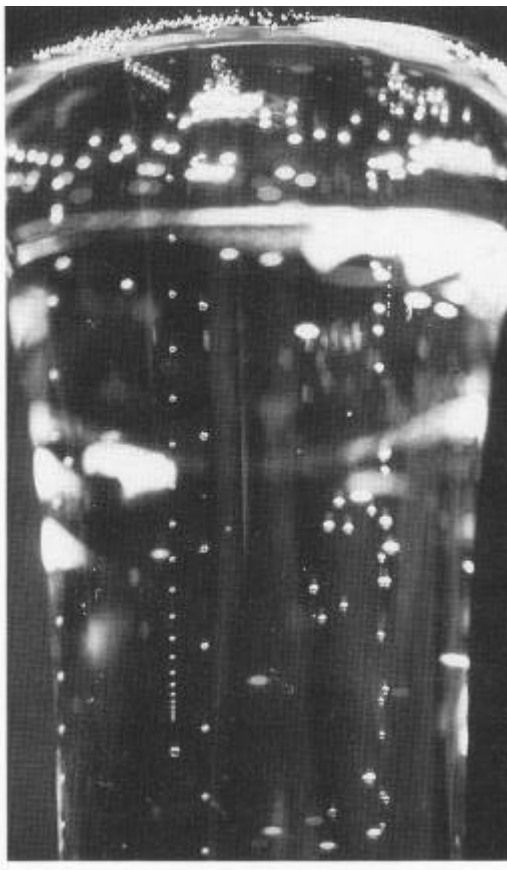


Warum sprudelt der Sekt?

H. Joachim Schlichting, Christian Ucke

In einem Sektglas steigen wie glitzernde Perlen Gasblasen auf. Warum bilden sie sich vornehmlich an bestimmten Stellen, und nach welchen Gesetzen bewegen sie sich an die Oberfläche

Man erlebt es tagtäglich, wenn auch nicht gerade immer beim Sekttrinken, sondern meistens bei Sprudelwasser oder anderen mit Kohlenstoffdioxidgas (CO_2) versetzten Getränken: Nachdem das Trinkglas mit der CO_2 -haltigen Flüssigkeit gefüllt worden ist, steigen wie an Perlensträngen aufgereiht Blasen auf, um auf diese Weise die Flüssigkeit von dem Gas zu befreien.



Einzelne "Perlenketten" mit zunehmendem Abstand zwischen benachbarten Blasen sind gut zu erkennen. Die Perlen sehen aufgrund der konvexen Linsenwirkung des flüssigkeitsgefüllten Glases größer aus als sie sind.

Warum entledigt sich die Flüssigkeit des gelösten Gases, und warum tut sie es in dieser auffälligen Weise? Die erste Frage lässt sich mit dem Hinweis beantworten, dass die

Flüssigkeit offenbar mehr gelöstes Gas enthält, als dem herrschenden äußeren Luftdruck entspricht. Hergestellt wird solche mit gelöstem Gas übersättigte Flüssigkeit, indem man die Getränkeflüssigkeit bei einem Druck von 2 bis 3 Atmosphären mit dem CO_2 -Gas versetzt und anschließend auf Flaschen abzieht. Dabei wird die Tatsache ausgenutzt, dass die Löslichkeit von Gas in Flüssigkeit mit der Stärke des Luftdrucks zunimmt und sich in der verschlossenen Flasche über der Flüssigkeitsoberfläche ein Gleichgewichtsdruck einstellt, bei dem im zeitlichen Mittel genauso viel Gasteilchen die Flüssigkeit verlassen, wie von ihr aufgenommen werden. (Nach dem Henry-Dalton'schen Gesetz ist die Konzentration eines gelösten Stoffes im Zustand der Sättigung sogar proportional zum Druck). Durch Schütteln der verschlossenen Flasche kann man die Entstehung und Abgabe von Gasbläschen in den gasgefüllten Flaschenhals sichtbar machen. Nicht sichtbar bleibt hingegen, dass diese Störung des stationären Gleichgewichts schließlich durch die Lösung einer gleich großen Gasmenge in der Flüssigkeit wieder beseitigt wird. Die Störung des Gleichgewichts wird vermutlich durch die mit dem Schütteln verbundenen Druckschwankungen in der Flüssigkeit bedingt. Wenn die Flasche dann geöffnet und die Flüssigkeit dem Atmosphärendruck ausgesetzt wird, stellt sie sich allmählich auf die neue Gleichgewichtssituation ein, indem sie das überschüssige Gas an die Umgebung abgibt.

