Klangsynthese und akustische Erkennung rechteckiger Platten

Martin Czuka[1], Marian Weger[2], Robert Höldrich[2]

[1] *AIT Austrian Institute of Technology, Center for Low-Emission Transport, Wien, Österreich, Email: martin.czuka@ait.ac.at*

[2] *Institut für Elektronische Musik und Akustik, Graz, Österreich.*

Einleitung

Im Alltag ist es uns oft möglich, physikalische Objekte anhand ihres Klangs zu unterscheiden, und zu identifizieren. Beispielsweise klopfen wir auf Melonen, um deren Reifegrad abzuschätzen, oder schütteln die Kaffeedose, um deren Füllstand zu bestimmen. Bei Festkörpern, wie sie üblicherweise im Baumarkt angefunden werden können (z.B. Bretter, Platten, oder Rohre), wird der abgestrahlte Schall von der Form, der Größe, und den jeweiligen Materialeigenschaften bestimmt, sowie auch von der Art der Anregung.

Die akustische Identifikation grundlegender Objekteigenschaften kann einerseits durch den Menschen erfolgen. Die Wahrnehmbarkeit unterschiedlicher Materialien von Objekten wurde dazu bereits eingehend untersucht. In [1] konnten Versuchspersonen auf Basis des Klangs von angeschlagenen Platten mehrheitlich zwischen den verschiedenen Materialgruppen unterscheiden. Die Unterscheidung innerhalb einiger Materialgruppen war jedoch partiell uneindeutig. Hörversuche in [2] und [3] mit synthetisierten Klängen angeschlagener Balken und in [4] mit synthetisierten Klängen angeschlagener Platten zeigten, dass das Abklingverhalten in Form des materialinhärenten Verlustfaktors η am besten mit der Distinktion unterschiedlicher Materialgruppen korrelierte.

Die akustische Identifikation einfacher Objekteigenschaften durch ein algorithmisches Verfahren stellt eine weitere Möglichkeit der akustischen Erkennung dar. Bei bekannter rechteckiger Geometrie einer Platte konnten in [5] auf Basis der niedrigsten akustisch gemessenen Platteneigenfrequenzen die elastischen Eigenschaften unterschiedlicher orthotroper Materialien geschätzt werden.

Um aus dem Klang angeschlagener rechteckiger Platten neben grundlegenden Materialeigenschaften auch auf die Abmessungen der Platte rückzuschließen, wurde in [6] ein algorithmisches Verfahren entwickelt, dessen Prinzip in Abbildung 1 dargestellt ist. Der vorliegende Konferenzbeitrag fasst dabei die wesentlichsten Aspekte und Erkenntnisse dieser Arbeit zusammen. Im ersten Teil der Arbeit wurde ein physikalisches Modell implementiert, welches das Schwingungs- und Abstrahlverhalten von Biegewellen in rechteckigen Platten mittels Modalsynthese simuliert. Im zweiten Teil wurden Tonaufnahmen von angeschlagenen Platten analysiert. Die Eigenfrequenzen der angeregten Platten wurden mittels Pitch-Tracking extrahiert, um in weiterer Folge die Modellparameter zu ermitteln. Auf Basis dieser Informationen erfolgte eine Schätzung der Materialeigenschaften sowie der geometrischen Abmessungen der Platten.

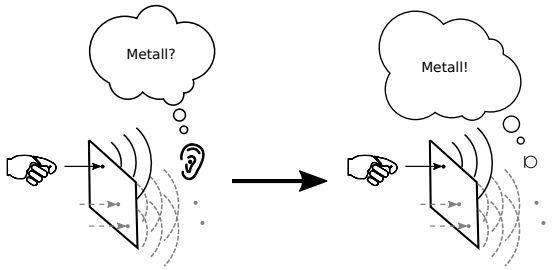

Abbildung 1: Schematisches Prinzip einer auditiven Materialerkennung (links) und der entwickelten computergestützten Erkennungsmethode (rechts).

Implementiertes Synthesemodell

Zur Generierung von Klängen angeschlagener rechteckiger Platten wurde ein Modalsynthesemodell auf Basis der Kirchhoff-Love-Plattentheorie aus [7] implementiert und um ein umfangreicheres Dämpfungsmodell aus [8] erweitert. Das Modell ist in der Lage, die durch Biegewellen verursachte transversale Auslenkung dünner orthotroper Platten mit einer beliebigen Kombination aus freien, frei gelagerten oder eingespannten Rändern zu simulieren. Die Eigenfrequenzen und ihre zugehörigen Modenformen können dabei näherungsweise über ein einfaches analytisches Modell nach [9] oder über FE-Simulationen mit der freien Software Elmer FEM ermittelt werden.

