

Mythos Bierschaumzerfall

Ein Analogon für den radioaktiven Zerfall?

Heike Theyßen

Lehrstuhl für Didaktik der Physik, TU Dortmund, Otto-Hahn-Straße 4, 44221 Dortmund
(Eingegangen: 19.03.2009; Angenommen: 03.06.2009)

Kurzfassung

Bierschaumzerfall ist ein im Physikunterricht gerne genutztes Analogon zum radioaktiven Zerfall, unterliegt doch der Einsatz von (alkoholfreiem!) Bier bei weitem nicht so strengen Bestimmungen wie der Einsatz radioaktiver Substanzen. Auch bei Beschaffung, Lagerung und Entsorgung bietet Bier offensichtliche Vorteile. Aber worauf basiert diese Analogie? Und zerfällt Bierschaum tatsächlich nach einem Exponentialgesetz? In der Literatur findet man nur wenige experimentelle Untersuchungen zum Bierschaumzerfall mit teils widersprüchlichen Ergebnissen. Zum Zerfall von Schäumen im Allgemeinen liegen jedoch sowohl detaillierte Modellierungen als auch experimentelle Ergebnisse vor. Im Folgenden werden zunächst die Methoden und Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zum Bierschaumzerfall zusammengefasst. Anschließend werden die dem Schaumzerfall allgemein zugrunde liegenden Mechanismen erläutert und es wird erörtert, wie weit sich daraus Schlüsse für das Bierschaumproblem ziehen lassen.

1. Experimente zum Bierschaumzerfall - ein Überblick zum „Stand der Forschung“

Der Bierschaumzerfall wird im Physikunterricht oder auch in Physikvorlesungen gerne als Analogon zum radioaktiven Zerfall herangezogen¹. Es gibt auch mehrere Untersuchungen mit mehr oder weniger wissenschaftlichem Anspruch zu diesem Thema. Hier sollen zunächst drei davon vorgestellt werden.

1.1. Das Experiment von Leike

2002 erhielt der Münchener Physiker Arnd Leike für seine Veröffentlichung zum Bierschaumzerfall [1] den IG-Nobelpreis für Physik, eine satirische Auszeichnung der Harvard-Universität [2]. Leike beschreibt in seinem Artikel die Durchführung und Auswertung von Zerfallsmessungen bei drei verschiedenen Weißbiersorten. Erzeugt wurde der Schaum durch Einschütten, gemessen wurde die Höhe der Schaumkrone als Maß für die „Schaummenge“. Die Reproduktion der Versuche zeigt

schnell, wie problematisch die Ablesung dieser Größe speziell am oberen Ende ist.

Leike setzt voraus, dass sich die Höhenabnahme der Schaumkrone durch Fitkurven der Funktion

$$h(t) = h_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \{1\}$$

beschreiben lässt, wobei h_0 die Höhe zu Beginn der Messung und τ eine für die Biersorte charakteristische Zeitkonstante ist. Die „optimale“ Zeitkonstante wird durch Minimierung der Fehlerfunktion χ^2 ermittelt. Abb. 1 zeigt die von Leike veröffentlichten Messwerte mit Fehlerbalken und den berechneten optimalen Fitkurven. Die Fehlerbalken für Erdinger sind kleiner, weil damit mehr Messungen durchgeführt wurden (der Autor erklärt dies mit persönlichen geschmacklichen Vorlieben).

Man erkennt, dass die Höhe wie bei einer Exponentialfunktion zunächst schnell, dann immer langsamer abnimmt. Die Passung der berechneten Ausgleichskurven lässt jedoch in vielen Bereichen zu wünschen übrig. Leike nimmt als einzige Alternative einen linearen Abfall an und erzielt schlechtere Ergebnisse. Alternative nichtlineare Funktionen werden jedoch nicht getestet. Nimmt man die in der Veröffentlichung angegebenen Messwerte und passt daran beispielsweise eine Funktion der Form

$$h(t) = \frac{h_0}{t - t_0} \quad \{2\}$$

an, so erhält man eine mindestens ebenso gute Passung wie Leike (Abb. 2).

¹ Eine wichtige Bemerkung vorab: Die grundsätzliche Problematik des Genusses oder gar der Verharmlosung alkoholischer Getränke in der Schule muss bei der unterrichtlichen Umsetzung aller folgenden Inhalte bedacht werden. Dies ist jedoch nicht Thema dieses Artikels. Hier werden nur Experimente vorgeschlagen, bei denen das Bier nicht zu trinken, sondern allenfalls in extrem geringen Mengen zu verkosten ist. Es sei auch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass alle Beobachtungen und Experimente mit alkoholfreiem Bier, vielfach sogar mit Seifenschaum nachvollzogen werden können. Ein bewusster, reflektierter, wissenschaftlich distanzierter Umgang mit dem Thema „Bierschaum“ sollte in diesem Rahmen bei geeigneter Anleitung möglich sein.

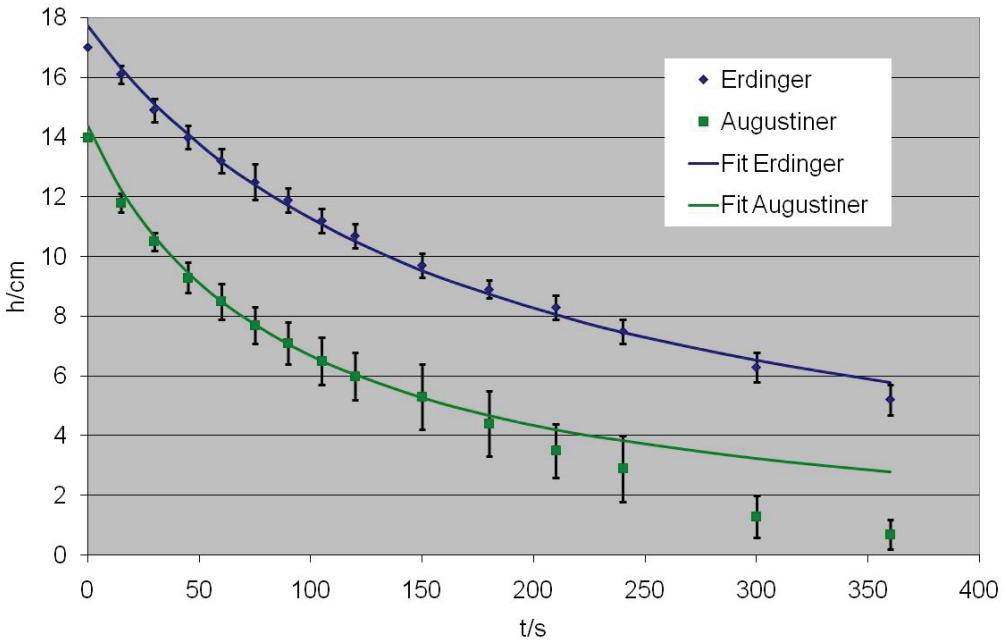


Abb. 1: Graphische Darstellung der Messwerte von A. Leike für zwei Biersorten, Daten aus [1], exponentielle Fitkurven

