The preterm baby in the bass booster
Zur Frage der A-Bewertung bei Pegelmessungen in Inkubatoren

Christoph Reuter[1], Marcus Mäder[2], Isabella Czedik-Eysenberg[1], Lisa Bartha-Doering[3], Philipp Deindl[4], Matthias Bertsch[5], Angelika Berger[3], Vito Giordano[3]

[1] *Universität Wien, 1090 Wien, E-mail: christoph.reuter@univie.ac.at*
[2] *Institut für Akustik und Schwingungstechnik, 80686 München, E-Mail: info@maeder-bi.de*
[3] *Universitätsklinik für Kinder- und Jugendheilkunde, Medizinische Universität Wien, 1090 Wien, E-mail: vito.giordano@meduniwien.ac.at*
[4] *Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf, 20251 Hamburg, E-mail: p.deindl@uke.de*
[5] *MDW - Universität für Musik und Darstellende Kunst, 1030 Wien, E-mail: bertsch@mdw.ac.at*

Die akustische Situation im Inkubator

Während im Durchschnitt 0,1-0,3% aller Neugeborenen an Hörstörungen oder einem Hörverlust leiden, liegt diese Rate bei Frühgeborenen zwischen 2 und 10% [1]. Im Alter von drei Jahren sind bei nahezu 50% der Frühgeborenen Defizite im Spracherwerb feststellbar [2][3]. Betrachtet man vor diesem Hintergrund die in Inkubatoren gemessenen Geräuschpegel, so fällt auf, dass diese meist deutlich höher liegen als der von der American Academy of Pediatrics (AAP [4]) empfohlene Pegel von 45 dB. In den meisten Fällen liegt der Ruhepegel in Inkubatoren bei ca. 57 dB und steigt beim Hantieren / Öffnen der Box auf Spitzenpegel von 91-114 dB an (s.u.).

Die akustische Situation im Inkubator zeichnet sich vor allem durch einen hohen Innengeräuschpegel aus, der besonders während der Beatmung im hochtönigen Bereich stark ansteigen kann, während der Ruhepegel im Mutterleib zwar auch bei ca. 57 dB liegt, hier jedoch die tieffrequenten Anteile besonders vorherrschend sind [5]. Durch die Wände der Inkubatorbox werden von außen kommende Geräusche und Stimmen im Inkubator stark gedämpft, während im Mutterleib unterhalb von 300 Hz die Schallübertragung nahezu der in der Luft entspricht und oberhalb von 300 Hz eine Dämpfung um ca 5dB/Okt. einsetzt [6]. Körperschall-auslösende Kontakte mit dem Inkubator (Klopfen, etwas auf den Inkubator ablegen, Türen) werden im Inkubator stark verstärkt (s.u.), während im Mutterleib hauptsächlich die Stimme der Mutter durch Körperschall übertragen wird [6]. Hinzu kommt, dass das Kind im Mutterleib so gut wie keinen impulshaften oder abrupt einsetzenden Schallen ausgesetzt ist, im Inkubator jedoch schon. Da die Inkubatorbox ein mit Luft gefüllter Hohlraum ist, muss darüber hinaus im Inkubator von einer starken und dezidierten Resonanz im tieffrequenten Bereich ausgegangen werden, während die für den Mutterleib bislang berechneten Resonanzen oberhalb von 10 kHz liegen und dadurch auf die Hörentwicklung des Embryos so gut wie keine Auswirkung haben sollten [7]. Die bedrückende akustische Situation im Inkubator wurde auch im Kontext von [8] als ein interaktives VR-Erlebnis unter [9] bereitgestellt.

Gemessene Pegelwerte im Inkubator

Um die Pegelwerte bei knapp 50 typischen Situationen zu erfassen, wurden im Simulationsraum des Wiener Allgemeinen Krankenhauses innerhalb und außerhalb eines Inkubators (Dräger Isolette 8000) jeweils ein Esper K4 Mess-mikrofon aufgestellt:

- Innerhalb des Inkubators: am Ohr einer Simulationspuppe, 37 cm unter der Decke der Inkubatorbox.
- Außerhalb des Inkubators: 37 cm oberhalb der Inkubatorbox (gespiegelt zum Ohr der Simulationspuppe).

Beide Mikrofone wurden bei 1000 Hz auf 114 dB_{SPL} kalibriert. Zusätzlich fand ein Pegel-Abgleich mit einem NTi XL2 Acoustic Analyzer statt.