Die transversale Auslenkung $W(x, y, t)$ auf der Platte, verursacht durch die punktförmige Kraft $F(t)$ an der Position $\{x_0, y_0\}$, errechnet sich dabei mit

$$\begin{aligned} W(x,y,t) &= \frac{1}{\rho h}\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{\infty} Z_{mn}(x,y)W_{mn}(t), \\ Z_{mn}(x,y) &= A_{mn}^2\Theta_{mn}(x,y)\Theta_{mn}(x_0,y_0), \\ W_{mn}(t) &= \int_0^t F(\tau)e^{-\alpha_{mn}(t-\tau)}\frac{\sin(\omega_{mn}(t-\tau))}{\omega_{mn}}\mathrm{d}\tau, \end{aligned} \tag{1}$$

wobei von der in Abbildung 2 dargestellten geometrischen Konstellation ausgegangen wird. Die rechteckige Platte wird durch ihre Seitenlängen L_x, L_y, ihre Dicke h, die Dichte ρ, die Randbedingungen, sowie durch die Eigenfrequenzen ω_{mn} und die zugehörigen Modenformen Θ_{mn} definiert. Der Skalierungsfaktor A_{mn} stellt sicher, dass für jede Mode mit den Modenzahlen m und n das Skalarprodukt $\int\int(A_{mn}\Theta_{mn})^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y = 1$ ident ist. Für eine isotrope Platte werden die elastischen Eigenschaften durch das Elastizitätsmodul E und die Poissonzahl ν beschrieben. Die modalen Abklingkonstanten α_{mn} errechnen sich mit Hilfe der Verlustfaktoren η_i und der moden-

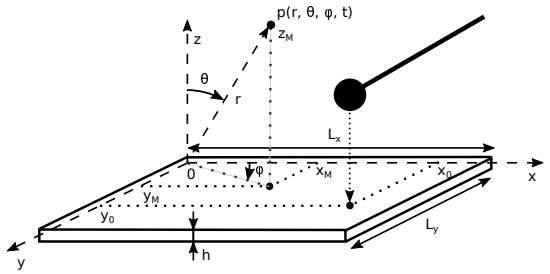

Abbildung 2: Geometrische Anordnung für das implementierte Modalsynthesemodell.

formabhängigen $J_{i,mn}$ über

$$\alpha(\omega_{mn}) = \sum_{i=1}^{4} \frac{\omega_{mn}}{2} \eta_i(\omega_{mn}) J_{i,mn} + \frac{R_f}{2}, \qquad (2)$$
$$\eta_i(\omega_{mn}) \approx \mathrm{Im}\{\tilde{d}_{i,t}(j\omega) + \tilde{d}_{i,v}(j\omega) + \tilde{d}_r(j\omega)\}.$$

Die Pertubationsfaktoren berücksichtigen die inhärenten thermo- ($\tilde{d}_t$) und viskoelastischen ($\tilde{d}_v$) Verluste, sowie die Wechselwirkung zwischen einer (unendlich groß angenommenen) isotropen Platte und der umgebenden Luft ($\tilde{d}_r$). Eine mögliche frequenzunabhängige Dämpfung wird durch die fluide Dämpfung R_f quantifiziert. Für eine detaillierte Beschreibung des implementierten Dämpfungsmodells sei an dieser Stelle auf [8] und [5] verwiesen. Die punktförmige Kraft $F(t)$ wird über ein einfaches Hertz'sches Kontaktmodell nach [10] modelliert, und beschreibt damit die Interaktion zwischen dem Schlägel und der damit angeregten Platte.

