

# Psychoacoustic and neurophysiologic investigations of auditory continuity

## Citation for published version (APA):

Riecke, L. (2009). *Psychoacoustic and neurophysiologic investigations of auditory continuity*. [Doctoral Thesis, Maastricht University]. Datawyse / Universitaire Pers Maastricht. <https://doi.org/10.26481/dis.20090401lr>

## Document status and date:

Published: 01/01/2009

## DOI:

[10.26481/dis.20090401lr](https://doi.org/10.26481/dis.20090401lr)

## Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

## Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

## General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.umlib.nl/taverne-license](http://www.umlib.nl/taverne-license)

## Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[repository@maastrichtuniversity.nl](mailto:repository@maastrichtuniversity.nl)

providing details and we will investigate your claim.

## Summary

The aim of this thesis is to broaden our understanding of the ability to track sounds in noisy environments. The general question addressed in the different chapters is: How does the auditory system in the brain construct smooth and meaningful sound percepts from noisy acoustic stimuli? The mechanisms underlying this phenomenon were investigated by means of the continuity illusion in which an interrupted sound is illusorily perceived as continuing through noise. The continuity illusion is a graded perceptual state which requires that acoustic energy of the noise masks the interruption.

A psychoacoustic study presented in *chapter two* investigated how the different acoustic parameters of noise influence the continuity illusion. The results revealed that continuity illusions of interrupted tones tend to be stronger when the noise 1) has shorter duration and 2) is a stronger masker. These effects on perceived continuity partially depended on the frequency of the tone, and were not evident for physically uninterrupted tones. Based on estimated thresholds for the continuity illusion, a neural filter model was adapted to describe the interaction of the different masking parameters that affect the continuity illusion. The estimated widths of the proposed 'illusory' filters suggested the involvement of constructive perceptual mechanisms that may operate on the output of peripheral masking mechanisms, especially at high sound frequencies. These findings set constraints on the spectral resolution of the mechanisms underlying the continuity illusion, and provide a stimulus set that can be readily applied for investigation of neural correlates.

A functional magnetic resonance imaging (fMRI) study presented in *chapter three* aimed at localizing the proposed constructive neural mechanisms. Using stimuli that were fine-tuned in the previous study, it was found that the masking of gaps in interrupted tones by noise is accompanied by decreased activities in auditory cortical regions. Since no such effect of masking was observed for physically uninterrupted tones, the observed decreases could be ascribed to the filling of gaps by acoustic energy. Importantly, listeners' subjective experience of continuity illusions was paralleled by activities in primary auditory cortex. These findings show that 1) the amount of acoustic energy in tone gaps is processed in early auditory cortex and 2) the subjective experience of continuity illusions of tones is represented in primary auditory areas.

An electroencephalography (EEG) study presented in *chapter four* investigated the relative neural timing of the acoustic-perceptual processes localized in the previous fMRI study. Using the same stimuli and task as before, it was found that 1) increased acoustic energy in tone gaps decreases EEG activities about 130 ms after gap onset and 2) continuity illusions reduce oscillatory EEG activities during and after the gaps. The results indicated that cognitive factors such as attention may influence the sensory processing of acoustic energy during the interruption. These findings set

constraints on the timing of cortical processes involved in the acoustical analysis and perceptual interpretation of noise-interrupted sounds.

A preliminary fMRI study presented in *chapter five* aimed at localizing neural mechanisms for continuity illusions of complex natural sounds. Using voice sounds as stimuli and the same methods as in the previous fMRI study, it was observed that the masking of interrupted voices by noise evokes decreased activities in auditory cortical regions that may be sensitive to speech sounds. Listeners' reports of voice continuity illusions were reflected by activities in primary auditory cortex, consistent with the previous findings on tone continuity illusions. These initial results suggest that 1) the amount of acoustic energy in voice gaps is processed in speech-sensitive cortical regions and 2) voice continuity illusions recruit primary auditory cortical regions that process continuity illusions of the frequency components constituting the voice sound.

