

Hersenspotentialen als maat voor het menselijk taalvermogen

P. Hagoort en C.M. Brown

Max Planck Instituut voor Psycholinguïstiek, Nijmegen

Dit artikel geeft aan op welke wijze de registratie van hersenspotentialen kan bijdragen aan onderzoek naar het menselijk vermogen tot begrijpen van taal en de stoornissen die daarin kunnen optreden. Beschreven wordt wat de voor taalonderzoek relevante kenmerken van hersenspotentialen zijn. Vervolgens wordt aandacht besteed aan de voor taalonderzoek meest relevante hersenspotentiaal (de N400). Als illustratie wordt tenslotte ons eigen hersenspotentiaalonderzoek naar taalbegripsstoornissen bij afasie en het onderzoek naar aspecten van syntactische verwerking beschreven.

Inleiding

Informatieoverdracht in het centrale zenuwstelsel vindt onder andere plaats door middel van elektrische activiteit van de zenuwvezels en de 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 electrodes. Het resulterende EEG (Electro-Encephalo-Gram) heeft sindsdien een belangrijke rol gespeeld in de klinische diagnostiek bij patiënten waarvan vermoed werd dat zij leden aan een hersenziekte.

Het klinische EEG geeft een globaal beeld van de elektrische activiteit van de hersenen onder bepaalde algemene condities van het organisme, zoals slapen of waken. Het is echter ook mogelijk gebleken het EEG te registreren in afhankelijkheid van specifieke sensorische en cognitieve processen. Indien men het EEG registreert terwijl door de proefpersoon of patiënt naar een bepaalde stimulus (bijvoorbeeld een toon of een geometrisch figuur) geluisterd of gekeken wordt en dit EEG vervolgens wordt gemiddeld over een aantal aanbiedingen van de

stimulus, zien we een identificeerbaar patroon van negatieve en positieve pieken in het EEG-signaal ontstaan. Deze pieken zijn de zogenaamde ERP-componenten, waarbij ERP staat voor Event-Related Potentials. Deze ERPs geven onder andere informatie over de aard van bepaalde cognitieve processen, zoals het voorbereiden van een beweging, het registreren van een onverwachte gebeurtenis, etc.

Sinds de ontdekking van een taalgevoelige ERP-component ruim een decennium geleden, heeft de ERP-methode ook voor taalpsychologisch onderzoek aan belang gewonnen. In Nederland is het project "Neurocognition of Language Processing" op het Max Planck Instituut voor Psycholinguïstiek het eerste onderzoekprogramma waarin het registreren van ERPs wordt gebruikt om ons inzicht te vergroten in het intacte taalverwerkingssysteem en de daarin optredende stoornissen bij afasie.

Aangezien we bij ERPs met het registreren van hersenactiviteit te maken hebben, kunnen in samenhang met taalverwerking geregistreerde ERPs in principe gebruikt worden om meer informatie te verkrijgen over de bij verschillende aspecten van taalverwerking betrokken hersenstructuren. Het samenstel van hersenstructuren en neurofysiologische processen dat verantwoordelijk is voor ons vermogen tot produceren en begrijpen van taal, vatten wij hier samen met het begrip *neurale architectuur* van het menselijk taalsysteem. Modellen van taalverwerking zoals die in de taalpsychologie zijn ontwikkeld houden echter weinig of geen rekening met de manier waarop deze in het centrale zenuwstelsel liggen verankerd. Wat modellen van de spreker en luisteraar wel doen is het uiteenraffelen van complexe cognitieve vaardigheden als spreken en verstaan in termen van de samenstellende delen. Deze betreffen de voor taalverwerking vereiste declaratieve kennisstructuren, zoals kennis over de woordvormen, woordbetekenissen etc. Daarnaast dienen modellen van spreken en verstaan te verantwoorden hoe informatie over woordvormen en woordbetekenissen, informatie over de grammaticale eigenschappen van de moedertaal etc. razendsnel uit het geheugen worden opgehaald en met elkaar in verband gebracht. Het snel en efficiënt aanspreken van de relevante kennisrepresentaties is een noodzakelijke voorwaarde om een gedachte te kunnen omzetten in een welgevormde uiting (spreken), of om de boodschap te kunnen distilleren uit het van de spreker afkomstige spraaksignaal (verstaan). Het samenstel van voor taalverwerking vereiste kennisbestanden en verwerkingscomponenten noemen wij de *cognitieve architectuur* van het menselijk taalvermogen.

Figuur 1 is een voorbeeld van de cognitieve architectuur van taalverstaan. Taalverstaan vereist dat we op basis van het spraaksignaal de juiste woorden uit het lexicon ophalen. Het variabele spraaksignaal moet daartoe met behulp van onze impliciete kennis over akoestisch-fonetische eigenschappen van het Nederlands gebruikt worden om de in het mentale lexicon opgeslagen klankvorm van het te herkennen woord te activeren. Op basis van de activatie van de klankvorm worden de daarmee geassocieerde syntactische eigenschappen (zoals woordklasse) en de semantische specificaties van het herkende woord geactiveerd. Deze