Abbildung 1: Positionierung der Messmikrofone zur Pegelmessung innerhalb und außerhalb des Inkubators Dräger Isolette 8000.

Um die gemessenen Pegelwerte mit denen aus der Literatur vergleichen zu können, wurden sie sowohl in dB_{SPL} als auch in dB_A erhoben.

Die in der Literatur zu findenden Werte lassen sich hauptsächlich in Messungen des Ruhepegels, der Respiratorgeräusche, der Türgeräusche sowie auf die Messung von Körperschallquellen aufteilen, wie z.B. das Ablegen von Objekten auf den Inkubatordeckel oder auch das Klopfen an die Inkubatorwand (weitere in der Messung erfasste Schallquellen wie Alarmgeräusche, Wassergeräusche und Stimmen bzw. Konversation werden an anderer Stelle vergleichend ausgewertet).

Tabelle 1: Pegelwerte in dB_A und dB_{SPL} aus der Literatur sowie aus eigener Messung für verschiedene Situationen.

Messung	dB_A in der Literatur	dB_A eigene Messung	dB_{SPL} in der Literatur	dB_{SPL} eigene Messung
Ruhepegel	38-79	51	36-80	63
Respirator	51-73	64-85	80-83	64-93
Türgeräusche	67-111	75-100	91-114	81-101
Objekte auf Inkubator	71-108	95-98	62-64	95-99
An Inkubator klopfen	68-110	87	130-140	92

Literaturquellen für dB_A-Messungen: [8][10][11][12][13][14][15][16][17][18][19][20][21][22][23], Literaturquellen für dB_{SPL}-Messungen: [8][11][12][13] [17] [24][25][26][27].

Beim Vergleich der Quellen fällt auf, dass es weitaus mehr Pegelmessungen an Inkubatoren in dB_A gibt als in dB_{SPL}, während in den Empfehlungen der American Academy of Pediatrics [4] zwischen dB_A und dB_{SPL} erst gar nicht unterschieden wird. Dies führt zu der Frage nach der Sinnhaftigkeit von dB_A-Messungen an Inkubatoren:

dB_A oder dB_{SPL} bei Pegelmessungen an Inkubatoren?

Die Pegelmessung mit A-Bewertung wurde ursprünglich für die Berücksichtigung der frequenzabhängigen Sensitivität des Ohrs entlang der 40-Phon-Kurve eingeführt [27]. Die damals eingeführte A-Bewertung entspricht jedoch nicht ganz der 40-Phon-Kurve. Breitbandige Geräusche werden um 10-20 dB zu niedrig eingeschätzt [28]. Bei einem Vergleich der 40-Phon-Kurve mit der Kurve für die A-Bewertung wird deutlich, dass sowohl die Pegel tiefer Frequenzen (unter 400 Hz) als auch die Pegel hoher Frequenzen (über 5000 Hz) in A-Bewertung gemessen niedriger ausfallen als sie eigentlich sind (sowohl gegenüber der 40-Phon-Kurve als auch gegenüber dem dB_{SPL}-Pegel).

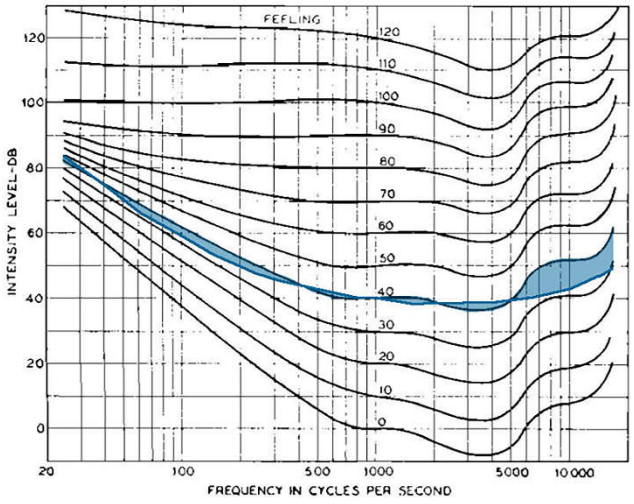

Abbildung 2: Kurven gleicher Lautstärke (Isophonenkurven) und davon abweichende A-Bewertung [nach 29].

