

## Luisteraars maken de balans op: Akoestische cue-weging tijdens klankherkenning

Marcel R. Giezen<sup>1</sup>, Paola Escudero<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Laboratory for Language and Cognitive Neuroscience,  
San Diego State University, San Diego CA, USA*

<sup>2</sup>*MARCS Institute, University of Western Sydney, Penrith, Australia*

### Samenvatting

Luisteraars gebruiken akoestische cues in het spraaksignaal, bijvoorbeeld formantfrequenties, formantovergangen, duur en intensiteit, om klanken van elkaar te onderscheiden. Om spraakklanken correct waar te nemen en te herkennen, moeten luisteraars leren verschillende akoestische cues te combineren en tegen elkaar af te zetten; dit wordt 'cue-weging' genoemd. Talen verschillen van elkaar in welke akoestische cues relevant zijn voor de waarneming van klankcontrasten en in hoe zwaar iedere cue weegt. De ontwikkeling van akoestische cue-weging begint al op zeer jonge leeftijd, maar is pas op relatief late leeftijd voltooid. Succesvolle verwerving van cue-weging wordt mede beïnvloed door het leren van een tweede taal, gehoorverlies, en spraak-taalproblematiek. Om akoestische cue-weging te onderzoeken, worden meestal één of meerdere akoestische cues van een bepaald klankcontrast in tussenliggende stappen gemanipuleerd zodat er een stimulus-continuum ontstaat van klankvarianten tussen de twee eindpunten van het contrast. Luisteraars moeten deze stimuli vervolgens discrimineren of categoriseren. In de analyse van cue-weging data kan onder andere berekend worden in welke mate luisteraars een bepaalde cue gebruiken en hoe zwaar ze verschillende cues ten opzichte van elkaar wegen. Naast een belangrijke rol in theoretisch en toegepast onderzoek naar klankwaarneming in tweede taalverwerving, kan de studie van akoestische cue-weging een waardevolle bijdrage leveren aan klinisch interventie-onderzoek door akoestische cues te identificeren die problemen (blijven) vormen voor de fonologische ontwikkeling van bijvoorbeeld dove en slechthorende kinderen. Daarnaast kan akoestische cue-weging zelf het doel zijn van interventiestudies gericht op het aanleren en/of versterken van het gebruik van bepaalde akoestische cues om de klankwaarneming te ondersteunen.

### Summary

Listeners rely on acoustic cues in the speech signal, such as formant frequency, formant transitions, duration and intensity, to discriminate speech sounds. To correctly perceive and recognize speech sounds, listeners must learn to combine and weigh different acoustic cues, that is, 'cue-weighting'. Languages in the world differ in the specific acoustic cues that are relevant to correctly perceive speech sound contrasts and in the relative importance of each cue. The development of acoustic cue-weighting starts at an early age already, but takes several years to reach adult-like levels. Factors that can influence this development are, for instance, second language acquisition, hearing impairment, and speech and language difficulties. To investigate acoustic cue weighting, researchers typically manipulate one or more acoustic cues of a specific contrast in intermediate steps to create a stimulus continuum of sound variants in between the two endpoints of the contrast. Participants are then asked to discriminate or categorize those stimuli. Several dependent variables can be derived from the analysis of cue weighting experiments, including measures of the use of each acoustic cue by listeners and of the relative weighting of different cues. In addition to the important contribution to theoretical and applied research on sound perception in second language acquisition, acoustic cue weighting can provide useful information for clinical intervention studies through the identification of acoustic cues that present persistent difficulties to the phonological development in, for example, deaf and hard- of hearing children. Furthermore, acoustic cue weighting can also directly be the target of intervention, for instance, in studies aimed at training and/or reinforcing the use of specific acoustic cues to support speech perception.

## Achtergrond

Wanneer we naar spraak luisteren, moeten onze hersenen in zeer korte tijd geluidstrillingen omzetten in klanken, combinaties van klanken in woorden, en uiteindelijk combinaties van woorden in betekenis. Daarnaast moeten onze oren zich continu aanpassen aan 'irrelevante' variatie in het spraaksignaal zoals verschillen in spreeknelheid en uitspraak, maar bijvoorbeeld ook omgevingslawaai. Ondanks de complexiteit van het spraakherkenningsproces, leren jonge kinderen zonder al teveel moeite en vanaf hele jonge leeftijd klanken en woorden in hun moedertaal te onderscheiden. Rond hun eerste verjaardag is hun klankwaarneming gevormd door de specifieke taal (of talen) die ze om hen heen horen, gebruiken ze prosodie en statistische regelmatigheden in het taalaanbod om woorden in een doorlopende klankenbrij te segmenteren, en leren ze al om sommige vormen van variatie in het spraaksignaal te negeren (Kuhl, 2004). Deze vroege spraakwaarnemingsvaardigheden zijn belangrijke voorspellers van latere taalontwikkeling, waaronder woordenschat en taalbegrip (bijv. Kuhl, Conboy, Padden, Nelson, & Pruitt, 2005; Newman, Bernstein Ratner, Jusczyk, Jusczyk, & Ayala Dow, 2006).

Om klanken in het spraaksignaal te onderscheiden en te identificeren, gebruiken volwassen luisteraars specifieke akoestische eigenschappen van de klanken in hun taal, zo-

genoemde akoestische cues. Voorbeelden van dergelijke akoestische cues zijn formantfrequentie (de resonerende frequenties in het stemkanaal), formantovergangen (veranderingen in formantfrequentie tussen opeenvolgende klanken), duur (de 'lengte' van de klank), en intensiteit (de hoeveelheid energie die het stemkanaal voortbrengt). Klanken kunnen in één of meerdere akoestische cues van elkaar verschillen. Zo verschillen de Nederlandse klinkers /ɑ/ en /a/ in de woorden 'man' en 'maan' in hoogte van de eerste en tweede formant (F1 en F2 zijn beide hoger voor /a/) en klinkerlengte (langer voor /a/). De Nederlandse klinkers /y/ en /u/ als in de woorden 'muur' en 'moer' verschillen daarentegen alleen in formantfrequentie (hogere derde formant voor /u/).

Omdat klanksystemen tussen talen verschillen, zijn de (combinaties van) akoestische cues die relevant zijn voor luisteraars van verschillende talen ook taalspecifiek. Zo gebruikt een luisteraar van het Nederlands zowel formantfrequentie als klinkerlengte om het verschil tussen de klinkers in de woorden 'vis' en 'vies' te horen, terwijl een luisteraar van het Engels hiervoor alleen formantfrequentie gebruikt. Klinkerlengte is niet klankonderscheidend in het Engels. Jonge kinderen moeten dus niet alleen leren uit welke klanken het klanksysteem voor hun taal bestaat, maar ook welke akoestische cues relevant zijn om die klanken van elkaar te kunnen onderscheiden. Bovendien moeten ze leren om relevante akoestische cues op de juiste manier tegen elkaar af te zetten tijdens klankherkenning. Al deze aspecten van klankwaarneming vallen in het straatje van onderzoek naar akoestische cue-weging. Bijvoorbeeld, bij het horen van de zin "De *maan* stond hoog in de lucht", moeten Nederlandse luisteraars formantfrequentie en klinkerlengte (eventueel samen met de formantovergangen in de omliggende medeklinkers) als akoestische cues gebruiken om te bepalen of de spreker het woord 'man' of 'maan' zegt. Maar stel je nu eens voor dat de uiteindelijke klinker die de spreker produceert de formanthoogte van een /ɑ/ heeft, maar de duur van een /ɑ/. Hoort de luisteraar dan het woord 'man' of 'maan'? Hierbij speelt het tegen elkaar afwegen van akoestische cues een rol. Indien voor een willekeurige luisteraar formantfrequentie belangrijker is dan klinkerlengte voor het onderscheiden van /ɑ/ en /a/, dan zal hij of zij het woord 'maan' horen. Indien klinkerlengte daarentegen belangrijker is voor deze luisteraar, dan zal hij of zij het woord 'man' horen. Uiteraard speelt in langere stukken spraak zoals zinnen of discourse de semantische context waarin het woord geproduceerd wordt ook nog een hele belangrijke rol, maar dat laten we hier voor het gemak buiten beschouwing.

Alhoewel kinderen al op zeer jonge leeftijd belangrijke stappen zetten in de ontwikkeling van spraakwaarneming, waaronder akoestische cue-weging, duurt het nog vele jaren voordat hun klankwaarneming op hetzelfde niveau zit als volwassenen. Verscheidene studies hebben laten zien dat kinderen pas op achtjarige leeftijd of zelfs later het volwassen doelniveau voor klankwaarneming benaderen (bijv. Gerrits, 2001; Hazan & Barrett, 2000; Medina, Hoonhorst, Bogliotti, & Serniclaes, 2010). In de literatuur zijn verscheidene verklaringen voorgesteld voor deze langdurende ontwikkeling. Het zou bijvoorbeeld kunnen zijn dat op jongere leeftijd de auditieve waarneming nog niet volledig ontwikkeld is, en daarmee ook het onderscheidingsvermogen van bepaalde akoestische cues (bijv. Mayo & Turk, 2005; maar zie ook Nittrouer & Lowenstein, 2007). Zo zou bijvoorbeeld de waarneming van kleine verschillen in formantfrequentie misschien nog verder moeten ontwikkelen, die belangrijk zijn bij het waarnemen van klankcontrasten die dicht bij elkaar zitten in formanthoogte (zo-

als /ɪ/ en /i/ in het Nederlands). Een andere mogelijke verklaring is dat kinderen in eerdere fasen van de taalontwikkeling vooral op grotere klankeenheden zoals hele lettergrepen gericht zijn en individuele klanken pas nauwkeuriger van elkaar gaan onderscheiden naarmate hun woordenschat uitbreidt (bijv. Nittrouer, 1996; Walley & Flege, 1999). Hoe meer woorden kinderen leren die maar in een enkele klank van elkaar verschillen (oftewel, hoe meer fonologische burens ze in hun lexicon hebben), hoe belangrijker het voor ze wordt om genuanceerde klankonderscheidingen te maken. Behalve het groeiende lexicon zou ook het leren lezen en de daaraan gekoppelde verdere ontwikkeling van fonologisch bewustzijn bij kunnen dragen aan de noodzaak voor nauwkeurigere klankonderscheidingen (bijv. Mayo, Scobbie, Hewlett, & Waters, 2003).

Als akoestische cue-weging taalspecifiek is, dan roept dat uiteraard vragen op voor kinderen en volwassenen die een tweede taal leren. Kinderen die twee talen tegelijk of na elkaar leren, moeten namelijk niet alleen de juiste cue-weging voor hun eerste taal leren, maar ook voor hun tweede taal. En volwassenen die op latere leeftijd een tweede taal leren, moeten de inmiddels ingeprente cue-weging van hun eerste taal aanpassen om klankcontrasten in de tweede taal die niet volledig overlappen met contrasten in hun eerste taal correct te kunnen verstaan. Behalve in onderzoek naar tweede taalverwerving, is er ook een belangrijke rol voor akoestische cue-weging weggelegd in onderzoek naar de ontwikkeling en interventie van klankwaarnemingsvaardigheden van kinderen met een meer of mindere mate van gehoorverlies, waaronder dove kinderen met een cochleair implantaat (CI). Wanneer de auditieve waarneming beperkt is, kan dit logischerwijs ingrijpende gevolgen hebben voor het onderscheiden en op de juiste manier combineren van akoestische cues en het onderscheiden van klanken en woorden. Tot slot kan cue-wegingsonderzoek nuttige inzichten opleveren in de spraakwaarneming door kinderen met fonologische verwerkingsproblemen (in productie of waarneming) of andere spraak-taalproblematiek met een mogelijk fonologische grondslag, zoals bij kinderen met Specific Language Impairment (SLI) of kinderen met dyslexie.

