

Das Trennröhr mit hohem Druck und radialem elektrischen Feld

I. Von der Turbulenz unabhängige Wirkungen des Feldes

VON ERWIN WILLY BECKER¹

Aus dem Physikalisch-Chemischen Institut der Universität München

(Z. Naturforschg. 2a, 441—446 [1947]; eingegangen am 20. Februar 1947)

Der Einfluß eines radialen elektrischen Feldes auf die Vorgänge im Clusius-Dickel'schen Trennröhr wird bei 16 atm untersucht, mit dem Ziel, den Wirkungsgrad der Anordnung zu steigern. Im vorliegenden ersten Teil der Arbeit werden die durch das vertikale Konzentrations- und durch das horizontale Temperaturgefälle bedingten Erscheinungen behandelt, soweit sie von der Turbulenz unabhängig sind. Die mit dipollosen Gasen gefundenen, ungewöhnlich großen Effekte beruhen auf Elektrostriktion und können theoretisch erklärt werden. Die Berücksichtigung der für die Energieausbeute wichtigen Wirbelbildung erfolgt im zweiten Teil.

Das Trennröhr von Clusius und Dickel² hat sich als eines der erfolgreichsten Mittel zur Isotopentrennung erwiesen. Es beruht auf der Kombination von Thermodiffusion und Konvektion, die sich ergibt, wenn zwei senkrecht stehende konzentrische Röhre³ auf verschiedene Temperaturen gebracht werden.

Die Wärmeleitung des zu trennenden Gas- oder Flüssigkeitsgemisches bewirkt, daß ein dauernder Energiestrom fließt, der die zur reversiblen Entmischung erforderliche Mindestenergie um etwa acht Größenordnungen übertrifft. Der äußerst geringe Nutzeffekt ist zwar immer noch größer als der fast aller anderen Isotopentrennverfahren⁴, doch erhebt sich angesichts der beim Trennröhr besonders durchsichtigen Verhältnisse die Frage, ob sich die Energieausbeute nicht verbessern läßt.

Drucksteigerung allein bringt keinen Erfolg. Zwar wird dadurch bei gleichem Energieverbrauch eine erhebliche Vergrößerung des Gasumlaufs erzielt, doch muß die Verbesserung des Transportes mit einer entsprechenden Verminderung der Trennschärfe auf Grund der schlechteren Diffusionsverhältnisse erkauft werden. Nur wenn es gelingt, den horizontalen Thermodiffusionsstrom ebenfalls zu

vergrößern, kann durch Drucksteigerung ein Energiegewinn erzielt werden.

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, ob sich die Vergrößerung des Thermodiffusionsstromes mit einem elektrischen Feld erreichen läßt. Legt man zwischen die Röhre eine Spannung, so steht der wirksame Trennröhrraum unter dem Einfluß eines stark inhomogenen Feldes mit dem Maximum der Feldstärke an der Oberfläche des inneren Rohres. Zwar wurde in einer früheren Arbeit⁵ festgestellt, daß eine Veränderung von Wärmeleitung, Zähigkeit und somit wohl auch Diffusion und Thermodiffusion bei dipollosen Gasen durch das Feld nicht eintritt. Wegen der räumlich veränderlichen Dielektrizitätskonstante ϵ werden jedoch durch das inhomogene Feld auf das Gas besonders bei hohem Druck erhebliche Elektrostriktionskräfte ausgeübt, die zu den verschiedensten Effekten führen. Daß die elektrischen Kräfte selbst bei dipollosen Gasen für eine wirksame Beeinflussung der Trennröhrströmung ausreichen, kann aus den Wärmeübergangsversuchen entnommen werden⁵. Besteht das zu trennende Gemisch aus Partnern mit gleichem ϵ (z. B. Isotopen), so ist die Veränderlichkeit der Dielektrizitätskonstante nur durch den Temperaturgradienten ge-

¹ Z. Zt. Physikalisches Institut der Universität Marburg.

² K. Clusius u. G. Dickel, Naturwiss. 26, 546 [1938]; Zusammenfass. Ber. s. R. Fleischmann u. H. Jensen, Ergebn. exakt. Naturwiss. 20, 121 [1942]; Theoret. Darstellung u. a. L. Waldmann, Z. Physik 114, 53 [1939]; W. Furry, R. Jones u. L. Onsager, Physic. Rev. 55, 1083 [1939]; s. a. K. Clusius u. E. W. Becker, Z. Naturforschg. 2a, 154 [1947].

