihre besonders wichtigen Gruppen, ihre komplexe Verwertungsmöglichkeiten.

*Intermediäre Produkte*, die transportierbar und auch verwertbar sein können, jedoch im allgemeinen nur innerhalb der chemischen Industrie.

*Endprodukte*, die den Anforderungen eines anderen Produktionszweiges oder des Verbrauchers entsprechen. Hier wird im Unterricht wenig Wert auf folgende Gesichtspunkte gelegt: verschiedene Anforderungen, deren Erfüllung dienende mögliche Endprodukte und optimale Auswahl aus diesen.

Zum Beispiel: Es handelt sich um eine Anforderung der Landwirtschaft. Zur Einführung von maximal aufnehmbarer Menge von Kalium, Natrium, Nitrogen in den Boden. Zu entscheiden ist, welche Arten von Kunstdüngern sich hierzu am besten eignen? Welche ist in einem gegebenen Fall die wirtschaftlichste, d. h. die Kosten welcher Sorte sind auf das Pflanzenwachstum bezogen, die geringsten? Oder eine andere Forderung: Die Aufgabe besteht darin, eine Holzoberfläche weiß zu tünchen. Zu untersuchen ist, welche Sorten der weißen Pigmente hierzu geeignet sind und bei welchen unter diesen die Kosten zum deckfähigen Anstreichen von  $1 \text{ m}^2$  am geringsten sind? Und so weiter.

*Abfall*. Dieser kann aus technologischem oder aus intermediärem Stoff bestehen. Zu besprechen ist die Verwendbarkeit des technologischen Stoffes, sein Transport an einen Sammelort; Reinigen oder Rezirkulation des intermediären Stoffes.

Dritte Klassifizierungsweise: *Veränderter Stoff*, wobei die Veränderung eben die Aufgabe der Technologie ist.

*Hilfsstoff*, z. B. Katalysator, Lösemittel, Luft, Wasser usw. Es ist wichtig im Unterricht die wichtigsten Hilfsmittel je nach dem Verwendungszweck und ihre spezielle Behandlungsweisen anzuführen.

Das waren einige, von den konkreten Technologien unabhängige Gesichtspunkte im Zusammenhang mit den verschiedenen Stoffen. Obige Klassifizierung der Stoffe ist auch dazu geeignet, die Hierarchie der technologischen Systeme vorzuführen. Wir unterscheiden folgende Systemarten:

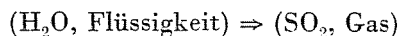
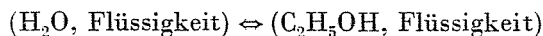
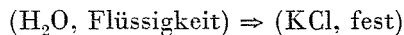
- a) *Zusammengesetzte chemische technologische Systeme*. Die aus diesen ein- und austretenden Ströme sind veränderte technologische Stoffe oder Abfälle.
- b) *Chemische technologische Systeme*. Die aus diesen ein- und austretenden Ströme sind veränderte technologische Stoffe oder Abfälle, können aber

nicht auf weitere Systeme geteilt werden. Die zusammengesetzten chemischen technologischen Systeme bestehen aus einem oder aus mehreren chemischen technologischen Systemen.

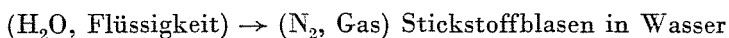
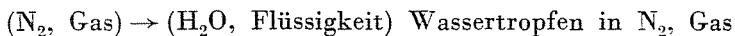
- c) *Elementare chemische technologische Systeme, technologische Stufe.* Die aus diesen ein- und austretenden Ströme sind veränderte Stoffe — es können auch intermediäre sein — oder Abfälle und können nicht weiter auf solche Systeme geteilt werden. Die chemischen technologischen Systeme bestehen aus einem oder aus mehreren technologischen Stufen.
- d) *Chemische technologische Operationssysteme, operative Einheit, Einrichtung.* Die aus diesen ein- und austretenden Ströme sind Stoffe, eventuell Hilfsstoffe, und bestehen aus einer einzigen Einrichtung oder aus einem Block gleicher Einrichtungen. Die technologischen Stufen bestehen aus einer oder aus mehreren Einrichtungen.