Die zweite Frage lenkt den Blick auf den Mechanismus der Blasenentstehung und Blasenabgabe. Wie man leicht erkennen kann, sammelt sich in der Flüssigkeit Gas in kleinen Bläschen, die - nachdem sie eine bestimmte Größe erreicht haben - aufsteigen und die Flüssigkeit verlassen. Bei diesem Vorgang ist zunächst die Tatsache interessant, dass die Bläschenentstehung nicht an beliebigen Stellen in der Flüssigkeit erfolgt, sondern an bestimmten, scheinbar wahllos verteilten Stellen an den Glaswandungen. Dabei handelt es sich in der Regel um mikroskopisch kleine Verletzungen oder Verunreinigungen der Glaswand. Diese Inhomogenitäten in einer ansonsten weitgehend homogenen Umgebung können als Keime für die energetisch relativ aufwendige Bildung der Blasenoberfläche angesehen werden.

Die Bedeutung solcher Keime kann man daran erkennen,

dass unregelmäßig gebrochene Partikel wie z.B. Kochsalz ideale Keime abgeben. Schüttet man etwas Salz in das Sprudelwasser, so kommt es zu einem wahren auch akustisch wahrnehmbaren "Rausch" von Blasen-kaskaden schon während des Absinkens des Salzes in der Flüssigkeit. Blasen sind selbst ideale Keime; sie üben eine selbstverstärkende Wirkung auf die Blasenbildung aus.

Mit der Entstehung einer Gasblase in der Flüssigkeit, greift die Schwerkraft in Form des Auftriebs an der sich bildenden Blase an, um sie zur Flüssigkeitsoberfläche zu treiben. Zu einer Ablösung der Blase kommt es jedoch nicht sofort, sondern erst, wenn die Blase eine kritische Größe erreicht hat, bei der die Auftriebskraft größer wird als die Adhäsionskraft, mit der die Blase zunächst ihrem "Geburtsort" verbunden bleibt. Das geschieht allerdings in sehr kurzer Zeit, weil die Auftriebskraft proportional mit dem Volumen, die Adhäsionskraft aber allenfalls nur proportional mit der Oberfläche, auf jeden Fall aber "langsamer" wächst. Nachdem sich eine Blase gelöst hat und aufsteigt, bildet sich sofort die nächste heran, um sich nach Erreichen der kritischen Größe ebenfalls abzulösen und in einem für die Entstehungszeit charakteristischen Abstand der Vorgängerin zu folgen usw.

Die Größengleichheit der sich ablösenden Blasen und der gleichbleibende Abstand zwischen einer sich gerade ablösenden Blase und ihrer Vorgängerin reflektiert die während der Beobachtungszeit gleichbleibenden Randbedingungen des Vorgangs insbesondere die konstante Diffusionsrate, mit der sich die gelösten Gasteilchen zur Blase begeben. Dieser Sachverhalt läßt sich auch leicht quantitativ abschätzen (Kasten 1).

Der gleichbleibende Takt, mit der sich die Blasen gewissermaßen aus dem Nichts herausstülpen, ein kurzes Leben in einer meist schnurgeraden von der Keimstelle bis zur Flüssigkeitsoberfläche reichenden, durch Lichtbrechung zum Funkeln gebrachten Perlenkette verbringen, um dann an der Flüssigkeitsoberfläche im Konzert mit allen anderen Blasen mit feinem Knistern wieder zu vergehen, verbunden mit der statistischen Verteilung der Keime und der aus ihnen hervorgehenden Ketten, machen einen Großteil des Reizes aus, den ein für derartige Kleinigkeiten sensibler Beobachter empfangen mag.