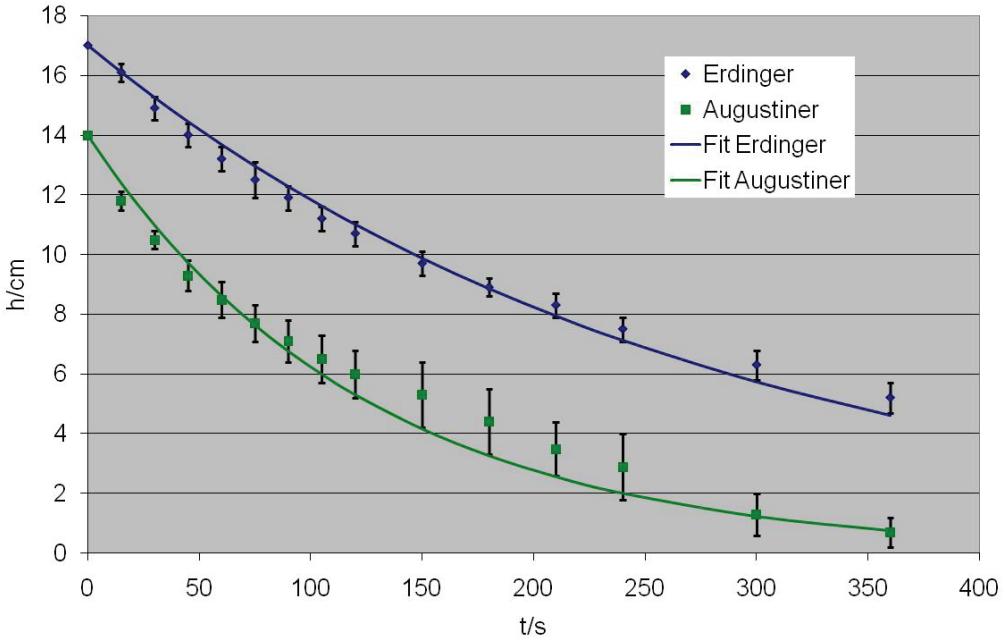


Abb. 2: Die Daten von A. Leike (aus [1]) mit einer hyperbolischen Ausgleichskurve der Form $h(t) = h_0 / (t - t_0)$

1.2. Die Experimente von Dale et al.

Bereits einige Jahre vor Leike hat sich eine Gruppe britischer und mexikanischer Wissenschaftler mit dem Zerfall von Bierschaum beschäftigt [3].

Hier wurde nicht Weißbier, sondern Ale und Lager untersucht. Der Schaum wurde erzeugt, indem die Experimentatoren abgestandenes (ausgegastes) Bier bei kontrollierter Flussrate von Gas durchströmen ließen. Diese zugegebener etwas künstliche Methode führt zu gut reproduzierbaren Ergebnissen. Unmittelbar nach der Schaumerzeugung wurde die Rest-

flüssigkeit unter dem Schaum entfernt. Gemessen wurden anschließend die Masse der pro Zeit aus dem Schaum abfließenden Flüssigkeit, die elektrische Leitfähigkeit des Schaums (beides Maße für den Flüssigkeitsanteil) und die molekulare Zusammensetzung der abfließenden Flüssigkeit. Aus der Masse der abgeflossenen Flüssigkeit wurde auf die verbliebene Schaummasse zurückgerechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 3 logarithmisch aufgetragen.

Bei einem exponentiellen Zerfall müsste sich eine fallende Gerade ergeben. Man erkennt jedoch zwei

Geraden unterschiedlicher Steigung, was zwei Phasen exponentiellen Abklingens mit unterschiedlichen Zerfallskonstanten entspricht. Die beiden Phasen zeigen sich auch in den Leitfähigkeitsmessungen. Letztere weisen sogar auf eine dritte Phase hin, bei der jedoch nur noch eine vernachlässigbar dünne Restschicht an Schaum vorliegt, die austrocknet. Dale et al. erklären die ersten beiden Phasen mit einem Wechsel des grundlegenden Zerfallsmechanismus beim Übergang von der ersten zur zweiten Phase. Während zunächst die Drainage, d. h. das Ablaufen von Flüssigkeit aus dem Schaum (vgl. 2.3.2) dominiert, ist die zweite Phase durch eine Anreicherung von Polypeptiden, d. h. eine Änderung der molekularen Zusammensetzung des Schaummaterials, charakterisiert.

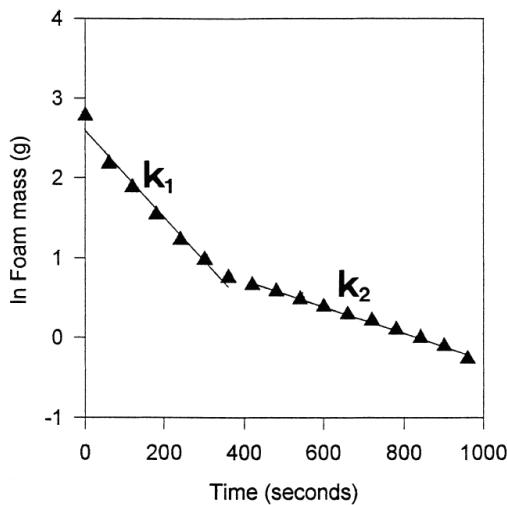


Abb.3: Ergebnisse der Zerfallsmessungen von Dale et al. (aus [3]). Aufgetragen ist der Logarithmus der Flüssigkeitsmasse im Schaum über der Zeit.²

1.3. Die Experimente von Plath und Sauerbrei

Plath und Sauerbrei haben die widersprüchlichen Ergebnisse zum Anlass genommen für eine weitere Untersuchung mit Bremer Biersorten [4].

