

LITERATUURSTUDIE

---

# Microtonaliteit, gehoor en modaliteit

*De gedempte oscillator als brug tussen  
psychoakoestiek, culturele conditionering en neurale verwerking*

M.J. Hogerheijde

April 2026

*Voorstudie bij het onderzoeksvorstel 'Het Unified Model en het Brein'*

---

Kernwoorden: microtonaliteit, psychoakoestiek, consonantie, culturele conditionering, gedempte harmonische oscillator, predictive coding

## Samenvatting

Deze literatuurstudie onderzoekt microtonaliteit - muzikale intervallen kleiner dan de halve toon - vanuit drie complementaire perspectieven: psychoakoestiek, cross-culturele toonsystemen en neurale verwerking. De studie fungeert als voorstudie bij het onderzoeksvoorstel 'Het Unified Model en het Brein', waarin de gedempte harmonische oscillator wordt voorgesteld als domeinoverschrijdende wiskundige structuur die zowel ruimteakoestiek als neurale oscillaties beschrijft.

De centrale these is dat het microtonaliteitsonderzoek drie lagen blootlegt die direct aansluiten bij het unified model: (1) een biologisch substraat van frequentieafhankelijke neurale resonatoren (het cochlea als filterbank, hersenstamresponsies op harmonische verhoudingen), (2) culturele conditionering die functioneert als een geleerde transferfunctie (categorische waarneming, het Tsimane-onderzoek), en (3) modaliteit als predictive-coding fenomeen waarbij microtonale inflecties de prediction error bepalen. Het Tsimane-onderzoek van McDermott et al. (2016-2025) wordt uitvoerig behandeld als cruciaal bewijs voor de culturele component van consonantiewaarneming.

# 1. Inleiding

Microtonaliteit - het gebruik van intervallen kleiner dan de halve toon van het twaalftoonsysteem - is een fenomeen dat zich bevindt op het snijvlak van fysica, biologie en cultuur. In de Westerse muziektraditie wordt het twaalftoons gelijkzwevende temperament (12-TET) vaak als 'natuurlijk' ervaren, maar dit systeem is een cultureel-historisch compromis dat pas in de achttiende en negentiende eeuw dominant werd. De overgrote meerderheid van de muzikale tradities wereldwijd gebruikt toonsystemen die niet reduceerbaar zijn tot twaalf gelijke halve tonen.

Deze literatuurstudie fungeert als voorstudie bij het onderzoeksvorstel 'Het Unified Model en het Brein' (Hogerheijde, 2026). Dat voorstel stelt dat de gedempte harmonische oscillator - de vergelijking die resonantie en verval in een systeem beschrijft - zowel akoestische ruimteresonantie als neurale oscillaties beschrijft, en dat het brein binnenkomende signalen verwerkt via deconvolutie: het aftrekken van de geleerde transferfunctie van de omgeving.

Het microtonaliteitsonderzoek biedt een unieke testcase voor dit model, omdat het precies de vragen stelt die het unified model moet beantwoorden:

- Hoe verwerkt het cochlea - zelf een reeks gedempte resonatoren - intervallen die buiten het aangeleerde raster vallen?
- Wat is de rol van culturele blootstelling in het vormen van de transferfunctie die het brein gebruikt om toonhoogte te categoriseren?
- Hoe bepalen microtonale inflecties de prediction error die modaliteit constitueert?

De studie is gestructureerd rond drie lagen - biologie, cultuur, modaliteit - die convergeren in de these dat microtonale waarneming een manifestatie is van hetzelfde frequentieafhankelijke resonantie- en vervalsproces dat het unified model beschrijft.

## 2. Psychoakoestiek van microtonale waarneming

### 2.1 Het cochlea als gedempte-resonatorenbank

Het binnenoor verwerkt geluid via het basilair membraan, dat functioneert als een reeks van circa 3.500 bandpassfilters, elk getuned op een specifieke frequentie. De Gammatone-filterbank (Patterson & Holdsworth, 1996) is het standaard computationele model. Elk filter gedraagt zich als een gedempte harmonische oscillator: het resonanceert op zijn eigenfrequentie en sterft uit met een karakteristieke dempingsfactor.

Dit is **exact dezelfde vergelijking** als die van de akoestische ruimteresnantie in het unified model. Het verschil zit in de schaal: waar een kathedraal resonanties heeft met vervaltijden van seconden, opereert het cochlea met vervaltijden van milliseconden. Maar de wiskundige structuur is identiek: frequentieafhankelijk verval, waarbij hogere frequenties sneller uitsterven dan lagere.