In dit artikel bepreken we verscheidene methodologische aspecten van cue-wegingsonderzoek. We zetten enkele technieken op een rij die in cue-wegingstudies gebruikt worden en bespreken de mogelijkheden en beperkingen, bijvoorbeeld in onderzoek met jonge kinderen. We gaan ook uitgebreid in op de stimuli die gebruikt worden in cue-wegingsexperimenten en op manieren om data uit cue-wegingsexperimenten te analyseren. Daarna bespreken we kort enkele voorbeelden van cue-wegingsstudies bij verschillende populaties, waaronder baby's, oudere kinderen, tweetalige kinderen en volwassenen, en kinderen en volwassenen met gehoorverlies. We sluiten het artikel af met een korte samenvatting van de belangrijkste overwegingen in cue-wegingsonderzoek en een uiteenzetting van mogelijke klinische toepassingen van deze techniek in interventiestudies bij kinderen en volwassenen met gehoorverlies en/of andere spraak-taalproblematiek.

## Cue-wegingstaken

### Identificatietaken

Hoewel verschillende soorten experimentele taken gebruikt kunnen worden om akoestische cue-weging te onderzoeken, hebben de meeste taken gemeenschappelijk dat aan luisteraars gevraagd wordt om auditieve stimuli te *identificeren* (“Welke klank hoor je?”), te *discrimineren* (“Zijn deze twee klanken hetzelfde of verschillend?”), of te *categoriseren* (“Klinkt de eerste klank meer als de tweede of meer als de derde klank?”). Welk type taak gebruikt wordt, verschilt tussen studies en is ook sterk afhankelijk van de onderzoekspopulatie. Sommige taken zijn bijvoorbeeld minder geschikt om bij kinderen af te nemen vanwege de vereiste concentratiespanne of het beroep dat de taak doet op het werkgeheugen. Gerrits (2001, hoofdstuk 3) bespreekt uitvoerig verschillende experimentele taken die gebruikt worden in klankwaarnemingsonderzoek en hoe de gebruikte taak de gevonden resultaten kan hebben beïnvloed.

### Identificatietaken

In identificatietaken horen luisteraars een enkele stimulus per trial, waarna ze uit twee of meer antwoordmogelijkheden moeten kiezen (bijv. “Hoorde je een /ɑ/ of een /a/?”). Deze taak wordt vaak gecombineerd met een beoordelingstaak waarbij luisteraars niet alleen aangeven welke klank ze dachten te horen, maar ook in hoeverre de gehoorde klank een goed voorbeeld was (een ‘prototypisch exemplaar’ van de klankcategorie die ze gekozen hadden (bijv. op een schaal van 1 tot 10). Een voordeel van identificatietaken is dat ze een zeer beperkt beroep doen op het werkgeheugen, omdat er slechts één stimulus per trial aangeboden wordt. De werkgeheugenbelasting neemt overigens wel toe naarmate het aantal antwoordmogelijkheden - de klankcategorieën waaruit luisteraars kunnen kiezen - groter wordt. Het nadeel van deze methode is dat de manier waarop de antwoordmogelijkheden aangeboden worden de resultaten kan beïnvloeden. Sommige studies gebruiken bijvoorbeeld plaatjes van woorden met de betreffende klanken voor kinderen of geschreven letters voor volwassenen. Het nadeel van lettercategorieën is dat orthografische kennis klankwaarneming kan sturen. Bijvoorbeeld, Escudero en Wanrooij (2010) vonden dat Spaanse leerders van het Nederlands veel minder moeite hadden met het identificeren van het Nederlandse klinkercontrast /a/-/ɑ/ als de antwoordmogelijkheden niet auditief, maar orthografisch aangeboden werden (in de Nederlandse spelling, dus respectievelijk als <a> en <aa>). Een mogelijke verklaring is dat de Spaanse luisteraars de spelling <aa>, die niet in het Spaans voorkomt, interpreteerden als een lange variant van de klank die in het Spaans als <a> gespeld wordt. Omdat /ɑ/ (<aa>) in het Nederlands inderdaad langer is dan /ɑ/ (<a>), hielp de orthografische codering de Spaanse leerders bij het identificeren van /ɑ/ en /a/. Omgekeerd had het aanbieden van de Nederlandse spelling een tegengesteld effect op het identificeren van de klinker /y/ (<uu>), mogelijk omdat de Spaanse leerders de spelling <uu> associeerden met een lange variant van de klank die in het Spaans als <u> gespeld wordt, terwijl /y/ in het Nederlands juist een korte klinker is.

## Discriminatietaken

In discriminatietaken horen luisteraars twee stimuli na elkaar en moeten ze aangeven of de tweede stimulus wel of niet hetzelfde klinkt als de eerste stimulus. Dit worden ook wel AX-taken genoemd (X is de stimulus waarover je een beslissing neemt, en A is de stimulus waar je stimulus X mee vergelijkt). Evenals de meeste identificatietaken hebben AX-taken een relatief lage werkgeheugenbelasting omdat er slechts twee stimuli per trial gepresenteerd worden. Het nadeel van de AX-taak is dat luisteraars soms een bias voor 'ja'-antwoorden (verschillende klanken) of 'nee'-antwoorden (dezelfde klanken) hebben. Dit kan de resultaten van een studie sterk beïnvloeden. Om een dergelijke bias tegen te gaan, kan een iets ingewikkeldere variant van de AX-taak gebruikt worden, waarbij direct na elkaar twee stimulusparen aangeboden worden en luisteraars aan moeten geven welke twee stimuli hetzelfde waren en welke twee verschillend (de 4IAX-variant). Deze variant vergroot uiteraard wel de werkgeheugenbelasting voor luisteraars, en is daarom minder geschikt voor (jonge) kinderen. Een andere manier om met een antwoord-bias van luisteraars om te gaan, is om bij de analyse van de data zogenoemde *false alarm rates* en *hit rates* te berekenen (hier komen we op terug bij het bespreken van de analyse van data uit cue-wegingsexperimenten).

## Categorische discriminatietaken

Een combinatie van een discriminatietaken en een identificatietaken is ook mogelijk, oftewel categorische discriminatietaken. Luisteraars horen dan zowel een doelstimulus (X) als de twee eindpunten van een klankcontrast (klankcategorie A en klankcategorie B) en moeten aangeven in welke klankcategorie de doelstimulus hoort ("Op welke klank lijkt de doelstimulus het meeste?"). De volgorde van doelstimulus en klankcategorieën kan variëren, bijvoorbeeld doelstimulus eerst (XAB), doelstimulus midden (AXB), of doelstimulus laatst (ABX). Al deze varianten komen voorbij in de literatuur en ieder heeft zijn eigen voordeelen en nadelen. Het voordeel van ABX-taken is dat luisteraars gedwongen worden om naar beide antwoordcategorieën (A en B) te luisteren voordat ze de doelstimulus (X) horen. Het nadeel van deze variant is dat er een verschillende tijdsinterval is tussen klankcategorie A en de doelstimulus en klankcategorie B en de doelstimulus, wat opnieuw een bias voor één van de twee klankcategorieën kan opleveren wanneer luisteraars bijvoorbeeld moeite hebben om de eerstgehoorde stimulus in het werkgeheugen vast te houden totdat ze de doelstimulus gehoord hebben. Dit probleem wordt gedeeltelijk opgevangen als de doelstimulus in het midden gepresenteerd wordt, zoals in de AXB-variant. Het nadeel van AXB-taken is echter dat luisteraars dan mogelijk hun antwoord al klaar hebben voordat ze de tweede klankcategorie (B) gehoord hebben en vervolgens niet meer naar klank B luisteren. XAB-taken en ABX-taken verschillen verder nog van elkaar in dat een taak waarbij de doelstimulus *voor* de klankcategorieën gepresenteerd wordt (XAB) minder abstract is dan een taak waarbij de doelstimulus *na* de klankcategorieën gepresenteerd wordt (ABX).

## Inter-stimulus interval

Een belangrijke andere keuze die gemaakt moet worden bij het opzetten van een cue-wegingsexperiment waarbij twee of meer stimuli per trial worden aangeboden, is welke inter-stimulusinterval gebruikt wordt. Het gaat dan om de tijd die zit tussen het aanbieden van de eerste stimulus en het aanbieden van de tweede stimulus (bijv. in het geval van een AX-taak), of tussen de eerste, tweede en derde stimulus (bijv. in het geval van een XAB-taak). Taken met een relatief korte inter-stimulusinterval (bijv. 200ms) doen een minder zwaar beroep op het auditieve werkgeheugen omdat luisteraars de stimuli minder lang vast hoeven te houden om een keuze te maken. Het nadeel van een korte inter-stimulusinterval is dat luisteraars eerder geneigd zijn de stimuli simpelweg akoestisch met elkaar te vergelijken (auditieve discriminatie) in plaats van hun interne klankrepresentaties aan te spreken (fonologische categorisatie). Langere inter-stimulusintervals (bijv. 1200ms) dragen bij aan taalspecifieke fonologische verwerking van de stimuli door luisteraars (Van Hessen & Schouten, 1999; Werker & Logan, 1985).

## Stimuli

De stimuli die in cue-wegingexperimenten gebruikt worden, zijn losse klanken, lettergrepen of woorden die alleen verschillen in de akoestische waarde van een of twee akoestische cues van een klankcontrast en daardoor alleen verschillen in die klank. Deze akoestische cues worden vervolgens systematisch in stappen gemanipuleerd tussen de twee eindpunten van het contrast om er achter te komen of luisteraars de cues daadwerkelijk gebruiken om de twee klanken te onderscheiden, en welke cues ze hierbij eventueel zwaarder wegen dan andere. Bijvoorbeeld, om te onderzoeken of klinkerlengte een rol speelt bij het onderscheiden van de klinkers /ɑ/ en /a/, kun je de 'normale' lengte (duur) van een /ɑ/-klank en een /a/-klank bepalen door bijvoorbeeld verschillende sprekers de woorden 'man' en 'maan' te laten zeggen en dan de gemiddelde duur van de twee klinkers te berekenen. Als je de duur van de twee eindpunten van het klankcontrast (dus de 'normale' /ɑ/ en /a/) weet, kun je vervolgens stimuli creëren met een duur tussen die van /ɑ/ en /a/ in. Het is essentieel dat de stimuli alleen van elkaar verschillen in klinkerlengte en niet bijvoorbeeld ook in formantfrequentie of luidheid. Zou dat wel het geval zijn, dan kun je niet meer met zekerheid zeggen of luisteraars daadwerkelijk de variatie in lengte in de stimuli gebruiken om de klanken van elkaar te onderscheiden, omdat ze ook formantfrequentie of luidheid zouden kunnen gebruiken. Om dezelfde reden is het heel belangrijk om, wanneer in het experiment twee akoestische cues tegen elkaar afgezet worden, beide cues onafhankelijk van elkaar te manipuleren (bijvoorbeeld formantfrequentie en klinkerlengte voor het Nederlandse klinkercontrast /ɑ/-/a/).

Om accurate metingen te kunnen doen in cue-wegingexperimenten, is het belangrijk om de akoestische cues die onder de loep genomen worden te variëren in meerdere, even grote stappen, dus bijvoorbeeld klinkerlengte te variëren van 100 naar 200ms in zes even grote stappen of formantfrequentie te variëren van 600Hz naar 800Hz in zes even grote stappen.