³ Das innere Röhr wird häufig durch einen elektrisch geheizten Draht ersetzt.

⁴ Vergl. den zusammenfassenden Artikel über Isotopentrennung von W. Walcher, Ergebn. exakt. Naturwiss. 19, 155 [1940].

⁵ E. W. Becker, Zur Beeinflussung der Transportphänomene dipolloser Gase durch elektrische Felder, Z. Naturforschg. 2a, 297 [1947].



geben. Im anderen Fall muß ein weiterer Einfluß auf Grund der Entmischung erwartet werden. Das Problem der Energieausbeute erfordert daher eine systematische Untersuchung der verschiedenen Elektrostriktionsvorgänge.

Im vorliegenden ersten Teil der Arbeit werden die durch das vertikale Konzentrations- und durch das horizontale Temperaturgefälle bedingten Erscheinungen so weit untersucht, als die Turbulenz keine Rolle spielt. Der zweite Teil⁶ befaßt sich näher mit dem Einfluß der Wirbelbildung. Tatsächlich gelingt es dort, bei der Stickstoff-Kohlensäure-Trennung die Energieausbeute durch das Feld erheblich zu steigern.

Als Modellgas wurde wegen der guten Analysierbarkeit und wegen des verhältnismäßig großen Thermodiffusionsfaktors meistens ein Gemisch aus Stickstoff und Kohlensäure verwendet. Die dabei beobachteten Effekte sind aus dem oben erwähnten Grund bei Isotopengemischen nur zum Teil zu erwarten.

1. Der Einfluß auf die Längsdiffusion

In einem eingestellten Trennrohr besteht in vertikaler Richtung ein Konzentrationsgefälle, das einen Längsdiffusionsstrom zur Folge hat. Die Wirkung des radialen Feldes auf diesen Diffusionsstrom soll unabhängig vom Einfluß des Temperaturgradienten untersucht werden in dem Fall, daß sich die Dielektrizitätskonstanten der Gaspartner unterscheiden. Dazu wird ein sehr kurzes ungeheiztes Trennrohr verwendet und das Konzentrationsgefälle durch Übereinanderschichten der reinen Gase hergestellt.

Die aus dem 30 cm langen Stahlrohr R_1 von 16 mm lichter Weite und dem Kupferrohr R_2 von 7,5 mm Außendurchmesser bestehende Anordnung ist in einem Druckgefäß aus Stahl untergebracht (Abb. 1). R_1 ist unten offen, so daß sein Inhalt mit dem übrigen Gasraum kommuniziert. Das auf dem Potential der Hochspannung liegende Kupferrohr ist durch einen in den unteren Flansch eingelöteten Isolator aus Hartporzellan⁷ nach außen geführt. Innerhalb des Stahlrohres wird es durch zwei schmale Bernsteinringe zentriert, die mit 90°-Ausschnitten für den Gasdurchtritt versehen sind. R_2 kann für Vergleichsversuche durch

⁶ E. W. Becker, Z. Naturforschg. 2a, 447 [1947].

⁷ Der Isolator ist eine Spezialanfertigung der Firma Rosenthal, Isolatoren, Selb, die dem Verfasser geschenkt wurde. Den beteiligten Herren, insbesondere Hrn. Dr. Ziegler, sei hiermit bestens gedankt. Für weitere kostenlose Materiallieferungen danke ich der Firma R. u. G. Schmöle, Menden, insbesondere Hrn. Direktor W. Ulmke.

einen eingebauten Chromnickeldraht elektrisch geheizt werden.

Als Hochspannungsquelle wurde gewöhnlich ein kleiner selbsterregender Bandgenerator verwendet, wie ihn Kossel u. Mitarb.⁸ beschrieben haben.

In die evakuierte Apparatur wurde durch das Ventil 1 zunächst Stickstoff bis zu einem Druck von 8,0 atm und darauf Kohlensäure bis zum Enddruck von 16 atm aus der Bombe eingelassen. Die auf diese Weise im Zwischenraum von Stahl- und Kupferrohr erzielte stabile Schichtung läßt sich sehr gut reproduzieren. Sie gleicht sich allmählich durch Diffusion aus. Das Fortschreiten der Vermischung konnte durch gasanalytische Untersuchung der im Abstand von 2 zu 2 Stunden am Ventil 2 entnommenen Proben verfolgt werden. Es wurde zunächst ohne Feld, dann mit verschiedenen Spannungen gemessen. Für jeden Versuch kam eine neue Gasfüllung zur Verwendung. Das Feld wurde jeweils erst nach der ersten Analyse, d. h. 2 Stdn. nach dem Einfüllen der Gase, eingeschaltet.