Wie schon erwähnt wurde, ist es die Aufgabe der chemischen Technologie, die physikalischen, aber vor allem die chemischen Eigenschaften der Stoffe zu verändern. Wir verfolgen nun diese Eigenschaften in Klassen eingeteilt: [2]

- a) das Atom, das im Laufe der chemisch-technologischen Veränderungen unverändert bleibt;
- b) die Komponente;
- c) der ursprüngliche Aggregatzustand, in welchem sich die Komponente befinden würde, wenn er bei gegebener Temperatur und Druck im System allein vorhanden wäre. Diese Information ist notwendig, um feststellen zu können, ob z. B. in der Flüssigphase neben dem Wasser gelöstes Kaliumchlorid, vermischter Äthylalkohol oder absorbiertes Schwefeldioxyd vorhanden ist. Diese Unterscheidung ist wegen der Trennung von Bedeutung.
- d) Charakter der Zusammenhänge zwischen den Komponenten. Wenn es sich um einen Zusammenhang handelt, der ein homogenes System bildet, so wird es mit dem Symbol  $\Rightarrow$  bezeichnet. Der Pfeil zeigt in Richtung derjenigen Komponente, welche nicht die Phase bezeichnet, z. B.



Wenn ein heterogener Zusammenhang besteht, so ist  $\rightarrow$  ebenso gedeutet, wie bei dem homogenen Zusammenhang:



Mit Hilfe dieser Eigenschaften können die Stoffe qualitativ gekennzeichnet werden. Für die quantitative Beschreibung dient das Maß. Das meist gebrauchte Maß ist die Masse. Es müßten aber auch die übrigen, in den Systemen der chemischen Technologie wichtigsten Maße behandelt werden. Im Zusammenhang mit der Energie z. B. die wichtigsten Energiearten: also die inneren Energiesorten, deren Temperatur, Druck, Zusammensetzung, Oberflächefaktoren und die äußeren Energiearten, also Strömungs-, Lage-, Volumen-, Vibrationsenergien usw.

Besondere Aufmerksamkeit ist der mit Maßangaben erfolgenden Beschreibung der sich im Dispersionssystem abspielenden Prozesse, z. B. der Zerkleinerung, Naßentstäubung, Kristallisierung zuzuwenden, so z. B. den verschiedenen Momenten der Zahlenverteilung nach Maß:

$$M_i = \int_0^{\infty} \delta i_n(\delta) d\delta,$$

von diesen vor allem zur Verwendung der Zahlenmäßigkeit  $i = 0$ , des Maßes  $i = 1$ , der Oberfläche  $i = 2$ , des Volumens  $i = 3$  [3].

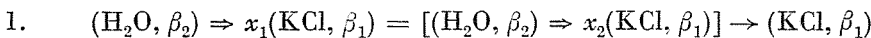
Die Anwendung obiger Behandlungsart soll an einem Beispiel gezeigt werden.

Untersucht wird der folgende technologische Schritt: Gewinnung von Kaliumchlorid in Form von trockenen Körnern aus einer wässrigen Kaliumchloridlösung.

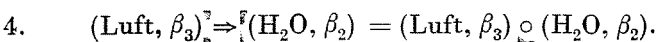
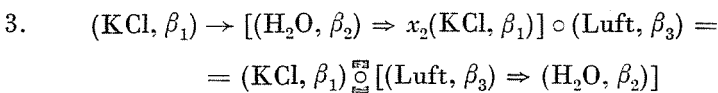
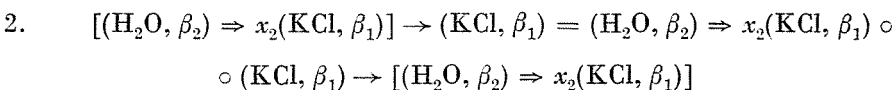
Realisierung: Die warme, gesättigte Kaliumchloridlösung wird abgekühlt, wobei KCl herauskristallisiert wird. Die Suspension wird durch Filtration getrennt. Die anhaftende Feuchtigkeit entfernt man mittels Lufttrocknung, dann folgt die Kondensation der Wasserdämpfe aus der Luft.

