

Sekt oder Selters?

Wie steigen die Blasen auf?

Thomas Wilhelm

1. Mit Sekt anstoßen

Wenn man etwas zu feiern hat, lässt man Sekt knallen. Wenn man es sich leisten kann, dann nimmt man Champagner, der in vielen Teilen der Welt als das Festlichste aller Getränke gilt. Sekt ist nach EG-Verordnung das Gleiche wie Qualitätsschaumwein. Vereinfacht gesagt handelt es sich um ein weinhaltiges Getränk in Flaschen, das auf Grund seines Gehaltes an Kohlenstoffdioxid unter Druck steht und einige Qualitätsbedingungen erfüllt [1]. Dazu gehört, dass beim Öffnen des Behältnisses ausschließlich aus der Gärung stammendes Kohlendioxid entweicht und der Überdruck durch das gelöste Kohlenstoffdioxid bei 20°C mindestens 3,5 bar beträgt [1], weshalb der Sektkorken mit einem Drahtgestell fixiert werden muss. Beim Entkorken kann deshalb der Korken mit einem Tempo von 50 km/h aus der Flasche schießen [2+3].

Die aufsteigenden Sektblasen können nicht spontan aus dem Nichts entstehen, sondern nur aus Mikroblasen, die sich an geeigneten Oberflächen bilden [4]. In kleinen Kratzern im Glas sind bereits kleine Gasblasen eingeklemmt, die sich vergrößern können, bis sich ein Kohlendioxidbläschen bis auf einen kleinen Rest ablöst. Die meisten Blasen entstehen aber nicht an Kratzern in Glas, sondern an kleinen, unsichtbaren und hohlen Zellulosefasern, die beim Abtrocknen mit dem Baumwoll-Geschirrtuch haften geblieben sind [3+4]. Sowohl an den Kratzern als auch an den kleinen Verunreinigungen lösen sich regelmäßig Kohlendioxidbläschen ab, so dass beim Sekt u.a. kleine Perlen attraktiv wie an einer Schnur nahezu senkrecht aufsteigen (siehe Abb. 1).

Wenn eine CO₂-Blase an der Oberfläche zerplatzt, reißt sie oben auf, die Flüssigkeit der Blasenwand fließt seitlich ab und trifft unten zusammen, so dass ein Flüssigkeitsjet entsteht, der nach oben aus der Flüssigkeit herausschießt [3]. Wenn dieser dann zu kleinen Tropfen zerfällt, bleiben diese z.T. in der Luft. Mit diesen flüssigen Schwebeteilchen in der Luft gelangen Aromastoffe, Duftstoffe und andere Verbindungen in die Nase des Trinkers - was einen großen Teil des sinnlichen Genusses ausmacht, weshalb die langandauernde Bildung möglichst kleiner Bläschen ein wichtiges Qualitätsmerkmal

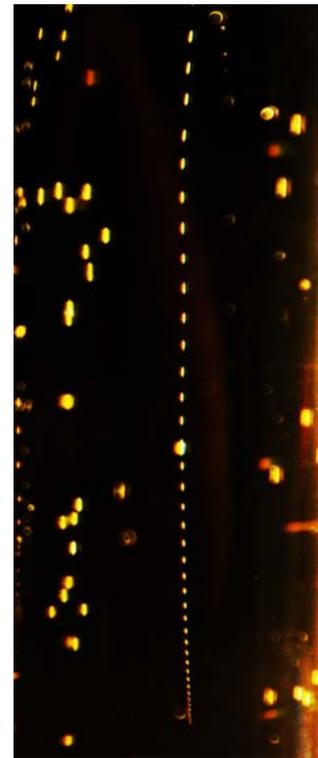


Abb. 1: Nahaufnahme einer Perlenschnur im Sekt (die kugelförmigen Blasen sind durch zu lange Belichtungszeit verzerrt)

ist [3+4]. Eine 0,75 Liter-Flasche Sekt schafft deshalb laut [5] ca. 100 Millionen Blasen. Das Kohlendioxid der Bläschen dringt beim Trinken in die Schleimhaut des Zungengewebes ein, in der daraus Kohlensäure gebildet wird, was Nervenimpulse auslöst und das gewünschte Kribbeln erzeugt [4]. Außerdem werden die Magenwände gereizt, die dadurch stärker durchblutet werden und deshalb den Alkohol schneller ins Blut aufnehmen können.

2. Ziele einer Betrachtung im Unterricht

Im Folgenden soll es um die Frage gehen, wie die Bewegung der Gasblasen in einer Flüssigkeit aussieht. Wir können uns dieser Frage von zwei Seiten nähern. Die eine Möglichkeit ist, im Experiment eine Messung zu machen. Dafür eignet sich eine Videoanalyse. Hat man den Ort zu verschiedenen Zeiten, erhält man durch Differenzieren bzw. durch Differenzenbildung die Geschwindigkeit und analog die Beschleunigung. Die andere Möglichkeit ist, eine mathematische Modellbildung als Theoriebildung vorzunehmen. Dazu überlegt man sich zuerst die Kräfte und erhält damit die Beschleunigung sowie durch Integrieren bzw. durch numerisches Integrieren die Geschwindigkeit und den Ort [6].

Bei den Gasblasen besteht damit die Möglichkeit, eine reale Bewegung zu untersuchen, die nicht in die Spezialfälle gleichförmige und gleichmäßig beschleunigte Bewegung passt. Außerdem hat man damit eine Bewegung, für die man aufgrund der vielfältigen Einflüsse keine „richtige“ mathematische Beschreibung findet. Des Weiteren ist es eine Möglichkeit, den Zusammenhang zwischen Theorie und Experiment zu diskutieren. Schüler tendieren häufig zu der Auffassung, die Physik bilde die Wirklichkeit eins-zu-eins ab, sie entwerfe eine wahrheitsgetreue Kopie der Welt; Schüler sind also naive Realisten [7, S. 246 f. und 8, S. 161]. Das heißt, sie unterscheiden nicht zwischen Theorie und experimentellen Belegen und kommen so zu einer einzigen Darstellung der Dinge, wie sie sind [9, S. 687]. Physik ist aber eine Modellbildungswissenschaft und das physikalische Wissen ist menschliche Konstruktion, aber keine Eins-zu-Eins-Beschreibung der Wirklichkeit.