## 2.2 Het kleinst waarneembare verschil (JND)

De just noticeable difference voor toonhoogte varieert systematisch met frequentie, wat direct volgt uit de filterbankeigenschappen van het cochlea:

| Context                   | JND         | Implicatie                        | Bron                  |
|---------------------------|-------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Melodisch, getraind       | 5-6 cent    | Beneden kleinste microtonale stap | Zarate et al. (2012)  |
| Melodisch, ongetraind     | 15-25 cent  | Rond kwarttoon (50 cent)          | Burns & Ward (1978)   |
| Harmonisch (gelijktijdig) | 1-2 cent    | Zwevingen detecteerbaar           | Plomp & Levelt (1965) |
| Laag register (< 200 Hz)  | ca. 26 cent | Verminderd onderscheid            | Moore (2012)          |

Tabel 1. Just noticeable difference voor toonhoogte in verschillende contexten.

Het feit dat de JND frequentieafhankelijk is - scherper in het middenregister (300-3000 Hz, het spraakgebied), zwakker in de extremen - ondersteunt de hypothese uit het unified model dat het auditieve systeem een frequentieafhankelijke transferfunctie heeft die is geoptimaliseerd voor ecologisch relevante signalen.

## 2.3 Categorische waarneming: de geleerde transferfunctie

Een cruciaal fenomeen voor de verbinding met het unified model is categorische waarneming. Burns en Ward (1978) toonden aan dat muzikanten intervallen niet als een continuum waarnemen, maar als discrete categorieën: een toon wordt gehoord als 'grote tert' of 'kleine tert', niet als '387 cent'.<sup>1</sup>

In termen van het unified model is dit een **geleerde transferfunctie**: het brein heeft door blootstelling aan een specifiek toonsysteem een intern model opgebouwd dat

<sup>1</sup>Burns, E.M. & Ward, W.D. (1978). Categorical perception - phenomenon or epiphenomenon. JASA, 63(2), 456-468.

binnenkomende toonhoogtes snapt naar de dichtstbijzijnde categorie. De prediction error - het verschil tussen waargenomen en verwachte toonhoogte - bepaalt of iets als 'zuiver' of 'vals' klinkt.

Paradoxaal genoeg blijken niet-musici soms sneller te leren microtonale schalen te onderscheiden dan musici, juist omdat hun categorische grenzen minder rigide zijn (Loui, Wessel & Hudson Kam, 2010). Dit suggereert dat de aangeleerde transferfunctie zowel een hulpmiddel als een obstakel is: zij optimaliseert de verwerking binnen het bekende systeem, maar bemoeilijkt de perceptie van systemen die buiten het raster vallen.

### 3. Cross-culturele microtonale toonsystemen

De diversiteit van toonsystemen wereldwijd vormt het sterkste bewijs dat de koppeling tussen akoestisch signaal en muzikale betekenis cultureel gemedieerd is. Tabel 2 geeft een overzicht.

| Systeem         | Stappen per octaaf | Kleinste stap | Basis                    | Bijzonderheden  |
|-----------------|--------------------|---------------|--------------------------|---|
| 12-TET          | 12                 | 100 cent      | Gelijke verdeling        | Compromis: kwint 700 i.p.v. 702 cent, grote terts 400 i.p.v. 386 cent     |
| Arabisch maqam  | ca. 24             | ca. 50 cent   | Kwarttonen (theoretisch) | Praktijk wijkt af; neutrale terts 340-360 cent, niet exact 350            |
| Turks makam     | 53                 | ca. 22,6 cent | Holdriaans comma         | Yarman (2008): officieel 24-toonsmodel klopt niet met uitvoeringspraktijk |
| Indiaas shruti  | 22                 | Variabel      | Ongelijke verdeling      | Gamaka (microtonale ornamenten) constitutief voor raga-identiteit         |
| Gamelan slendro | 5                  | ca. 240 cent  | Ruw gelijk               | Stemming past bij inharmonisch spectrum (Sethares, 2005)                  |
| Partch 43-toon  | 43                 | Variabel      | 11-limiet JI             | Intervallen als 11:8 (551 cent), 7:4 (969 cent)                           |

Tabel 2. Overzicht van microtonale toonsystemen wereldwijd.

#### 3.1 Sethares' inzicht: consonantie als functie van timbre

Het werk van William Sethares vormt een sleutelbijdrage voor het begrip van de relatie tussen stemming en waarneming.<sup>2</sup> Zijn kernargument is dat consonantie en dissonantie geen vaste eigenschappen van intervallen zijn, maar afhangen van het **timbre** van de klanken. Via dissonantiekrommen - berekend uit de interferentie tussen boventonen - laat Sethares zien dat elk spectrum zijn eigen optimale stemming heeft.

De Indonesische gamelan illustreert dit principe: de metalen klankstaven hebben een inharmonisch spectrum (hun boventonen staan niet in gehele-getalverhoudingen tot de grondtoon). De slendro-stemming met ruwweg gelijke stappen van 240 cent minimaliseert

<sup>2</sup>Sethares, W.A. (2005). *Tuning, Timbre, Spectrum, Scale*. 2nd ed. Springer.

de dissonantie *gegeven dit specifieke timbre*. De toonladder past bij het instrument, niet andersom.

