

## Es tönen die Gläser

H. Joachim Schlichting, Christian Ucke

*"Jede Glocke hat ihren Klöppel", heißt es in einem deutschen Sprichwort. Einem Weinglas entlockt man auch ohne Klöppel einen glockenartigen Ton, wenn man mit dem feuchten Finger über den Rand des Glases fährt. Wie kommt dieser Ton zustande!*

Wie eine Glocke klingt das mit einem Löffel leicht angeschlagene Weinglas. Mit dem feinen aber durchdringenden Ton hat schon so mancher Festredner die Aufmerksamkeit auf sich gelenkt. Weniger festlich, dafür aber physikalisch und haptisch umso faszinierender wird der Ton des Weinglases empfunden, wenn er nicht durch trockenes Anschlagen, sondern durch den feuchten Finger hervorgehoben wird, mit dem man leicht über den Glasrand fährt. Was spricht uns hier an! Ist es die Konstanz des Tons, der solange nicht verhallt, wie der Finger über das Glas gleitet! Oder ist es die Art und Weise, auf die ein relativ lauter Ton aufgrund einer auffällig leichten Berührung des Glases entsteht?

Diese ungewöhnliche Art, Töne zu erzeugen, ist nicht neu. Schon Galileo Galilei bewundert in seinem „Saggiatore“ (1623) jemanden, „der, mit der Fingerkuppe den Rand eines Glases reibend, ihm einen wunderbar zarten Ton entlockte“ und Benjamin Franklin erfand sogar ein Musikinstrument, das aus rotierenden Gläsern unterschiedlicher Größe bestand, deren Rand automatisch feucht gehalten wurde. Es genügte, die verschiedenen Gläser dieser Harmonica zu berühren, um Töne zu erzeugen und ganze Melodien einer feinen „Glasmusik“ zu spielen.

### Tönen heißt schwingen

Wenn man dies nicht schon wüßte, könnte man es zum Beispiel daran feststellen, daß ein an den Rand des tönendes Glases gehaltener Löffel fühlbar und hörbar zum Mitschwingen angeregt wird. Einen sichtbaren Ausdruck findet der Ton des voll gefüllten Weinglases auf der Oberfläche des Weines. Solange das Glas tönt, erscheinen dort feine Kräuselungen der Flüssigkeit, die besonders deutlich als senkrecht zum Glasrand orientierte kurzwellige Randwellen in Erscheinung treten (Abbildung 1). Sie ähneln den „Flüstergalerie“-Wellen, die bereits Lord Rayleigh 1904 in der St. Paul's Cathedral in London beobachtete [13].

Die Randwellen ordnen sich in einem karreeartigen Muster an, in dem sich Bereiche relativer Ruhe mit solchen stark ausgeprägter Wellen abwechseln. Dieses Randwel-

lenmuster ist allerdings nicht feststehend, sondern folgt dem über den Glasrand streichenden Finger. Es liegt nahe,

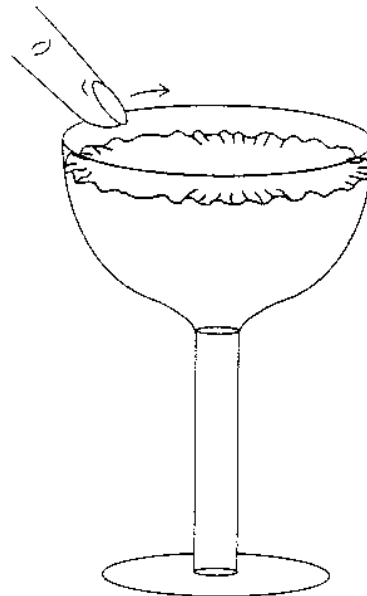


Abb. 1: Karreeartig auftretende Randwellen auf der Oberfläche der Flüssigkeit.

diese Erscheinung so zu deuten, daß das Glas an den Stellen hin- und herschwingt, an denen die Wellen auftreten und dazwischen in Ruhe bleibt (Abbildung 2). Die Schwingung des Glases teilt sich nicht nur dem Wein, sondern auch der Luft mit und gelangt auf diese Weise als feiner Ton an unser Ohr.

Übliche (leere) Weingläser lassen sich in einem weiten Bereich um 1000 Hz anregen, wie man beispielsweise durch Vergleich mit einem entsprechenden Klavierton leicht feststellen kann (s. „Resonanzfrequenz“, S. 139).