Darüber hinaus entspricht die Hörschwelle von Neugeborenen keinesfalls der eines erwachsenen Menschen: Während die Außenohrkanal-Eigenresonanz beim erwachsenen Menschen bei ca. 2,7 kHz liegt, liegt sie bei Neugeborenen bei ca. 6 kHz [30]. Dies hat entsprechende Konsequenzen für die Kurven gleicher Lautstärke, die bei Neugeborenen entsprechend verschoben sind, so dass auch aus dieser Perspektive eine Pegelmessung mit A-Bewertung bei Inkubator-Schallen sinnlos ist bzw. wenig Aussagewert hat.

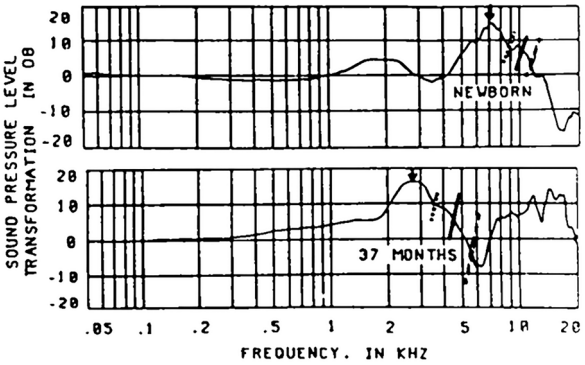

Abbildung 3: Außenohrkanal-Übertragungsfunktion von 26 Babys im Alter von 0 Monaten (oben) vs. im Alter von 37 Monaten (unten)[30].

Resonanzeigenschaften des Inkubators

Auswirkungen auf den Pegel

Beim Dräger Isolette 8000 Inkubator konnte eine Hauptresonanz bei 97 Hz gemessen werden. Hier findet eine Verstärkung des Schalls um 28 dB statt. Diese Hauptresonanz lässt sich sowohl in der realen Messung als auch in der numerischen Simulation der Inkubatorbox finden [31].

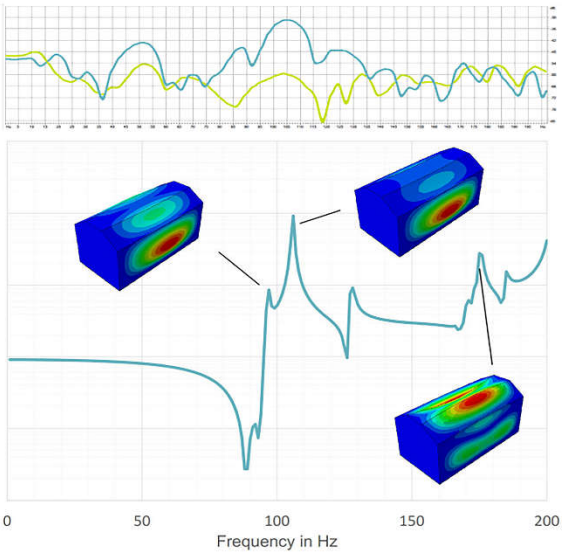

Abbildung 4: Gemessene (oben) und simulierte (unten) Resonanzeigenschaften des Inkubators.
— Anregungsimpuls, — Impulsantwort [31]

Auswirkungen auf andere Klangeigenschaften

Die Auswertung der klanglichen Eigenschaften der erhobenen Geräusche mithilfe aktueller Signalanalyse-Libraries [32][33][34][35][36] ergab, dass sich die Aus-

wirkungen der Inkubatorbox auf Luftschall-Geräusche (bei Klangquellen außerhalb des Inkubators) recht gut anhand von drei Merkmalen beschreiben lassen:

• **Pitch Salience**: nimmt innerhalb des Inkubators zu (r=-0,458, p<0,001), d.h. innerhalb des Inkubators haben die Geräusche im Vergleich zu außen einen eher tonalen Charakter.

• **Timbral Booming**: nimmt innerhalb des Inkubators zu (r=0,790, p<0,001), d.h. innerhalb des Inkubators werden Geräusche im Vergleich zu außen eher als dröhnender wahrgenommen

• **Spectral Centroid**: nimmt innerhalb des Inkubators ab (r=0,604, p<0,001), d.h. innerhalb des Inkubators werden Geräusche im Vergleich zu außen eher als dumpfer wahrgenommen.