In termen van het unified model is dit een cruciaal inzicht: de transferfunctie van het gehoor is niet alleen cultureel gevormd door blootstelling aan melodische patronen, maar ook door de **spectrale eigenschappen** van de klanken zelf. Het cochlea reageert op frequentieverhoudingen; welke verhoudingen als consonant worden ervaren, hangt af van welke verhoudingen het spectrum aanbiedt.

### 3.2 Het maqam/makam-systeem: microtonaliteit als identiteit

Het Arabische maqam-systeem verdeelt het octaaf theoretisch in 24 stappen, maar deze notationele conventie verhuult een rijkere praktijk. Elke maqam wordt gedefinieerd door een specifiek patroon van ajnas (tetrachorden) met karakteristieke intervallen, een seyir (melodisch pad), en kenmerkende wendingen.<sup>3</sup>

Het Turkse makam-systeem is nog fijner: theoretisch 53 Holdriaanse comma's per octaaf (elk 22,64 cent). Ozan Yarman toonde via pitch-histogrammen van opnames aan dat de werkelijke intonatie van makam-muzikanten niet overeenkomt met het officiële 24-toonsmodel van het Arel-Ezgi-Uzdilek-systeem. Hij stelde alternatieve modellen voor (Yarman-24, Yarman-36, 79-toons qanun-stemming) die beter bij de meetdata passen.

### 3.3 Raga en shruti: microtonale inflectie als expressie

Het Indiase systeem erkent 22 shruti's per octaaf, maar deze vormen geen vast grid. De exacte toonhoogte van een swara hangt af van de melodische richting, de raga-context en de emotionele inhoud. Cruciaal is dat gamaka - microtonale ornamenten zoals meend en andolan - niet decoratief maar **constitutief** zijn voor de raga-identiteit. Dezelfde komal gandhara (verlaagde derde toon) wordt in raga Darbari Kanada lager geïntoneerd dan in raga Jaunpuri.<sup>4</sup>

---

<sup>3</sup>Yarman, O. (2008). 79-Tone Tuning & Theory for Turkish Maqam Music. Dissertatie, Istanbul Technical University.

<sup>4</sup>Partch, H. (1974). Genesis of a Music. 2nd ed. Da Capo Press.

## 4. Het Tsimane-onderzoek

### Culturele conditionering van consonantiewaarneming

Het onderzoeksprogramma van Josh McDermott (MIT) bij de Tsimane in het Boliviaanse Amazonegebied vormt het meest directe empirische bewijs voor de culturele component van toonhoogtewaarneming. Dit onderzoek wordt hier uitvoerig behandeld omdat het rechtstreeks relevant is voor de predictive-coding-hypothese van het unified model.

#### 4.1 De oorspronkelijke studie (McDermott et al., 2016)

McDermott, Schultz, Undurraga en Godoy testten vijf groepen proefpersonen die een gradient van blootstelling aan Westerse polyfone muziek vertegenwoordigen:<sup>5</sup>

| Groep                             | N     | Blootstelling              | Consonantievoordeur    |
|-----------------------------------|-------|----------------------------|------------------------|
| Tsimane (Amazone)                 | 64-50 | Minimaal (monofone muziek) | Niet detecteerbaar     |
| Boliviaans platteland (San Borja) | 26    | Matig                      | Klein maar significant |
| Boliviaanse stad (La Paz)         | 24    | Aanzienlijk                | Matig                  |
| VS niet-musici                    | 25    | Hoog                       | Sterk                  |
| VS musici                         | 23    | Zeer hoog + training       | Zeer sterk             |

Tabel 3. Proefpersoongroepen en consonantievoordeur in McDermott et al. (2016).

#### Stimuli en methode

De studie omvatte vijf experimenten met synthetische tweeklankige akkoorden (dyaden), gezongen tweeklanken, gezongen drieklanken, ruwheidscontroles en niet-muzikale controlestimuli (lachen, happen naar adem). Proefpersonen beoordeelden de aangenaamheid op een vierpuntsschaal, visueel weergegeven als smileys van toenemende grootte om niet-geletterde deelnemers te faciliteren.

#### Kernresultaten

De Tsimane beoordeelden consonante en dissonante akkoorden als **even aangenaam**. De consonantievoordeur was statistisch niet detecteerbaar in deze groep. De voorkeur nam

<sup>5</sup>McDermott, J.H., Schultz, A.F., Undurraga, E.A. & Godoy, R.A. (2016). Indifference to dissonance in native Amazonians reveals cultural variation in music perception. *Nature*, 535, 547-550.

monotoon toe met blootstelling aan Westerse muziek over de vijf groepen. De interactie-effecten waren zeer sterk significant ( $p < 0.00000001$  voor synthetische intervallen).