Das Ergebnis der Versuche ist in Abb. 2 dargestellt. Bereits eine Spannung von 14 kV bewirkt eine deutliche Zunahme der Vermischungsgeschwindigkeit. Bei der maximal anwendbaren Spannung von 55 kV erreicht sie den 60-fachen Betrag der Diffusion ohne Feld. Der gemeinsame Anfangspunkt in Abb. 2 bei 5,0% wurde durch geringfügiges gegenseitiges Verschieben der Kurven in Richtung der Konzentrationsachse erzielt.

Die gestrichelten Kurven konnten nach sorgfältiger Zentrierung des Kupferrohres ohne die beiden Bernsteinisolatoren aufgenommen werden. Die Ringe haben demnach keine für den Effekt wesentliche Wirkung und ergeben nur die zu erwartende Verminderung der Vermischungsgeschwindigkeit.

Weitere Versuche zeigten, daß der Feldeinfluß bei konstanter Hochspannung stark mit dem Gasdruck, der Differenz der Dielektrizitätskonstanten der Gaspartner (Verwendung anderer Gaspaare) und mit dem vertikalen Konzentrationsgefälle zunimmt.

⁸ W. Kossel, Z. Physik 111, 264 [1938]; F. Heise, Z. Physik 116, 317 [1940]; s. a. E. W. Becker, Ein 300-kV-Bandgenerator mit übernormaler Ladungsdichte, Z. Naturforschg. 2a, 395 [1947].

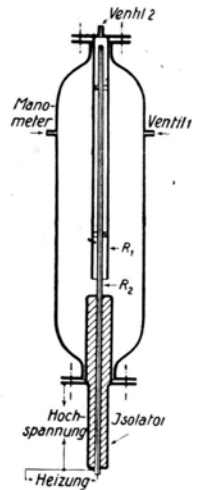


Abb. 1. Apparatur zur Untersuchung des Feldeinflusses auf die Längsdiffusion.

Zu einer Theorie des Vermischungsvorganges kommt man auf folgendem Weg: Wir schematisieren den Raum zwischen den Rohren durch einen Kasten, dessen Längsschnitt in Abb. 3 dargestellt ist. Die Breite beträgt $(R-r)$, wenn man mit R und r den Radius des äußeren bzw. des inneren Rohres bezeichnet. Die Höhe ist H , die Tiefe senkrecht zur Zeichenebene sei $(R-r)/2$. In vertikaler Richtung besteht auf Grund des Konzentrationsgefälles ein Gradient von ϵ (es sei $\epsilon_2 > \epsilon > \epsilon_1$); in der horizontalen Richtung die Feldinhomogenität $\partial\mathcal{E}/\partial r$ (es

$(P = \text{Spannung zwischen den Rohren})$. Da die angenommene Bewegung mit einem Energiegewinn verbunden ist, verläuft sie von selbst unter fortgesetzter Verminderung von $\Delta\epsilon$ und entsprechender Geschwindigkeitsabnahme so lange, bis bei $\epsilon_1 = \epsilon_2$ der Prozeß zur Ruhe kommt.

Die gefundene Zunahme der Vermischungsgeschwindigkeit mit der Differenz der Dielektrizitätskonstanten der Gaspartner und dem Konzentrationsgradienten geht unmittelbar aus (1) hervor, während das Ansteigen mit dem Gasdruck wegen der Dichteabhängigkeit von ϵ verständlich ist.

Experimentell konnte die elektrische Energiedifferenz durch Vergleich mit einer dieselbe Vermischungsgeschwindigkeit erzeugenden Wärmekonvektion ermittelt werden. Es ergab sich richtig die aus (1) zu berechnende Größenordnung. Auch die Richtung der Elektro-Konvektion läßt sich durch Vergleich mit der Wärmekonvektion bestimmen. Nach Gl. (1) läuft die durch das Feld hervorgerufene Gasbewegung am inneren Rohr nach oben, wenn $\epsilon_2 > \epsilon_1$ ist. Im anderen Fall muß sie ihre Richtung umkehren. Die mit einer bestimmten Feldstärke erzielte Vermischungsgeschwindigkeit wird daher beim Einschalten der Heizung von R_2 im CO_2/N_2 -Gemisch *vergrößert* werden. Beim Ersatz des Stickstoffs durch Äthylen sollte dagegen eine *Verminderung* zu beobachten sein⁹.

