



Oberflächenbestimmung nach der BET-Methode

Ziel des Versuchs

In diesem Versuch wird die Adsorption von Gasmolekülen an Festkörperoberflächen dazu benutzt, die spezifische Oberfläche, d. h. den Quotienten aus Oberfläche und Masse des Festkörpers, zu bestimmen. Dazu wird die im folgenden erläuterte BET-Methode genutzt.

Vorausgesetzte Kenntnisse

Adsorption (Adsorptiv, Adsorbens, Adsorbat), Chemisorption, Physisorption

Theoretische Grundlagen

Die Ermittlung spezifischer Oberflächen disperser Festkörper ist für verschiedene Gebiete der Technik von großer Bedeutung, z. B. für die Kennzeichnung der Eigenschaften von Katalysatoren, Pigmenten, Füllstoffen usw.

Die Adsorption von Gasen an Festkörperoberflächen wird durch die Adsorptionsisotherme charakterisiert, die die Abhängigkeit der adsorbierten Gasmenge n_{ads} vom Gasdruck p darstellt:

$$n_{ads} = f(p) \quad (\text{bei } T = \text{const.}) \quad (1)$$

Chemisorption

Ein besonders einfacher und durchsichtiger Fall liegt vor, wenn die adsorbierten Moleküle sehr fest (d. h. mit großer Bindungsenergie) an die Festkörperoberfläche gebunden sind (Chemisorption) und wenn weiterhin die Wechselwirkungsenergie zwischen den adsorbierten Molekülen untereinander gegen die Chemisorptionsenergie vernachlässigt werden kann. In diesem Fall wird sich eine monomolekulare Adsorptionsschicht bilden; die Ausbildung von Mehrschichten ist wegen der vernachlässigbaren zwischenmolekularen Wechselwirkung sehr unwahrscheinlich.

Zur Ableitung der Adsorptionsisothermen gehen wir davon aus, dass im Adsorptionsgleichgewicht die Geschwindigkeit, mit der Moleküle aus dem Gasraum auf die Oberfläche gelangen und adsorbiert werden gleich der Geschwindigkeit ist, mit der adsorbierte Moleküle wieder in den Gasraum abgegeben (desorbiert) werden.

Als „Bedeckungsgrad“ θ wird das Verhältnis der adsorbierten Moleküle N_{ads} zur Zahl der Moleküle bei vollständiger Bedeckung der Oberfläche eingeführt („Monoschichtbedeckung“)

N_{mono} :

$$\theta = \frac{N_{ads}}{N_{mono}} \quad (2)$$

Die Adsorptionsgeschwindigkeit ist proportional zum Gasdruck (die Zahl der Oberflächenstöße ist proportional zum Druck p) und zur Zahl der **freien Oberflächenplätze** $N_{mono} \cdot (1 - \theta)$:

$$\frac{dN_{ads}}{dt} = \alpha \cdot N_{mono} \cdot (1 - \theta) \cdot p \quad (3)$$

Die Desorptionsgeschwindigkeit ist proportional zur Zahl der adsorbierten Moleküle und hängt **nicht** vom Gasdruck ab:

$$\frac{dN_{des}}{dt} = \beta \cdot N_{mono} \cdot \theta \quad (4)$$

Die Konstanten α und β sind temperaturabhängig und hängen von den spezifischen Bindungskräften ab. Aus der angenommenen Gleichheit von Adsorptions- und Desorptionsgeschwindigkeit ergibt sich nach Umstellung die Langmuirsche Adsorptionsisotherme:

$$N = N_{mono} \cdot \frac{p}{(\beta/\alpha) + p} \quad (5)$$

Bei kleinem Gasdruck ($p \ll \frac{\beta}{\alpha}$) steigt nach Gleichung (5) die adsorbierte Stoffmenge linear mit dem Druck an (Henry-Gesetz), um dann bei hohem Druck ($p \gg \frac{\beta}{\alpha}$) den Maximalwert der Monoschichtbedeckung zu erreichen.

