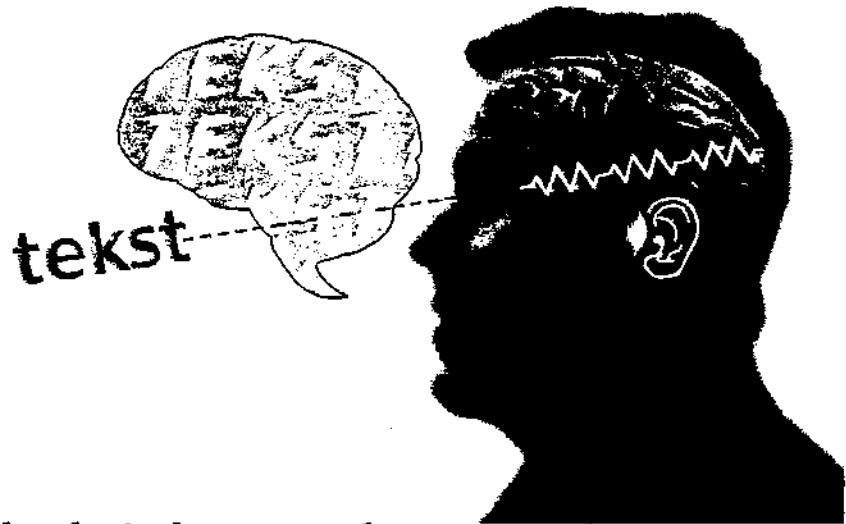


De elektrofysiologie van taal

Wat hersenpotentialen vertellen over het menselijk taalvermogen

PETER HAGOORT



Informatieoverdracht in het centrale zenuwstelsel vindt onder andere plaats door middel van elektrische activiteit van de zenuwvezels en zenuwcellen. Minimale potentiaalveranderingen opgewekt aan de receptieve uiteinden van het neuron (dendrieten) of aan het cellichaam zelf, leiden tot minuscule elektrische stroompjes die zich langs de zenuwvezels (axonen) voortplanten. Hans Berger slaagde er aan het begin van deze eeuw in om deze continue elektrische activiteit van de hersenen aan de schedel op te pikken met behulp van elektrodes. Het resulterende EEG (elektro-encefalogram) heeft sindsdien een belangrijke rol gespeeld in de klinische diagnostiek bij patiënten van wie vermoed werd dat zij leden aan een hersenziekte.

Het klinische EEG geeft een globaal beeld van de elektrische hersenactiviteit onder bepaalde algemene condities van het organisme, zoals slapen of waken. Het is echter ook mogelijk gebleken het EEG te registreren afhankelijk van specifieke sensorische en cognitieve processen. Als we het EEG registreren terwijl de proefpersoon of patiënt naar een bepaalde stimulus (bijvoorbeeld een toon of een geometrisch figuur) luistert of kijkt, en dit EEG vervol-

tieve elektrode registreert elektrische hersenactiviteit. De inactieve referentie-elektrode is zo geplaatst dat daarmee geen hersenactiviteit wordt opgepikt (bijvoorbeeld op de oorlel). Het stimuleren van een zintuigstelsel leidt tot een potentiaalverandering in het elektrische veld tussen de actieve elektrode en de referentie-elektrode. Deze potentiaalverandering kan negatief dan wel positief zijn, resulterend in een ERP-component met een negatieve res-

