

**De rol van de eerste formant  
bij perceptieve restauratie van /i/**

**Marieke Ebeling-van den Heuvel**

**Studentnummer: 6198783**

**Bachelorscriptie Taalwetenschap 2011/2012**

**Datum: 30 mei 2012**

**Begeleider: Prof. Dr. P.P.G. (Paul) Boersma**



## INHOUDSOPGAVE

ABSTRACT	4
INLEIDING	4
METHODE	7
<i>TAAK</i>	8
<i>PROEFPERSONEN</i>	8
<i>STIMULI</i>	8
RESULTATEN	12
CONCLUSIE/DISCUSSIE	15
<i>SAMENVATTING RESULTATEN</i>	15
<i>MOGELIJKE VERKLARINGEN</i>	16
<i>KRITIEK EN VERDER ONDERZOEK</i>	19
REFERENTIES	21

## ABSTRACT

Tussen de Nederlandse klinkers /i/ en /u/ is niet alleen een verschil in tweede formant (F2), maar ook een verschil in eerste formant (F1) aanwezig. De vraag die in deze scriptie gesteld wordt, is of luisteraars dit F1-verschil kunnen gebruiken voor het onderscheid tussen /i/ en /u/. Dit wordt getest door middel van een categorisatietoets met als mogelijke responsen /i/ en /u/, en als stimuli natuurlijke laagdoorlaatgefilterde /i/'s met toegevoegde hoogdoorlaatgefilterde ruis. De waarde van F1 op zichzelf blijkt geen significant effect te hebben op de categorisatie. Daarentegen blijken de bandbreedte van deze formant, de waarde van de grondfrequentie (F0) en het verschil tussen F1 en F0 wel van invloed te zijn op de respons. Mogelijke verklaringen worden uiteengezet en een potentieel versterkend effect van de waarde van F1 wordt besproken.

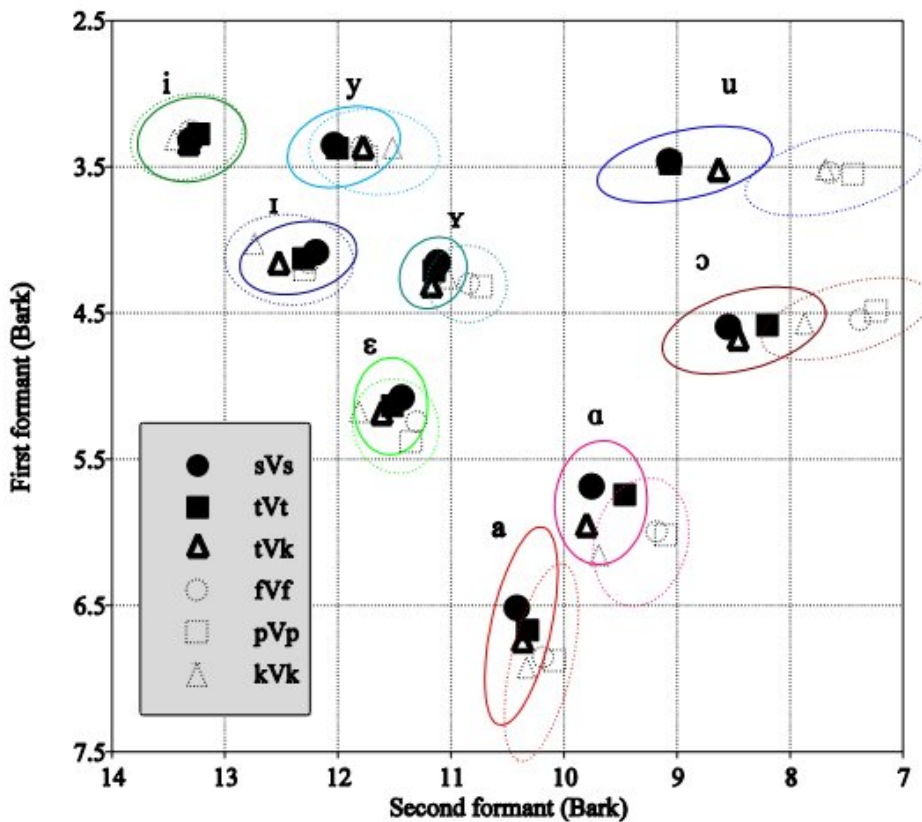
## INLEIDING

Welbekend is de klinkerdriehoek, met aan de uitersten de drie vocalen /i/, /u/ en /a/, waarvan een voorbeeld staat afgebeeld in Figuur 1 (uit Van Leussen e.a., 2011). Een belangrijk verschil tussen de akoestische signalen van de Nederlandse vocalen /i/ en /u/ is te vinden in de waarde van de tweede formant (F2). Zoals te zien in de figuur, heeft het foneem /u/ als eigenschappen een lage eerste formant (F1) en een lage tweede formant. Ook het foneem /i/ heeft een lage eerste formant, maar de tweede formant is hoog. Volgens bijvoorbeeld Van Hout e.a. (2000) en Pols e.a. (1973) kunnen de waarden van de F1 en F2 in verband gebracht worden met respectievelijk de hoogte en de articulatieplaats van klinkers. Hoe meer de klinker naar voren in de mond geproduceerd wordt, des te hoger is de F2. Aangezien /i/ een voorklinker is en /u/ een achterklinker, is de F2 onder andere belangrijk voor het onderscheid tussen /i/ en /u/.

Nu heeft zowel /i/ als /u/ een lage eerste formant, maar deze formant is niet voor beide fonemen gelijk. Uit verschillende onderzoeken blijkt dat de F1 voor de /i/ gemiddeld lager is dan voor de /u/. De Boer (2011), bijvoorbeeld, heeft dit verschijnsel gevonden in 29 van de 30 door hem onderzochte talen, die uit verschillende taalfamilies afkomstig zijn. De Boer heeft het Nederlands niet onderzocht, maar er zijn verscheidene andere studies waaruit blijkt dat dit formantverschil ook geldt voor het Nederlands. In het artikel van Van Leussen e.a. (2011), bijvoorbeeld, staan door hen gemeten F1-waarden van Nederlandse klinkers beschreven. In hun corpus heeft de F1 van /i/ gemiddeld een waarde van 354

Hertz bij vrouwen en van 317 Hertz bij mannen, terwijl de F1 van /u/ gemiddeld een waarde van 389 Hertz heeft bij vrouwen en van 339 Hertz bij mannen. De gemiddelde F1 van /u/ is in hun data dus hoger dan de gemiddelde F1 van /i/. Dit verschil is al terug te zien in Figuur 1: de /i/ staat iets hoger afgebeeld dan de /u/.

