The Feature Looks Bright.
Einfluss psychoakustischer Parameter in Musik auf die Pupillendilatation

Marik Roos[1], Veronika Weber[2], Dijana Popovic[2], Felix Klooss[2], Christoph Reuter[1]
[1] *Institut für Musikwissenschaft, Universität Wien, E-Mail:marik.roos@univie.ac.at*
[2] *MediaLab, Universität Wien*

Hintergrund

Das LC-NE-System: Der Locus Coeruleus (LC) ist für die Produktion von etwa 95% des Noradrenalins (NE) im Gehirn verantwortlich und reguliert direkt wie indirekt Arousal, Stressreaktionen und sowohl die Lenkung (Selektivität), als auch die Aufrechterhaltung (Intensität) von Aufmerksamkeit [1][2]. Nicht nur die pathologische Relevanz des LC-NE-Systems für neurodivergente Symptomatiken von z. B. Autismus, AD(H)S, Parkinson, Depression, Epilepsie etc. ist bereits gut erforscht [3][4][5], sondern ebenso die Beobachtbarkeit der LC-Aktivität mittels Eye-Tracking [6][7]. Die Pupillendilatation ist hierbei simultan zur gemessenen BOLD-Aktivität im LC [8].

Predictive Processing: Gemäß Predictive Processing-Framework [9] liegt die Hypothese nahe, dass für die Attribution von Salienz in Musikwahrnehmung nicht nur die allgemeine Vorerfahrung mit Musik, sondern ebenso die adäquate Fähigkeit zur Erstellung eines Vorhersagemodells über musikalische Kontexte relevant ist. Folglich wird angenommen, dass Personen mit höherem Predictive Processing Impairment (PPI [10]) während der Rezeption unbekannter Musikstücke vermehrt tonische LC-NE-Aktivität sowie wenig bzw. kurze phasische Aktivität zeigen [11][12].

Pupillenreflexe lassen sich jedoch nicht nur auf Licht beobachten, sondern ebenso auf semantische Entsprechungen von Helligkeit in geschriebener Sprache, visuellen sowie akustischen Reizen [14][15].

Ziel

In dieser Studie soll der kovariierende bzw. moderierende Einfluss psychoakustischer Parameter in Popsongs auf den Zusammenhang zwischen Stimulus-evozierter Aufmerksamkeit und Pupillendilatation untersucht werden.

Methode

N=39 Versuchspersonen wurden mittels Eye-Tracking durch SR-Research Eyelink 1000 Plus im Labor mit kontrollierter Helligkeit während der Musikrezeption aufgezeichnet. Zunächst wurden Baselines der Pupillengröße auf schwarzem, grauem und weißem Bildschirm ermittelt und anschließend schauten die Versuchspersonen während der Musikrezeption auf eine kontrastarme, bewegliche Wolke, um den Fokus auf den Bildschirm zu erleichtern.

Anschließend machten die Versuchspersonen Angaben zu ihrem Erleben und Verhalten (Introspektives Predictive Processing Inventar [10]) sowie ihrer musikalischen Vorerfahrung. Außerdem durften freiwillige Angaben zu bestehenden neuropathologischen Diagnosen gemacht werden, die mit Predictive Processing Impairment assoziiert werden (z. B. Autismus, AD(H)S, Parkinson etc.).

Die Eye-Tracking-Daten wurden gemäß aktuellen Guidelines aufbereitet [13]. Mögliche kovariierende Pupillenreflexe auf semantische Entsprechungen von Helligkeit in geschriebener Sprache sowie akustischen Reizen wurden durch die Analyse psychoakustischer Parameter wie Helligkeit, Perkussivität Rauigkeit, Lautheit und 2-4kHz Bandenergie mittels Feature-Extractor von Isabella Czedik-Eysenberg in Matlab (MIRToolbox [16]) und Python (Praat-Parselmouth [17]) kontrolliert.