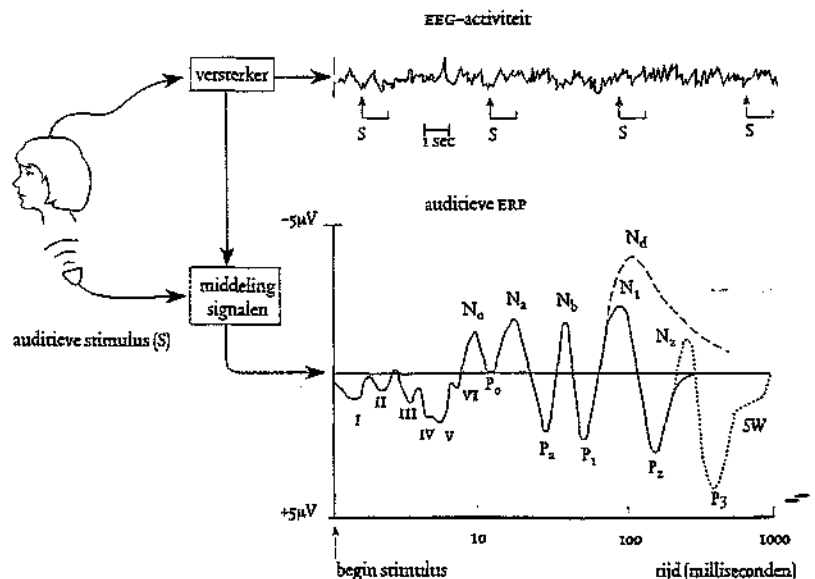
Figuur 1
Geïdealiseerd golfpatroon van de reeks ERP-componenten die zichtbaar worden wanneer het EEG gemiddeld wordt over de herhaalde aanbiedingen van een korte auditieve stimulus. De ERP is doorgaans te klein om in het EEG (boven) te worden opgepikt, waardoor middeling per computer over meerdere stimuluspresentaties vereist is om een adequate signaal-ruisverhouding te bereiken. Op de logaritmische tijdsas zijn achtereenvolgens zichtbaar de vroege hersenstampotentialen (No, Po, Na, Pa, Nb), de exogene componenten (P1, N1, P2), en de endogene, cognitieve ERP-componenten (Nd, N2, P300). De componenten met een negatieve polariteit zijn omhoog geplott, de componenten met een positieve polariteit hebben een naar beneden gerichte piek (ontleend aan Hillyard en Kutas, 1983).

➤ *Het is mogelijk gebleken het EEG te registreren afhankelijk van specifieke sensorische en cognitieve processen*

gens middelen over een aantal aanbiedingen van de stimulus, zien we een identificeerbaar patroon van negatieve en positieve pieken in het EEG-signaal ontstaan. Figuur 1 geeft daarvan een voorbeeld. De daarin zichtbare pieken zijn de zogenaamde ERP-componenten, waarbij ERP staat voor Event-Related Potentials. Deze ERP's geven onder andere informatie over de aard van bepaalde cognitieve processen, zoals het voorbereiden van beweging en het registreren van een onverwachte gebeurtenis. ERP's worden dus opgewekt door stimulatie van een of meerdere zintuigsystemen en de daarop volgende verwerking van de geregistreerde prikkel.

Het identificeren van de verschillende ERP-componenten geschiedt op basis van een aantal kenmerken van het signaal. Het eerste kenmerk is de polariteit van een ERP-component. Wat bij ERP-registraties in feite wordt opgepikt, is een elektrische potentiaalverandering van een actieve elektrode ten opzichte van een inactieve referentie-elektrode. De ac-

pectievelijk positieve polariteit. ERP-componenten met een negatieve polariteit worden doorgaans weergegeven door middel van een omhoog gaande piek, componenten met een positieve polariteit door middel van een omlaag gaande piek. De benoe-



ming van de componenten bevat meestal informatie over hun polariteit (N of P).

Een tweede kenmerk is het moment waarop de component optreedt. Het gaat hier om de piekdatentie ten opzichte van het moment waarop de stimulus (bijvoorbeeld een toon of een woord) is gepresenteerd. Zo is bijvoorbeeld de P300 een ERP-component met een positieve polariteit waarvan de maximale amplitude optreedt zo'n 300 milliseconden na het verschijnen van de stimulus.

Een derde onderscheidend kenmerk van een ERP-component is zijn topografische verdeling over de schedel. Doorgaans wordt het EEG over meerdere elektrodes afgeleid, die verspreid op de hoofdhuid zijn aangebracht. Vaak is het zo dat een bepaalde ERP-component per elektrode in sterkte verschilt. De P300 bijvoorbeeld vertoont op de posterieure elektrodes een grotere amplitude dan op de frontale afleidingen. De topografische verdeling wordt mede bepaald door de plaats in het brein waar de potentiaalverandering plaatsvindt.

