

AMERINDIAN RESEARCH

Zeitschrift für indianische Kulturen von Alaska bis Feuerland



DER LEIPZIGER TRAUM VOM INDIANER

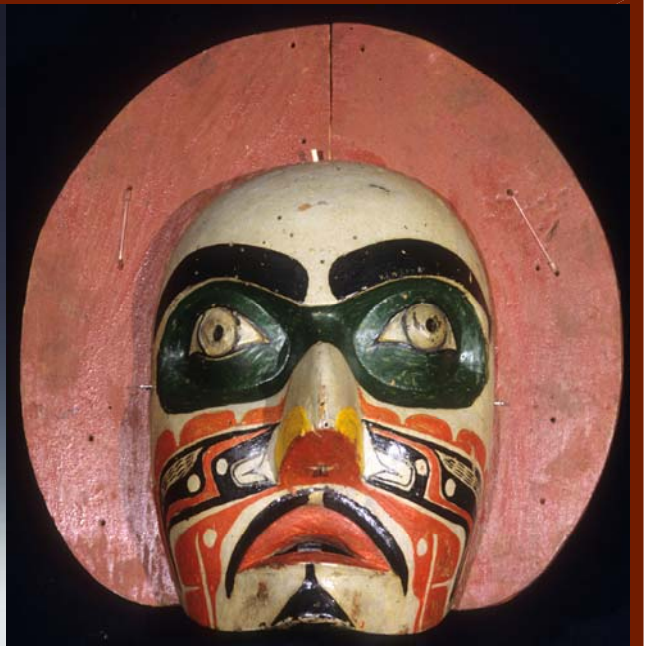
INDIANER-ROMANTIK, VÖLKERKUNDE, VOLKSBILDUNG

Die Zeichnungen von Wilhelm Watzke

ANTIKOLONIALE BEFREIUNG ODER KLASSENKAMPF?

Über das Verhältnis von Staat und Nation in der frühen Maya-Bewegung

Copyrights und Fotoangaben: Siehe S. 71



REVITALISIERUNG DES LAKOTA

Zur Lage der Sprache in den Reservationen heute

SENSATIONELLE AUSGRABUNGSERGEBNISSE IN PERU

Archäologen aus Berlin entdecken über 5000 Jahre alte Gräber

REZENSIONEN | KURZBERICHTE | AUSSTELLUNGEN

Singende Pyramidentreppen und mögliche Zeremonien für Quetzalcoatl bei den Maya der klassischen Epoche

Jaroslav Klokočník und Petr Hadrava

An vielen mesoamerikanischen Pyramiden lässt sich ein als "Zwischerecho" bekannter Effekt beobachten. Klatscht man unten in die Hände oder schlägt zwei Steine aneinander, werfen die Treppenstufen ein Echo zurück, das sich anhören kann, als würde ein Vogel fliegen, es kann aber auch wie der Ruf des Quetzals, des Göttervogels der Maya, klingen. Das Phänomen wurde zuerst durch den Akustikfachmann David Lubman bekannt. Dass Pyramiden eigens so gebaut wurden, um dieses und ähnliche Geräuschphänomene zu zeremoniellen Zwecken zu erzeugen, versucht dieser Beitrag mit einer mathematischen Beweisführung zu untermauern. Geräuschaufnahmen dafür wurden an mehreren Pyramiden in Yucatán, Chiapas, Zentralmexiko, Oaxaca und Guatemala gemacht.

At many mesoamerican pyramids an effect known as "chirped echo" can be observed. Hand claps or stones being struck one on another at the pyramid's base evoke an echo from the stairs that resembles the sound of a flying bird or the cry of the resplendent quetzal, the Mayan divine bird. The phenomenon was first described by David Lubman, an acoustic specialist. This article gives a mathematical proof of the idea that pyramids were constructed to produce these and other, similar sounds for ceremonial purposes. Sound records were taken at a variety of pyramids in Yucatán, Chiapas, Central Mexico, Oaxaca and Guatemala.