Stimuli

In 5 Songs wurden zuvor 26 Cue Points bestimmt, die Aufmerksamkeit evozierende musikalische Ereignisse repräsentieren, z. B. Einsatz von Gesang, stilistische Änderungen, neue Formteile, Modulationen und unkonventionelle Akkordprogressionen.

1. „Never Gonna Let You Go“ – Sérgio Mendes (Tonartwechsel und Akkordprogressionen)
2. „Phasic Trigger“ – Felix Klooss (plötzliche Geräusche, Stil- & Taktwechsel, Synkopen etc.)
3. Unbekanntes Stück aus „21 Jump Street“ (Prototypischer Song, aber unbekannt)
4. „Let it Be“ – The Beatles (Kontrollstück; harmonisch prototypisch und sehr bekannt)
5. „Pisces“ – Jinjer (plötzliche Änderung von Sound, Arrangement und Stil)

Die Analyse der Pupillengröße sowie der psychoakustischen Parameter erfolgte also an 52 musikalischen Ereignissen, jeweils kurz vor und nach einem Cue.

Sechs Versuchspersonen mussten aufgrund unvollständiger Aufzeichnung der Pupillometrie aus verschiedenen Gründen (technische Fehler, Ermüdungserscheinungen etc.) ausgeschlossen werden.

Ergebnisse

Die Audiofeatures wurden anhand der Mittelwerte für den jeweiligen Song und die Pupillengröße anhand der Baseline der jeweiligen Versuchsperson und außerdem für den jeweiligen Song z-transformiert.

Die Versuchspersonen ließen sich post hoc in jeweils 2 Gruppen unterteilen, einmal anhand der musikalischen

Vorerfahrung (N=16 mit geringer und N=17 mit hoher musikalischer Erfahrung) sowie anhand des IPPI-Scores (N=16 mit geringerem und N=17 mit höherem Predictive Processing Impairment). In der Gruppe mit hohem PPI liegt der Mittelwert im Bereich, der in der Normstichprobe des IPPI von neurodivergenten Personen definiert wurde.

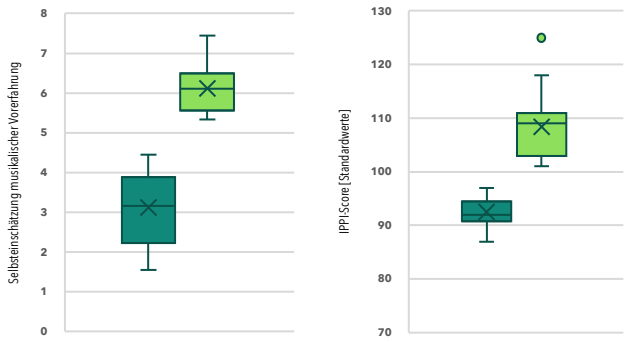

Abbildung 1: Post-hoc Unterteilung in Versuchsgruppen nach IPPI-Score (rechts) sowie musikalischer Vorerfahrung (links).

Tonische und phasische Aktivität

Im Mittel zeigten alle Vpn eine Pupillenerweiterung als Reaktion auf die zuvor gesetzten (Aufmerksamkeit evozierenden) musikalischen Cue Points, die deutlich als phasische bzw. Wechsel in phasische Aktivität erkennbar ist.

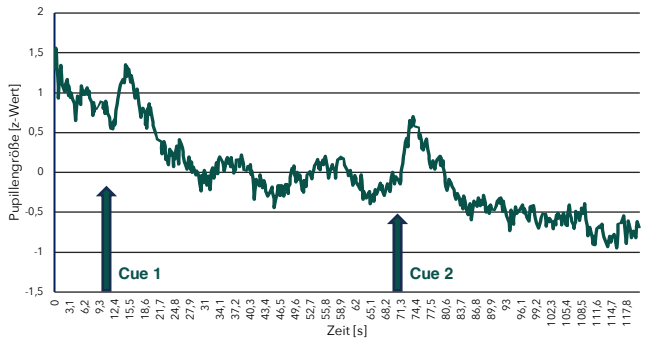

Abbildung 2: Mittlere Pupillengröße aller Vpn über den Verlauf eines Stückes (Jinjer – *Pisces*) mit Cue Points.