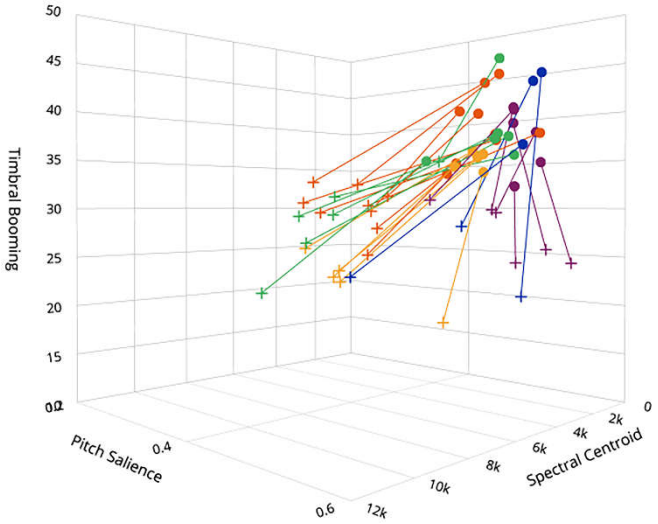

Abbildung 5: Klangeigenschaften von Alarmklängen, Konversation, Inkubatortüren und –klappen, NICU-Umgebung und Wasserversorgung außerhalb und innerhalb des Inkubators, interaktiver Graph mit Klangbeispielen unter [37].

Ähnlich sieht es bei körperschallgeprägten Geräuschen aus, die sich innerhalb des Inkubators ebenfalls durch einen Anstieg der Pitch Salience auszeichnen sowie durch eine Abnahme der Spectral Bandwidth (siehe Abbildung 6):

• **Pitch Salience**: nimmt innerhalb des Inkubators zu (r=0,894, p<0,001), d.h. innerhalb des Inkubators haben die Geräusche im Vergleich zu außen einen eher tonalen Charakter.

• **Spectral Bandwidth**: nimmt innerhalb des Inkubators ab (r=-0,611, p=0,004), d.h. innerhalb des Inkubators werden Geräusche im Vergleich zu außen eher als dumpfer wahrgenommen

Bei Klängen, die innerhalb des Inkubators entstehen wie z.B. Beatmungs- oder Absauggeräusche, zeigen sich die deutlichsten Unterschiede zwischen innerhalb und außerhalb des Inkubators ebenfalls in der durch die Inkubatorresonanzen hervorgerufenen erhöhten Pitch Salience im Inkubator und damit zusammenhängend mit einer deutlicheren Ausprägung des stärksten spektralen Maximums (siehe Abbildung 7):

• **Pitch Salience**: nimmt innerhalb des Inkubators zu (r=0,624, p<0,001), d.h. innerhalb des Inkubators haben die Geräusche im Vergleich zu außen einen eher tonalen Charakter.

• **Spectral StrongPeak**: nimmt innerhalb des Inkubators zu (r=0,661, p=0,005), d.h. innerhalb des Inkubators ist das spektrale Maximum ausgeprägter als außerhalb des Inkubators.

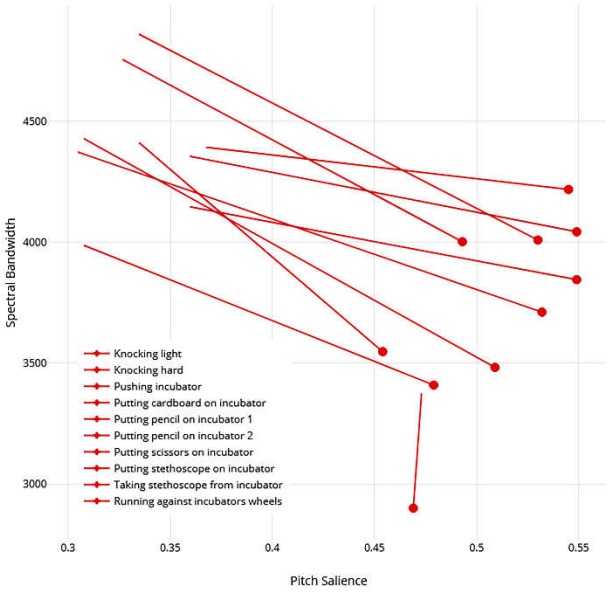

Abbildung 6: Klangeigenschaften von körperschallgeprägten Geräuschen außerhalb und innerhalb des Inkubators, interaktiver Graph mit Klangbeispielen unter [37].