Diese Weinglasschwingung, die übrigens schon aufgrund der Form des Glases der Schwingung einer Glocke sehr ähnlich ist, läßt sich im Falle des Anschlagens mit einem Löffel leicht erklären: Das Glas wird an einer Stelle etwas „eingedellt“. Elastische Rückstellkräfte veranlassen die Glaswand, in die Ausgangslage zurückzuschwingen. Dabei schießt sie - aus Trägheit - über das Ziel hinaus, führt zu einer Auslenkung des Glases nach außen, bewegt sich

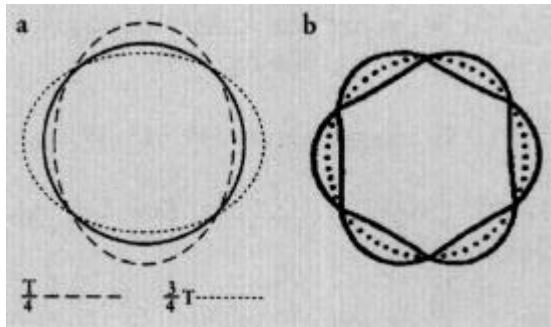


Abb. 2: Schwingungsmoden des Glases (stark übertrieben gezeichnet). (a) Grundschwingung (b) Oberschwingung.

wieder zurück usw. Obwohl man kaum in der Lage sein dürfte, das Glas immer wieder auf dieselbe Weise anzuschlagen, entsteht doch jedesmal derselbe Ton. Zwar werden beim Anschlagen unterschiedliche Verformungen hervorgerufen, die jeweils wellenförmig über die Oberfläche des Glases laufen; aber nur Wellen passender Länge können zu einer (quasi-) stationären Schwingung der Glaswand beitragen. Diese werden weniger (Resonanz), alle anderen stärker gedämpft.

Das einfachste Muster einer solchen stationären Schwingung hat die Form eines Karrees, bei der der Rand des Glases abwechselnd zueinander senkrechte, elliptische Verformungen durchläuft (Abbildung 2a). Natürlich sind weitere auf den Glasrand passende Schwingungsmuster denkbar und treten insbesondere beim Anschlagen des Glases auch tatsächlich auf (Abbildung 2b, Oberschwingung).

Schwieriger ist die Tonerzeugung im Falle des sanften Reibens zu verstehen. Setzt man den feuchten Finger auf den glatten Glasrand und versucht, ihn unter leichtem Druck in Bewegung zu versetzen, so bemerkt man, wie der Finger aufgrund der Haftreibung zwischen Glas und Finger zunächst „hängenbleibt“ und eventuell das Glas ein wenig tangential auslenkt. Mit zunehmender Zugkraft wird die Haftreibungskraft überwunden. Der Finger beginnt zu gleiten, und das ausgelenkte Glas schwingt aufgrund der elastischen Rückstellkraft zurück. Dadurch wird der Wert der Haftreibungskraft unterschritten, der Finger bleibt erneut „hängen“, und der Vorgang kann sich wiederholen: In einem subtilen Wechselspiel von Haften und Gleiten (Slip and Stick) [2] gerät der über den Glasrand geschobene Finger gewissermaßen ins „Stottern“ und ruft Schwingungen hervor, die sich wellenartig über die

Glaswand ausbreiten. Obwohl das System stottert, vermag es sich auf eindrucksvolle Weise verständlich zu machen: Wie beim Anschlagen des Weinglases werden durch Resonanz nur jene Frequenzen ausgesondert, die zu den Abmessungen des Weinglases passen und sich als charakteristischer Weinglaston Gehör verschaffen. Interessanterweise ist der Ton weitgehend unabhängig von der Geschwindigkeit, mit der man den Finger über den Rand streicht.

21. Ein gemeines Trinkt-Glass pfeiffend und tanzend zu machen.

Wann man ein gemeines Weing-Glass mit reinem und heilen Wasser anfüllet, den Zeiger-Finger damit benetzt, und also nah auf den Rand des Glases herum fähret, wie aus beygehender Figur zu ersehen:



So wird man bald einen hellen Ton hören, gleich einem klingenden Metall, wodon das Wasser im Glas bewegten bewegt, daß es vor Fuß zu tanzen und springen scheint.

Dieses ist ein sehr gemeines Experiment, und wird hin und wieder von denen Gästen auf Hochzeiten und Gastreuen exerciret, welches auch um so viel lustiger fällt, als viele zuweilen mit mehrer Gläsern solches öffter zu probiren pflegen.

Abb. 3: Beschreibung des Phänomens in „Natürliches Zauberbuch“, Nürnberg 1745.