Cruciaal: alle groepen, inclusief de Tsimane, toonden **aversie tegen akoestische ruwheid** (zwevingen tussen nabije frequenties) en vergelijkbare esthetische responsies op niet-muzikale geluiden. Het verschil zit specifiek in de *esthetische evaluatie* van harmonische verhoudingen, niet in de sensorische verwerking.

## 4.2 De dissociatie: perceptie vs. evaluatie

McPherson et al. (2020) verdiepten dit inzicht met een experiment over perceptuele fusie.<sup>6</sup> Zowel VS- als Tsimane-proefpersonen toonden **grotere perceptuele fusie voor consonante intervallen** (octaaf, kwint, kwart) dan voor dissonante. Dit betekent dat het auditieve systeem universeel de harmonische relatie tussen tonen representeert - consonante intervallen worden vaker als een klank gehoord.

De dissociatie is fundamenteel: het **perceptuele mechanisme** (fusie) is universeel, maar de **esthetische evaluatie** (voorkeur) is cultureel bepaald. In termen van het unified model: de filterbank van het cochlea registreert dezelfde frequentieverhoudingen, maar de geleerde transferfunctie bepaalt welke verhoudingen als aangenaam worden gecategoriseerd.

## 4.3 Octaafequivalentie als cultureel construct

Jacoby et al. (2019) lieten Tsimane- en VS-proefpersonen korte melodien nazingen.<sup>7</sup> Westerse luisteraars transponeerden spontaan naar exacte octaven; Tsimane-deelnemers deden dit niet. Beide groepen toonden wel logaritmische toonhoogteschalen en vergelijkbare beperkingen in toonhoogtebereik - biologische constraints - maar octaafequivalentie bleek cultureel aangeleerd.

Dit resultaat is bijzonder relevant voor het unified model: het suggereert dat de eigenfrequenties van de neurale oscillatoren die toonhoogte representeren biologisch zijn bepaald (logaritmische schaal), maar dat de **categorische structuur** die erop wordt gelegd (octaven, halve tonen, kwarttonen) een geleerde transferfunctie is.

---

<sup>6</sup>McPherson, M.J. et al. (2020). Perceptual fusion of musical notes by native Amazonians suggests universal representations of musical intervals. *Nature Communications*, 11, 2786.

<sup>7</sup>Jacoby, N. et al. (2019). Universal and non-universal features of musical pitch perception revealed by singing. *Current Biology*, 29(19), 3229-3235.

## 4.4 Globalisering en veranderende waarneming

De meest recente studie (McPherson-McNato et al., 2025) kwantificeerde de mate van *global integration* van individuele Tsimane-deelnemers.<sup>8</sup> Kernbevindingen:

- Tsimane met grotere globale integratie toonden een kleine maar significante voorkeur voor consonantie.
- Tsimane met minder globale integratie toonden geen voorkeur, conform de bevinding uit 2016.
- De voorkeur nam progressief toe over de hele gradient: geïsoleerde Tsimane, geïntegreerde Tsimane, plattelandsbolivianen, stadsbolivianen, VS niet-musici.

Dit is direct bewijs dat **globalisering meetbare veranderingen in muziekperceptie induceert**. In unified-modelterminen: de transferfunctie van het brein wordt geleidelijk herschreven door blootstelling aan een nieuw toonsysteem.

## 4.5 Kritieken op het Tsimane-onderzoek

Bowling, Hoeschele, Gill en Fitch (2017) formuleerden vier kritieken:<sup>9</sup>

1. Het ontbrekende octaaf: het meest consonante en cross-cultureel meest gedeelde interval werd niet getest.
2. De vierpuntsschaal is gevoelig voor culturele verschillen in schaalgebruik.
3. De Tsimane prefereerden de kwint wel boven de kleine secunde - een detail dat alleen in de extended data verscheen.
4. De Tsimane gebruiken zelf pentatonische schalen met overwegend consonante intervallen, wat sensitiviteit voor consonantie in de eigen muziekpraktijk suggereert.

Bowling et al. stelden als alternatief de Vocal Similarity Theory (VST) voor: mensen ervaren consonantie op basis van gelijkenis met het spectrum van de menselijke stem. Analyse van 18 opnames van inheemse Amazone-muziek toonde nadruk op eenvoudige frequentieverhoudingen (kleine tertsen, kwint).

---

<sup>8</sup>McPherson-McNato, M.J. et al. (2025). Preferences for consonance are evident in Indigenous Amazonians with higher, but not lower, levels of global integration. *Cognition*, 260, 106102.

<sup>9</sup>Bowling, D.L., Hoeschele, M., Gill, K.Z. & Fitch, W.T. (2017). The nature and nurture of musical consonance. *Music Perception*, 35(1), 118-121.

Infant-studies compliceren het beeld verder: Zentner en Kagan (1998) vonden dat vier maanden oude baby's langer keken naar consonante melodieën. Pasgeborenen van dove ouders toonden dezelfde voorkeur, wat op enige biologische voorbereiding wijst.

