

Das Trennrohr mit hohem Druck und radialem elektrischen Feld¹

II. Erscheinungen der Turbulenz

Von ERWIN WILLY BECKER

Aus dem Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie, Tailfingen

(Z. Naturforschg. 2a, 447–454 [1947]; eingegangen am 4. März 1947)

1. Der Entmischungsvorgang im Clusius-Dickelschen Trennrohr wird erstmalig bei hohem Druck im Bereich von 1–26 atm untersucht (Wandabstand = 4,2 mm). Es zeigt sich, daß die Turbulenz besonders bei hohem Druck die Trennschärfe des Rohres gegenüber der Erwartung nach der laminaren Theorie außerordentlich *vergrößert*. Die Verbesserung der Trennschärfe wird durch eine Verminderung des Transportes so kompensiert, daß die Energieausbeute von turbulenter und laminarer Entmischung übereinstimmen. Die Turbulenz läßt sich in den laminaren Trennrohrformeln durch Einführung eines effektiven Wandabstandes berücksichtigen.

2. Die Wirbelbildung bei hohem Druck kann mit einem radialen elektrischen Feld stark beeinflusst werden. Im außen geheizten Trennrohr wird sie durch Elektrostriktionskräfte vermindert, im innen geheizten dagegen verstärkt. Bei dem als Modellgas verwendeten Stickstoff-Kohlensäure-Gemisch unter 16 atm Druck kann der Wirkungsgrad der Trennung durch die Kombination von Turbulenz und Feld gegenüber den optimalen laminaren Verhältnissen verbessert werden.

Im ersten Teil dieser Arbeit¹ wurde die Frage erörtert, ob sich die Leistungsfähigkeit des Clusius-Dickelschen Trennrohres² durch Anwendung eines radialen elektrischen Feldes in Verbindung mit hohem Druck verbessern läßt. Zur Klärung der Verhältnisse wurden mit einem Stickstoff-Kohlensäure-Gemisch die Elektrostriktionserscheinungen untersucht, die bei 16 atm auf Grund des vertikalen Konzentrations- und des horizontalen Temperaturgradienten auftreten. Dabei stellte sich heraus, daß eine vollständige Beschreibung der verschiedenen Vorgänge nur bei Berücksichtigung der Turbulenz möglich ist.

Der Einfluß der Wirbelbildung auf die Entmischung im Trennrohr *bei hohem Druck* ist bisher nicht untersucht worden. Onsager und

Watson³ befassen sich zwar mit den Turbulenzerscheinungen im Bereich bis 4 atm. Sie untersuchen jedoch nicht den Entmischungsvorgang, sondern die mit der Wirbelbildung einsetzende Änderung der Temperaturdifferenz zwischen den Rohren. Offenbar wird, wie in allen anderen Arbeiten über das Trennrohr, vorausgesetzt, daß die Turbulenz die Entmischung in jedem Fall weitgehend *zerstört*.

Durch eine systematische Untersuchung im Druckbereich bis 26 atm wird in der vorliegenden Arbeit zunächst gezeigt, daß die Wirbelbildung, im Gegensatz zur bestehenden Anschauung, die Energieausbeute der Trennung bei hohem Druck weitgehend *unbeeinflusst* läßt. Gegenüber den Erwartungen nach der laminaren Theorie wird durch die Turbulenz eine außerordentliche *Steigerung der Trennschärfe* mit einer äquivalenten *Verminderung des Transportes* erzielt. Im Anschluß daran werden die elektrischen Versuche des ersten Teiles weitergeführt, wobei es gelingt, den Wirkungsgrad der Trennung bei dem als Modellgas verwendeten Stickstoff-Kohlensäure-Gemisch mit Hilfe des Feldes gegenüber den optimalen laminaren Verhältnissen zu verbessern.

¹ E. W. Becker, Das Trennrohr mit hohem Druck und radialem elektrischen Feld. Teil I: Von der Turbulenz unabhängige Wirkungen des Feldes. Z. Naturforschg. 2a, 441 [1947].

² K. Clusius u. G. Dickel, Naturwiss. 26, 546 [1938]; Z. physik. Chem. (B) 44, 397 [1939]; Theoretische Darstellung u. a. L. Waldmann, Z. Physik 114, 53 [1939]; W. Furry, R. Jones u. L. Onsager, Physic. Rev. 55, 1083 [1939]; Zusammenfassende Darstellung und Literatur bis 1941 R. Fleischmann u. H. Jensen, Ergebn. exakt. Naturwiss. 20, 121 [1942]; s. a. K. Clusius u. E. W. Becker, Z. Naturforschg. 2a, 154 [1947].

³ L. Onsager u. Watson, Physic. Rev. 56, 474 [1939]; s. a. Simon, Physic. Rev. 60, 172 [1941].