Hier wurde der zu untersuchende Schaum durch Ultraschallaufschäumung frischen Bieres erzeugt. Man schenkt aus einer frisch geöffneten Flasche einige Milliliter Bier sehr vorsichtig schaumfrei in einen Messzylinder und stellt diesen in ein herkömmliches Ultraschallbad. Das Bier sollte zum größeren Teil unterhalb der Wasseroberfläche des Bades sein. Mit Einschalten des Ultraschalls bildet das im Bier gelöste CO₂ Gasblasen und das Bier schäumt sehr schnell auf. Ausgehend von 20 ml Bier erhält man in einem 100 ml Messzylinder ca. 40 ml Bierschaum und einen Rest von ca. 4 ml ungeschäumten Bieres [4]. Dies kann im Experiment leicht überprüft werden. Auch die von den Autoren angegebene Abhängigkeit vom verwendeten Gefäß

² Offensichtlich nehmen die Autoren es hier mit den Einheiten nicht so genau. Wie es scheint, wurde der Logarithmus aus der Maßzahl der Masse in Gramm errechnet.

lässt sich hierbei bestätigen. Mit diesen Verfahren erhält man einen sehr feinporigen Schaum, der dem Schaum nach dem Einschenken sehr ähnlich, aber besser reproduzierbar herstellbar ist. Plath und Sauerbrei lesen nach dem Aufschäumen das Volumen der Flüssigkeit unter dem Bierschaum an der Skala des Messzylinders ab und schließen daraus (und aus dem eingeschenkten Volumen) auf das Flüssigkeitsvolumen im Schaum. Letzteres interpretieren sie als Maß für die „Schaummenge“.

Sie erhalten Messkurven, die sich in ihrem gesamten Verlauf optimal durch ein Produkt aus zwei Exponentialfunktionen approximieren lassen:

$$V(t) = V_0 \cdot e^{(-a \cdot t)} \cdot e^{(-b \cdot t^{2.5})} \quad \{3\}$$

(vgl. Abb. 4) und wie bei Dale et al. auf zwei Phasen im Zerfall hinweisen. Eine separate Analyse der Messwerte der ersten Phase (bis ca. 150 s) liefert als optimale Ausgleichskurve tatsächlich eine einfache exponentielle Abnahme (V_1 in Abb. 4), während die zweite Phase durch den komplizierteren Zusammenhang

$$V_2 \sim e^{-k \cdot t^{2.5}} \quad \{4\}$$

beschrieben wird (V_2 in Abb. 4).

Die erste Phase erklären die Autoren wie Dale et al. mit Drainage, in der zweiten Phase beobachten sie als dominierenden Prozess eine Umordnung der Schaumstruktur, die sie als „apollonische Umordnung“ bezeichnen (Details siehe z.B. [4]).

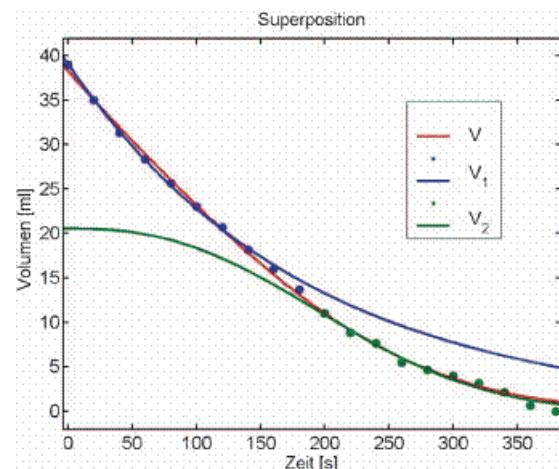


Abb. 4: Ergebnisse von Plath und Sauerbrei aus [4]. Die rote Kurve ist die Ausgleichskurve für den gesamten Zerfall, die blaue Kurve beschreibt die erste, die grüne die zweite Phase.

1.4. Fazit der Experimente

Vergleicht man die dargestellten Experimente, so stellt man fest, dass in allen drei Studien unterschiedliche Ergebnisse für den zeitlichen Verlauf des Zerfallsprozesses gewonnen wurden. Das wird allenfalls zum Teil daran liegen, dass unterschiedliche Biersorten untersucht wurden.

In allen Studien wurde jedoch auch jeweils eine andere Messgröße als Maß für die „Schaummenge“

herangezogen. Dale et al. sowie Plath und Sauerbrei wählen Messgrößen, die sehr genau erfassbar sind, wie z.B. die Höhe der unteren Schaumgrenze im Messzylinder. Die Höhe der Schaumsäule bei den Messungen von Leike ist hingegen sehr viel weniger präzise zu bestimmen. Dies wird teilweise durch Mehrfachmessungen kompensiert.

Weiterhin lassen die Messungen von Dale et al. sowie Plath und Sauerbrei Rückschlüsse auf den Flüssigkeitsanteil im Schaum zu, während Leike indirekt das Schaumvolumen erfasst. Gleiche Ergebnisse wären hier nur zu erwarten, wenn der Flüssigkeitsanteil im gesamten Schaum räumlich und zeitlich konstant wäre. Bereits einfachste Beobachtungen an einem Bierglas zeigen jedoch, dass dem nicht so ist. Und wie die Theorie zeigt, ist die Beziehung zwischen Flüssigkeitsanteil und Schaumvolumen keineswegs trivial zu modellieren.

2. Qualitative Beschreibung von Schäumen und Schaumzerfall

Zum besseren Verständnis der Zerfallsmechanismen sollen nun vorab einige Begriffe zur Beschreibung von Schäumen eingeführt und die Prinzipien der Schaumentstehung erläutert werden. Da beides nicht zentrales Thema dieses Artikels ist, sind die Darstellungen bewusst knapp gehalten - sicherlich knapper als es dem interessanten Thema gerecht würde.

2.1. Einige Fachbegriffe

Schaum ist eine Dispersion von Gas in einer Flüssigkeit. Eine wichtige charakteristische Größe ist der *Flüssigkeitsanteil* Φ , d. h. das Verhältnis des Volumens der im Schaum enthaltenen Flüssigkeit zum Volumen des gesamten Schaums. Bei trockenen Schäumen liegt der Flüssigkeitsanteil nicht über 1 %. Es ist klar, dass der Flüssigkeitsanteil in einem zerfallenden Schaum räumlich und zeitlich nicht konstant ist. Deshalb ist Φ eine Funktion von Zeit und Ort.³

In nassen Schäumen mit hohem Flüssigkeitsanteil haben die Schaumblasen annähernd Kugelform. Man spricht von einem *Kugelschaum*. Ein Kugelschaum liegt z.B. in einem frisch eingeschenkten Bier am unteren Ende der Schaumsäule vor. Man kann beobachten, wie kugelförmige Gasblasen in der Flüssigkeit aufsteigen und sich von unten an den Schaum anlagern (Abb. 5).

