

## Physikalisch-Chemisches Praktikum für Anfänger

### Versuch A14: Grundlagen der Gaschromatographie

*Wichtig: Zu diesem Versuch bitte einen USB-Stick mitbringen*

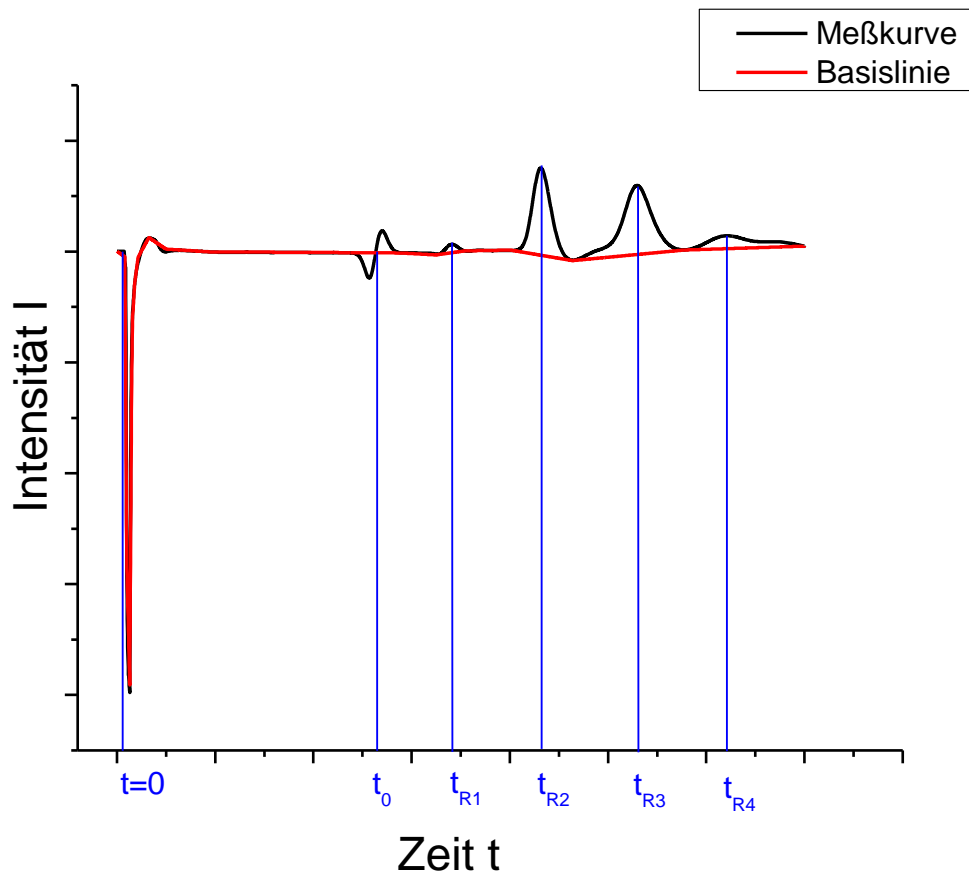
#### 1. Einleitung

Die Gaschromatographie ist neben Destillation und Extraktion eines der wichtigsten thermischen Trennverfahren und stellt eine empfindliche Methode zur Identifizierung und Analyse der Komponenten von Stoffgemischen dar. Anwendung findet die Gaschromatographie unter anderem in der Analytik von Agrar- und Fleischprodukten, in der Untersuchung von Arzneimitteln, Erdölkomponenten wie auch in der Umweltanalytik. Die enorme Bedeutung der Chromatographie in der Chemie wurde durch die Verleihung des Chemie-Nobelpreises 1952 an zwei Pioniere der Verteilungs-Chromatographie Archer J. P. Martin und Richard L.M. Synge, deutlich gemacht.