Tenslotte varieert een bepaalde component in amplitude. Deze amplitudemodulatie kan samenhangen met fysieke stimulusparameters (bijvoorbeeld de luidheid van een toon), maar ook met bepaalde cognitieve variabelen (zoals de sterkte van de betekenisverwantschap van woorden, waarover verderop meer). Voor het ERP-onderzoek naar taal zijn tot nu toe vooral de door cognitieve variabelen opgeroepen amplitudeschommelingen van belang gebleken.

ERP's en taal

In 1980 bleek voor het eerst dat het registreren van hersenpotentialen van belang was voor het onderzoek

naar taal en hersenen. In dat jaar rapporteerden onderzoekers van de Universiteit van Californië in San Diego de opmerkelijke uitkomsten van een experiment waarin zij deelnemers zinnen hadden laten lezen. In sommige van deze zinnen paste het laatste woord wel in de context, in andere zinnen niet. Bijvoorbeeld:

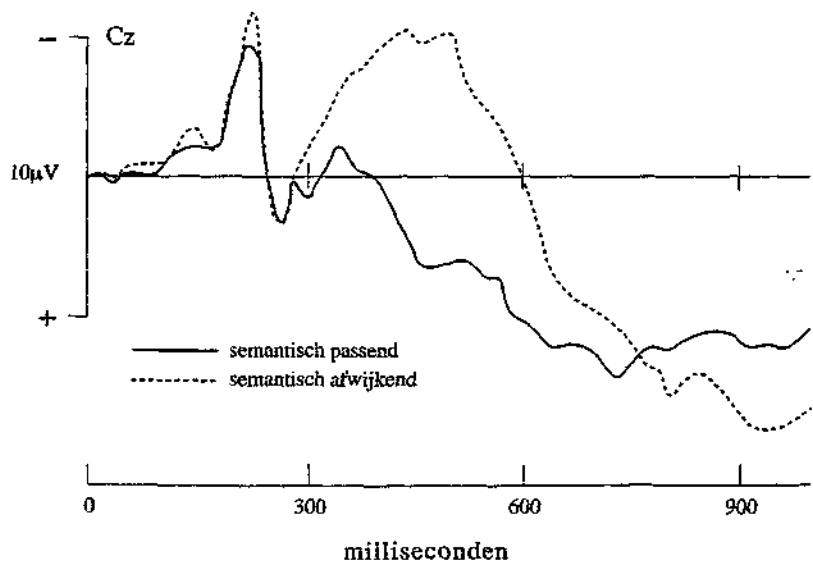
blijkt onder andere uit het volgende onderzoek van Colin Brown en mijzelf. Wij vroegen deelnemers aan ons experiment zinnen te lezen die slechts minimaal van elkaar verschilden en semantisch geheel in orde waren. Een voorbeeld van de zinsparen die we vergeleken is: 'Het meisje stopte het snoepje in haar

➤ Het registreren van hersenpotentialen is van belang voor het onderzoek naar taal en hersenen

'De man eet een broodje met boter en jam,' versus 'De man eet een broodje met boter en sokken.' De ERP die werd opgeroepen door sokken vertoonde een negatieve piek met een maximale amplitude rond de 400 milliseconden nadat dit woord op het beeldscherm verscheen. Om die reden wordt dit de N400-component genoemd (zie figuur 2). De amplitude van deze component is met name gevoelig voor het integreren van de betekenis van een woord in de betekenisrepresentatie die is opgebouwd op basis van de voorafgaande woorden. Dit

Figuur 2

Het gemiddelde ERP-golfpatroon voor het laatste woord in de zin. De doorgetrokken lijn is het ERP-patroon voor het semantisch passende laatste woord; de onderbroken lijn dat voor het semantisch niet-passende woord. In het laatste geval is een duidelijke toename zichtbaar van een negatieve piek die zijn maximale waarde bereikt om en nabij de 400 milliseconden na presentatie van het semantisch afwijkende laatste woord (ontleend aan Kutas en Van Petten, 1988).