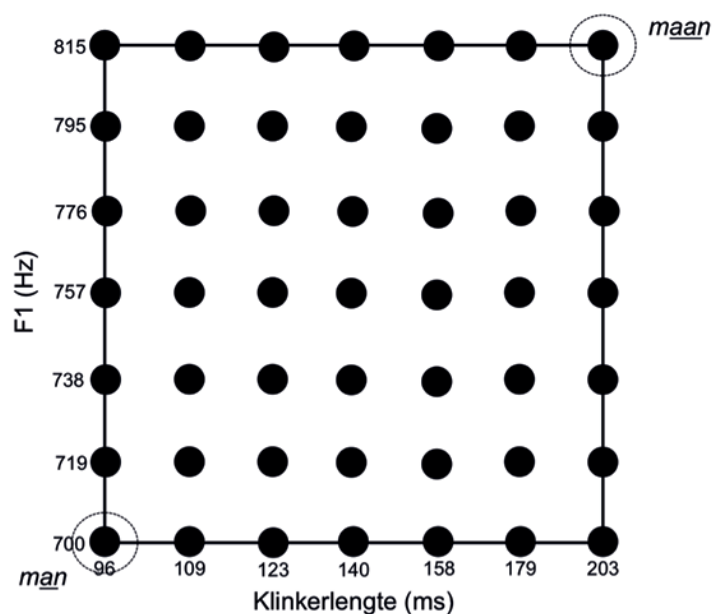
Het is belangrijk om te vermelden dat bij het bepalen van de tussenliggende waardes (en dus de stapgrootte) vaak geen gebruik wordt gemaakt van een absolute schaal, maar een logaritmische schaal. De redenen hiervoor zijn onder andere dat tijdsduur logaritmisch waargenomen wordt door het menselijke gehoor (Allan & Gibbon, 1991; Gibbon, 1977), en dat op deze manier het effect van een bepaalde articulatorische variabele (bijv. hoogte van de tong in mond) op de absolute formanthoogte uitgedrukt wordt als een relatief verschil, onafhankelijk van de grootte van het stemkanaal (Escudero, Boersma, Rauber, & Bion, 2009).

In het geval van klinkerlengte zou dit een stimulus-continuum opleveren met zeven stimuli, variërend van de gemiddelde lengte voor een /ɑ/-klank tot de gemiddelde lengte voor een /a/-klank met vijf tussenliggende stimuli, die onderling logaritmisch steeds even veel van elkaar verschillen in lengte. In het geval van formantfrequentie zou dit een stimulus-continuum opleveren met eveneens zeven stimuli, variërend van de gemiddelde formanthoogte van F1 en F2 voor een /ɑ/-klank tot de gemiddelde formanthoogte van F1 en F2 voor een /a/-klank met vijf tussenliggende stimuli, die onderling logaritmisch steeds even veel van elkaar verschillen in formanthoogte. Omdat F1 en F2 op dezelfde manier variëren in het Nederlandse /ɑ/-/a/ contrast, wordt in dit geval een combinatie van F1 en F2 als cue voor formantfrequentie genomen. In een experiment waarin zowel het gebruik van klinkerlengte als formantfrequentie onderzocht wordt, levert dit dan een stimulusvierkant op met  $7 \times 7 = 49$  stimuli (zie Figuur 1).

Het is belangrijk om te vermelden dat sommige onderzoekers ervoor kiezen om slechts een van de twee akoestische cues (bijv. formantfrequentie) in meerdere stappen te variëren, en voor de andere akoestische cue (bijv. klinkerlengte) alleen de twee eindpunten te gebruiken (bijv. Gerrits, 2001). Voor bovenstaand voorbeeld zou dat dan  $7 \times 2 = 12$  stimuli opleveren, dus een flink aantal minder stimuli dan wanneer beide cues gemanipuleerd worden. De reden om deze alternatieve stimulusopzet te gebruiken in een cue-wegingstudie is vaak juist ook om het aantal stimuli beperkt te houden, bijvoorbeeld omdat jonge kinderen en/of meerdere klankcontrasten getest worden. Een belangrijk nadeel van deze alternatieve stimulusopzet is overigens dat luisteraars mogelijk meer geneigd zijn de cue te gebruiken met de minste variatie (en dus de grootste en meest opvallende verschillen tussen stimuli).

Audiobewerkingsprogramma's kunnen gebruikt worden om de gemiddelde waardes van akoestische cues voor de eindpunten van een klankcontrast te meten. Een uitstekend (gratis) programma hiervoor is *Praat* (Boersma & Weenink, 2014). Om de akoestische waardes van de eindpunten te manipuleren of anderszins tussenliggende klankvarianten te creëren kan eveneens *Praat* gebruikt worden, of andere programma's waarmee spraakklanken gesynthesizeerd kunnen worden, bijvoorbeeld *Klatt synthesizer* (Klatt, 1980). Hiermee komen we aan bij een belangrijke overweging in cue-wegingsonderzoek. Hoewel het mogelijk is om bijvoorbeeld met *Praat* specifieke akoestische waardes van opgenomen klanken te manipuleren en zo tussenliggende klankvarianten te creëren, is deze procedure gevoeliger voor onnauwkeurigheden dan de stimuli voor zowel de eindpunten als de tussenliggende klankvarianten te synthesizeren. Doordat de gebruiker bij het synthesizeren van klanken alle akoestische parameters invult, kunnen specifieke akoestische parameters gemakkelijker onafhankelijk van elkaar gemanipuleerd worden, terwijl andere akoestische parameters juist constant gehouden worden. Op die manier heeft de gebruiker uiteindelijk meer con-





*Figuur 1:* Mogelijke stimulusdistributie voor het klinkercontrast /a-/ /a/ met klinkerlengte (ms) op de horizontale as en frequentie (Hz) van de eerste formant (F1) op de verticale as. Ieder zwart punt stelt een stimulus voor. Stimuluswaarden zijn gebaseerd op Escudero, Benders, en Lipski (2009).

trole over de precieze akoestische eigenschappen van de stimuli.

## Procedure

De details van de gevolgde procedure bij het afnemen van cue-wegingexperimenten verschillen sterk tussen studies, naar er zijn wel enkele generalisaties te maken. Zo wordt iedere doelstimulus (identificatietaken en categorische discriminatietaken) of ieder paar van twee doelstimuli (discriminatietaken) in ieder geval meerdere keren aangeboden tijdens een experiment, meestal in willekeurige volgorde. In principe geldt dat hoe vaker iedere stimulus of ieder stimuluspaar aangeboden wordt, hoe meer datapunten er verkregen worden en hoe nauwkeuriger en betrouwbaarder de analyse en daaruitvolgende resultaten zijn. De stimuli worden vaak via koptelefoons aangeboden en luisteraars gebruiken een toetsenbord, muis of touchscreen om hun antwoord te geven (geavanceerdere technieken zoals het meten van oogbewegingen kunnen gebruikt worden met heel jonge kinderen). De antwoordmogelijkheden (klankcategorieën) kunnen visueel in de vorm van letters, woorden of plaatjes op een computerscherm aangeboden worden (bijv. in identificatietaken), maar kunnen ook auditief aangeboden worden (bijv. in categorische discriminatietaken). Indien ze auditief aangeboden worden, dan kunnen de knoppen op het scherm ook een neutralere vorm krijgen, bijvoorbeeld ‘antwoord 1’ en ‘antwoord 2’.

## Cue-weginganalyse

De analyse van de meeste cue-weging experimenten kan samengevat worden onder drie variabelen: eindpunt-identificatie, gebruik van individuele cues, en cue-verhouding. Kort omschreven gaat het bij deze drie variabelen om de vaardigheid om de eindpunten van een klankcontrast van elkaar te onderscheiden of correct te identificeren (eindpunt-identificatie), de mate waarin luisteraars een bepaalde akoestische cue gebruiken bij het onderscheiden van een klankcontrast (individueel cue-gebruik), en de mate waarin luisteraars één cue zwaarder wegen (belangrijker vinden) dan een andere cue (cue-verhouding). Afhankelijk van de gebruikte analysemethode kan ook nog een maat berekend worden voor de discriminatiesterkte (hoe scherp is de grens tussen de twee klanken voor luisteraars?).

### Eindpunt-identificatie

Kort omschreven geeft een eindpunt-identificatiescore aan hoe accuraat luisteraars de twee eindpunten van een klankcontrast kunnen onderscheiden of identificeren. Dus in hoeverre ze een 'gemiddelde' /ɑ/ van een 'gemiddelde' /a/ kunnen onderscheiden, of een gemiddelde /ɑ/ of /a/ ook als zodanig kunnen identificeren. Een hoge eindpunt-identificatiescore geeft daarom alleen maar aan dat luisteraars de twee klanken van elkaar kunnen onderscheiden en zegt verder niets over welke akoestische cues ze hierbij gebruiken, en of één cue mogelijk belangrijk is dan een andere.

In veel cue-wegingstudies wordt de eindpunt-identificatiescore alleen als criterium gebruikt om de data van individuele luisteraars wel of niet mee te nemen in de analyse. Bijvoorbeeld, alleen luisteraars met een eindpunt-identificatiescore van 80% of hoger worden meegenomen in de analyse, dus alleen de luisteraars die de gemiddelde /ɑ/ en /a/ acht van de tien keer correct uit elkaar konden houden of acht van de tien keer een gemiddelde /ɑ/ of /a/ ook als zodanig konden identificeren. Cue-wegingsonderzoek is minder geïnteresseerd in de vraag *of* luisteraars de twee klanken van elkaar kunnen onderscheiden, dan in de vraag *hoe* ze dat doen en welke akoestische cues ze daarbij gebruiken. Een lage eindpunt-identificatiescore is een indicatie dat een luisteraar moeite had om het klankcontrast waar te nemen, de taak niet goed begrepen had, of zijn of haar aandacht niet goed bij de taak kon houden.

Om een mogelijke antwoord-bias van luisteraars in de richting van het ene of andere eindpunt van het klankcontrast zoveel mogelijk tegen te gaan bij de analyse van eindpunt-identificatiescores, kan in plaats van simpele percentage correct-berekeningen ook een maat gebruikt worden die corrigeert voor antwoord-bias (zoals  $A'$  (Grier, 1971)).  $A'$  zet de *hit rate* (correct geïdentificeerde /a/-stimuli) van een luisteraar af tegen de *false alarm rate* (als /ɑ/ geïdentificeerde /a/-stimuli) en geeft een index tussen 0 en 1. Hoe hoger de index, hoe beter het onderscheidingsvermogen (0,5 staat gelijk aan kansniveau).

## Individueel cue-gebruik

De aanbevolen statistische methode om cue-wegingdata te analyseren is logistische regressie, waarbij S-curves op binomiale categorische data gepast worden (Morrison, 2005, 2007). Het verschil tussen logistische regressie en de meer gebruikelijke lineaire regressie is dat de afhankelijke variabele (de data die gemodelleerd moet worden) in logaritmische waarden uitgedrukt wordt. Logistische regressie is bij uitstek geschikt voor het analyseren van data uit experimenten waarbij maar twee antwoorden mogelijk zijn (bijv. 'ja' en 'nee', of 'goed' en 'fout', of '/ɑ/' en '/a/'). De variabelen moeten binair gecodeerd zijn in de data, dat wil zeggen als 0 of 1 (bijvoorbeeld 0 voor 'fout' en 1 voor 'goed', of 0 voor '/ɑ/' en 1 voor '/a/'). Om de regressiecoëfficiënten voor verschillende akoestische cues zinvol te kunnen vergelijken, is het verder belangrijk dat de akoestische waarden voor beide cues omgezet worden in vergelijkbare cijferreeksen, afhankelijk van het aantal stappen waarin elke cue gevarieerd wordt (bijvoorbeeld 1 tot 7 voor de stimulusdistributie in Figuur 1). Op die manier worden de twee cues weergegeven op een schaal met vergelijkbare relatieve verschillen tussen opeenvolgende stimuli. Logistische regressie-analyses kunnen uitgevoerd worden met statistische software zoals *SPSS*, *SAS* of *R* (R Core development team, 2011), maar is bijvoorbeeld ook mogelijk in *Praat* (Boersma & Weenink, 2014).