#### 2. Theoretische Grundlagen

Die Trennung einzelner Komponenten eines Gemisches erfolgt in einer Trennstrecke (Säule), die aus einer stationären Phase besteht. Das Gemisch als Bestandteil einer mobilen Phase (Gemisch im Trägergas) durchströmt die stationäre Phase. Die Wechselwirkung der Moleküle der mobilen Phase mit den Bestandteilen der Säule ist molekulspezifisch und führt zu unterschiedlichen Flussgeschwindigkeiten der transportierten Komponenten. Die Moleküle des Gemisches pendeln zwischen den Phasen hin und her und weisen damit unterschiedliche Verweilzeiten in der stationären Phase auf. Die verlängerten Verweilzeiten sind durch thermodynamische Gleichgewichte zwischen den Gas- und Festphasen geprägt (Adsorption/Desorption) und damit von der Temperatur der Gas/Fest-Grenzfläche abhängig. Diese Tatsache drückt sich durch messbar unterschiedliche Verzögerungen im Transport der einzelnen Komponenten des Gemisches aus. Diese Verzögerung bezeichnet man als chromatographische Retention. Die unterschiedlichen Retentionszeiten in der stationären Phase sind durch die freie Gibbssche Enthalpie des Verzögerungsvorganges (Adsorption/Desorption) bestimmt. Die Zeit, die die Moleküle brauchen, um die Trennstrecke zu durchqueren, nennt man Bruttoretentionszeit. Zwei Komponenten eines Gemisches sind also trennbar, wenn sie sich unterschiedlich lange in der stationären Phase aufhalten. Ihre Trennbarkeit wird durch den sog. Trennfaktor  $\Delta$  beschrieben ( $\Delta = t_1/t_2$ , das Verhältnis der Nettoretentionszeiten der beiden Komponenten). Dieser Faktor spiegelt die Verhältnisse aller abgeleiteten Größen wider, z. B. Mengenverhältnisse, Verteilungskoeffizienten, etc..

Die Retentionszeit einer Komponente wird mittels eines Detektors gemessen, der am Ausgang der Säule positioniert ist und die transportierten Moleküle via zeitlicher Änderung der Wärmeleitfähigkeit detektiert. Wegen der statistischen Natur des molekularen Transports (Diffusionsvorgänge führen zu unterschiedlichen Wegstrecken der Moleküle) zeigt das Messsignal einer transportierten Komponente annähernd Gauß-Form. Die Retentionszeit  $t_R$ , die Zeit, zwischen dem Einspritzen der Komponente bis zum Erscheinen des Gauß-Peaks (Maximum) am Detektor, bleibt bei gleichen chromatographischen Bedingungen konstant und ist daher charakteristisch für die untersuchte Komponente. Die Identifizierung einer unbekanntes Komponente kann deshalb durch Vergleich der Retentionszeiten mit einem Standard erfolgen.



Das Retentionsvolumen  $V_R$  (die Menge der mobilen Phase, die durch das Trennsystem in der Zeit  $t_R$  geflossen ist) kann aus der folgenden Relation berechnet werden:

$$1) \quad V_R = t_R F, \text{ wobei } F - \text{konstante Flussgeschwindigkeit (mL/min).}$$

Ein Vergleich der absoluten Retentionszeiten ist erschwert, weil  $t_R$  sowohl von der Flussgeschwindigkeit der mobilen Phase wie auch von der Länge  $L$  der Trennstrecke abhängt. Der sog. Kapazitätsfaktor ( $k^*$ -Wert) stellt eine von  $F$  und  $L$  unabhängige Größe dar. Diese Größe bezieht die Netto-Retentionszeit  $t_R^*$  auf die Totzeit  $t_0$ :

$$2) \quad k^* = t_R^*/t_0 = (t_R - t_0)/t_0 = (t_R/t_0) - 1$$

Damit stellt der  $k^*$ -Wert das Molverhältnis einer Komponente in stationärer und mobiler Phase dar. Der  $k^*$ -Wert ist mit dem Verteilungskoeffizienten  $K$  verknüpft:

$$3) \quad k^* = (V_s/V_g)K$$

wobei  $V_s$  das Volumen der stationären Phase und  $V_g$  das Volumen der mobilen Phase ist. Der Kapazitätsfaktor  $k^*$  ist demnach proportional zu dem Volumen der stationären Phase (bzw. der spezifischen Oberfläche der Adsorbate, in  $m^2/g$ ).

Die relative Retention  $\alpha$  für zwei Komponenten 1 und 2 kann somit wie folgt dargestellt werden:

$$4) \quad \alpha = k_2^* / k_1^* = K_2 / K_1,$$

d.h. zwei Komponenten mit gleichen  $k^*$ -Werten bleiben untrennbar.