Het eerste-formantverschil tussen de twee klinkers wordt ook vertoond door de spreker die de stimuli heeft ingesproken voor het huidige onderzoek. Zijn gemiddelde F1-waarde voor /i/ is 347,77 Hz (261 tokens, standaarddeviatie 31,54 Hertz) en zijn gemiddelde F1-waarde voor /u/ is 376,76 Hz (52 tokens, standaarddeviatie 28,49 Hertz); een verschil van 28,99 Hertz. Deze waarden zijn gemeten met behulp van Praat (Boersma & Weenink, 2012, vanaf hier naar verwezen als “Praat”), door geluidsobjecten om te zetten naar formantobjecten met de functie “To Formant (burg)...”. In deze functie zijn de standaardwaarden gebruikt, behalve voor “maximum formant (Hz)”, waar een waarde van 5000 is ingevuld, in plaats van 5500, omdat het hier om een mannelijke spreker gaat (Praat Manual, “Sound: To Formant (burg)...”). Gebruikmakend van de middelste 50



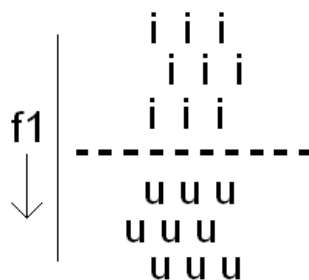
Figuur 1: De klinkerruimte gebaseerd op elf mannelijke sprekers van het Nederlands, uit Van Leussen e.a. (2011).

milliseconden van de klinker<sup>1</sup> is vervolgens met de functie “Get mean...” steeds de gemiddelde F1-waarde opgevraagd. Op basis van wat zojuist besproken is, kan geconcludeerd worden dat /i/ en /u/ dus niet alleen van elkaar verschillen op grond van de tweede formant, maar dat zij ook een verschil vertonen in eerste formant.

Een vraag die voortvloeit uit het feit dat de F1 van /i/ lager is dan de F1 van /u/, is of sprekers van het Nederlands ook daadwerkelijk gebruik kunnen maken van het verschil om de twee klinkers te onderscheiden. Dit kan onderzocht worden door te testen of luisteraars kunnen horen of een klank een /i/ of een /u/ is, wanneer zij alleen de eerste formant, en niet de tweede, tot hun beschikking hebben. Dit idee leidt tot de onderzoeksvraag die in deze scriptie gesteld wordt:

*“Kan het verschil in eerste formant tussen /i/ en /u/ gebruikt worden bij perceptieve restauratie van /i/ in het Nederlands?”*

Er zijn verschillende onderzoeken gedaan naar perceptieve restauratie. Er is bijvoorbeeld een discussie gaande met betrekking tot de mechanismen die luisteraars in staat stellen een klank te restaureren. De vraag is of men daarbij gebruik maakt van auditieve inductie, van een top-downproces, of van een combinatie van deze twee. Repp (1991) is bijvoorbeeld van mening dat bij perceptieve restauratie auditieve processen geen rol spelen en dat deze processen slechts een illusie zijn. Maar bijvoorbeeld Bashford & Warren (1987) houden aan dat er juist wel sprake is van auditieve inductie, waarbij ook gebruik wordt gemaakt van contextuele informatie. Gesteld zou kunnen worden dat wanneer in dit onderzoek de eerste formant gebruikt wordt, er bij perceptieve restauratie (in ieder geval) sprake is van auditieve inductie.



**Figuur 2:** Een grens die luisteraars mogelijk leggen op een bepaalde frequentie van de F1 om /i/ en /u/ te onderscheiden. Een ‘i’ geeft aan dat de luisteraar een stimulus als /i/ classificeert; een ‘u’ geeft aan dat de luisteraar een stimulus als /u/ classificeert.

<sup>1</sup> Omdat dit gedeelte van de klinker gebruikt werd voor de stimuli; zie Methode pagina 9.

Shriberg (1992) heeft onderzoek uitgevoerd naar perceptieve restauratie van geïsoleerde, Amerikaans-Engelse, klinkers. Hieruit blijkt dat luisteraars laagdoorlaatgefilterde voorklinkers (1000 Hertz), waaronder /i/, overwegend als achterklinker, waaronder /u/, waarnemen. Wanneer echter aan die gefilterde klinker hoogdoorlaatgefilterde ruis wordt toegevoegd, neemt de luisteraar de stimulus weer waar als voorklinker. Een /i/ wordt dus veelal waargenomen als /u/ wanneer de hoge frequenties eruit gefilterd worden, maar wordt veelal weer waargenomen als /i/ wanneer ruis toegevoegd is op hoge frequenties. Shriberg concludeert hieruit dat luisteraars met behulp van deze ruis de verwijderde F2 restaureerden.

In dit scriptieonderzoek wordt gebruik gemaakt van een methode die vergelijkbaar is met die van Shriberg. De achterliggende gedachte is dat wanneer een groot aantal laagdoorlaatgefilterde /i/'s met toegevoegde hoogdoorlaatgefilterde ruis aangeboden wordt aan proefpersonen, zij een deel van de klinkers zullen classificeren als /i/ en een deel als /u/, wanneer zij gedwongen zijn tussen deze twee fonemen te kiezen. In het geval dat proefpersonen de eerste formant daadwerkelijk gebruiken bij het restaureren van de klinkers, zouden naar verwachting de stimuli met een lage F1 door hen geïllustreerd worden als /i/ en de stimuli met een hoge F1 als /u/. Mogelijk plaatsen zij een grens op de F1-as en categoriseren zij stimuli met een F1-waarde lager dan deze grenswaarde als /i/ en stimuli met een F1-waarde hoger dan de grenswaarde als /u/. Dit idee staat geïllustreerd in Figuur 2. In het geval dat er inderdaad een grens getrokken wordt, kan geconcludeerd worden dat Nederlandse luisteraars de F1 kunnen gebruiken voor het onderscheid tussen /i/ en /u/.

## METHODE

Er wordt onderzocht of moedertaalsprekers van het Nederlands de eerste formant in het akoestische signaal van de /i/ kunnen gebruiken om een onderscheid tussen /i/ en /u/ te maken. Hoge frequenties, waaronder die van de tweede formant, die belangrijk kunnen zijn voor het onderscheid tussen /i/ en /u/ zijn hiertoe verwijderd uit het signaal. In onderstaande paragrafen zullen de taak, de proefpersonen en het gebruikte stimulusmateriaal beschreven worden.

## *TAAK*

De taak die de proefpersonen uitvoerden was een categorisatietask op de computer, met behulp van Praat, waarbij zij gedwongen waren een keuze te maken tussen twee responsen. De proefpersoon kreeg de volgende opdracht: “Iemand heeft allemaal zinnen ingesproken. Daar heb ik de klinkers uitgehaald en die krijg je nu te horen. Met de klinkers is iets gedaan, waardoor ze niet meer zoals origineel klinken. Na elk geluid klik je de klinker aan die je gehoord hebt, ‘ie’ of ‘oe’ (/i/ of /u/).” De proefpersonen kregen 261 stimuli één voor één in gerandomiseerde volgorde aangeboden. Na het horen van elke stimulus moesten zij kiezen of ze een ‘ie’ of een ‘oe’ (/i/ of /u/) gehoord hadden, door één van de twee knoppen ‘ie’ en ‘oe’ aan te klikken. Voorafgaand aan de daadwerkelijke taak kregen proefpersonen een gelijksoortige oefentaak, om aan de werking van het programma te wennen. In deze oefentaak werden veertien ongefilterde stimuli (zeven /i/’s en zeven /u/’s) één voor één getoond en moesten de proefpersonen kiezen welke klinker ze gehoord hadden, /i/ of /u/. De taak werd afgelegd in een afgesloten ruimte, waarbij de proefpersonen een koptelefoon droegen. Zij mochten zelf het volume afstellen zodat het geluid voor hen niet te hard of te zacht was.

