

Samenvatting

Een cochleair implantaat (CI) is een chirurgisch geïmplanteerd apparaat dat geluid omzet in elektrische signalen die de gehoorzenuw in het binnenoor stimuleren. Het is een waardevolle behandeling voor mensen met ernstig tot zeer ernstig perceptief gehoorverlies. Bij postlinguaal doof geworden volwassenen verbetert een CI het auditief functioneren en het verstaan van spraak in een stille omgeving, hoewel het maximale verstaan, uitgedrukt in percentage correct herkende spraakelementen, sterk kan variëren van persoon tot persoon.

In het dagelijks leven zijn er vaak achtergrondgeluiden aanwezig die het verstaan van spraak belemmeren. Spraakverstaan in situaties met achtergrondgeluid is een uitdaging voor CI-ontvangers of het is zelfs niet mogelijk. Deze beperkte spraakperceptie in achtergrondgeluid is een gevolg van het feit dat de auditieve informatie die de CI via de gehoorzenuw doorgeeft, minder gedetailleerd is dan bij normaalhorende luisteraars. Er is daarom verdere verwerking van het inkomende auditieve signaal nodig om woorden te herkennen en de hiaten in het inkomende auditieve signaal op te vullen. Bij deze top-down verwerking zijn taalkundige en cognitieve processen betrokken.

In dit proefschrift is onderzocht hoe spraakperceptie van CI-gebruikers wordt beïnvloed door achtergrondlawaai. Dit is gedaan met drie uitkomstmaten: spraakverstaan in lawaai, subjectieve ruistolerantie en luisterinspanning. Daarbij werd gebruik gemaakt van spraakmateriaal dat bestaat uit alledaagse zinnen met vergelijkbare verstaanbaarheid. Met deze uitkomstmaten kan een beeld geschetst worden van de mate waarin CI gebruikers kunnen verstaan in achtergrondlawaai.

Hedendaagse geluidsprocessors van CI-systemen bevatten algoritmen voor ruisonderdrukking met de bedoeling de perceptie van spraak in lawaai te verbeteren. Een tweede onderwerp van dit proefschrift was daarom de evaluatie van het effect van algoritmen voor ruisonderdrukking op spraakperceptie in achtergrondgeluid. Deze evaluatie is eveneens gedaan met behulp van de drie bovengenoemde uitkomstmaten.

Ten derde is onderzocht wat de relatieve invloed is van zogenoemde 'bottom-up' auditieve spraakkenmerken in het binnenkomende signaal en cognitieve 'top-down' verwerking op de spraakperceptie in lawaai. De relatie van de genoemde uitkomstmaten met de hoeveelheid bottom-up informatie in het binnenkomende signaal is onderzocht met een spectrale resolutietest. Het effect van de top-down verwerking op de uitkomstmaten is onderzocht met een test voor werkgeheugencapaciteit. Verder werd een model gebruikt dat modelleert hoe contextuele informatie die binnen een zin aanwezig is, gebruikt wordt om spraakelementen die niet goed zijn binnenkomen, alsnog correct te kunnen verstaan.

De vierde vraag van dit proefschrift was hoe het bestaande Nederlands zinsmateriaal voor spraaktesten het beste kan worden gebruikt om spraakperceptie in lawaai bij CI-gebruikers te meten.

In de studie beschreven in **hoofdstuk 2** werd spraakverstaan in ruis gemeten bij verschillende spraak-ruisverhoudingen en in stilte. Verder werd de geluidstolerantie gemeten met de Acceptable Noise Level (ANL) test. Deze metingen werden gedaan met en zonder ruisonderdrukkingsalgoritme ClearVoice. Ook werd de effectieve spectrale resolutie gemeten met een spectral ripple (SR) discriminatietest. De studie was bedoeld om (1) het effect van het ruisonderdrukkingsalgoritme ClearVoice te evalueren en (2) de invloed van de gemeten spectrale resolutie bij CI-gebruikers op de spraakperceptie in ruis en op het effect van ClearVoice te onderzoeken. De hypothese was dat CI-gebruikers met een lage spectrale resolutie meer baat zouden kunnen hebben bij algoritmen voor ruisonderdrukking dan CI-gebruikers met een hoge spectrale resolutie.