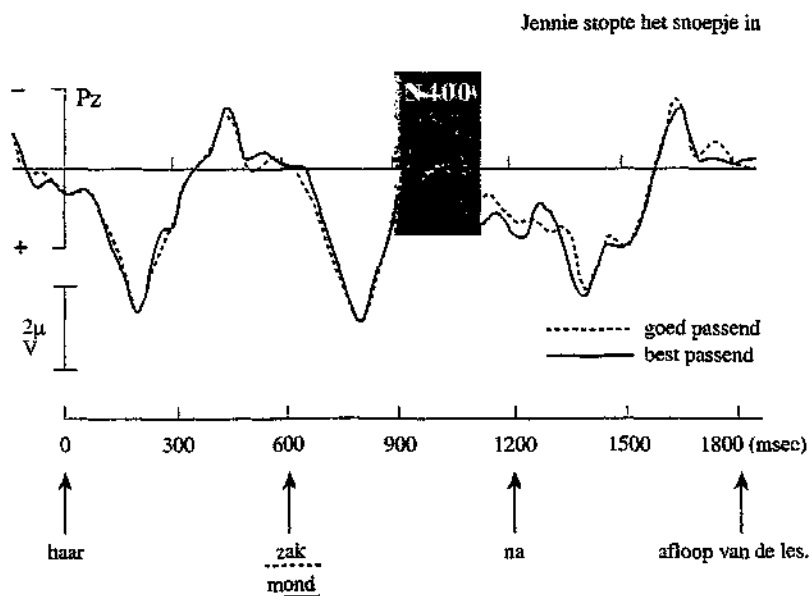


mond na afloop van de les' versus 'Het meisje stopte het snoepje in haar zak na afloop van de les.' Het belangrijkste verschil tussen deze zinnen is dat de meeste mensen na het lezen van 'Het meisje stopte het snoepje in haar' verwachten dat de zin vervolgt met het woord 'mond'. De verwachting voor het woord 'zak' is duidelijk kleiner dan die voor 'mond'. De betekenisrepresentatie van dit eerste gedeelte van de zin sluit 'zak' en andere continueringen geenszins uit, maar sommige woorden voegen zich gemakkelijker in de betekenisrepresentatie van de zinscontext dan andere. En zoals zichtbaar is in figuur 3, resulteert dit in een amplitudeverschil voor de N400. Hoe makkelijker een woord inpasbaar is in de voorafgaande context, hoe kleiner de amplitude van de N400. Vandaar dat de N400 gezien wordt als een gevoelige maat

voor het proces van betekenisintegratie. Wie leest of luistert naar taal, probeert automatisch de betekenissen van de afzonderlijke woorden met elkaar samen te smeden tot een zinvol geheel. Als taalgebruikers zullen we taaluitingen namelijk nooit goed kunnen begrijpen als we alleen de betekenissen van de daarin voorkomende woorden uit het geheugen hebben opgehaald. Die uit het geheugen opgehaalde betekenissen moeten ook nog met elkaar worden geïntegreerd.