Die Gruppe mit IPPI-Scores im neurodivergenten Durchschnitt zeigte der Hypothese gemäß für alle Stimuli geringere Schwankungen in der Pupillengröße (vermehrt tonische Aktivität); für drei Songs mit jeweils mittlerer Effektstärke.

Tabelle 1: Ergebnisse der Gruppenunterschiede zwischen Personen mit hohem bzw. niedrigem Predictive Processing Impairment bzgl. Schwankung der Pupillengröße über einen Stimulus hinweg.

Stimulus	*t*	df	*p*	Cohen's *d*
Pisces	-1.083	31	0.144	-0.377
Phasic Trigger	-0.966	31	0.171	-0.336
Let it Be	-1.990	31	0.028	-0.693
Never Gonna Let You Go	-1.722	31	0.048	-0.600
21 Jump Street	-1.594	31	0.061	-0.555

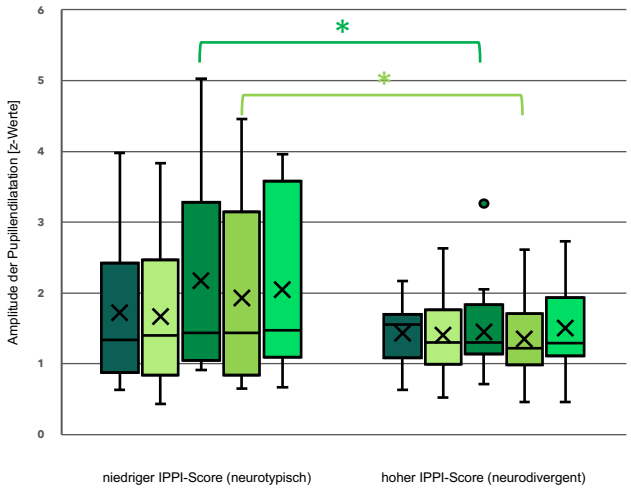

Abbildung 3: Unterschiede in der Abweichung der Pupillendilatation pro Stimulus (z-Werte) zwischen Personen mit niedrigem PPI (links) sowie hohem PPI (rechts).

Einzelne Cues

Nicht alle Cues evozierten dieselbe schematische Aufmerksamkeitsreaktion in den Versuchsgruppen. Häufig entsprach das Ergebnis der Hypothese, dass neurotypische Personen mit signifikanter Pupillenerweiterung auf einen Cue reagieren:

Abbildung 4: Cue 1 „Pisces"; Unterschied zwischen Personen mit höherem (dunkelgrün) und geringerem (hellgrün) PPI (*t*=2.638, *p*=.007, df=30, Cohen's *d*=.933).

Abbildung 5: Reaktion auf Einsatz der Stimme in „Let it Be" von Personen mit mehr (hellgrün) und weniger (dunkelgrün) musikalischer Erfahrung (*t*=2.607, *p*=.007, df=30, Cohen's *d*=.922).

Exekutivfunktionen

Vor allem im bekannten Stück zeigte sich ein signifikant negativer Zusammenhang zwischen Pupillendilatation und Beeinträchtigung der Exekutivfunktionen (r=-.414, p=.019).

Je schlechter die Exekutivfunktionen, desto geringer die Pupillenreaktion.

