

■ Die Physik macht die Musik

Für den Ton ist es ein weiter Weg zwischen dem Anstreichen einer Geigensaite und dem Ohr des Zuhörers. Damit ein schöner Ton entsteht, müssen auch physikalische Details stimmen.

Ein Konzertbesuch: Der Solist auf der Bühne setzt die Violine an. Leicht gleitet der Bogen über die Saite. Bis die Klänge aber beim Zuhörer ankommen, ist noch viel Physik im Spiel. Allgemein bekannt ist, dass der Bogen die Saite in ihrer Eigenfrequenz und in den ganzzahligen Vielfachen, den Obertönen, zum Schwingen anregt. In einem ständigen Wechsel mit der Eigenfrequenz der Saite lösen Haft- und Gleitreibung zwischen Bogen und Saite einander ab. In der Haftungsphase wird die Saite aus der Ruhelage bewegt, in der Gleitphase schlägt sie in Gegenrichtung aus.

Doch die Saite allein ist viel zu dünn, um die Umgebungsluft in ausreichende Schwingung zu versetzen und den Saal mit Musik zu füllen. Dazu muss die Schwingungsbewegung über den Steg auf den gesamten Korpus des Instrumentes übertragen werden (Abb. 1). Dieser Schritt beeinflusst den späteren Klang, denn der Steg hat Eigenfrequenzen. Wird er in diesen Frequenzen von den Saiten angeregt, so geht die Energie in die Eigenschwingungen des Steges anstatt auf den Geigenkorpus über, und die Töne sind effektiv gedämpft. Geigenbauer wählen für den Steg eine Form, die möglichst viele hohe Eigenfrequenzen ab etwa 3000 Hz hat. Dann kann er als Tiefpassfilter fungieren und dem Instrument die störend hohen Obertöne nehmen. Außerdem hat die Saite einen kleineren Schwingungswiderstand, auch Schallimpedanz genannt, als der Korpus:

Wäre kein Bauelement dazwischen, würde der Korpus die Schwingungen größtenteils reflektieren. Der etwas biegsame Steg transmittiert dagegen die Schwingungen auf den Korpus. So erfüllt



Mit moderner Technik gehen Geigenbauer den Geheimnissen guter Instrumente auf den Grund wie hier in der Werkstatt des Physikers Martin Schleske.

er eine ähnliche Funktion wie der Impedanzwandler im elektrischen Schaltkreis.

Ist die Energie auf den Geigenkörper übertragen, komprimiert dieser seine Umgebungsluft regelmäßig, was als Schall beim Zuhörer ankommt. Doch nicht auf jede Schwingung reagiert die Geige in gleicher Weise. Jeder Klangkörper hat ein individuelles Resonanzverhalten. Es unterscheidet sich dabei nicht nur die Amplitude der Schwingung abhängig von der Anregungsfrequenz, sondern auch die Schwingungsform, also der Verlauf der Stellen, die keine Schwingungsamplitude haben – der Knotenlinien. Alle diese Faktoren beeinflussen die Klangfarbe, die sich aus dem Amplitudenverhältnis von Grundton zu Obertönen ergibt. Für viele Menschen entscheidet dieser Aspekt darüber, ob das Instrument schön klingt. Untersuchen lässt sich das Resonanz- und Schwingungsverhalten des Instruments mit der Modalanalyse. Dazu zählen alle Messmethoden, die das Schwingungsverhalten der Geige erfassen und visualisieren.

Bereits bei der Auswahl des Holzes achtet ein Geigenbauer auf die akustischen Eigenschaften. Die Geige muss leicht sein, damit sie mit geringer Anregungsintensität in Schwingung gerät, und steif, damit

eine möglichst große Fläche mitschwingt anstatt die Bewegung abzufedern. Zur Modalanalyse gehört auch, das Holz abzuklopfen und den darauf erklingenden Eigenton zu messen. Hat das Holz einen Eigenton mit hoher Frequenz und langer Nachklingzeit, ist es meist leicht und steif.