Mit Hilfe der transversalen Auslenkung $W(x, y, t)$ auf der Platte wird der Schalldruck p am Aufpunkt M durch die numerische Lösung des Rayleigh-Integrals

$$p(r, \theta, \varphi, t) = \frac{\rho_{air}}{2\pi} \int_S \frac{\partial^2}{\partial t^2} \frac{W(x, y, t - d/c_{air})}{d} \mathrm{d}S, \qquad (3)$$
$$d = \sqrt{(x - x_M)^2 + (y - y_M)^2 + z_M^2}$$

berechnet, wobei ρ_{air} und c_{air} die Dichte von und die Schallgeschwindigkeit in Luft sind. Für die Berücksichtigung der Abstrahleffizienz einer Platte endlicher Größe wurde - angelehnt an das empirische Abstrahlmodell aus [11] - ein Hochpassfilter erster Ordnung mit der kritischen Abstrahlfrequenz

$$f_{crit} = \frac{c_{air}^2}{\pi h} \sqrt{\frac{\rho}{E}} \sqrt{3(1 - \nu^2)} \qquad (4)$$

einer unendlich großen, isotropen Platte als Grenzfrequenz implementiert. Zur einfachen Auralisierung über Kopfhörer wird der Schalldruck p an zwei gedachten Positionen synthetisiert.

Die ausführliche Validierung des Synthesemodells erfolgte in [6] mit Simulationsergebnissen und Schalldruckmessungen aus [7], Simulationsergebnissen aus [8], sowie durch Laservibrometer- und Akustikmessungen an eigens angefertigten Platten. Ein Teil der Validierung beinhaltete Vergleiche zwischen aufgenommenen Klängen realer Platten mit ihren jeweils synthetisierten Gegenstücken, die vergleichbare Abmessungen und Materialparameter besitzen. Dafür wurden, wie in Abbildung 3 schematisch dargestellt, die Platten an einer Ecke mit einem Filzschlägel angeschlagen und die erzeugten Klänge akustisch aufgezeichnet. Die Platten waren dabei in einer speziellen Vorrichtung installiert, die angelehnt an [1] konstruiert wurde, um näherungsweise eine freie Randbedingung zu realisieren. Abbildung 4 zeigt einen exemplarischen Vergleich zwischen realem und synthetisiertem Klang einer Aluminiumplatte, und die für das Synthesemodell verwendeten Parameter sind in [6] Tabelle 10 aufgelistet. Die spektralen Maxima des simulierten Klangs weisen dabei ähnliche Lagen wie die spektralen Maxima des aufgenommenen realen Plattenklangs auf. Die individuellen Unterschiede zwischen spektralen Maxima konnten unter anderem auf zwei Aspekte zurückgeführt werden. Wie in den Spektrogrammen ersichtlich, weisen die Plattenmoden des simulierten Klangs einerseits andere Abklingkonstanten auf, die zu unterschiedlichen Energien in den einzelnen Moden führen. Zudem führen kleine Unterschiede zwischen den geometrischen Anordnungen des synthetisierten und des aufgezeichneten realen Klangs zu substantiell anderen akustischen Interferenzen am Aufpunkt. Aus dem Gesichtspunkt der akustischen Plausibilität führte das implementierte Synthesemodell für die in [6] untersuchten Aluminium- und Glasplatten zu zufriedenstellenden Ergebnissen, und verglichen mit ihren realen Gegenstücken, zu perzeptiv ähnlichen Klängen.

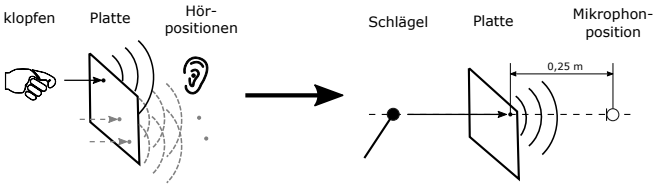

Abbildung 3: Angenommenes Szenario einer akustischen Erkennung (links) und daraus abgeleiteter Aufbau für die akustische Erkennungsmethode (rechts).

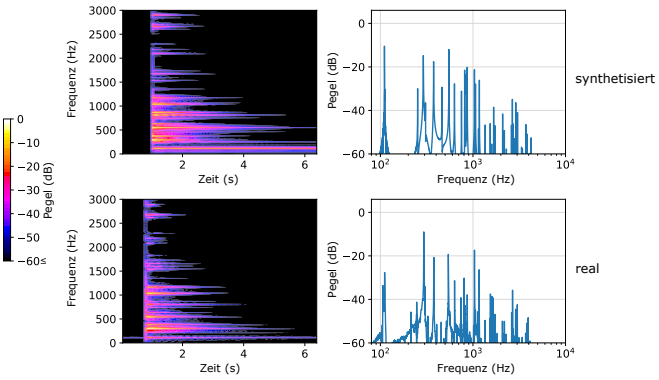

Abbildung 4: Spektrogramme (links) und Betragsspektren (rechts) von synthetisiertem (oben) und realem (unten) Klang einer Aluminiumplatte.