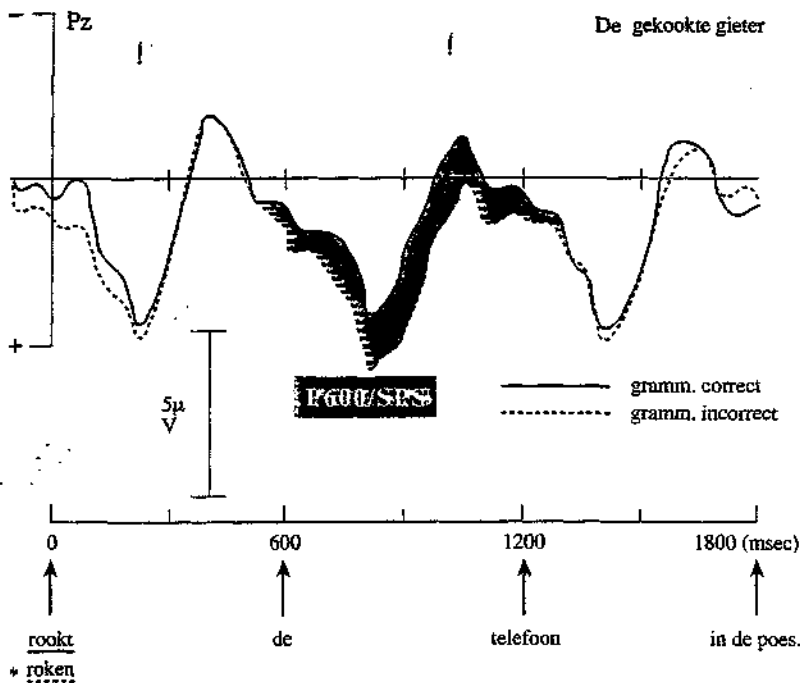
Naast de semantiek zijn er andere kennisbronnen die een rol spelen bij het begrijpen van taal. Een centraal onderscheid in de taalkunde is dat tussen de semantiek en de syntaxis, tussen de betekenis- en de grammaticale (structurele) aspecten van taal. Onder het laatste valt de kennis die wij gebruiken om grammaticaal welgevoerde zinnen te

maken en om de zinnen die wij horen en lezen te ontleden. Daarbij gaat het niet om zaken die we op school geleerd hebben. Ook degenen die op school een onvoldoende hadden voor zinsontleding, weten in de praktijk van het praten precies op welke momenten een zelfstandig naamwoord en een werkwoord geproduceerd moeten worden. Om die reden zal iemand bijvoorbeeld zeggen 'De koe loeit', maar niet 'De loeit koe'. Ons brein beschikt over allerlei impliciete en onbewuste kennis waartoe ons bewustzijn niet of maar in zeer beperkte mate toegang heeft. Dit geldt zeker voor de grammaticale kennis die wij aanwenden om goede zinnen te formuleren of taaluitingen te ontleden. Tijdens dit ontledingsproces krijgen de woorden in de zinnen die we lezen of horen hun grammaticale rollen toebedeeld (onderwerp, lijdend



Figuur 3

Modulatie van de N400-amplitude ten gevolge van het verschil in het gemak waarmee de betekenis van een woord in de voorafgaande zinscontext kan worden geïntegreerd. Het erg-golfpatroon is geregistreerd over de achterzijde van het hoofd, voor het semantisch best passend woord (doorgetrokken lijn) en het iets minder goed passende woord (gestippelde lijn). Zinnen werden woord voor woord gepresenteerd op een computerscherm. Elke 600 milliseconden verscheen een volgend woord op het scherm. De presentatie van het relevante woord is in de figuur weergegeven na 600 milliseconden op de tijdsas (ontleend aan Hagoort en Brown, 1994).



Figuur 4

Het syntactische ERP-effect (de P600/SFS) ten gevolge van een grammaticale schending. Het weergegeven ERP-patroon is geregistreerd op dezelfde plaats als dat in figuur 3. Er werden onzinnigen gepresenteerd die soms grammaticaal correct waren, maar in andere gevallen een grammaticale schending bevatten. In dit geval betrof de grammaticale schending een verschil in getal tussen het onderwerp van de zin ('gieter'; enkelvoud) en het werkwoord ('roket'; meervoud). Ongeveer 500 milliseconden na de schending is een positieve uitslag in het ERP-golfpatroon zichtbaar (ontleend aan Hagoort en Brown, 1994).

voorwerp, enzovoort). Deze roltoebedeling is belangrijk bij het interpreteren van een uiting, bijvoorbeeld om uit te maken wie een bepaalde handeling verricht en wie de handeling ondergaat.