De meest gebalanceerde interpretatie is die van Harrison en Pearce (2020), die consonantie modelleerden als composiet van drie factoren: ruwheid, harmoniciteit en culturele familiariteit.<sup>10</sup> Eerola en Lahdelma (2021) vonden dat culturele familiariteit de dominante factor is (46,2 procent verklaarde variantie), gevolgd door ruwheid en harmoniciteit (19,3 procent).<sup>11</sup>

---

<sup>10</sup>Harrison, P.M.C. & Pearce, M.T. (2020). Simultaneous consonance in music perception and composition. *Psychological Review*, 127(2), 216-244.

<sup>11</sup>Eerola, T. & Lahdelma, I. (2021). The anatomy of consonance/dissonance. *Music & Science*, 4.

## 5. Neurale verwerking van microtonale intervallen

### 5.1 Hersenstamresponsies: de biologische laag

Bidelman en Krishnan (2009) toonden aan dat hersenstamresponsies (frequency-following responses) op consonante intervallen robuuster zijn en een sterkere pitch salience opleveren dan die op dissonante intervallen.<sup>12</sup> De ordening van neurale toonhoogte-prominentie volgde precies de hiërarchie van consonantie uit de Westerse muziektheorie: octaaf, kwint, kwart, grote terts, kleine terts, tritoon.

Dit is de biologische laag van het systeem: de hersenstam reageert sterker op eenvoudige frequentieverhoudingen. In unified-modeltermen: de gedempte resonatoren op hersenstamniveau hebben eigenfrequenties die corresponderen met harmonische verhoudingen, en produceren sterkere responsies wanneer het inkomende signaal deze verhoudingen bevat.

### 5.2 Corticale verwerking: de culturele laag

Proverbio et al. (2016) onderzochten via EEG hoe musici en niet-musici reageerden op akkoorden variërend van consonant tot kwarttoonakkoorden.<sup>13</sup> Een vroege N1-component werd gemoduleerd door akkoord-dissonantie in beide groepen, maar een anterieure N2-respons was **alleen bij musici versterkt voor kwarttonen**. Dit suggereert dat muzikale training de gevoeligheid voor microtonale afwijkingen vergroot - de geleerde transferfunctie wordt preciezer.

Een opvallende bevinding was hemisfeerspecialisatie: musici vertoonden dominante verwerking in de linker hersenhelft, niet-musici in de rechter. Dit past bij het bredere patroon dat muzikale expertise leidt tot meer analytische (linkerhemisfeer) verwerking van toonhoogte.

### 5.3 Neurale entrainment en gedempte oscillatoren

Het werk van Large en Palmer (2002) over gekoppelde neurale oscillatoren toont dat eenvoudige frequentieverhoudingen (2:1, 3:2, 4:3) leiden tot stabielere mode-locked states

---

<sup>12</sup>Bidelman, G.M. & Krishnan, A. (2009). Neural correlates of consonance, dissonance, and the hierarchy of musical pitch in the human brainstem. *Journal of Neuroscience*, 29(42), 13165-13171.

<sup>13</sup>Proverbio, A.M. et al. (2016). Brain processing of consonance/dissonance in musicians and controls: a hemispheric asymmetry revisited. *European Journal of Neuroscience*, 44(6), 2340-2356.

in neurale netwerken.<sup>14</sup> Dit verklaart waarom deze intervallen perceptueel prominent zijn, maar het verklaart niet automatisch een esthetische voorkeur - die blijkt cultureel bepaald.

De directe verbinding met het onderzoeksvorstel is het HORN-model van Jaramillo et al. (2025), dat neurale oscillaties modelleert als netwerken van gedempte harmonische oscillatoren.<sup>15</sup> Als neurale oscillatoren inderdaad gedempte resonatoren zijn, dan is hun respons op microtonale stimuli voorspelbaar: intervallen die dicht bij harmonische verhoudingen liggen (3:2, 4:3, 5:4) zullen sterkere en langduriger responsies produceren dan intervallen die er ver van af liggen.

Dit levert een concrete voorspelling op voor Studie 1 van het onderzoeksvorstel: de neurale 'RT60' voor een microtonaal interval dat net naast een harmonische verhouding ligt, zou korter moeten zijn dan voor het harmonische interval zelf - de resonator wordt minder sterk aangeslagen.

---

<sup>14</sup>Large, E.W. & Palmer, C. (2002). Perceiving temporal regularity in music. *Cognitive Science*, 26, 1-37.

<sup>15</sup>Jaramillo, J. et al. (2025). Harmonic oscillator recurrent networks. *PNAS*, 122(3).

## 6. Modaliteit als microtonaal fenomeen

### 6.1 Het fundamentele verschil met 12-TET

In 12-TET zijn modi (Dorisch, Mixolydisch, enz.) puur structureel gedefinieerd door het patroon van hele en halve tonen. Een Dorische toonladder op D en een getransponeerde versie op E klinken identiek qua intervalstructuur. Modale identiteit hangt uitsluitend af van welke abstracte toonhoogteklassen worden gebruikt.