Je trockener der Schaum wird, desto deutlicher nehmen die Schaumblasen die Form von Polyedern (Abb. 6) an. Trockene Schäume werden daher auch

als *Polyederschäume* bezeichnet, die Grenzflächen der Polyeder als *Filme* oder *Lamellen*. Man kann zeigen (und beobachten), dass immer genau drei Lamellen in einer so genannten *Plateaugrenze* unter jeweils 120 ° aneinander stoßen (Abb. 6)⁴. In den Plateaugrenzen ist der überwiegende Teil der Flüssigkeit enthalten. Je vier Plateaugrenzen treffen sich in so genannten *Knoten* und bilden ein verzweigtes Netzwerk.

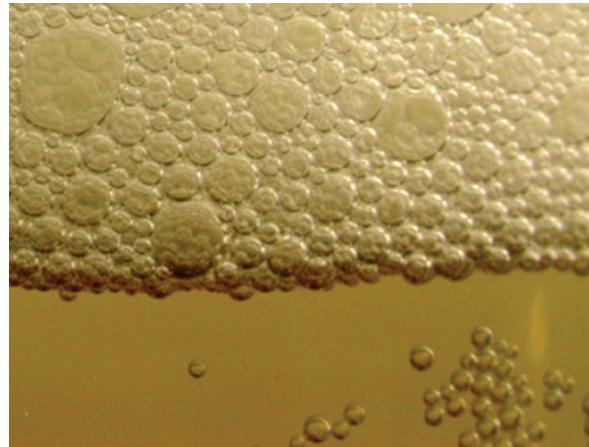


Abb. 5: Kugelschaum im Bierglas

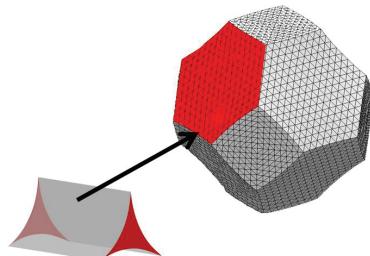


Abb. 6: Polyeder (eine Lamelle rot hervorgehoben) mit vergrößert dargestellter Plateau-Grenze

2.2. Wie entsteht Schaum?

Schaumentstehung bedeutet eine Vergrößerung der Flüssigkeitsoberfläche und erfordert deshalb Energiezufuhr. Die Oberflächenspannung γ einer Flüssigkeit gibt an, welche Energie pro Oberflächenvergrößerung aufgebracht werden muss. Je niedriger die Oberflächenspannung ist, desto weniger Energie ist zur Schaumerzeugung notwendig. Dies ist jedoch nicht der ausschlaggebende Faktor, der eine Flüssigkeit zu einem guten Schaumbildner macht. Auch Flüssigkeiten mit hoher Oberflächenspannung, wie Wasser und selbst Quecksilber [5], lassen sich aufschäumen. Allerdings bleibt hier der Schaum nicht lange erhalten.

Wesentlich für die Schaumstabilisierung bei Flüssigkeiten auf Wasserbasis sind so genannte amphiphile Moleküle, d. h. Moleküle mit einem hydrophilen (wasserliebenden) und einem hydrophoben (wasserfeindlichen) Ende. Hierzu gehören z.B. Tenside

³ Anschaulich ist die Definition des Flüssigkeitsanteils klar, formal ist sie etwas komplizierter. Für einen Ort x erhält man den Flüssigkeitsanteil $\Phi(x)$, indem man über ein kleines Volumen um x herum mittelt. Sonst würde man immer entweder 0 erhalten (in einer Schaumblase) oder 1 (sonst). Das Volumen, über das gemittelt wird, sollte so klein sein, dass Φ darin als konstant angenommen werden kann, aber deutlich größer als eine einzelne Schaumblase.

⁴ Dies ist eine der Plateauschen Regeln, die die Schaumgeometrie beschreiben, ebenfalls nicht Gegenstand dieses Artikels, aber z.B. in [8] nachzulesen sind.

(Seifenschaum) und Proteine (Milchschaum, Bierschaum). Die amphiphilen Moleküle ordnen sich an der Oberfläche einer (wasserhaltigen) Flüssigkeit so an, dass der hydrophile Teil in die Flüssigkeit und der hydrophobe Teil nach außen weist. Len Fisher beschreibt das sehr anschaulich durch den Vergleich mit gründelnden Enten [6]. In einer Seifenblase oder Schaumlamelle ordnen die Moleküle sich in einer Doppelschicht an (vgl. Abb. 7) und stabilisieren die Blase bzw. Lamelle.

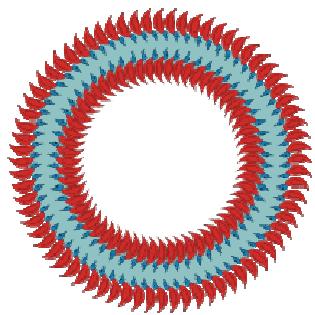


Abb. 7: Anordnung amphiphiler Moleküle (dargestellt durch Enten) in einer kugelförmigen Schaumblase

2.3. Zerfallsmechanismen

Grundsätzlich werden drei Zerfallsmechanismen unterschieden: Verdunstung, Drainage und Vergrößerung.

2.3.1. Verdunstung

Verdunstung aus den oberen Lamellen führt zunächst zu einer Reduktion des Flüssigkeitsanteils und später durch Zerplatzen auch zur Reduktion des Schaumvolumens. Will man den Schaumzerfall auf größeren Zeitskalen untersuchen, sollte man daher schmale Gefäße mit kleiner Verdunstungsfläche nehmen (wie Plath und Sauerbrei) oder den Schaum abdecken (wie Dale et al.). Ein einfaches Experiment, das u. a. den Einfluss der Verdunstung anschaulich macht, ist in Kasten 1 beschrieben.

Man nimmt zwei identische, verschließbare Gläser, z.B. Marmeladengläser, und füllt beide mit der gleichen Menge ca. 1:1 verdünnten Spülmittels (etwa 10 % des Glasvolumens reichen). Man verschließt die Gläser und erzeugt durch Schütteln möglichst vergleichbare Schäume in beiden Gläsern. Dann öffnet man das eine Glas und lässt das zweite verschlossen. Bereits nach ca. einer Stunde erkennt man einen deutlichen Unterschied in der Schaumstruktur (siehe auch „Vergrößerung“) und nach zwei Stunden auch im Schaumvolumen. Im Verlauf der folgenden Stunden wird dieser Unterschied immer ausgeprägter. Die Abb. 8 (nächste Seite) zeigt den Schaum im verschlossenen und offenen Glas zu verschiedenen Zeitpunkten im Vergleich.

