

Die Faszination einer riesigen Zahl

Loschmidt im Unterricht

Ein einfaches Experiment zur Bestimmung der Loschmidtschen Zahl

Helmut Eibler und Helmuth Mayr

Die Loschmidtsche Zahl im Unterricht

Zu den wesentlichen Erkenntnissen, die der naturwissenschaftliche Unterricht zu vermitteln hat, gehört zweifellos eine plausible Vorstellung von der Größenordnung atomarer Teilchen und damit auch eine Vorstellung der Teilchenzahlen in "handlichen" Mengen.

Daten wie 10^{-10} m für den Atomdurchmesser oder $6 \cdot 10^{23}$ Kohlenstoffteilchen, die in 12 Gramm Kohlenstoff enthalten sind, werden (im besten Fall) vom Schüler auswendig gelernt, ohne daß er auch nur irgendwie einen Bezug zu diesen Werten sieht. Daher müssen Zahlen dieser Größenordnungen durch Vergleiche und anschauliche, wenn möglich "handgreifliche" Beispiele dargestellt werden.

Im folgenden versuchen die Autoren jenen pädagogischen Pfad zu skizzieren, mit dem diese grundlegenden Erkenntnisse sowohl mit Hilfe von Demonstrations- als auch mit Schülerexperimenten im Unterricht erarbeitet wurden.

Ein Mol wird verständlich

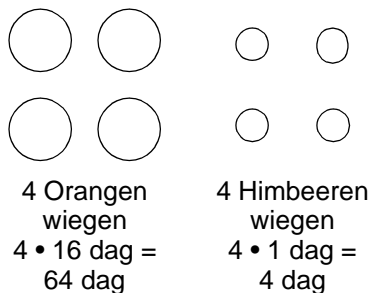
Um die tieferstehend beschriebenen Experimente zu verstehen, müssen die Schüler und Schülerinnen zunächst den Begriff "Mol" als Massenverhältnis der betrachteten Teilchensorten begreifen. (Die oft gehörte und sprachlich etwas holprig wirkende Festlegung "Unter einem Mol versteht man die in Gramm ausgedrückte Molekularmasse eines Reinstoffes" bereitet vielen Schülerinnen und Schülern oftmals größere Verständnisprobleme).

Am besten nähert man sich diesem Begriff mit einem Vergleich aus dem Alltagsleben: Nehmen wir einmal an, wir hätten zur Herstellung eines Obstsalates zwei verschiedenen Sorten von Früchten, die wir im Verhältnis 1:1 mischen sollen:

Himbeeren ... "H", Orangen ... "O"

Nun nehmen wir überdies an, daß jede Orange "O" 16 dag und jede Himbeere "H" 1 dag wiegen soll.

Es ist nun leicht einzusehen, daß ein aus je vier Früchten bestehender Obstsalat folgende Masse haben muß:



Massensumme = $64 \text{ dag} + 4 \text{ dag} = 68 \text{ dag}$

Umgekehrt läßt sich nun leicht einsehen, daß in einer Portion Obstsalat aus gleich vielen Orangen wie Himbeeren das Massenverhältnis von Orangenmasse zu Himbeermasse gleich 16:1 sein muß.

Dieser Kenntnisstand zum Molbegriff genügt zum Verständnis des folgenden Experimentes.

Der Ölfleckversuch zur Bestimmung von N_L

Materialliste

- 1 flaches Gefäß mit einem Durchmesser von mind. 40 cm
- 1 Einwegspritze *oder* 1 Bürette *oder* 1 Feinbürette (Chemiesammlung)
- 2 Meßkolben 100 ml (Chemiesammlung)
- 1 Pipette 10 ml
- 1 Becherglas 100 ml
- 1 Laborwaage (auf 0,01 g genau)
- 1 Gramm Ölsäure
 $\text{CH}_3\text{-(CH}_2)_7\text{-CH=CH-(CH}_2)_7\text{-COOH}$
(Dichte: $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$; relative Molekularmasse = 282)
oder
Ölsäureethylester $\text{CH}_3\text{-(CH}_2)_7\text{-CH=CH-(CH}_2)_7\text{-COOC}_2\text{H}_5$
(Dichte: $\rho = 867 \text{ kg/m}^3$; relative Molekularmasse = 310)
- 200 cm³ Petrolether *oder* Feuerzeug- *oder* Wundbenzin
- 1 Portion Kolophonium *oder* Bärlappsporen *oder* Aktivkohle *oder* fein gemahlener Pfeffer

Als flaches Gefäß kann ein Backblech, eine größere Kristallierschale oder ein geeigneter Kunststoffteller dienen, nötigenfalls tut es auch ein Pappteller.

Einwegspritzen (2 - 3 cm³) erhält man um einige Schilling in jeder Apotheke. (Führt man das Experiment jedoch mit einer Bürette statt mit einer Spritze durch, erhält man wesentlich bessere Ergebnisse!)