## *PROEFPERSONEN*

De proefpersonen waren 15 moedertaalsprekers van het Nederlands, waarvan 5 mannen en 10 vrouwen. Ze hadden op het moment van testen een leeftijd tussen de 18 en 65 jaar, met een gemiddelde leeftijd van 34 jaar en een standaarddeviatie van 9,90 jaar. De proefpersonen hadden geen kennis van het doel van het onderzoek. Twee van de oorspronkelijk 17 proefpersonen zijn geëlimineerd voor de analyse. Eén van hen omdat hij een gehoorapparaat droeg, de ander omdat zij achteraf toch kennis bleek te hebben van het doel van het onderzoek.

## *STIMULI*

Om te achterhalen of luisteraars de eerste formant kunnen gebruiken om een klinker te herkennen, is het zinvol klinkers als stimuli te gebruiken waarin de eerste formant oorspronkelijk duidelijk hoorbaar was. Traunmüller (1984) heeft geobserveerd dat het verschil tussen de eerste formant en de grondfrequentie (F0) groter is bij mannen dan bij vrouwen, omdat de F0 bij mannen lager is dan bij vrouwen. Het is aannemelijk dat de F1 daardoor bij mannelijke sprekers beter te onderscheiden is van de F0 dan bij vrouwen. Daarom is er voor gekozen in deze studie een mannelijke spreker te gebruiken. Het is

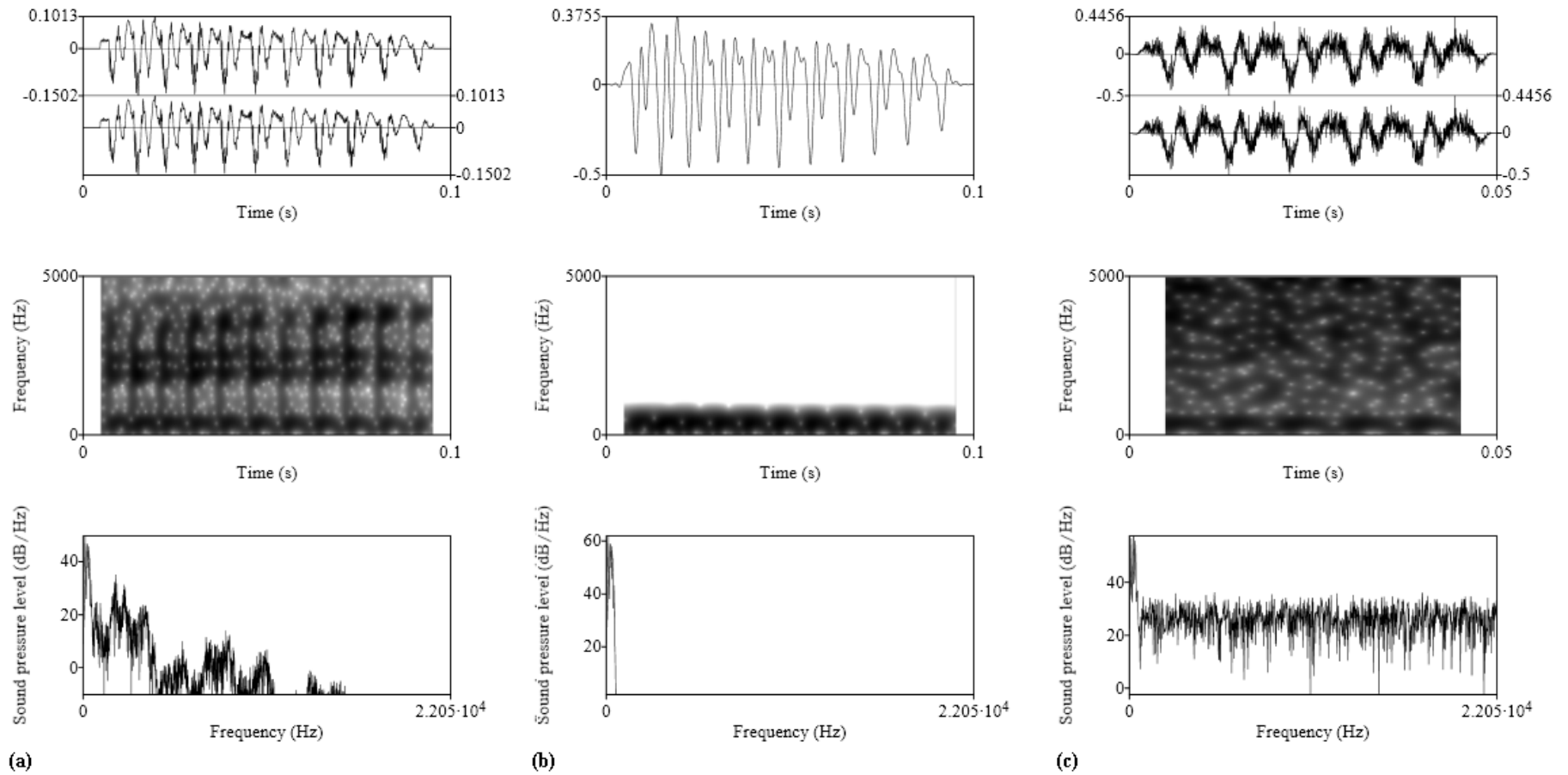


namelijk een mogelijkheid dat luisteraars de F1 niet kunnen gebruiken om /i/ van /u/ te onderscheiden bij een vrouwelijke spreker, maar wel bij een mannelijke spreker. Op deze wijze kan met meer zekerheid onderzocht worden of er een effect van de eerste formant op zich is, en niet alleen van een combinatie van F1 en F0 door mogelijke samensmelting van de twee.

Het stimulusmateriaal is ingesproken door een 23-jarige mannelijke moedertaalspreker van het Nederlands afkomstig uit de Randstad. Hierbij werd gebruik gemaakt van een hoogfrequente dynamische microfoon (Sennheiser MKH105) en een Tascam recorder (Tascam CDRW900) en de opname vond plaats in een geïsoleerde, bijna geluidsdichte, ruimte. De klinkers die opgenomen werden, zijn op twee manieren ‘natuurlijk’. Ten eerste zijn de klinkers niet synthetisch gegenereerd, maar daadwerkelijk uitgesproken door een spreker. De reden om niet voor synthetische, maar voor natuurlijke stimuli te kiezen, is dat proefpersonen anders reageren bij het classificeren van natuurlijke stimuli dan bij het classificeren van synthetische stimuli (Ter Schure e.a., 2011). Ten tweede is er voor gekozen om geen klinkers in isolatie, maar klinkers uit context te gebruiken, om ze zo natuurlijk mogelijk te laten klinken. Met ‘natuurlijk’ wordt in dit geval bedoeld dat de klinkers afkomstig zijn uit woorden die in zinnen voorkomen, net als in spraak in het dagelijks leven. Het gebruik van natuurlijke stimuli tegenover synthetische geeft meer garantie op data die informatie bevatten over hoe hoorders klanken van hun taal daadwerkelijk waarnemen.

De spreker heeft voor dit experiment 154 Nederlandse zinnen ingesproken, die 334 /i/’s bevatten. Van alle ingesproken /i/’s waren er 261 met een duur van 50 milliseconden of langer, welke bewerkt werden met behulp van Praat om de gewenste stimuli te creëren. De stimuli hebben dus een duur die bij klinkers daadwerkelijk voorkomt. In Figuur 3 wordt een voorbeeld weergegeven van het genereren van een stimulus. In 3(a) zijn de golfvorm, het spectrogram en het spectrum te zien van een nog onaangepaste /i/. De enige aanpassing die gemaakt is, is dat de duur op 100 milliseconden is gezet. Dit zijn de middelste 100 milliseconden van de klinker, of, wanneer de duur korter was dan 100 milliseconden, de klinker in het midden van een geluid met een totale duur van 100 milliseconden.