Außerdem ist es sinnvoll, die Größen Geschwindigkeit und Beschleunigung nicht an idealisierten Bewegungen einzuführen. Sinnvoller ist es, ausgehend von realen Bewegungen zu fragen, ob die Modelle gleichförmiger oder gleichmäßig beschleunigter Bewegung hier sinnvoll sind [10, S. 14]. Besonders diskussionswürdig kann es sein, wenn man kein befriedigendes Modell finden kann.

3. Videoanalyse des Blasenanstiegs

3.1 Versuchsaufbau

Für eine Videoanalyse muss man zunächst eine Videoaufnahme machen. Dafür genügt eine einfache, kleine Digitalkamera, die 30 Bilder pro Sekunde aufnimmt. Eine Hochgeschwindigkeitskamera, wie es sie bereits für 70 € gibt [11], ist nicht nötig. Hier wurde trotzdem mit einer solchen (Casio Exilim EX-FS10) mit 210 Bilder pro Sekunde aufgenommen, im Video-

analyseprogramm das Bild gesucht, an dem die Blase letztmals in Ruhe ist, und dann nur jedes siebte Bild ausgewertet, was effektiv 30 Bilder pro Sekunde bedeutet [11].

Ein bauchiges Glas sollte vermieden werden, da es aufgrund der Brechung am Glas zu falschen Ortsmessungen kommt. Ein quaderförmiges Glasgefäß ist aber auch nicht nötig, es genügt ein zylindrisches Gefäß, z.B. ein Trinkglas, ein Becherglas oder ein Messzylinder. Hier sieht man nur den Ort und den Durchmesser der Gasblase in horizontaler Richtung falsch, was nicht störend ist. Um eine lange Beobachtungszeit zu haben, sollte ein höheres Glas gewählt werden, obwohl man ein Sektglas nur zwei Drittel mit Sekt füllt und so nur etwa 7,4 cm Füllhöhe hat [4].

Aus pädagogischen Gründen verwendet man keinen Sekt, sondern Mineralwasser, was auch aus experimentellen Gründen sinnvoller ist. Die Videoanalyse ist einfacher, wenn sich nicht zu viele Gasblasen gleichzeitig in der Flüssigkeit bewegen. Deshalb sollte man auch nur ein Mineralwasser mit wenig Kohlensäure verwenden („medium“) und nach dem Einschenken einige Zeit warten, bis nur noch wenige Gasblasen aufsteigen. Man muss sich aber bewusst sein, dass sowohl die Flüssigkeitsart als auch deren noch verbliebener Kohlendioxidgehalt einen Einfluss auf den Blasenanstieg hat.

Das Glasgefäß stellt man am Besten vor einen schwarzen Karton und beleuchtet das Glas schräg von hinten. Die Gasblasen sind kleine Zerstreuungslinsen; das auf sie auftreffende

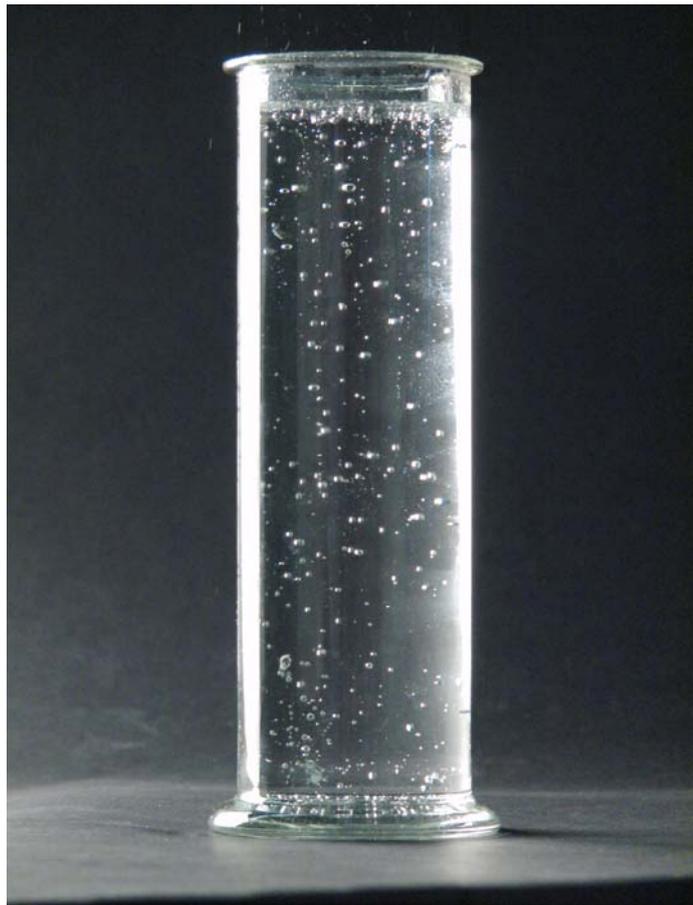


Abb. 2: Mineralwasser im Messzylinder vor schwarzem Hintergrund und von links vorne beleuchtet

Licht geht nach ihnen in alle Richtungen weg. So erhält man im Video weiße Punkte vor dunklem Hintergrund (siehe Abb. 2).

Verfolgt man nun in mit einem Videoanalyseprogramm (hier wurde „measure dynamics“ gewählt) einige Blasen, erhält man zunächst ganz unterschiedliche Ergebnisse, die nicht reproduzierbar scheinen. Deshalb empfiehlt es sich, zwei Spezialfälle anzusehen: Die großen Blasen, die sehr schnell sind, und die ganz kleinen Blasen, die langsam sind. Dann sind die Ergebnisse auch reproduzierbar.