Ein solcher Beobachter wird auch erkennen, dass die Abstände zwischen je zwei benachbarten Blasen im Verlaufe des Aufstiegs allmählich stetig größer werden. Sollte darin die beschleunigende Wirkung zum Ausdruck kommen, die die Auftriebskraft auf Blasen gegebener Größe ausübt? Aufgrund der Kleinheit der Blasen und der geringen Dichte des in ihnen enthaltenen CO_2 -Gases muß die Flüssigkeit den Blasen wie Sirup vorkommen. In einer solchen Situation wird die mit der Geschwindigkeit wachsende, die Bewegung bremsende innere Reibungskraft bereits bei sehr kleinen Geschwindigkeiten -und das heißt in einer für den Beobachter kaum wahrnehmbaren kurzen Zeitspannen den Wert der Auftriebskraft einer Blase gegebener Größe

erreichen und zu einer gleichförmigen Grenzgeschwindigkeit führen (siehe Kasten 2)..

Zu einer Lösung des Problems kommt man, wenn man durch genaues Hinsehen erkennt, dass nicht nur der Abstand zwischen den Blasen sondern auch die Größe der Blasen mit der Aufstiegshöhe zunimmt.. Sollte es da nicht einen Zusammenhang geben? In der Tat, eine Volumenvergrößerung der Blasen hat eine Vergrößerung des Auftriebs und damit eine Beschleunigung zur Folge. Daran kann auch die Tatsache nichts ändern, dass sich die der Bewegung der Blasen entgegenstellende Reibungskraft die Auftriebskraft fast augenblicklich erreicht. Da die Auftriebskraft wesentlich schneller als die Reibungskraft (nämlich proportional zum Volumen) wächst, ist sie letzterer immer ein Stück voraus. Eine Verdopplung des Blasenradius, ein für das Blasenwachstum in einem normalen Wasserglas typischen Wert, führt immerhin zu einer Verachtfachung des Auftriebs.

Jetzt bleibt nur noch die Frage zu klären, wie es zu diesem Blasenwachstum kommt? Auf den ersten Blick naheliegend erscheint eine auch in der Literatur (siehe z.B. [1]) angegebene Erklärung, wonach der mit der Höhe abnehmende hydrostatische Druck im Sprudelwasser die Blasenvergrößerung bedingt. Auf den zweiten Blick wird jedoch klar, dass der Einfluß des hydrostatischen Drucks auf die Größe der Blase kaum wahrzunehmen ist. Da nämlich bei idealen Gasen, (wovon hier näherungsweise ausgegangen werden soll,) das Produkt aus Volumen und Druck unter sonst gleichen Bedingungen als konstant angesehen werden kann (Gesetz von Boyle-Mariotte), würde eine Verdopplung des Radius, also eine Verachtfachung des Volumens, eine Druckabnahme um das Achtefache nach sich ziehen. Da der Luftdruck dem hydrostatischen Druck einer Wassersäule von etwa 10 Metern entspricht, wäre das bei einer Wassersäule von 8 Metern der Fall. Die Flüssigkeitssäule im Sekt- oder Sprudelglas beträgt aber nur einige Zentimeter.

Ausschlaggebend für das Blasenwachstum während des Aufstiegs ist vielmehr die Tatsache, dass eine Blase auch nach der Ablösung von der Störstelle, also während des Aufstiegs zur Oberfläche keinen Grund hat, nicht auch weiterhin Gas aus der Flüssigkeit aufzunehmen und den Wachstumsprozeß bis zum bitteren Ende fortzusetzen. Die Blasenvergrößerung während des Aufstiegs beruht also auf einer Massenzunahme.

Die Blasen scheiden nicht weniger spektakulär aus ihrem kurzen Leben wie sie es geführt haben: Beim Erreichen der Oberfläche verbleiben sie dort noch eine mehr oder weniger kurze Zeit, in der sie unaufhörlich weiterwachsen, um endlich unter Aussendung feinsten Fontänen kleiner Flüssigkeitströpfchen zu zerplatzen. Dieser Vorgang wird akustisch durch das ein Rauschen untermalt, das durch die zahlreichen Miniexplosionen der Blasen zustandekommt. Gegen Licht betrachtet erkennt man in den Fontänen ein Ensemble von gaußverteilten schlanken

Wurfparabeln, die bei unseren Beobachtungen bis zu 20 cm über dem Wasserglas hinaus reichen.