Das wäre die Erörterung des Problems nach der beschreibenden chemischen Technologie.

Der Vorgang mit obenbeschriebener Behandlungsweise in Form von in der Chemie gewohnten Gleichungen läßt sich folgendes beschreiben. Hierbei ist der feste Zustand mit  $\beta_1$ , der flüssige mit  $\beta_2$ , der gasförmige mit  $\beta_3$  bezeichnet:



wobei  $x_1, x_2$  Gewichtsbruch und  $x_1 > x_2$



Gleichung 1. entspricht der Kristallisation, 2. der Filtration, 3. der Trocknung, 4. der Kondensierung. Addiert man die Gleichungen 1.—4. nach der bei den chemischen Gleichungen üblichen Methode, so ergibt sich:

$$5. \quad (\text{H}_2\text{O}, \beta_2) \Rightarrow x_1(\text{KCl}, \beta_1) = (\text{H}_2\text{O}, \beta_2) \Rightarrow x_2(\text{KCl}, \beta_1) \circ (\text{KCl}, \beta_1) \circ (\text{H}_2\text{O}, \beta_2).$$

Gleichung 5. kann auf verschiedene Weisen verallgemeinert werden. Ist die Trennung vollkommen, so müssen  $x_2 = 0$  und  $x_1$  nicht angegeben werden:

$$6. \quad (\text{H}_2\text{O}, \beta_2) \Rightarrow (\text{KCl}, \beta_1) = (\text{H}_2\text{O}, \beta_2) \circ (\text{KCl}, \beta_1).$$

Dies bedeutet die Spaltung der wässrigen Lösung von Kaliumchlorid auf Komponenten.

$$7. \quad (\text{C}_1, \beta_2) \Rightarrow (\text{C}_2, \beta_1) = (\text{C}_1, \beta_2) \circ (\text{C}_2, \beta_1).$$

Zeigt die Trennung an.

$$8. \quad (\text{C}_1, \beta_i) = (\text{C}_2, \beta_j) = (\text{C}_1, \beta_i) \circ (\text{C}_2, \beta_j)$$

bedeutet die Trennung von einem homogenen System mit zwei Komponenten.

Obiges kann auch auf algebraische Weise abgefaßt werden: Es sollen folgende Zeichen eingeführt werden:

$$\begin{aligned} k_1 &= (\text{H}_2\text{O}, \beta_2) \Rightarrow x_1(\text{KCl}, \beta_1) & k_2 &= [(\text{H}_2\text{O}, \beta_2) \Rightarrow x_2(\text{KCl}, \beta_1)] \Rightarrow (\text{KCl}, \beta_1) \\ k_3 &= (\text{H}_2\text{O}, \beta_2) \Rightarrow x_2(\text{KCl}, \beta_1) & k_4 &= (\text{KCl}, \beta_1) \rightarrow [(\text{H}_2\text{O}, \beta_2) \rightarrow x_2(\text{KCl}, \beta_1)] \\ k_5 &= (\text{Luft}, \beta_3) & k_6 &= (\text{KCl}, \beta_1) \\ k_7 &= (\text{Luft}, \beta_3) \Rightarrow (\text{H}_2\text{O}, \beta_2) & k_8 &= (\text{H}_2\text{O}, \beta_2). \end{aligned}$$

Lasse man die durchgeführten Änderungen Abbildungen entsprechen [5], so ergibt sich:

$$l_1 = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} \quad l_2 = \begin{bmatrix} k_2 \\ k_3 \circ k_4 \end{bmatrix} \quad l_3 = \begin{bmatrix} k_4 \circ k_5 \\ k_6 \circ k_7 \end{bmatrix} \quad l_4 = \begin{bmatrix} k_7 \\ k_5 \circ k_8 \end{bmatrix}.$$