3.2 Kleine Blasen im Mineralwasser

Zunächst werden Gasblasen ausgewählt, die so klein sind, dass sie unten am Boden, wenn sie sich ablösen, gerade noch gesehen werden können. Für die 16 cm bis zur Wasseroberfläche wurden dann 1,2 s bis 1,6 s gemessen. Das Zeit-Höhen-Diagramm sieht dabei auf dem ersten Blick nach einer Parabel aus (siehe Abb. 3), es handelt sich also um eine beschleunigte Bewegung. Betrachtet man das Tempo in Abbildung 4, sieht man, dass diese von 0 cm/s bis ca. 25 cm/s zunimmt. Allerdings nimmt sie nicht linear zu, sondern ihre Steigung nimmt ebenso zu. Im Videoanalyseprogramm „measure dynamics“ kann man sich Regressionsgeraden berechnen lassen. Für das erste Drittel der Bewegung erhält man damit in diesem Messbeispiel einen Betrag der Durchschnittsbeschleunigung von ca. 5 cm/s², für das letzte Drittel von ca. 25 cm/s². Es handelt sich also dabei um eine Bewegung mit zunehmendem Beschleunigungsbetrag. Die übliche Sektfüllhöhe von ca. 7,4 cm hat die Gasblase aus Abbildung 3 in 1,18 s mit einem Geschwindigkeitsbetrag von 16 cm/s erreicht und ist damit bereits schneller als Sektblasen.

3.3 Große Blasen im Mineralwasser

Nun werden Gasblasen ausgewählt, die so groß sind, dass sie für die gleiche Strecke nur 0,5 s brauchen, d.h. in etwa ein Drittel der Zeit. Das Zeit-Höhen-Diagramm sieht nun auf den ersten Blick wie eine Gerade aus (siehe

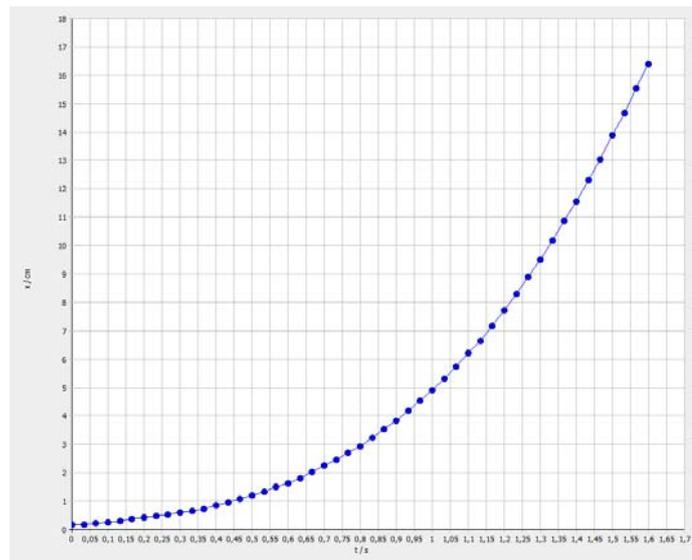


Abb. 3: $y(t)$ -Diagramm einer kleinen, im Mineralwasser aufsteigenden Gasblase (gemessen mit der Videoanalyse)



Abb. 4: $v(t)$ -Diagramm einer kleinen, im Mineralwasser aufsteigenden Gasblase (gemessen mit der Videoanalyse)

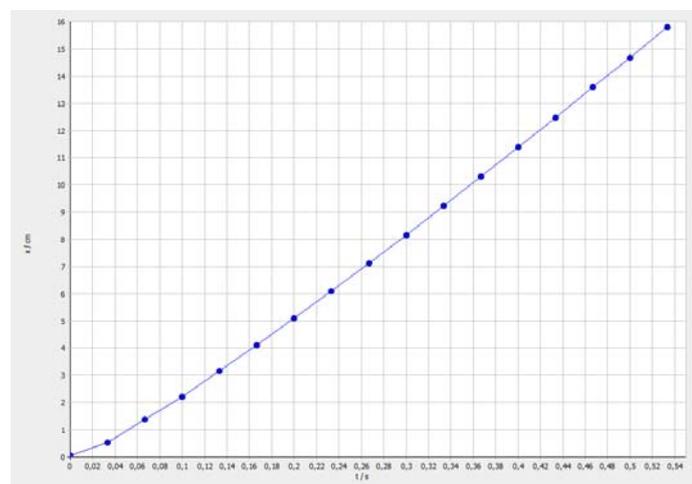


Abb. 5: $y(t)$ -Diagramm einer großen, im Mineralwasser aufsteigenden Gasblase (gemessen mit der Videoanalyse)

he Abb. 5). Betrachtet man den Geschwindigkeitsbetrag, sieht man, dass dieser aber doch leicht zunimmt, im Beispiel von 25 cm/s bis ca. 35 cm/s (siehe Abb. 6). Es handelt sich also auch hier um eine beschleunigte Bewegung.

3.4 Blasen im Sekt

Nun wäre es doch interessant, wie eine Gasblase im Sekt im Vergleich zu den Blasen im Mineralwasser aufsteigt. Nach dem Einschenken muss man et-

was warten, bis sich die Anzahl der aufsteigenden Blasen reduziert hat. Dann sieht man auch große und kleine Blasen aufsteigen. Die Perlenschnüre (siehe Abb. 1), bei denen von einem Punkt in sehr kurzem Abstand hintereinander sehr viele Blasen aufsteigen, bestehen aber nur aus kleinen, langsam aufsteigenden Blasen. Zu Beginn sind die einzelnen Blasen so nahe beieinander, dass sie z.T. vom Auge nicht getrennt werden können und als ein Faden erscheinen.

Für die Videoanalyse wählt man einzelne Blasen aus. Kleine Blasen ergeben wieder ein Zeit-Höhen-Diagramm, das auf den ersten Blick nach einer Parabel aussieht (siehe Abb. 12, wie bei Abb. 3); der Geschwindigkeitsbetrag nimmt mehr als linear zu. Große Blasen ergeben wieder ein Zeit-Höhen-Diagramm, das auf den ersten Blick wie eine Gerade aussieht (ähnlich wie Abb. 5); der Geschwindigkeitsbetrag nimmt aber leicht zu. Diese Ergebnisse rechtfertigen es, im Physikunterricht Mineralwasser statt Sekt zu analysieren.