DE COGNITIEVE ARCHITECTUUR VAN TAALVERSTAAN

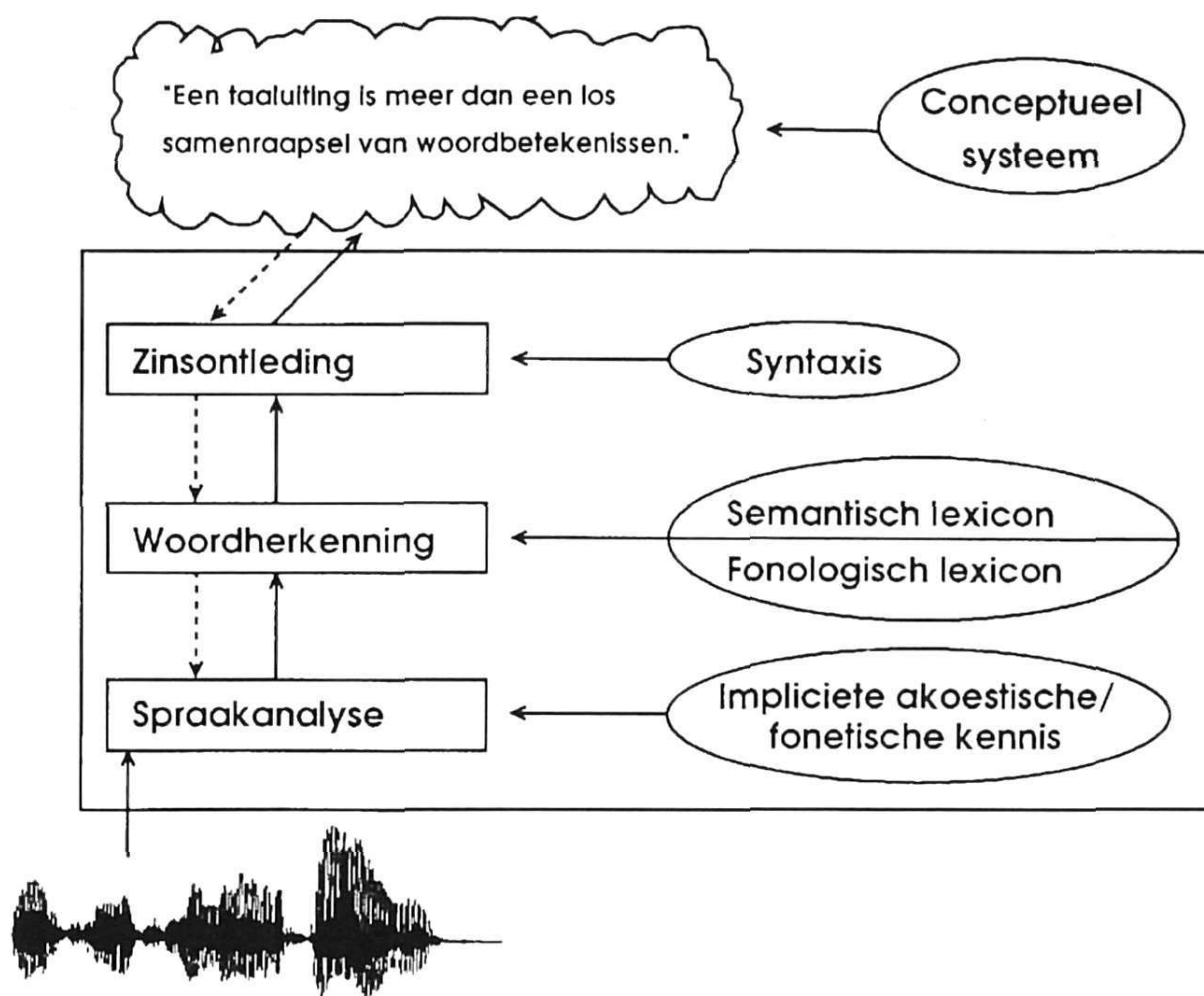


Fig. 1. De cognitieve architectuur van taalverstaan.

informatie moet vervolgens worden ingevoegd in de op basis van voorafgaande woorden opgebouwde zinsrepresentatie. Bij dit invoegen speelt o.a. kennis van de grammatica een belangrijke rol. Woorden krijgen in zinsverband een grammaticale rol toebedeeld die op de relevante thematische rollen (agens, thema, instrument) wordt geprojecteerd. Op deze wijze achterhaalt de luisteraar wie wat doet en waarmee. De uitkomst van dit proces is de interpretatie van de geproduceerde uiting.

Vergelijkbare modellen kunnen worden gespecificeerd voor de cognitieve architectuur van spreken, lezen en schrijven. Het probleem waarvoor de taalpsycholoog zich gesteld ziet is te achterhalen uit welke kennisbestanden en verwerkingscomponenten het menselijk taalvermogen is opgebouwd, alsmede hoe razendsnelle processen als spreken en verstaan temporeel georganiseerd zijn. Naast informatie over de neurale architectuur van het menselijk taalvermogen, kan de ERP-methode ook worden aangewend om ons inzicht in de cognitieve architectuur van de verschillende taalfuncties te vergroten. In dat geval is van minder belang dat we hier met een maat van hersenactiviteit te maken hebben. Wat telt is

hoe het ERP-signaal zich zodanig functioneel laat interpreteren dat uitspraken over de cognitieve architectuur mogelijk zijn.

In het navolgende zullen we uitsluitend aandacht besteden aan het gebruik van ERPs als zoeklicht op de cognitieve architectuur van met name taalverstaan. Allereerst zullen we de belangrijkste kenmerken van ERPs bespreken. Daarnaast zullen we aangeven wat ERPs zo aantrekkelijk maakt voor psycho- en neurolinguïstisch onderzoek. Vervolgens gaan we kort in op de ERP-component die aanleiding is geweest tot een snel groeiende belangstelling bij taalonderzoekers voor de ERP-methode. Daarna volgen bij wijze van illustratie twee voorbeelden van ERP-onderzoek uit ons eigen laboratorium. Het eerste voorbeeld betreft afatische taalstoornissen. Het tweede voorbeeld illustreert het gebruik van ERPs in het onderzoek naar het toekennen van een grammaticale structuur aan zinnen. We besluiten met enkele algemene opmerkingen over mogelijkheden en beperkingen van de ERP-methode.

De basiskenmerken van ERPs

Zoals hierboven reeds in het kort geschetst is, worden ERPs opgewekt door stimulatie van een of meerdere zintuigsystemen en de daarop volgende verwerking van de geregistreerde prikkel. De manier waarop ERPs kunnen worden opgewekt is als volgt. Aan de proefpersoon worden meerdere malen een bepaald type stimulus (bijvoorbeeld een toon van een bepaalde frequentie of een woord van een bepaalde klasse) aangeboden. Tegelijkertijd wordt bij de proefpersoon het EEG geregistreerd. Meestal gebeurt dit over meerdere afleidingen, d.w.z. meerdere electrodes zijn in een bepaalde ruimtelijke configuratie op de hoofdhuid bevestigd. Nadat het EEG geregistreerd is voor een bepaald aantal exemplaren van het aangeboden stimulustype, volgt een middelling van de afzonderlijke stukjes EEG die door deze exemplaren zijn opgewekt. Figuur 2 laat het door een auditieve stimulus opgewekte golfpatroon zien. Gemarkeerd is het moment waarop de stimulus wordt aangeboden. In het daarop volgend golfpatroon zijn verschillende ERP-componenten te identificeren. Deze identificatie 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 potentiaalverandering van een actieve electrode ten opzichte van een inactieve referentie-electrode. De actieve electrode registreert elektrische hersenactiviteit. De inactieve referentie-electrode is zo geplaatst dat daarmee geen hersenactiviteit kan worden opgepikt (bijvoorbeeld op de oorlel). De stimulatie van een zintuigstelsel leidt tot een potentiaalverandering in het elektrische veld tussen de actieve electrode en de referentie-electrode. De potentiaalverandering kan negatief of positief zijn, resulterend in een ERP-component met een negatieve of een 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