De tweede stap was het verwijderen van alle hoge frequenties uit de geluidssignalen, zodat de eerste formant en de grondfrequentie behouden bleven en de tweede en hogere formanten afwezig waren. Hiervoor is gebruik gemaakt van de functie “Filter (stop Hann band)...”. De amplitude van elke klinker werd met de functie “Scale



**Figuur 3:** Een visualisatie van het genereren van een stimulus. Van boven naar beneden zijn steeds de golfvorm, het spectrogram en het spectrum te zien. (a): de klinker alvorens aanpassingen te maken, met een duur van 100 ms; (b): de klinker laagdoorlaatgefilterd (500 Hertz); (c): de laagdoorlaatgefilterde klinker met toegevoegde hoogdoorlaatgefilterde (500 Hertz) ruis.

peak...” geschaald naar 0,5, zodat verschillen in amplitude geen effect op de responsen konden hebben. Er is voor gekozen om de ruis te laten starten vanaf 500 Hertz, omdat uit formantmetingen bleek dat de hoogste eerste formant van alle gebruikte /i/’s een waarde van 480,17 Hertz had. Van alle klinkers die gebruikt zijn als stimuli is de gemiddelde bandbreedte van de F1 101,10 Hertz, met een standaarddeviatie van 56,59 Hertz. De bandbreedtes zijn gemeten in Praat met de functie “Get bandwidth at time...” precies in het midden van de klinker. Omdat bij het filteren de standaard smoothingwaarde van 100 Hertz gebruikt werd, zal op deze manier waarschijnlijk geen informatie van de F1 verloren zijn gegaan door mogelijke overlapping met ruis. In Figuur 3(b) is het resultaat te zien: de golfvorm is minder complex en het spectrogram en spectrum vertonen alleen energie op lage frequenties.

De volgende stap was het toevoegen van gesynthetiseerde random ruis, startend vanaf 500 Hertz, weer met een smoothing-waarde van 100 Hertz. Aan de hand van een pilot-experiment is bepaald hoe hoog de amplitude van de ruis moest zijn zodat de proefpersonen een (van te voren onbepaald) deel van de gefilterde /i/’s als /i/ en het andere deel als /u/ zouden herkennen. Uit de pilot bleek dat wanneer de ruis in verhouding een hogere amplitude had dan de klinker, de proefpersonen ongeveer 50% van de stimuli als /i/ classificeerden en ongeveer 50% als /u/. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de proefpersonen het klinkergeluid niet goed meer konden horen doordat er in verhouding veel ruis aanwezig was, waardoor zij gingen gokken. Bij een ruisamplitude die gelijk is aan de amplitude van het klinkergeluid, classificeerden de proefpersonen ongeveer 40% van de stimuli als /i/ en ongeveer 60% als /u/. Deze percentages wijzen minder sterk naar mogelijk gokken door proefpersonen en daarom is ervoor gekozen de amplitude van de ruis gelijk te stellen aan die van de klinker (0.5).

Na toevoeging van de ruis kregen alle klinkers dezelfde duur van 50 milliseconden, zodat de lengte van de stimuli geen invloed kon uitoefenen op de categorisatie. Wanneer de duur van de originele klinker langer was dan 50 milliseconden, zijn 50 milliseconden uit het midden van de klinker geëxtraheerd, om een zo puur mogelijk klinkergeluid te verkrijgen. Uiteindelijk zijn de klinkers voorzien van een *fade-in* en *fade-out* door de eerste en laatste 5 milliseconden van de klinkers zodanig aan te passen dat het geluid begint en eindigt met een amplitude met de waarde 0 en geleidelijk oploopt richting het midden van de klinker. De amplitudes werden opnieuw geschaald naar 0,5. De uiteindelijke stimulus is gevisualiseerd in Figuur 3(c).

## RESULTATEN

In deze sectie wordt getracht een verband te leggen tussen de responsen van de proefpersonen en bepaalde eigenschappen van de stimuli. Allereerst wordt natuurlijk bekeken of er een effect is van de waarde van de eerste formant op de respons. In de test classificeerden proefpersonen gemiddeld 48,91% van de stimuli als /u/ en 51,09% als /i/. Hier was wel veel variatie in: sommige proefpersonen klikten bijvoorbeeld in ongeveer 30% van de gevallen op /i/, sommigen in ongeveer 70% van de gevallen.

Zoals vermeld in de Inleiding (pagina 5) zijn de F1-waarden gemeten over de middelste 50 milliseconden van elke gebruikte, nog ongefilterde, klinker. Het gaat hier dus om het gedeelte van de klinker dat ook gebruikt is bij het genereren van de stimuli. De gemiddelde F1 van de stimuli die proefpersonen bij elkaar genomen als /i/ classificeerden was 346,43 Hertz met een standaarddeviatie van 27,29 Hertz; van stimuli geassocieerd als /u/ was de gemiddelde F1 349,17 Hertz, met een standaarddeviatie van 35,27 Hertz. Het verschil in gemiddelden is dus een erg klein verschil, van 2,74 Hertz. Dit kan er op wijzen dat de proefpersonen in deze test geen gebruik gemaakt hebben van de eerste formant om de stimuli als /i/ dan wel /u/ te classificeren. Om dit te testen is een logistische regressie-test uitgevoerd op de data, met als onafhankelijke variabele de waarde van de F1 en als afhankelijke variabele de respons: /i/ of /u/. Voor elke proefpersoon is de log odds-ratio berekend en weergegeven in Tabel 1. De log odds-ratio's geven de natuurlijke logaritme aan van de verhouding van de kans op /u/ in vergelijking met de kans op /i/ bij de laagste F1 (282,36 Hertz) tot de kans op /u/ in vergelijking met de kans op /i/ bij de hoogste F1 (480,17 Hertz). De log odds-ratio van proefpersoon 1 is bijvoorbeeld -1,200040. Dit is een logaritme, dus de odds-ratio behorend bij deze proefpersoon is gelijk aan  $e^{-1,200036} \approx$

**Tabel 1: De log odds-ratio's per proefpersoon voor de eerste formant in relatie tot de classificatie van de stimuli als /i/ of /u/**

Proefpersoon	Log odds-ratio factor F1	Proefpersoon	Log odds-ratio factor F1
1	-1,200036	9	0,542181
2	1,298207	10	2,011617
3	0,414917	11	-0,176728
4	-0,088698	12	0,260192
5	-1,285538	13	-0,485080
6	1,343797	14	0,222182
7	2,470754	15	1,141619
8	-0,277035		

**Tabel 2: De log odds-ratio's per proefpersoon voor de bandbreedte van de eerste formant in relatie tot de classificatie van de stimuli als /i/ of /u/**

Proefpersoon	Log odds-ratio factor bandb. F1	Proefpersoon	Log odds-ratio factor bandb.F1
1	0,374495	9	0,392787
2	1,301149	10	0,359706
3	1,354981	11	0,755922
4	1,540079	12	1,579318
5	-0,693433	13	2,193144
6	3,944636	14	0,739303
7	-0,236509	15	2,483334
8	0,426606		