Kasten 1: Ein einfaches Experiment zum Schaumzerfall

2.3.2. Drainage

Ein weiterer Effekt, der wie die Verdunstung auf eher kurzen Zeitskalen abläuft, ist die Drainage, das

Ablaufen von Flüssigkeit aus dem Schaum unter dem Einfluss der Gravitation. Durch die Drainage sinkt in den oberen Bereichen der Flüssigkeitsanteil schneller als in den unteren Schaumschichten. Es entsteht eine inhomogene Flüssigkeitsverteilung. Auch in dem in Kasten 1 beschriebenen Experiment kann man die Auswirkungen der Drainage gut beobachten (Abb. 8). Der Flüssigkeitsspiegel unter dem Schaum steigt zu Beginn schnell an und innerhalb des Schaums erkennt man, wie in Abb. 9, eine Verlagerung des Flüssigkeitsanteils nach unten. Das beste Mittel, die Drainage zu verhindern, ist, in die Schwerelosigkeit auszuweichen. Abb. 8 zeigt zwei Schäume, von denen einer auf der Erde, einer in der ISS aufgenommen wurde. Es ist unschwer zu erkennen, welcher unter Einfluss der Schwerkraft steht.



Abb. 9: Schaum mit (links) und ohne Schwerkraft (rechts) – eine Aufgabe aus dem ESA Education Kit [7]

Kann man die Schwerkraft nicht ausschalten, so kann man die Drainage zumindest minimieren, indem man die Zähigkeit der Flüssigkeit erhöht, z.B. durch Kühlung.

Durch Drainage ändert sich auch die Zusammensetzung des Schaums und der darunter liegenden Flüssigkeit. Die die Schaumlamellen stabilisierenden amphiphilen Moleküle, beim Bier darunter auch Bitterstoffe, bleiben bevorzugt in den Lamellen zurück. Die innerhalb der Doppelschicht abfließende Flüssigkeit enthält also einen geringeren Anteil dieser Moleküle. Das ist der Grund, warum Bierschaum bitterer schmeckt als die Flüssigkeit darunter, eine Beobachtung, die sich in einem einfachen Selbstversuch überprüfen lässt (vgl. Kasten 2). Aufwändige Analysen der molekularen Zusammensetzung der abfließenden Flüssigkeit (z.B. von Dale et al. [3]) bestätigen diese Beobachtung.

Man benötigt zwei Biergläser, eine Flasche alkoholfreies Bier und einen Schaumlöffel. Etwas Bier wird in einem Glas frisch und mit möglichst viel Schaum eingeschenkt. Man wartet ein wenig, bis durch Drainage ein großer Teil der Flüssigkeit aus den Lamellen abgelaufen ist, d. h. der Schaum „sich gesetzt hat“. Dann schöpft man den oberen Teil des Schaums ab und gibt ihn in das zweite Glas. Man sollte warten, bis er zerfallen ist, damit die unterschiedliche Konsistenz nicht den Geschmackseindruck verfälscht. Schließlich verkostet man die Flüssigkeiten in beiden Gläsern.

Kasten 2: Ein Selbstversuch zum Bierschaum

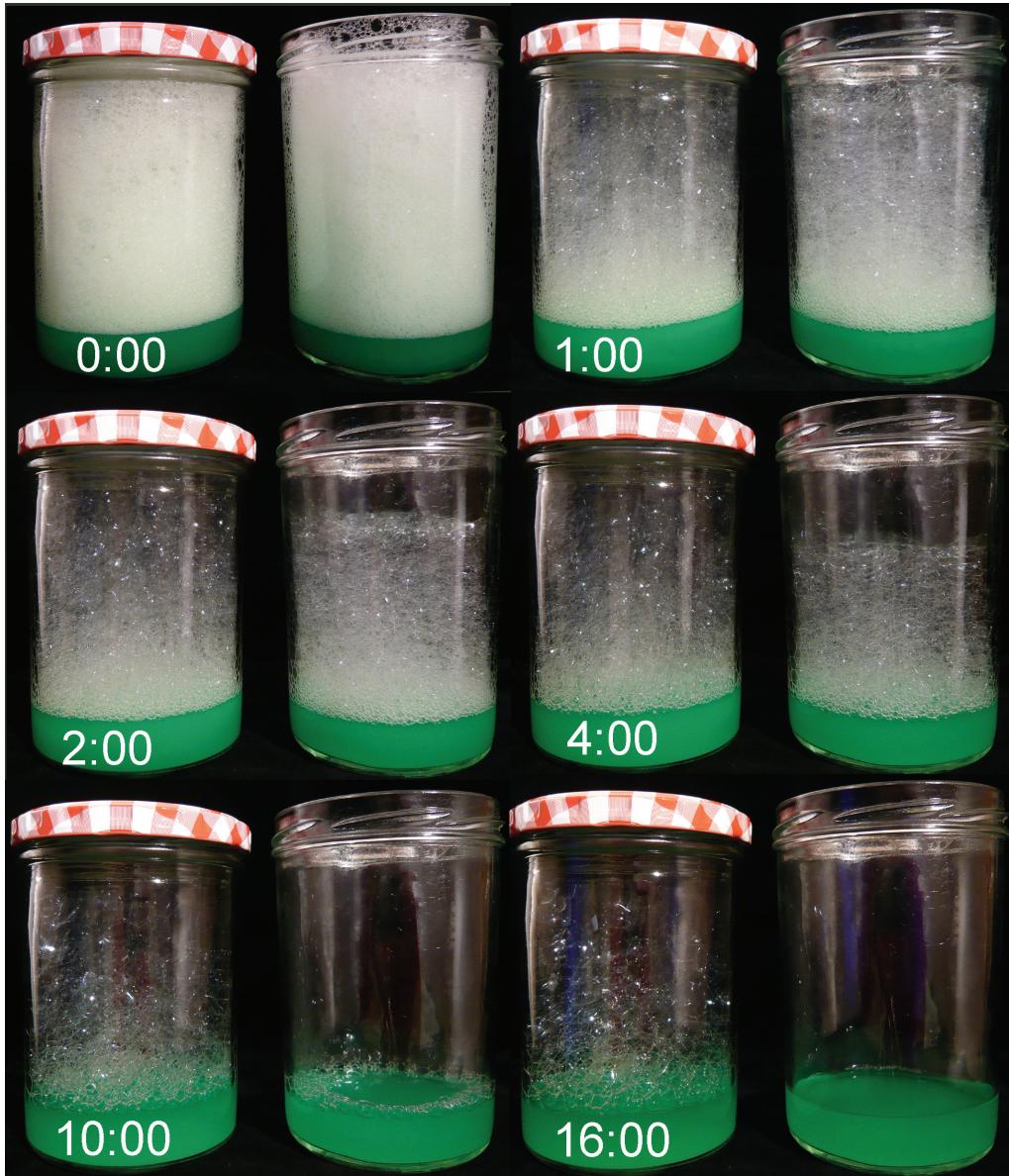


Abb. 8: Spülmittelschaum in einem verschlossenen und einem offenen Glas unmittelbar nach dem Schütteln und nach 1, 2, 4, 10 bzw. 16 Stunden. Nach 10 Stunden ist im offenen Glas der Schaum so gut wie zerfallen, während das verschlossene Glas auch nach 16 Stunden oberhalb der Flüssigkeit noch praktisch vollständig mit (trockenem) Schaum gefüllt ist.