In niet-Westerse tradities is dit fundamenteel anders: **modale identiteit hangt af van precieze intonatie**. Twee maqamat kunnen dezelfde notenset delen maar met verschillende microtonale inflecties. Het verschil tussen maqam Rast (neutrale terts ca. 355 cent) en maqam Nihavend (kleine terts 300 cent) is niet te vangen in 12-TET.

### 6.2 Modaliteit als prediction error

In termen van predictive coding (Friston, 2005) biedt microtonale modaliteit een elegante interpretatie.<sup>16</sup> Het brein onderhoudt een generatief model van de muzikale context - de verwachte toonhoogtes, de verwachte intervalverhoudingen, het verwachte verloop. Wanneer een toon klinkt, wordt de prediction error berekend: het verschil tussen de waargenomen en de verwachte toonhoogte.

In een maqam-context is het intern model getuned op de specifieke microtonale inflecties van die maqam. De neutrale terts van Rast (ca. 355 cent) genereert geen prediction error bij een luisteraar die het Rast-model actief heeft; dezelfde toon zou een grote prediction error genereren bij een luisteraar die het Nihavend-model verwacht (kleine terts, 300 cent).

Dit is **exact de deconvolutiehypothese** van het onderzoeksvoorstel: het brein trekt de verwachte transferfunctie af van het binnenkomende signaal. Bij muziek is die transferfunctie het actieve modale model. De prediction error is het muzikaal informatieve signaal - de verrassing, de spanning, de expressie.

### 6.3 De Tsimane-connectie: wat gebeurt er zonder modaal model?

Het Tsimane-onderzoek suggereert wat er gebeurt wanneer het brein geen transferfunctie voor polyfone harmonie heeft aangeleerd. Zonder intern model voor consonantie-dissonantie genereert een consonant akkoord geen kleinere prediction error dan een

---

<sup>16</sup>Friston, K. (2005). A theory of cortical responses. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 360(1456), 815-836.

dissonant akkoord - beide zijn even verwacht of onverwacht. De esthetische indifferentie van de Tsimane is dan niet het ontbreken van perceptie (zij horen het verschil), maar het ontbreken van een intern model dat het verschil als *betekenisvol* categoriseert.

Dit heeft directe implicaties voor Studie 3 van het onderzoeksvorstel: de MMN-respons op een omgevingswisseling zou moeten afhangen van de sterkte van het interne model. Een muzikant met een precies getraind intern model voor ruimteakoestiek zou een grotere MMN moeten vertonen dan iemand zonder dergelijk model - net zoals musici een sterkere N2-respons vertonen op microtonale afwijkingen.

## 7. Synthese: drie lagen van het unified model

Het microtonaliteitsonderzoek blootlegt drie lagen die exact corresponderen met de structuur van het unified model:

| Laag          | Microtonaliteit   | Unified model   | Bewijs   |
|---------------|---|---|--|
| 1. Biologie   | Cochlea als filterbank; hersenstamresponsies op harmonische verhoudingen; JND frequentieafhankelijk | Gedempte resonatoren met eigenfrequenties; frequentieafhankelijk verval; neurale RT60 | Bidelman & Krishnan (2009); Large (2002); Jaramillo et al. (2025)  |
| 2. Cultuur    | Categorische waarneming; consonantievoorkeur cultureel aangeleerd; Tsimane-indifferentie            | Geleerde transferfunctie; het brein snapt frequenties naar aangeleerd raster          | McDermott et al. (2016-2025); Burns & Ward (1978); Sethares (2005) |
| 3. Modaliteit | Microtonale inflecties constitueren modale identiteit; maqam, raga, pathet                          | Prediction error = signaal min transferfunctie; MMN als maat voor modelsterkte        | Friston (2005); Proverbio et al. (2016); Yarman (2008)             |

Tabel 4. Drie lagen van microtonale waarneming in relatie tot het unified model.

De kernthese is dat deze drie lagen niet los van elkaar opereren maar een geïntegreerd systeem vormen. De biologische laag biedt het substraat: gedempte resonatoren die gevoelig zijn voor harmonische verhoudingen. De culturele laag vormt de transferfunctie: door blootstelling leert het brein welke frequentieverhoudingen normaal zijn en categoriseert het binnenkomende signalen dienovereenkomstig. De modale laag is het resultaat: microtonale inflecties genereren prediction errors die muzikale betekenis dragen.

Het Tsimane-onderzoek fungeert als **natuurlijk experiment** dat deze lagen ontkoppelt. De biologische laag functioneert normaal (ruwheidsaversie, perceptuele fusie, logaritmische toonhoogteschalen). De culturele laag ontbreekt voor polyfone harmonie (geen consonantievoorkeur, geen octaafequivalentie). En daarmee ontbreekt ook het modale model dat prediction errors zou genereren bij harmonische afwijkingen.