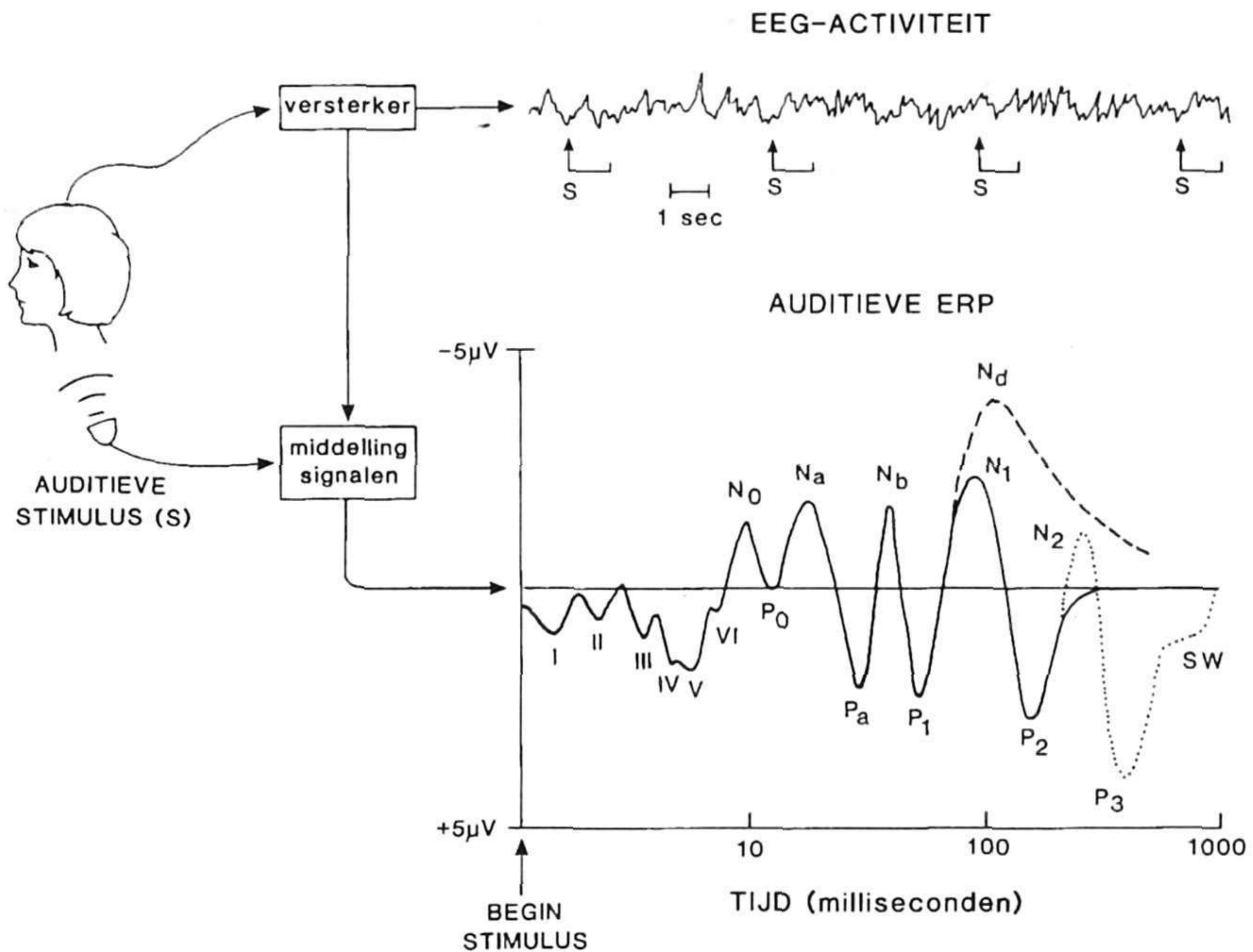


Fig. 2. (ontleend aan Hillyard & Kutas, 1983): Geïdealiseerd golfpatroon van de reeks ERP-componenten die zichtbaar worden wanneer het EEG gemiddeld wordt over de herhaalde aanbiedingen van een korte auditieve stimulus. De ERP is doorgaans te klein om in het EEG (boven) te worden opgepikt, waardoor middelling per computer over meerdere stimuluspresentaties vereist is om een adequate signaalruis verhouding te bereiken. Op de logaritmische tijdsas zijn achtereenvolgens zichtbaar de vroege hersenstampotentialen (Golven I-VI), de zogenaamde middenlatentie componenten (N_0 , P_0 , N_a , P_a , N_b), de exogene componenten (P_1 , N_1 , P_2), en de endogene, cognitieve ERP-componenten (N_d , N_2 , P_{300}). De componenten met een negatieve polariteit zijn omhoog geplote, de componenten met een positieve polariteit hebben een naar beneden gerichte piek.

van een omlaag gaande piek. De benoeming 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 *pieklatentie* ten opzichte van het moment waarop de stimulus gepresenteerd is. Zo is bijvoorbeeld de P_{300} een ERP-component met een positieve polariteit waarvan de maximale amplitude optreedt zo'n 300 milliseconden na het optreden van een stimulus.