Im Gegensatz zu Destillation und Extraktion existieren bei der Chromatographie keine physischen Trennstufen; vereinfacht wird der Vorgang folgendermaßen modelliert: eine gewisse Menge des Gasgemischs gelange zu einem bestimmten Zeitpunkt in einen Abschnitt der Säule, der als theoretische Trennstufe betrachtet werde. In diesem Abschnitt wird jedes Gasmolekül mit einer stoffspezifischen Wahrscheinlichkeit adsorbiert (rot). Alle nichtadsorbierten Moleküle (blau) bewegen sich im nächsten Zeitschritt in die nächste Trennstufe, alle adsorbierten Moleküle verbleiben. Nun können wieder alle Gasmoleküle mit einer stoffspezifischen Wahrscheinlichkeit adsorbiert werden, während alle Adsorbatmoleküle mit einer ebenfalls stoffspezifischen Wahrscheinlichkeit desorbieren. Es bewegen sich erneut alle nichtadsorbierten Moleküle eine Trennstufe weiter, während alle adsorbierten Moleküle in ihrer jeweiligen Stufe verbleiben. Dies wiederholt sich so lange, bis alle Moleküle sämtliche Trennstufen durchlaufen haben. Sofern die Säule nicht durch zu große Probenvolumina, falsch gewählte Temperatur oder Flussgeschwindigkeit überlastet wird, ist die Trennung statistisch und die einzelnen Komponenten verlassen die Säule Gauß-verteilt. Ansonsten kommt es zu einer Deformation des gemessenen Peaks.

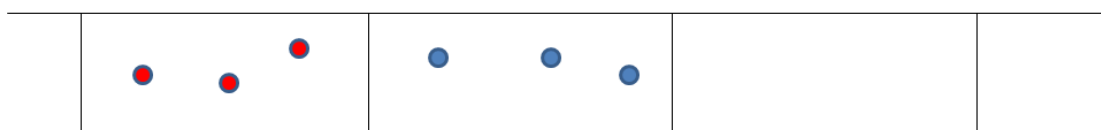
1) Eintritt der Gasmoleküle in eine Trennstufe



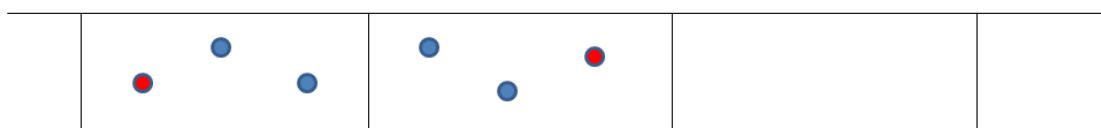
2) Adsorption mit stoffspezifischer Wahrscheinlichkeit



3) Weiterbewegung der nichtadsorbierten Moleküle zur nächsten Trennstufe



4) Adsorption und Desorption mit stoffspezifischer Wahrscheinlichkeit



5) Wiederholung von 3) und 4) bis zur Entleerung der Säule

Nach der Theorie von Martin und Synge aus dem Jahre 1941 kann das Auflösungsvermögen einer Säule der Länge  $L$  mit dem Parameter HETP beschrieben werden (HETP- height equivalent to a theoretical plate, *theoretische Trennstufenhöhe*):

$$5) \quad \text{HETP} = L / N \quad (\text{in mm})$$

wobei  $N$ , die Anzahl der Trennstufen in der Säule (Bodenzahl), für Gaußförmige Peaks wie folgt berechnet werden kann:

$$6) \quad N = 16 (t_R / W)^2$$

wobei  $t_R$  die Bruttoretentionszeit am Peakmaximum und  $W$  die Peak-Basisbreite (Abstand der Schnittpunkte der Wendetangenten mit der Basislinie) ist. Bei Peaks, die von der Gauß-Form abweichen, wird die Basisbreite  $W$  durch die Halbwertsbreite  $W_{1/2}$  ersetzt:

$$7) \quad N = 8 \ln 2 (t_R / W_{1/2})^2 \quad \text{somit} \quad \mathbf{HETP} = L / [8 \ln 2 (t_R / W_{1/2})^2]$$

Die Auflösung  $R$  einer GC-Trennstrecke wird durch das Verhältnis der Retentionszeitdifferenz der benachbarten Peaks  $\Delta t_R$ , und dem arithmetischen Mittel aus den entsprechenden Basisbreiten  $W$  definiert:

$$8) \quad R = (t_{R2} - t_{R1}) / (W(1) + W(2))/2 = 1,198 (t_{R2} - t_{R1}) / [W_{1/2}(1) + W_{1/2}(2)]$$