De regressiecoëfficiënten van de voorspellende factoren (de gemanipuleerde akoestische cues) in de uiteindelijke regressie-functie zijn een index voor de mate waarin een akoestische cue gebruikt wordt door een groep luisteraars. Bijvoorbeeld formantfrequentie en klinkerlengte bij het onderscheiden van de klinkers /ɑ/ en /a/. Door een regressiemodel met en zonder een bepaalde akoestische cue als voorspeller statistisch met elkaar te vergelijken kan bekeken worden of die cue significant bijdraagt aan het onderscheiden van het klankcontrast door een groep luisteraars. Op dezelfde manier kan een regressiemodel met een interactieterm tussen beide cues statistisch vergeleken worden met een model met alleen hoofdeffecten van de twee cues om te bekijken of luisteraars beide akoestische cues *integreren* (dat wil zeggen, of het gebruik van één cue het gebruik van de andere cue beïnvloedt). Regressiecoëfficiënten kunnen ook direct statistisch met elkaar vergeleken worden tussen twee of meer groepen luisteraars om te bekijken of de groepen van elkaar verschillen in de mate waarin ze gebruik maken van een bepaalde akoestische cue (hiervoor kunnen simpele parametrische of non-parametrische toetsen voor onafhankelijke samples gebruikt worden).

Alhoewel de voorkeur mogelijk gegeven zou moeten worden aan de statistisch iets nauwkeurigere en krachtigere logistische regressiemethode, is er ook een simpelere manier om een betrouwbare indicatie te krijgen van het gebruik van individuele akoestische cues, namelijk de *edge ratio*-analyse (Boersma & Escudero, 2005; Escudero & Boersma, 2004). Voor deze analyse gebruiken we in het geval van een 7 x 7 stimulusvierkant met formantfrequentie op de verticale assen en klinkerlengte op de horizontale assen (zie Figuur 1) alleen de stimuli op de vier assen van het stimulusvierkant (zie Figuur 2). Indien luisteraars elke stimuli bijvoorbeeld zes keer te horen kregen in het experiment, dan zijn er in totaal 36 responsen (datapunten) voor iedere as van het stimulusvierkant (stimuli in de hoeken tellen voor 50% ( $6 / 2 = 3$ ) mee met de verticale as en voor 50% ( $6 / 2 = 3$ ) met de horizontale as). Om het

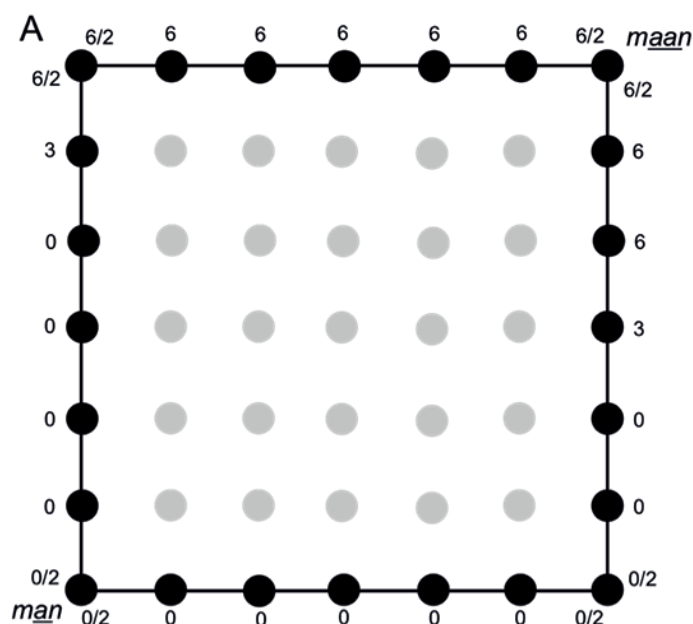
simpel te houden, staat in Figuur 2 het aantal /a/-responsen per stimulus weergegeven voor een geïdealiseerde luisteraar met 0%, 50% of 100% /a/-responsen voor iedere stimulus op de vier assen. Om het gebruik van klinkerlengte te berekenen, tellen we alle /a/-responsen voor stimuli op de rechteras op (de as met de stimuli met de normale klinkerlengte voor /a/; in Figuur 2 zijn dit er 18) en trekken daar het aantal /a/-responsen voor stimuli op de linker-keras van af (de as met de stimuli met de normale klinkerlengte voor /a/; in Figuur 2 zijn dit er 6). De uitkomst ( $18 - 6 = 12$ ) wordt vervolgens gedeeld door het totaal aantal responsen voor stimuli op de verticale as (= 36) om een indicatie te krijgen van het gebruik van klinkerlengte in het experiment door deze geïdealiseerde luisteraar ( $12 / 36 = 0,33$ ). Deze luisteraar vertrouwde dus voor 33% op klinkerlengte bij het bepalen of een aangeboden stimulus een /a/ of een /ɑ/ was. Op dezelfde manier kunnen we het gebruik van formantfrequentie door deze luisteraar berekenen door het aantal /a/-responsen voor stimuli op de onderste as (0 in Figuur 2) af te trekken van het aantal /a/-responsen voor stimuli op de bovenste as (60 in Figuur 2), en de uitkomst vervolgens te delen door het totaal aantal responsen op de horizontale as ( $(36 - 0) / 36 = 1$ , dus een gebruik van 100%). Hoewel we in het voorbeeld hierboven het aantal /a/-responsen op de assen telden, hadden we natuurlijk ook het aantal /ɑ/-responsen op de assen kunnen tellen, met precies dezelfde uitkomsten.

De *edge ratio*-methode en de logistische regressiemethode geven over het algemeen dezelfde of slechts minimaal verschillende uitkomsten, ongeacht of in de logistische regressie alle stimuli meegenomen worden of alleen de stimuli op de assen (Boersma & Escudero, 2005). Om deze reden wordt er in sommige cue-wegingstudies zelfs voor gekozen om alleen de stimuli op de assen van het stimulusvierkant aan luisteraars aan te bieden en zo het totaal aantal stimuli in het experiment te beperken (bijv. Brasileiro, 2009; Escudero et al., 2009; Giezen, Escudero, & Baker, 2010).

## Cue-verhouding

Wanneer de waarden voor het gebruik van individuele cues bekend zijn, is het betrekkelijk eenvoudig om deze om te zetten in een maat voor de verhouding van de twee cues, dat wil zeggen het relatieve gewicht van beide cues voor luisteraars, ongeacht de methode waarmee deze waarden verkregen zijn. Voor zowel de logistische regressiemethode als de *edge ratio*-methode zijn er twee onderling uitwisselbare manieren om met behulp van de waarden voor individueel cue-gebruik de cue-verhouding te berekenen. De eerste manier is om de waarde voor het cue-gebruik van één van de twee cues te delen door de som van de waarden voor het cue-gebruik van beide cues. Bijvoorbeeld, de waarde voor het cue-gebruik van formantfrequentie delen door de som van de waarden voor het cue-gebruik van formantfrequentie en klinkerlengte geeft een waarde tussen 0 en 1 die aangeeft of een bepaalde luisteraar of groep luisteraars formantfrequentie minder zwaar (cue-verhouding  $< 0,5$ ), even zwaar (cue-verhouding = 0,5) of zwaarder (cue-verhouding  $> 0,5$ ) wegen dan dan klinkerlengte. Voor de geïdealiseerde luisteraar in Figuur 2 is de cue-verhouding 0,75 (1 delen door 1,33, de som van 1 en 0,33). Voor deze luisteraar weegt formantfrequentie dus zwaarder dan klinkerlengte bij het onderscheiden van /ɑ/ en /a/.

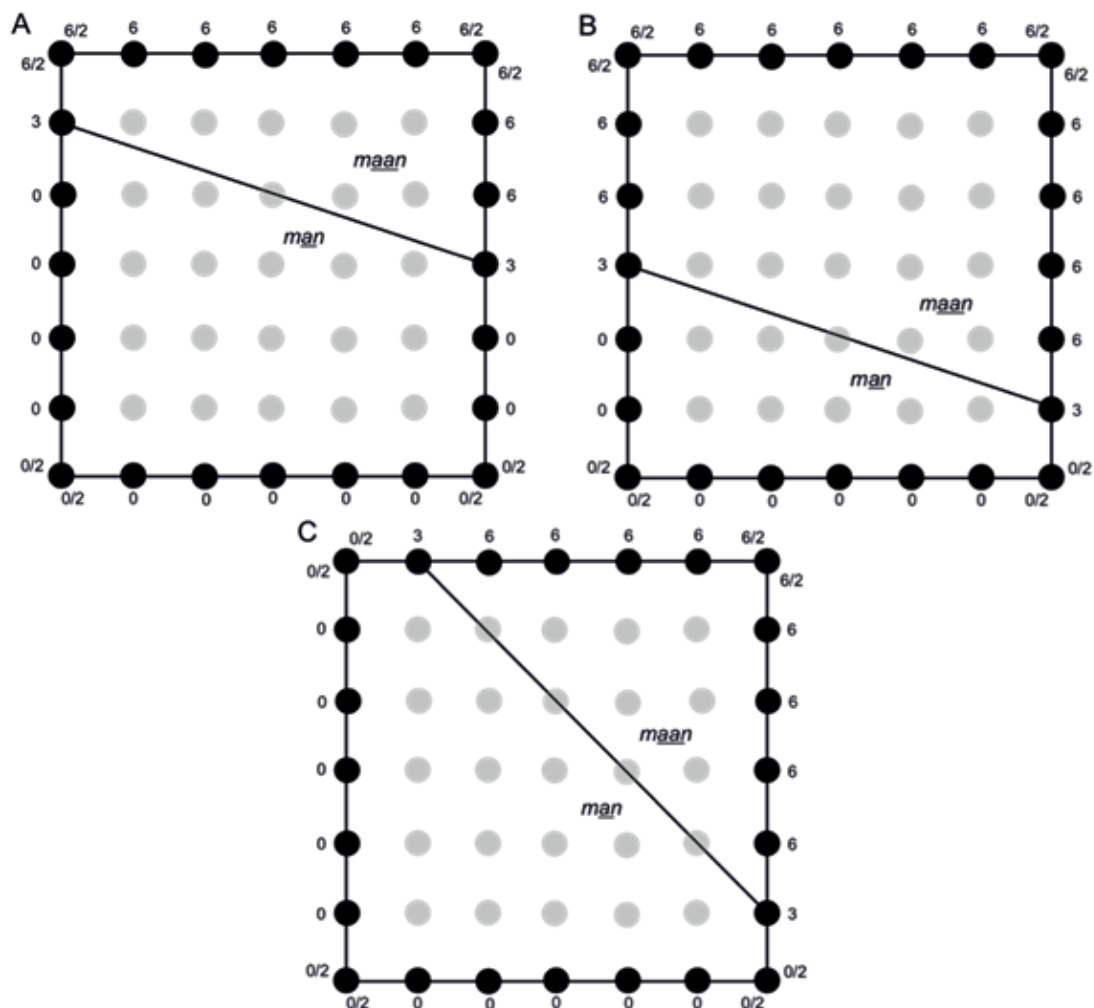
Een andere manier om te bepalen hoeveel zwaarder luisteraars een bepaalde cue wegen



*Figuur 2:* Stimulusdistributie voor de edge ratio-analyse waarbij alleen gekeken wordt naar de data voor de stimuli op de horizontale (klinkerlengte in ms) en verticale (frequentie van de eerste formant in Hz) assen van het vierkant. De cijfers naast de stimuli geven het aantal /a/-responsen weer voor een geïdealiseerde luisteraar met 0%, 50% of 100% /a/-responsen voor de stimuli op de assen.

ten opzichte van een andere cues, is om de twee cue-waardes direct door elkaar te delen. Om te bepalen hoeveel zwaarder luisteraars formantfrequentie wegen dan klinkerlengte in bovenstaand voorbeeld, delen we de cue-waarde voor formantfrequentie door de cue-waarde voor klinkerlengte, dus  $1/0,33 = 3$ . Voor deze luisteraar weegt formantfrequentie dus drie keer zo zwaar als klinkerlengte. Simpele parametrische of non-parametrische toetsen voor ongerelateerde samples kunnen gebruikt worden om waardes voor de cue-verhouding te vergelijken tussen groepen luisteraars.