En muchas pirámides mesoamericanas se puede escuchar un sonido chirriante, fenómeno acústico conocido como "cola de quetzal". Al aplaudir en la base de las escaleras o al pegar una piedra contra otra, los escalones reflejan un eco barrido que es parecido al vuelo de un pájaro o, a veces, al trino de un quetzal, el ave sagrada de los mayas. El fenómeno fue reconocido por primera vez por el ingeniero en acústica David Lubman. Pensamos que por lo menos existan algunas pirámides construidas con el fin de producir efectos de sonido como éstos, y también otros parecidos más, para usos ceremoniales, y queremos aportar aquí una demostración matemática que confirme ésta hipótesis. Hemos registrado sonidos en varios pirámides de diferentes lugares en Yucatán, Chiapas, México Central, Oaxaca y Guatemala.

Einleitung

Klatscht man in Mesoamerika am Fuße einer Tempelpyramide in die Hände, kommt von der Treppe häufig ein Echo zurück, das sich wie Gezwitscher oder Gezirpe anhört. Ein wohlbekanntes Beispiel für dieses Phänomen ist die Pyramide des Kukulkan, des Quetzalcoatl der Maya, in Chichén Itzá, doch kann man solche Resonanzeffekte bei weitem nicht nur dort erleben. Das Echo erinnert an den Ruf des heiligen Quetzalvogels der Maya. 1998 erklärte der kalifornische Akustikfachmann David Lubman die Physik dieses Echos mit periodischen Reflexionen von den Stufen [1]. Ein Sonogramm des Händeklatschens und des Zwischerechos kann man auf www.ocasa.org/MayanPyramid2.htm abrufen; weitere Verweise auf dieses Thema finden sich z.B. bei Calleja and Declercq [2], wenngleich ihre Abhandlung selbst sich mit einem anderen akustischen Effekt beschäftigt. In diesem Beitrag stellen wir nun unsere eigene mathematische Beschreibung des Phänomens vor. Wenn Lubmans Hypothese korrekt ist, dann ist es kein Zufall, dass die Stufen vieler Pyramiden so steil sind, denn dann lag genau diese Besonderheit – ähnlich wie bei griechischen Amphitheatern – im Interesse einer möglichst guten Akustik, die man bei verschiedensten zeremoniellen Ereignissen gezielt einsetzen wollte.

Das mathematische Modell

Ein Beobachter sendet einen kurzen Impuls aus, der von den Stufen einer Treppe reflektiert wird. Das Echo baut sich dann aus einer (quasi-)periodischen Sequenz von Impulsen auf, deren Teilfrequenzen sich mit der Fourier-Analyse berechnen lassen. Dabei zerlegt man die Sequenz in den sich wiederholenden Sinus-Grundton, dessen Periode der Zeitverzögerung zwischen zwei Echos entspricht, die von aufeinander folgenden Stufen reflektiert werden, und in die den Grundton überlagernden Obertonschwingungen, die stets ganze Vielfache der Grundfrequenz sind. Wenn aufgrund der Geometrie der Treppe die Zeitverzögerung zwischen den Echos von aufeinander folgenden Stufen nicht genau gleich lang bleibt, verschiebt sich die Frequenz des zusammengesetzten Geräusches mit der Zeit wie beim Stimmen einer Saite oder so, als würde das Geräusch von einer heranahenden Quelle durch den Doppler-Effekt verschoben werden, obwohl die Geometrie der reflektierenden Treppe statisch ist. Deshalb kann das Geräusch, das der Beobachter hört, dem Geräusch eines fliegenden Vogels ähneln.