Die lineare Strömungsgeschwindigkeit  $u$  der mobilen Phase wird aus dem Chromatogramm wie folgt berechnet:

$$9) \quad u = L_g / t_0$$

$L_g$  Länge der Trennsäule inkl. Zu- und Ableitung in cm

$t_0$  Totzeit der Säule in s bei dieser Flussgeschwindigkeit

Falls das Totzeitsignal im Chromatogramm nicht zu erkennen ist, kann  $t_0$  näherungsweise so berechnet werden:

$$10) \quad t_0 = A * L_g / F \quad (\rightarrow u = F/A)$$

$A$ =Querschnittsfläche des Säulenrohrs

$F$ =Durchfluss gemäß Flussmeter

Nach Van Deemter hängt der HETP-Parameter von der Strömung der mobilen Phase  $u$  ab. Diese Gleichung beschreibt die chromatographische Trennung als dynamischen Prozess und berücksichtigt die Rolle der Diffusion und des Massentransfers:

$$11) \quad \mathbf{HETP} = A + B/u + C u.$$

$A$  - Beitrag der Eddy-Diffusion (Diff. Durch turbulente Verwirbelungen)

$B$  - Beitrag der Longitudinaldiffusion

$C = [K_1 d_f^2 / D_s + K_2 d_p^2 / D_M]$  Massentransfer von und zu stationärer Phase zustande.

$u$  - die lineare Strömungsgeschwindigkeit

$\lambda$  - Konstante, die Partikelform und Homogenität der Packung wiedergibt.

$d_p$  - Partikeldurchmesser

$D_M$  - Diffusionskoeffizient der mobilen Phase

$\Psi$  - Korrekturfaktor für die Freiräume zwischen den Partikeln

$d_f$  - Dicke des Flüssigkeitsfilmes

$K_1, K_2$ : Korrekturfaktoren für die spezifische Geometrie der Säule und die Säulenkapazität.

Die Eddy-Diffusion  $A$  ist nur abhängig von der Packung der stationären Phase und dem damit verbundenen Weg, den die mobile Phase darin zurückführen muss. Je kleiner und homogener die Säule gepackt ist, desto kleiner ist die Eddy-Diffusion. Sie ist unabhängig von der Flussgeschwindigkeit  $u$ .  $A = 2 * \lambda * d_p$

Die Longitudinaldiffusion  $B$  ist nur von der mobilen Phase abhängig. Sie tritt sowohl bei gepackter, als auch bei ungepackter Säule auf und beschreibt die Verbreiterung der Phase

aufgrund von Diffusion weg vom Zentrum. Je größer  $u$  desto geringer ist der Beitrag von B.  $B=2*\lambda*D_M$ .

C ist der Stoffaustausch zwischen stationärer und mobiler Phase und beschreibt damit den eigentlichen chromatographischen Prozess. C ist von Partikel zu Partikel unterschiedlich und ermöglicht so die Trennung verschiedener Komponenten der mobilen Phase. Je langsamer die Flussgeschwindigkeit ist, desto effektiver ist auch die Trennung der einzelnen Komponenten.

$$C=[K_1d_f^2/D_s + K_2d_p^2/D_M]$$

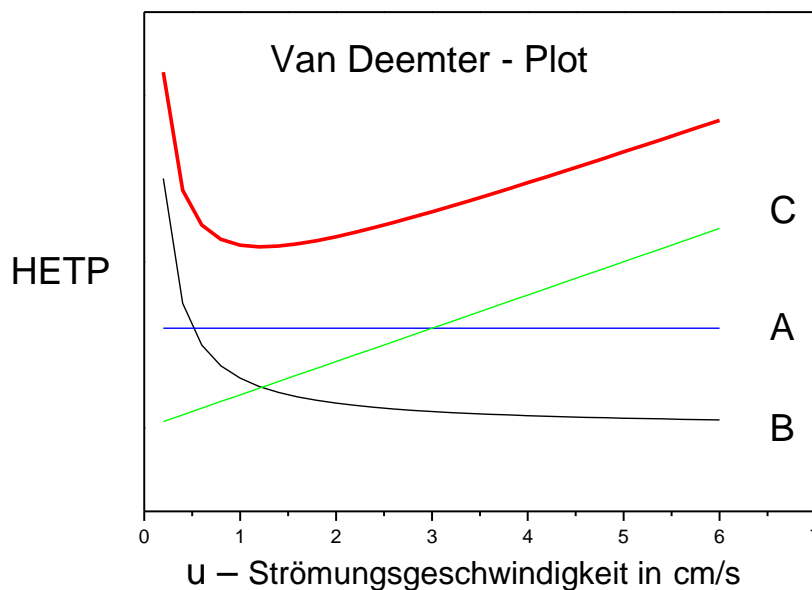
Diese Gleichung zeigt, wie man die optimale Trennleistung der Säule finden kann (Optimum: möglichst kurze Analysenzeit und gute Trennleistung). Über die Analyse der spezifischen Parameter ( $\lambda$ ,  $d_p$ ,  $d_M$  ...) kann man Aussagen zur optimalen Säulenbeschaffenheit treffen: Säulen mit geringem Säulendurchmesser, die eng und homogen mit feinkörnigem Material bepackt sind, zeigen die besten Trennleistungen.

Bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten  $u$  kann die Rolle der A- und C-Terme vernachlässigt werden und Gl. 9 erlaubt, den effektiven Koeffizienten der longitudinalen Diffusion zu bestimmen (Gl.11):

$$12) \quad \text{HETP} = 2 \Psi D_M / u ,$$

wobei in der Praxis der Parameter  $\Psi \approx 1$  gesetzt wird,

$$13) \quad D_{\text{eff}} = \text{HETP} u / 2.$$



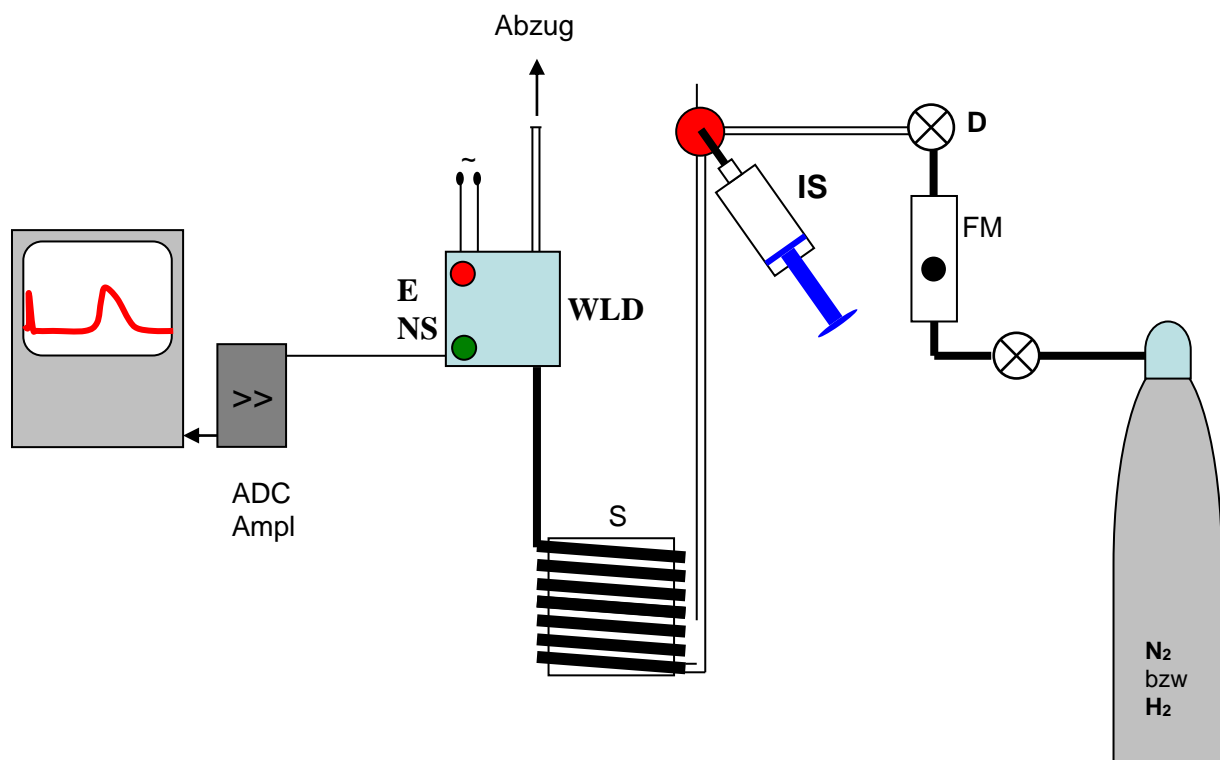
### 3. Ziele des Experiments

Die Analyse der Chromatogramme von reinen Substanzen soll zunächst die wichtigsten grundlegenden Relationen der Gaschromatographie verdeutlichen. Die charakteristischen Größen der Gaschromatographie, HETP, N und  $D_{\text{eff}}$ , sollen mit Stickstoff als Trägergas als Funktionen der Versuchsparameter bestimmt werden (Stoffmenge M, Strömungsgeschwindigkeit  $u$ ). Im zweiten Teil sollen die wichtigsten Komponenten eines *unbekannten* käuflichen Gasgemisches durch Vergleiche der Retentionszeiten von reinen Referenzsubstanzen identifiziert werden.

#### 4. Experimenteller Aufbau

Das Kernmodul der Apparatur stellt eine lange spiralförmige Säule (S) dar, die mit porösem oxidischen Material gefüllt ist ( $L=2$  m, Innendurchmesser des Glassrohrs  $\phi=5$  mm, Länge inkl. Zu- und Ableitung  $L_g=2,7$  m). Das Material der Säule wird vom analysierten Gas durchströmt (Leitung von der  $N_2$ -Gasflasche durch die Säule bis zum Abzug). Die Strömungsgeschwindigkeit des Trägergases bzw. des Gemisches wird mit einem Flussmeter (FM) gemessen. Auf dem Computer am Versuchsplatz finden Sie eine Flusstabelle zur Umrechnung der Skala in  $NI/min$ .

Der Nachweis der transportierten Komponenten des Gemisches wird mittels eines Wärmeleitfähigkeitsdetektors (WLD), der am Ausgang der Säule positioniert ist, realisiert. Das vorbeiströmende Trägergas in einem WLD-Detektor kühlt stets den aktiven Heizdraht ab. Das Gemisch im Trägergas weist eine