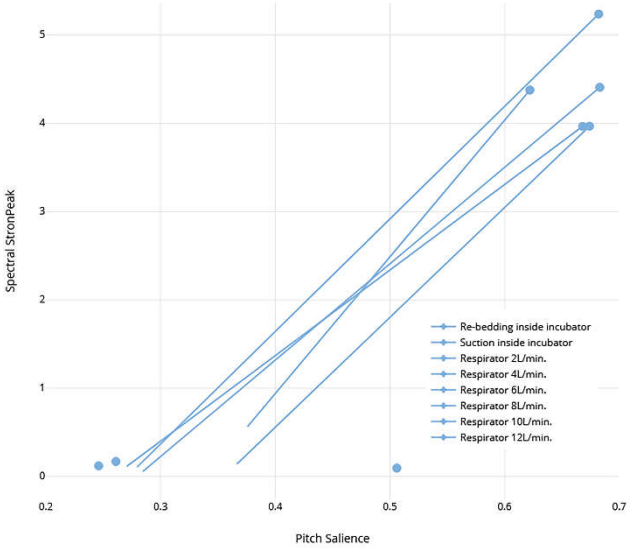

Abbildung 7: Klangeigenschaften von Geräuschen, die im Inkubator entstehen, außerhalb und innerhalb des Inkubators gemessen, interaktiver Graph mit Klangbeispielen unter [37].

Fazit und Zusammenfassung

Pegelmessungen mit A-Bewertung an Inkubatoren sind aus mehreren Gründen nicht empfehlenswert:

1. Die gemessenen Schallpegel liegen sowohl weit oberhalb der 40 Phon-Kurve als auch weit oberhalb der von der American Academy of Pediatrics [4] empfohlenen Grenze von 45 dB (egal ob in dB_A oder dB_{SPL} gemessen).
2. Breitbandige Schalle fallen bei Messungen in A-Bewertung meist niedriger aus als sie eigentlich sind.
3. Die Hörschwelle von Neugeborenen — und damit die Kurven gleicher Lautstärke — unterscheiden sich stark von

denen erwachsener Menschen, weswegen Pegelmessungen in dB_A im Kontext von Früh-/Neugeborenen nicht adäquat sind. 4. Besonders die tiefen Frequenzen werden bei Messungen in A-Bewertung nicht mehr richtig erfasst.

Gerade die in Inkubatorboxen stark wirkende tieffrequente Hauptresonanz (hier bei 97 Hz) bleibt bei Pegelmessungen mit A-Bewertung völlig außen vor. Der Einfluss der Eigenresonanzen der Inkubatorbox zeigt sich besonders in der Veränderung der Klangeigenschaften beim Vergleich von innerhalb und außerhalb des Inkubators gemessener Geräusche: Luftschall-Geräusche im Inkubator klingen tonaler, dröhnender und dumpfer (erhöhte Pitch Salience, erhöhtes Timbral Booming und abgesenkter Spectral Centroid im Inkubator). Körperschall-Geräusche klingen im Inkubator ebenfalls tonaler und dumpfer (erhöhte Pitch Salience und verringerte Spectral Bandwidth im Inkubator), während im Inkubator entstehende Geräusche beim Vergleich zwischen Innen und Außen innerhalb des Inkubators vor allem tonaler ausgeprägt sind (erhöhte Pitch Salience und Spectral StrongPeak).
Diese Klangeigenschaften, die starke tieffrequente Inkubator-Resonanz sowie Pegelangaben in dB_{SPL} sollten sowohl bei der Entwicklung als auch bei der Bewerbung von Inkubatoren im Vordergrund stehen, wenn es darum geht zum Erhalt der Hörfähigkeit von Frühgeborenen beizutragen.

Literatur

[1] Wroblewska-Seniuk, K. et al..: Hearing impairment in premature newborns. PLoS ONE 12(9): e0184359.

[2] Foster-Cohen, S. et al.: Early delayed language development in very preterm infants. J. of Child Lang. 34(3), 2007, S. 655–675.

[3] Ribeiro, L.A. et al.: Attention problems and language development in preterm low-birth-weight children. BMC Pediatrics 11(59), 2011.

[4] American Academy of Pediatrics: Noise: A Hazard for the Fetus and Newborn. Pediatrics 100(4), 1997, S. 724–727.

[5] Satt, B.J.: An investigation into the acoustical induction of intrauterine learning. Los Angeles, 1984.

