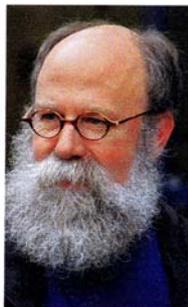


Moderne Musikinstrumenten-Saiten

Einfach Drähte oder technologische Meisterwerke?



► Dr. Alex von Bohlen,
Senior Engineer & Beamline Scientist,
Institute for Analytical Sciences, ISAS-Dortmund

Saiten sind für viele Musikinstrumente zur Erzeugung von Tönen unentbehrlich. Die Saiten werden gezupft, gestrichen oder geschlagen und geraten dadurch in Schwingung. Diese Schwingungen werden nebst hohen Kräften auf das jeweilige Musikinstrument übertragen. Mittlere Zugkräfte für eine Geige liegen bei ca. 250 N, für eine Gitarre bei 400 N, für ein Cello bei 550 N, für einen Kontrabass bis 1.000 N, bei einer Konzertharfe um 7.000 N und bei einem Konzertflügel über 200.000 N.

Betrachten wir die Kräfte, die die Saiten auf den Steg und von dort aus auf die Decke einer Geige übertragen, so erreicht man, unter Berücksichtigung der Auflagefläche des Steges von ca. 1 cm² auf der Geigendecke, eine optimale Kopplung an den Resonanzkörper. Der Steg wird dabei mit einer Kraft von etwa 100 N auf die Decke gepresst. Schwingungen, die mit dem Bogen an den Saiten erzeugt werden, werden optimal weiter geleitet. Hierbei vollführt die Saite mehrere Bewegungen gleichzeitig. Es entstehen Longitudinal- und Torsionswellen, die sich ausbreiten und das Instrument zum klingen bringen.

Legt man die Brook – Taylor Geigensaitengleichung zur Beschreibung der physikalischen Einflüsse zu Grunde, so erkennt man leicht, welche Parameter variiert werden können und welche fest liegen. Bei einer Geige ist die frei schwingende Länge der Saiten gleich, denn sie liegen alle auf dem Sattel und auf dem Steg auf. So können bei GDAE-Stimmung nur noch der Querschnitt und/oder die Materialdichte geändert werden, um das Schwingverhalten der Saiten zu beeinflussen.

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{P}{q \cdot d}}$$

Wobei f die Frequenz der Schwingung (1/Sekunde) ist, L die Länge der Saite (in cm), P die Zugkraft mit der die Saite gespannt ist (in Newton = kg m/s²), q der Querschnitt der Saite (in cm²) und d die Dichte des Saitenmaterials (in g/cm³) ist.

Der Querschnitt einer Saite unterliegt einigen Randbedingungen. Eine zu dünne Saite schneidet sich sowohl in die Finger als auch in das Holz ein. Auch darf die Saite nicht zu dick sein, denn sie muss in die Bohrung der Wirbel passen und muss über den Steg am Saitenhalter befestigt

werden können. Durchmesser von ca. 0,25 mm bis hin zu ca. 2 mm sind gängige Größen. Das ist leider ein recht schmaler Bereich. Bleibt dann nur noch eine Änderung der Materialdichte, um die Frequenz f laut Brook-Taylor variieren zu können. Die Dichte des Materials kann von ca. 1,1– 22,65 g/cm³ verändert werden. Der kleinere Wert steht für Kunststoffe, Naturdarm liegt bei etwa 1,3 g/cm³, und der hohe Wert entspricht der Dichte des Edelmetalls Iridium.

Leider kann nur der Querschnitt einer Saite stufenlos verändert werden, die Dichte aber nicht. Auch dann nicht, wenn man Legierungen nimmt. Da die Dichte eine Materialkonstante ist, kann sie nur in diskreten Stufen variiert werden. Erschwerend kommt noch hinzu, dass nicht jedes Material zur Herstellung von Saiten eingesetzt werden kann. So lässt sich reines Gold beispielsweise zu hauchdünnen Drähten ausziehen ohne die erforderliche Elastizität zu erreichen. Andere Materialien lassen sich überhaupt nicht ziehen, z.B. Silicium, Arsen, Germanium, usw. Aber gerade mit einer fein abgestimmten Dichteänderung hätte man die Möglichkeit, in die Frequenz einer schwingenden Saite in kleinsten Schritten einzugreifen.

Dieser Weg wurde zuerst zaghaft in der Vergangenheit begonnen und ab Mitte des 20. Jahrhunderts mit großem Erfolg fortgesetzt. Möglich wurde das durch den raschen technologischen Wandel in den Materialwissenschaften mit der Bereitstellung und Herstellung neuer Kunststoffe, und durch die Entwicklung ausgefeilter Beschichtungsmethoden. So sehen wir uns heute mit einer Vielzahl spezieller Saiten konfrontiert, die für jedes Instrument eigens entwickelt wurden. Viele dieser über 3.000 modernen Saiten kann man als technologische Meisterwerke bezeichnen. Nun sei die Frage nach ihren Zusammensetzungen und ihrem Aufbau erlaubt, um einige Geheimnisse zu lüften.