Het is belangrijk om te vermelden dat de waardes voor individueel cue-gebruik en de cue-verhouding niet aangeven waar precies in het stimulusvierkant van formantfrequentie en klinkerlengte een individuele luisteraar of een groep luisteraars precies de grens tussen de twee klanken leggen. Oftewel, waar in het stimulusvierkant de grens getrokken moet worden. Luisteraar 1 kan bijvoorbeeld het merendeel van de stimuli in het vierkant als /ɑ/ bestempelen, terwijl luisteraar 2 het merendeel van de stimuli als /a/ bestempelt, maar beide luisteraars formantfrequentie en klinkerlengte op dezelfde manier (dat wil zeggen, even zwaar) wegen. Aan de hand van de regressie-functie kun je overigens wel een benadering van de locatie van de grens tussen de twee klanken voor individuele luisteraars zichtbaar maken, zoals in Figuur 3A-3C gedaan is voor de geïdealiseerde luisteraar uit Figuur 2 en twee andere geïdealiseerde luisteraars. In al deze figuren vallen /a/-responsen gemiddeld



*Figuur 3:* Klankgrenzen voor het Nederlandse klinkercontrast /a/-/a/ voor drie geïdealiseerde luisteraars. Paneel A: formantfrequentie weegt drie keer zo zwaar als klinkerlengte en relatief meer stimuli worden als /a/ benoemd. Paneel B: formantfrequentie weegt drie keer zo zwaar als klinkerlengte en relatief meer stimuli worden als /a/ benoemd. Paneel C: formantfrequentie en klinkerlengte wegen even zwaar en relatief meer stimuli worden als /a/ benoemd.

genomen in de rechterbovenhoek van het stimulusvierkant en /a/-responsen in de linkeronderhoek. Voor de combinaties van formantfrequentie en klinkerlengte op de weergegeven klankgrens denkt de luisteraar 50% van de tijd dat hij of zij een /a/ hoort en 50% van de tijd dat hij of zij een /a/ hoort. De twee luisteraars in *Figuur 3A* en *Figuur 3B* wegen formantfrequentie allebei drie keer zo zwaar als klinkerlengte, maar het totale aantal /a/-responsen is veel hoger voor de luisteraar in *Figuur 3B* (60 in *Figuur 3A* en 84 in *Figuur 3B*). De luisteraar in *Figuur 3C*, daarentegen, gaf in totaal net zoveel /a/-responsen als de luisteraar in *Figuur 3A*, maar heeft een heel andere cue-verhouding. De waarde voor het cue-gebruik

van formantfrequentie voor deze luisteraar is  $(30 - 0) / 36 = 0,83$ , en de waarde voor het cue-gebruik van klinkerlengte is eveneens  $(30 - 0) / 36 = 0,83$ , met daaruitvolgend een cue-verhouding van 1 ( $0,83 / 0,83$ ). Voor de luisteraar in Figuur 3C wegen formantfrequentie en klinkerlengte dus even zwaar.

## Discriminatiesterkte

Indien logistische regressie gebruikt wordt om de data te analyseren, dan is het mogelijk om nog een vierde variabele te berekenen, namelijk de individuele variatie rond de geschatte perceptuele grens tussen de twee klanken. Deze variabele kan gebruikt worden als een maat voor de sterkte van de discriminatie. In wiskundige termen gaat het dan om hoe snel de verandering van /ɑ/-respons naar /a/-respons plaatsvindt over het stimulusvierkant heen gezien, oftewel de helling van de grens tussen /ɑ/ en /a/. Volgens Morrison (2007) kan deze discriminatiemaat berekend worden door de wortel te nemen van de som van de kwadraten van de regressie-coëfficiënt voor beide akoestische cues in een experiment met twee gemanipuleerde cues. Indien maar één akoestische cue gemanipuleerd was in het experiment, dan is de discriminatiesterkte gelijk aan een vierde van de regressie-coëfficiënt voor deze cue. In beide gevallen geldt, hoe hoger de waarde, hoe scherper de grens. Onnieuw kunnen simpele parametrische of non-parametrische toetsen voor ongerelateerde samples gebruikt worden om de discriminatiesterkte te vergelijken tussen groepen luisteraars.

## Onderzoekspopulaties

In deze sectie bespreken we enkele voorbeelden van akoestisch cue-wegingsonderzoek bij verschillende taallerende populaties in het Nederlandse taalgebied (en soms daarbuiten), waaronder baby's, kinderen van de basisschoolleeftijd, jongere en oudere tweede taalleerders, en kinderen en volwassenen met gehoorproblematiek. Studies naar het Nederlandse klinkercontrast /ɑ/-/a/, een contrast in formantfrequentie van de eerste en tweede formant en klinkerlengte, vormen een rode draad hierbij.

### Normaalontwikkkelende kinderen

Susan Nittrouer en collega's waren een van de eersten om systematisch de ontwikkeling van akoestische cue-weging te onderzoeken bij jonge eentalige kinderen (voor discussie, zie bijv. Nittrouer, 2002). In deze studies ging het vaak om de weging van dynamische informatie zoals de overgang in formantfrequenties tussen een medeklinker en opeenvolgende klinker ten opzichte van meer statische informatie zoals de intensiteit van het ruisspectrum in fricatieven, in lettergrepen bestaande uit een medeklinker en klinker. Uit deze en andere studies is naar voren gekomen dat kinderen al naargelang ze ouder worden statische cues zwaarder gaan wegen, terwijl jongere kinderen dynamische cues juist zwaarder wegen. Deze verschuiving in het relatieve gewicht van statische en dynamische cues wordt ook wel de *developmental cue weighting shift* genoemd (Hicks & Ohde, 2005; Nittrouer & Miller, 1997).

Gerrits (2001) onderzocht klankcategorisatie van verscheidene Nederlandse klinker- en medeklinkercontrasten bij 4-, 6- en 9-jaar oude kinderen en volwassenen, waaronder het klinkercontrast /ɑ/-/a/, ingebed in de woorden /zak/ en /za:k/. Ze maakte hierbij gebruik van gesynthetiseerde stimuli en een identificatietoets met twee antwoordmogelijkheden. Alleen luisteraars met eindpunt-identificatiescores hoger dan 90% werden meegenomen in de analyse. Formantfrequentie werd gemanipuleerd in zes stappen en elke stimulus kon twee waarden aannemen voor klinkerlengte (/ɑ/-lengte of /a/-lengte). Gerrits gebruikte de helling van de classificatiecurve als index voor het gebruik van formantfrequentie als cue en de verschuiving van de curve op de x-as voor stimuli met de /ɑ/-lengte en stimuli met de /a/-lengte als index voor het gebruik van klinkerlengte als cue. Ze vond dat kinderen van vier jaar en ouder zowel formantfrequentie als klinkerlengte gebruikten om /ɑ/ en /a/ van elkaar te onderscheiden. Vier-jarigen en zes-jarigen gebruikten formantfrequentie minder dan negen-jarigen en volwassenen, maar de groepen verschilden niet in het gebruik van klinkerlengte.

In plaats van te kijken naar de doorlopende ontwikkeling, hebben enkele recente studies juist gekeken naar de allereerste stappen in de ontwikkeling van cue-weging. Bijvoorbeeld, Dietrich, Swingley, en Werker (2007) lieten zien dat 18-maanden oude Nederlandstalige baby's klinkerlengte al gebruiken als akoestische cue om nieuwe woordjes met korte en lange klinkers uit elkaar te houden, terwijl Engelstalige baby's nieuwe woordjes die alleen verschilden in klinkerlengte niet konden leren (in het Engels is klinkerlengte niet klankonderscheidend).

Curtin, Fennell, en Escudero (2009) onderzochten of 15-maanden oude Canadese baby's nieuwe woordjes konden leren die minimaal verschilden in de Canadees-Engelse klinkercontrasten /i/-/i/, /i/-/u/ en /ɪ/-/u/ (/dit/-/dit/, /dit/-/dut/, en /dit/-/dut/). Deze contrasten verschillen respectievelijk in de formantfrequenties van F1 en F2, F2 en F3, en F1, F2 en F3. De baby's leerden alleen de woordjes met het klankcontrast /i/-/i/. Deze bevinding suggereert dat jonge baby's in het begin vooral gericht zijn op de akoestisch gezien meest distinctieve cue (F1). Verdere aanwijzingen voor de rol van akoestische distinctie in de vroege klankwaarneming werd recentelijk gevonden in een vervolgstudie met Australische baby's (Escudero, Best, Kitamura, & Mulak, 2014). Hoewel zowel het Canadees-Engels als het Australisch-Engels de klinkercontrasten /i/-/i/ en /i/-/u/ kennen, zijn de fonetische verschillen tussen de klinkers in deze contrasten kleiner in het Australisch-Engels dan in het Canadees-Engels. Australische baby's van 15 maanden konden alleen nieuwe woordjes met de Canadees-Engelse contrasten leren, niet de Australisch-Engelse contrasten, ondanks dat de Australisch-Engelse contrasten in hun taalaanbod voorkwamen.

Benders (2013), tot slot, onderzocht de waarneming van het klinkercontrast /ɑ/-/a/ door 11-maanden en 15-maanden oude baby's. Voor haar studie synthetiseerde ze klinkers met alleen een verschil in frequentie van de eerste en tweede formant, alleen een verschil in klinkerlengte, of met een verschil in zowel formantfrequentie als klinkerlengte. De klinkers werden ingebed in een CVC-frame (/s/-v-/k/) en aangeboden als pseudowoorden. Oogbewegingen van de baby's fungeerden als index voor klankonderscheiding. De baby's luisterden eerst naar meerdere herhalingen van één van beide pseudowoorden gedurende een trainingsfase (bijv. /sak/-sak/-/sak/ etc.). Daarna volgde de testfase. Als baby's de klanken



/ɑ/ en /a/ van elkaar kunnen onderscheiden, dan zouden ze langer moeten kijken naar een trial met een alternerende stimulus (/sak/-/sak/) dan naar trials met alleen herhaling van dezelfde stimulus (/sak/-/sak/). Benders vond dat baby's uit beide leeftijdsgroepen /ɑ/ en /a/ van elkaar konden onderscheiden als de stimuli zowel in formantfrequentie als klinkerlengte verschilden, maar niet als ze alleen in formantfrequentie of klinkerlengte verschilden.