Wir wollen diesen Effekt für den Sonderfall einer Treppe mit gleichgroßen Stufen berechnen. Wenn s die schräge Entfernung zwischen der Quelle des von Be-



obachter¹ P am Boden ausgesendeten kurzen Impulses ist – der vor dem Treppenaufgang einer Pyramide in die Hände klatscht – und der i -sten Stufe der Pyramide (siehe Abb. 1), wenn ferner x die horizontale Entfernung zur i -sten Stufe und x_0 die horizontale Entfernung zur ersten Stufe ist, dann ist $s_0 = x_0$, Δx ist die Breite der Trittstufe, y die vertikale Entfernung zur i -sten Stufe (d.h. Teil der Höhe der gesamten Pyramide von der Basis bis zur i -sten Stufe), und Δy die Höhe der i -sten Stufe. Bezeichnen wir ferner mit $\Delta p^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2$ die Hypotenuse jeder Stufe. Wie setzen voraus, dass die Treppe geradlinig verläuft, also $y = k(x - x_0)$ ist, wobei $k = \tan a$ ist mit a als konstantem Winkel, der die Steilheit der gesamten Treppe definiert.

Die Zeit t , die das Echo mit einer Schallgeschwindigkeit c zurück nach P benötigt, beträgt

$$t = 2 \frac{s}{c} \quad (1)$$

wobei

$$s^2 = x^2 + y^2 = x^2 + k^2(x - x_0)^2 \text{ ist.}$$

Wenn wir nach x auflösen, erhalten wir

$$x = \frac{k^2 x_0 + \sqrt{(1+k^2)s^2 - kx_0^2}}{1+k^2}. \quad (2)$$

Dies ist die Entfernung zwischen der Quelle des Geräusches und der entsprechenden Stufe.

Die Zeitverzögerung Δt zwischen Echos, die von aufeinander folgenden Stufen reflektiert und bei P empfangen werden, ist somit

$$\Delta t = \frac{dt}{dx} \Delta x. \quad (3)$$

Mit Hilfe von (2) erhalten wir

$$\Delta t = \frac{2}{cs} \Delta x [x(1+k^2) - x_0 k^2] = \frac{2}{c} \Delta x \sqrt{1+k^2 - \frac{4k^2 x_0^2}{c^2 t^2}} \quad (4)$$

Es gibt zwei Spezialfälle von Gleichung (4), und zwar das Echo von der ersten Stufe und das Echo von einer sehr weit entfernten, asymptotischen Stufe. Für die erste Stufe, $s_0 = x_0$, haben wir

$$\Delta t_0 = 2\Delta x/c.$$

Die Frequenz f_0 des Echos von der ersten Stufe

$$f_0 = \frac{1}{\Delta t_0} = \frac{1}{2} \frac{c}{\Delta x}$$

wird bestimmt durch die Schallgeschwindigkeit und die Weite der Stufe. Für die asymptotische Stufe, $s = \infty$, (4) wird

$$\Delta t_a = 2\Delta p/c.$$

Die Frequenz f_a

$$f_a = \frac{1}{\Delta t_a} = \frac{1}{2} \frac{c}{\Delta p}$$

wird bestimmt durch die Schallgeschwindigkeit und die Länge der Hypotenuse der Stufe.

Die Differenz von f_0 und f_a beträgt

$$2(f_0 - f_a) = \frac{c}{\Delta p} - \frac{c}{\Delta p} \quad (5)$$

was besagt, dass f_0 höher ist als f_a . Ihrerseits ist die Frequenz des Echos von $(i + 1)$ ster Stufe immer niedriger als die Frequenz von der i -sten Stufe. Je höher die Stufe ist, um so niedriger ist die Frequenz des Echos, das von dort zum Beobachter nach P zurück kommt.

Mögliche Zeremonien

Selbstverständlich wollen wir nicht behaupten, die Maya hätten zuerst ein mathematisches Modell entwickelt, um nach diesem dann die Pyramiden zu errichten. Sie könnten das Echoprinzip stattdessen aber durch Zufall, auf experimentellem Weg, entdeckt haben. Auf dieselbe Weise kann es dann in anderen Orten adaptiert worden sein. Wir haben nur beschrieben, "wie es funktioniert".