geringere Wärmeleitfähigkeit als das reine Trägergas auf, wodurch der Heizdraht weniger gekühlt wird. Die dadurch entstandene Temperaturerhöhung wird als Widerstandsänderung des Heizdrahtes gegenüber einem Referenzelement in einer Wheatstone'schen Brücke gemessen. Solche Gase wie  $H_2$ ,  $N_2$  und He garantieren das Erreichen der höchsten Temperaturdifferenzen, weil sie auch die höchsten Wärmeleitfähigkeiten aufweisen. Das Signal, die Kompensationsspannung aus der Wheatstone'schen Brücke, ist proportional zur erzeugten Temperaturdifferenz und diese ist proportional zur Zahl der Gasmoleküle, die die Fläche des Heizdrahtes erreichen (zum Partialdruck des Gemisches). Als optimal hat sich eine Empfindlichkeit des WLD-Detektors von 235 erwiesen. Vor jeder Messung soll der Nullpunkt durch Variationen des Widerstandes Z neu festgesetzt werden.



**D** – Drosselventil  
**FM** – Flussmeter  
**S** – Säule der Länge 2m  
**WB** – Wasserbad  
**WLD** – Wärmeleitfähigkeitsdetektor (TCD, thermal conductivity detector)  
**ADC+Ampl** – Verstärker mit AD-Konverter  
**DA** – Datenerfassung und Analyse  
**IS** – Injektionsspritze  
**E** – Empfindlichkeit (voroptimiert, nicht verstellen)  
**NS** – Nullstellung (Kompensierung des Referenzsignals)

Das Signal aus der Wheatstone'schen Brücke als Funktion der Zeit,  $U(t)$ , gibt die vorbeiströmenden Moleküle des Gemisches wieder. Im Idealfall hat das Signal Gauß -Form. Das analoge Signal (einige mV) wird verstärkt, digitalisiert und über eine Schnittstelle in den Rechner übertragen. Die Aufnahme der Signale erfolgt mittels eines Labview-Programms (**GC**), zu dem Sie vor Ort eine Einweisung erhalten. Die Zeit zwischen der Injektion des Gemisches (**IS**) und dem Erscheinen des Maximums des Gauß -Peaks entspricht der Brutto-Retentionszeit,  $t_R$ . Hat der Peak eine andere Form als die einer Gaußkurve, entspricht  $t_R$  dem Schwerpunkt.