### **Volwassen tweede taalleerders**

Iemand die op latere leeftijd een tweede taal leert, moet voor de klankcontrasten die verschillen tussen de eerste (L1) en tweede (L2) taal opnieuw leren de relevante akoestische cues te identificeren en tegen elkaar af te zetten om die contrasten op de juiste manier te kunnen onderscheiden. Er zijn verschillende scenario's mogelijk voor het wel of niet overlappen van 'cue-wegingspatronen' in de L1 en L2. Als een klankcontrast in L1 volledig overlapt met het contrast in L2, dan hoeft de taalleerder uiteraard geen nieuw cue-wegingspatroon te leren en kan hij of zij gewoon de geleerde L1-weging toepassen op het vergelijkbare contrast in de L2. Een ander scenario is als de L1 een bepaald contrast wel maakt, maar de tweede taal niet. Zo kent bijvoorbeeld het Spaans het klinkercontrast /ɑ/-/a/ niet. Om dit contrast in het Nederlands te leren onderscheiden, moet een Spaanse leerder van het Nederlands de relevante cues identificeren en leren te gebruiken. Een derde scenario is als zowel de L1 als L2 een bepaald klankcontrast heeft, maar de cue-wegingspatronen verschillen in de L1 en de L2 zodat de distributie van het klankcontrast slechts gedeeltelijk overlapt tussen de twee talen. Zo maakt het Zuid-Duits wel een onderscheid tussen de klinkers /ɑ/ en /a/, maar overlapt de distributie van de formantfrequenties voor beide klinkers grotendeels. Het is daarom goed mogelijk dat Duitse luisteraars meer moeten vertrouwen op klinkerlengte dan formantfrequentie om de twee klinkers uit elkaar te houden. Escudero (2005) bespreekt deze scenario's - en nog andere - uitgebreid in haar proefschrift over klankwaarneming in tweede taalverwerving.

Escudero et al. (2009) vergeleken de cue-weging van het Nederlandse klinkercontrast /ɑ/-/a/ door Nederlandse L1 luisteraars, Spaanse L2 leerders van het Nederlands en Duitse L1 luisteraars. In het Spaans is klinkerlengte niet klankonderscheidend, terwijl klinkerlengteverschillen in het Duits juist vaak voorkomen. De gebruikte taak was een XAB-taak waarin formantfrequentie (een combinatie van F1 en F2) en klinkerlengte in zes stappen gemanipuleerd werden (zie Figuur 1; alleen de stimuli op de randen werden aangeboden). Iedere stimulus werd 10x aangeboden en logistische regressie werd gebruikt om individueel cue-gebruik, cue-verhouding en discriminatiesterkte te berekenen. De resultaten lieten zien dat Nederlandse L1 luisteraars formantfrequentie zwaarder wegen dan klinkerlengte bij het onderscheiden van /ɑ/ en /a/, terwijl Spaanse leerders van het Nederlands klinkerlengte juist zwaarder wegen dan formantfrequentie. Duitse luisteraars wegen formantfrequentie ook zwaarder dan klinkerlengte, maar maakten minder gebruik van formantfrequentie dan Nederlandse luisteraars. Het gebruik van klinkerlengte als cue voor klankwaarneming in de L2 door de Spaanse leerders, ook al is deze cue niet relevant in hun L1, zou verklaard kunnen doordat 1) klinkerlengte mogelijk een universeel perceptueel opvallende cue is, 2) de Spaanse leerders er expliciet aan herinnerd worden dat deze twee klinkers een verschil-

lende klinkerlengte hebben in het Nederlands (bijvoorbeeld door hun verschillende spelingswijze), of 3) er transfer plaatsvindt van fonetische variatie in klinkerlengte in de L1 naar fonologische categorisatie in de L2.

## Tweetalige kinderen

Er is nog relatief weinig bekend over de ontwikkeling van akoestische cue-weging bij tweetalige kinderen, zowel bij kinderen die beide talen tegelijk leren als bij kinderen die de twee talen kort na elkaar leren. In recente jaren zijn er wel steeds meer studies verschenen over de vroege klank- en woordontwikkeling van tweetalige kinderen (Sebastián-Gallés, 2010; Werker, 2012).

Brasileiro (2009) bestudeerde in detail de verwerving van het klinkercontrast /ɑ/-/a/ door tweetalige kinderen die Braziliaans-Portugees en Nederlands leerden. Braziliaans-Portugees kent dit specifieke klankcontrast niet en klinkerlengte is ook niet klankonderscheidend in deze taal. Brasileiro onderzocht een groep tweetalige kinderen die opgroeiden in Nederland en een groep tweetalige kinderen die opgroeiden in Brazilië. Daarnaast verzamelde ze data van eentalige Braziliaanse en Nederlandse kinderen en volwassenen. De kinderen waren tussen de vier en zeven jaar oud. Brasileiro gebruikte een XAB-taak om cue-weging te onderzoeken. De stimuli in deze studie bestonden uit gesynthetizeerde klankvarianten die varieerden in formantfrequentie (een combinatie van F1 en F2) en klinkerlengte. Alleen stimuli op de vier assen van het stimulusvierkant (vgl. Figuur 2) werden gesynthetiseerd en aangeboden om zo de lengte van de taak beperkt te houden voor de kinderen. Brasileiro berekende een  $A'$ -score als index voor eindpunt-identificatie, en alleen kinderen en volwassenen die hoger dan 80% correct scoorden, werden meegenomen in de analyse. Ze gebruikte de *edge ratio*-methode om cue-weging te analyseren en vond dat alle groepen meer gebruik maakten van formantfrequentie dan klinkerlengte om /ɑ/ en /a/ van elkaar te onderscheiden. In alle groepen kinderen vond er een leeftijdsontwikkeling plaats in de richting van meer gebruik van formantfrequentie als cue. Brasileiro vond in deze cross-sectionele studie geen bewijs voor een vergelijkbare leeftijdsontwikkeling in het gebruik van klinkerlengte als cue, en ook waren er geen aanwijzingen in deze studie dat de ontwikkeling van cue-weging bij tweetalige kinderen achterloopt ten opzichte van eentalige kinderen.

In een tweede, longitudinale studie volgde Brasileiro (2009) een groep eentalige Nederlandse en tweetalige Nederlands-Braziliaans-Portugese kinderen en volwassenen over een periode van drie jaar met een jaarlijks meetmoment in de vorm van een cue-weging taak. Ze vond dat beide groepen kinderen over de jaren heen meer gebruik gingen maken van formantfrequentie als cue, maar deze groei verliep trager voor de tweetalige kinderen. In het gebruik van klinkerlengte als cue lieten juist de tweetalige kinderen een sterkere ontwikkeling zien dan de eentalige kinderen. Dit zou te maken kunnen hebben met de mogelijke opvallendheid van klinkerlengte in L2-contrasten voor L2 leeders met een L1-achtergrond waarin klinkerlengte niet klankonderscheidend is (zie de sectie over cue-weging bij volwassen tweede taalleeders).

## Slechthorende kinderen en volwassenen

Akoestische cue-weging experimenten lenen zich uiteraard bijzonder goed voor onderzoek bij populaties met gehoorproblemen. De mate van gehoorverlies lijkt een belangrijke voorspellende factor te zijn van verschillen in cue-weging tussen kinderen en volwassenen met gehoorverlies en normaalhorende kinderen en volwassenen (Jergers, 2007). Zo verschillen kinderen met mild tot matig gehoorverlies niet van normaalhorende kinderen in hun gebruik van *voice onset time* informatie (het moment waarop de stemgevendheid ingezet wordt bij stemgevendende plosieven zoals /b/ en /d/), maar kinderen met ernstig gehoorverlies wel. Ook wegen kinderen en volwassenen met mild tot matig gehoorverlies formantovergangen in CV-lettergrepen met een fricatieve klank even zwaar als normaalhorende kinderen en volwassenen (Pittman, Stelmachowicz, Lewis, & Hoover, 2002).

Een relatief nieuwe onderzoekspopulatie in deze doelgroep zijn dove kinderen en volwassenen met een cochleair implantaat (CI), een elektronische binnenoorprothese die geluid opvangt, omzet in elektronische signalen en op die manier de gehoorzenuw stimuleert en geluidswaarneming mogelijk maakt. De geluidsinformatie die een CI doorgeeft is beperkt in vergelijking met het menselijke gehoor. Vooral de resolutie voor het waarnemen van verschillen in formantfrequentie is relatief laag. Informatie uit formantfrequentie is vooral belangrijk voor klinkerherkenning en voor het onderscheiden van medeklinkercontrasten die verschillen in plaats van articulatie. De herkenning van andere medeklinkercontrasten is juist weer sterk afhankelijk van klankduur en luidheidinformatie.

Studies met gevocodeerde spraak die implantaten simuleren hebben aangetoond dat kinderen meer moeite hebben met het waarnemen van spraak met gereduceerde formant-informatie dan volwassenen (bijv. Eisenberg, Shannon, Schaefer Martinez, Wygonski, & Boothroyd, 2000). Daarnaast hebben studies met volwassen CI-gebruikers gevonden dat vooral subtiele verschillen in formantfrequentie of snelle veranderingen in formantfrequentie (bijv. formantovergangen) problemen kunnen opleveren voor de spraakwaarneming met een CI (zie bijv. Xu & Pfingst, 2008). Een van de weinige studies met CI-kinderen vond dat kinderen en volwassenen met een CI bij het desambigueren van ambigue fricatieven minder gebruik maakten van eropvolgende (niet-ambigue) klinkerinformatie dan normaalhorende kinderen en volwassenen (Summerfield et al., 2002).

Giezen et al. (2010) onderzochten verschillen in cue-weging tussen een groep Nederlandse en Vlaamse CI-kinderen en een groep normaalhorende Nederlandse en Vlaamse kinderen. Alle kinderen waren tussen de vier en zeven jaar oud. De gemiddelde leeftijd van implantatie voor de CI-kinderen was anderhalf jaar. De studie keek naar verschillende medeklinkercontrasten en klinkercontrasten, waaronder het klinkercontrast /a/-/a/. De stimuli werden aangeboden in een XAB-taak en bestonden uit opgenomen spraakklanken waarvan de formantfrequentie (een combinatie van F1 en F2) en klinkerlengte gemanipuleerd waren in een 4 x 4 stimulusvierkant met alleen stimuli op de assen. Vanwege de bijzondere populatie werden gemanipuleerde natuurlijke spraakstimuli gebruikt en geen gesynthetiseerde stimuli. Omdat meerdere klankcontrasten getest werden, werd elke stimulus slechts tweemaal aangeboden. Verder werd er in deze studie geen criterium aangehouden voor correcte identificatie van de eindpuntstimuli. In plaats daarvan werden eindpunt-identificatiescores

geanalyseerd als afhankelijke variabele. De onderzoekers gebruikten de logistische regressiemethode om cue-weging te analyseren.

Ondanks hun gehoorbeperking konden de CI-kinderen het klankcontrast /ɑ/-/a/ duidelijk waarnemen en verschilden hun identificatiescores voor de twee eindpunten niet significant van die van normaalhorende kinderen. De CI-kinderen maakten minder gebruik van formantfrequentie als cue, maar verschilden niet van normaalhorende kinderen in het gebruik van klinkerlengte. Zowel CI-kinderen als normaalhorende kinderen wogen formantfrequentie waarder dan klinkerlengte bij het onderscheiden van /ɑ/ en /a/. De discriminatiesterkte was marginaal lager voor CI-kinderen dan normaalhorende kinderen, wat erop duidt dat de CI-kinderen minder zeker van zichzelf waren in hun oordelen. Voor andere klankcontrasten in de studie werd grotendeels hetzelfde gevonden, namelijk minder gebruik van sommige akoestische cues door de CI-kinderen (bijv. formantfrequentie en *voice onset time*), maar vergelijkbare cue-verhoudingen voor CI-kinderen en normaalhorende kinderen. Voor een fricatief contrast (/f/-/s/) waren overigens zelfs de eindpunt-identificatiescores significant lager voor CI-kinderen dan voor normaalhorende kinderen.