[6] Abrams, R.M. et al.: Fetal Music Perception. Music Perception 15(3), S. 307–317.

[7] Diwan, G.C. et al.: Computational Studies on the Acoustics of Womb. UKACM, London 2019.

[8] Bertsch, M. et al.: The "Sound of Silence" in a Neonatal Intensive Care Unit. Frontiers in Psychology 11:1055, 2020.

[9] VR Incubator Experience, URL: `https://muwiserver.synology.me/inkubator`

[10] DePaul, D. et al.: Environmental noise in the neonatal intensive care unit. J. of Perinatal & Neonatal Nursing 8(4), 1995, S. 71–76.

[11] Falk, S.A. et al.: Incubator Noise and Possible Deafness. Archives of Otolaryngology 97, 1973, S. 385–387.

[12] Blennow, G. et al.: Noise levels in infant incubators (Adverse Effects?). Pediatrics 53(1), 1974, S. 29–32.

[13] Bess, F.H. et al.: Further Observations on Noise Levels in Infant Incubators. Pediatrics 63(1), 1979, S. 100–106.

[14] Anagnostakis, D. et al.: Noise pollution in neonatal units. Acta Paediatrics Scandinavia 69, 1980, S. 771–773.

[15] Thomas, K.A.: How the NICU environment sounds to a preterm infant. MCN 14, 1989, S. 249–251.

[16] Nzama, N.: Noise in a neonatal unit. Johannesburg 1992.

[17] Abril, A. et al.: Review of noise in neonatal intensive care units. J. of Physics, 012038, 2007.

[18] Altuncu, E. et al.: Noise levels in neonatal intensive care unit and use of sound absorbing panel in the isolette. Int. J. of Pediatric Otorhinolaryngology 73, 2009, S. 951–953.

[19] Lasky, R.E. et al.: Noise and light exposures for extremely low birth weight newborns during their stay in the neonatal intensive care unit. Pediatrics 123, 2009, S. 540–546.

[20] Liu, W.F.: The impact of a noise reduction quality improvement project upon sound levels. J. of Perinatology 30, 2010, S. 489–496.

[21] Berg, A.L. et al.: Monitoring Noise Levels in a Tertiary Neonatal Intensive Care Unit. Contemporary Issues in Communication Science and Disorders 37, 2010, S. 69–72.

[22] Marik, P.E. et al.: Neonatal incubators. Pediatrics and Critical Care Medicine 13(6), 2012, S. 685–689

[23] Duran, R. et al.: The effects of noise reduction by earmuffs on the physiologic and behavioral. International J. of Pediatric Otorhinolaryngology 76, 2012, S. 1490–1493.

[24] Seleny, F.L.: Noise Characteristics in the Baby Compartment of Incubators. American J. of Diseases of Children 117, 1969, S. 445–450.

[25] Benini, F., et al.: Evaluation of Noise in the Neonatal Intensive Care Unit. American J. of Perinatology 13(1), 1996, S. 37–41.

[26] Surenthiran, S. et al.: Noise levels within the ear and post-nasal space in neonates in intensive care. Archive Diseases in Childhood Foetal and Neonatal Ed 88, 2003, S. F315–F318.

[27] McCurdy, R.G.: Tentative Standards for Sound Level Meters. Electrical Engineering, March 1936, S. 260–263.

[28] Reichardt, W.: Lautstärke, Lautheit, Lärm. J. of Audiological Technique 5-6, 1966, S. 2–16.

[29] Fletcher, H, et al.: Loudness, its definition, measurement and calculation. JASA 5, 1933, S. 82–108.

[30] Kruger, B.: An Update on the External Ear Resonance in Infants and Young Children. Ear and Hearing 8(6), 1987, S. 333–336.

[31] Maeder, M. et al.: Vibroacoustic analysis of an incubator. 47. GNPI, Wien 2021.

[32] MIRToolbox, URL: `https://www.jyu.fi/hytk/fi/laitokset/mutku/en/research/materials/mirtoolbox`

[33] Essentia, URL: `https://essentia.upf.edu`

[34] AudioCommons Timbral Models, URL: `https://www.audiocommons.org`

[35] MiningSuite, URL: `https://olivierlar.github.io/miningsuite/`

[36] Brüel & Kjaer: BK Connect, URL: `https://bkconnect.bksv.com`

[37] Interaktive Graphen zum Artikel, URL: `https://www.univie.ac.at/muwidb/inkubatorbox`