In allen Experimenten wird der Druck des Trägergases mittels des Reduzierventils an der Gasflasche auf **0.5** bar festgesetzt. Die Strömungsgeschwindigkeit  $u$  wird mittels eines Drosselventils (**D**) am Ausgang des Flussmeters festgelegt.

Die Aufnahme einer GC Kurve wird erst nach dem Erreichen einer stabilen Flussgeschwindigkeit vorgenommen. Im nächsten Schritt soll das Signal mit dem Regelknopf **NS** als Referenz auf 0 mV eingestellt werden. Anschließend wird die Aufnahme neu gestartet und die Injektion des Probegases kann vorgenommen werden.

## 5. Durchführung des Experiments

### A. HETP (V)

Am Beispiel von iso-Butan ( $N_2$ -Trägergas,  $F = 0,037$  NI/min  $\rightarrow$  NI/min=Nettoliter/min) sollen 4 Messungen mit unterschiedlichen Stoffmengen des Gases durchgeführt werden ( $V = 1, 2, 3$  und  $4$   $cm^3$ ). Die Abnahme der bestimmten Gasmenge erfolgt mittels einer Injektionsspritze. Für jedes Experiment soll der HETP-Wert berechnet und die berechneten HETP-Werte als Funktion von **V** dargestellt werden. Die Berechnung der Retentionszeiten und der Halbwertsbreiten aus den Chromatogrammen werden mit der Origin-Funktion *Basislinie und Peaks* durchgeführt (Siehe Pkt. 7).

### B. HETP(u): Van Deemter - Plot

Die Abhängigkeit des **HETP**-Parameters von der linearen Strömungsgeschwindigkeit  $u$  soll für n-Butan im  $N_2$ -Trägergas aufgenommen werden. Nehmen Sie Chromatogramme von n-Butan (1ml) bei verschiedenen Flussgeschwindigkeiten im Bereich von 0.07 – 0.015 NI/min auf. Im oberen Bereich sollen die Messungen im Abstand von ca. 5 Skt(Skalenteile), abwärts von 0.025 NI/min in kleineren Schritten durchgeführt werden (3 Skt.). Berechnen Sie **HETP**, **N** und **D<sub>eff</sub>** bei der optimalen Strömungsgeschwindigkeit  $u^*$ . Durch Anpassung der gemessenen Kurve HETP(u) an die van Deemter-Funktion sollen die Parameter A und C bestimmt werden. Der Parameter B kann mit dem hier verwendeten Aufbau nicht bestimmt werden, da sich die dafür nötigen niedrigen Flussgeschwindigkeiten nicht stabil einstellen lassen. Die optimale Strömungsgeschwindigkeit  $u^*$ (cm/s) ist in daher diesem Fall die minimale erreichbare stabile Strömungsgeschwindigkeit.

### C. Identifizierung eines unbekanntes Gasgemisches

Bei der niedrigsten erreichbaren stabilen Flussgeschwindigkeit (ca. 0,015l/min, bzw. 5 Skt.) erfolgt die Bestimmung der Bestandteile des unbekanntes Gasgemisches. Hierfür benötigen Sie Chromatogramme von je 1 ml Propan, iso-Butan und n-Butan sowie von 2 ml des Gasgemisches. Die Zuordnung der Komponenten des Gemisches erfolgt durch den Vergleich der Retentionszeiten zu den gemessenen für die reinen Substanzen. Es sollen die Volumenanteile der jeweiligen Komponenten bestimmt werden.

Am Beispiel der benachbarten Peaks von iso- und n-Butan des Chromatogrammes des Gasgemisches berechnen Sie die Auflösung **R** der Trennstrecke nach der Formel (8) mit Anwendung des entsprechenden Origin-Programms.

### 6. Auswertung und Datenanalyse

#### A) Volumenabhängigkeit: **HETP** (V)

Bestimmen Sie aus den Chromatogrammen iso-Butan **HETP** und **D<sub>eff</sub>**. Tragen Sie die erhaltenen Werte gegen V auf. Die gemessenen Abhängigkeiten HETP(V) und D<sub>eff</sub>(V) sowie die Veränderung der Peakform sollen erklärt werden.