Wenn die adsorbierte Stoffmenge als Funktion des Gasdruckes gemessen wird, kann die Monoschichtbedeckung mit Gleichung (5) bestimmt werden. Bei bekanntem Flächenbedarf A_1 eines einzelnen adsorbierten Moleküls kann aus der Monoschichtbedeckung N_{mono} die Festkörperoberfläche O_A berechnet werden:

$$O_A = N_{mono} \cdot A_1 \quad (6)$$

Physisorption

Wenn jedoch die Bindungsenergie der adsorbierten Moleküle zur Festkörperoberfläche klein und in der gleichen Größenordnung ist wie die Wechselwirkungsenergie der Moleküle untereinander („Physisorption“), wird die Adsorption nicht bei einer Monoschicht adsorbierter Moleküle stehenbleiben. Es kommt dann zur Ausbildung von Mehrschichten. Die für die Ermittlung der spezifischen Oberfläche wichtige Monoschichtbedeckung N_{mono} kann jedoch auch in diesem komplizierten Fall bestimmt werden, wenn ein zu Gleichung (5) analoger theoretischer Zusammenhang zwischen adsorbierter Stoffmenge, Gasdruck und Monoschichtbedeckung bekannt ist. Eine solche häufig benutzte Multischicht-Adsorptionsisotherme ist die von Brunauer, Emmett und Teller abgeleitete "BET-Isotherme".

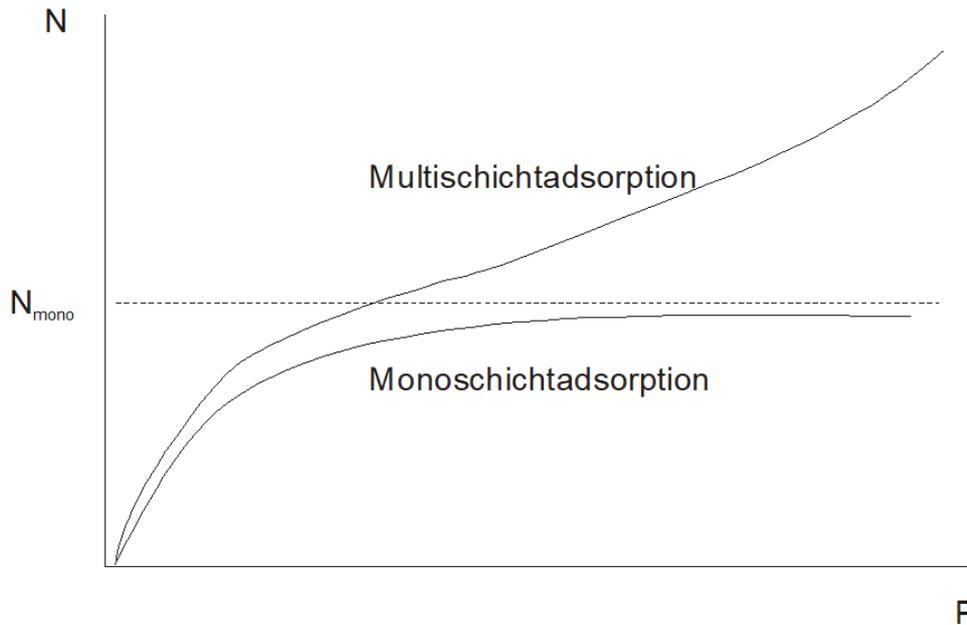


Abbildung 1 – Adsorptionsisothermen

Herleitung der BET-Isotherme

Man geht wie bei der Ableitung der Langmuirisotherme von der kinetischen Vorstellung aus, dass im Adsorptionsgleichgewicht in einer bestimmten Zeit dt gleich viele Moleküle adsorbiert und desorbiert werden (dN_{ads} bzw. dN_{des}). Diese Bedingung soll jetzt für jede einzelne Schicht erfüllt sein. Bezeichnet man den Bruchteil der Oberfläche, der mit i Schichten bedeckt ist, mit θ_i (θ_0 : nicht bedeckt, θ_1 : eine Schicht, θ_2 : zwei Schichten usw.), so wird