Eine genaue Laborwaage befindet sich üblicherweise an jeder Schule (auch wenn es sich um eine etwas ältere Ausgabe einer Balkenwaage mit Gewichtskörpersatz und Tariereitern handeln sollte). Natürlich sind die in vielen Chemie-Sammlungen vorhandenen Digital-Laborwaagen besonders bequem.

Es genügt vollauf, wenn die benötigte Ölsäure bzw. Ölsäureethylester in technischer Reinheit vorliegt. (Eine "Analysenreinheit" stellt einen unnötigen Luxus dar, der viel Geld kostet). Sollte in der Chemie-Sammlung keine Ölsäure bzw. Ölsäureethylester vorhanden sein, kann man ein Fläschen dieser Flüssigkeit in jeder Chemikalienhandlung ohne Giftschein erhalten.

Meßprinzip

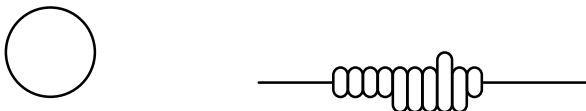
Ein Tropfen von in Petrolether (oder Feuerzeugbenzin o.ä.) gelöster Ölsäure bzw. Ölsäureethylester fällt auf eine Wasser-

Helmut Eibler, BGRG Wien 19, Billrothstraße 26-30

Helmuth Mayr, BGRG Wien 15, Auf der Schmelz 4 und Universität Wien

oberfläche, die z.B. mit Kolophonium bestäubt worden ist. Dadurch bildet sich in Sekundenschnelle ein Ölfleck auf der Wasseroberfläche, während das Lösungsmittel (eben der Petrolether) rasch verdunstet. Da die Ölsäureteilchen ein wasserfreundliches und ein wasserfeindliches Ende haben, kann man annehmen, daß die Ölsäureschicht aus lauter Teilchen besteht, die wie "die Zinnsoldaten" nebeneinander angeordnet sind. Man kann also mit gutem Grund von einer praktisch *monomolekularen* Schicht sprechen.

Aus dem ursprünglichen *kugelförmigen* Tropfenvolumen wird daher eine volumsgleiche "*plattenförmige*" Schicht.



Aus der Volumsgleichheit läßt sich die Größe der Ölsäure-Moleküle und deren Anzahl berechnen. Aus letzterer kann man die Loschmidtsche Zahl bestimmen.

Durchführung

• Demonstrations-Experiment (am Beispiel Ölsäure)

Das Herstellen der Meßlösung

Wenn Sie das Experiment als Lehrereperiment der Klasse demonstrieren wollen, sind zunächst folgende vorbereitende Schritte notwendig:

Wiegen Sie zunächst 1 Gramm Ölsäure so genau wie möglich auf der Laborwaage ab. (Um möglichst gute Ergebnisse zu erzielen, sollte die von Ihnen verwendete Waage eine Genauigkeit von $\delta = 0,01$ g aufweisen.)

Füllen Sie dann einen 100 ml-Meßkolben bis zur Markierung mit dem Lösungsmittel Petrolether (oder Feuerzeugbenzin o.ä.) und lösen Sie anschließend die abgewogenen Ölsäuremenge in diesem Meßkolben auf. Dazu verschließen Sie den Kolben mit dem Stöpsel und schütteln Sie - zwecks guter Durchmischung - kräftig einige Sekunden lang.

Entnehmen Sie dann mit einer Pipette genau 10 ml dieser Lösung und geben Sie diese in den zweiten bereitgestellten 100 ml-Meßkolben. Wenn Sie diesen anschließend mit Petrolether wiederum bis zur Markierung auffüllen, haben Sie eine 0,11 % -ige Ölsäure-Lösung hergestellt.

Füllen Sie anschließend diese Lösung in eine Bürette.

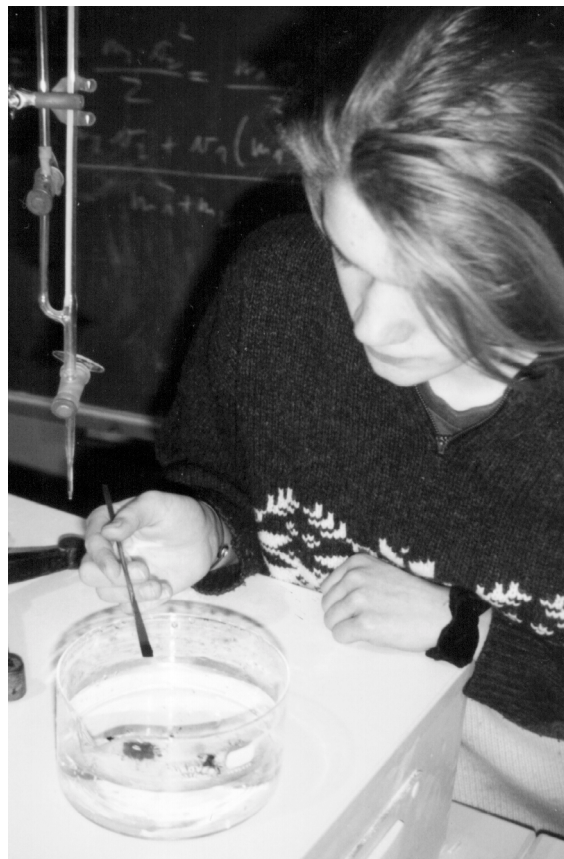
Damit haben Sie Ihr Demonstrationsexperiment vorbereitet; alles weitere erfolgt im Unterricht.