Computer erlauben es mittlerweile, das Schwingungsverhalten von fertigen Geigen systematisch zu untersuchen. Solche Analysen an berühmten Geigen wie denen von Stradivari und Guarneri del Gesù helfen dabei, Anhaltspunkte für ihr Schwingungsverhalten zu finden. Die Resultate können als Referenz für neue Instrumente dienen, wenn ähnliche Klangeigenschaften gewünscht sind. Die Geige wird durch ein Impulshämmerchen mit Kraftmesser in einer bestimmten Frequenz am Steg angeregt. Gleichzeitig nimmt ein piezoelektrisches Beschleunigungsmessgerät die Bewegung an einem Messpunkt des Geigenkörpers auf. Diese Messung wird an über 200 Stellen wiederholt und die jeweils maximale Amplitude entlang eines Koordinatensystems im Computer dargestellt (Abb. 2).

Das Fourier-Spektrum des gemittelten Ausschlages des Geigenkörpers im Verhältnis zur Anregungskraft ist die „Übertragungs-

Abb. 1 Die Form des Steges sorgt für viele Resonanzen im sehr hohen Frequenzbereich.



funktion“. Sie zeigt, wie intensiv die Geige auf welche Frequenz reagiert. Die Maxima dieser Funktion sind die Resonanzfrequenzen. Die heutige Form der Geige ist in der Barockzeit entstanden und hat durch ihre Unregelmäßigkeit besonders viele Eigenfrequenzen. Deren Anzahl erhöht sich weiter, wenn Dicke und Struktur von Boden- und Deckenplatte ungleichmäßig ausgearbeitet sind. Außerdem verlaufen die Jahresringe im Holz parallel, sodass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen in horizontale und vertikale Richtung verschieden ist. Typischerweise hat die Geige vier besondere Frequenzbereiche, in denen viele starke Resonanzen auftreten.

Von Knoten und Bäuchen

Die Geige reagiert auf jede Frequenz in einer bestimmten Schwingungsform. Diese ist durch Schwingungsbäuche und Knotenlinien charakterisiert, deren Anordnung bestimmt, wie der Ton abgestrahlt wird. Es gibt drei Abstrahlungsmechanismen, die bei verschiedenen Frequenzen auftreten. Die tiefsten Töne entstehen nach dem Prinzip der Helmholtz-Resonanz. Dieses Phänomen ist bekannt durch den tiefen Ton, der auftritt, wenn man über einen Flaschenhals hinweg pustet. Ein Körper zieht durch eine Öffnung Luft ein und aus, wodurch

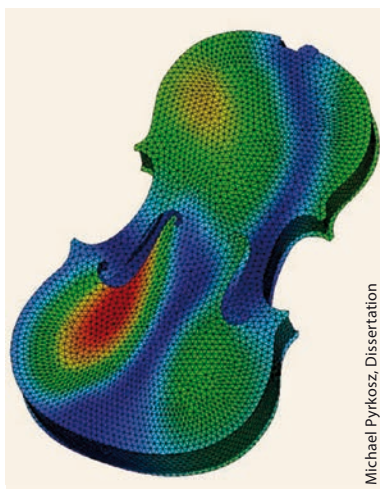


Abb. 2 Die Modalanalyse einer Geige bei 824,7 Hz zeigt das individuelle Schwingungsverhalten dieser Plattenresonanz. Hier sind mehrere Schwingungsbäuche (rot, gelb) und Knotenlinien (blau) zu sehen.

ein Ton entsteht. Die tiefe Saite der Geige ist in der Regel auf den Ton g mit einer Frequenz von 196 Hz gestimmt. Das entspricht einer Wellenlänge von 1,7 Metern, während der Korpus nur etwa 35 Zentimeter lang ist. Damit der Ton erklingen kann, schwingen Boden und Decke gegeneinander und pumpen Luft über die Schalllöcher in der Deckenplatte, die F-Löcher (Abb. 3), ein und aus. Die Luft im Geigenkorpus ändert als akustische Feder ihr Volumen.