$$dN_{ads,i} = \alpha_i \cdot \theta_{i-1} \cdot p \cdot O_A \cdot dt$$

$$dN_{des,i} = \beta_i \cdot \theta_i \cdot O_A \cdot dt$$

wobei O_A die Oberfläche des Adsorbens bezeichnet. Die Proportionalitätsfaktoren α_i und β_i , die die jeweiligen Bindekräfte charakterisieren, haben für die erste Schicht (eigentliche Adsorption) die Werte α' bzw. β' , für alle übrigen Schichten (Kräfte wie in der reinen flüssigen Phase des Adsorptivs) aber identische Werte α bzw. β . Im Gleichgewicht gilt also:

$$\alpha' \cdot \theta_0 \cdot p = \beta' \cdot \theta_1, \quad i = 1 \tag{7}$$

$$\alpha \cdot \theta_{i-1} \cdot p = \beta \cdot \theta_i, \quad i > 1 \tag{8}$$

Es soll nun der Quotient $\frac{\alpha}{\beta}$ folgendermaßen bestimmt werden: In der reinen flüssigen Phase des Adsorptivs unter ihrem Gleichgewichtsdampfdruck p_0 sind die Zahlen dN_k der

kondensierten bzw. dN_V der verdampfenden Moleküle analog den obigen Ansätzen gegeben durch:

$$\begin{aligned}dN_K &= \alpha \cdot p_0 \cdot O \cdot dt \\dN_V &= \beta \cdot O \cdot dt,\end{aligned}$$

wobei O die Oberfläche der Flüssigkeit ist.

Aus der Gleichgewichtsbedingung $dN_K = dN_V$ folgt:

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{1}{p_0}$$

Damit wird aus Gleichung (8):

$$\theta_i = \theta_{i-1} \left(\frac{p}{p_0} \right) = \theta_{i-1} \cdot x, \quad i > 1 \text{ und } x = \frac{p}{p_0} \quad (9)$$

Für die erste Schicht ist $\frac{\alpha'}{\beta'}$ aber verschieden von $\frac{\alpha}{\beta}$. Mit einer zunächst noch unbekanntem Konstanten C kann man $\frac{\alpha'}{\beta'} = \frac{C}{p_0}$ setzen.

Es ergibt sich also (für die erste Schicht aus Gleichung (7), für die übrigen aus Gleichung(9)):

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \theta_0 \cdot C \cdot x \\ \theta_2 &= \theta_1 \cdot x = \theta_0 \cdot C \cdot x^2 \\ \theta_3 &= \theta_2 \cdot x = \theta_0 \cdot C \cdot x^3 \quad \text{usw.}\end{aligned} \quad (10)$$

Die Summe aller θ_i muss nun gleich 1 sein:

$$\sum_{i=0}^{\infty} \theta_i = \theta_0 + \theta_0 \cdot C \cdot (x + x^2 + \dots) = 1$$

Die geometrische Reihe in der Klammer konvergiert, da $x = \frac{p}{p_0}$ zwischen 0 und 1 liegt; mit der bekannten Summenformel über die Konvergenz der geometrischen Reihe wird

$$\begin{aligned}1 &= \theta_0 + \theta_0 \frac{C \cdot x}{1-x} = \theta_0 \frac{1-x+C \cdot x}{1-x} \quad \text{oder} \\ 1 &= \theta_0 \frac{1+x(C-1)}{1-x}\end{aligned} \quad (11)$$

Wenn man die maximale Zahl der Moleküle, die in einer Monoschicht adsorbiert werden können, mit N_{mono} bezeichnet, ergibt sich für die Gesamtzahl der in allen Schichten adsorbierten Moleküle

$$N_{ads} = N_{mono} \sum_{i=1}^{\infty} i \theta_i = N_{mono} \theta_1 + 2N_{mono} \theta_2 + 3N_{mono} \theta_3 + \dots; \quad \text{oder mit (10)}$$

$$N_{ads} = N_{mono} \theta_0 C (x + 2x^2 + 3x^3 + \dots).$$

Auch diese Reihe konvergiert. Es ergibt sich

$$N_{ads} = N_{mono} \theta_0 C \frac{x}{(1-x)^2}$$

Überzeugen Sie sich durch Dividieren von der Richtigkeit des für die Summe angegebenen Ausdrucks!