Lichtmikroskopische und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Die ersten Untersuchungen an Geigensaiten waren einfache lichtmikroskopische Betrachtungen bei kleinen Vergrößerungen. Hier konnte man schon anhand der Farben einiges erkennen. Eine durchgeschnittene und leicht aufgedrehte Geigensaiten ist in Abbildung 1 links wiedergegeben. Deutlich zu erkennen sind drei Bestandteile: eine

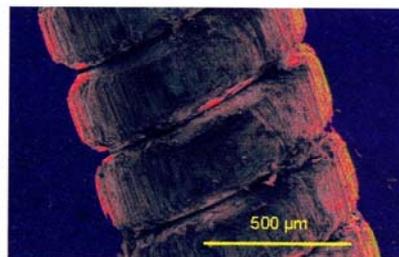


Abb. 1: Geigensaiten lichtmikroskopische Aufnahme (links) und Cellosaite rasterelektronenmikroskopisch (rechts).

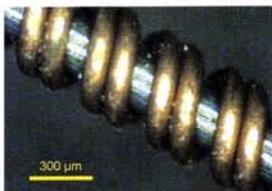
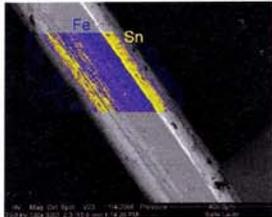
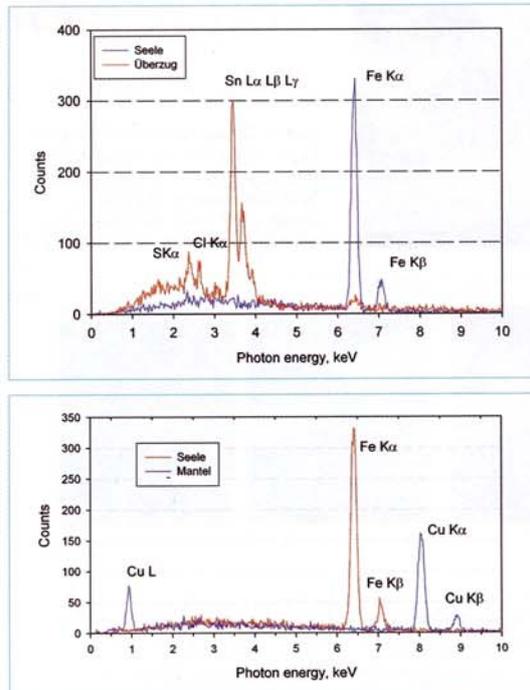


Abb. 2: Mandolinensaiten (gezupft) in unterschiedlichen Ausführungen weisen deutliche Unterschiede zu Geigensaiten (gestrichen) auf. REM-EDX Analysen der Saiten.



Metallseele oder -kern bestehend aus einem einfachen Draht umgeben von einem roten Kunststoffgeflecht, dieses schließlich wieder mit einem Metalldraht umwickelt. Nehmen wir ein Rasterelektronenmikroskop (REM) zur Hilfe, erkennen wir noch weitere Details, die sich auf die Morphologie der Saiten beschränken (Abb. 1 rechts).

Materialanalyse mittels Röntgenemission und Röntgenfluoreszenz

Schon in der Vergangenheit konnte Martha Goodway mittels Spektralanalyse zeigen, dass der Einfluss des technologischen Wandels auf die Musikinstrumente dramatische Folgen hatte. So wurden Stähle bis ins 18. Jh. mit Phosphor passiviert. Sie ließen sich zu dünnen Drähten von nur 1 Meter Länge ausziehen. Entsprechend lang waren die damaligen Musikinstrumente. Doch dann lernte man den Stahl mit Kohlenstoff zu passivieren. Mit den neuen Stahlsorten ließen sich Drähte ziehen, die bei einer höheren Festigkeit, einige Meter lang waren. Parallel dazu fertigte man Musikinstrumente mit einem höheren Tonumfang und einer größeren Baulänge an [1].

Die Entwicklung von neuen Materialien und dadurch auch von neuen Saiten für eine Vielzahl von Musikinstrumenten hat zur Folge, dass wir heute in der Lage sind, allein durch Saitenwahl den Ton des jeweiligen Instruments sehr stark zu beeinflussen. Aber weshalb ist es so? Ein Teil der Antwort ist in der kontinuierlichen Variation der (mittleren) Dichte einer Saite, die in die Brook-Taylor Gleichung eingeht, verborgen. Der kom-

plexere Teil der Antwort liegt in der Physik der schwingenden Saite, und da differenziert man, ob gestrichen, gezupft oder geschlagen [2]. Hier steht die Materialzusammensetzung dieser modernen Produkte im Vordergrund.