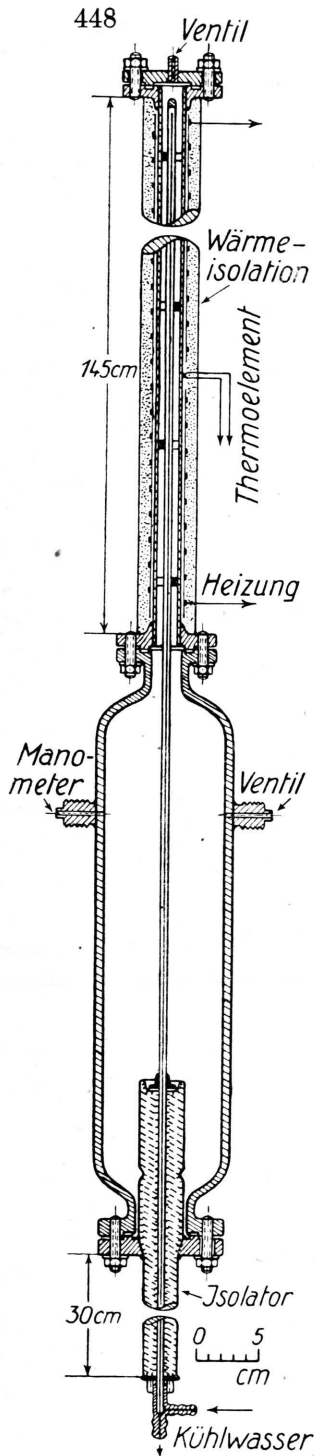


Abb. 1. Das Hochdruck-trennrohr zur Untersuchung der Wirkung eines radialen elektrischen Feldes auf die turbulente Entmischung (Arbeitsdruck bis 30 atü).

I. Die turbulente Entmischung ohne Feld

1. Die Apparatur war bereits für die späteren Feldversuche vorgesehen. Sie hatte eine wirksame Länge von 1,45 m bei einem Radienverhältnis von 8,0/3,75 mm (Abb. 1). Die Zentrierung des inneren Rohres erfolgte im Abstand von 35 cm durch die früher beschriebenen Bernsteinringe¹. Das Stahlrohr konnte von außen elektrisch geheizt werden, während das innere, aus Kupfer bestehende Rohr von Kühlwasser durchströmt war. Der Wirbeleinsatz wurde durch Messung der Temperaturdifferenz zwischen den Rohren festgestellt³. Dazu war die eine Verbindungsstelle eines Thermoelementes auf dem Stahlrohr aufgelötet, während sich die andere im Kühlwasser befand.

2. Zunächst wurde mit einem Gemisch aus gleichen Teilen Stickstoff und Kohlensäure die Entmischung und die Temperaturdifferenz zwischen den Rohren bei konstanter Heizleistung (61 Watt) im Bereich von 1 bis 26 atm bestimmt. Das Ergebnis ist im oberen Teil der Abb. 2 dargestellt. Nach Aussage der Temperaturkurve setzt die Turbulenz bei 3,6 atm ein. Im unteren Teil der Abbildung sind die aus der Entmischung berechneten Trennlängen aufgetragen. Außerdem ist der nach der laminaren Theorie zu er-

wartende Verlauf der Trennlänge gestrichelt eingezeichnet. Diese letztere Kurve entspricht der Beziehung⁴

$$L = 0,88 \frac{\Delta r}{\alpha \Delta T} \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^2 + 2 \left(\frac{p_0}{p} \right)^2 \right] \quad (1)$$

(Δx = Wandabstand, α = Thermodiffusionsfaktor, ΔT = Temperaturdifferenz zwischen den Rohren, T = mittlere absolute Temperatur, p = Gasdruck, p_0 siehe⁴). Als Thermodiffusionsfaktor α wurde das Mittel aus den beiden in der Literatur angegebenen Werten⁵ genommen (0,047). Unterhalb der Wirbelgrenze folgen die Meßpunkte der laminaren Kurve tadellos, was als eine experimentelle Bestätigung der Theorie in diesem Druckbereich angesehen werden kann. Von 3,6 atm an biegen sie jedoch mit zunehmendem Druck stark nach unten ab. Bei 26 atm arbeitet das turbulente Rohr fast 20-mal trennschärfer, als es die laminare Theorie verlangt.

Ähnliche Verhältnisse ergeben sich mit Luft als Rohrfüllung. Wegen der größeren Zähigkeit und kleineren Dichte setzt jedoch in diesem Gasgemisch, trotz der verwendeten größeren Heizleistung (135 Watt), die Turbulenz erst bei 4,6 atm ein, und die Trennschärfe zeigt bei 26 atm nur etwa den 8-fachen Betrag des nach Gl. (1) berechneten Wertes (vergl. Tab. 4).

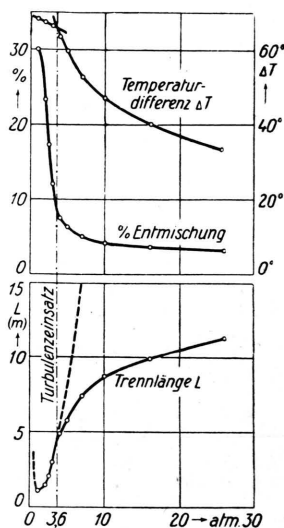


Abb. 2. Druckabhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen den Rohren und der Entmischung ohne Feld (oben) sowie der daraus berechneten Trennlängen (unten). Als Entmischung ist die Differenz des Stickstoffgehaltes am oberen und unteren Rohrende angegeben (N_2/CO_2 50/50%, 61 Watt).