0,3012. Dit betekent dat de kans op /u/ in vergelijking met de kans op /i/ bij de hoogste F1 ongeveer 0,3012 keer zo groot is als de kans op /u/ in vergelijking met de kans op /i/ bij de laagste F1, bij deze proefpersoon. In de tabel is te zien dat zes proefpersonen een negatieve ratio hebben en dus de tendens vertonen bij een lage F1 eerder /u/ en bij een hoge F1 eerder /i/ als respons te geven. Proefpersoon 2, bijvoorbeeld, heeft daarentegen een positieve log odds-ratio, van 1,298207. De odds-ratio van deze proefpersoon is dus  $e^{1,298207} \approx 3,6627$ . Dit betekent dat bij deze proefpersoon de kans op /u/ in vergelijking met de kans op /i/ bij de hoogste F1 ongeveer 3,6627 keer zo groot is als de kans op /u/ in vergelijking met de kans op /i/ bij de laagste F1. Negen proefpersonen hebben een positieve ratio en vertonen dus de tendens bij een lage F1 eerder /i/ en bij een hoge F1 eerder /u/ als respons te geven. Om te onderzoeken of er sprake is van een effect, is een T-test uitgevoerd op de log odds-ratio's. Hieruit blijkt dat er geen significant effect is van de waarde van de eerste formant op de respons ( $p=0,08$ ; 95%-betrouwbaarheidsinterval = (-0,19; 1,01)).

Aangezien het niet is aangetoond dat de waarde van de eerste formant effect heeft op de classificatie van /i/ en /u/, rijst de vraag of luisteraars dan gebruik maken van andere informatie die aanwezig is in het stimulussignaal. Heeft de bandbreedte van de F1 misschien effect? In de data van de spreker heeft de F1 van /i/ een gemiddelde bandbreedte van 101,10 Hertz (standaarddeviatie 56,59 Hertz) en de eerste formant van /u/ een gemiddelde bandbreedte van 199,24 Hertz (standaarddeviatie 109,64 Hertz). De gemiddelde bandbreedte van stimuli geclassificeerd als /i/ was 97,12 Hertz met een standaarddeviatie van 54,15 Hertz en de gemiddelde bandbreedte van stimuli geclassificeerd als /u/ was 105,27 Hertz met een standaarddeviatie van 58,56 Hertz. Het verschil in gemiddelden is dus 8,15 Hertz. Dit lijkt een klein verschil te zijn, maar om te bekijken of er een effect is, is een logistische regressie-test uitgevoerd, met als onafhankelijke variabele de bandbreedte van de F1 en als afhankelijke variabele de respons. Voor elke proefpersoon is de log odds-ratio berekend, die de natuurlijke logaritme geeft van de verhouding van de kans op /u/ in vergelijking met de kans op /i/ bij de kleinste bandbreedte (21,64 Hertz) tot de kans op /u/ in vergelijking met de kans op /i/ bij de grootste bandbreedte (400,69 Hertz). De ratio's zijn te vinden in Tabel 2. Te zien is dat dertien van de vijftien proefpersonen een negatieve ratio hebben, wat in de richting wijst van responskeuze /i/ bij een kleine bandbreedte en responskeuze /u/ bij een grote bandbreedte. Om te bekijken of hier daadwerkelijk sprake is van een effect, is een T-test uitgevoerd op de ratio's. Er blijkt een significant effect te zijn van de bandbreedte op de

respons ( $p < 0,01$ ; 95%-betrouwbaarheidsinterval = (0,46;1,75)). Proefpersonen kiezen dus eerder voor /u/ bij een F1 met een grote bandbreedte en kiezen eerder voor /i/ bij een F1 met een kleine bandbreedte.

In de stimuli was niet alleen de eerste formant, maar ook de fundamentele frequentie aanwezig. Wellicht is er ook gebruik gemaakt van de waarde van de F0 bij het geven van de responsen. Net als bij de metingen van de eerste formanten, is de frequentie van de F0 gemeten op basis van de middelste 50 milliseconden van elke gebruikte, nog ongefilterde, klinker. Hiertoe werden de geluidsbestanden eerst omgezet naar een pitchobject, met de functie “To Pitch (cc)...”. Er is voor deze functie gekozen omdat deze geschikter is dan de standaardfunctie “To Pitch...” voor het meten van de F0 in korte geluidsbestanden (Praat Manual, “Sound: To Pitch...” en “Sound: To Pitch (cc)...”). Als ‘Pitch ceiling’ werd een waarde van 300 Hertz ingevuld, omdat de spreker een man is (Praat Manual, “Intro 4.2”), en verder de standaardwaarden. Vervolgens is per klinker de gemiddelde waarde opgevraagd met “Get mean...”. Bij één van de stimuli is de waarde handmatig gemeten met een lagere ‘voicing threshold’ (0,4 in plaats van de standaardwaarde 0,45), omdat Praat de waarde niet kon berekenen, maar er wel een F0 te horen was door de onderzoekster.

De gemiddelde F0 van de stimuli die proefpersonen bij elkaar genomen als /i/ classificeerden was 154,15 Hertz met een standaarddeviatie van 19,72 Hertz; van stimuli geclassificeerd als /u/ was de gemiddelde F0 134,72 Hertz, met een standaarddeviatie van 19,90 Hertz. Hier gaat het om een verschil in gemiddelden van 19,43 Hertz. Dit is een groter absoluut verschil dan bij de F1 gevonden werd en dit kan er op wijzen dat de

**Tabel 3: De log odds-ratio's per proefpersoon voor de grondfrequentie in relatie tot de classificatie van de stimuli als /i/ of /u/**

Proefpersoon	Log odds-ratio factor F0	Proefpersoon	Log odds-ratio factor F0
1	-11,895701	9	-3,850337
2	-5,585924	10	-6,947782
3	-8,011273	11	-11,798818
4	-6,754912	12	-5,282576
5	-3,540369	13	-5,392637
6	-10,289915	14	-1,230453
7	-0,954819	15	-6,947194
8	-6,464067		

**Tabel 4: De log odds-ratio's per proefpersoon voor het verschil tussen de waarde van de fundamentele frequentie en de waarde van de eerste formant in relatie tot de classificatie van de stimuli als /i/ of /u/**

Proefpersoon	Log odds-ratio factor F1-F0	Proefpersoon	Log odds-ratio factor F1-F0
1	4,242187	9	2,472194
2	4,022925	10	5,078954
3	4,399904	11	5,215955
4	3,607870	12	3,029375
5	1,150944	13	2,608486
6	5,907481	14	0,873134
7	2,154894	15	4,494048
8	3,348330		

proefpersonen misschien wel gebruik hebben gemaakt van de F0 om de stimuli te classificeren. Om dit idee te testen is wederom een logistische regressie-test uitgevoerd. De onafhankelijke variabele is de waarde van de F0 en de afhankelijke variabele is weer de respons. De log odds-ratio's indiceren de natuurlijke logaritme van de verhouding van de kans op /u/ in vergelijking met de kans op /i/ bij de laagste F0 (94,68 Hertz) tot de kans op /u/ in vergelijking met de kans op /i/ bij de hoogste F0 (201,85 Hertz). Ze staan weergegeven in Tabel 3. Te zien is dat elke participant een negatieve ratio heeft en dus neigt eerder voor /u/ te kiezen als respons bij een lage F0 en voor /i/ te kiezen bij een hoge F0. Om te onderzoeken of hier sprake is van een effect, is weer een T-test uitgevoerd. Uit deze test blijkt dat er een significant effect is van de fundamentele frequentie op de respons ( $p < 0,01$ ; 95%-betrouwbaarheidsinterval = (-8,15;-4,51)). Proefpersonen kiezen dus bij een hogere grondfrequentie voor /i/ en bij een lagere voor /u/.