Akustische Material- und Größenschätzung

Im zweiten Teil des Projektes wurde eine Detektionsmethode entwickelt, um aus dem Klang einer angeschlagenen rechteckigen Platte deren Abmessungen und die Materialeigenschaften zu schätzen. Ausgangslage dafür bildet das in Abbildung 3 dargestellte Detektionsszenario, bei dem der aufgezeichnete Klang durch das einfache Signalmodell

$$x(t) = \sum_{m=1}^{M} A_m \sin(\omega_m t + \varphi_m) e^{-\alpha_m t} \tag{5}$$

beschrieben wird. Die Platte wird dabei an einer Ecke angeschlagen, um möglichst viele Eigenmoden des Objekts anzuregen. Das Messmikrophon befindet sich in geringem Abstand zur Platte, um die destruktiven Interferenzen bei niedrigen Platteneigenfrequenzen möglichst gering zu halten. Alle im folgenden beschriebenen Aspekte der Detektionsmethode werden in [6] ausführlicher behandelt. Der grundlegende Verfahrensablauf der akustischen Detektion ist in Abbildung 5 visualisiert. Im ersten Schritt werden die Eigenfrequenzen ω_m mittels Pitch-Tracking Algorithmus nach [12] aus dem Signal extrahiert. Die Schätzung der zugehörigen Abklingkonstanten α_m erfolgt analog zum beschriebenen Verfahren in [13]. Die aus dem Mikrophonsignal extrahierten Modellparameter ω_m und α_m dienen als Basis für zwei unterschiedliche Analysen.

Im Rahmen der ersten in Abbildung 5 dargestellten Analyse erfolgt einer Schätzung der kritischen Abstrahlfrequenz f_{crit}. Die Analyse berücksichtigt dabei die tendenziell kürzeren Abklingzeiten für Platteneigenmoden mit hoher Abstrahleffizienz. Im Rahmen des Dämpfungsmodells aus [8] wird dieses Verhalten durch den Pertubationsterm $\tilde{d}_r$ und dessen Einfluss auf die Abklingkonstanten α_{mn} beschrieben. Wie in Abbildung 6 exemplarisch ersichtlich, steigen die Abklingkonstanten oberhalb von f_{crit} maßgeblich an. Zur Lokalisierung dieses Anstieges liegt das Mikrophonsignal an einer Terzbandfilterbank an. Aus den entsprechenden Ausgangssignalen der Filterbank werden über eine exponentielle Regression Terzbandabklingkonstanten α_i ermittelt. Für die in Abbildung 6 dargestellten Dämpfungsspektren einer exemplarischen Glasplatte liegen die Maxima nahe an der theoretisch ermittelten kritischen Abstrahlfrequenz f_{crit}. In [6] konnte diese Tendenz auch für Klänge von Aluminiumplatten mit freien Rändern beobachtet werden.

Die zweite Analyse umfasst die Bestimmung eines materialinhärenten Verlustfaktors η. Wie in [8] beschrieben, werden die Abklingkonstanten α unterhalb von f_{crit} maßgeblich durch thermo- und viskoelastische Verluste geprägt. Deshalb wird für diesen Frequenzbereich auf Basis der Relation $\eta = \frac{2\alpha}{\omega}$ über eine lineare Regression ein mittlerer Verlustfaktor η geschätzt. Die in Abbildung 6 exemplarisch dargestellten Regressionen über die extrahierten Abklingkonstanten von Glasplatten mit freien Rändern zeigt die Bestimmung von Verlustfaktoren, die in einem Wertebereich für Glas liegen, wie er in [14] angeführt ist.

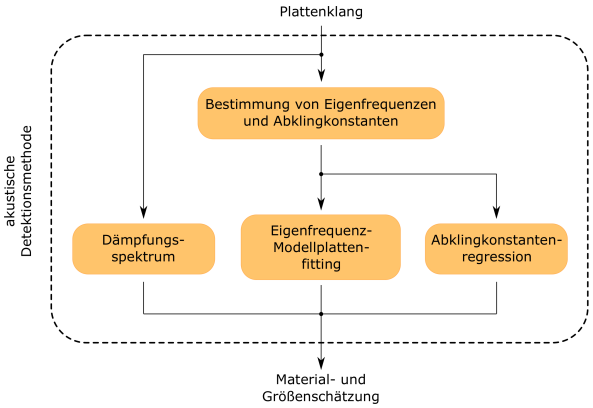

Abbildung 5: Aufbau der entwickelten akustischen Identifikationsmethode.