Wird diese Gleichung nun links durch 1 und rechts durch die rechte Seite von Gleichung (11) dividiert, so kürzt sich $\frac{\theta_0}{1-x}$ heraus:

$$N_{ads} = \frac{N_{mono} \cdot C \cdot x}{(1-x)[1+x(C-1)]}$$

N_{ads} und N_{mono} sind den Adsorptionsmolalitäten $\gamma = \frac{n_{ads}}{m_A}$ (Einheit: $\frac{mmol}{g}$) bzw. im Falle vollständiger monomolekularer Bedeckung γ_{mono} proportional. Setzt man für x wieder $\frac{p}{p_0}$ ein, so erhält man zunächst

$$\gamma = \frac{\gamma_{mono} \cdot C \cdot p}{(p_0 - p)[1 + (p/p_0)(C - 1)]}$$

und schließlich die meist benutzte linearisierte Form (**BET-Isotherme**):

$$\frac{p}{(p_0 - p)\gamma} = \frac{1}{C\gamma_{mono}} + \frac{C-1}{C\gamma_{mono}} \cdot \frac{p}{p_0} \quad (12)$$

Dies ist die Gleichung einer Geraden $y = a + b \cdot x$ mit $a = \frac{1}{C\gamma_{mono}}$ und $b = \frac{C-1}{C\gamma_{mono}}$.

Aus diesen beiden Größen sind die Monoschichtkapazität γ_{mono} und die BET-Konstante C des Adsorbats erhältlich:

$$\gamma_{mono} = \frac{1}{a+b} \quad \text{und} \quad C = 1 + \frac{b}{a} \quad (13)$$

Die der Ableitung der BET-Isotherme zugrundeliegenden Voraussetzungen sind bei realen Adsorbaten allerdings nicht erfüllt und widersprechen sich auch teilweise. Trotzdem erhält man Geraden entsprechend Gleichung (12), gewöhnlich aber nur, wenn man sich auf den sogenannten BET-Bereich ($0,05 < \frac{p}{p_0} < 0,30$) beschränkt. Hier kompensieren sich die bei der Ableitung gemachten Fehler größtenteils.

Aus γ_{mono} ist die spezifische Oberfläche des Adsorbens erhältlich:

$$O_{A,sp} = \frac{O_A}{m_A} = N_{AV} \cdot A_1 \cdot \gamma_{mono} \quad (14)$$

A_1 ist die Fläche, die ein Adsorptmolekül in einer Monoschicht beansprucht. Werte für A_1 sind nach mehreren Methoden erhältlich und liegen für verschiedene Adsorpte tabelliert vor.

Einpunktauswertung

Die BET-Methode wird heute als Standardmethode zur Bestimmung spezifischer Oberflächen verwendet, da sie als am besten theoretisch fundiert gilt und im BET-Bereich gut reproduzierbare Werte liefert. Nachteilig ist aber der große Zeitaufwand, der für die Aufnahme einer Messreihe erforderlich ist. Eine Vereinfachung stellt die **Einpunktauswertung nach Haul und Dümbgen** dar. Dabei wird angenommen, dass die BET-Gerade durch den Koordinatenursprung geht, d. h. in Gleichung (12) wird $\frac{1}{C\gamma_{mono}} = 0$ gesetzt, was umso besser gilt, je größer C ist:

$$\frac{p}{(p_0-p)\gamma} = \frac{1}{\gamma_{mono}} \cdot \frac{p}{p_0}, \quad \gamma_{mono} = \gamma \left(1 - \frac{p}{p_0}\right)$$

Auf diese Weise ist die Monoschichtkapazität (näherungsweise) schon aus einem einzigen Wertepaar p, γ erhältlich (wobei aber die Möglichkeit einer Fehlerrechnung entfällt).