A psychoacoustic study presented in *chapter six* investigated whether the continuity illusion can be influenced by contextual factors. The results revealed that continuity illusions of the same ambiguous tone glide are modulated by the loudness and the perceived continuity of preceding sounds. These context effects were unrelated to the sound spectrum of the preceding sounds, indicating non-sensory adaptive influences. The findings revealed that the mechanisms underlying continuity illusions are non-static which may serve to recalibrate continuity hearing to different acoustic environments.

In summary, the findings obtained in these studies show that the construction of smooth sound percepts from noisy acoustic stimuli involves not only static acoustic mechanisms, but also active and adaptive perceptual mechanisms in the brain. Primary auditory cortical regions play a dominant role in this regard, since they process the sound energy in noisy interruptions that is crucial for the continuity illusion. These early sensory-perceptual processes are further modulated by listeners' attention and likely also by the sensory context. Based on the accumulating evidence obtained in these and other studies, a neural model for the continuity illusion is proposed in *chapter seven*. For future research, an implementation of the proposed mechanisms in artificial hearing devices may be envisioned, wherein the illusory filter proposed in chapter two could serve as a basic processing unit.

## Samenvatting

Deze dissertatie tracht de kennis te verruimen over het mechanisme dat ons in staat stelt geluiden waar te nemen die verstoord zijn door akoestische ruis. De hoofdvraagstelling is: Hoe is het auditieve systeem in staat een betekenis te geven aan een geluid dat verstoord wordt door verschillende variaties van akoestische ruis? Het mechanisme dat aan dit fenomeen ten grondslag ligt werd onderzocht met behulp van de continuïteitsillusie. Bij deze illusie wordt een geluid, ondanks een onderbreking door akoestische ruis, als een continu ervaren. Deze illusie is een perceptuele ervaring die geleidelijk gebeurt, en die vereist dat de onderbreking gemaskeerd wordt door de akoestische energie van ruis.

In *hoofdstuk twee* wordt een psychoakoestische studie gepresenteerd waarin onderzocht werd op welke manier de verschillende akoestische parameters van akoestische ruis de continuïteitsillusie beïnvloeden. De resultaten onthullen dat continuïteitsillusies van tonen sterker zijn wanneer de akoestische ruis 1) een korte duur heeft en 2) een sterk maskerende eigenschap heeft. De waargenomen continuïteit hing gedeeltelijk af van de frequentie van de toon. Het effect van de ruis was echter afwezig als de gepresenteerde tonen fysisch continue waren. Gebaseerd op de geschatte drempelwaarde van de illusie werd een neuronaal filtermodel voorgesteld. Dit model beschrijft hoe de continuïteitsillusie beïnvloed wordt door de verschillende parameters van akoestische ruis en hun onderlinge interacties. De geschatte breedte van de voorgestelde 'illusionaire' filters suggereert dat een constructief proces verantwoordelijk is dat zich baseert op de output van de perifere maskeringmechanismen. Dit effect is groter bij geluiden die hogere frequenties bevatten. Deze bevindingen bepalen de spectrale resolutie van de mechanismen die aan de continuïteitsillusie ten grondslag liggen. Hiernaast verschaffen ze akoestische stimuli voor onderzoek naar de neuronale correlaten van de continuïteitsillusie.

De functionele magnetische resonantie tomografie (fMRT) studie die in *hoofdstuk drie* gepresenteerd wordt was gericht op het lokaliseren van de neuronale mechanismen van de continuïteitsillusie. Er werd gebruik gemaakt van de akoestische stimuli die in de voorafgaande studie geoptimaliseerd werden. Een conclusie van deze studie is dat een onderbreking van een toon, gemaskeerd met ruis, tot een afname leidt van activiteit in de auditieve cortex. Omdat deze maskeringeffecten niet optraden indien de toon fysisch continue was, konden de geobserveerde effecten worden toegeschreven aan de opvulling van de interruptie met akoestische energie. Daarnaast werd de relatie beschreven tussen de subjectieve ervaring van de continuïteitsillusie en activiteitsniveau van de primaire auditieve cortex. Deze bevindingen laten zien dat 1) de akoestische energie tijdens de onderbreking van een toon al in de primaire auditieve gebieden verwerkt wordt en 2) de subjectieve ervaring van de continuïteitsillusie van een toon in de primaire auditieve gebieden gerepresenteerd wordt.