Beobachtet und aufgezeichnet haben wir die Echos an der Kukulcan-Pyramide (El Castillo) in Chichén Itzá, an der ovalen Pyramide des Zauberers in Uxmal (zwei exzellente Beispiele), in Tikal an den Pyramiden 1 und 2, vor dem Quetzalcoatl-Tempel in Teotihuacan, in Santa Cecilia Acatitlan, vor Gebäude H in Monte Alban, am Tempel der Inschriften und dem Tempel des Kreuzes in Palenque, am Palast des Gouverneurs in Uxmal und an weiteren Orten, wo das Echo allerdings schwach ist. Man muss bedenken, dass die Stufen ursprünglich gleichmäßig mit feinem Stuck überzogen waren und das Echo sicherlich besser war. Auch werden die Echos heute durch poröse, von Schmutz und Unkraut überwucherte Stufen und Bäume in der nahen Umgebung beeinträchtigt.

Als wir einmal Messungen auf der Spitze der Pyramide des Zauberers in Uxmal vornahmen, wurde unser Gespräch von Menschen verfolgt, die am Fuß der Pyramide standen. Sie waren sehr überrascht, wie gut sie selbst unser gedämpftes Geplauder noch verstehen konnten. Das hat uns bei unseren Untersuchungen sehr inspiriert.

Wir wissen, dass in bestimmten Orten groß angelegte Festivitäten stattfanden, insbesondere, um den Gott Quetzalcoatl zu ehren. Bis heute wird zu den Tag- und Nachtgleichen vor den Kukulcan-Pyramiden in Chichén Itzá ein Volksfest begangen, zu dem sich tausende begeisterte Teilnehmer versammeln. Das Echo, das von den Stufen reflektiert wird, wenn man am Fuß der Pyramiden in die Hände klatscht oder zwei Steine gegeneinander schlägt, ist das Echo, dem wir diesen Artikel gewidmet haben. Doch ebenso kann ein oben entstehendes Geräusch auch unten gehört werden. Somit kann man sich ein Zeremoniell vorstellen, das ein oben auf der Pyramide beim Heiligtum

¹ Entfernung zwischen zwei Punkten ist, die nicht auf gleicher Höhe liegen. (Anm. der Übers.)



stehender Priester nach Art einer Theater- oder Musikaufführung leitet. Die Menschen unten klatschen in die Hände, während er spricht, der religiösen Überlieferung folgend. Dies könnte Teil einer atemberaubenden Inszenierung gewesen sein und die einfache Bevölkerung von damals tief bewegt haben.

Schlussfolgerung

Gleichung (4) zeigt, wie das Echo, während es die Stufen einer Pyramide emporsteigt, immer niedrigere Frequenzen des Geräuschsignals zurückwirft. Dabei hängt es offenkundig auch von der Bauweise der Stufen selbst ab, ob man den gewünschten Echoeffekt erhält; und die niedrigeren Stufen können einem Beobachter *P* den Blick auf zumindest einen Teil der höheren Stufen nicht verdecken. Dies erklärt den wohlbekannten Tatbestand, dass viele Pyramiden sehr steil sind ($\alpha \geq 45^\circ$). Unsere Ableitung stimmt mit den Geräuschaufzeichnungen überein, die sich wie ein von oben kommendes Zwitschern, wie das "Ee-Oo" des Quetzalvogels anhört. Solche Aufzeichnungen wurden an der Kukulkan-Pyramide in Chichén Itzá, der dem

Quetzalcoatl geweihten ovalen Pyramide des Zauberers in Uxmal, den Pyramiden 1 u d 2 in Tikal und vielen weiteren Pyramiden in unterschiedlichen Orten und zu unterschiedlichen Zeiten gemacht. Unsere Ableitung unterstützt Lubmans Hypothese.