⁴ R. Fleischmann u. H. Jensen, *Ergebn. exakt. Naturwiss.* **20**, 121 [1942], Gl. (21c). p_0 ist der Druck, bei dem L sein Minimum hat. Er wurde gleich 1,08 atm gesetzt. Die Trennlänge L ist das Rohrstück, längs dessen sich die Konzentration um den Faktor e verschiebt. Kleine Trennlänge bedeutet daher große Trennschärfe und umgekehrt.

⁵ T. L. Ibbs u. A. C. R. Wakeman, *Proc. Roy. Soc. [London] Ser. A* **134**, 613 [1932]; L. Waldmann, *Naturwiss.* **32**, 222 [1944].

Verhältnis N ₂ /CO ₂ in %	ΔT in °	$\Delta \gamma$	L (cm)
25/75	38,5	0,034	863
50/50	40,0	0,038	970
75/25	41,0	0,023	1097

Tab. 1. Konzentrationsabhängigkeit der Trennlänge (16 atm, 61 Watt).

3. Auch durch Variation des Mischungsverhältnisses bei konstantem Druck kann gezeigt werden, daß im Gebiet $p \gg p_0$ die Tendenz zur Wirbelbildung für die Größe der Entmischung entscheidend ist. Aus Tab. 1 geht hervor, daß das CO₂-reichste Gemisch die kürzeste Trennlänge ergibt, während die laminare Theorie und die geringe Konzentrationsabhängigkeit von α das Gegenteil erwarten lassen.

4. Der Einfluß der *Temperaturdifferenz* auf die turbulente Entmischung kann aus Tab. 2 entnommen werden. Es zeigt sich, daß L annähernd proportional zu $1/\sqrt{\Delta T}$ ist.

5. Zur Beurteilung des *Wirkungsgrades* der turbulenten Entmischung ist noch eine Transportbestimmung erforderlich, da die Energieausbeute durch den Quotienten aus der Trennlänge L und dem Anfangstransport τ_1 gegeben ist.

Unter dem Anfangstransport versteht man die Menge an reiner anzureichernder Komponente, die in der Zeiteinheit durch die Trennrohrwirkung an ein Rohrende transportiert wird, solange noch kein nennenswertes senkrechtes Konzentrationsgefälle vorhanden ist. τ_1 kann in einem nicht unterteilten Rohr exakt nach der von Clusius und Dickel bei niedrigen Drucken angewendeten Methode² bestimmt werden. Bei der vorhandenen, notwendigerweise mehrfach unterteilten Apparatur ist es jedoch zweckmäßiger, den Transport aus der bei einer bestimmten gleichmäßigen Entnahme sich einstellenden Endkonzentra-

Heizleistung in Watt	ΔT in °	$\Delta \gamma$	L in cm	$L \cdot \sqrt{\Delta T}$ m · grad ^{1/2}
135	80	0,056	645	58
61	40	0,038	970	61
8,6	9	0,016	2250	67

Tab. 2. Abhängigkeit der Trennlänge von ΔT (N₂/CO₂ 50/50%, 16 atm).

tion zu berechnen. Sind A und a die Anreicherungs-faktoren der Anlage ohne und mit Entnahme, und ist m die in der Zeiteinheit entnommene Gasmenge mit dem Überschuß $\Delta \gamma$ an anzureichernder Komponente, so ergibt sich für den Anfangstransport⁶ (unabhängig von der Turbulenz)

$$\tau_1 = m \Delta \gamma \frac{A - 1}{A - a}. \quad (2)$$

Der Transport wurde bei verschiedenen Drucken bestimmt. Experimentelle Einzelheiten sind bei der Untersuchung des Feldeinflusses beschrieben. Tab. 3 zeigt das Ergebnis. In der letzten Spalte ist als Maß für die Energieausbeute der Quotient τ_1/L aufgeführt, der nach der laminaren Theorie im Gebiet $p \gg p_0$ vom Druck unabhängig sein soll. Die Versuche zeigen, daß der *Wirkungsgrad der Trennung durch die Wirbelbildung nicht merklich beeinflusst wird. Alle τ_1/L -Werte stimmen unter sich und mit dem nach der laminaren Theorie berechneten Quotienten innerhalb der zu erwartenden Fehlergrenze überein. Es sei besonders darauf hingewiesen, daß die Versuche mit konstanter Heizleistung durchgeführt wurden. Bei festgehaltener Temperaturdifferenz ist die turbulente Entmischung dem größeren Wärme-*

⁶ R. Fleischmann u. H. Jensen⁴ Gl. (23a) mit $\tau_0 c(0) = \tau_1$ und $\tau = m \Delta \gamma$.