De electroencefalografie (EEG) studie die in *hoofdstuk vier* gepresenteerd wordt onderzocht de neuronale timing van de akoestische en perceptuele processen die in de fMRT studie gelokaliseerd werden. Door gebruik te maken van de taak en stimuli van de fMRT studie, werden de volgende bevindingen gedaan: 1) De verhoogde akoestische energie tijdens de onderbreking van een toon leidt tot een verminderde EEG activiteit 130 ms na het begin van de onderbreking en 2) de continuïteitsillusie onderdrukt de oscillaties in het EEG signaal gedurende en na deze onderbreking. Deze resultaten tonen aan dat cognitieve factoren zoals aandacht de sensorische verwerking van de akoestische energie beïnvloeden, vooral tijdens de onderbreking van het geluid. Daarnaast bieden de resultaten informatie over de timing van de corticale processen die betrokken zijn bij de akoestische analyse en de perceptuele interpretatie van geluiden die onderbroken worden door ruis.

De voorbereidende fMRT studie die in *hoofdstuk vijf* gepresenteerd wordt had het doel om de neuronale mechanismen voor continuïteitsillusies van natuurlijke, complexere geluiden te lokaliseren. Er werd gebruik gemaakt van stemgeluiden in combinatie met de methoden van de eerdere fMRT studie. Een bevinding van deze studie was dat het maskeren van de onderbroken stemmen door akoestische ruis de activiteit verminderde in auditieve corticale gebieden waarvan vermoed wordt dat ze betrokken zijn bij de verwerking van intacte stemmen. De subjectieve ervaring van de continuïteitsillusie van een stemgeluid correspondeerde met de activiteit van de primaire auditieve cortex. Deze bevinding was in overeenstemming met de resultaten van de eerdere fMRT studie waarin illusies van tonen onderzocht werden. Deze voorbereidende resultaten suggereren dat 1) specifieke auditieve hersengebieden die gevoelig zijn voor stemgeluiden ook de akoestische energie tijdens de interruptie van een stem verwerken en 2) continuïteitsillusies van stemmen in primaire auditieve gebieden verwerkt worden die ook betrokken zijn bij het invullen van alleenstaande frequentie componenten.

Een psychoakoestische studie die in *hoofdstuk zes* gepresenteerd wordt onderzocht in welke mate de continuïteitsillusie van contextuele factoren afhangt. De resultaten onthullen dat illusies van de dezelfde stimulus gemoduleerd kunnen worden door de geluidsssterkte en de waargenomen continuïteit van voorafgaande geluiden. Deze context effecten waren van niet-sensorische aard omdat deze niet aan het geluidsspectrum van de voorafgaande geluiden gerelateerd waren. Deze resultaten tonen dat het mechanisme dat aan de continuïteitsillusie ten grondslag ligt, van niet-statische aard is. Deze flexibiliteit is waarschijnlijk nuttig bij het aanpassen van geluidswaarneming aan verschillende akoestische omgevingen.

Samengevat laten de bevindingen van deze studies zien dat de continue geluidswaarneming van een verstoorde akoestische input niet enkel is gebaseerd op statische akoestische mechanismen in het brein, maar ook op actieve en adaptieve perceptuele mechanismen. Primaire auditieve gebieden spelen daarbij een belangrijke rol omdat ze de geluidsenergie waarop de continuïteit illusie gebaseerd is verwerken tijdens een onderbreking van een geluid. Deze vroege sensorisch - perceptuele processen worden verder beïnvloedt door aandacht en mogelijk ook door de sensorische context. Op basis van de bevindingen van deze en andere

studies wordt in *hoofdstuk zeven* een neuronaal model voor de continuïteitsillusie voorgesteld. Toekomstig onderzoek kan zich richten op de implementatie van de voorgestelde mechanismen in kunstmatige hoorapparaten. Daarbij zou de filter die in hoofdstuk twee voorgesteld werd als een basale verwerkingseenheid kunnen gebruikt worden.