## 8. Implicaties voor het onderzoeksvoorstel

### 8.1 Studie 1: Neurale RT60 en microtonale stimuli

Het microtonaliteitsonderzoek suggereert een uitbreiding van Studie 1: naast breedbandimpulsen zouden microtonale intervallen als stimulus kunnen dienen. De voorspelling is dat de neurale RT60 (vervalsnelheid van de evoked response) langer is voor intervallen die dicht bij harmonische verhoudingen liggen (kwint, kwart) dan voor intervallen die er net naast liggen (bijvoorbeeld 710 cent i.p.v. 702 cent). Dit zou aantonen dat de gedempte-resonatorstructuur niet alleen geldt voor het verval van willekeurige stimuli, maar ook voor de harmonische structuur van het signaal.

## 8.2 Studie 2: De draagfrequentie van de docent

Een cruciaal inzicht uit het microtonaliteitsonderzoek dat direct aansluit bij Studie 2 is de notie van de **draagfrequentie**. Voordat lesinhoud kan worden overgedragen, moet het draagsignaal - de stem van de docent, diens prosodie en intonatie - de filterbank-transferfunctie-predictive-coding-keten passeren. Deze keten bestaat uit drie gekoppelde fases:

- Het cochlea als filterbank: de stem wordt per frequentieband gedempt of versterkt door de ruimte, en doorloopt vervolgens de 3.500 bandpassfilters van het basilair membraan.
- Culturele conditionering als geleerde transferfunctie: de leerling heeft een intern model van stem, prosodie en klagsgeluid; een onbekend accent of ongebruikelijke ruimte-akoestiek verhoogt de baseline prediction error voordat er überhaupt semantische inhoud wordt verwerkt.
- Predictive coding als deconvolutie: het brein trekt de geleerde transferfunctie van ruimte en stem af van het binnenkomende signaal; wat overblijft is de prediction error die de eigenlijke lesinhoud draagt.

De consequentie is dat een klaslokaal met ongunstige akoestiek niet alleen de verstaanbaarheid vermindert, maar ook **cognitieve capaciteit consumeert** voor de deconvolutie van de draagfrequentie. Hoe ongunstiger de transferfunctie van de ruimte, hoe meer brein-cycli er opgaan aan het decoderen van het draagsignaal, en hoe minder er overblijft voor de lesinhoud. Dit voorspelt dat lokaal D uit Studie 2 (gericht behandeld in de spraakband) niet alleen een hogere woordherkenning zal opleveren, maar ook een hogere cognitieve reserve voor begrijpend lezen en rekenvaardigheid - de lesinhoud die de draagfrequentie moduleert.

## 8.3 Studie 3: Predictive coding en microtonale categorisering

De sterkste verbinding ligt bij Studie 3. Het microtonaliteitsonderzoek toont dat predictive coding niet alleen van toepassing is op de akoestische omgeving (het aftrekken van galm), maar ook op de muzikale context (het aftrekken van het verwachte tonale raster). De MMN-respons die het voorstel wil meten bij omgevingswisseling zou een parallel moeten hebben in de MMN bij *tonale* contextwisseling: het overschakelen van een 12-TET-context naar een kwarttooncontext, of van het ene maqam naar het andere.

Dit opent een vierde, niet eerder geëxploreerde hypothese: **de snelheid waarmee het brein zich aanpast aan een nieuw tonaal systeem correleert met de neurale RT60**. Een brein met een korte neurale vervaltijd past zich sneller aan dan een brein met een lange vervaltijd - het oude model sterft sneller uit, waardoor het nieuwe model sneller kan worden geïnstalleerd.

## 9. Conclusie

Deze literatuurstudie laat zien dat het microtonaliteitsonderzoek drie lagen blootlegt die direct aansluiten bij het unified golfpropagatie-model:

- Een biologische laag van frequentieafhankelijke gedempte resonatoren (cochlea, hersenstam) die de infrastructuur bieden voor toonhoogtewaarneming.
- Een culturele laag van geleerde transferfuncties die bepalen welke frequentieverhoudingen als normaal worden gecategoriseerd - overtuigend aangetoond door het Tsimane-onderzoek.
- Een modale laag waarin microtonale inflecties prediction errors genereren die muzikale betekenis en identiteit constitueren.

Het Tsimane-onderzoek fungeert als cruciaal natuurlijk experiment dat deze lagen ontkoppelt en daarmee de voorspellingen van het unified model toetsbaar maakt. De bevinding dat perceptuele mechanismen universeel zijn maar esthetische evaluaties cultureel bepaald, correspondeert exact met de twee componenten van het model: de eigenfrequenties van de neurale resonatoren (biologisch) en de geleerde transferfunctie (cultureel).