Het onderzoek toonde aan dat een gemiddelde signaal-ruisverhouding van 4,7 dB nodig was voor 50% correct herkende woorden uit zinnen in ruis. Deze waarde is veel hoger dan de waarde van -5dB die in de literatuur wordt gerapporteerd voor normaalhorenden, wat aantoont dat spraak-in-ruisherkenning veel slechter is bij CI-gebruikers. Toepassing van het ruisonderdrukkingsalgoritme ClearVoice had geen significant effect op spraakverstaan in lawaai. De meting van de subjectieve geluidstolerantie toonde aan dat er tijdens het luisteren naar spraak weinig geluid werd getolereerd. De gemiddelde ANL-waarde was 14 dB, d.w.z. het ruisniveau was alleen acceptabel als het voor een groot deel onder het niveau van de zachte spraaksegmenten lag. Het ruisalgoritme verbeterde deze tolerantie met 3,6 dB. De verbetering van de geluidstolerantie was niet significant gecorreleerd met de effectieve spectrale resolutie, de spraakverstaanbaarheidsscore of de signaal-ruisverhouding. De hypothese dat CI-ontvangers met een lage spectrale resolutie een groter voordeel hebben van ruisonderdrukking dan CI-gebruikers met een hoge spectrale resolutie, kon niet worden bevestigd voor spraakverstaanbaarheid in ruis of ruistolerantie.

Hoofdstuk 3 beschrijft een vervolg op de studie die in hoofdstuk 2 beschreven is. De hypothese die deze vervolgstudie onderzoekt is dat een toename van maximale comfort niveaus (M-levels) in de CI-aanpassing het effect van ruisonderdrukkingsalgoritme ClearVoice zou kunnen vergroten. Uit de studie bleek dat de toename van M-levels met 5% resulteerde in een kleine significante verbetering van de spraakverstaansdrempel in ruis en een significante verbetering van de ruistolerantie als gevolg van het ruisonderdrukkingsalgoritme. De toename van M-levels alleen resulteerde niet in een significante verandering in spraakverstaan in ruis of ruistolerantie. Deze bevindingen bevestigden de hypothese van deze studie.

In het dagelijkse leven ervaren CI-gebruikers een verscheidenheid aan geluiden die variëren in klank, duur of luidheid. Sommige van deze geluiden zijn plotselinge,

kortdurende geluiden, zogenaamde transiënten. Het doel van de studie beschreven in **hoofdstuk 4** was om het effect van luide kortdurende geluiden op spraakperceptie bij CI-gebruikers te onderzoeken en om de validiteit en werkzaamheid van een transient noise reduction algoritme (TNRA) te evalueren, zowel alleen als in combinatie met een algoritme voor onderdrukking van continue ruis. Kortdurende geluiden werden opgenomen en gemengd met spraak en continue ruis. De ervaren hinder werd nagevraagd en er werd ook een spraak-in-ruis-test en een ruistolerantietest afgenomen.

CI-gebruikers beoordeelden geluiden met luide kortdurende geluiden erin als matig vervelend. Deze hinder werd in lichte mate, maar statistisch significant, verminderd door toepassing van de TNRA. De luide kortdurende geluiden veroorzaakten een grote afname van de spraakverstaanbaarheid in lawaai en een matige afname van de geluidstolerantie. De TNRA had geen significant effect op de spraakverstaanbaarheid in lawaai en ook niet op de geluidstolerantie. De TNRA had geen significante invloed op het gunstige effect van het ruisonderdrukkingsalgoritme voor continue ruis op de spraakverstaanbaarheid in ruis en geluidstolerantie niet.

De studie die beschreven is in **hoofdstuk 5** richtte zich op de luisterinspanning zoals gemeten met pupillometrie tijdens spraakherkenning van zinnen in ruis bij verschillende spraak-ruisverhoudingen. Ook werd het effect van een ruisonderdrukkingsalgoritme op de luisterinspanning geëvalueerd. Ten derde werd de relatie tussen werkgeheugencapaciteit en luisterinspanning onderzocht.