Ook dit proces valt zichtbaar te maken in het elektrische signaal van ons brein. Een manier om dat te

volgende variant van dit brokje onzin: 'De gelaarsde gitaar kookten tijdens de ijzeren verjaardag.' Deze zin is fout omdat bij een onderwerp in het enkelvoud een werkwoord in het meervoud staat. Dit klopt niet alleen niet volgens de grammaticaboekjes, maar ook ons brein registreert feilloos dat hier iets aan de

halve seconde aanhoudt. Dit ERP-effect is voor het eerst en onafhankelijk van elkaar gevonden door Lee Osterhout en Phil Holcomb (1992) en door mijn onderzoeksgroep op het Max Planck Instituut voor Psycholinguïstiek in Nijmegen (Hagoort, Brown, en Groothusen, 1993; Hagoort en Brown, 1994). Osterhout noemde dit effect de P600, omdat het een positieve polariteit heeft en een maximum bereikt om en nabij de 600 milliseconden. In onze publicaties wordt naar hetzelfde effect verwezen onder de naam SFS (Syntactic Positive Shift). Thans ziet men in de literatuur dit effect ook wel aangeduid als P600/SFS.

Het meest interessante aspect van de P600/SFS is dat deze ERP-component kwalitatief geheel anders is dan de N400. De N400 is een ERP-component met een negatieve polariteit, terwijl de P600/SFS een positieve polariteit heeft. Uit dit kwalitatieve

➤ *Het proces van het ontleden van taaluitingen kan zichtbaar worden gemaakt in het elektrische signaal van ons brein*

doen is mensen zinnen te laten lezen die qua betekenis geen hout snijden, zoals: 'De gelaarsde gitaar kookte tijdens de ijzeren verjaardag.' Ondanks de moeite die we hebben om deze zin te begrijpen, kan iedereen vaststellen dat er grammaticaal gesproken geen vuiltje aan de lucht is. Dit in tegenstelling tot de

hand is. Figuur 4 laat de ERP-signalen zien voor het correct vervoegde werkwoord ('kookte') en het incorrect vervoegde werkwoord ('kookten'). Zoals in de figuur zichtbaar is levert de grammaticale schending een grote positieve uitslag op die ongeveer een halve seconde na de schending opkomt en ongeveer een

verschil valt op te maken dat de beide ERP-componenten door verschillende stukjes hersenweefsel worden opgewekt. Met andere woorden, wij hebben hier te maken met een onderscheid op electrofysiologisch niveau tussen semantiek en syntaxis. Deze verschillende soorten taalkennis blijken te corresponderen met verschillende 'ERP-signalen'. Dit laat zien dat onze hersenen gedeeltelijk gescheiden verwerkingscircuits hebben voor het analyseren van de structuur en de betekenis van taaluitingen.

Bovendien blijkt uit het tijdsverloop van deze ERP-effecten dat de semantische en syntactische analyseprocessen zich voltrekken binnen ongeveer een halve seconde. Dit illustreert de snelheid waarmee wij in staat zijn uit het gesproken of geschreven signaal de boodschap af te leiden. Uit onderzoek bij afasiepatiënten (zie ook het artikel van Bastiaanse en Prins) blijkt dat deze patiënten N400-effecten vertonen die later optreden dan bij taalgebruikers zonder taalprobleem. Het is zeer waarschijnlijk dat taalstoornissen voor een deel samenhangen met het onvermogen semantische en syntactische analyseprocessen met de vereiste snelheid te laten verlopen.

Dit verwijst naar een centraal aspect van de neurale architectuur van taal. De bedrieglijke schoonheid van de PET- en fMRI-beelden die laten zien welke gebieden van onze hersenen betrokken zijn bij een bepaalde cognitieve functie (zie de bijdrage van Indefrey), suggereren dat wij de neurale architectuur in kaart gebracht hebben als bekend is wat de betrokken hersengebieden zijn. Niets is echter minder waar. Het is van minstens even groot belang te weten op welke momenten zich be-

paalde processen afspelen, en wanneer precies de verschillende hersengebieden ingeschakeld worden in de keten van activaties die zich in onze hersenen afspelen wanneer wij spreken, luisteren of lezen. Kortom, de tijdsdimensie mag niet uit het oog worden verloren. Elektrofysiologische metingen leveren precies dit soort tijdsinformatie op. In combinatie met PET- en fMRI-metingen

talige ERP-effecten het meest is aangedaan. Daardoor kan worden vastgesteld of de stoornis zich met name afspeelt op het niveau van de klankanalyse, de analyse van betekenis of de syntactische analyse. Een tweede praktische toepassing betreft de evaluatie van therapeutische interventie. In de praktijk blijkt het niet eenvoudig om het succes van verschillende afasie therapieën of therapeu-

➤ *Taalstoornissen hangen voor een deel samen met het onvermogen semantische en syntactische analyseprocessen met de vereiste snelheid te laten verlopen*

moeten zij uiteindelijk het spatio-temporele profiel van taalfuncties leveren dat ons in staat stelt de neurale architectuur van het menselijk taalvermogen te kenschetsen.