Beim Sekt bietet sich noch eine andere Möglichkeit der Auswertung an. Macht man ein Foto wie Abbildung 1, kann man in measure dynamics eine Bildanalyse machen und die Koordinaten der einzelnen Perlen bestimmen (siehe Abb. 7). Unter der Annahme, dass die Blasen in gleichen Zeitabständen gestartet sind, kann man das auch als die Orte einer Blase in gleichen Zeitabständen auffassen und deren Tempo betrachten. Das Zeit-Höhen-Diagramm entspricht

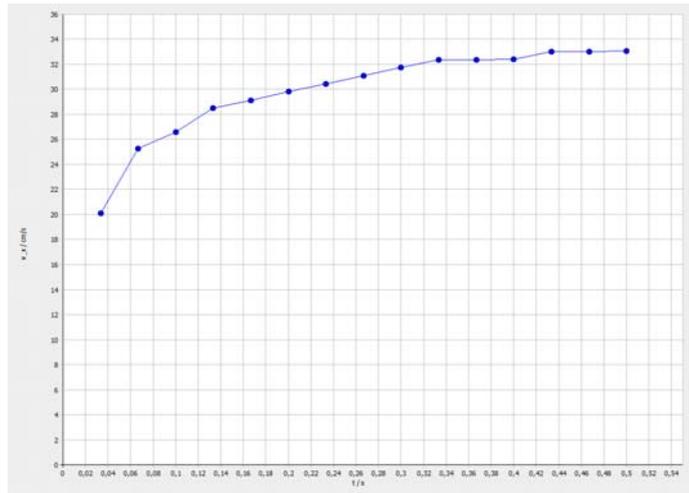


Abb. 6: $v(t)$ -Diagramm einer großen, im Mineralwasser aufsteigenden Gasblase (gemessen mit der Videoanalyse)

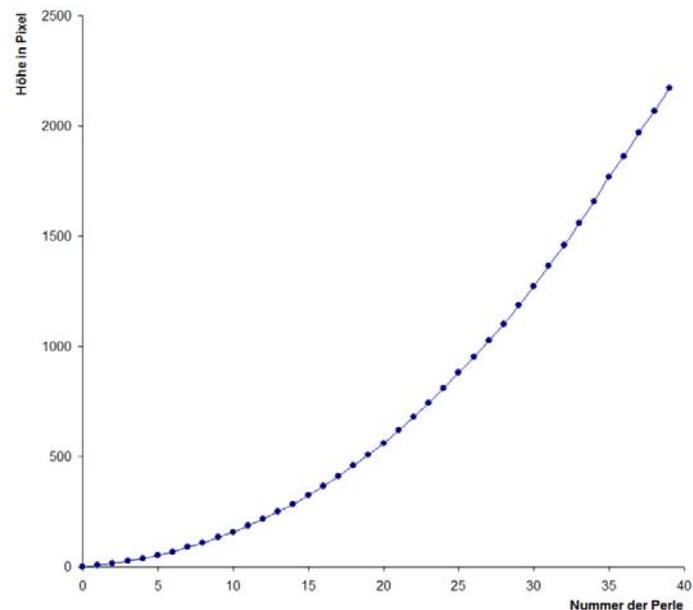


Abb. 7: y -Komponente der Pixelkoordinaten der CO_2 -Blasen der Perlenschnur aus Abbildung 1

der Abb. 7 und auch der Geschwindigkeitsbetrag steigt wieder kontinuierlich mit zunehmendem Beschleunigungsbetrag an.

4. Modellierung des Blasenauftiegs

4.1 Einfaches Modell mit konstantem Auftrieb

Die einfachste Modellannahme ist, dass die Kohlendioxidbläschen nach dem Ablösen vom Glas mit konstantem Volumen aufsteigen. Damit wirken nur zwei Kräfte auf die Gasbläschen: die Gewichtskraft und die Auftriebskraft, also $m \cdot \vec{a} = \vec{F}_G + \vec{F}_{Auf}$. Wir wählen aufwärts als die positive Koordinatenrichtung und beachten, dass die Auftriebskraft gleich der Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit ist. So erhalten wir:

$m_{CO_2} \cdot a = |F_{Auf}| - |F_{G, CO_2}| = |F_{G, Sekt}| - |F_{G, CO_2}| = V_{CO_2} \cdot g \cdot (\rho_{Sekt} - \rho_{CO_2}) \approx V_{CO_2} \cdot g \cdot \rho_{Sekt}$, da die Dichte des Kohlendioxids gegenüber der Dichte der Flüssigkeit vernachlässigt werden kann.

Da die Massen von den Dichten abhängen, folgt nach Division durch $m_{CO_2} = \rho_{CO_2} \cdot V_{CO_2}$ dann

$$a = g \cdot (\rho_{Sekt} - \rho_{CO_2}) / \rho_{CO_2} \approx g \cdot \rho_{Sekt} / \rho_{CO_2} .$$

Das bedeutet, dass eine Bewegung mit konstanter Beschleunigung vorliegt. Wenn sich die Blasen an einer Stelle des Glases in gleichen Zeitintervallen Δt ablösen und eine Perlenschnur erzeugen, dann gilt damit für den Zeitpunkt einer Ablösung einer neuen Blase, dass sich die zurückgelegten Wege aller bereits abgelöster Blasen verhalten wie $1 : 4 : 9 : 16 : \dots : n^2$. Die Abstände zwischen zweier aufeinanderfolgender Blasen verhalten sich damit wie $1 : 3 : 5 : 7 : \dots : (2n-1)$, d.h. die Abstände zwischen zwei aufeinanderfolgender Blasen werden jeweils um die gleiche Strecke größer (im Gegensatz zu dem Ergebnissen von 3.4).

In diesem Modell ist die Beschleunigung vom Volumen unabhängig. Vernachlässigen wir, dass die Gasdichte vom Blasenradius abhängt, bedeutet dies, alle Blasen müssten genauso aufsteigen. Das ist aber ganz offensichtlich nicht der Fall. Man kann ganz deutlich sehen, dass sich Blasen gegenseitig überholen können.