Die in Abb. 4 dargestellten Versuche zeigen den erwarteten starken Unterschied im Verhalten der Gemische. Die Heizung bewirkt jedoch unter dem Einfluß des Feldes in beiden Fällen eine zusätzliche Beschleunigung der Vermischung, die eine Folge des in (1) nicht berücksichtigten horizontalen Dichtegefälles ist.

⁹ Die Dielektrizitätskonstanten haben bei Normalbedingungen die Werte: $\text{N}_2 = 1,00060$, $\text{CO}_2 = 1,00095$, $\text{C}_2\text{H}_4 = 1,00146$.

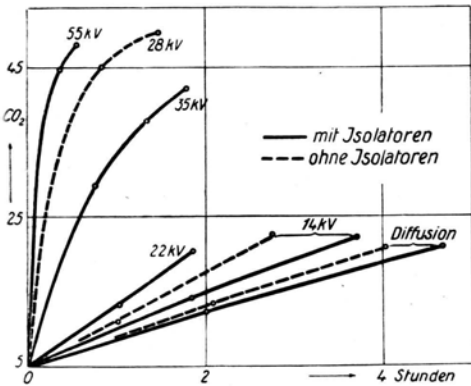


Abb. 2.

Abb. 2. Der Einfluß des Feldes auf die Diffusionsvermischung (N_2/CO_2 , 50/50%, 16 atm).

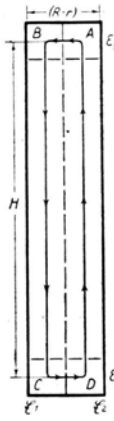


Abb. 3.

Abb. 3. Zur Theorie des Feldeinflusses auf die Diffusionsvermischung.

sei $\epsilon_2 > \epsilon > \epsilon_1$). An den Enden des Kastens teilen wir die Volumina A bis D so ab, daß ihr Inhalt jeweils $(R-r)^3/8$ beträgt. Es wird versuchsweise eine Gasbewegung auf dem eingezeichneten Weg angenommen und die elektrische Energiebilanz für eine Verschiebung um $(R-r)/2$ aufgestellt.

Die vertikale Bewegung ist mit keiner elektrischen Arbeit verbunden, da sie senkrecht zu den Feldlinien verläuft. Die bei den Verschiebungen $A \rightarrow B$ und $C \rightarrow D$ geleisteten Arbeiten sind verschieden wegen $\epsilon_2 \neq \epsilon_1$. Die Formel für die Energiedifferenz kann aus der früheren Arbeit⁵ entnommen werden:

$$U_{el} = \frac{1}{4\pi} (R-r)^3 (\epsilon_2 - \epsilon_1) P^2 \varphi, \quad (1)$$

mit der Apparatekonstante

$$\varphi = \frac{1}{(\ln R/r)^2} \left(\frac{1}{(R+3r)^2} - \frac{1}{(r+3R)^2} \right) \quad (1a)$$

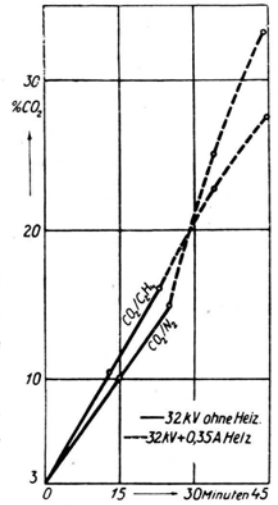


Abb. 4.

Zusammensetzung von Wärme- und Elektrokonvektion (16 atm, 50/50%).

2. Der Einfluß auf den Konvektions-transport

Bevor sich das Trennrohr eingestellt hat, wird durch die Wärmekonvektion die anzureichernde Komponente an ein Rohrende transportiert. Es soll jetzt die Wirkung des radialen Feldes auf diesen Konvektionstransport untersucht werden. Da bei hohem Druck nur eine kleine Trennrohrentmischung erwartet werden kann, ist es zweckmäßig, den Konvektionstransport wiederum aus der Vermischungsgeschwindigkeit der reinen Gase zu ermitteln. Zur Unterdrückung des im vorigen Abschnitt untersuchten Feldeffektes wird dabei ein verhältnismäßig langes Rohr verwendet.