Uit de resultaten bleek dat CI-luisteraars luisterinspanning moesten leveren in alle spraak-in-ruis condities, ook bij heel gunstige spraak-ruisverhoudingen. Wel was er voor de meest gunstige spraak-ruis verhoudingen gemiddeld enige afname van de luisterinspanning te zien tijdens en na de zinnen. Het ruisonderdrukkingsalgoritme zorgde voor minder vermindering van pupil dilatatie na de zin, vergeleken met condities zonder ruisonderdrukking. Dit kan duiden op meer onzekerheid over de spraakherkenning na een gehoorde zin. De mate van gemeten luisterinspanning was gerelateerd aan de werkgeheugencapaciteit. De pupildilatatie nam bij een toenemende signaal-ruisverhouding, voornamelijk af bij deelnemers met een relatief lage werkgeheugencapaciteit en was kleiner en vrijwel onafhankelijk van de signaal-ruisverhouding bij luisteraars met een relatief hoge werkgeheugencapaciteit.

Hoofdstuk 6 beschrijft een onderzoek naar de top-down verwerking van inkomende spraaksignalen waarin de hoeveelheid spraakinformatie beperkt is. Deze studie onderzocht de rol van contextuele informatie in het proces van spraakverstaan en de invloed van het verbale werkgeheugen op het gebruik van contextuele informatie. De spraakverstaanbaarheid werd gemeten bij 50 post-linguale volwassen CI-gebruikers en een normgroep van normaal-horende jonge mensen, zowel met zinnen als met

consonant-nucleus-consonant (CNC) woorden. De invloed van contextuele informatie werd berekend op basis van verschillende contextfactoren en modellen.

Uit de studie bleek dat CI-gebruikers significant meer gebruik maakten van contextuele informatie bij het herkennen van CNC-woorden en zinnen dan de normaal-horende normgroep. Het gebruik van contextuele informatie in zinnen was gerelateerd aan de werkgeheugencapaciteit maar niet aan leeftijd, wat aangeeft dat het vermogen om context te gebruiken afhankelijk is van cognitieve vaardigheden, ongeacht de leeftijd.

De aanwezigheid van contextuele informatie in de spraak verhoogde de gevoeligheid van de test om verschillen in sensorische bottom-up informatie tussen condities te identificeren, maar verhoogde ook het risico op een plafondeffect bij goed presterende luisteraars. Dit laatste kan worden gecompenseerd door ruis toe te voegen om de scores weer in het responsieve bereik te brengen.

Meting van de spraakreceptiedrempel in ruis (SRTn) met zinnen is niet altijd mogelijk bij gebruikers van een cochleair implantaat (CI). Gewoonlijk wordt de SRTn bepaald met een adaptieve procedure, waarbij de spraak-ruisverhouding gewijzigd wordt, afhankelijk van de response van degene die getest wordt. Een verlaagde maximale score voor het zinsverstaan in stilte en een slappe helling van de psychometrische functie die het verband tussen de spraak-ruisverhouding en de verstaanbaarheid beschrijft, beperken de toepassing van een adaptieve SRTn-bepaling. **Hoofdstuk 7** beschrijft een studie waarin onderzocht werd of spraak-in-ruis-tests die adaptieve procedures gebruiken om een SRTn te bepalen, voor CI-gebruikers kunnen worden geoptimaliseerd met behulp van stochastische approximatiemethoden (SA) en woordscoring. Uit de literatuur zijn vier verschillende SA-algoritmen geselecteerd. Voor elk van deze algoritmen moesten de beste parameters worden bepaald. Vervolgens moesten de prestaties van de algoritmen worden vergeleken met elkaar en met bestaande klinische procedures. Er werd een simulatiemodel ontwikkeld waarmee spraakverstaan in lawaai nauwkeurig gesimuleerd kon worden voor zowel CI-gebruikers als normaal horende (NH) luisteraars. Na validatie werd het model gebruikt in Monte Carlo-simulaties om de vier verschillende SA-algoritmen te optimaliseren voor gebruik in beide groepen en vervolgens werden ze vergeleken met klinische adaptieve procedures met behulp van zinscores.