4.2 Stokes'sche Reibung

Im Wasser aufsteigende Gasblasen haben bis zu einem Radius von 0,6 mm in etwa Kugelform, steigen geradlinig auf und können wie feste Kugeln behandelt werden [12]. Sektblasen sind in der Regel unterhalb dieser Grenze. Größere Gasblasen sind dann rotations-ellipsoid-ähnliche Formen und ab einem Radius von ca. 3 mm haben sie unregelmäßige Deformationen, die dann eine pendelnde Bewegung bzw. Schraubenbewegung ausführen [13].

Bei laminarer Strömung (Reynoldszahl $Re < 0,4$) kann gemäß dem Stokes'schen Gesetz die Reibungskraft näherungsweise als $F_{Reib} = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$ angenommen werden. Das ist bei kleinen Sektblasen erfüllt, aber nicht mehr bei großen Blasen. Außerdem ist die Bedingung des unendlich ausgedehnten Gefäßes nicht erfüllt und man beobachtet auch, dass Blasen am Rand langsamer aufsteigen.

Mit der Annahme einer Stokes'schen Reibung gilt:

$$m_{CO_2} \cdot a = |F_{Auf}| - |F_{G,CO_2}| - |F_{Reib}| = V_{CO_2} \cdot g \cdot (\rho_{Sekt} - \rho_{CO_2}) - 6\pi \cdot \eta \cdot r_{CO_2} \cdot v_{CO_2}$$

und daraus folgt wie unter 3.1 mittels Division durch $m_{CO_2} = \rho_{CO_2} \cdot V_{CO_2}$ und da $\rho_{CO_2} \ll \rho_{Sekt}$:

$$a = g \cdot \rho_{Sekt} / \rho_{CO_2} - 6\pi \cdot \eta \cdot r_{CO_2} \cdot v_{CO_2} / (\rho_{CO_2} \cdot V_{CO_2}). \text{ Mit } V_{CO_2} = \frac{4}{3} \pi \cdot r_{CO_2}^3 \text{ folgt weiter:}$$

$$a = g \cdot \rho_{Sekt} / \rho_{CO_2} - \frac{9}{2} \cdot \eta \cdot v_{CO_2} / (\rho_{CO_2} \cdot r_{CO_2}^2).$$

Damit stellt sich recht schnell ein konstantes Endtempo $v_{CO_2} = \frac{2}{9} \cdot g \cdot \rho_{Sekt} \cdot r_{CO_2}^2 / \eta$ ein, das abhängig von der Größe der Blasen ist. Dieses Endtempo ist proportional zur Querschnittsfläche bzw. zum Quadrat des Radius.

Für Gasbläschen in Sekt mit einem Bläschenradius zwischen 50 µm und 400 µm ergibt das mit $\eta_{Sekt} = 1,5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ein Endtempo zwischen 0,4 cm/s und 23 cm/s. Für Gasbläschen gleicher Größe in Wasser ergibt das mit $\eta_{H_2O} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ein Endtempo zwischen 0,5 cm/s und 35 cm/s.

4.3 Volumenvergrößerung wegen Druckabnahme

Eine weitere Überlegung könnte sein, dass sich der Druck im Sekt mit der Höhe im Glas ändert. Da Flüssigkeiten näherungsweise inkompressibel sind, hat das fast keine Auswirkung auf die Dichte des Sektes, aber auf die Dichte bzw. das Volumen der Gasbläschen.

Wir legen den Koordinatennullpunkt an die Sekttoberfläche. Dann ist der hydrostatische Druck in der Tiefe $x < 0$ nun $p = \rho_{Sekt} \cdot g \cdot (-x)$ und der absolute Druck ist $p(x) = p_{Luft,außen} + \rho_{Sekt} \cdot g \cdot (-x)$. Für die Gasbläschen gilt nun das Boyle-Mariottesche Gesetz.

Damit nimmt ihr Volumen mit der Tiefe ab bzw. mit der aufgestiegenen Höhe zu.

Eine Blase, die unten bei $x = -15 \text{ cm}$ Wassertiefe einen Radius $r = 0,1 \text{ mm}$ hat, hat damit an der Oberkante der Sektsäule bei Normaldruck einen Radius $r = 0,10048 \text{ mm}$, so dass dieser Effekt völlig vernachlässigbar ist.

4.4 Gaszunahme

Als Physiker mag man geneigt sein, an dieser Stelle aufzuhören, und hat damit einen wesentlichen Effekt übersehen. Die aufsteigenden Gasblasen nehmen während des Aufstieges nämlich doch an Volumen zu, da an ihrer Oberfläche weiteres im Sekt gelöste Kohlendioxid frei wird, d.h. je größer die Blasenoberfläche, desto größer ist ihre Volumenzunahme. Roth [4] erläutert theoretisch und zeigt an Messdaten, dass der Radius einer aufsteigenden Sektblase linear mit der Zeit zunimmt. Es sind etwa 350 bis 400 µm pro Sekunde.

Dadurch vergrößert sich der Auftrieb, aber auch die Reibung. Nach 4.2 ist das Endtempo proportional zum Quadrat des Radius. Nehmen wir an, das „End“-tempo bei jedem Radius wird quasi sofort erreicht, dann muss das Tempo quadratisch mit der Zeit zunehmen, d.h. der Be-

schleunigungsbetrag nimmt linear mit der Zeit zu wie in 4.1, was zu den Messwerten aus 3.2 passt.

Streng genommen kann man aber nicht einfach in der Berechnung die bewegte Masse bzw. das Volumen erhöhen, denn das dazukommende Gas hat ja noch keinen Impuls. Lässt man beispielsweise auf einen mit konstanter Geschwindigkeit rollenden Wagen noch Sand auffallen, so wird dieser langsamer, da der Gesamtimpuls konstant bleibt. Falls keine Kräfte wirken, würde gelten: $m \cdot dv = -v \cdot dm$ bzw. $a = \frac{dv}{dt} = -\frac{v}{m} \cdot \frac{dm}{dt} = -\frac{v}{m} \cdot \rho \cdot \frac{dV}{dt}$. Allerdings ist dies aufgrund der kleinen Blasenmassen vernachlässigbar.