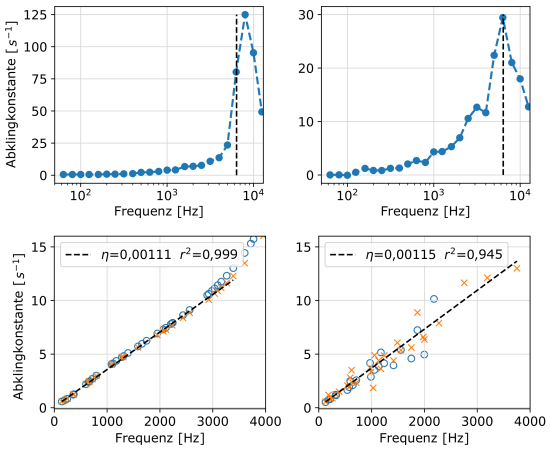

Abbildung 6: Schätzung der kritischen Abstrahlfrequenz f_{crit} (oben) und Verlustfaktorbestimmung (unten) von synthetisiertem (links) und realem (rechts) Klang einer Glasplatte.

Die dritte Analyse beinhaltet ein Modellplattenfitting auf Basis der aus dem Plattenklang extrahierten Eigenfrequenzen $\omega_m = 2\pi f_m$. Dabei wird mit Hilfe des Gradientenverfahrens iterativ eine isotrope rechteckige Platte gesucht, deren Eigenfrequenzen f_{mn} möglichst eine erweiterte Menge von f_m sind. Hierfür wird die analytische Frequenzformel

$$f_{mn} = \underbrace{\frac{h\pi}{A}\sqrt{\frac{E}{\rho}}\sqrt{\frac{1}{48(1-\nu^2)}}}_{\Phi} \sqrt{\left(G_x^4 \frac{1}{r_a^2} + G_y^4 r_a^2 + 2\nu H_x H_y + 2(1-\nu) J_x J_y\right)} \tag{6}$$

nach [9] in zwei Teile separiert: den Proportionalitätsfaktor Φ als Funktion vom Material (ρ, E, ν) und der Plattengeometrie (A und h), sowie in einen zweiten Teil, der von ν, dem Seitenverhältnis $0 < r_a \leq 1$, den Modenzahlen m und n, und den Randbedingungen (G, H, J) abhängt. Unter der Annahme $\nu = 0{,}3$, da viele Konstruktionsmaterialien im Bereich von $0{,}2 \leq \nu \leq 0{,}4$ liegen, wird nun eine Modellplatte mit einem Wertepaar für Φ und ν gesucht. Dafür wird für eine große Anzahl

an Startwertepaaren $\Phi[0]$ und $\nu[0]$ jeweils das Gradientenverfahren angewendet. Die Richtung und Schrittweite ergibt sich aus dem steilsten Gradienten der notwendigen Kosten zur Lösung eines linearen Zuordnungsproblems. Aufbauend auf den Konventionen aus [6] ergeben sich die Elemente C_{ij} der Kostenmatrix $\mathbf{C}$ mit den modellierten Frequenzen f_j' und den gemessenen Frequenzen f_i^* zu

$$C_{ij} = \frac{|f_i^* - f_j'[k]|}{f_i^*}. \tag{7}$$

Wie in Abbildung 7 dargestellt, konvergiert für den synthetisierten Klang einer exemplarisch untersuchten Aluminiumplatte eine substantielle Anzahl von Durchläufen des Gradientenverfahrens in der Nähe der tatsächlichen Werte von Φ und r_a.

Werden die aus den Analysen gewonnenen Informationen kombiniert, ist über die Gleichungen 4 und 6 eine Schätzung der Plattenfläche A und des Seitenverhältnisses r_a möglich. Aus dem bestimmten Verlustfaktor η kann aus Literaturquellen (z.B. [14]) die Materialkategorie bestimmt werden.