Het simulatiemodel bleek valide, aangezien de simulaties zeer goed overeenkwamen met bestaande experimentele gegevens. De vier geoptimaliseerde SA-algoritmen leverden allemaal efficiënte schattingen van de SRTn op. Ze waren vrijwel even nauwkeurig en produceerden kleinere standaarddeviaties (SD) dan de klinische procedures. Bij CI-gebruikers hadden SRTn-schattingen een grotere SD dan bij NH-luisteraars. Er waren minimaal 20 zinnen per testconditie nodig om voldoende betrouwbaarheid te garanderen. De SD van de SRTn-schatting nam toe met afnemende maximale verstaanbaarheid in stilte bij CI-gebruikers. Bias en SD werden onaanvaardbaar groot voor een

spraakverstaanbaarheidsscore van minder dan 70% voor spraak zonder ruis. Stochastische benaderingsprocedures die woordscoring gebruiken, kunnen worden beschouwd als een valide, nauwkeuriger alternatief voor klinische adaptieve procedures die momenteel worden gebruikt.

Hoofdstuk 8 gaat over onderzoek naar de Acceptable Noise Level (ANL) test als maat voor ruistolerantie. In deze test geven luisteraars aan welk ruisniveau ze willen verdragen tijdens het volgen van spraak. Er is onderzocht of het spraakmateriaal dat in de test gebruikt wordt, invloed heeft op de uitkomst. Daartoe werden verschillende spraakmaterialen vergeleken, namelijk de zinnen die in dit proefschrift steeds gebruikt zijn, conversatiespraak en een betekenisloos spraak-achtig signaal dat wordt gebruikt bij het testen van hoortoestellen. Deze materialen verschillen in de mate waarin ze betekenisvol en coherent zijn. Ook is onderzocht wat de test-retest betrouwbaarheid van de ANL-test is en of de ANL geassocieerd is met werkgeheugen capaciteit. Daarnaast werd onderzocht of ANL-resultaten, verkregen met deze drie verschillende spraakmaterialen, geassocieerd waren met zelfgerapporteerde beperkingen als gevolg van gehoorproblemen en luisterinspanning in het dagelijks leven, zoals beoordeeld met een vragenlijst. Het onderzoek is gedaan met goed-horende volwassenen met een leeftijdscategorie die representatief is voor volwassen hoortoestel- en CI-gebruikers. De studie was bedoeld als een voorloper van een klinische studie met CI-gebruikers.

De resultaten toonden aan dat betekenis, maar niet semantische coherentie van het spraakmateriaal, de ANL beïnvloedde. Er werd minder ruis geaccepteerd voor het niet-betekenisvolle spraak-achtige signaal dan voor het zinvolle spraakmateriaal. Er werd echter geen verschil gevonden tussen de conversatiespraak en de zinnen die in dit proefschrift gebruikt zijn.

De test-retest betrouwbaarheid van de ANL was vergelijkbaar tussen de spraakmaterialen en was niet voldoende voor gebruik van de ANL test in intra-individuele vergelijking van condities. De ANL bleek verband te houden met de uitkomst van een gehoorgerelateerde vragenlijst, wat suggereert dat ANL aspecten van spraakperceptie meet die gerelateerd zijn aan waargenomen beperkingen in spraak in lawaai in alledaagse situaties.

In **hoofdstuk 9** gaat het over de vraag of de ruistolerantiemeting en de spraakmetingen in stilte en ruis gerelateerd zijn aan een gehoorspecifieke, door de patiënt gerapporteerde uitkomstmaat (PROM). De hypothese was dat spraakverstaanbaarheid in ruis en geluidstolerantie een groter deel van de variantie in PROM-scores kan verklaren dan spraakverstaanbaarheid in stilte. De SSQ-vragenlijst (Speech, Spatial, Qualities) werd gebruikt als een PROM. Spraakverstaan in stilte en in ruis werden weer gemeten met de VU zinnen, en de ruistolerantie werd weer gemeten met de Acceptable Noise Level (ANL) test in een groep van 48 CI gebruikers.

Het bleek dat de SSQ-scores matig waren gecorreleerd met spraakscores in stilte en ruis, en ook met ANL's. Spraakscores in stilte en ruis waren sterk gecorreleerd. De combinatie van spraakscores en ANL verklaarde 10-30% van de varianties in SSQ-scores, waarbij de bijdragen van ANL's slechts 0-9% was.