Een derde onderscheidend kenmerk van een ERP-component is zijn *topografische verdeling* over de schedel. Indien het EEG over meerdere afleidingen geregistreerd is, kan een bepaalde component een verschillende amplitude hebben op verschillende afleidingen. De P_{300} bijvoorbeeld vertoont op de posteri-

eure afleidingen een grotere amplitude dan op de frontale afleidingen. De oorzaak van deze amplitudevariatie is een samenspel van de wijze waarop de voor een ERP-component verantwoordelijke neuronen georiënteerd zijn ten opzichte van de registratieplaats op de schedel en van hun afstand tot deze registratieplaats. De voor een bepaalde component verantwoordelijke populatie van neuronen wordt de neurale generator genoemd. De wijze waarop de ERP-component zich spatiaal aan de oppervlakte van de schedel manifesteert wordt dus bepaald door de kenmerken van de neurale generator(en). Voor een functioneel gebruik van ERPs is de topografische informatie met name van belang om een bepaalde component eenduidig te identificeren en te onderscheiden van andere componenten met dezelfde polariteit en een maximale amplitude in hetzelfde latentiebereik.

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 semantische verwantschap tussen woorden; zie verderop). Voor cognitief-psychologisch ERP-onderzoek zijn tot nu toe vooral de door cognitieve variabelen opgeroepen amplitudeschommelingen van belang gebleken.

In Figuur 2 zijn ERP-componenten met een positieve en negatieve polariteit op verschillende plaatsen op de tijdsas zichtbaar. De vroegste componenten worden reeds op het niveau van de hersenstam gegenereerd. Voor onze doeleinden zijn echter met name de corticaal gegenereerde componenten van belang. Deze laten zich onderscheiden in exogene en endogene componenten. De exogene componenten zijn hoofdzakelijk (maar zeker niet geheel) afhankelijk van de fysieke kenmerken van de stimulus. Zo wekt iedere stimulus een N100 op (ook wel N1 genoemd) die in amplitude varieert als functie van fysische parameters zoals de intensiteit van de stimulus. De N100 is een ERP-component met een negatieve piek zo rond de 100 milliseconden na aanbidding van de stimulus. Daarnaast zijn er de endogene ERP-componenten die **niet** zozeer samenhangen met de fysische kenmerken van de stimulatie, maar veeleer een uitdrukking zijn van cognitieve verwerkingsprocessen.

Het standaardvoorbeeld van een endogene ERP-component is de P300, waaraan wij hieronder enige aandacht zullen besteden ter illustratie van de wijze waarop mentale activiteit zich electrofysiologisch kan manifesteren. Laten we **daartoe** het volgende zeer simpele experiment onder de loep nemen. Een proefpersoon krijgt via de koptelefoon een lange reeks tonen te horen. Sommige daarvan zijn hoge tonen, andere zijn lage tonen. Deze worden in een voor de proefpersonen onbekende en niet te voorspellen volgorde aangeboden. Tevens is er een onevenredige verdeling van de hoeveelheid hoge en lage tonen. De hoge tonen komen veel vaker voor dan de lage. De proefpersonen wordt gevraagd goed naar de tonen te luisteren en daarbij het aantal lage tonen te tellen. Vervolgens wordt tijdens het luisteren naar de tonen het EEG voor de hoge en lage tonen afzonderlijk geregistreerd en gemiddeld. Dit resulteert in twee gemiddelde EEG-sporen die in Figuur 3 zijn afgebeeld.