Messung adsorbierter Stoffmengen

Die Messung adsorbierter Stoffmengen kann prinzipiell gravimetrisch, d.h. durch Wägung des Adsorbats und des Adsorbens erfolgen. Im Versuch wird eine im Folgenden beschriebene volumetrische Methode benutzt (Abbildung im Abschnitt ‚Durchführung‘). Das Adsorbat befindet sich in einem Probengefäß A (Volumen V_A , Adsorptivdruck p_A), ein weiteres Adsorptiv befindet sich in einem Dosiergefäß D ($p_D > p_A$). Nach dem Öffnen eines Hahnes zwischen beiden Gefäßen stellt sich ein gemeinsamer Gleichgewichtsdruck p ein. Die Änderung der adsorbierten Stoffmenge Δn_{ads} kann nun mittels der Zustandsgleichung der idealen Gase berechnet werden. Wenn die gesamte Apparatur dieselbe Temperatur T hat, gilt für die Stoffmenge des gasförmigen Adsorptivs **vorher**

$$n_1 = n_{A1} + n_{D1} = \frac{1}{RT} (p_A v_A + p_D v_D) \quad (15)$$

und **nachher**

$$n_2 = n_{A2} + n_{D2} = \frac{1}{RT} (p v_A + p v_D). \quad (16)$$

Daraus ergibt sich:

$$\Delta n_{ads} = n_1 - n_2 = \frac{v_D(p_D-p) - v_A(p-p_A)}{RT} \quad (17)$$

Die Voraussetzung einheitlicher Temperatur kann im Versuch jedoch nicht erfüllt werden, da die Adsorption bei der Temperatur des flüssigen Stickstoffs ($T_A = 77,4\text{ K}$ bei $p = 101,3\text{ kPa}$) erfolgt, das Dosiergefäß jedoch Raumtemperatur besitzt. In dem Teil des Probengefäßes, der nicht gekühlt wird, besteht ein Temperaturgefälle $T_A \rightarrow T_D$.

Gleichung (17) kann dennoch zur Bestimmung von Δn_{ads} benutzt werden, wenn das „geometrische“ Volumen v_A des Probengefäßes durch das „effektive“ Volumen v_A' ersetzt wird.

Das effektive Volumen v_A' ist um den Faktor größer als das geometrische v_A , um den sich das Gas bei der Abkühlung von T_D auf T_A zusammenzieht. Anstelle von Gleichung (17) gilt:

$$\Delta n_{ads} = \frac{v_D(p_D - p) - v_A'(p - p_A)}{RT_D} \quad (18)$$

Das **effektive Volumen** v_A' des Probengefäßes muss experimentell bestimmt werden. Es ergibt sich aus Messungen der Drücke p_A , p_D und p ohne Adsorbens (d. h. mit dem leeren Probengefäß). Dann ist $\Delta n_{ads} = 0$ und aus (18) folgt

$$v_A' = v_D \frac{p_D - p}{p - p_A} \quad (19)$$

Für das reine Adsorbens, das noch nicht mit dem Adsorptiv beladen ist, ist $n_{ads} = 0$.

Nach dem j -ten Dosierschritt ist

$$n_{ads,j} = \sum_{i=0}^j \Delta n_{ads,i}$$

und damit wird schließlich

$$\gamma_j = \frac{n_{ads,j}}{m_A} \quad (20)$$

Infolge der Summation der Δn_{ads} gehen experimentelle Fehler bei der Ermittlung eines Wertes von Δn_{ads} nicht nur in den jeweiligen n_{ads} - und γ -Wert ein, sondern auch in alle folgenden Werte. **Es muss daher mit größter Sorgfalt gearbeitet werden!**

Aufgaben

- Bestimmung des effektiven Volumens v_A' für die jeweilige Apparatur (5 Messungen).
- Messung der Adsorptionsisotherme für die Adsorption von Stickstoff bei seiner Kondensationstemperatur an einem hochdispersen Festkörper (ca. 10 Messpunkte im BET-Bereich).