An den Haufen der Abbildungen wurde die partielle algebraische Struktur  $\oplus$  folgendermaßen definiert:

$$l_i \oplus l_j = l_k$$

Obige Operation ist dann durchführbar, wenn die Abbildung von  $l_i$  und die Urform von  $l_j$  einen gemeinsamen Teil besitzen. Wir erhalten die Urform von  $l_k$ , indem wir die Urformen von  $l_i$  und  $l_j$  abschreiben, die gemeinsamen Teile weglassen. Dasselbe geschieht beim Bild der Abbildung. So ergibt sich

$$l_1 \oplus l_2 \oplus l_3 \oplus l_4 = \hat{l}_1 = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_3 \cdot k_6 \cdot k_8 \end{bmatrix}$$

Die algebraische Struktur wurde verwendet, um Aufgaben im Zusammenhang mit Operationsreihen zu lösen.

Die Operationsreihe kann auch durch einen Matrix repräsentiert werden. Man erhält den Matrix der resultierenden Änderung, wenn man die algebraische Summe der Reihen nimmt, und die Reihen mit Wert 0 wegläßt. So ergibt sich:

$$\begin{matrix}
 & l_1 & l_2 & l_3 & l_4 & & \\
 k_1 & \left[ \begin{array}{cccc}
 1 & 0 & 0 & 0 \\
 -1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & -1 \\
 0 & 0 & -1 & 0 \\
 0 & 0 & -1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & -1
 \end{array} \right] & & & & \\
 k_2 & & & & & & \\
 k_3 & & & & & & \\
 k_4 & & & & & & \\
 k_5 & & & & & & \\
 k_6 & & & & & & \\
 k_7 & & & & & & \\
 k_8 & & & & & & 
 \end{matrix}
 \hat{l}_1
 \begin{bmatrix}
 1 \\
 -1 \\
 -1 \\
 -1
 \end{bmatrix}$$

Unter Verwendung der Matrix-Darstellung wurde ein Computerprogramm ausgearbeitet, zur Lösung von Aufgaben im Zusammenhang mit Operationsreihen.

Dem Matrix können sogenannte Petrische Graphen entsprochen lassen werden, wobei den Strömen  $k$ , den Punkten  $l$  Abbildungsschnitte, den Matrixelementen die Kanten entsprechen. So erhält man (Abb. 1) und damit gelangt man wieder zur Behandlungswiese der herkömmlichen chemischen Technologie, dem Flußbild, das dem Petrischen Graph entspricht (Abb. 2).

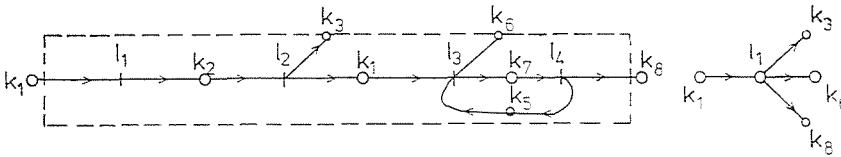


Abb. 1

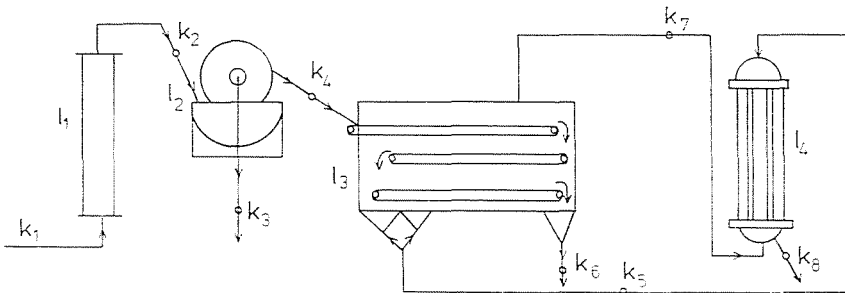


Abb. 2

Die an vorigem Beispiel gezeigte technologische Stufe kann weiter ausgebaut werden. Wenn der wässrigen Lösung von Natriumchlorid Kaliumchlorid hinzugeben wird, so scheidet durch Abkühlen nur das Kaliumchlorid aus, also das Wesen des Prozesses bleibt unverändert.