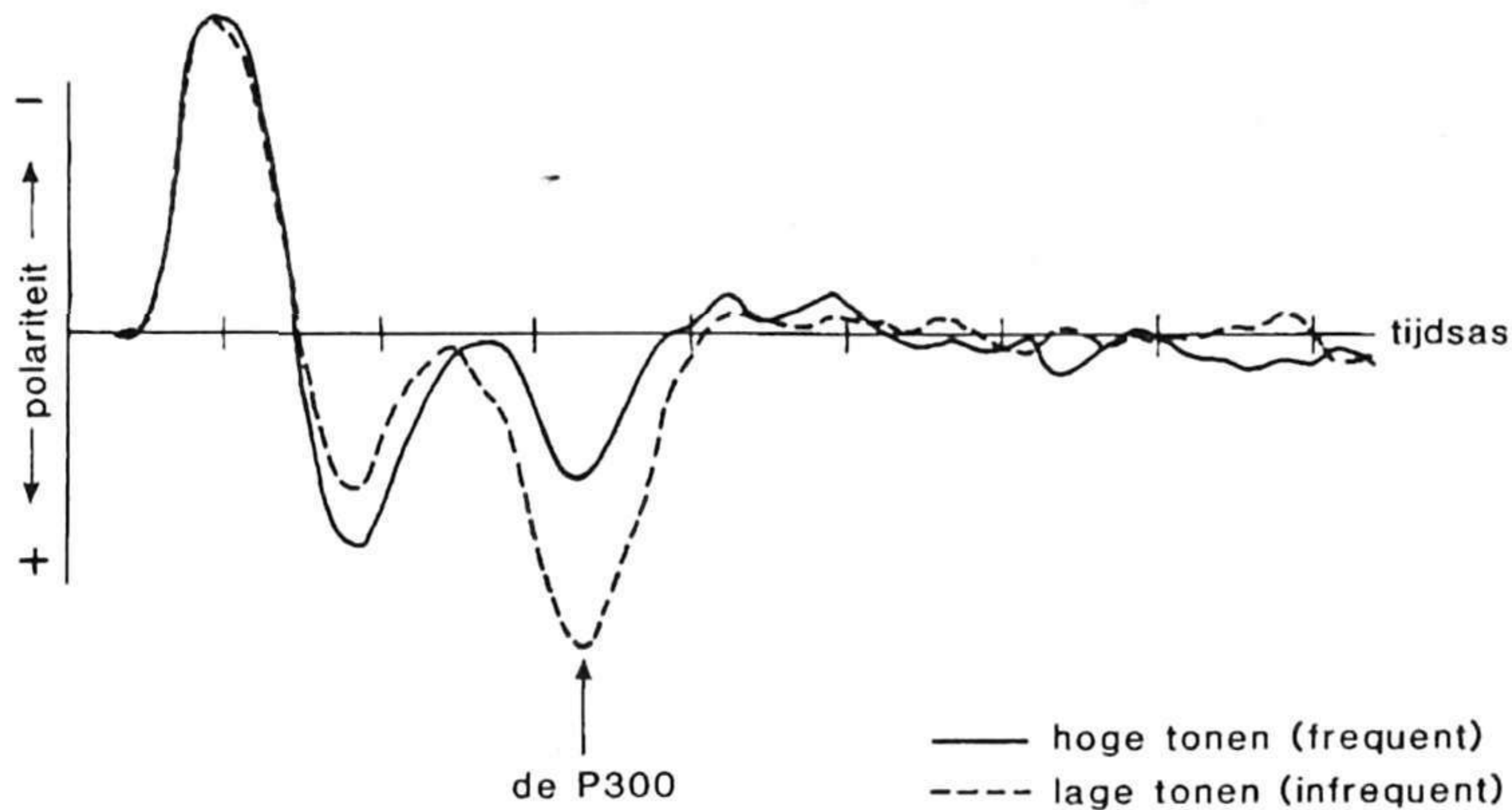


Fig. 3. Het EEG-spoor voor een ongelijke verdeling van hoge en lage tonen. De doorgetrokken lijn geeft het gemiddelde EEG weer voor de hoge tonen, de onderbroken lijn dat voor de lage tonen. De minder frequent voorkomende tonen resulteren in een P300 met een duidelijk grotere amplitude dan de frequent voorkomende tonen. De tijdsas is onderverdeeld in eenheden van 100 milliseconden. (uit het werk van de auteurs).

De doorgetrokken lijn stelt het gemiddelde EEG-spoor voor de hoge tonen voor, de onderbroken lijn dat voor de lage tonen. Met de pijl is de P300 aangegeven. Wat onmiddellijk opvalt is dat de amplitude van de P300 voor de lage tonen aanzienlijk groter is dan die voor de hoge tonen. Wat, zo kan men zich afvragen, is er nu zo bijzonder aan het ontstaan van deze bobbel in een zich voortslingerende lijn van hersenactiviteit die gepaard gaat met het luisteren naar infrequent voorkomende tonen? Het antwoord schuilt in de aard van de mentale activiteit die de P300 weerspiegelt. De P300 berust namelijk niet op een of ander triviaal verschil tussen de neurofysiologische verwerking van hoge en lage tonen, maar hangt samen met de relatieve waarschijnlijkheid waarmee de hoge en lage tonen optreden. Hoe geringer het aantal van één van beide typen tonen is dat in de reeks voorkomt, hoe groter de amplitude van de P300 voor deze klasse van tonen wordt. Met andere woorden, de proefpersoon vertoont op neurofysiologisch niveau een effect van de *informatiewaarde* die een bepaald type stimulus in de context van de hele reeks stimuli heeft. Deze informatiewaarde hangt niet zozeer samen met specifieke kenmerken van de stimulus als zodanig (bijv. dat de toon een frequentie van 1000 Hz heeft), maar is veeleer een uitdrukking van de wijze waarop deze door het cognitief systeem verwerkt wordt.

Voor onderzoek naar complexe cognitieve vaardigheden als spreken en verstaan zijn met name endogene ERP-componenten zoals de P300 relevant. Verderop besteden wij aandacht aan de N400, een andere endogene ERP-component die met name voor taalpsychologisch onderzoek van belang is gebleken. Maar alvorens aandacht te besteden aan deze taalgevoelige ERP-component, zal worden uiteengezet welke kwaliteiten ERPs tot zo'n aantrekkelijke maat voor onderzoek naar het menselijk taalvermogen maken.

De kracht van ERPs

Taalpsychologisch onderzoek naar taalverstaan kan op verschillende manieren verricht worden, afhankelijk van de vraag die men zich stelt. Indien men geïnteresseerd is in de aard van de representaties die een taalgebruiker berekent, kan men bijvoorbeeld gebruik maken van aan proefpersonen ontlokte oordelen over het aangeboden materiaal. Zo kan men proefpersonen vragen oordelen uit te spreken over de syntactische welgevormdheid van aangeboden zinnen. Deze oordelen kunnen inzicht geven in de impliciete syntactische kennis van de taalgebruiker die wordt ingezet bij spreken en verstaan. Wat met dit type taken echter niet achterhaald kan worden is hoe spreken en verstaan zich in de tijd voltrekken, dat wil zeggen hoe opgeslagen lexicale en syntactische kennis in minder dan een seconde geactiveerd en gecombineerd kan worden. Daartoe dient men onderzoeksparadigma's te gebruiken die gevoelig zijn voor de temporele kenmerken van taalverwerkingsprocessen. In taalpsychologisch onderzoek dat gevoelig is voor deze temporele kenmerken wordt proefpersonen meestal gevraagd zo snel mogelijk op een bepaald aspect van het aangeboden materiaal te reageren. Behalve de adequaatheid, wordt de reactiesnelheid geregistreerd. De resulterende reactietijden zijn van cruciaal belang voor de interpretatie van de resultaten in termen van wat zich *op een bepaald moment* in het proces van spreken en verstaan afspeelt. De reactietijdmethode is door de Utrechtse fysioloog Donders aan het eind van de vorige eeuw geïntroduceerd als een belangrijk instrument om de aard van mentale processen te bepalen en hun duur te meten. Ook vandaag de dag nog is deze methode in de taalpsychologie het belangrijkste instrument om te achterhalen welke bronnen van informatie een rol spelen tijdens taalverwerking en op welke momenten zij dat doen. Met name vanwege de mogelijkheid de temporele organisatie van spreken en verstaan te meten, wordt de reactietijdmethode als een "on-line" methode aangeduid. Dit als contrast met de zogenaamde "off-line" methoden (zoals het ontlokken van semantische en syntactische oordelen) die voor temporele aspecten ongevoelig zijn.

De ERP-methode staat evenals de reactietijdmethode een on-line registratie toe van het taalverwerkingsproces zoals zich dat afspeelt in de tijd. Bovendien heeft de ERP-methode een drietal kenmerken die haar gunstig doen afsteken bij de reactietijdmethode en die haar derhalve tot een krachtig en veelbelovend aanvullend onderzoeksinstrument maken voor taalpsychologisch onderzoek.