- c) Graphische Darstellung der Messwerte (γ als Funktion von p).
- d) Graphische Darstellung der linearisierten BET-Isotherme (Ausgleichsgerade, siehe Fehlerrechnung; Messpunkte deutlich hervorheben).
- e) Ermittlung der Monoschichtkapazität γ_{mono} und der spezifischen Oberfläche $O_{A,sp}$ des Adsorbens (siehe Fehlerrechnung bzw. (14)).
- f) Ermittlung von γ_{mono} und $O_{A,sp}$ durch Einpunktauswertung (ersten und letzten Punkt des BET-Bereichs verwenden). Diskutieren Sie die Resultate im Vergleich zu denen von 5.)!

Durchführung

Aufbau und Handhabung der Apparatur sind aus der folgenden Darstellung ersichtlich. Zur besseren Orientierung sind die Hähne von H1 bis H4 durchnummeriert.

Zur Druckmessung stehen ein digital anzeigendes piezoresistives Manometer (Messbereich 0...1300 mbar, Auflösung 1 mbar) sowie ein Piranimanometer (zur Kontrolle des Anfangsvakuums, der Dichtheit der Apparatur sowie zur Kontrolle der Wasserabgabe beim Ausheizen der Probe) zur Verfügung. Hahn 4 ist ein Feindosierventil, mit dem Reinststickstoff aus dem Vorratsgefäß V_0 in das Dosiervolumen eingelassen wird.

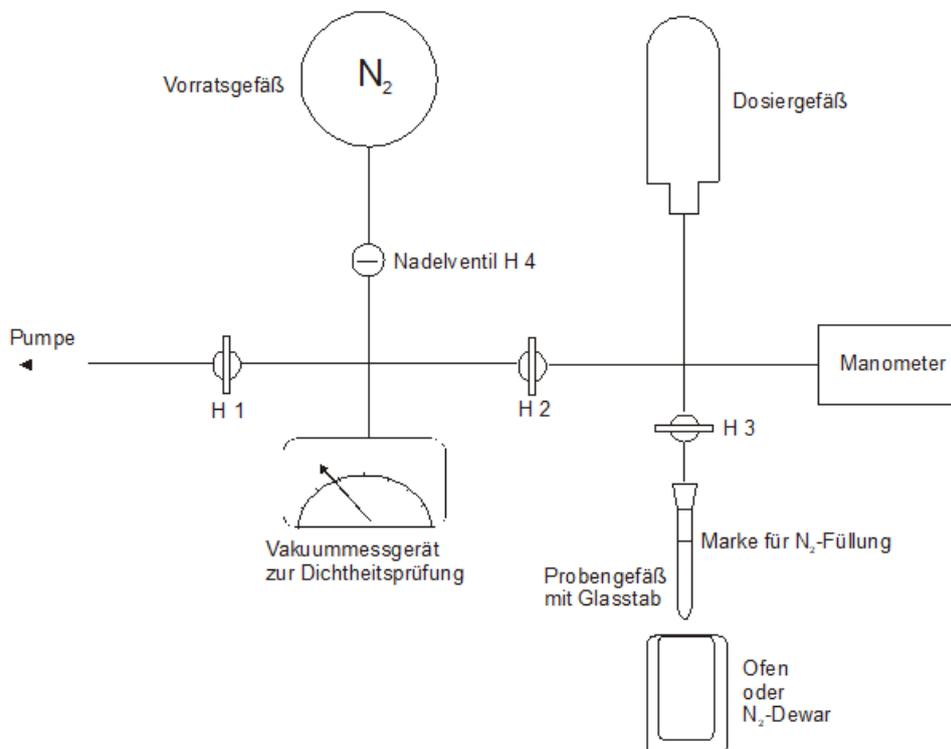


Abbildung 1 – BET-Apparatur



1. Bestimmung des effektiven Volumens

Das Probengefäß wird leer an die Apparatur angesetzt und evakuiert. Dazu wird die Vakuumpumpe angeschaltet, nach etwa 2 min Warmlaufzeit werden die Hähne H1, H2 und H3 geöffnet. Die Apparatur wird auf einen Druck $p_0 < 10^{-2} \text{ mbar}$ evakuiert, danach wird H1 geschlossen.