Stufenlose Variation der Dichte

Die stufenlose Änderung der Dichte ist auf ersten Blick nicht möglich. Dennoch: Wie erreicht man auf einfache Art und Weise das, was in der Natur nicht vorgesehen ist? Eine genau errechnete (mittlere) Dichte oder sogar einen Dichtegradienten kann man durch geschickte Materialwahl und durch Kombination mehrerer Komponenten erreichen. Es gibt immer mehrere Lösungen, die der Sache gerecht werden. Andere Zusatzparameter sind maßgeblich für die Entscheidung der Wahl. Da sind u.a. die Saitendicke, der Klang und nicht zuletzt der Preis des Produktes.

Rein äußerlich ist einer Saite nicht anzusehen, wie und woraus sie gefertigt wurde. Weder Lichtmikroskop noch Elektronenmikroskop oder gar eine verbrauchsfreie Röntgenfluoreszenzanalyse gibt Einblicke in ihr Inneres; wir müssen sie zur genaueren Untersuchung „zerlegen“.

Wie werden nun Dichten variiert? Die einfachste Möglichkeit ist ein Tauchbad eines Drahtes in z.B. flüssigem Zinn. Dieser Saitentyp wurde für Mandoline konzipiert. Ob der dünne Überzug (ca. 3 µm dick) nun als Korrosionsschutz oder aus ton-technischen Gründen aufgebracht wurde, ist nicht bekannt. Das Ergebnis der REM-EDX Analyse nach leichtem Anschleifen der Saite ist in Abbil-

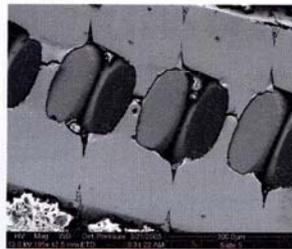
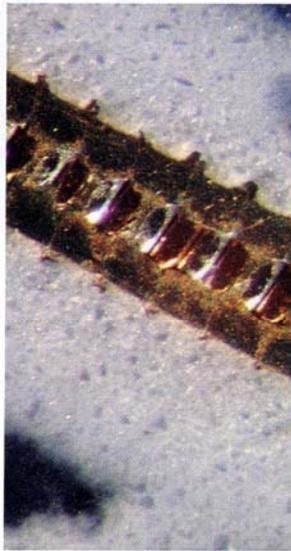


Abb. 3: Cellosaite, oben lichtmikroskopische Ansicht der eingebetteten und angeschliffenen Saite, sowie REM Aufnahme im SEI-Modus. Unten: μ XRF-WDX mit Synchrotronstrahlenergie (vgl. GIT 2/2007 [3]).

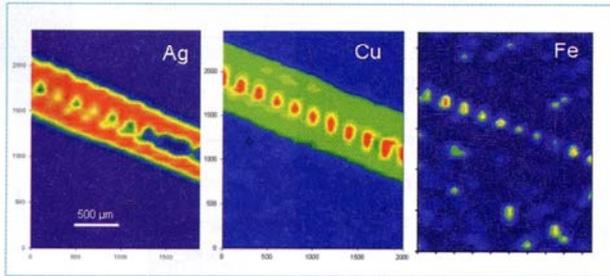


Abb. 2 oben zu sehen. Die Mandolinensaite (Abb. 2 unten) besteht aus einem Eisen (Stahl) Kern mit einer Zwei-Draht Ummantelung aus Kupfer. Weitere Elemente liegen unterhalb der Nachweisgrenze des Analyseverfahrens.

Im Gegensatz zur einfachen Mandolinensaite steht die Cellosaite, deren Längsschliff in Abb. 3 links zu sehen ist. Ein weitaus komplexeres Gebilde zeigt die REM Aufnahme. Im inneren Bereich befinden sich zwei umeinander gewickelte

Drahte mit unterschiedlichen Grauwerten. Dieser Bereich ist von einem dritten Draht umwickelt, der die inneren dicht umschließt. Dieser äußere Draht stellt sich noch heller dar als die inneren. Schon anhand dieser Grauwertabstufung kann man drei sehr unterschiedliche Metalle oder Legierungen vermuten. Die Analyse zeigt für den inneren Bereich einen Eisen- und einen Kupferdraht. Da die Saite nur knapp angeschliffen ist, hat man noch nicht ihr Inneres erreicht.