Im Falle der reibungsbedingten Tonerzeugung bleibt der Ton solange ungedämpft erhalten, wie man durch den „stotternden“ Finger Energie in die Glaswand einspeist. Sobald der Ton erklingt, spürt man diese Energieübertragung gewissermaßen körperlich: Irgendwie „rastet“ der über den Glasrand fahrende Finger ein und erfährt einen gleichbleibenden Widerstand, solange der Ton erklingt. Es sei in diesem Zusammenhang erwähnt, daß sich das von Schülern so gefürchtete Quietschen von Kreide auf der Wandtafel, das Knarren und Quietschen nicht geölter Türangeln, aber auch das Anstreichen der Geigensaiten mit dem Geigenbogen demselben Mechanismus verdankt. Auch wenn es sich nach unseren Erfahrungen nicht gerade empfiehlt, dies an einem weinseligen Abend zu tun, reizt es, den Glockenklang des Weinglases systematisch zu untersuchen. Vergleicht man Gläser mit etwa gleicher Wandstärke, so stellt man fest, daß sie umso höher tönen, je kleiner ihr Durchmesser ist. Die Glasrandhöhe spielt dabei kaum eine Rolle. Vergleicht man den Umfang des Glasrandes mit der Länge einer schwingenden Saite, so wird dieses Verhalten verständlich. Sind gleichartige

## Resonanzfrequenz

Zu einer groben quantitativen Abschätzung der Resonanzfrequenz  $f$  eines Grogglases kommt man, wenn man sich dieses als einen Zylinder vom Radius  $r$  vorstellt, der aus einer Platte gebogen wurde. (Die Zylinderform wird durch ein Grogglas besser erfüllt als durch ein Weinglas.) In einer Platte pflanzt sich die Biegewelle näherungsweise mit einer Geschwindigkeit von

$$v = f_{\lambda} = (\pi u f d / \sqrt{3})^{1/2}$$

fort, wobei  $f$  und  $\lambda$  Frequenz und Wellenlänge,  $u$  die Schallgeschwindigkeit in der Platte und  $d$  die Dicke der Platte darstellen. Im Falle der Grundschwingung beträgt der Umfang des Glases gerade zwei Wellenlängen  $2\lambda = 2\pi r$ .

Setzt man dies in die obige Gleichung ein und löst nach  $f$  auf, so erhält man

$$f = d u / (\sqrt{3} \pi r^2).$$

Für das von uns benutzte Glas ergibt sich mit  $d = 1$  mm,  $2r = 61$  mm und der Schallgeschwindigkeit in Glas  $u = 5300$  m/s eine Resonanzfrequenz  $f = 1047$  Hz. Mit Hilfe des Klaviers stellen wir eine perfekte Übereinstimmung des Weinglastons mit dem dreifach gestrichenen Cis, also einer Frequenz von 1109 Hz fest. Im Rahmen der groben Abschätzung erhalten wir also gute Übereinstimmung.

In jüngster Zeit hat French eine detaillierte Ableitung der Theorie für Weingläser gegeben, die mit einigem Erfolg auf reale Weingläser und andere derartige Gefäße [3] angewandt werden können.

Gläser mit einer Flüssigkeit gefüllt, so klingen sie umso tiefer, je mehr Flüssigkeit sie enthalten. Da Flüssigkeit mitbewegt werden muß, wird durch sie die Trägheit erhöht. Dem Glas fällt es „schwerer“, den Auslenkungen zu folgen. Die Frequenz wird also erniedrigt.

Merkwürdigerweise klingen Gläser gleichen Durchmessers, aber unterschiedlicher Wanddicke umso höher, je dicker sie sind. Man könnte meinen, mit wachsender Dicke nehme ähnlich wie bei der Füllung mit einer Flüssigkeit die Trägheit zu. Dies ist auch gewiß der Fall. Außerdem nimmt aber mit der Dicke die Steifheit des Glases zu. Zunehmende Steifheit erhöht aber, ähnlich wie die zunehmende Spannung einer schwingenden Saite, die Frequenz. Dieser Effekt der Frequenzerhöhung durch zunehmende Steifheit überwiegt offenbar den Effekt der Frequenzabnahme durch zunehmende Trägheit.

An entsprechenden Experimenten scheint es auch in der Vergangenheit nicht gefehlt zu haben. Bereits der Heraus-

geber eines „Natürlichen Zauberbuches“ aus dem Jahre 1745 sagt: "Dieses ist ein sehr gemeines Experiment und wird hin und wieder von denen Gästen auf Gastereyen und Hochzeiten exercieret, welches auch um so viel lustiger fällt, als viele zugleich mit mehrer Gläsern solches öftters zu probiren pflegen".

## Literatur

- [1] R. E. Apfel, American Journal of Physics 53, 1070 (1985).
- [2] E. Rabinowicz, Scientific American S. 109 (1956).
- [3] A. P. French, American Journal of Physics 51, 688 (1983).