Das äußere Stahlrohr hatte einen Innendurchmesser von 16 mm und eine Länge von 5,6 m. Es ließ sich aus zwei Teilstücken zusammensetzen. Am unteren Ende war der in Abb. 1 dargestellte Gasvorratsbehälter angeschlossen. Das innere Kupferrohr von 7,5 mm Stärke war durch 14 der bereits beschriebenen Bernsteinringe zentriert und konnte durch einen eingebauten Chromnickeldraht (5,4 Ω /m) elektrisch geheizt werden. Der Isolationswiderstand zwischen Stahl- und Kupferrohr war bei 40 kV und 16 atm Kohlensäure größer als $5 \cdot 10^9$ Ohm.

In die evakuierte Apparatur wurden durch das untere Ventil nacheinander 10 atm Stickstoff und 6 atm Kohlensäure eingefüllt. Die Gase können sich in dem langen Rohr durch Diffusion nur äußerst langsam vermischen. Etwa 4 Stunden nach dem Einfüllen wurde die Heizung eingeschaltet (0,50 A).

Zunächst wurde ohne Feld gemessen. Die Vermischungsgeschwindigkeit war bei nicht zu langer Versuchsdauer fast konstant = 0,46%/h. Die Anlage wurde sodann neu gefüllt und der Versuch zum zweitenmal begonnen. Nachdem durch zwei Analysen gesichert war, daß der Verlauf beider Kurven sich praktisch deckte, wurde (bei etwa 7,5 % CO_2) die Hochspannung eingeschaltet (42 kV). Die folgenden, im Abstand von etwa 10 Stunden entnommenen Proben zeigten, daß das Feld die Vermischungsgeschwindigkeit auf 0,02 %/h, d. h. auf den 23-ten Teil, herabsetzt. Drei weitere Versuche, von denen einer mit Wechselstrom durchgeführt wurde, sind zusammen mit den beiden ersten in Abb. 5 dargestellt. Sie zeigen die Spannungsabhängigkeit der Erscheinung. Bei jeder Neufüllung wurden die Anfangsbedingungen in einem kurzen Versuchsgang ohne Feld geprüft, der in der Abbildung nicht wiedergegeben ist. Die Anfangspunkte mit Feld sind durch geringfügiges gegenseitiges Verschieben der Kurven in Richtung

der Konzentrationsachse zur Deckung gebracht worden. Ein gleichfalls in Abb. 5 dargestellter Diffusionsversuch (ohne Heizung) zeigt, daß der Feldeffekt aus Abschn. 1 in dem langen Rohr nicht mehr festzustellen ist.

Die starke Transportverminderung durch das Feld kann nur auf dem wagerechten Temperaturgefälle beruhen, da eine erhebliche Veränderung der gaskinetischen Größen nach⁵ ausgeschlossen ist. Auch die dort untersuchte Beeinflussung der Konvektionsströmung kommt jetzt als Erklärung nicht in Frage, da sie in dem senkrechten Rohr wegen der großen Antriebslänge der Konvektion zu klein ist und außerdem im Sinne einer Transportvergrößerung wirken müßte.

Für die Theorie der Erscheinung ist folgende Beobachtung wichtig: In der Abb. 5 sind besonders die mit niederen Spannungen aufgenommenen Kurvenstücke deutlich nach oben durchgebogen. Die Wiederholung des Versuches in einem nur 2,6 m langen Rohr (oberes Teilstück der beschriebenen Anlage) zeigt, daß die Stärke der Durchbiegung mit abnehmender Rohrlänge zunimmt. Nach dem Ausschalten des Feldes ist die Vermischungsgeschwindigkeit so stark gegenüber der Vergleichskurve heraufgesetzt, daß der durch das Feld verursachte Zeitverlust aufgeholt wird. Weiter stellt man fest, daß die anfängliche Bremsung mit der Zahl der Strömungshindernisse größer wird.