Druck	Entmischung ohne Entnahme in %	Entmischung mit Entnahme in %	Entnahme cm ³ Gas/h	τ_1 cm ³ /h n. Gl. (2)	L ohne Entnahme (cm)	τ_1/L 10 ⁻² cm ³ /h
2,4	19,0	9,8	95	15,5	200	7,7
6,5	5,3	2,5	1000	45	700	6,5
13,0	4,0	1,3	3200	60	940	6,4
23,0	3,3	1,3	3800	78	1090	7,2
$\gg p_0$	berechnet nach der laminaren Theorie mit $\alpha = 0,047$ und $\Delta T = 65^\circ$					7,4

Tab. 3. Transportbestimmung bei verschiedenen Drucken. τ_1/L ist innerhalb der Fehlergrenze vom Druck und von der Turbulenz unabhängig. Die Fehlergrenze ist im wesentlichen durch die Analysengenauigkeit gegeben, die $\pm 0,05\%$ beträgt.

übergang entsprechend leistungsfähiger als die laminare.

6. An dieser Stelle muß kurz die Frage nach der Druckabhängigkeit des Thermoeffusionsfaktors diskutiert werden. α wurde in der vorliegenden Betrachtung im Anschluß an die Enskog-Chapmansche Theorie als *druckunabhängig* angenommen. Die Richtigkeit dieser Annahme dürfte durch die beschriebenen Versuche im wesentlichen bestätigt werden. Die Vermutung von Schmahl und Schewe⁷, daß die Thermoeffusion in dem von ihnen untersuchten System H_2/CO_2 bei 4,2 atm verschwindet, kann nicht zutreffen, da die in Abb. 1 dargestellte Apparatur mit einem Gemisch aus gleichen Teilen Wasserstoff und Kohlensäure unter 16 atm Druck bei nur 10° Temperaturdifferenz eine Entmischung von 25% ergab. Da Schmahl und Schewe, die den Elementareffekt bestimmen, ein wagrecht liegendes Versuchsgefäß verwenden, dürfte die Druckabhängigkeit von α durch eine druckabhängige Konvektionsbewegung vorge täuscht werden.

II. Theorie der turbulenten Entmischung ohne Feld

Die Gleichheit der Energieausbeute von turbulenter und laminarer Entmischung kann folgendermaßen erklärt werden:

Zwischen der heißen und der kalten Wand des Trennrohres strömen zwei Gasschichten mit verschiedener Dichte aneinander vorbei. Die in Ruhe befindliche Grenzschicht zwischen beiden wird nach den Erfahrungen der Hydrodynamik leicht instabil und zum Ausgangspunkt für die bei einer allmählichen Vergrößerung des Gasdruckes plötzlich einsetzende Turbulenz. Da die Wirbel die Strömung bremsen und so die Turbulenzneigung selber vermindern, bleibt der Wirbelvorgang auf die Nachbarschaft der früheren Grenzschicht beschränkt. Die Strömung des turbulenten Trennrohres setzt sich daher aus den beiden laminaren Gebieten in der Nähe der Wände und der dazwischenliegenden turbulenten Zone zusammen, deren Breite mit zunehmendem Gasdruck größer wird. Das von den Wirbeln erfaßte Gebiet stellt bei hohem Druck sowohl für den Impuls- als auch für den Wärme- und Materialtransport praktisch einen Kurzschluß dar. Man kann daher das Wirbelgebiet bei der Berechnung des Entmischungsvorganges in Gedanken herauschneiden und auf den Vorgang in dem restlichen Raum die laminaren Formeln anwenden. Die Wirkung der Tur-

bulenz wird so einfach als eine Annäherung der Trennrohrwände beschrieben (Abb. 3). Da der Wirkungsgrad der laminaren Trennung von Δx unabhängig ist, geht die gefundene Konstanz von τ_1/L unmittelbar aus der Theorie hervor.

Da eine Berechnung des „effektiven Wandabstandes“ nicht möglich ist, entnehmen wir ihn aus der experimentell aufgenommenen Temperaturkurve der Abb. 2. Bezeichnet man die Temperaturdifferenz vor dem Turbulenzeinsatz mit $\Delta T_{\text{lamin.}}$ und die Temperaturdifferenz bei dem zu untersuchenden Druck im turbulenten Gebiet mit $\Delta T_{\text{turb.}}$,

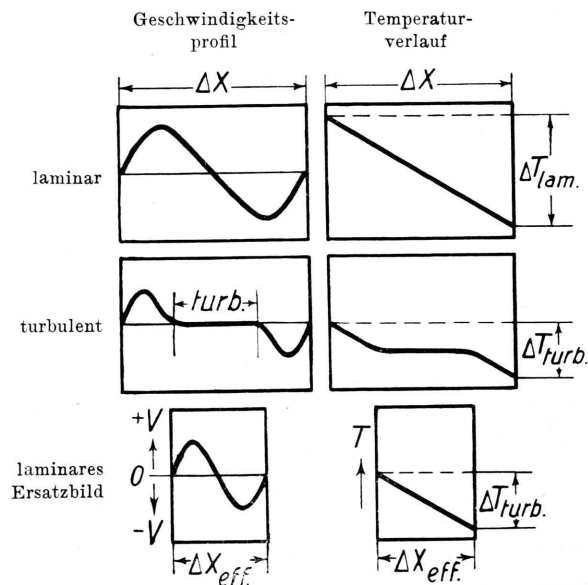


Abb. 3. Zur Theorie der turbulenten Entmischung ohne Feld (ebene Anordnung).

so ergibt sich für die ebene Anordnung, da die Temperaturdifferenz bei konstanter Heizleistung dem Wandabstand umgekehrt proportional ist⁸:

$$\Delta x_{\text{eff.}} = \Delta x \cdot \Delta T_{\text{turb.}} / \Delta T_{\text{lamin.}}$$

In Tab. 4 sind die mit $\Delta x_{\text{eff.}}$ berechneten Trennlängen mit den experimentell gefundenen verglichen. Die Übereinstimmung ist besonders im Hinblick auf die völlig abwegigen mit Δx berechneten Werte befriedigend.