Bestimmung der Tropfengröße

Stellen Sie ein Becherglas unter die Bürette, öffnen sie den Hahn und zählen Sie die Anzahl der Tropfen, während ein Milliliter austropft. Wenn Sie 1 ml durch die gezählte Tropfenanzahl dividieren, erhalten Sie das Tropfenvolumen (in ml).

Der Ölsäurefleck

Bestreuen Sie die Wasseroberfläche des Gefäßes möglichst gleichmäßig und dünn mit Kolophonium, Aktivkohle, Bärlappsporen oder feingemahlenem Pfeffer. (Die Autoren haben die besten Erfahrungen mit der Verwendung von Bärlappsporen gemacht). Achtung! Eine zu dicke oder zu inhomogen aufgetragene Schicht verfälscht das Meßergebnis! (siehe Abb.,



aus fototechnischen Gründen zeigt diese Abbildung das Bestreuen mit Aktivkohle).

Lassen Sie anschließend *einen* Tropfen der 0,11%-igen Ölsäurelösung auf die *Mitte* der Wasseroberfläche fallen. Dadurch bildet sich in Sekundenschnelle (während das Lösungsmittel verdunstet) ein fast kreisrunder Ölfleck, dessen Durchmesser leicht mit einem Rollmaßband gemessen werden kann.

Auswertung

Meßergebnisse:

55 Tropfen pro ml

Durchmesser des Ölsäurefleckes $D = 170$ mm

daraus folgt:

Volumen des Tropfens

$$V_{Tr} = 1/55 \text{ ml} = 0,0182 \text{ cm}^3$$

Volumen der darin enthaltenen Ölsäure

$$V = 0,11\% V = 2 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3$$

Masse der Ölsäure

$$m = \rho \cdot V = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ g}$$

Fläche des Ölsäurefleckes

$$A = (D/2)^2 \cdot \pi = 227 \text{ cm}^2$$

Dicke der Ölsäureschicht

$$d = V/A = 8,8 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$$

Diese Dicke d hat offensichtlich die Größenordnung des "Moleküldurchmessers": $d \approx 9 \cdot 10^{-8}$ cm

Zur weiteren Berechnung treffen wir folgende Idealisierung: Ein Ölsäuremolekül soll ungefähr die Form eines Würfels mit der Kantenlänge d haben.

daraus folgt:

Volumen eines Ölsäuremoleküls

$$V_1 = d^3 = 6,8 \cdot 10^{-22} \text{ cm}^3$$

Anzahl der Ölsäuremoleküle in der Schicht

$$Z = V/V_1 = 2,9 \cdot 10^{16} \text{ Moleküle}$$

Anzahl der Moleküle pro Gramm Ölsäure

$$N = Z/m = 1,45 \cdot 10^{21} \text{ Moleküle}$$

Anzahl der Moleküle in 1 mol = 282 g

$$N_L = 282 \cdot N = 4,1 \cdot 10^{23} \text{ Moleküle pro Mol}$$

• Schülerexperiment

Da der zeitliche Aufwand für dieses Experiment eher groß ist, haben sich die folgenden zwei Durchführungsvarianten bewährt:

Vorbereitung durch den Lehrer, Versuchsdurchführung durch Schülergruppen

Diese Version wurde in Klassen angewandt, die bereits in kleineren Gruppen gearbeitet haben. Jede Arbeitsgruppe hat ein wassergefülltes, flaches Gefäß vor sich, das von den Schülern/innen im Unterricht mit Bärlappsporen, fein gemahlenem Pfeffer o.ä. bestreut wird.

Die Lehrperson bereitet wie beschrieben die Ölsäurelösung vor. Die Schüler/innen erhalten eine Einwegspritze voll Lösung. Dann wird zunächst die Tropfenanzahl pro ml bestimmt. Anschließend lassen die Schüler/innen auf die bestreute Wasseroberfläche einen Tropfen fallen und verfahren gemäß obiger Beschreibung.