Het eerste belangrijke kenmerk is dat ERPs in tegenstelling tot reactietijden een *continue* on-line registratie mogelijk maken. Bij reactietijden bepaalt de onderzoeker vooraf voor welk aspect van het materiaal een reactietijd moet worden geregistreerd. Neem bijvoorbeeld de zogenaamde woordmonitortask. Daarin wordt van een proefpersoon gevraagd zo snel mogelijk op een knop te drukken als een van te voren gespecificeerd woord in de daarop volgende zin voorkomt. Variaties in de context voorafgaand aan het doelwoord kunnen leiden tot langere of kortere reactietijden in deze woordmonitortask. Zo zal een syntactische schending voorafgaand aan het doelwoord meestal leiden tot een langere reactietijd op het

doelwoord zelf. Wat daaruit kan worden afgeleid over het onderliggende proces doet in deze context niet ter zake. Wat wel ter zake doet is dat de onderzoeker niet meer dan een momentopname-krijgt van het zich voltrekkende verwerkingsproces. Behalve dat het daardoor niet mogelijk is het verwerkingsproces te volgen door de tijd heen, is het cruciaal dat de onderzoeker een gelukkige keuze maakt met betrekking tot het moment waarop het snapshot wordt genomen. Twee woorden na de syntactische schending zou het verwerkingseffect daarvan wellicht uitgewoed kunnen zijn. In dat geval wordt een aanwezig effect niet opgepikt omdat de experimentator het moment van zijn snapshot verkeerd gekozen heeft.

ERPs kan men daarentegen registreren gedurende de volledige periode waarover de visueel of auditief aangeboden zin gepresenteerd wordt. In het voorbeeld van de syntactische schending kan men in zo'n geval niet alleen de onmiddellijke consequentie van de schending op het volgende woord meten, maar ook mogelijke effecten die daarna optreden. De consequentie van de syntactische schending kan als het ware in de tijd gevolgd worden voor alle woorden die op de schending volgen. Dat dit belangrijke informatie kan verschaffen zal verderop duidelijk worden bij de bespreking van syntactische ERP-effecten.

Een tweede belangrijk kenmerk van ERPs is de *multidimensionaliteit* van het signaal. Terwijl reactietijden een eendimensionale maat zijn waarin latentiever verschillen de enige bron van informatie vormen, levert het ERP-sig naal tenminste drie, gedeeltelijk onafhankelijke bronnen van informatie. Deze zijn behalve de latentiever verschillen in het optreden van een ERP-component, de polariteit van het ERP-effect en de amplitude van het ERP-effect. Latentie, polariteit en amplitude kunnen alle drie afzonderlijk verschillen ten gevolge van de experimentele manipulaties van de experimentator. Een belangrijke consequentie van deze multidimensionaliteit is dat kwalitatief verschillende deelprocessen zich op kwalitatief onderscheiden wijze in het ERP-patroon kunnen manifesteren. Op basis van informatie over polariteit en de topografische verdeling van activiteit over de schedel, kan worden vastgesteld of het ERP-correlaat van een bepaald deelproces kwalitatief anders is dan dat van een ander deelproces. Het voordeel daarvan laat zich illustreren aan een centrale vraag in de psycholinguïstiek. Deze vraag is of het berekenen van een syntactische structuur voor een zin een apart en wellicht autonoom proces is dat zich niets aantrekt van lexicale en semantische informatie bij het opbouwen van een constituentenstructuur. Voor- en tegenstanders van een autonome positie baseren zich op onderzoek waarin leestijden gemeten worden. Op basis van verschillen in leestijden (een eendimensionale maat) worden conclusies getrokken over de aan- of afwezigheid van kwalitatief verschillende processen (zoals zinsontleding en semantische integratie). Het onderzoek naar deze kwesties zou er zeer bij gebaat zijn indien het ERP-correlaat voor zinsontleding kwalitatief anders blijkt te zijn dan het ERP-correlaat voor semantische integratie. In recent onderzoek hebben wij een ERP-correlaat van syntactische verwerking geobserveerd (zie verderop). Daarvan kan in vervolgonderzoek gebruik gemaakt worden om vast te stellen of, en zo ja door welk type informa-

tie, de eigenschappen van dit correlaat (te weten zijn amplitude en latentie) worden beïnvloed. Op deze wijze zou het empirisch testen van diverse zinsontledingtheorieën een stuk eenvoudiger kunnen worden.

Een derde belangrijk kenmerk van ERPs tenslotte is dat betrouwbare ERP-effecten verkregen kunnen worden zonder dat van de proefpersoon iets anders gevraagd wordt dan woorden of zinnen te lezen dan wel ernaar te luisteren. Dat zijn precies de processen waarin de taalpsychologie geïnteresseerd is, maar die zich zelden of nooit rechtstreeks laten betrappen. In het standaard taalpsychologisch onderzoek wordt de proefpersoon altijd gevraagd iets te doen met het aangeboden materiaal, d.w.z. een oordeel uit te spreken, zo snel mogelijk te beslissen of een reeks letters een Nederlands woord vormt of niet, etc. Dit zijn op zich vrij onnatuurlijke toevoegingen aan het normale proces van lezen of verstaan. Voor het testen van de doorsnee proefpersonen in taalpsychologische experimenten is dat meestal niet zo'n probleem. Dergelijke taakvereisten kunnen echter wel problematisch zijn voor onderzoek naar taalstoornissen, bijvoorbeeld bij afasiepatiënten. Daarbij treden vaak de volgende twee problemen van de taaksituatie aan het licht. Allereerst moet de patiënt de taak begrijpen. Patiënten met zeer ernstige taalbegripsstoornissen kunnen dat meestal niet. Om die reden ziet men dergelijke patiënten zelden of nooit vertegenwoordigd in de afasieliteratuur. Ten tweede moet de patiënt de taak uit kunnen voeren zonder dat dit zijn of haar (resterende) taalbegripsproces beïnvloedt. Taakinterferentie met het lees- of luisterproces moet vermeden worden. Het is vaak niet duidelijk of dat in het standaard afasie-onderzoek ook lukt. Beide problemen zijn te ondervangen door gebruikmaking van de ERP-methode. De patiënt krijgt een koptelefoon op en luistert naar de gepresenteerde woorden of zinnen, terwijl onderwijl het EEG geregistreerd wordt. Op deze wijze zijn reeds een aantal betrouwbare en relevante ERP-effecten verkregen in het binnen ons onderzoekprogramma uitgevoerde onderzoek naar taalbegripsstoornissen bij afasiepatiënten (zie verderop).