## **Kinderen met spraak-taalproblematiek**

Voorzover wij weten zijn er geen studies die specifiek naar akoestische cue-weging bij kinderen met spraak-taalproblematiek of leesproblemen hebben gekeken. Toch is het zeker niet vergezocht om de mogelijke toepassing van cue-wegingstechnieken bij deze populatie hier te bepreken. Er is immers veel discussie over de vraag of kinderen met bijvoorbeeld Specific Language Impairment (SLI) of dyslexie ook spraakwaarnemingproblemen hebben, en of dergelijke spraakwaarnemingproblemen aan de grondslag kunnen liggen van de fonologische verwerkingsproblemen die voor beide groepen kinderen beschreven worden in de literatuur (zie bijv. McArthur & Bishop, 2001). Gerrits en De Bree (2009) vergeleken bijvoorbeeld categorisatie van het medeklinkercontrast /p/-/k/ tussen kinderen met een genetisch risico op dyslexie, kinderen met SLI en normaal ontwikkelende kinderen. Alle kinderen waren tussen de drie en vier jaar oud. De twee klinische groepen verschilden niet van elkaar en beide groepen scoorden lager dan de normaal ontwikkelende kinderen. Dit resultaat sluit aan bij een eerdere studie die liet zien dat kinderen met SLI lager scoorden dan normaal ontwikkelende kinderen op een categorisatietaak voor het medeklinkercontrast /p/-/k/, maar vergelijkbaar scoorden voor het klinkercontrast /ɑ/-/a/ (Van Alphen et al., 2004). Een analyse van de cue-wegingpatronen voor het klinkercontrast in beide groepen zou interessant zijn, omdat vergelijkbare discriminatie of categorisatie nog niet hoeft te betekenen dat normaal ontwikkelende kinderen en kinderen met SLI akoestische cues ook op dezelfde manier gebruiken. Eventuele verschillen in cue-wegingpatronen tussen de twee groepen zouden inzicht kunnen geven in de vraag of kinderen met SLI moeite hebben met het verwerken van specifieke types van akoestische informatie. Een dergelijke analyse zou zelfs mogelijk zijn met de bestaande data, omdat zowel formantfrequentie (in vijf stappen) als klinkerlengte (in twee stappen) gevarieerd werden in de studie, maar alleen de manipulatie van formantfrequentie uitgewerkt wordt in het artikel.

Om dezelfde reden is het interessant om cue-weging als onderzoeksmethode in te zet-

ten om te bepalen of klankproductieproblemen zonder aanwijsbare fysiologische oorzaak een articulatorische, perceptuele of taalkundige grondslag hebben. In deze bredere context van spraak-taalproblematiek biedt cue-weging een perceptie-georiënteerd tegenwicht aan meer gangbare taalkundig-georiënteerde benaderingen van fonologische ontwikkeling (zie bijv. Escudero & Benders, 2010 voor discussie),

## Discussie

We hebben hopelijk duidelijk gemaakt dat akoestische cue-weging een krachtige en waardevolle techniek is in klankwaarnemingsonderzoek. Niet alleen is het mogelijk om deze techniek te gebruiken bij zeer verschillende doelgroepen, waaronder tweede taalleerders en luisteraars met gehoor- en/of andere spraak-taalproblematiek, maar ook is de techniek geschikt voor praktisch alle leeftijdsgroepen, waaronder jonge kinderen. De precieze eigenschappen van gebruikte cue-wegingtaken zijn afhankelijk van de doelgroep, en een taak die geschikt is voor volwassenen is niet zonder meer ook geschikt voor kinderen. Vooral de eisen die de taak aan de concentratiespanne en het werkgeheugen stelt, moeten in overweging worden genomen bij het opzetten van een cue-wegingstudie. Het aantal verschillende stimuli en het aantal herhalingen van iedere stimulus zijn hierbij belangrijke factoren. Daarnaast dragen het aantal antwoordmogelijkheden (klankcategorieën) waaruit luisteraars kunnen kiezen en de inter-stimulusinterval bij aan de uiteindelijke werkgeheugenbelasting van de taak.

De toegevoegde waarde van cue-weging experimenten voor klankwaarnemingsonderzoek is voornamelijk dat klankwaarnemingsprocessen teruggebracht worden tot de 'ruwe data' waarmee de oren en hersenen aan de slag moeten, namelijk de akoestische informatie waaruit klanken bestaan. Dit verschilt sterk van meer taalkundige benaderingen in klankwaarnemingsonderzoek, waarbij klanken van elkaar onderscheiden worden in distinctieve fonologische kenmerken (bijv. Fikkert, 2010). Ook verschilt deze benadering substantieel van meer productie-georiënteerde benaderingen van klankwaarneming, waarbij luisteraars klanken herkennen op basis van de articulatorische bewegingen waaruit die klanken bestaan (bijv. Galantucci, Fowler, & Turvey, 2006). In plaats daarvan worden klankrepresentaties gedefinieerd in termen van taalspecifieke combinaties van akoestische cues met verschillend perceptueel gewicht.

Naast deze toegevoegde waarde voor theorievorming heeft onderzoek naar akoestische cue-weging ook praktische toepassingen. Zo kan de techniek gebruikt worden om akoestische cues te identificeren die problemen (blijven) vormen voor specifieke onderzoekspopulaties, bijvoorbeeld het gebruik van formantinformatie in de perceptie van medeklinkercontrasten die verschillen in plaats van articulatie door jonge CI-gebruikers (bijv. Bouton, Serniclaes, Bertoncini, & Colé, 2012; Giezen et al., 2010). Aan die akoestische cues kan dan extra aandacht gegeven worden binnen interventiemethodes gericht op klankwaarneming en fonologische vaardigheden. Moore, Rosenberg, en Coleman (2005) vonden bijvoorbeeld dat klankdiscriminatie training positieve effecten heeft op de fonologische verwerkingsvaardigheden van normaal ontwikkelende schoolgaande kinderen.

Cue-wegingstechnieken kunnen ook gebruikt worden om het (sterker) gebruik van bepaalde akoestische cues direct te trainen en te stimuleren. Zo zijn er verscheidene trainingstudies met tweede taalleerders uitgevoerd die gericht waren op het aanleren van klankcontrasten door selectief de aandacht van leerders te vestigen op relevante cues (bijv. Iverson, Hazan, & Bannister, 2005; Kondaurova & Francis, 2010). Andere studies hebben gekeken naar de leereffecten van distributionele training van klankcontrasten, waarbij stimuli aan beide einden van een continuum (dat wil zeggen, de eindpunten of stimulivarianten die daar dicht bij liggen) vaker herhaald worden dan stimuli in het midden van het continuum (dat wil zeggen, stimuli die dicht bij de grens tussen de twee klanken liggen). Met zulke bimodale distributies lijkt meer leersucces behaald te worden dan met unimodale distributies (bijv. Hayes-Harb, 2007; Wanrooij, Escudero, & Raijmakers, 2013). Escudero, Benders, en Wanrooij (2011) vonden verder dat de leereffecten van distributionele training voor volwassen tweede taalleerders groter waren als de extreme waardes (dus de langste klinkerlengte en het grootste spectrale verschil) van een klankcontrast binnen een groep sprekers als eindpunten genomen werden in plaats van de gemiddelde waardes. Op deze manier worden relevante akoestische cues voor het kunnen onderscheiden van het contrast als het ware versterkt tijdens de training. Escudero en Williams (2014) lieten zien dat de positieve leereffecten van distributionele training zes en twaalf maanden later nog steeds zichtbaar zijn.

Een zonder meer zeer interessante doelgroep voor de training van het gebruik van akoestische cues zijn slechthorende kinderen en volwassenen, waaronder CI-gebruikers. Er zijn verscheidene auditieve trainingsprogramma's ontwikkeld voor gehoorapparaat- en CI-gebruikers die gericht zijn op het onderscheiden van klanken, toonhoogte of bijvoorbeeld het waarnemen van spraak-in-ruis (voor discussie, zie Fu & Galvin, 2008; Henshaw & Ferguson, 2013; Ingvalson & Wong, 2013; Sweetow & Palmer, 2005), maar geen van die programma's kijkt specifiek naar akoestische cue-weging of naar de leereffecten van systematische manipulaties van bepaalde akoestische cues.

Kort samengevat staat akoestische cue-weging aan de basis van de eerste stappen in het (opnieuw) leren waarnemen van klanken en woorden door taalleerders in alle soorten en maten, van eentalige baby's tot volwassen tweede taalleerders en CI-gebruikers. Toegepast cue-wegingsonderzoek is tot nu toe vooral beperkt gebleven tot studies met tweede taalleerders, maar deze veelzijdige techniek leent zich ook uitstekend voor klankwaarnemingsonderzoek bij klinische populaties en voor implementatie in trainingstudies gericht op het versterken van klankherkenning en daaraan gekoppelde fonologische verwerkingsvaardigheden.

## Dankwoord

Wij willen graag een anonieme reviewer bedanken voor zeer behulpzaam commentaar op een eerdere versie van dit artikel.

## Referenties

- Allan, L.G., & Gibbon, J. (1991). Human bisection at the geometric mean. *Learning and Motivation*, 22(1-2), 39-58. doi:10.1016/0023-9690(91)90016-2
- Benders, T. (2013). *Nature's distributional-learning experiment: Infants' input, infants' perception and computational modeling*. Universiteit van Amsterdam (academisch proefschrift).
- Boersma, P., & Escudero, P. (2005). Measuring relative cue weighting: A reply to Morrison. *Studies in Second Language Acquisition*, 27(4), 607-617. doi:10.1017/S0272263105050278
- Boersma, P., & Weenink, D. (2014). *Praat: doing phonetics by computer*. Retrieved 28 April 2014 from www.praat.org.
- Bouton, S., Serniclaes, W., Bertoncini, J., & Colé, P. (2012). Perception of speech features by French-speaking children with cochlear implants. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 55(1), 139-153. doi:10.1044/1092-4388(2011/10-0330)
- Brasileiro, I. (2009). *The effects of bilingualism on children's perception of speech sounds*. Utrecht, The Netherlands: LOT Dissertation Series 204.
- Curtin, S., Fennell, C.T., & Escudero, P. (2009). Weighting of vowel cues explains patterns of word-object associative learning. *Developmental Science*, 12(5), 725-731. doi:10.1111/j.1467-7687.2009.00814.x
- Dietrich, C., Swingle, D., & Werker, J.F. (2007). Native language governs interpretation of salient speech sound differences at 18 months. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(41), 16027-16031. doi:10.1073/pnas.0705270104
- Eisenberg, L.S., Shannon, R.V, Schaefer Martinez, A., Wygonski, J., & Boothroyd, A. (2000). Speech recognition with reduced spectral cues as a function of age. *Journal of the Acoustical Society of America*, 107(5), 2704-2710. doi:10.1121/1.428656
- Escudero, P. (2005). *Linguistic perception and second language acquisition: explaining the attainment of optimal phonological categorization*. Utrecht, The Netherlands: LOT Dissertation Series 113.
- Escudero, P., & Benders, T. (2010). Phonetic and phonological approaches to early word recognition: Empirical findings, methodological issues and theoretical implications. In M.B.H. Everaert, T. Lentz, H. De Mulder, N. Øystein, & A. Zondervan (Eds.), *The Linguistics Enterprise: From knowledge of language to knowledge in linguistics* (pp. 55-77). Amsterdam, The Netherlands: John Benjamins.
- Escudero, P., Benders, T., & Lipski, S.C. (2009). Native, non-native and L2 perceptual cue weighting for Dutch vowels: the case of Dutch, German, and Spanish listeners. *Journal of Phonetics*, 37(4), 452-466. doi:10.1016/j.wocn.2009.07.006
- Escudero, P., Benders, T., & Wanrooij, K. (2011). Enhanced bimodal distributions facilitate the learning of second language vowels. *Journal of the Acoustical Society of America*, 130(4), EL206-EL212. doi:10.1121/1.3629144
- Escudero, P., Best, C.T., Kitamura, C., & Mulak, K.E. (2014). Magnitude of phonetic distinction predicts success at early word learning in native and non-native accents. *Frontiers*