2.3.3. Vergrößerung

Der dritte Mechanismus, der zum Schaumzerfall beiträgt, ist die Vergrößerung, d. h. die Zunahme der mittleren Blasengröße. Dies kann durch das Reißen von Lamellen zwischen Schaumblasen geschehen. Die Flüssigkeit aus der gerissenen Lamelle fließt nach unten ab und der Flüssigkeitsanteil des Schaums reduziert sich.

Offensichtlich besteht zwischen Drainage und Vergrößerung durch Riss der Lamellen eine enge Wechselwirkung:

- Durch Drainage wird die Dicke der Lamellen reduziert, so dass ein Riss wahrscheinlicher wird.
- Die aus den Lamellen freigesetzte Flüssigkeit wird durch Drainage nach unten abgeführt.

Der zweite Mechanismus, der zur Vergrößerung beiträgt, ist die Diffusion von Gas zwischen den Schaumblasen. Gemäß des Gesetzes von Laplace (Details siehe z.B. [8]) ist der Gasdruck in einer Schaumblase umgekehrt proportional zum Krümmungsradius der Lamellen. Je kleiner also eine Schaumblase ist, desto größer ist der Druck darin. Grenzen zwei Schaumblasen mit auch nur leicht unterschiedlicher Größe aneinander, so diffundiert Gas in Richtung des Druckgefälles von der kleineren in die größere Blase. Die kleinere Blase schrumpft, das Druckgefälle nimmt zu und der Prozess verstärkt sich selbst. Schließlich verschwindet die kleinere Blase vollständig zugunsten der größeren. Die mittlere Blasengröße im Schaum nimmt zu. Dieser Prozess läuft auf deutlich größeren Zeitskalen ab als Drainage und Verdunstung, ist aber in dem in Kas-

ten 1 beschriebenen Experiment (Abb. 8) sehr gut zu beobachten. Schneller läuft der Prozess ab, wenn die Blasen direkt mit einander verbunden sind. In Kasten 3 ist ein entsprechendes Experiment beschrieben, das man mit einfachen Mitteln selbst nachbauen kann.

Man benötigt einen Dreiwegehahn, drei Stücke Schlauch, Seifenlauge und eine ruhige Hand. Die Seifenlauge ergibt stabilere Blasen, wenn man etwas Glycerin untermischt. Die drei Schlauchstücke werden auf den Dreiwegehahn aufgesetzt, so dass zwei Enden möglichst senkrecht nach unten zeigen. Der Hahn steht zunächst so, dass alle drei Schlauchstücke verbunden sind. Abb. 10 zeigt den Aufbau. Dann hält man die beiden nach unten zeigenden Schlauchenden kurz in die Seifenlauge und bläst durch das dritte Ende vorsichtig zwei Seifenblasen auf. Danach hält man das Ende, über das man aufgeblasen hat, zu oder dreht den Hahn um 180° , so dass nur noch zwischen den Seifenblasen Gasaustausch möglich ist. Eine der beiden Seifenblasen wird beim Aufblasen praktisch immer etwas größer ausfallen als die andere. Nach kurzer Wartezeit sollte also der Gasaustausch mit zunehmender Geschwindigkeit zu beobachten sein.

Kasten 3: „Diffusion“ zwischen Seifenblasen



Abb. 10: Versuchsanordnung zu Kasten 3

Die „Geschwindigkeit“ der Diffusion zwischen Schaumblasen, die nicht durch Schläuche verbunden sind, hängt maßgeblich von der Löslichkeit des Gases in der Flüssigkeit ab. Kohlendioxid kennt man z.B. vom Mineralwasser als ein in Flüssigkeiten sehr gut lösliches Gas. Stickstoff hingegen ist sehr viel schlechter löslich. Das Gas im Bierschaum ist bei der Gärung entstandenes, zuvor in der Flüssigkeit gelöstes CO₂. Das verringert die Haltbarkeit von Bierschaum gegenüber Schäumen, die mit reinem Stickstoff oder Luft aufgeschäumt sind. Ein direkter Vergleich ist möglich, wenn man zwei Proben gut abgestandenen, „entgasten“ Bieres mit CO₂ bzw. Pressluft aufschäumt. Abb. 11 zeigt oben die Gläser nach dem Aufschäumen und darunter nach einigen Minuten Wartezeit. Das Bier im linken Glas war mit Stickstoff aufgeschäumt. Die Beobachtung erklärt, warum jenseits des Reinheitsgebotes bei einigen Bieren zusätzlich Stickstoff zur Schaumbildung hinzugefügt wird.

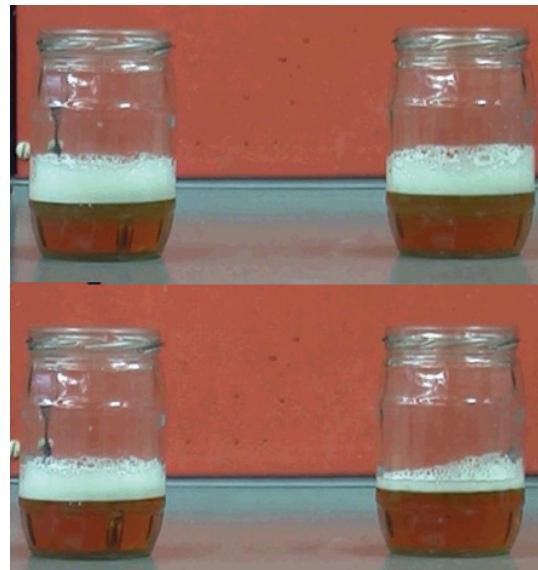


Abb. 11: Mit Pressluft (links) bzw. CO₂ (rechts) aufgeschäumtes Bier nach dem Aufschäumen (oben) und nach ca. fünf Minuten (unten).

2.4. Folgerungen für die Interpretation der Experimente

Die drei beschriebenen Zerfallsmechanismen laufen parallel ab und beeinflussen sich gegenseitig. Die Verdunstung ist dabei stark von der Geometrie des Gefäßes abhängig und in den betrachteten Experimenten sicherlich von untergeordnetem Einfluss. Bei Dale et al. wird sie durch eine Abdeckung ausgeschlossen. Bei Plath und Sauerbrei ist sie aufgrund des engen Messzyinders auf eine sehr kleine Oberfläche beschränkt.