Uit bovenstaande blijkt niet dat de waarde van de F1 alleen effect heeft op de respons, maar wel dat de respons beïnvloed wordt door de waarde van de F0 alleen. Natuurlijk hebben de participanten bij elke stimuli steeds beide tot hun beschikking gehad. De vraag die nu opkomt is of er een effect is van het verschil tussen F0 en F1 op de respons. Een antwoord wordt weer gegeven met behulp van een logistische regressie-test. De onafhankelijke variabele is in dit geval het verschil tussen F1 en F0 en de afhankelijke variabele is de respons: /i/ of /u/. De log odds-ratio's zijn weer berekend per proefpersoon en geven de natuurlijke logaritme aan van de verhouding van de kans op /u/ in vergelijking met de kans op /i/ bij het kleinste verschil tussen F1 en F0 (150,45 Hertz) tot de kans op /u/ in vergelijking met de kans op /i/ bij het grootste verschil tussen F1 en F0 (342,44 Hertz). De ratio's staan afgebeeld in Tabel 4 en zijn allemaal positief. Proefpersonen hebben dus de neiging eerder voor /u/ te kiezen bij een groter verschil tussen F1 en F0 en eerder voor /i/ te kiezen bij een kleiner verschil. Er is hier, net als bij F0 alleen, ook sprake van een significant effect (T-test,  $p < 0,01$ , 95%-betrouwbaarheidsinterval = (2,70;4,32)).

## **CONCLUSIE/DISCUSSIE**

### *SAMENVATTING RESULTATEN*

In bovenstaande data-analyse zijn vier belangrijke verschijnselen aan het licht gekomen, die in deze sectie bediscussieerd zullen worden. Bij een taak met gedwongen keuze tussen

/i/ en /u/, met als stimuli laagdoorlaatgefilterde /i/'s met toegevoegde hoogdoorlaatgefilterde ruis:

- 1) is er geen significant effect gevonden van de waarde van de eerste formant op de respons. Er is dus niet aangetoond dat proefpersonen gebruik maken van de F1 op zichzelf;
- 2) is er een significant effect gevonden van de bandbreedte van de eerste formant op de respons. Proefpersonen maken dus gebruik van de bandbreedte van de F1;
- 3) is er een significant effect gevonden van de waarde van de fundamentele frequentie op de respons. Proefpersonen maken dus gebruik van de F0;
- 4) is er een significant effect gevonden van het verschil tussen de waarde van de fundamentele frequentie en de waarde van de eerste formant. Proefpersonen maken dus gebruik van het verschil tussen F1 en F0.

Bij perceptieve restauratie van /i/ maken proefpersonen dus gebruik van de bandbreedte van de eerste formant, de waarde van de grondfrequentie en het verschil in waarden van de eerste formant en de grondfrequentie.

#### *MOGELIJKE VERKLARINGEN*

De eerste vraag die rijst, is waarom er geen significant effect gevonden is op de categorisatie van /i/ en /u/ van de waarde van F1 alleen. Een eerste mogelijkheid is dat het verschil in eerste formant tussen /i/ en /u/ niet groot genoeg is voor luisteraars om te horen, met als gevolg dat zij van dit verschil geen gebruik kunnen maken. Een andere mogelijkheid is dat de participanten het verschil in F1 niet horen als gevolg van de toegevoegde ruis en het daarom niet gebruiken. Om dit te testen zou eenzelfde soort experiment uitgevoerd kunnen worden waarbij de amplitude van de ruis verlaagd wordt en/of de afstand tussen de ruis en de F1 vergroot wordt, waardoor misschien een beter onderscheid gemaakt kan worden tussen ruis en klinkergeluid. Een alternatieve verklaring is dat de proefpersonen wel lage en hoge eerste formanten konden horen, maar dit verschil niet als kenmerkend zien voor het onderscheid tussen /i/ en /u/ en het om die reden niet gebruiken. Het is in elk geval een mogelijkheid dat proefpersonen voor het onderscheiden van /i/ en /u/ het F1-verschil op zichzelf ofwel niet konden horen, ofwel niet konden gebruiken.



De tweede vraag is hoe het komt dat proefpersonen de bandbreedte van de F1 hebben kunnen gebruiken bij de perceptieve restauratie van /i/. Een eerste mogelijkheid is dat er niet alleen voor de spreker in dit onderzoek een verschil in bandbreedte aanwezig is tussen /i/ en /u/, maar dat dit algemeen geldt voor deze twee Nederlandse klinkers. Het feit dat de bandbreedte van de F1 voor /i/ kleiner is dan voor /u/ is dan misschien een cue die goed gebruikt kan worden voor het onderscheid. Een andere mogelijke verklaring is dat luisteraars, bij gebrek aan meer informatie, een F1 met een grote bandbreedte hebben geïnterpreteerd als een combinatie van de eerste en tweede formant van de /u/. Dit is het zogenoemde *center of gravity*-effect, waarbij luisteraars twee formanten die relatief dicht bij elkaar liggen kunnen interpreteren als één formant. Volgens Hoemeke & Diehl (1994) kan dit effect een belangrijke rol spelen in de categorisatie van klinkers. Daarbij hebben Delattre e.a. (1952) gevonden dat achterklinkers op basis van één enkele formant gesimuleerd kunnen worden, waarbij de waarde van die formant dicht in de buurt ligt van de eerste formant zoals gesynthetiseerd in een klinker met twee formanten. Het is dus mogelijk dat een ‘brede’ F1 waargenomen wordt als een F1 en F2 die dicht bij elkaar liggen, zoals wel bij /u/, maar niet bij /i/, het geval is.

De derde vraag die gesteld kan worden, is waarom er ook gebruik gemaakt is van de F0. Een eerste mogelijkheid is dat de F0 daadwerkelijk een cue is voor het onderscheid tussen /i/ en /u/, door een mogelijk verschil in F0 tussen de twee klinkers. In de data van de spreker voor dit onderzoek is een dergelijk F0-verschil tussen /i/ en /u/ echter niet te vinden. De gemiddelde F0 van /u/ is 144,76 Hertz (52 tokens, standaarddeviatie 19,04 Hertz) en is ongeveer gelijk aan de gemiddelde F0 van /i/, die 144,65 Hertz is (261 tokens, standaarddeviatie 22,10 Hertz). In de literatuur is, voor zover de schrijver bekend, ook geen evidentie te vinden voor een F0-verschil tussen specifiek /i/ en /u/ dan wel algemeen tussen voor- en achterklinkers. Een andere mogelijkheid is dat men een lagere F0-waarde sneller aan een geronde klinker relateert, en een hoge F0 waarde aan een gespreide klinker. Voor zover de schrijver bekend, is hiervoor tot nog toe echter geen evidentie aanwezig in de literatuur. Om te testen of de F0 inderdaad gerelateerd kan worden aan klinkerronding, zou een vergelijkbare test gedaan kunnen worden waarin gekozen moet worden tussen /u/ en /y/, omdat deze klinkers beide gerond zijn. Wanneer er dan een kleiner effect van F0 is dan bij /u/ en /i/, of helemaal geen effect, kan afgeleid worden dat men inderdaad gebruik kan maken van F0 om geronde van ongeronde klinkers te onderscheiden. Later in deze sectie wordt nog teruggekomen op het idee van een categorisatietaak met /u/ en /y/. De conclusie die op het moment getrokken kan worden, is dat de waarde van de F0 effect

heeft op de keuze tussen /i/ en /u/, maar dat er nog geen aannemelijke verklaring voor gevonden is.