Schleift man weiter oder betrachtet den Querschliff, erkennt man eine Kunststoffseele umgeben von je zwei Eisen- und Kupferdrähten, die wiederum von einem mit Kupfer legierten Silberdraht umwickelt sind. Dieser bildet die Oberfläche der Cellosaite. An einem ca. 2 mm langen und ca. 0,6 mm breiten Querschliff wurde am Synchrotron DELTA in Dortmund (www.delta.uni-dortmund.de) eine Elementflächenanalyse mittels μ -Röntgenfluoreszenz durchgeführt [3]. Es wurden dafür 20 x 25 Punkte à 50 μ m im Durchmesser in Abständen von 100 μ m untersucht. Die Falschfarben-Darstellung der Ergebnisse ist in Abb. 3 zu sehen.

Als letztes Beispiel wird noch eine moderne Cellosaite gezeigt. Ein innerer Stahlkern mit einem Sn-Überzug ist mit einem Kunststoffaden umwickelt, dieser wiederum mit einem Metallband umwickelt. Mit einem modernen REM-EDX System sind wir in der Lage, auch schlecht leitende Proben bei sehr kleinen Beschleunigungsspannungen zu beobachten und mit einer energiedispersiven Röntgensonde (REM: FEI Quanta 200F und EDX: Bruker Quantax 400 X-Flash) alle Elemente von Bor bis Uran recht empfindlich zu erfassen. Eine eindrucksvolle Darstellung der Elementverteilung von Al, Cr und O, sowie Fe und C, ist in Abb. 4 zu sehen.

Dieser Saitenaufbau hat einen großen Einfluss auf das Schwingverhalten der Saite. Sowohl die Longitudinal- als auch die Torsionswellen werden beeinflusst und wirken sich direkt auf den Ton aus. Durch die Wahl und Anordnung der Komponenten ergeben sich auch spezielle Eigenschaften bezüglich der Festigkeit und der Dicke der Saite. So würde eine reine Kunststoffsaite etwa dreimal dicker ausfallen (hier ca. 2,1 mm), eine reine Stahlsaite merklich dünner, letztere würde weniger als halb so dick (ca. 0,3 mm) sein. Man kann also davon ausgehen, dass der Hersteller diese Komponentenwahl nicht willkürlich sondern sehr gezielt getroffen hat. Die technische Fertigung eines solchen Produktes bedarf spezieller Maschinen, um einen Qualitätsstandard über einen längeren Zeitraum zu gewährleisten.

Fazit

Moderne Saiten für Musikinstrumente sind Produkte, in die viel Wissen und Entwicklung einer hochtechnisierten Gesellschaft eingeflossen sind. Nicht jedem Konzertbesucher, sei es Rock, Pop oder Klassik, ist es bewusst, wie viel brandneue Erkenntnisse der Materialforschung dort zum Einsatz kommen, nur um dem Gehör zu schmeicheln.

Literatur

- [1] Goodway, M.: Phosphorus in antique iron music wires. *Science* 236 927–932 (1987)
- [2] Cremer, L.: *Physik der Geige*. Hirzel Verlag, Stuttgart, (1981)
- [3] von Bohlen, A.: Erste Erfahrungen mit einem Prototyp – Eine wellenlängendispersive Röntgenmikroskopie am Synchrotron DELTA. *GIT Labor-Fachzeitschrift* 2 98–100 (2007)

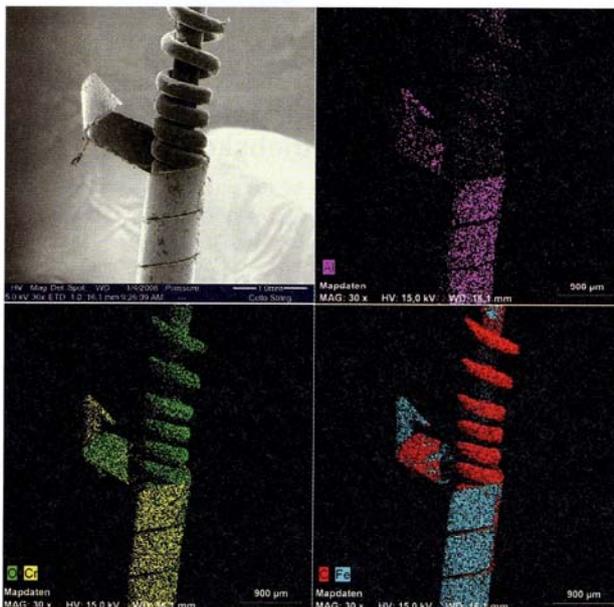


Abb. 4: Cellosaite, oben links REM-Bild; oben rechts REM-EDX Aluminium-Elementverteilung, unten links Sauerstoff/Chrom-Verteilung und unten rechts Kohlenstoff/Eisenverteilung.

KONTAKT

Dr. Alex von Bohlen
Institute for Analytical Sciences,
ISAS-Dortmund
Tel.: 0231/1392-232
Fax: 0231/1392-120
vonbohlen@isas.de
www.isas.de