De drie bovengenoemde kenmerken van de ERP-methode maken deze in onze ogen tot een potentieel krachtig onderzoeksinstrument in de psycho- en neurolinguïstiek, in aanvulling op en naast de gangbare onderzoeksmethoden met een veel langere traditie in het onderzoek naar het menselijk taalvermogen. De reden dat de ERP-methode snel aan invloed wint in taalpsychologisch onderzoek hangt samen met de ontdekking van een bepaalde ERP-component die vooral gevoelig bleek voor aspecten van taalverwerking. Deze component is de zogenaamde N400.

De N400

Zelden kan in de cognitieve psychologie een specifiek experiment aangewezen kan worden dat de directe aanleiding vormt voor het ontstaan van een nieuw onderzoekprogramma. Het onderzoek naar hersenpotentialen en taalverwerking is echter zo'n zeldzaam geval. Het "historisch" moment was een publikatie uit

1980 in *Science* van de hand van Marta Kutas en Steven Hillyard, beiden verbonden aan de University of California, San Diego. Deze onderzoekers lieten proefpersonen zinnen lezen waarvan het laatste woord qua betekenis wel of niet in de zinscontext paste. Bijvoorbeeld: “De man eet een broodje met boter en *jam*”, versus “De man eet een broodje met boter en *sokken*”. In het ERP-patroon dat opgeroepen werd door *sokken* was een component zichtbaar met een negatieve polariteit en met een maximale amplitude ongeveer 400 milliseconden na presentatie van het laatste woord in de zin. Eenzelfde negatieve component werd ook voor *jam* geobserveerd, maar in dit geval was de amplitude aanmerkelijk gereduceerd in vergelijking met de negatieve component voor *sokken* (zie Figuur 4).

Kutas en Hillyard doopten de door hun waargenomen component “N400”. Zij suggereerden dat deze component een uitdrukking is van semantische analyseprocessen. Deze bevinding vormde het begin van een inmiddels zeer omvangrijk onderzoekprogramma rondom hersenpotentialen en taalbegripsprocessen. Wij zullen nu een aantal kernbevindingen van dit onderzoek kort bespreken.

Een eerste belangrijke kwestie betreft de uniciteit van de N400. Is de N400 specifiek gevoelig voor taal – en wel in het bijzonder voor betekenisaspecten van taal – of treedt de N400 ook op in andere modaliteiten? Deze vraag is op verschillende wijzen onderzocht. Wij geven hier bij wijze van illustratie slechts één voorbeeld. In dit voorbeeld staat de vraag centraal of muzikale schendingen een N400 oproepen? Dit werd onderzocht door Besson en Macar (1987). Zij vergele-