4.5 Weitere Effekte

Vergleicht man die Gasblasen und deren Aufstieg in Mineralwasser, Sekt und Bier, stellt man bereits mit bloßem Auge unterschiedliche Blasengrößen und unterschiedliche Aufstiegs- geschwindigkeiten fest. In spritzigem Mineralwasser sind die Blasen am größten, wachsen am schnellsten und bewegen sich am schnellsten.

Im Sekt gibt es oberflächenaktive Substanzen (Tenside), die sich an der Grenzfläche der Gasblasen ansammeln und damit das weitere Anwachsen der Blasen durch Diffusion von CO_2 in die Blase verlangsamen, so dass die Blasen kleiner bleiben [4]. Bier enthält noch mehr oberflächenaktive Proteine [13], so dass die Gasblasen besonders klein sind, noch langsamer wachsen und deutlich langsamer sind.

Diese Proteinmoleküle an der Blasenwand vergrößern außerdem den Reibungswiderstand [3], was die Bewegung auch verlangsamt. Welch vielfältige Effekte bei größeren Gasblasen auch im reinen Wasser noch zu berücksichtigen sind, stellt Siemes [12] zusammen, was allerdings die Schulmöglichkeiten übersteigt.

5. Vergleich Videoanalyse und Modellbildung

5.1 Bedingungen für die Modellbildung

Bei all den gemachten Vereinfachungen und Vernachlässigungen kann man sich schon fragen, wie gut nun das Modell, das in dem Abschnitt 4 entwickelt wurde, zu den Messwerten aus Abschnitt 3 passt. Insbesondere Schüler interessiert dies. Aus den vielen für die Schule entwickelten Modellbildungssystemen [6] zur numerischen Berechnung müssen wir deshalb eines auswählen, das auch Messdaten zum Vergleich importieren kann. Aufgrund des sehr kleinen Radius, der in der dritten Potenz eingeht und von der Zeit abhängt, braucht man ein sehr gutes numerisches Verfahren, z.B. Runge-Kutta vierter Ordnung mit automatischer Schrittweitenanpassung. Viele einfache numerische Verfahren scheitern hier (selbst Runge-Kutta vierter Ordnung ohne automatische Schrittweitenanpassung). Die Wahl fiel deshalb auf das gleichungsorientierte Modellbildungssystem Newton-II [6+14].

Wir berücksichtigen den Auftrieb, die Stokes'sche Reibung und die Blasenvergrößerung, vernachlässigen aber die Gewichtskraft. Für das Wasser nehmen wir eine Dichte von 1.000 kg/m^3

an und eine dynamische Viskosität von $\eta = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ und für das CO_2 eine Dichte von $1,9 \text{ kg/m}^3$.

Damit ergeben sich sechs Gleichungen für die Berechnung: $r = r_0 + c \cdot t$; $V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$; $m = 1,9 \cdot V$ sowie $F_{\text{Auf}} = 1000 \cdot V \cdot 9,81$; $F_{\text{Reib}} = 6 \cdot \pi \cdot 1e-3 \cdot r \cdot v$; $F = F_{\text{Auf}} - F_{\text{Reib}}$. Die grundlegende Gleichung $a = F/m$ sowie die Berechnung von v und s ist in der Software bereits fest implementiert.

5.2 Modellbildung für die kleine Blase im Wasser

Bei der kleinen Blase aus Abschnitt 3.2 bekommt man mit den beiden Parametern $r_0 = 50 \text{ }\mu\text{m}$ für den Startradius der Blase und $c = 185 \text{ }\mu\text{m/s}$ für das Radiuswachstumstempo eine verblüffend gute Anpassung der $y(t)$ -Kurve an die Messdaten (siehe Abb. 8). Selbst die berechnete $v(t)$ -Kurve passt damit sehr gut zu den Messwerten (siehe Abb. 9).

Da das verwendete Mineralwasser wesentlich weniger Kohlendioxid enthält als Sekt, war auch zu erwarten, dass das Radiuswachstum langsamer geht, also c kleiner als beim frisch geöffneten Sekt ist, wofür Roth ein größeres Radiuswachstumstempo von etwa 350 bis 400 μm pro Sekunde angibt [4]. Mit den verwendeten Parametern ergibt sich, dass der Blasenradius nach 15 cm oder 1,58 s nun 342 μm ist, d.h. der Radius hat sich während des Aufstieges versiebenfacht.

5.3 Modellbildung für die große Blase im Wasser

Die Qualität unserer Modellbildung können wir nun an der Bewegung der großen Blase aus Abschnitt 3.3 testen. Da beide Bewegungen aus dem gleichen Video sind, hat das Mineralwasser

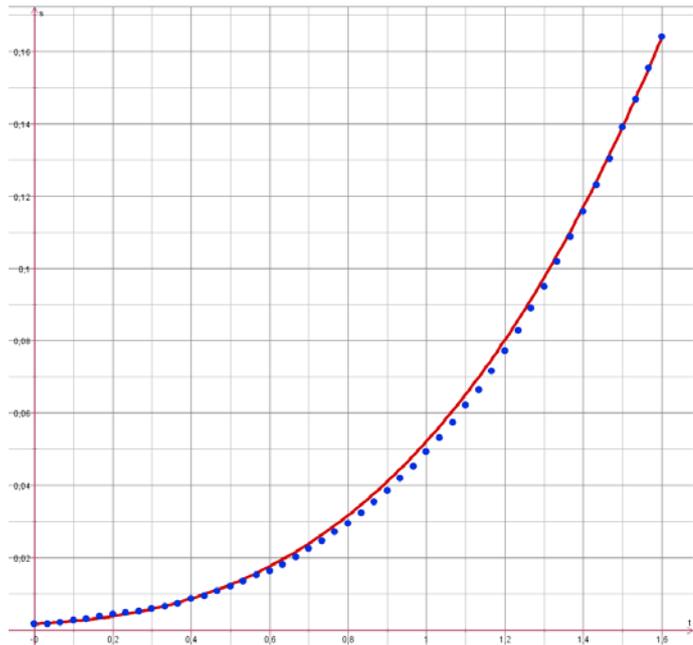


Abb. 8: $y(t)$ -Diagramm einer kleinen, im Mineralwasser aufsteigenden Gasblase: modellierte Kurve (rot) und gemessene Punkte (blau)