De vierde vraag die gesteld kan worden, is waarom participanten het verschil tussen F1 en F0 konden gebruiken voor de perceptieve restauratie van /i/. Een mogelijke verklaring is dat /u/ wordt gezien als een iets lagere klinker dan /i/. Voor de perceptie van klinkerhoogte is al eerder gevonden dat het verschil tussen F1 en F0 gebruikt kan worden bij het categoriseren van klinkers met verschillende hoogtes (Traunmüller, 1981). Deterding (1997) redeneert echter dat wanneer luisteraars dit verschil zouden gebruiken, onafhankelijk van de spreker die zij horen, er wel een consistente samenhang tussen de waarden van F1 en F0 zou moeten zijn, wat volgens hem in de werkelijkheid niet het geval is (gebaseerd op een studie van Ladefoged, 1967). Volgens een studie van Chládková e.a. (2009) naar Tsjechische klinkers gaan de formanten wel omhoog wanneer F0 omhoog gaat, al is dit effect bij vrouwen groter dan bij mannen. In de data van de spreker van het huidige onderzoek bleek echter geen correlatie aanwezig te zijn tussen de waarden van F0 en F1 ( $r=-0,03$  voor /i/,  $r=-0,18$  voor /u/). Nu is de redenering van Deterding ook niet helemaal waterdicht. Deterding beargumenteert dat wanneer F0 omhoog gaat, F1 ook omhoog moet gaan, zodat luisteraars onafhankelijk van de spreker het verschil tussen F1 en F0 kunnen gebruiken als een cue voor klinkerhoogte. Dit hoeft niet waar te zijn, want zolang er een verschil is dat sprekers kunnen horen, kunnen zij dat misschien gebruiken. Stel dat twee sprekers allebei een /i/ en een /a/ uitspreken. De /i/ en /a/ van spreker 1 hebben bijvoorbeeld een F0 van 100 Hertz en die van spreker 2 hebben een F0 van 300 Hertz. De F1 is voor beide /i/'s bijvoorbeeld 350 Hertz en voor beide /a/'s 500 Hertz. Terwijl verwacht wordt dat F1-F0 voor /i/ kleiner is dan voor /a/, is F1-F0 voor de /i/ van spreker 1 250 Hertz en F1-F0 voor de /a/ van spreker 2 200 Hertz. De vraag is dan inderdaad hoe het verschil tussen F1 en F0 gebruikt kan worden voor de perceptie van klinkerhoogte. Het antwoord hierop heeft te maken met sprekernormalisatie. Luisteraars classificeren klinkers niet alleen op basis van informatie die aanwezig is in het akoestische signaal, maar ook op basis van de kennis die zij hebben over eigenschappen van de spreker (Barreda & Nearey, 2012). Het verschil tussen F1 en F0 blijft per spreker voor /i/ kleiner dan voor /a/, ook al gaat F1 niet omhoog wanneer F0 omhoog gaat. Kortom zou het een mogelijkheid zijn dat luisteraars het F1-F0-verschil kunnen gebruiken voor de perceptie van klinkerhoogte. Wellicht nemen luisteraars van het Nederlands /u/ waar als een lagere klinker dan /i/. Als er dan geen informatie aanwezig is die een verschil in klinkerplaats

en/of ronding aanduidt, kan er misschien informatie gebruikt worden die helpt open van gesloten klinkers te onderscheiden, in dit geval F1-F0.

Dat er een effect is van zowel F0 alleen als van F1-F0, geeft twee verdere mogelijkheden: F1 heeft geen effect of F1 heeft alleen een versterkend effect. In het geval dat F1 een versterkend effect heeft, is dit effect er alleen wanneer luisteraars naast de F1 andere informatie tot hun beschikking hebben, in dit geval de F0. Een lage F1-waarde zou misschien extra evidentie geven voor een /i/ wanneer er een hoge F0 is, maar niet bepalend zijn. Een andere mogelijkheid is dat het effect van F1-F0 op de respons grotendeels bepaald is door de waarde van de F0, aangezien deze op zichzelf al invloed heeft. Een klein verschil tussen F1 en F0 kan voorkomen als F0 hoog is en in beide gevallen kiest men voor /i/. In dat geval heeft F1 geen effect.

Op basis van bovenstaande kan geconcludeerd worden dat in deze studie de bandbreedte van de F1, de F0 op zichzelf en het verschil tussen F1 en F0 gebruikt zijn voor het onderscheid tussen de Nederlandse klinkers /i/ en /u/. Voorzichtig kan de aanname gemaakt worden dat luisteraars het F1-F0-verschil konden gebruiken omdat /i/ een iets hogere klinker is dan /u/. De proefpersonen konden deze cue gebruiken bij afwezigheid van duidelijkere cues, zoals het F2-verschil tussen /i/ en /u/. Het is de vraag of luisteraars het F1-F0-verschil ook (kunnen) gebruiken wanneer duidelijkere cues wel aanwezig zijn. De waarde van de F0 alleen kon misschien gebruikt worden door een mogelijk verschil in F0 tussen voor- en achterklinkers, dan wel geronde en gespreide klinkers. Hier is echter geen verdere evidentie voor aanwezig in de literatuur. De bandbreedte van F1 kon mogelijk gebruikt worden door een mogelijk algemeen bandbreedteverschil tussen de F1 van /i/ en /u/ of als gevolg van het *center of gravity*-effect.

#### *KRITIEK EN VERDER ONDERZOEK*

Uit het huidige onderzoek is gebleken dat in ieder geval F0 en F1 misschien ook of deels een effect heeft op de categorisatie van /i/ en /u/. Het is echter nog niet helemaal duidelijk op wat voor manier dit effect tot stand komt. Om meer duidelijkheid te krijgen over de precieze reden achter het effect van F0, een verklaring voor het effect van het verschil tussen F1 en F0 en de juiste uitleg voor het effect van de bandbreedte van de F1, zal meer onderzoek uitgevoerd moeten worden. Vervolgonderzoek zou bijvoorbeeld verschillende tests in kunnen houden waarbij de ene keer enkel de F0 aanwezig is in de stimuli en gevarieerd wordt en de andere keer enkel de F1 aanwezig is en gevarieerd wordt. Een manier om deze factoren goed te kunnen controleren is door gebruik te maken

van synthetische stimuli, al zullen proefpersonen daar anders op reageren dan op natuurlijke stimuli met vergelijkbare kwaliteiten. Bij gebruik van synthetische stimuli kan ook de bandbreedte van de formanten eenvoudiger gecontroleerd worden, zodat over het effect hiervan en over een mogelijk *center of gravity*-effect meer duidelijkheid kan komen. Door verschillende karakteristieken van de stimuli apart te manipuleren kan wellicht een duidelijker beeld verkregen worden van de manier waarop F0 en F1 de categorisatie van /i/ en /u/ beïnvloeden.