Die Überlegungen gelten nicht für das Gebiet $p \leq p_0$, da nach der laminaren Theorie dort eine

⁸ Die Annahme eines druckunabhängigen $\Delta T_{\text{lamin.}}$ ist wegen des Wärmetransportes an den Umkehrstellen der Strömung nicht ganz exakt.

⁷ Schmahl u. Schewe, Z. Elektrochem. angew. physik. Chem. 46, 203 [1940].

Stickstoff/Kohlensäure (50/50 ‰)				Stickstoff/Sauerstoff (Luft)			
Druck atm	Trennlänge L in m			Druck atm	Trennlänge L in m		
	exp.	berechnet nach Gl. (1)			exp.	berechnet nach Gl. (1)	
		mit $\Delta x_{\text{eff.}}$	mit Δx			mit $\Delta x_{\text{eff.}}$	mit Δx
5,0	5,7	5,6	8,0	5,5	10,8	10,5	13,3
7,0	7,4	6,7	15,7	8,0	14,3	13,4	28,2
10,0	8,7	8,7	32	16,0	26,2	19,4	113
16,0	9,7	11,7	82	26,0	39	26	296
26,0	11,3	14,4	217				

Tab. 4. Vergleich der experimentell bestimmten Trennlängen mit den aus Gl. (1) auf Grund von $\Delta x_{\text{eff.}}$ und Δx berechneten Werten. Heizleistung: $\text{N}_2/\text{CO}_2 = 61$ Watt, $\text{N}_2/\text{O}_2 = 135$ Watt. Druck = 16 atm.

Verminderung von Δx wegen der ins Gewicht fallenden Rückdiffusion eine Verschlechterung der Energieausbeute zur Folge hat. Damit ergibt sich die von anderen Autoren bei *niederen* Drucken gefundene negative Wirkung der Turbulenz.

III. Die turbulente Entmischung mit Feld

Die bisherigen Versuche haben gezeigt, daß der Wirkungsgrad des Trennröhres bei hohem Druck durch die Wirbelbildung nicht merklich beein-

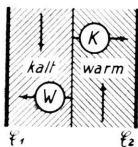


Abb. 4. Zur Theorie der Wirkung des radialen elektrischen Feldes auf die Turbulenz.

ten Gebiet stammendes Volumenelement K durch die Trennungslinie in das warme Gebiet einge-
drungen ist und umgekehrt. Die kalte Blase zeigt gegenüber ihrer Umgebung eine größere, die warme eine kleinere Dielektrizitätskonstante. Ein horizontales inhomogenes elektrisches Feld mit der Feldstärke \mathcal{E} übt daher, bei $\mathcal{E}_2 > \mathcal{E}_1$ auf die fraglichen Volumenelemente Kräfte in Richtung der eingezeichneten Pfeile aus und verstärkt so die Turbulenz, während es bei $\mathcal{E}_2 < \mathcal{E}_1$ dem Wirbelvorgang entgegenarbeitet. Der erste Fall, der bei einem *innen* geheizten Trennröhr verwirklicht ist, führt zu einer Verbreiterung der Wirbelzone, d. h. zu einer Verminderung von $\Delta x_{\text{eff.}}$, während bei einem außen geheizten Rohr der effektive Wandabstand durch das Feld vergrößert wird. Im einzelnen können daher die in der Tab. 5 zusammengestellten Feldwirkungen erwartet werden.

Bezüglich der Entmischung läßt sich keine zwingende Voraussage treffen. Der zu $\Delta T/\Delta x$ proportionale horizontale Thermodiffusionsstrom sollte nach Tab. 5 zwar konstant bleiben, doch ist eine zusätzliche Beeinflussung durch das Feld nicht auszuschließen.

Wir kommen zu den Versuchen und besprechen die beiden Fälle.

Heizung	$R_{\text{krit.}}$	$\Delta x_{\text{eff.}}$	ΔT	v
außen	+	+	+	+
innen	—	—	—	—

Tab. 5. Der zu erwartende Feldeinfluß auf die kritische Reynoldssche Zahl $R_{\text{krit.}}$, den effektiven Wandabstand $\Delta x_{\text{eff.}}$, die Temperaturdifferenz ΔT und die Konvektionsgeschwindigkeit v .