De variantie in de SSQ als gehoorspecifieke PROM bij CI-gebruikers werd dus niet beter verklaard door spraakverstaanbaarheid in lawaai dan door spraakverstaanbaarheid in stilte, vanwege de opmerkelijk sterke correlatie tussen beide maten, die mogelijk kan worden verklaard door het feit dat de beschikbare auditieve bottom-up informatie in CI-stimulatie erg beperkt is en beide uitkomstmaten voor een belangrijk deel bepaalt. ANL's leveren slechts een kleine bijdrage aan het verklaren van de variantie van de SSQ. ANL's lijken andere aspecten te meten dan de SSQ. Gebruik van een PROM naast spraaktests levert extra informatie t.o.v. de spraakmetingen alleen.

Hoofdstuk 10 geeft een samenvatting van de belangrijkste bevindingen uit de voorgaande hoofdstukken, becommentarieert deze en beantwoordt de onderzoeksvragen die in de introductie gesteld waren. De resultaten van dit proefschrift bevestigen de veelgehoorde klacht van CI-gebruikers dat zij een gesprek in achtergrondlawaai moeilijk kunnen volgen. De gebruikte uitkomstmaten waren gericht op verschillende aspecten van spraakverstaan en samen geven ze een gedifferentieerd beeld van de spraakverstaanproblemen die CI-gebruikers ervaren in achtergrondlawaai. Gemiddeld tolereren CI-gebruikers weinig achtergrondgeluid tijdens het volgen van spraak en moeten ze luisterinspanning leveren tijdens spraakverstaan in lawaai, zelfs als er weinig achtergrondlawaai is. Deze resultaten suggereren dat motivatie en inspanning vereist zijn om deel te nemen aan een gesprek in achtergrondlawaai en als het niveau van het achtergrondgeluid stijgt, wordt spraakverstaan praktisch onmogelijk. Deze moeilijkheden werden ook door CI-gebruikers zelf gerapporteerd in een evaluatie met een vragenlijst.

De ruisonderdrukingsalgoritmen voor continue ruis of plotselinge, kortdurende geluiden die in de studies van dit proefschrift getest zijn, resulteren niet in een relevante verbetering van het spraakverstaan. Wel kunnen ze de tolerantie voor continue ruis verbeteren en de hinder van luide kortdurende geluiden verminderen.

De beperkingen in het verstaan van spraak in lawaai kunnen voor het grootste deel worden verklaard door beperkingen in de auditieve informatie die de CI en de gehoorzenuw doorgeven. Deze beperkingen houden deels verband met een lage spectrale resolutie, die werd gemeten bij CI-gebruikers. Bij het verstaan van spraak in lawaai spelen ook linguïstisch-cognitieve factoren een rol. Uit het onderzoek bleek dat CI-gebruikers beter gebruik maken van contextuele informatie die binnen een zin aanwezig is, dan jonge, normaal-horende luisteraars. De linguïstisch-cognitieve bijdrage resulteerde in een toename van maximaal 35 procentpunten in woordherkenning voor zinnen die typerend zijn voor dagelijkse conversatie, ten opzichte van herkenning van losse fonemen. CI

gebruikers met een relatief lage werkgeheugencapaciteit hebben gemiddeld een slechtere spraakherkenning in lawaai, maken minder effectief gebruik van contextuele informatie en lijken meer luisterinspanning te leveren dan CI-gebruikers met een relatief hoge werkgeheugencapaciteit.

De Acceptable Noise Test bleek een geschikte test te zijn voor het meten van directe effecten van een ruisonderdrukingsalgoritme op tolerantie van ruis tijdens het luisteren naar spraak. Bij CI-gebruikers was de geluidstolerantie gerelateerd aan de spraakperceptiedrempel in lawaai. Volgens de literatuur over geluidstolerantie wordt deze relatie niet gevonden voor personen met normaal gehoor of lichte slechthorendheid. De test-retest betrouwbaarheid van de Acceptable Noise Test, de constructvaliditeit en de instructie zijn als matig beoordeeld, waardoor de waarde van de Acceptable Noise Test ook matig is.

Voor het meten van het spraakverstaan in stilte en in achtergrondlawaai bij CI gebruikers blijken de VU-zinnen goed bruikbaar, mits er gebruik gemaakt wordt van woord scoring. De spraakperceptiedrempel in ruis kan adaptief gemeten worden met een stochastische approximatiemethode mits de woordherkenning in stilte voldoende is.