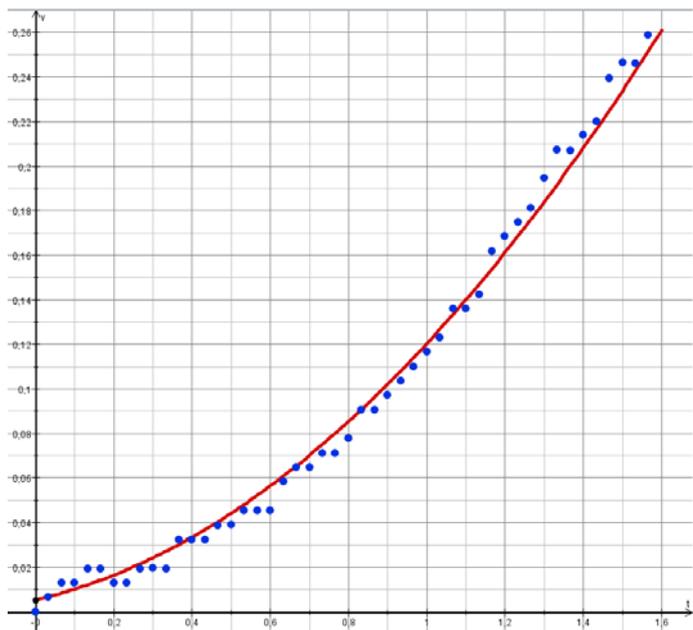


Abb. 9: $v(t)$ -Diagramm einer kleinen, im Mineralwasser aufsteigenden Gasblase: modellierte Kurve (rot) und gemessene Punkte (blau)

jeweils den gleichen CO_2 -Gehalt. Gemäß dem Modell muss das Radiuswachstumstempo c die gleiche sein. Außerdem hat man im Video den Eindruck, dass der Durchmesser der großen Blase beim Start in der Größenordnung der kleinen Blase am Ende ist.

Und tatsächlich ergibt sich mit dem Radiuswachstumstempo $c = 185 \mu\text{m/s}$ und dem Startradius der Blase $r_0 = 324 \mu\text{m}$ für den $y(t)$ -Graphen eine unerwartet gute Anpassung der berechneten $y(t)$ -Kurve an die gemessenen Werte (siehe Abb. 10). Die berechnete $v(t)$ -Kurve kann auch akzeptiert werden (siehe Abb. 11). Allerdings nimmt der Betrag der Beschleunigung bei den Messwerten ab, während sie bei den Modellwerten leicht zunimmt. Mit den verwendeten Parametern ergibt sich, dass der Blasenradius nach 15 cm oder 0,5 s nun $415 \mu\text{m}$ ist, d.h. der Radius hat während des Aufstieges nur um 30 % zugenommen.

5.4 Modellbildung für eine Sektblase

Einen weiteren Test der Qualität der Modellbildung können wir an der Bewegung einer Gasblase in Sekt (siehe Abschnitt 3.a) durchführen. Für den Sekt nehmen wir auch eine Dichte von 1.000 kg/m^3 und eine höhere dynamische Viskosität von $\eta = 1,5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ an. Wir wählen eine kleine Blase in einem Sekt, der nach einiger Standzeit nur noch wenig perlt.

Auch hier ergeben sich für kleine und große Blasen gute Anpassungen der $y(t)$ -Kurven an die Messdaten. Für eine kleine Blase ergab sich mit den beiden Parametern $r_0 = 80 \mu\text{m}$ für den Startradius und $c = 67 \mu\text{m/s}$ für das Radiuswachstumstempo eine verblüffend gute Anpassung (siehe Abb. 12). Selbst die berechnete $v(t)$ -Kurve passt damit gut zu den Messwerten.

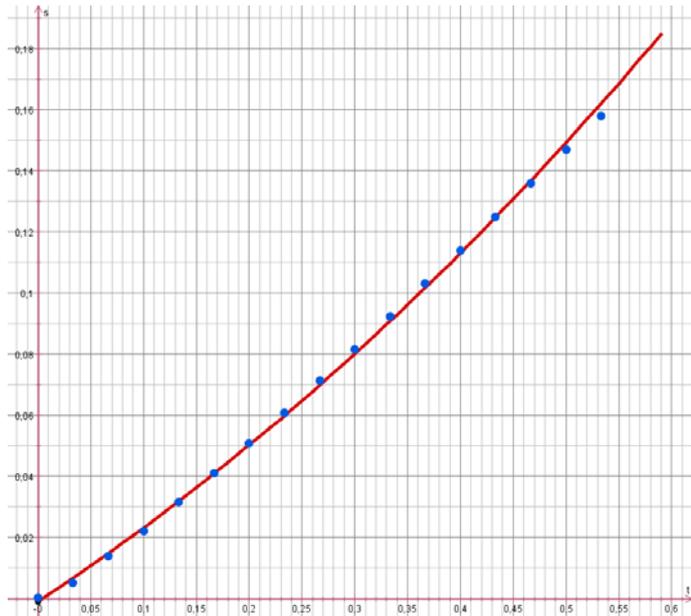


Abb. 10: $y(t)$ -Diagramm einer großen, im Mineralwasser aufsteigenden Gasblase: modellierte Kurve (rot) und gemessene Punkte (blau)



Abb. 11: $v(t)$ -Diagramm einer großen, im Mineralwasser aufsteigenden Gasblase: modellierte Kurve (rot) und gemessene Punkte (blau)

Da der Sekt schon einige Zeit stand, ist das geringe Radiuswachstumstempo verständlich. In einem Video, das weitere acht Minuten später aufgenommen wurde, ergab sich entsprechend ein noch geringeres Radiuswachstumstempo, was das Modell bestätigt.