Folgende Vorstellung scheint das Wesentliche des Vorganges zu erfassen: Auf Grund des Temperaturgradienten besteht zwischen den Rohren ein horizontales Dichtegefälle, das mit einem Gra-

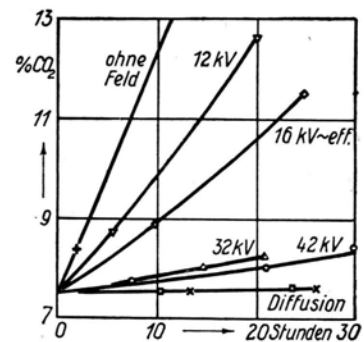


Abb. 5. Der Einfluß des Feldes auf die Konvektionsvermischung (5,6 m Rohr). In der Diffusionskurve geben die Quadrate die Meßpunkte des Versuches mit Feld und die Kreuze die Punkte ohne Feld (N_2/CO_2 , 62/38%, 16 atm, 0,50 A Heizung).

dienten der Dielektrizitätskonstante verknüpft ist. Feld- und Dielektrizitätskonstanten-Gradient sind so gerichtet, daß die Temperaturschichtung beim Einschalten des Feldes instabil wird. Wäre keine Trennröhrkonvektion vorhanden, so würde

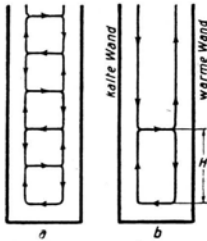


Abb. 6. Zur Theorie des Feldeinflusses auf die Konvektionsvermischung.

sich die Instabilität in einer das Rohr durchsetzenden Folge von gegenläufigen Zirkulationen ausgleichen¹⁰ (Abb. 6a). Die normale Trennröhrkonvektion arbeitet diesem Vorgang entgegen und beschränkt ihn auf die Umkehrstellen an den Konvektionshindernissen, wo die Querströmung bereits vorgebildet ist (Abb. 6b). Die Höhe H der verbleibenden gegenläufigen Zirkulation stellt sich wahrscheinlich so ein, daß die thermische Kraft die elektrische gerade kompensiert. Der Raum zwischen Isolator und Umkehrstelle bleibt dann im wesentlichen konvektionsfrei und muß bei dem Transportvorgang durch die langsame *Diffusion* überwunden werden.

Da die Verhältnisse ähnlich wie bei den Wärmeübergangsversuchen⁵ liegen, kann die Höhe der Stauzonen mit den dort abgeleiteten Formeln abgeschätzt werden. Die für mittlere Spannungen gefundene Größenordnung von 1 cm reicht zur Erklärung der gemessenen Transport-Verzögerung aus.

Wir haben hier geschlossen, daß die Hochspannung eine Transportstauung an den Konvektionshindernissen hervorruft, deren Zusammenbrechen nach dem Ausschalten des Feldes das Aufholen ermöglicht. Andererseits wird im zweiten Teil gezeigt, daß die Wärme konvektion bei hohem Druck Turbulenzerscheinungen auslöst, die sich durch das ganze Rohr erstrecken und deren Beeinflus-

¹⁰ Ähnliche Erscheinungen können auf Grund der Schwerkraft in Flüssigkeiten beobachtet werden, die infolge eines vertikalen Temperaturgradienten instabil geschichtet sind. Vergl. L. Prandtl, Strömungslehre, 2. Aufl., Fr. Vieweg & Sohn, Braunschweig 1944, S. 372.

sung durch das Feld einen *bleibenden* Transportverlust bewirkt. Dies findet merklich aber erst bei höheren Temperaturdifferenzen und Feldstärken statt.

Die für die weitere Untersuchung wichtigste Folgerung aus der entwickelten Vorstellung ist, daß die Instabilität und damit die unangenehme Erscheinung der Transportverminderung verschwinden muß, wenn man den Gradienten der Dielektrizitätskonstante umkehrt, d. h. ein *außen* geheiztes Rohr verwendet.

Diese Voraussage konnte experimentell bestätigt werden. Darüber hinaus zeigte sich bei dem außen geheizten Rohr eine schwache Beschleunigung der Vermischung durch das Feld, die sich mit der laminaren Theorie *nicht* erklären läßt. Wir werden darauf im zweiten Teil noch zurückkommen.

3. Der Einfluß auf die Entmischung

Bei den bisherigen Versuchen konnte die Thermodiffusion unberücksichtigt bleiben. Wir wenden uns nun den besonderen Verhältnissen bei der Trennröhrentmischung zu. Um die Strömung möglichst laminar zu erhalten, wurden wieder sehr kleine Temperaturdifferenzen angewendet.