+ bedeutet Vergrößerung, — Verminderung.

flußt wird. Dennoch wird man gewöhnlich nicht mit turbulenter Strömung arbeiten wollen, da die effektive Wandannäherung im allgemeinen durch eine wirkliche ersetzt werden kann, die wegen des kleineren Rohrinhaltes zu günstigeren Einstellzeiten führt. Es soll jetzt untersucht werden, ob sich die Vorgänge in der turbulenten Zone mit einem radialen elektrischen Feld so beeinflussen lassen, daß sich eine *Verbesserung* der Energieausbeute ergibt. Wir überlegen zunächst, welche Wirkungen des Feldes auf die Turbulenz zu erwarten sind:

Abb. 4 gibt ein Stück des Trennröhr-Längsschnittes wieder, das schematisch in eine kalte und eine warme Zone eingeteilt ist. Der Wirbelvorgang ist dadurch angedeutet, daß ein aus dem kal-

a) Außenheizung

1. Die Apparatur ist im ersten Abschnitt beschrieben. Die Zahl der Bernsteinringe wurde von 4 auf 11 erhöht, um eine möglichst gute Zentrierung der inneren Elektrode zu erreichen. Die Ent-

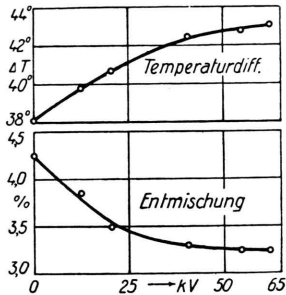


Abb. 5. Der Einfluß des Feldes auf die Temperaturdifferenz zwischen den Rohren (oben) und auf die Entmischung (unten) bei Außenheizung (N_2/CO_2 , 16 atm, 61 Watt).

mischung ohne Feld mit 61 Watt und 16 atm stieg dadurch von 3,8 % auf 4,4 %. Die Temperaturdifferenz sank von 40° auf 38° .

2. Im unteren Teil der Abb. 5 ist der Einfluß des Feldes auf die Entmischung wiedergegeben, im oberen Teil der Einfluß auf die Temperaturdifferenz. Im Einklang mit der Erwartung bewirkt die Hochspannung ein Ansteigen von ΔT (maxim. 12 %) und ein Absinken der Entmischung (maxim. 25 %). Beide Kurven zeigen eine bei etwa 40 kV beginnende Sättigung.

3. Zur Bestimmung der Transportbeeinflussung wurde mit Stickstoff/Kohlensäure bei 16,5 atm mit 61 Watt zunächst das Trennrohr ohne Feld eingestellt (Entm.=4,4%). Dann wurde das obere Ventil so weit geöffnet, daß etwa 1 l Gas in der Stunde ausströmte. Die entnommene Gasmenge konnte fortlaufend durch Auffangen in einer pneumatischen Wanne bestimmt werden. Sie ist im oberen Teil der Abb. 6 zusammen mit dem Gasdruck in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen⁹. Im unteren Teil der Abbildung ist der zeitliche Verlauf der Stickstoffkonzentration am oberen und unteren Rohrende wiedergegeben. Die Entmischung sinkt durch die Entnahme zunächst

⁹ Obwohl die anfängliche Ventileinstellung während des ganzen Versuches nicht verändert wurde, nahm die in der Zeiteinheit ausströmende Gasmenge allmählich ab. Als Grund kommt neben der Druckabnahme eine allmähliche Verlegung des äußerst feinen Ventildurchganges in Frage.

	Druck atm	Ent- mischung ohne Ent- nahme %	Ent- mischung mit Ent- nahme %	Ent- nahme cm ³ Gas/h	τ_1 nach Gl. (2) cm ³ /h
ohne Feld	15,3 13,7 14,5	4,4 4,5 Mittel	2,6 2,8 aus Zeile 1 und 2	1180 860	72 60 66
mit 50 kV	14,5	3,6	3,3	970	295

Tab. 6. Zum Feldeinfluß auf den Transport bei Außenheizung (N_2/CO_2 50/50 %, 61 Watt).

schnell ab, bis sie mit 2,6 % einen nahezu stationären Wert erreicht. Das Einschalten des Feldes (50 kV) bewirkt eine erhebliche Vergrößerung der Entnahmekonzentration (auf 3,3 %), d. h. des Transportes. Nach dem Ausschalten der Hochspannung sinkt dieselbe auf 2,8 %.

Bei der Auswertung des Versuches könnte die zeitliche Änderung der ausströmenden Gasmenge dadurch eliminiert werden, daß der Meßwert mit Feld mit dem Mittel aus zweien ohne Feld verglichen wurde. Die entsprechenden Zeiten sind in Abb. 6 durch strichpunktierte Linien gekennzeichnet. Die verschiedenen Größen sind in der Tab. 6 zusammengestellt und mit Gl. (2) ausgewertet.

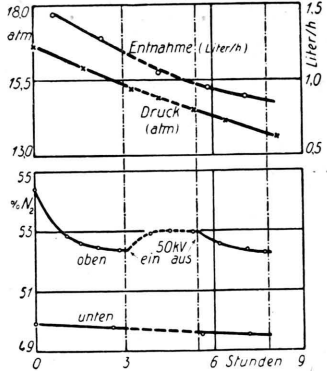


Abb. 6. Zur Untersuchung der Transportbeeinflussung bei Außenheizung (N_2/CO_2 , 61 Watt).