6. Fazit

Die CO₂-Blasen im Sekt sind nicht nur für festliche Angelegenheiten von großer Bedeutung für das sinnliche Erleben. Der Aufstieg der Gasblasen in kohlenensäurehaltigen Getränken, ob nun Sekt oder Selters, sind eine interessante Möglichkeit für die Videoanalyse, da sich eine beschleunigte Bewegung ergibt, für die man keine vereinfachte Bewegungsgleichung angeben kann.

Deshalb ist es auch eine herausfordernde Möglichkeit zur Modellbildung mit Hilfe eines Modellbildungssystems, um so das Verständnis für die newtonsche Mechanik in höheren Jahrgangsstufen zu vertiefen. An Kräften muss man nur die Auftriebskraft und die Stokes'sche Reibungskraft berücksichtigen. Entscheidend wichtig ist dabei, die Blasenvergrößerung durch weiteres Kohlendioxid zu berücksichtigen. Auf diese Weise hängen Radius, Volumen, Masse, Auftriebskraft und Reibungskraft von der Zeit ab.

Die Physik des Blasenanstieges ist zwar schwierig, aber es ist auch faszinierend, was bei diesem Alltagsvorgang alles eine Rolle spielt. Deshalb: erst beobachten, dann trinken. Prost!

Literatur

- [1] Verordnung (EG) Nr. 479/2008 des Rates vom 29. April 2008 über die gemeinsame Marktorganisation für Wein, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 1493/1999, (EG) Nr. 1782/2003, (EG) Nr. 1290/2005, (EG) Nr. 3/2008 und zur Aufhebung der Verordnungen (EWG) Nr. 2392/86 und (EG) Nr. 1493/1999, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:148:0001:0061:DE:PDF>
- [2] Wiesner, H.; Rachel, R.; Colicchia, G.: Warum „raucht“ Sekt? Physikalische Aspekte des Lösens von Gasen in Flüssigkeiten - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 60, Nr. 8, 2011, in diesem Heft
- [3] Walker, J.: Der fliegende Zirkus der Physik, München, Oldenbourg, 9. Auflage, 2008
- [4] Klaus Roth: Sekt, Champagner & Co. So prickelnd kann Chemie sein – In: Chemie in unserer Zeit, Band 43, 2009, S. 418–432
- [5] Wirtzfeld, A.: Aufzug für den Geschmack: Kohlendioxid-Blasen im Champagner, http://www.yoopress.com/de/weinnews/weinwirtschaft/forschung/849.Aufzug_fuer_den_Geschmack_Kohlendio_xid-Blasen_im_Champagner.html, 2009
- [6] Lück, S.; Wilhelm, T.: Modellierung physikalischer Vorgänge am Computer. Modellbildungssysteme als Unterstützung zum Verständnis physikalischer Strukturen - In: Unterricht Physik 22, Heft 122, 2011, S. 26 - 31

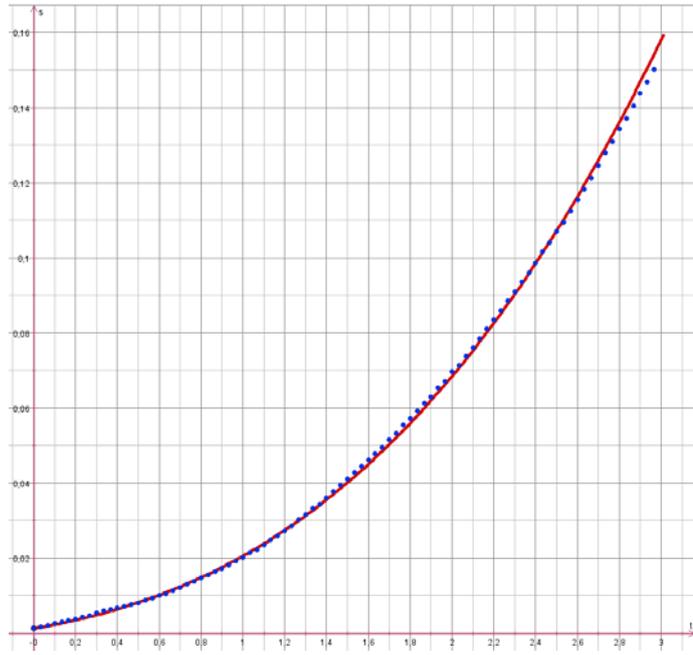


Abb. 12: $y(t)$ -Diagramm einer kleinen, in Sekt aufsteigenden Gasblase: modellierte Kurve (rot) und gemessene Punkte (blau)

- [7] Kircher, E.: Studien zur Physikdidaktik. Erkenntnis- und wissenschaftstheoretische Grundlagen, IPN, Kiel, 1995
- [8] Priemer, B.: Ein diagnostischer Test zu Schüleransichten über Physik und Lernen von Physik – eine deutsche Version des Tests „Views About Science Survey“ - In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 9, 2003, S. 160 - 178
- [9] Kuhn, D.: Children and Adults as Intuitive Scientists – In: Psychological Review 96, Nr. 4, 1989, S. 674 - 689
- [10] Bardo Diehl: Wenn Schüler Versuche selbst entwickeln ... Vom reproduktiven zum kreativen Experiment - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 60, Nr. 4, 2011, S. 12 - 18
- [11] Michel, M.; Wilhelm, T.: Dynamik mit Hochgeschwindigkeitsvideos - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 59, Nr. 7, 2010, S. 23 - 30
- [12] Siemes, W.: Gasblasen in Flüssigkeiten. Teil II: Der Aufstieg von Gasblasen in Flüssigkeiten - In: Chemie-Ing.-Techn. 26, Nr. 11, 1954, S. 614 - 630
- [13] Wilhelm, T.; Ossau, W.: Bierschaumzerfall – Modelle und Realität im Vergleich - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 58, Nr. 8, 2009, S. 19 - 26
- [14] downloadbar unter <http://did-apps.physik.uni-wuerzburg.de> und kostenlos verwendbar

Anschrift des Verfassers:

Dr. habil. *Thomas Wilhelm*, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Physikalisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de, www.thomas-wilhelm.net