Gewinnt man die Lösung durch Lösen von Sylvinit, so bedeuten die beiden Stufen zusammen ebenfalls die Trennung von zwei Komponenten:

$$\hat{i}_2 = \left[ \begin{array}{l} (\text{Sylvinit}, \beta_1) \\ (\text{KCl}, \beta_1) \circ (\text{NaCl}, \beta_1) \end{array} \right] = \dot{i}_1$$

aber dies ist gleichzeitig wieder chemische Technologie,

$$\dot{i}_2 = \left[ \begin{array}{l} (\text{Apatit}, \beta_1) \circ (\text{H}_2\text{SO}_4, \beta_2) \\ (\text{CaSO}_4, \beta_1) \circ (\text{H}_3\text{PO}_4, \beta_2) \end{array} \right] \quad \dot{i}_3 = \left[ \begin{array}{l} (\text{NH}_3, \beta_3) \circ (\text{H}_3\text{PO}_4, \beta_2) \\ (\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4, \beta_1) \end{array} \right]$$

$$\dot{i}_4 = \left[ \begin{array}{l} (\text{Apatit}, \beta_1) \circ (\text{H}_2\text{SO}_4, \beta_2) \\ (\text{Superphosphat}, \beta_1) \end{array} \right] \quad \dot{i}_5 = \left[ \begin{array}{l} (\text{NH}_3, \beta_3) \circ (\text{Luft}, \beta_3) \\ (\text{HNO}_3, \beta_2) \end{array} \right]$$

$$\dot{i}_6 = \left[ \begin{array}{l} (\text{NH}_3, \beta_3) \circ (\text{HNO}_3, \beta_3) \\ (\text{NH}_4\text{NO}_3, \beta_1) \end{array} \right]$$

$$\dot{i}_7 = \left[ \begin{array}{l} (\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4, \beta_1) \circ (\text{KCl}, \beta_1) \circ (\text{Superphosphat}, \beta_1) \circ (\text{NH}_4\text{NO}_3, \beta_1) \\ (\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4, \beta_1) \Leftrightarrow (\text{KCl}, \beta_1) \Leftrightarrow (\text{Superphosphat}, \beta_1) \Leftrightarrow (\text{NH}_4\text{NO}_3, \beta_1) \end{array} \right]$$

$$\bar{i}_1 = \dot{i}_1 \oplus \dot{i}_2 \oplus \dot{i}_3 \oplus \dot{i}_4 \oplus \dot{i}_5 \oplus \dot{i}_6 \oplus \dot{i}_7 = \left[ \begin{array}{l} (\text{Apatit}, \beta_1) \circ (\text{Sylvinit}, \beta_1) \circ (\text{NH}_3, \beta_3) \circ \\ \quad \circ (\text{H}_2\text{SO}_4, \beta_2) \circ (\text{Luft}, \beta_3) \\ (\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4, \beta_1) \Leftrightarrow (\text{KCl}, \beta_1) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow (\text{NH}_4\text{NO}_3, \beta_1) \Leftrightarrow (\text{Superphosphat}, \beta_1) \end{array} \right]$$

Man erhielt das beschriebene zusammengesetzte chemisch-technologische System [11, 12].

Derartige Untersuchungen ermöglichen die Klassifizierung der Technologien nach Strukturen, und zwar:

- Die Aufgabe der Technologie besteht in der Trennung der Komponenten des Ausgangsstoffes, das auf physikalischem Wege, z. B. Aufarbeitung von Sylvinit, oder auf chemischem Wege, z. B. Bayerische Tonerde-Erzeugung geschehen kann.
- Vereinigung von Komponenten und Erzeugung eines gegebenen Endprodukts, z. B. Tri-Kunstdünger.
- Verwirklichung einer chemischen Reaktion, z. B. Superphosphat-Erzeugung.
- Chemische Reaktion, sodann Trennung der Komponenten, z. B. Phosphorsäure-Erzeugung.

In obigen Ausführungen habe ich einige Gedanken aufgeworfen. Es sind die Gedanken eines chemischen Technologen, der sich in den letzten Jahren