Führen Sie für die hier bestimmten Werte eine Größtfehlerabschätzung durch:

$$\Delta HETP = \left| \frac{\partial HETP}{\partial L} \right| \Delta L + \left| \frac{\partial HETP}{\partial t_r} \right| \Delta t_r + \left| \frac{\partial HETP}{\partial W_{1/2}} \right| \Delta W_{1/2}$$

Für den Fehler der Säulenlänge können Sie aufgrund möglicher Packungsfehler 2cm annehmen; machen Sie für Retentionszeit und Halbwertsbreite selbst Annahmen, die zu begründen sind.

#### B) Geschwindigkeitsabhängigkeit: **HETP**(u):

Bestimmen Sie aus den Chromatogrammen von n-Butan **HETP**, **N** und **D<sub>eff</sub>**. Tragen Sie HETP gegen u auf und bestimmen Sie die van-Deemter-Parameter A und C. Interpretieren Sie die berechneten Parameter der van Deemter-Gleichung, A und C.

#### C) Komponentenbestimmung des Gasgemisches

Integrieren Sie die Peaks der Einzelmessungen und bestimmen Sie das Verhältnis Peakintegral/Volumen (Origin). Aus diesem können Sie durch Vergleich mit den Integralen der Peaks des Gemisches die Zusammensetzung desselben berechnen:

$$V_{Probe} = \frac{V_{Referenz}}{I_{Referenz}} * I_{Probe}$$

Wie gut ist die hier erreichte Identifizierung der Komponenten des unbekanntes Gasgemisches?

### 7. Auswertung der Chromatogramme mit Origin 2016 und neuer

1. Importieren Sie die Excel-Datei in Origin mit *Datei/Import/Excel(xls)*
2. Tragen Sie die Meßdaten in einem Diagramm auf. Skalieren Sie das Diagramm so, dass alle Messereignisse deutlich erkennbar sind. Der Injektionsausschlag ist zur Auswertung nicht erforderlich und muss daher in Spannungsrichtung nicht im gezeigten Ausschnitt enthalten sein.
3. Wählen Sie unter *Analyse* die Funktion *Peaks und Basislinie* → *Peaks analysieren* → *Dialog öffnen*
4. Wählen Sie als Ziel *Peaks integrieren* → nächstes
5. Wählen Sie „benutzerdefiniert“ als Basislinien-Modus → nächstes



6. Wählen Sie unter „Verbinden mit“ die Variante „*Interpolation*“ und setzen Sie die Ankerpunkte so (*ändern*), dass die Basislinie vollständig erfasst wird, aber kein Peak in seiner Form verändert wird → nächstes
7. Basislinie automatisch subtrahieren auswählen → nächstes
8. Automatische Peaksuche deaktivieren, Peaks hinzufügen auswählen und diese mit Doppelklick markieren → nächstes
9. Wählen Sie bei der Integration die Option „Anpassen auf Vorschaudiagramm“ und wählen Sie als Integrationsbereich immer den vollständigen Peak
10. Schließen Sie den Vorgang ab. Die Brutto-Retentionszeit finden Sie nun unter „Center“, die Halbwertsbreite unter „FWHM“ und das Peakintegral unter „Area“.

## Literatur

1. E. Leibniz, H.-G. Struppe: *Handbuch der Gaschromatographie*. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig KG, Leipzig 1984
2. L.S. Ettre, J.V. Hinshaw, L. Rohrschneider, Grundbegriffe und Gleichungen der Gaschromatographie, Hüthig Verlag, Heidelberg
3. Peter J. Baugh: *Gaschromatographie. Eine anwenderorientierte Darstellung*. Springer, Berlin 1997.
4. Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 4. Auflage, Band 5, S. 118 ff.
5. J. J. van Deemter, F. J. Zuiderweg, A. Klinkenberg: *Longitudinal diffusion and resistance to mass transfer as causes of nonideality in chromatography*. Chemical Engineering Science, 1956, Band 5, Heft 6, S. 271-289
6. J. Calvis Giddings, Spencer L. Seager, Larry R. Stucki and George H. Stewart: *Plate Height in Gas Chromatography*. Analytical Chemistry, 1960, Band 32, Heft 7, S. 867-870

## Was man wissen soll:

- 1) Chromatographie als Verfahren zur Stofftrennung
- 2) Der idealisierte chromatographische Prozess
- 3) Kenngrößen der Gaschromatographie
- 4) Peakformen in der Gaschromatographie (Gauß und leading)
- 5) Die Theorie der Trennstufen
- 6) Gas-fest Chromatographie
- 7) van Deemter-Analyse der HETP-Werte