Man berechnet für den Anfangstransport bei 14,5 atm

τ_1 ohne Feld = 66 cm³/h, τ_1 mit 50 kV = 295 cm³/h,
d. h. das Feld vergrößert den Transport um der Faktor 4,5.

Die starke Transportsteigerung ist überraschend da nach Abb. 5 die Entmischung ohne Entnahme

durch die gleiche Spannung nur um 25% sinkt. Berechnet man τ_1/L , so ergibt sich

$$\begin{aligned}\tau_1/L \text{ ohne Feld} &= 0,08 \text{ cm}^2/\text{h}, \\ \tau_1/L \text{ mit } 50 \text{ kV} &= 0,29 \text{ cm}^2/\text{h}.\end{aligned}$$

Der Wirkungsgrad der Trennung wird durch das Feld demnach um den Faktor 3,5 verbessert.

4. Es erschien wünschenswert, die starke Transportvergrößerung durch das Feld noch auf einem anderen Weg nachzuweisen. Da der Einfluß auf den Transport wahrscheinlich in einer Erhöhung des Gasumlaufes bestand, mußte er sich von der Thermodiffusion unabhängig auch bei der Vermischung der Gase zeigen. Das Ergebnis eines Vermischungsversuches, dessen Durchführung bereits in¹ beschrieben wurde, ist in der linken Kurve der Abb. 7 dargestellt (Außenheizung). Das Feld ergibt den erwarteten Effekt. Man entnimmt aus der Kurve für den Augenblick des Einschaltens der Hochspannung eine Vergrößerung der Vermischungsgeschwindigkeit um den Faktor 4,0 in guter Übereinstimmung mit dem für die Transportbeeinflussung oben gefundenen Wert (4,5).

b) Innenheizung

1. Die Feldeffekte bei Innenheizung konnten z. T. schon in¹ behandelt werden. Die nach Tab. 5 zu erwartende Transportverminderung wurde dort gefunden, mußte jedoch teilweise auf eine Beein-

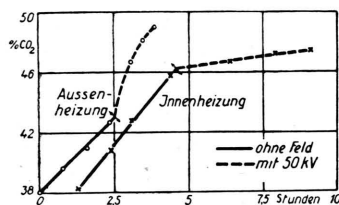


Abb. 7. Der Einfluß des Feldes auf die Vermischungsgeschwindigkeit von N_2 und CO_2 bei Außen- und Innenheizung (N_2/CO_2 50/50%, 16 atm, 7,5 Watt).

flussung des laminaren Strömungsanteiles zurückgeführt werden. Die rechte Kurve der Abb. 7 zeigt einen Vermischungsversuch bei Innenheizung, der zur Vervollständigung des Bildes in dem hier verwendeten kurzen Rohr mit wesentlich stärkerer Heizung durchgeführt wurde.

2. Auch das Ergebnis des Entmischungsversuches war von der Temperaturdifferenz weitgehend unabhängig. Bei einer Wiederholung des im ersten Teil beschriebenen Versuches, ebenfalls mit

erheblich größerer Temperaturdifferenz, zeigte sich erneut die starke Verminderung der Entmischung durch das Feld (ca. 40% bei 50 kV).

3. Nachzutragen ist der Feldeinfluß auf die Temperaturdifferenz. Die Temperatur des Kupferrohres wurde, wie in¹⁰ näher beschrieben ist, gas-

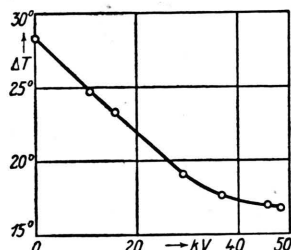


Abb. 8. Der Einfluß des Feldes auf die Temperaturdifferenz zwischen den Rohren bei Innenheizung (CO_2 , 16 atm, 26 Watt).

thermometrisch bestimmt. Die Ausdehnung des Kupferrohr-Gasinhaltess konnte an einem mit einem Petroleumtropfen abgeschlossenen dünnen Glasrohr abgelesen werden. Abb. 8 zeigt das Ergebnis. Die Hochspannung bewirkt bei dem innen geheizten Rohr eine Verminderung von ΔT , in Übereinstimmung mit Tab. 5. Der Effekt ist wesentlich größer (50%) als die umgekehrte Feldwirkung bei Außenheizung (12%).

IV. Diskussion der Ergebnisse mit Feld

Die Grundlagen für die Theorie des Feldeinflusses auf die turbulente Strömung wurden am Anfang des vorigen Abschnittes beschrieben. Die damit möglichen qualitativen Voraussagen konnten experimentell bestätigt werden. Zur Erklärung des Feldeinflusses auf die Entmischung reicht die einfache Modellvorstellung jedoch nicht aus. Es ergeben sich folgende Schwierigkeiten:

1. Bei Innenheizung sollte die Verminderung von Δx_{eff} eine Vergrößerung der Trennschärfe hervorrufen, während experimentell eine Verminderung gefunden wird.