Das Probengefäß wird nun bis zur Markierung mit flüssigem Stickstoff eingekühlt. Während der gesamten Messdauer ist zu sichern, dass das Stickstoffniveau immer in Höhe der Markierung am Probengefäß bleibt.

Hahn 3 wird geschlossen, über Hahn 4 wird Stickstoff in das Dosiervolumen eingelassen (etwa 50 mbar). Sodann werden H2 und H4 geschlossen und der Dosierdruck p_D notiert. Nach dem Öffnen von H3 stellt sich ein gemeinsamer Gleichgewichtsdruck p ein. Das effektive Volumen v_A' ergibt sich aus

$$(p_D - p) \cdot v_D = p \cdot v_A'$$

Zur Gewinnung weiterer Werte von v_A' wird das beschriebene Verfahren mehrfach hintereinander angewendet, wobei der Druck p_D im Dosiervolumen bei jeder neuen Messung um etwa 50 mbar vergrößert wird. Da das Probengefäß zwischen den einzelnen Messungen nicht evakuiert wird, gilt jetzt

$$(p_D - p) \cdot v_D = (p - p_A) \cdot v_A'$$

wobei der Adsorptivdruck p_A gleich dem gemeinsamen Gleichgewichtsdruck der vorherigen Messung ist. Aus den etwa fünf p, p_D - Wertepaaren im Druckbereich 50 ... 300 mbar wird das arithmetische Mittel gebildet und als effektives Volumen bei der weiteren Auswertung verwendet.

2. Ausheizen der Probe

Nach der v_A' -Bestimmung wird die gesamte Apparatur evakuiert (H4 bleibt dabei selbstverständlich geschlossen). Das Probengefäß wird mit einem Fön auf Zimmertemperatur erwärmt und nach Schließen von H3 vorsichtig vom Schliff gezogen.

Es werden dann ca. 0.1 ... 0.2 g des Adsorbens in das trockene Probengefäß gebracht (zunächst nur grobe Wägung erforderlich). Nach erneutem Ansetzen an die Apparatur wird diese wieder evakuiert. Dann wird der Heizofen vorsichtig von unten über das Probengefäß geschoben (Achtung Bruchgefahr!), die Probe wird sodann etwa 40 min bei 250°C ausgeheizt. Der Ausheizvorgang kann abgebrochen werden, wenn der Druck in der Apparatur unter 10^{-2} mbar gesunken ist. Anschließend wird der Ofen entfernt, und man lässt die Probe auf Zimmertemperatur abkühlen. Nach diesen Vorbereitungen ist die Apparatur messbereit.



3. Messung der Adsorptionsisotherme

Hahn 3 wird geschlossen. Das Probengefäß wird wieder bis zur Markierung mit flüssigem Stickstoff eingekühlt (dessen Niveau während der gesamten Messdauer konstant bleiben muss, damit sich v_A' nicht ändert). Danach verfährt man weiter, wie bereits bei der Messung des effektiven Volumens beschrieben: Dosierdruck p_D einstellen, nach Öffnen von H3 Gleichgewichtseinstellung abwarten (bei der ersten Messung etwa 10 min, später 5 min) und den Gleichgewichtsdruck p ablesen. Nach Schließen von H3 neuen Dosierdruck einstellen usw.

4. Abschalten der Apparatur

Zunächst wird das Probegefäß erwärmt und dann vorsichtig abgenommen. Schliff mit Lappen säubern, Probe in ein (gewogenes) Probegläschen schüttet und exakt wägen (Feinwaage).