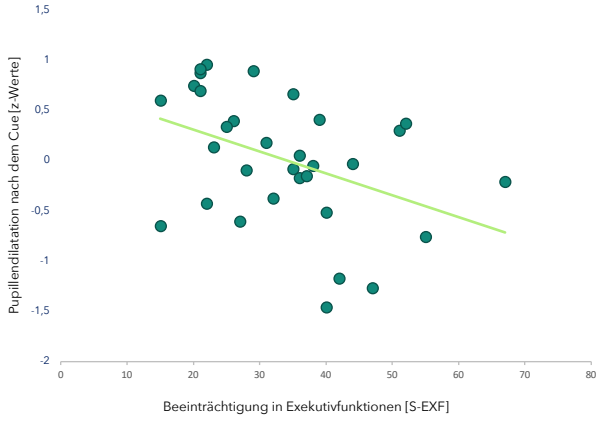

Abbildung 6: Negativer Zusammenhang zwischen gemessener Beeinträchtigung von Exekutivfunktionen (S-EXF im IPPI) und der Pupillenreaktion auf einen Cue.

Psychoakustische Analyse

Grundsätzlich ließen sich Zusammenhänge zwischen Pupillengröße und Audiofeatures beobachten:

- Je höher die (akustische) Helligkeit, desto kleiner die Pupille (r=-.467, p<.001).
- Je höher der Spectral Centroid, desto kleiner die Pupille (r=-.399, p=.003).
- Je stärker die Energy zwischen 2kHz und 4kHz, desto kleiner die Pupille (r=-.411, p=.002).

Tabelle 2: Korrelationen der Audiofeatures mit der mittleren Pupillengröße über alle Cues hinweg.

Audiofeature	Pearson's r	p-value	
Brightness	-0.467	< .001	***
RMS	-0.001	0.996	
Roughness	-0.072	0.608	
Spectral Centroid	-0.399	0.003	**
2 bis 4kHz Energie	-0.411	0.002	**
Harmonic-Percussive Ratio	0.097	0.491	
Loudness	-0.171	0.225	

Im direkten Vorher-Nachher-Vergleich der einzelnen Cues (jeweilige z-transformierte Differenz der Pupillengröße und jeweilige z-transformierte Differenz der Audiofeatures) ließ sich allerdings kein signifikanter Zusammenhang beobachten.

- Kein Zusammenhang zwischen Differenz der Pupillengröße und Differenz der Helligkeit pro Cue (r=.236, p=.123).
- Kein Zusammenhang zwischen Differenz der Pupillengröße und Differenz im SC pro Cue (r=.181, p=.188).
- Kein Zusammenhang zwischen Differenz der Pupillengröße und Differenz der 2-4kHz Energy pro Cue (r=.259, p=.101).

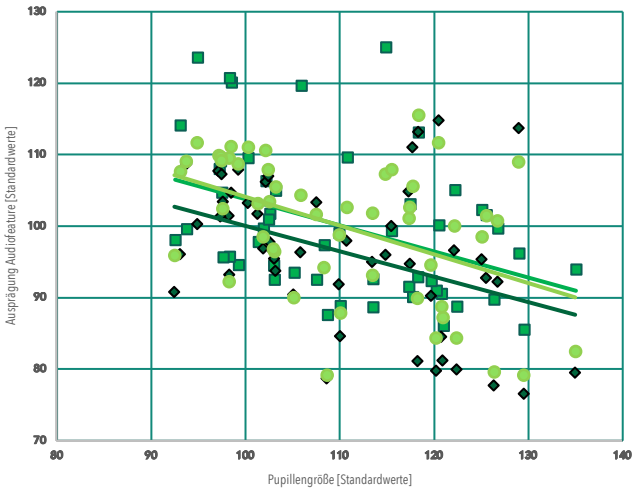

Abbildung 7: Zusammenhänge zwischen Pupillengröße und Helligkeit (hellgrün), Spectral Centroid (dunkelgrün) sowie 2-4kHz Energy (grün) in 52 Ausschnitten (prae- und post-Cue).