2. Bei Außenheizung sollte die Vergrößerung von Δx_{eff} in Anbetracht der Transportbeeinflussung eine Vergrößerung der Trennlänge um den

¹⁰ E. W. Becker, Zur Beeinflussung der Transportphänomene dipolloser Gase durch elektrische Felder, Z. Naturforschg. 2a, 297 [1947].

Faktor 4 bewirken, während sich experimentell der Faktor 1,3 ergibt.

Beide Abweichungen würden sich auf eine Beeinflussung des horizontalen Thermodiffusionsstromes zurückführen lassen, wobei bei Innenheizung eine Verminderung, bei Außenheizung dagegen eine Verstärkung anzunehmen ist. Der letztere Vorgang entspricht dann gerade dem praktischen Ziel der Untersuchung (vergl. die Einleitung zu Teil I). Eine kinetische Erklärung dieses Effektes soll zurückgestellt werden, bis experimentell bewiesen ist, daß sich die gleichen Resultate

auch mit Isotopengemischen ergeben. Die Vorgänge im außen geheizten Rohr dürften dann für die praktische Isotopentrennung von Bedeutung sein. Darüber hinaus ist die elektrische Turbulenzbeeinflussung auch für die allgemeine Strömungslehre von Interesse, so daß auch in dieser Hinsicht von weiteren Versuchen Aufschlüsse erwartet werden können.

Hrn. Prof. Dr. J. Matthauch danke ich bestens für die gastfreundliche Aufnahme im Institut. Hr. Dr. habil. L. Waldmann bin ich für fördernde Diskussionen zu Dank verpflichtet.

Über die Raman-Spektren von Zink-, Cadmium- und Quecksilberdimethyl sowie von Quecksilbermethylhalogeniden

Von FRANZ FEHÉR, WILHELM KOLB¹ und LOTTE LEVERENZ²

Aus dem Anorganisch-chemischen Institut der Universität Göttingen

(Z. Naturforschg. 2a, 454–457 [1947]; eingegangen am 14. April 1947)

Es werden die Raman-Spektren von Zink-, Cadmium- und Quecksilberdimethyl sowie von Quecksilbermethylhalogeniden mitgeteilt, mit den z. Tl. bereits in der Literatur vorhandenen älteren Werten verglichen und systematisch diskutiert. Eine Deutung der Spektren wird versucht. Dabei wird die bei allen Substanzen auftretende Frequenz zwischen 600 und 700 cm^{-1} einer extrem niedrigen C—H-Deformationsschwingung zugeordnet. Die Spektren sprechen für eine geradlinige Struktur der Metallalkyle.

Die Raman-Spektren von Zink- und Quecksilberdimethyl wurden bereits von Venkateswaran³ und Pai⁴ aufgenommen. Da die mitgeteilten Frequenzwerte jedoch erheblich differieren und im Falle Pais nachweislich falsche Zuordnungen enthalten, untersuchten wir diese Substanzen noch einmal und führten Polarisationsmessungen⁵ durch. Zum Vergleich wurden außerdem die Spektren von Cadmiumdimethyl und von Quecksilbermethylhalogeniden untersucht.

Die belichteten Substanzen wurden sehr sorgfältig dargestellt und gereinigt, um nach Möglichkeit Verunreinigungen auszuschalten, die zum Teil für die verschiedenen Angaben der früheren Autoren

verantwortlich waren. Die gemessenen Frequenzwerte sind in Gegenüberstellung zu den älteren Beobachtungen in den Tab. 1–4 zusammengestellt.

Venkates- waran	Pai	Fehér ρ	Kolb, Leverenz
	144 (2d) 248 (1) 488 (2) 506 (10)		144 (sw?)
	505 (8)	503 (20b); 0,18 523 (3)	503 (sst)
	617 (2b)	621 (3b); 0,800 898 (00?) 1013 (00)	621 (m)
	1165 (8)	1159 (6d) 1157 (15); 0,32 1194 (0) 1242 (0) 1313 (00?)	1135 (sw) 1157 (st) 1184 (sw) 1247 (ssw)
		1346 (0)	1388 (sw) 1453 (ssw)
	1443 (0)	1432 (00) 1648 (00?) 2835 (1/2b)	2830 (sw) 2893 (st) 2940 (sw)
	2883 (8b)	2897 (3) 2902 (4); 0,05 2952 (1b); 0,61	

Tab. 1. $\text{Zn}(\text{CH}_3)_2$.

¹ W. Kolb, Diplomarbeit Dresden 1939.

² L. Leverenz, Diplomarbeit Göttingen 1945.

³ S. Venkateswaran, Ind. J. Physics 5, 145 [1930].

⁴ N. G. Pai, Proc. Roy. Soc. [London] 149, 29 [1935].

⁵ Die Polarisationsmessungen sowie die in Tab. 1–4 unter Fehér angegebenen Werte wurden im Sommer 1940 im Physikalischen Institut der Technischen Hochschule Graz gemessen. Hr. Prof. Dr. K. W. F. Kohlrausch möchte der eine von uns (Fehér) auch an dieser Stelle nochmals herzlichst für seine damalige Gastfreundschaft danken.