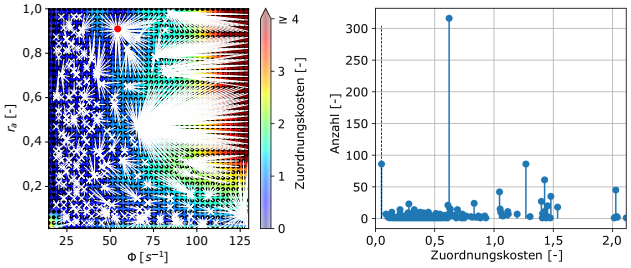

Abbildung 7: Kostenfunktion (links) mit tatsächlichem Wertepaar (roter Punkt) sowie Verläufen des Gradientenverfahrens (weiße Linien), und zugehöriges Histogramm (rechts) der Kosten zur Lösung eines linearen Zuordnungsproblems am Ende jedes Verlaufes des Gradientenverfahrens.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Vergleiche zwischen aufgenommenen angeschlagenen Aluminium- und Glasplatten mit freien Rändern und mit dem Synthesemodell erzeugten Klängen vergleichbarer Platten führten zu perzeptiv ähnlichen Klängen mit ähnlichen spektralen Eigenschaften. Die Plausibilität der mit dem Synthesemodell erzeugten Klänge hängt dabei wesentlich von den spezifizierten Materialparametern ab.

Der in [6] entwickelte Detektionsalgorithmus wurde anhand von realen Aufnahmen sowie synthetisiertem Klängen rechteckiger Platten aus Glas und Aluminium evaluiert. Die Abweichung zwischen Schätzwert und realem Wert lag bei der Fläche unter 8%, beim Seitenverhältnis unter 21%, und der Verlustfaktor lieferte eine eindeutige Unterscheidung zwischen Glas und Aluminium. Es sollte allerdings angemerkt werden, dass der vorgestellte Algorithmus von isotropen Platten mir freien Rändern ausgeht. Sobald die Platte z.B. durch eine aufliegende Hand gedämpft wird, ist davon auszugehen, dass der Algorithmus eine niedrigere Genauigkeit bei der Identifikation aufweisen wird.

Literatur

[1] Giordano, B.L., McAdams S.: Material identification of real impact sounds: Effects of size variation in steel, glass, wood, and plexiglass plates. The Journal of the Acoustical Society of America 119 (2006), 1171 - 1181.

[2] Klatzky, R.L., et al.: Perception of material from contact sounds. Presence in Teleoperators and Virtual Environment 9 (2000), 399 - 410.

[3] McAdams, S., Chaigne, A.: The psychomechanics of simulated sound sources: Material properties of impacted bars. The Journal of the Acoustical Society of America 115 (2004), 1306 - 1320.

[4] McAdams, S., Roussarie, V.: The psychomechanics of simulated sound sources: Material properties of impacted thin plates. The Journal of the Acoustical Society of America 128 (2010), 1401 - 1413.

[5] McIntyre, M., Woodhouse, J.: On Measuring the Elastic and Damping Constants for orthotropic Sheet Materials. Acta Metallurgica 35 (1988), 1397 - 1416.

[6] Czuka, M.: Sound Synthesis and Acoustic Characterization of Rectangular Plates. Masterarbeit (2021).

[7] Troccaz, P., Woodcock, R.: Acoustic radiation due to the inelastic impact of a sphere on a rectangular plate. The Journal of the Acoustical Society of America 109 (2000), 2197 - 2202.

[8] Chaigne, A., Lambourg, C.: Time-domain simulation of damped impacted plates, I. Theory and experiments. The Journal of the Acoustical Society of America 109 (2001), 1422 - 1432.

[9] Warburton, G.: The Vibration of Rectangular Plates. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 168 (1954), 371 - 384.

[10] Chaigne, A., Doutaut, V.: Numerical simulations of xylophones. I. Time-domain modelling of the vibrating bars. The Journal of the Acoustical Society of America 101 (1997), 539 - 557.

[11] Putra, A., Thompson, D.J.: Sound radiation from rectangular baffled and unbaffled plates. Applied Acoustics 71 (2010), 1113 - 1125.

[12] Neri, J., Depalle, P.: Fast Partial Tracking of Audio with real-time Capability trough linear programming. Proceedings of the 21st International Conference on Digital Audio Effects (2018), 326 - 333.

[13] Aramaki, M., Besson, M.: Controlling the Perceived Material in an Impact Sound Synthesizer. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing 19 (2011), 301 - 314.

[14] Cremer, L., Heckl M.: Structure-Borne Sound. Springer Verlag, Berlin, 2005.