- in Psychology*. doi:10.3389/fpsyg.2014.01059
- Escudero, P., & Boersma, P. (2004). Bridging the gap between L2 speech perception research and phonological theory. *Studies in Second Language Acquisition*, 26(4), 551-585. doi:10.1017/S0272263104040021
- Escudero, P., Boersma, P., Rauber, A.S., & Bion, R.A.H. (2009). A cross-dialect acoustic description of vowels: Brazilian and European Portuguese. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126(3), 1379-1393. doi:10.1121/1.3180321
- Escudero, P., & Wanrooij, K. (2010). The effect of L1 orthography on non-native vowel perception. *Language and Speech*, 53(3), 343-365. doi:10.1177/0023830910371447
- Escudero, P., & Williams, D. (2014). Distributional learning has immediate and long-lasting effects. *Cognition*, 133(2), 408-413. doi:10.1016/j.cognition.2014.07.002
- Fikkert, P. (2010). Developing representations and the emergence of phonology: Evidence from perception and production. In C. Fougerson, B. Kuehnert, M. Imperio, & N. Vallee (Eds.), *Laboratory Phonology 10* (pp. 227-259). Berlin, Germany: Walter de Gruyter.
- Fu, Q.-J., & Galvin, J.J. (2008). Maximizing cochlear implant patients' performance with advanced speech training procedures. *Hearing Research*, 242(1-2), 198-208. doi:10.1016/j.heares.2007.11.010
- Galantucci, B., Fowler, C.A., & Turvey, M.T. (2006). The motor theory of speech perception reviewed. *Psychonomic Bulletin & Review*, 13(3), 361-377. doi:10.3758/BF03193857
- Gerrits, E. (2001). *The categorisation of speech sounds by adults and children: a study of the categorical perception hypothesis and the developmental weighting of acoustic speech cues*. Utrecht, The Netherlands: LOT Dissertation Series 42.
- Gerrits, E., & De Bree, E. (2009). Early language development of children at familial risk of dyslexia: Speech perception and production. *Journal of Communication Disorders*, 42(3), 180-194. doi:10.1016/j.jcomdis.2008.10.004
- Gibbon, J. (1977). Scalar expectancy theory and Weber's Law in animal timing. *Psychological Review*, 84(3), 279-325. doi:10.1037/0033-295X.84.3.279
- Giezen, M.R., Escudero, P., & Baker, A.E. (2010). Use of acoustic cues by children with cochlear implants. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 53(6), 1440-1457. doi:10.1044/1092-4388(2010/09-0252)
- Grier, J.B. (1971). Nonparametric indexes for sensitivity and bias: Computing formulas. *Psychological Bulletin*, 75(6), 424-429. doi:10.1037/h0031246
- Hayes-Harb, R. (2007). Lexical and statistical evidence in the acquisition of second language phonemes. *Second Language Research*, 23(1), 65-94. doi:10.1177/0267658307071601
- Hazan, V., & Barrett, S. (2000). The development of phonemic categorization in children aged 6-12. *Journal of Phonetics*, 28(4), 377-396. doi:10.1006/jpho.2000.0121
- Henshaw, H., & Ferguson, M.A. (2013). Efficacy of individual computer-based auditory training for people with hearing loss: A systematic review of the evidence. *PLoS ONE*, 8(5), 1-18. doi:10.1371/journal.pone.0062836
- Hicks, C.B., & Ohde, R.N. (2005). Developmental role of static, dynamic, and contextual cues in speech perception. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 48(4), 960-974. doi:10.1044/1092-4388(2005/066)
- Ingvalson, E.M., & Wong, P.C.M. (2013). Training to improve language outcomes in cochlear



- implant recipients. *Frontiers in Psychology*, 263, 1-9. doi:10.3389/fpsyg.2013.00263
- Iverson, P., Hazan, V., & Bannister, K. (2005). Phonetic training with acoustic cue manipulation: A comparison of methods for teaching English /r/-/l/ to Japanese adults. *Journal of the Acoustical Society of America*, 118(5), 3267-3278. doi:10.1121/1.2062307
- Jerger, S. (2007). Current state of knowledge: perceptual processing by children with hearing impairment. *Ear and Hearing*, 28(6), 754-765. doi:10.1097/AUD.0b013e318157f049
- Klatt, D. (1980). Software for a cascade/parallel synthesizer. *Journal of the Acoustical Society of America*, 67(971), 971-995. doi:10.1121/1.383940
- Kondaurova, M., & Francis, A. (2010). The role of selective attention in the acquisition of English tense and lax vowels by native Spanish listeners: Comparison of three training methods. *Journal of Phonetics*, 38(4), 569-587. doi:10.1016/j.wocn.2010.08.003
- Kuhl, P.K. (2004). Early language acquisition: cracking the speech code. *Nature Reviews Neuroscience*, 5, 831-843. doi:10.1038/nrn1533
- Kuhl, P.K., Conboy, B.T., Padden, D., Nelson, T., & Pruitt, J. (2005). Early speech perception and later language development: implications for the 'critical period.' *Language Learning and Development*, 1(3-4), 237-264. doi:10.1080/15475441.2005.9671948
- Mayo, C., Scobbie, J.M., Hewlett, N., & Waters, D. (2003). The influence of phonemic awareness development on acoustic cue weighting strategies in children's speech perception. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 46(5), 1184-1196. doi:10.1044/1092-4388(2003/092)
- Mayo, C., & Turk, A. (2005). The influence of spectral distinctiveness on acoustic cue weighting in children's and adults' speech perception. *Journal of the Acoustical Society of America*, 118(2), 1730-1741. doi:10.1121/1.1979451
- McArthur, G.M., & Bishop, D.V.M. (2001). Auditory perceptual processing in people with reading and oral language impairments: Current issues and recommendations. *Dyslexia*, 7(3), 150-170.
- Medina, V., Hoonhorst, I., Bogliotti, C., & Serniclaes, W. (2010). Development of voicing perception in French: Comparing adults, adolescents, and children. *Journal of Phonetics*, 38(4), 493-503. doi:10.1016/j.wocn.2010.06.002
- Moore, D.R., Rosenberg, J.F., & Coleman, J.S. (2005). Discrimination training of phonemic contrasts enhances phonological processing in mainstream school children. *Brain and Language*, 94(1), 72-85. doi:10.1016/j.bandl.2004.11.009
- Morrison, G.S. (2005). An appropriate metric for cue weighting in L2 speech perception. *Studies in Second Language Acquisition*, 27(4), 597-606. doi:10.1017/S0272263105050266
- Morrison, G.S. (2007). Logistic regression modelling for first- and second-language perception data. In M.J. Solé, P. Prieto, & J. Mascaró (Eds.), *Segmental and prosodic issues in Romance phonology* (pp. 219-236). Amsterdam, The Netherlands: John Benjamins.
- Newman, R.S., Bernstein Ratner, N., Jusczyk, A.M., Jusczyk, P.W., & Ayala Dow, K. (2006). Infants' early ability to segment the conversational speech signal predicts later language development: a retrospective analysis. *Developmental Psychology*, 42(4), 643-655. doi:10.1037/0012-1649.42.4.643
- Nittrouer, S. (1996). Discriminability and perceptual weighting of some acoustic cues to

- speech perception by 3-year-olds. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 39(2), 278-297. doi:10.1044/jshr.3902.278
- Nittrouer, S. (2002). From ear to cortex: A perspective on what clinicians need to understand about speech perception and language processing. *Language, Speech & Hearing Services in Schools*, 33(4), 237-252. doi:10.1044/0161-1461(2002/020)
- Nittrouer, S., & Lowenstein, J.H. (2007). Children's weighting strategies for word-final stop voicing are not explained by auditory sensitivities. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 50(1), 58-73. doi:10.1044/1092-4388(2007/005)
- Nittrouer, S., & Miller, M.E. (1997). Predicting developmental shifts in perceptual weighting schemes. *Journal of the Acoustical Society of America*, 101(4), 2253-2266. doi:10.1121/1.418207
- Pittman, A.L., Stelmachowicz, P.G., Lewis, D.E., & Hoover, B.M. (2002). Influence of hearing loss on the perceptual strategies of children and adults. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 45(6), 1276-1284. doi:1092-4388/02/4506-1276
- R development core team (2011). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <http://www.r-project.org>.
- Sebastián-Gallés, N. (2010). Bilingual language acquisition: where does the difference lie? *Human Development*, 53, 245-255. doi:10.1159/000321282
- Summerfield, A.Q., Nakisa, M.J., McCormick, B., Archbold, S.M., Gibbin, K.P., & O'Donoghue, G.M. (2002). Use of vocalic information in the identification of /s/ and /ʃ/ by children with cochlear implants. *Ear and Hearing*, 23(1), 58-77.
- Sweetow, R., & Palmer, C. (2005). Efficacy of individual auditory training in adults: A systematic review of the evidence. *Journal of the American Academy of Audiology*, 16(7), 494-504. doi:10.3766/jaaa.16.7.9
- Van Alphen, P., De Bree, E., Gerrits, E., De Jong, J., Wilsenach, C., & Wijnen, F. (2004). Early language development in children with a genetic risk of dyslexia. *Dyslexia*, 10(4), 265-288. doi:10.1002/dys.272
- Van Hessen, A.J., & Schouten, M.E.H. (1999). Categorical perception as a function of stimulus quality. *Phonetica*, 56(1-2), 56-72. doi:10.1159/000028441
- Walley, A.C., & Flege, J.E. (1999). Effect of lexical status on children's and adults' perception of native and non-native vowels. *Journal of Phonetics*, 27(3), 307-332. doi:10.1006/jpho.1999.0098
- Wanrooij, K., Escudero, P., & Raijmakers, M.E.J. (2013). What do listeners learn from exposure to a vowel distribution? An analysis of listening strategies in distributional learning. *Journal of Phonetics*, 41(5), 307-319. doi:10.1016/j.wocn.2013.03.005
- Werker, J.F. (2012). Perceptual foundations of bilingual acquisition in infancy. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1251(1), 50-61. doi:10.1111/j.1749-6632.2012.06484.x
- Werker, J.F., & Logan, J.S. (1985). Cross-language evidence for three factors in speech perception. *Perception and Psychophysics*, 37(1), 35-44. doi:10.3758/BF03207136
- Xu, L., & Pfingst, B.E. (2008). Spectral and temporal cues for speech recognition: implications for auditory prostheses. *Hearing Research*, 242(1-2), 132-140. doi:10.1016/j.heares.2007.12.010