Unter den verbleibenden Zerfallsmechanismen dominiert zunächst die Drainage den Prozess. Vergrößerung hingegen wird auf deutlich größeren Zeitskalen wirksam, weil dann die dünnen Lamellen schnelleren Gasaustausch ermöglichen und Risse wahrscheinlicher werden.

Dies stützt die Ergebnisse sowohl von Plath und Sauerbrei als auch von Dale et al., die zwei Phasen des Schaumzerfalls identifizieren konnten. Beide Gruppen kommen zu dem Schluss, dass die erste Phase durch Drainage charakterisiert ist, die zweite Phase eher durch Umstrukturierungen im Schaum [4] bzw. Änderungen der Zusammensetzung [3].

Beide Gruppen finden aber auch, wie Leike, für die erste, durch Drainage dominierte Phase eine exponentielle Abnahme. Ob sich das auch theoretisch begründen lässt, ist Gegenstand des folgenden Abschnitts.

3. Theoretische Modellierung des Schaumzerfalls

Die drei Zerfallsmechanismen sind bisher nur qualitativ beschrieben worden. Es gibt jedoch auch theoretische Ansätze zur Modellierung des Flüssigkeitsanteils Φ in einem Schaum als Funktion von Ort und Zeit. Diese Ansätze beschränken sich jedoch überwiegend auf trockene Schäume und den Prozess der

Drainage und sind damit nur eingeschränkt auf den Bierschaumzerfall anwendbar.

Verdunstung wird bei der Modellierung in der Regel ganz vernachlässigt, weil sie experimentell leicht unterdrückt werden kann. Der Einfluss der Vergrößerung durch Diffusion wird in aufwändigeren Modellen mit berücksichtigt, führt jedoch zu sehr komplexen und analytisch nicht mehr lösbar Differentialgleichungssystemen. Das Gleiche gilt für die Modellierung nasser Schäume.

Im Folgenden wird lediglich der vergleichsweise einfache Fall der reinen Drainage eines trockenen Schaums betrachtet, weil daran der grundsätzliche Modellierungsansatz und die Komplexität des Problems bereits deutlich werden.

3.1. Die Drainagegleichung

Die theoretische Modellierung der Drainage für trockene Schäume basiert auf

- der Kontinuitätsgleichung für strömende Flüssigkeiten,
- dem Zusammenhang zwischen Gasdruck und Krümmungsradius einer Schaumblase (Gesetz von Laplace) sowie
- einer Kräftebilanz, die Gravitation, Reibung und Kräfte durch den Druckgradienten innerhalb der Flüssigkeit berücksichtigt.

Die Summe der drei Kräfte muss im stationären Fall (keine Beschleunigung der Flüssigkeit) Null ergeben.

Zur Vereinfachung wird angenommen, dass

- der Flüssigkeitsstrom in den Lamellen gegenüber dem in den Plateaugrenzen vernachlässigbar ist ($\Phi < 10\%$, trockener Schaum),
- in den Plateaugrenzen eine laminare Strömung mit ruhender Grenzschicht vorliegt,
- Φ nur in senkrechter z -Richtung variiert und
- in allen Schaumblasen der gleiche Druck herrscht (was nach dem Gesetz von Laplace der Annahme gleich großer Blasen entspricht, siehe 2.3.).

Unter diesen Voraussetzungen lässt sich die so genannte Drainagegleichung ableiten (nach [9]):

$$\eta \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \rho \cdot g \cdot \frac{\partial}{\partial z} (k \cdot \Phi) - \gamma \cdot C \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{L} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = 0 \quad \{5\}$$

Darin sind η die Viskosität, γ die Oberflächenspannung und ρ die Dichte der Flüssigkeit. k , C und L sind geometrische Kenngrößen des Schaums, von denen k und L in der Regel noch von z abhängen. L entspricht anschaulich etwa der durchschnittlichen Länge einer Polyederkante im Schaum. g ist der Ortsfaktor und schließlich $\Phi(t, z)$ der zu modellierende Flüssigkeitsanteil. Bereits für den stark vereinfachten Fall erhält man also eine analytisch nicht mehr lösbare, nichtlineare Differentialgleichung. In der Struktur erkennt man noch die Kräftebilanz als Ausgangspunkt. Der erste Term resultiert aus der

Reibung, der zweite aus der Gravitation und der dritte aus dem Druckgradienten.

Berücksichtigt man zusätzlich die Diffusion zwischen den Schaumblasen, kommt eine weitere, mit der Drainagegleichung {5} gekoppelte Differentialgleichung hinzu.

Um numerische Lösungen für $\Phi(t, z)$ experimentell überprüfen zu können, muss man den Flüssigkeitsanteil sowohl zeit- als auch ortsaufgelöst messen, was mit entsprechend aufwändigen, z.B. tomographischen Verfahren (vgl. z.B. [8]) auch möglich ist. Integriert man die numerische Lösung für $\Phi(t, z)$ über das Volumen, so erhält man den gesamten Flüssigkeitsgehalt des Schaums in Abhängigkeit von der Zeit. Erst dieser ließe sich mit Messungen wie denen von Dale et al. oder Plath und Sauerbrei vergleichen, wobei jedoch die eingeschränkte Gültigkeit der Näherungen zu Abweichungen führen dürfte.

3.2. Eine grobe Näherung

Will man die Drainagegleichung in eine analytisch lösbar Form überführen, so muss man weitere, stark vereinfachende Näherungen hinzu nehmen (vgl. [10]). Man muss zunächst annehmen, dass die aus dem Druckgradienten resultierende Kraft gegenüber den anderen beiden Kräften vernachlässigbar ist. Das entspricht der Annahme einer gleichmäßigen (linearen) Druckänderung in z -Richtung (vgl. [10]). Damit entfällt der dritte Term in {5} und man erhält eine linearisierte Form der Drainagegleichung. Um diese lösen zu können, nimmt man weiterhin an, dass L , d. h. die durchschnittliche Länge der Polyederkanten, konstant ist, und dass die Reibungsverluste in den Plateaugrenzen dominant sind gegenüber den Reibungsverlusten in den Knoten.

Mit diesen zusätzlichen Annahmen erhält man eine vereinfachte Gleichung der Form

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + B \cdot \frac{\partial}{\partial z} (\Phi^2) = 0 \quad \{6\}$$

mit einer Konstanten B , die von den Flüssigkeitseigenschaften ρ und η , der Schaumgeometrie L , sowie dem Ortsfaktor g abhängt.