In Abb. 7 ist ein mit der innengeheizten 5,6 m langen Apparatur durchgeführter Versuch dargestellt. Die mit 0,6 A erzielte Entmischung von 4,8% wird durch 50 kV beträchtlich herabgesetzt. Der Abfall mit Feld erfolgt etwa achtmal langsamer als der Wiederanstieg nach dem Ausschalten der Hochspannung. Ein zweiter Versuch mit 14 kV zeigt die Spannungsabhängigkeit der Erscheinung.

Der Unterschied in der Geschwindigkeit des Abfalls und des Wiederanstieges läßt sich zwar mit den Stauzonen begründen, doch geht die Verminde-

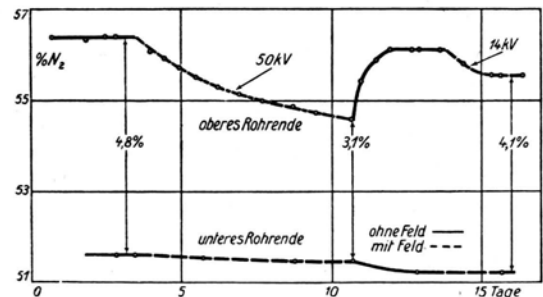


Abb. 7. Der Einfluß des Feldes auf die Trennröhrentmischung (N_2/CO_2 , 16 atm).

rung der Entmischung selber aus den bisher untersuchten Vorgängen *nicht* hervor.

An dieser Stelle soll kurz die geringfügige Entmischung der Gase mit verschiedenem ϵ im inhomogenen Feld diskutiert werden. Dieser Primärvorgang wird, wie die Thermodiffusion, durch die Konvektion vervielfacht und überlagert sich der Trennröhrentmischung. Für die Konstante des Elementarprozesses berechnet man aus dem Boltzmannschen Satz

$$q_{el} - 1 = \frac{2(\epsilon_2 - \epsilon_1) P^2 q}{\pi N k T} \quad (2)$$

(N = Zahl der Moleküle im cm^3 , k = Boltzmannsche Konstante). Das gibt unter den Bedingungen des in Abb. 7 dargestellten Versuches (50 kV): $q_{el} - 1 = 1,5 \cdot 10^{-6}$. Dieser Wert ist gegenüber dem entsprechenden für die Thermodiffusion $q_{Therm.} - 1 = 2 \cdot 10^{-4}$ um zwei Größenordnungen kleiner, kommt also zur Erklärung für die beobachtete verminderte Entmischung nicht in Frage. Nebenbei sei bemerkt, daß es wegen des kleinen Elementareffektes selbst bei Dipolgasen wenig aussichtsreich erscheint, die Kombination von Elektrostriktions-Entmischung und Wärmekonvektion zur *Gastrennung* auszunützen.

Zur Erklärung des Feldeinflusses auf die Entmischung muß man offenbar trotz der sehr kleinen Temperaturdifferenz die *Wirbelbildung* heranziehen. Dies wird bereits deutlich, wenn man auf Grund der laminaren Trennröhretheorie² die Ent-

mischung *ohne Feld* für die in Abb. 7 dargestellten Verhältnisse zu berechnen versucht. Mit dem sicher zu hoch angenommenen Wert von 10° für die Temperaturdifferenz erhält man bei 16 atm unter Verwendung des bekannten Thermodiffusionsfaktors¹¹ für die Trennlänge $L = 82$ m, während sich aus der gefundenen Entmischung $L = 29$ m ergibt. Diese Abweichung liegt außerhalb der Fehlergrenze und kann nur durch Wirbelbildung bedingt sein. Überraschend ist, daß die Turbulenz die Trennschärfe bei hohem Druck demnach außerordentlich *vergrößert*.

Der Einfluß der Wirbelbildung auf die Entmischung des Trennröhres bei *hohem Druck* ist bisher noch nicht untersucht worden. Für das weitere Studium der elektrischen Erscheinungen ist daher zunächst eine Behandlung der Turbulenzvorgänge ohne Feld erforderlich. Entsprechende Versuche werden im zweiten Teil der Arbeit beschrieben. Sie ermöglichen eine befriedigende Erklärung auch der zuletzt gefundenen Feldwirkungen und zeigen, wie sich das praktische Ziel der Untersuchung, die Verbesserung des Trennröhrewirkungsgrades, mit Hilfe des Feldes erreichen läßt.

¹¹ Z. B. L. Waldmann, Z. Naturforschg. **1**, 59 [1946].