Üblicherweise erhält man mit diesen Mitteln zwar die Größenordnung 10^{23} , jedoch einen Faktor, der sich deutlich vom Tabellenwert unterscheidet.

Vorbereitung und Durchführung durch Schüler/innen

Diese Version wurde im Wahlpflichtfach Physik, in Physikalischen Übungen bzw. im Physik-Olympiade-Kurs durchgeführt. Meist sind beim Einwiegen bzw. Herstellen der 0,11%igen Lösung Handling-Tips der Lehrperson notwendig.

Wie kann man die Loschmidtsche Zahl genauer bestimmen ?

Im Zuge der an das Experiment anschließenden Diskussion wurden wir oft von Schülern/innen gefragt, mit welchen Meßmethoden man genauere Werte von N_L erhalten könne. Der Vollständigkeit halber seien hier einige Verfahren tabellarisch aufgezählt:

- Elektrolyse (Faraday-Gesetze)
- Auswertung kristallchemischer Daten (Abstand der Ladungsschwerpunkte)
- Auswertung des radioaktiven Zerfalles einer Probesubstanz
- Interpretation der kinetischen Gastheorie (Boltzmannkonstante)
- Satz von Avogadro
- Aus der Regel von Dulong-Petit

Ein Mol Zwetschkenknödel

Auch wenn die Loschmidtzahl erfolgreich durch eine Messung bestimmt und ihre Bedeutung ausreichend diskutiert wurde, sollte man ihre Unvorstellbarkeit mit durchaus drastischen Vergleichen beleuchten. Besonders gute Erfahrungen haben wir mit folgender Frage gemacht:

Schätze: Wie lange würde die gesamte heutige Weltbevölkerung brauchen, um 1 mol Zwetschkenknödel zu verzehren?

Normalerweise streuen die Schätzungen der Schüler/innen zwischen einigen Wochen bis Jahren.

Nimmt man nun zwecks leichter Berechnung an, daß jeder Mensch in einer Sekunde einen Zwetschkenknödel essen könnte (und sonst mit gar nichts anderem beschäftigt wäre und beliebig lange leben könnte), ergäbe sich:

1 Jahr $\approx 3,16 \cdot 10^7$ sec ... Ein Mensch könnte $3,16 \cdot 10^7$ Zwetschkenknödel in einem Jahr essen.

Die Menschheit umfaßt etwa 5 Milliarden Individuen, pro Jahr könnten ca. $1,6 \cdot 10^{17}$ Knödel gegessen werden.

Dividiert man die Loschmidtsche Zahl durch diese eben erhaltene Zahl, ergibt sich eine Gesamtessenszeit von knapp 4 Millionen Jahre!

Die ganze heutige Weltbevölkerung von ca 5 Milliarden Menschen müßte also 4 Millionen Jahre lang nichts anderes tun, als -Tag und Nacht - pro Sekunde einen Zwetschkenknödel essen, sollte 1 Mol Knödel verzehrt werden.

Wir haben noch nie eine Klasse erlebt, die diesen Zeitraum geschätzt hat! Es stellt sich die Frage, ob Loschmidt selbst "gefühlsmäßig schätzend" auf solche Werte gekommen wäre.

Ein verfrühter Leserbrief

Als Herausgeber fühle ich mich zu einem Kommentar verpflichtet. Für die detaillierte Beschreibung inklusive Fotodokumentation und didaktische Einbettung des Versuches danke ich den Autoren herzlich. Gerade wegen des Werts des Aufsatzes muß ich doch einen Kommentar abgeben und hoffe auf einige Leserbriefe.

Daß ich mit der "sprachlich etwas holprigen Festlegung" des Begriffs Mol nichts anfangen kann, soll hier nicht verschwiegen werden. Daß die Loschmidtsche Zahl mit einem Fehler von 30% in einem so einfachen Experiment bestimmt werden kann, finde ich beeindruckend. Für mich haben experimentelle Ergebnisse aber keine Bedeutung, solange die möglichen Fehler experimenteller und systematischer Art nicht abgeschätzt sind.

Gehen wirklich genau 55 Tropfen auf den Milliliter, oder sind es 55,5? Dieser Fehler von lediglich 1% im Volumen wirkt sich im Wert von N_L mit 3% aus. Wie groß ist der Ölfleck? Ein Fehler von 1 mm im Durchmesser des exakt (?) kreisförmigen Flecks bedeutet 2% Fehler im Resultat. Am drastischsten wirkt sich die Annahme der Würfelform des kettenförmigen Moleküls aus. Wenn die Dicke des Ölsäuremoleküls nur die Hälfte der Länge beträgt, haben viermal so viele Moleküle in der Schicht Platz. Wichtig ist also nur die Größenordnung - und diese zu reproduzieren ist eindrucksvoll genug.

H. K.