Wenn die Blasenentwicklung relativ heftig ist, schmelzen mehrere zufällig zusammentreffende oder sich nur nahekommende und anschließend anziehende Bläschen zu einer größeren Blase zusammen. Diese bewegen sich noch während ihrer Entstehung auf den Rand des Glases zu, um dort meist in mehreren Schritten zu zerplatzen. Wenn das Glas allerdings so voll gefüllt ist, dass sich die Flüssigkeit aufgrund der Oberflächenspannung noch etwas über den Rand wölbt, begeben sich die großen Blasen zur Mitte des Flüssigkeitsberges, wo ihnen allerdings auch nichts anderes als ihr Ende beschieden ist. Die Klärung dieses merkwürdigen Verhaltens der Blasen erfolgt in einer späteren Ausgabe dieser Rubrik.

Literatur:

[1] Walker, Jearl: Experiment des Monats. Gedanken eines Physiker beim Anblick eines schäumenden Bierglases. Spektrum der Wissenschaft. Febr. 1982, S. 115

[2] Schafer, Neil E., Zare, Richard N: Through a beer glass darkly. Physics Today Oct. 1991.

Infokasten 2

Aufstiegsgeschwindigkeit der Blasen

Die Blasen steigen aufgrund des Größenwachstums beschleunigt auf. Ein quantitativer Zusammenhang zwischen Blasengröße und Steiggeschwindigkeit ist daher nur schwer zu gewinnen [2]. Für eine gegebene Blasengröße läßt sich die Steiggeschwindigkeit jedoch größenordnungsmäßig leicht abschätzen:

Eine kugelförmige Blase unterliegt der folgenden Auftriebskraft: $F = V(\rho_f - \rho_g)g \gg V\rho_f g$

(V, ρ_f, ρ_g und g bezeichnen das Volumen der Blase, die Dichte der Flüssigkeit, die Dichte des CO_2 -Gases und die Erdbeschleunigung). Es wurde unterstellt, dass die Dichte des Gases im Verhältnis zur Flüssigkeit vernachlässigt werden kann. Die Blase ist i.a. so klein und steigt so langsam, dass sie ihre Kugelgestalt beibehält. Wir gehen davon aus, dass die Auftriebskraft F durch eine Stokesche Reibungskraft

$$F_R = 6\pi\eta r v \tag{1}$$

kompensiert wird. $\eta(20^\circ C) = 10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ist die Viskosität der Flüssigkeit (Wasser), $r \gg 0,1 \text{ mm}$ ist ein typischer Radius der Blasen kurz nach ihrer Ablösung und v die Geschwindigkeit, mit der die Blase aufsteigt). Durch Gleichsetzen von Gl. (1) und (2) und Auflösen nach v erhält man:

$$v = 2g r^2 / 9\eta \gg 2 \text{ cm/s.}$$

Dieser Wert befindet sich größenordnungsmäßig in Übereinstimmung mit der Beobachtung.

Infokasten 1

Wachstum des Blasenradius

Wir gehen davon aus, dass die Rate der an einer Blase abgesetzten Zahl N CO_2 -Moleküle vom Radius r proportional zu dessen Oberfläche $A = 4\pi r^2$ ist:

$$dN/dt = gA.$$

Es wird weiterhin vorausgesetzt, dass CO_2 in Sekt der Zustandsgleichung für ideale Gase $PV = NkT$ gehorcht (wobei P, V, T und k Druck, Volumen, Temperatur und Boltzmann-Konstante bezeichnen). Da P und T während des Beobachtungszeitraums als konstant angenommen werden können, liefert die zeitliche Ableitung der Zustandsgleichung:

$$dN/dt = P/kT \cdot dV/dt = 4\pi P/kT \cdot r^2 \cdot dr/dt.$$

Durch Vergleich mit Gl. (1) erhalten wir die Lösung dieser Gleichung:

$$r = r_0 + ut$$

Dabei ist r_0 der Anfangsradius und $u = gkT/P$ die Geschwindigkeit, mit der der Blasenradius r wächst..