Die analytische Lösung dieser Gleichung lautet

$$\Phi(z, t) = \frac{1}{2B} \cdot \frac{z - z_0}{t - t_0} \quad \{7\}$$

mit Konstanten z_0 und t_0 , die sich aus den Randbedingungen am oberen und unteren Ende der Schaumsäule ergeben.

Integriert über das Schaumvolumen erhält man schließlich für das gesamte Flüssigkeitsvolumen im Schaum V_s :

$$V_s(t) \sim \frac{1}{t - t_0} \quad \{8\}$$

Dabei ist noch einmal einschränkend anzumerken, dass diese Näherungen insbesondere nicht für nasse Schäume (Anfangsstadium des Bierschaumzerfalls)

gelten und ausschließlich **einen** Zerfallsmechanismus berücksichtigen.

Deshalb ist es wohl mit großer Wahrscheinlichkeit Zufall, dass sich die Messwerte von Leike durch eine hyperbolische Funktion in der Form von {8} mindestens so gut beschreiben lassen, wie durch den exponentiellen Abfall (Abb. 1 und 2). Ein rein exponentieller Abfall ergibt sich jedoch weder aus den numerischen Lösungen der komplizierten Modelle noch aus der stark vereinfachten analytischen Lösung.

4. Fazit

Was bedeutet das nun für die Schule? Soll man auf das beliebte Analogon verzichten? Offenbar kann man die Werte, die man mit Schulmitteln erzielen kann, im Rahmen der Messgenauigkeit doch relativ gut mit einer Exponentialfunktion beschreiben. Allerdings findet man auch andere Funktionen, die den gleichen Zweck erfüllen und ebenso wenig (oder vielleicht sogar eher) theoretisch zu begründen sind. Und es gibt auch andere Vorgänge, die ohne Radioaktivität auskommen und als Messwerte eine abklingende Exponentialfunktion liefern. Beispiele sind das Leerlaufen eines Vorratsgefäßes durch eine Kapillare konstanten Strömungswiderstands oder (leider auch nur in Grenzen, vgl. [11]) das Abkühlverhalten von Kaffee.

Problematisch wird es sicherlich, wenn man von dem Bierschaum-Experiment mehr erwartet als einen „motivierenden Aufmacher“⁵ und die Lieferung von Messwerten, durch die man relativ glaubwürdig eine Exponentialfunktion legen kann.

Will man z.B. explorativ an die Interpretation der Daten heran gehen, so muss man auch andere Ansätze als die abklingende Exponentialfunktion in Betracht ziehen und kommt ggf. mit anderen Funktionen zu gleich guten oder besseren Ergebnissen.

Will man theoriebasiert vorgehen, so muss man motivieren, warum der Bierschaumzerfall exponentiell abklingen sollte. Typische Begründungen hierfür sind „die Menge der pro Zeit zerfallenden Blasen ist proportional zur Menge der noch vorhandenen Blasen“ oder „alle Blasen platzen mit der gleichen Wahrscheinlichkeit“. Beide Begründungen sind umformulierte Definitionen der abfallenden Exponentialfunktion und sehr analog zu den Aussagen zum radioaktiven Zerfall. Nach den obigen Ausführungen sind sie jedoch wenig plausibel. Der Bierschaum ist ein inhomogenes Medium, das mehreren sehr unterschiedlichen Zerfallsmechanismen unterliegt. Warum sollten unter diesen Umständen alle Blasen mit der gleichen Wahrscheinlichkeit platzen?

Und warum sollte das Platzen jeder Blase den gleichen Beitrag zur abgeflossenen Flüssigkeitsmenge oder zur Höhe der Schaumsäule leisten?

All dies sollte man gut abwägen, ehe man sich für den Einsatz der Bierschaumanalogie entscheidet.

Das Thema „Schäume“ kann jedoch auf ganz andere Weise den Unterricht sicherlich bereichern. Wenn auch die exakte Modellierung weit über Schulniveau hinaus geht, sind die grundlegenden Mechanismen, die dem Schaumzerfall zugrunde liegen, im Unterricht behandelbar und können durch einfache, teilweise hier vorgestellte Experimente veranschaulicht werden. Dann ist es lohnend, die „Zerfallskurven“ aufzunehmen und ihre Interpretation vor diesem qualitativen theoretischen Hintergrund zu diskutieren. Ebenso kann man an diesem Beispiel auch diskutieren, wie wichtig sorgfältige und „ergebnisoffene“ Analysen experimenteller Daten und deren Wechselspiel mit theoretisch begründeten Hypothesen sind.

5. Literatur

- [1] Leike, A. (2002). Demonstration of the Exponential Decay Law Using Beer Froth. In: European Journal of Physics, 23, 21-26.
- [2] <http://improbable.com/ig/> (Stand 09.03.2009)
- [3] Dale, C., West, C., Eade, J., Rito-Palomares, M., Lyddiatt, A. (1999). Studies on the physical and compositional changes in collapsing beer foam. In: Chemical Engineering Journal 72, 83 – 89.
- [4] Plath, P., Sauerbrei, S. (2004). Apollonische Umordnung des Schaums – Wie zerfällt Bierschaum wirklich? In: Brauindustrie 7/2004, 20-23.
- [5] Ostwald, W. & Steiner, A. (1925). Über Schaumfähigkeit und Oberflächenspannung; insbesondere von Humussolen. In: Colloid & Polymer Science 36 (6), 342-351.
- [6] Fisher, L. (2003). Die Reise zum Mittelpunkt des Frühstückseis. Frankfurt: Campus.
- [7] <http://esamultimedia.esa.int/docs/isseduikit/de/html/t040605e1.html>, dann „Schaum im Welt Raum“ (09.03.2009).
- [8] Weaire, D., Hutzler, S. (2000). The Physics of Foams. Oxford: Oxford University Press.
- [9] Koehler, S. A., Hilgenfeldt, S., Stone, H. A. (2000). A Generalized View of Foam Drainage: Experiment and Theory. In: Langmuir, 16, 6327-6341.
- [10] Verbist, G., Weaire, D., Kraynik, A. M. (1996). The foam drainage equation. In: J. Phys. Cond. Matter 8, 3715–3731.
- [11] Einhaus, E., Schecker, H. (2006). Kalter Kaffee. In: MNU 59/5, 267-276.

⁵ Wobei hinsichtlich dieses Einsatzmotivs die eingangs erwähnten Einschränkungen noch mehr zu bedenken sind. Wird der Bierschaumzerfall lediglich als „Aufmacher“ genutzt, ist die Gefahr eines unreflektierten und unwissenschaftlichen Umgangs mit dem Thema umso größer.