Bei Frequenzen oberhalb der Helmholtz-Resonanz greift die Korpusresonanz. Die Luft wird direkt durch die Plattenbewegung des Korpus verdrängt und dadurch der Ton abgestrahlt. Der Geigenkorpus schwingt dabei als ein geschlossenes Ganzes. Es gibt also nur eine Knotenlinie, die geschlossen über Decke, Seiten und Boden einmal die Geige umschlingt. Erhöht sich die Frequenz weiter, entstehen mehrere Knotenlinien, und viele Bereiche von Boden und Decke schwingen bei der Plattenresonanz gegeneinander (Abb. 2).

Der Verlauf der Knotenlinien entscheidet über die Tragweite des Instruments, denn um die Luft effektiv in Schwingung zu versetzen, dürfen die gegenphasigen Schwingungsbäuche räumlich nicht zu dicht aneinander liegen. Ansonsten kann die Luft ausgleichend zwischen diesen Bereichen am Geigenkörper entlang strömen anstatt sich zu komprimieren. Aus demselben Grund ist es für die Tragweite ungünstig, wenn sich bei der Korpusresonanz durch die Knotenlinie die Geige symmetrisch in linke und rechte Hälfte teilt. Auch dann kompensiert die Luft die Körperschwingung direkt durch Strömen von einer Hälfte zur anderen anstatt in den Raum hinein zu schwingen.

Der Verlauf der Knotenlinien lässt sich gezielt durch die Ausarbeitung beeinflussen. Über viele Details, wie die Form der F-Löcher oder die Form, Dicke und Spannung von Boden und Decke, kann ein Geigenbauer auf das Schwingungsverhalten einwirken. Viel Einfluss hat zum Beispiel die Position des Stimmstocks, eines zylinderfö-

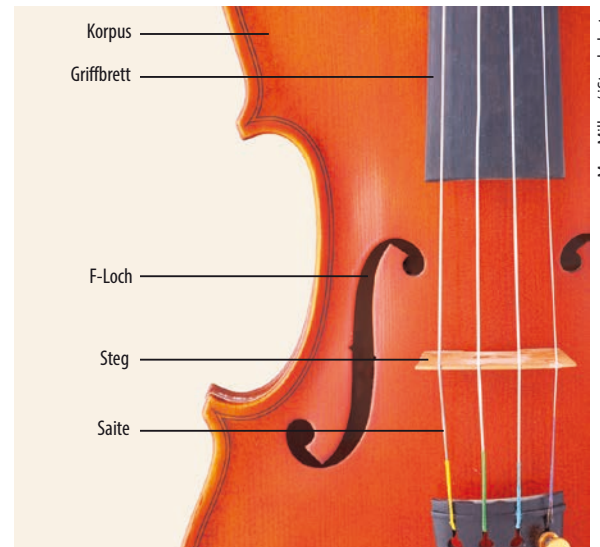


Abb. 3 Jedes Bauteil einer Geige prägt ihren besonderen Klang. Die wichtigsten sind hier benannt.

migen Stabes, der innen zwischen Boden und Decke steht und die Schwingungen zwischen diesen Platten überträgt.

Ein Geigenbauer arbeitet über technische Messungen und deren Vergleiche bei der Ausarbeitung der Geige zu einem schönen, vollen Klang hin. Auch kann er den Klang einer fertigen Geige über kleine Anpassungen an Stimmstock, Steg oder Griffbrett in seltenen Fällen auch am Korpus ändern. Bei Feinheiten bleiben viele Entscheidungen bezüglich der Klangfarbe der kunsthandwerklichen Freiheit und dem Wunsch des Musikers überlassen.

Während an der Geige unzählige physikalische Phänomene auftreten, entsteht Musik, die nicht allein über naturwissenschaftliche Sprache beschrieben sein will. Im Konzertsaal erreichen die Zuhörer nicht nur Luftschwingungen, sondern Töne, die im Zusammenspiel Geschichten und Empfindungen weitergeben. Die Physik der Geige ermöglicht diese Weitergabe und so gilt in doppeltem Sinn der alte Jazzstandard: „It Don't Mean a Thing / If It Ain't Got That Swing.“

Ich danke Martin Schleske vom Meisteratelier für Geigenbau, Landsberg am Lech, für die zahlreichen Informationen und hilfreichen Erklärungen.

Marie Teich