Het praktisch belang van talige ERP-effecten

Tot op heden is het ERP-onderzoek naar taal voornamelijk gericht geweest op het verdiepen en verbreden van onze kennis over het menselijk taalvermogen en de wijze waarop dit vermogen in de hersenen verankerd is. De vraag is of de besproken talige ERP-effecten ook voor praktische doeleinden kunnen worden aangewend. Ik zie hier mogelijkheden op minstens twee terreinen. Allereerst kunnen deze ERP-effecten worden ingezet bij het diagnosticeren van taalstoornissen. Voorbeelden van deze stoornissen zijn dyslexie en afasie. Elders in dit themanummer wordt uitvoeriger op deze stoornissen ingegaan. Het voorkomen van kwalitatief verschillende ERP-effecten voor afzonderlijke deelprocessen in ons taalsysteem opent de mogelijkheid om bij mensen met een taalstoornis na te gaan welk van de

tische interventies bij dyslectische lees- en spellingsproblemen op een objectieve manier vast te stellen. Ook hieraan kunnen talige ERP-effecten een bijdrage leveren. Door voor, tijdens en na de therapeutische behandeling (bijvoorbeeld logopedie) de verschillende talige ERP-effecten te meten en hun verloop in relatie tot de therapie te analyseren, is het wellicht mogelijk een meer objectieve index van therapie succes te ontwikkelen dan op dit moment beschikbaar is.

Deze praktische toepassingen zijn mede gebaseerd op een zeer aantrekkelijk aspect van het registreren van ERP's. In tegenstelling tot alle onderzoek dat gebruik maakt van gedragsmaten (reactietijden, semantische of grammaticale oordelen van de patiënt of proefpersoon), kunnen ERP's worden geregistreerd zonder toegevoegde taak. Dat wil zeggen, we laten de deelnemers luisteren naar talige stimuli (of laten deze lezen), en registreren de bijbehorende ERP's. Dit is precies het proces dat we willen meten, namelijk lezen van of luisteren naar taal. Met gedragsmaten worden taalprocessen geme-

ten via de omweg van een toegevoegde taak. Die taken zijn op zichzelf vaak lastig voor patiënten met een taalstoornis, zonder dat de moeilijkheid van de taak noodzakelijk gekoppeld is aan het taalprobleem. Deze omweg kan vermeden worden met behulp van elektrofysiologische registraties, hetgeen met name behulpzaam kan zijn bij diagnose en het objectiveren van therapiesucces bij taalstoornissen.

Literatuur

- Hagoort, P. en Brown, C.M. (1994). Brain responses to lexical ambiguity resolution and parsing. In: C. Clifton Jr. C., Frazier, L. en Rayner K. (red.), *Perspectives on sentence processing*, pp. 45-80. Erlbaum, NJ.
- Hagoort, P., Brown, C.M. en Groothuisen, J. (1993). The syntactic positive shift (SPS) as an ERP measure of syntactic processing. *Language and Cognitive Processes*, 8, 439-483.
- Hillyard, S.A. en Kutas, M. (1983). Electrophysiology of cognitive processing. *Annual Review of Psychology*, 34, 33-61.
- Kutas, M. en Van Petten, C. (1988). Event-related brain potential studies of language. In: Ackles, P.K., Jennings, J.R. en Coles, M.G.H. (red), *Advances in Psychophysiology*, dl. 3. JAI Press, Connecticut.
- Osterhout, L. en Holcomb, P.J. (1992). Event-related brain potentials elicited by syntactic anomaly. *Journal of Memory and Language*, 31, 785-806.