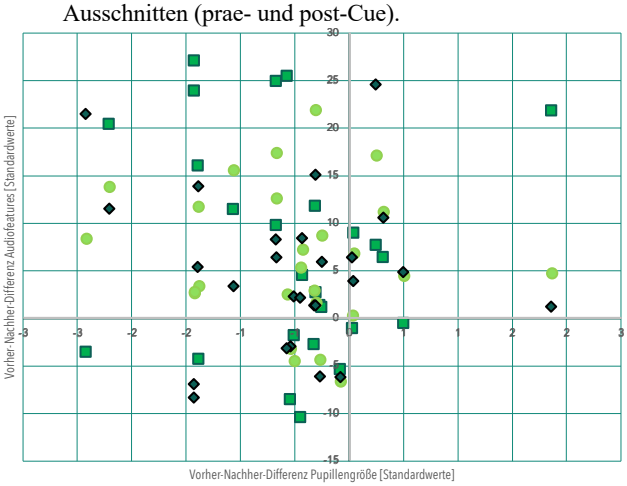

Abbildung 8: (Keine signifikanten) Zusammenhänge zwischen prae- und post-Cue-Differenzen in Pupillengröße und Helligkeit (hellgrün), Spectral Centroid (dunkelgrün) sowie 2-4kHz Energy (grün).

Diskussion

Reaktionsunterschiede auf die einzelnen Cues ließen sich jeweils zwischen beiden Versuchsgruppenpaaren finden. Am häufigsten fiel die Reaktion der Hypothese gemäß stärker bei Personen ohne Predictive Processing Impairment bzw. äquivalent mehr musikalischer Vorerfahrung aus, was in beiden Fällen auf eine leichtere Einschätzbarkeit des Kontexts schließen lässt. Bei einigen wenigen Cues, vor allem im

Kontrollstück „Let it Be“, zeigte sich auch ein umgekehrtes Reaktionsmuster, was auf einen Wechsel zur phasischen Aktivität, also Salience Shifting als Reaktion auf zu hohe Präzision der Vorhersagefehler hindeutet, also ein Reaktionsmuster, das mit dem Brechen einer Erwartungshaltung primär in neurodivergenter Kognition assoziiert wird.

Zusammengefasst können diese beiden Muster folgendermaßen erklärt und durch Ergebnisse der Regressionsanalyse gestützt werden:

1. Personen mit geringerem PPI zeigen stärkere Pupillenerweiterung als Personen mit höherem PPI. Varianzaufklärung für dieses Muster: **IPPI-Score + Musik. Erfahrung** (BF_{10}=11.3, R^2=.420)
2. Personen mit höherem PPI zeigen stärkere Pupillenerweiterung als Personen mit geringerem PPI. Varianzaufklärung für dieses Muster: **IPPI-Score** (BF_{10}=3.506, R^2=.305)

Die musikalische Erfahrung spielt also dann eine Rolle, wenn die Pupillenreaktion als Hinwendung zum Stimulus auf Basis erwarteter Information oder Affirmation zu deuten ist (Muster 1). Neurotypischen Personen erstellen Vorhersagemodelle auf Basis verfügbarer Informationen (musikalische Vorerfahrung) und alle Parameter werden korrekt gewichtet. Ist die Dilatation durch zu präzise Vorhersagefehler erklärbar (Muster 2, neurodivergente Kognition [12]), hat die musikalische Vorerfahrung keinen Einfluss auf die kognitive Verarbeitung, sondern nur das Ausmaß des Predictive Processing Impairments.

Psychoakustische Parameter wie Helligkeit, Spectral Centroid und 2-4kHz Energy korrelieren zwar grundsätzlich mit der Pupillengröße, allerdings scheint der Effekt nicht stark genug zu sein, um die Aufmerksamkeit-evozierte Pupillenerweiterung durch konkrete Änderungen im musikalischen Kontext kovariierend zu beeinflussen, was sich vor allem auch im Vergleich der einzelnen Differenzen pro Cue zeigt.