Anmerkungen und Literatur

Lubman, David

1998 Archaeological Acoustic Study of Chirped Echo from the Mayan Pyramid at Chichén Itzá, *J. Acoust. Soc. Am.*, 104, 1763-1783

Cruz Calleja, Jorge Antonio, and Nico F. Declercq

2009 The Acoustic Raindrop Effect at Mexican Pyramids. The Architect's Homage to the Rain God Chac?, *Acta Acustica* 95, 849-856; doi 10.3813/AAA.918216

(© Jaroslav Klokočník, Petr Hadrava

Astronomisches Institut der tschechischen Akademie der Wissenschaften, CZ-251 56 Ondřejov-Observatorium, Tschechische Republik

had@sunstel.asu.cas.cz, jklokocn@asu.cas.cz)

Eine Anmerkung:

Es mag den meisten Lesern gehen wie mir: Der mathematische Ansatz dieses Beitrages ist nur schwer verständlich.

Ich erinnere mich in diesem Zusammenhang aber an einen Besuch der Maya-Ruinen von Cobá (Quintana Roo, Mexico) im Herbst 1999. Damals führte von der Küste aus eine etwa 40 km lange von Schlaglöchern übersäte Straße zu den Ruinen, was die namhaften Reiseunternehmen offenbar abschreckte, ihre Busse dorthin fahren zu lassen.

Wir waren also fast allein und spazierten durch die ausgedehnte Ruinenstätte. Als wir die etwa 40 m hohe Pyramide "Nohoch Mul" erreichten, eines der höchsten Bauwerke der Maya von Yucatan, beschloss meine Lebensgefährtin angesichts der drückenden Wärme lieber unten zu warten, während ich die steile Steintreppe erklimmte. Ich fand oben die einzigen Touristen vor, die uns hier begegneten, ein US-amerikanisches Pärchen. Wir begrüßten uns und boten an, uns gegenseitig zu fotografieren. Dann unterhielten wir uns einige Minuten, bis meine besorgte Begleiterin auftauchte. Sie hatte sich über den lauten Streit gewundert, den ich dort oben offenbar auszufechten hatte und wollte mir zu Hilfe kommen. Dabei hatten wir uns nur in ganz normaler Lautstärke unterhalten. Unten war das aber ganz deutlich und laut hörbar gewesen.

Das Auftreten akustischer Phänomene an Bauwerken der Maya ist nach meiner eigenen Erfahrung also nicht von der Hand zu weisen. Aber handelt es sich um ursprünglich beabsichtigte Effekte oder heute eher zufällig zu beobachtende und allgemein wirkende akustische Gesetzmäßigkeiten?

Unsere romantische Erinnerung an die einsame Mayastätte wurde bei einem weiteren Besuch im Jahr 2010 jäh gedämpft. Zahlreiche Busse nutzten die kürzlich instand gesetzte Straße. Fahrräder und Rikschas standen in großer Zahl bereit, den Weg innerhalb der Ruinen zu verkürzen. Von einsamer Romantik keine Spur und auch keine Spur von Echo und Akustik. – Lärm und Lachen, Erwachsene und Kinder, das wirkliche Leben also.

Wie war es aber früher, vor über tausend Jahren? Da gab es weit und breit keinen Wald (wie er die heutige Stätte prägt) und keine Einsamkeit, sondern Tempel, Wohnkomplexe, Hütten, Straßen, Gärten, Felder. War es, wenn Zeremonien stattfanden, wirklich so still, dass man ein Echo hören konnte und dass es jemanden beeindruckte? Gab es doch auch keinen hoch aufragenden Wald, der die Geräusche zurückwarf. Zehntausende geschäftiger Menschen lebten im Umkreis nur weniger Kilometer. Die Fragen bleiben. *(Rudolf Oeser)*



Die Pyramide Nohoch Mul in Cobá, 1999.