Die Apparatur wird wieder evakuiert und geschlossen. Nach dem Abschalten der Vakuumpumpe muss diese unbedingt belüftet werden!

Hinweise:

- 1.) An der evakuierten Apparatur, beim Umgang mit Dewargefäßen und besonders beim Ein- oder Umfüllen von flüssigem Stickstoff sind Schutzbrillen zu tragen.
- 2.) Dewargefäße sind langsam zu füllen; es ist darauf zu achten, dass der flüssige Stickstoff nicht über den Gefäßrand läuft. Das Adsorptionsgefäß ist langsam einzukühlen, damit kein heftiges Aufsieden des flüssigen Stickstoffs erfolgt.
- 3.) Die Einwaage des Adsorbens braucht zuerst nur ungefähr bekannt zu sein; die genaue Probenmasse m_A wird durch Wägung unmittelbar nach der Messung ermittelt.
- 4.) Der Wert v_D ist an der Apparatur angegeben. Der Sättigungsdampfdruck p_0 des Adsorptivs (N_2) ist in guter Näherung gleich dem jeweiligen äußeren Luftdruck (am Barometer abzulesen). Der Platzbedarf A_1 für ein N_2 -Molekül beträgt $16,2 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$. T_D ist die Lufttemperatur in der Umgebung um das Dosiergefäß.

Fehlerrechnung

1.) Der Fehler von v_A' bleibt unberücksichtigt.

2.) Gleichung (14) kann mit den Transformationen

$$\frac{p}{p_0} = x \quad \frac{p}{(p_0-p)\gamma} \frac{\text{mmol}}{g} = y \quad \frac{1}{C \cdot \gamma_{\text{mono}}} \frac{\text{mmol}}{g} = A \quad \frac{C-1}{C \cdot \gamma_{\text{mono}}} \frac{\text{mmol}}{g} = B \quad (21)$$

auf die Form $y = A + B \cdot x$ gebracht werden. Mit den Messwerten wird eine Ausgleichsgerade berechnet.

3.) Aus Gleichungen (21) folgt wie (13) aus (12):

$$\gamma_{\text{mono}} = \frac{1}{A+B} \frac{\text{mmol}}{g}$$

Die Streuung $s(\gamma_{\text{mono}})$ wird aus dem Fehlerfortpflanzungsgesetz berechnet:

$$s(\gamma_{\text{mono}}) = \frac{1}{(A+B)^2} \sqrt{s^2(A) + s^2(B)} \frac{\text{mmol}}{g}$$

Damit wird

$$s(O_{A,sp}) = N_{AV} \cdot A_1 \cdot s(\gamma_{\text{mono}})$$

Anzugebende Werte

- 1.) v_D, A_1, p_0, T_D, m_A ; Probenummer
- 2.) $p_A, p_D, p, v_A', \overline{v_A'}$ (Messwerttabelle);
- 3.) $p_A, p_D, p, \Delta n_{\text{ads}}, n_{\text{ads}}, \gamma$, (Messwerttabelle);
- 4.) $\frac{p}{p_0}, \frac{p}{(p_0-p)\gamma}$;
- 5.) Datenblatt, Rechnerausgaben; BET-Diagramm
- 6.) $\gamma_{\text{mono}}, O_{A,sp}; s(\gamma_{\text{mono}}), s(O_{A,sp})$;
- 7.) $\gamma_{\text{mono}} = (\dots \pm \dots) \frac{\text{mmol}}{g}, O_{A,sp} = (\dots \pm \dots) \frac{\text{m}^2}{g}$
- 8.) $\gamma_{\text{mono}}, O_{A,sp}$ (Einpunktauswertung) für ersten und letzten Messpunkt im BET-Bereich ($0.05 \leq \frac{p}{p_0} \leq 0.3$).

Achtung!

Vertrauensintervalle mit höchstens zwei fehlerhaften Stellen angeben!