Literatur

[1] Aston-Jones, G., Rajkowski, J., & Cohen, J. (1999). Role of locus coeruleus in attention and behavioral flexibility. *Biol Psychiatry 46*:1309–1320.

[2] Joshi, S. & Gold, J. I. (2020). Pupil Size as a Window on Neural Substrates of Cognition. *Trends Cogn Sci. 24*(6), 466–480.

[3] Kim, Y., Kadlaskar, G., Keehn, R. M., & Keehn, B. (2022). Measures of tonic and phasic activity of the locus coeruleus-norepinephrine system in children with autism spectrum disorder: An event-related potential and pupillometry study. *Autism Res. 15*(12), 2250–2264.

[4] Bast, N., Poustka, L., & Freitag, C. M. (2018). The locus coeruleus–norepinephrine system as pacemaker of attention – a developmental mechanism of derailed attentional function in autism spectrum disorder. *European Journal of Neuroscience 47*, 115–125.

[5] Polzer, L., Freitag, C. M., Bast, N. (2022). Pupillometric measures of altered stimulus-evoked locus coeruleus-norepinephrine activity explain attenuated social attention in preschoolers with autism spectrum disorder. *Autism Res. 2022 15*(11), 2167–2180.

[6] Kane, G. A., Vazey, E. M., Wilson, R. C., Shenhav, A., Daw, N. D., Aston-Jones, G., & Cohen, J. D. (2017). Increased locus coeruleus tonic activity causes disengagement from a patch-foraging task. *Cogn. Affect. Behav. Neurosci 17,* 1073–1083.

[7] Aston-Jones, G., & Cohen, J. D. (2005). Adaptive gain and the role of the locus coeruleus-norepinephrine system in optimal performance. *J. Comp. Neurol 493,* 99–110.

[8] Murphy, P. R., O'Connell, R. G., O'Sullivan, M., Robertson, I. H., & Balsters, J. H. (2014). Pupil diameter covaries with BOLD activity in human locus coeruleus. *Hum Brain Mapp. 35,* 4140–4154.

[9] Van de Cruys, S., Evers, K., Van der Hallen, R., Van Eylen, L., Boets, B.,de Wit, L. & Wagemans, J. (2014) Precise minds in uncertain worlds: predictive coding in autism. *Psychol. Rev., 121*:649.

[10] Roos, M. (2021). Das introspektive Predictive Processing Inventar (IPPI). Erste Evaluation von Validität und Reliabilität eines neuen Messinstruments. Wissenschaftliche Tagung Autismus Spektrum.

[11] Zhao, S., Chait, M., Dick, F., Dayan, P., Furukawa, S., & Liao, H. I. (2019). Pupil-linked phasic arousal evoked by violation but not emergence of regularity within rapid sound sequences. *Nat Commun. 10*:4030.

[12] Lawson, R. P., Mathys, C. & Rees, G. (2017). Adults with autism overestimate the volatility of the sensory environment. *Nat. Neurosci. 20*, 1293–1299.

[13] Kret, M. E., & Sjak-Shie, E. E. (2018). Preprocessing pupil size data: Guidelines and code. *Behav Res Methods 51,* 1336–1342.

[14] Mathôt, S., Grainger, J., Strijkers, K. (2017). Pupillary Responses to Words That Convey a Sense of Brightness or Darkness. *Psychol Sci. 28*(8):1116–1124.

[15] Zekveld, A. A., Koelewijn, T., & Kramer, S. E. (2018). The Pupil Dilation Response to Auditory Stimuli: Current State of Knowledge. *Trends Hear. 22*:2331216518777174.

[16] Lartillot, O., & Toiviainen, P. (2007). A Matlab Toolbox for Musical Feature Extraction from Audio. *Proceedings of the 10th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx'07).* Bordeaux, France, September 10-15.

[17] Jadoul, Y ., Thompson, B., & de Boer, B. (2018). Introducing Parselmouth: A Python interface to Praat. *Journal of Phonetics 71*, 1–15.