De implicatie voor het onderzoeksvoorstel is dat microtonale stimuli een bijzonder informatieve testcase vormen voor de hypothesen over neurale RT60, omgevingsadaptatie en predictive coding. Het brein verwerkt toonhoogte via dezelfde wiskundige structuur als waarmee een ruimte geluid verwerkt: gedempte harmonische oscillatie met frequentieafhankelijk verval. Het verschil is dat de neurale resonator niet alleen door fysica wordt bepaald, maar ook door ervaring wordt getuned.

De combinatie cochlea-als-filterbank, culturele-conditionering-als-geleerde-transferfunctie en predictive-coding-als-deconvolutie vormt de draagfrequentie waarop lesinhoud pas kan worden overgedragen. Voordat de inhoud van een les relevant is, moet het draagsignaal deze drievoudige keten ongestoord kunnen passeren. De microtonaliteit van taal en stem wordt daarmee niet een bijzaak, maar noodzaak.

## Referenties

- Bidelman, G.M. & Krishnan, A. (2009). Neural correlates of consonance, dissonance, and the hierarchy of musical pitch in the human brainstem. *Journal of Neuroscience*, 29(42), 13165-13171.
- Bowling, D.L., Hoeschele, M., Gill, K.Z. & Fitch, W.T. (2017). The nature and nurture of musical consonance. *Music Perception*, 35(1), 118-121.
- Burns, E.M. & Ward, W.D. (1978). Categorical perception - phenomenon or epiphenomenon. *Journal of the Acoustical Society of America*, 63(2), 456-468.
- Eerola, T. & Lahdelma, I. (2021). The anatomy of consonance/dissonance: Evaluating acoustic and cultural predictors across multiple datasets with chords. *Music & Science*, 4.
- Friston, K. (2005). A theory of cortical responses. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 360(1456), 815-836.
- Harrison, P.M.C. & Pearce, M.T. (2020). Simultaneous consonance in music perception and composition. *Psychological Review*, 127(2), 216-244.
- Hogerheijde, M.A.H. (2026). Het Unified Model en het Brein: Neurale oscillaties als gedempte resonatoren. *Onderzoeksvoorstel*.
- Jacoby, N. et al. (2019). Universal and non-universal features of musical pitch perception revealed by singing. *Current Biology*, 29(19), 3229-3235.
- Jacoby, N. et al. (2024). Commonality and variation in mental representations of music revealed by a cross-cultural comparison of rhythm priors in 15 countries. *Nature Human Behaviour*, 8, 843-857.
- Jaramillo, J. et al. (2025). Harmonic oscillator recurrent networks. *PNAS*, 122(3).
- Lahdelma, I., Eerola, T. & Armitage, J. (2022). Is harmonicity a misnomer for cultural familiarity in consonance preferences? *Frontiers in Psychology*, 13, 802385.
- Large, E.W. & Palmer, C. (2002). Perceiving temporal regularity in music. *Cognitive Science*, 26, 1-37.
- Loui, P., Wessel, D.L. & Hudson Kam, C.L. (2010). Humans rapidly learn grammatical structure in a new musical scale. *Music Perception*, 27(5), 377-388.
- Lyon, R.F. (2017). *Human and Machine Hearing*. Cambridge University Press.
- McDermott, J.H., Schultz, A.F., Undurraga, E.A. & Godoy, R.A. (2016). Indifference to dissonance in native Amazonians reveals cultural variation in music perception. *Nature*, 535(7613), 547-550.
- McPherson, M.J. et al. (2020). Perceptual fusion of musical notes by native Amazonians suggests universal representations of musical intervals. *Nature Communications*, 11, 2786.
- McPherson-McNato, M.J. et al. (2025). Preferences for consonance are evident in Indigenous Amazonians with higher, but not lower, levels of global integration. *Cognition*, 260, 106102.
- Mehr, S.A. et al. (2019). Universality and diversity in human song. *Science*, 366(6468), eaax0868.
- Partch, H. (1974). *Genesis of a Music*. 2nd ed. Da Capo Press.

- Patterson, R.D. & Holdsworth, J. (1996). A functional model of neural activity patterns and auditory images. *Advances in Speech, Hearing and Language Processing*, 3.
- Proverbio, A.M. et al. (2016). Brain processing of consonance/dissonance in musicians and controls: a hemispheric asymmetry revisited. *European Journal of Neuroscience*, 44(6), 2340-2356.
- Sethares, W.A. (2005). *Tuning, Timbre, Spectrum, Scale*. 2nd ed. Springer.
- Yarman, O. (2008). *79-Tone Tuning & Theory for Turkish Maqam Music*. Dissertatie, Istanbul Technical University.
- Zarate, J.M., Ritson, C.R. & Poeppel, D. (2012). Pitch-interval discrimination and musical expertise: Is the semitone a perceptual boundary? *Journal of the Acoustical Society of America*, 132(2), 984-993.
- Zentner, M.R. & Kagan, J. (1998). Infants' perception of consonance and dissonance in music. *Infant Behavior and Development*, 21(3), 483-492.