Verder onderzoek kan natuurlijk uitgevoerd worden naar andere klinkers en andere talen. Zoals eerder kort vermeld, zou bijvoorbeeld een vergelijking gemaakt kunnen worden tussen de Nederlandse /u/ en /y/, aangezien /y/, net als /i/, ook een lagere eerste formant lijkt te hebben dan /u/. In de data van Van Leussen e.a. (2011) heeft /y/ namelijk een F1-waarde van 388,77 Hertz voor vrouwen en 339,26 Hertz voor mannen. Deze waarden zijn weliswaar hoger dan de gemiddelde F1-waarden voor /i/ in hun studie, maar nog steeds lager dan hun gevonden waarden voor /u/ (zie Inleiding, pagina 5). Gelijksortig onderzoek zou ook uitgevoerd kunnen worden naar de /i/ en /u/ van bijvoorbeeld het Engels, indien daar ook sprake is van een F1-verskil. Voor het *Southern British English* geldt in elk geval dat /u/ een hogere F1 heeft dan /i/ (Chládková & Hamann, 2011) Misschien kan dit verschil als cue gebruikt worden voor het onderscheiden van de twee klinkers in het Engels.

Een belangrijk punt dat nog besproken moet worden, is dat de responsen misschien niet alleen beïnvloed zijn door F0 en/of F1-F0, maar ook door andere factoren. Er is een mogelijkheid dat een respons niet alleen beïnvloed wordt door de stimulus waar deze respons bij hoort, maar door meerdere stimuli. Benders e.a. (2012) hebben een onderzoek uitgevoerd naar het effect van verschillende soorten context op responsen van proefpersonen. Uit hun studie blijkt dat de stimulus voorafgaand aan de huidige stimulus de respons op de huidige stimulus kan beïnvloeden. Wanneer sprekers van het Spaans /i/'s en /e/'s aangeboden kregen en telkens uit die twee klinkers moesten kiezen, classificeerden zij een stimulus bijvoorbeeld sneller als /e/ wanneer deze stimulus een hogere F1 had dan de voorafgaande stimulus, terwijl de F1 van de huidige stimulus misschien eigenlijk typerender was voor een /i/. In andere woorden, zoals Benders e.a. (2012:3082) stellen: hoe meer de F1 van de huidige stimulus hoger is dan de F1 van de voorgaande stimulus, des te groter is de kans dat de huidige stimulus als /e/ geclassificeerd wordt. Een gelijksoortig effect zou plaats kunnen hebben gevonden in de huidige studie, voor /i/ en /u/.

Dat het niet precies duidelijk is waarom bepaalde eigenschappen van de stimuli gebruikt werden als cue voor de categorisatie van /i/ en /u/, neemt niet weg dat er daadwerkelijk sprake is van bepaalde effecten. De bandbreedte van de F1, de waarde van de F0 en het verschil tussen F1 en F0 kunnen door luisteraars van het Nederlands gebruikt worden om een onderscheid tussen de twee klinkers te maken, zonder dat er context van een syllabe, woord of zin aanwezig is. Dit geeft aan dat perceptieve restauratie niet alleen gebaseerd is op top-downprocessen, zoals Repp (1991) stelt, maar dat men ook gebruik kan maken van auditieve inductie.

#### REFERENTIES

- Barreda, Santiago & Terrance M. Nearey (2012). "The direct and indirect roles of fundamental frequency in vowel perception." In: *Journal of the Acoustical Society of America*, **131**(1), 466-477.
- Bashford, James A. Jr. & Richard M. Warren (1987). "Multiple Phonemic Restorations Follow the Rules for Auditory Induction." In: *Perception & Psychophysics*, **42**(2), 114-121.
- Benders, Titia, Paola Escudero & Matthias J. Sjerps (2012). "The interrelation between acoustic context effects and available response categories in speech sound categorization." In: *Journal of the Acoustical Society of America*, **131**(4), 3079-3087.
- Boersma, Paul & David Weenink (2012). Praat: doing phonetics by computer (Versie 5.3.04) [computerprogramma]. Verkregen via <http://www.praat.org/>.
- Chistovich, Ludmilla, A. & Valentina V. Lublinskaya (1979). "The 'center of gravity' effect in vowel spectra and critical distance between the formants: Psychoacoustical study of the perception of vowel-like stimuli." In: *Hearing Research*, **1**(3), 185-195.
- Chládková, Kateřina, Paul Boersma & Václav Jonáš Podlipský (2009). "On-line Formant Shifting as a Function of F0." In: *Proceedings of Interspeech, Brighton, United Kingdom*, 464-467.

- Chládková, Kateřina & Silke Hamann (2011). "High vowels in Southern British English: /u/-fronting does not result in merger." In: *Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Congress of Phonetic Sciences (ICPhS), Hong Kong, Japan (17-21 August 2011)*, 476-479.
- De Boer, Bart (2011). "First Formant Difference for /i/ and /u/: A Cross-Linguistic Study and an Explanation." In: *Journal of Phonetics*, **39**, 110-114.
- Delattre, Pierre, Alvin M. Liberman, Franklin S. Cooper & Louis J. Gerstman (1952). "An experimental study of the acoustic determinants of vowel color: Observations on one- and two-formant vowels synthesized from spectrographic patterns." In: *Word*, **8**, 195- 210.
- Deterding, David (1997). "The Formants of Monophthong Vowels in Standard Southern British English Pronunciation." In: *Journal of the International Phonetic Association*, **27**, 47-55.
- Hoemeke, Kathryn A. & Randy L. Diehl (1994). "Perception of vowel height: The role of *F1-F0* distance." In: *Journal of the Acoustical Society of America*, **96**(2), 661-674.
- Ladefoged, Peter (1967). *Three Areas of Experimental Phonetics*. Oxford: Oxford University Press.
- Pols, L.C.W., H.R.C. Tromp & R. Plomp (1973). "Frequency analysis of Dutch vowels from 50 male speakers." In: *Journal of the Acoustical Society of America*, **53**(4), 1093-1101.
- Repp, Bruno H. (1991). "Perceptual Restoration of a "Missing" Speech Sound: Auditory Induction or Illusion?" In: *Haskins Laboratories Status Report on Speech Research*, **SR-107/108**, 147-170.
- Ter Schure, Sophie, Kateřina Chládková & Jan-Willem van Leussen (2011). "Comparing Identification of Artificial and Natural Vowels." In: *Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Congress of Phonetic Sciences (ICPhS), Hong Kong, Japan (17-21 August 2011)*, 1770-1773.
- Trautmüller, Hartmut (1981). "Perceptual dimension of openness in vowels." In: *Journal of the Acoustical Society of America*, **89**(5), 1465-1475.

- Traunmüller, Hartmut (1984). “Articulatory and Perceptual Factors Controlling the Age- and Sex-Conditioned Variability in Formant Frequencies of Vowels.” In: *Speech Communication*, **3**, 49-61.
- Van Hout, Roeland, Patti Adank & Vincent J. van Heuven (2000). “Akoestische metingen van Nederlandse klinkers in algemeen Nederlands en in Zuid-Limburg.” In: *Taal en Tongval*, **52**, 151-162
- Van Leussen, Jan-Willem, Daniel Williams & Paola Escudero (2011). “Acoustic Properties of Dutch Steady-State Vowels: Contextual Effects and a Comparison with Previous Studies.” In: *Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Congress of Phonetic Sciences (ICPhS), Hong Kong, Japan (17-21 August 2011)*, 1194-1197.