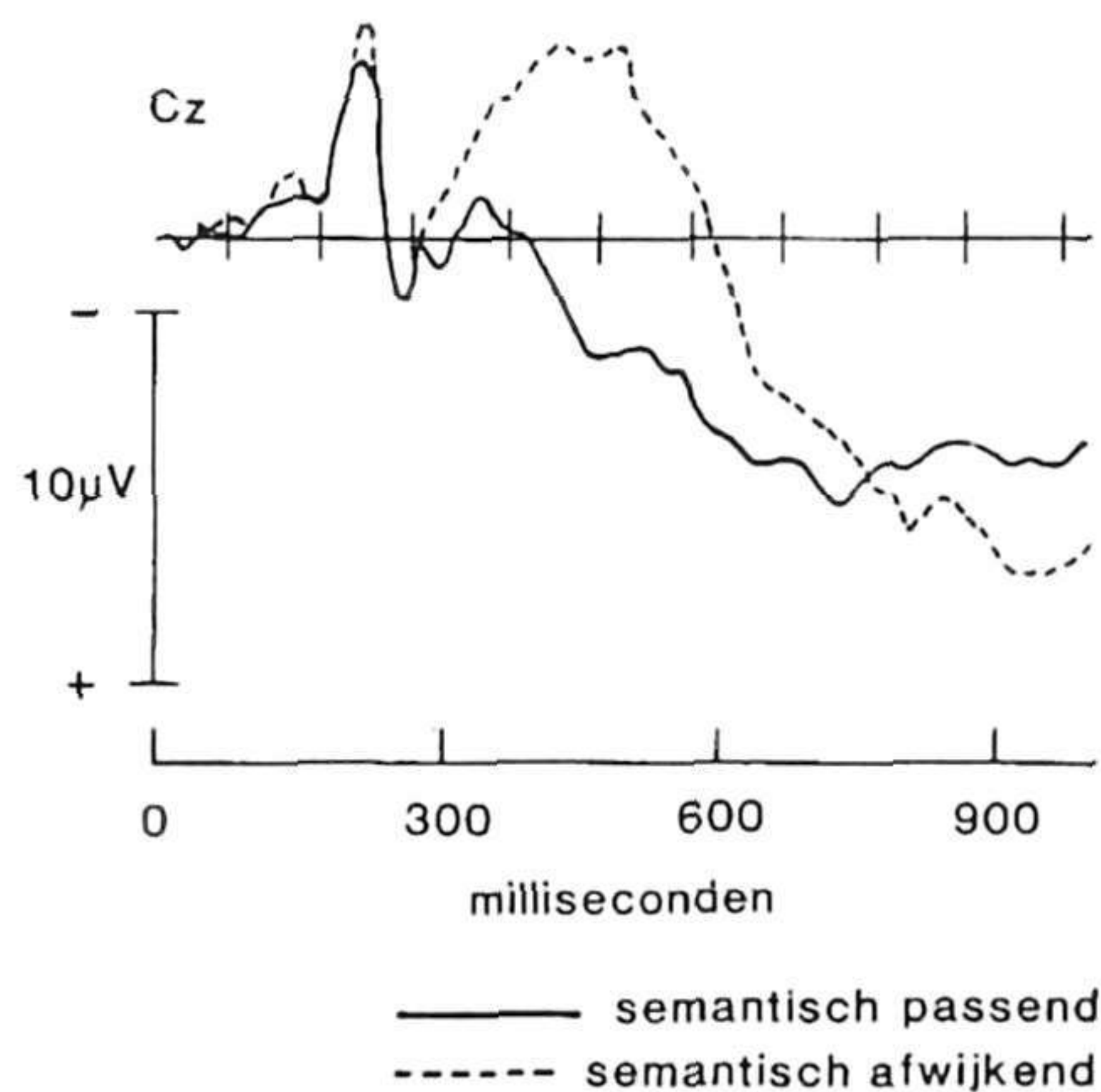


Fig. 4. (ontleend aan Kutas & Van Petten, 1988): Het gemiddelde ERP-golfpatroon voor het laatste woord in de zin. De doorgetrokken lijn is het ERP-patroon voor het semantisch passende laatste woord (i.c. “work”) in de zin “It was his first day at work”; de onderbroken lijn dat voor het semantisch niet-passende laatste woord (i.c. “socks”) in de zin “He spread the warm bread with socks”. 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 laatste woord. Deze component heet de N400.

ken ERPs die werden opgeroepen bij het lezen van zinnen met ERPs die zichtbaar werden bij het luisteren naar melodieën. In navolging van het "oer-experiment" van Kutas en Hillyard paste het laatste woord van een zin of de laatste toon van een melodie wel of niet in de voorafgaande context. Zo werden muzikale schendingen gerealiseerd door bekende volksliedjes zoals "Sur le pont d'Avignon" (het onderzoek werd in Frankrijk uitgevoerd) te laten eindigen in een toon die qua melodische contour en toonhoogte afwijkend was. Voor de aangeboden zinnen bevestigden de resultaten van dit onderzoek de eerdere bevindingen dat semantisch niet-passende woorden een grotere N400 oproepen dan wel in de zin passende woorden. Dit effect bleek echter niet op te treden voor de muzikale schendingen. De loutere aanwezigheid van een schending van wat een proefpersoon verwacht te zien of te horen is dus niet voldoende om een N400-effect op te wekken. Over de specificiteit van de N400 voor talige processen is het laatste woord nog niet gezegd. Het lijkt er echter wel op dat talige stimulatie zo al niet een voorwaarde dan toch minstens een van de beste manieren is om een N400 te observeren.

Hoewel de N400 wordt opgeroepen door talige informatie, betekent dit nog niet automatisch dat de N400 ook specifiek gevoelig is voor semantische informatie. Hoe zit het met andere bronnen van linguïstische informatie, zoals syntactische? Een eerste indicatie voor mogelijk verschillende ERP-effecten voor de verwerking van semantische en syntactische informatie werd verkregen in een studie van Kutas en Hillyard (1983). Zij vroegen proefpersonen zinnen te lezen die grammaticale fouten bevatten, zoals "Het kind *gooien* het speelgoed op de grond". In tegenstelling tot semantische schendingen, resulteerden deze grammaticale schendingen niet in N400-effecten. Waarin grammaticale schendingen wel resulteerden was minder duidelijk in de genoemde studie. Recent onderzoek (Hagoort, Brown, & Groothusen, 1993; Osterhout & Holcomb, 1992) heeft echter aangetoond dat andere ERP-componenten dan de N400 gevoelig zijn voor verwerking van syntactische informatie. Wij zullen verderop uitgebreider ingaan op ERP-manifestaties van syntactische processen. Hier volstaan wij met de constatering dat met betrekking tot taalverwerkingsprocessen de N400 vooral gevoelig is gebleken voor specifiek semantische informatie.

Uit het tot dusverre besproken onderzoek zou de indruk kunnen ontstaan dat modulaties van de N400-amplitude alleen optreden wanneer er sprake is van een schendingssituatie. Dit is echter niet het geval. Het is gebleken dat ieder betekenisdragend woord (zoals zelfstandige en bijvoeglijke naamwoorden) op zichzelf reeds een N400 oproept. De grootte van de N400-amplitude varieert daarbij als een functie van de mate waarin het betreffende woord qua betekenis past in de voorafgaande context. Zo hebben Kutas, Lindamood en Hillyard (1984) aangetoond dat de amplitude van de N400 zeer gevoelig is voor de voorspelbaarheid van een woord binnen een bepaalde zinscontext. Woorden die zeer voorspelbaar zijn (bijv. "De bakker legt het brood in de *oven*") roepen een N400 met lagere amplitude op dan woorden die minder voorspelbaar zijn (bijv. "De bakker legt het brood in de *auto*"). Hieruit blijkt dat modulaties van de N400 niet aan schen-

dingen gebonden zijn; er is immers in beide zinnen sprake van een laatste woord dat qua betekenis *prima* in de zinscontext past.

Uit meer recent onderzoek, onder andere uit ons eigen laboratorium, is tevens komen vast te staan dat N400-effecten niet uitsluitend in zinscontexten optreden. Zodra luisteraars of lezers hun aandacht richten op de betekenis van de woorden die zij horen of zien, kunnen N400-effecten geobserveerd worden. Dit geldt ook als de woorden niet in zinnen worden aangeboden, maar voorafgegaan worden door een of meerdere losse woorden. Zo hebben wij een aantal ERP-experimenten uitgevoerd met het zogenaamde "semantic priming" paradigma. Hierbij krijgen proefpersonen paren van woorden een voor een aangeboden. Daarbij is er soms wel en soms niet sprake van een semantische verwantschap tussen de woorden (Bijvoorbeeld "*hond-kat*" versus "*lamp-kat*"). Uit reactietijdonderzoek is reeds lang bekend dat op woorden die voorafgegaan worden door een semantisch verwant woord een snellere reactietijd verkregen wordt dan op woorden die niet samenhangen met het voorafgaande woord. Men veronderstelt dat dit "semantic priming" effect ontstaat op grond van de organisatie van ons mentaal lexicon. Een invloedrijke opvatting is dat men zich het mentaal lexicon als een netwerk van knopen kan voorstellen. Deze knopen zijn onderling verbonden. Iedere knoop stelt een woordbetekenis voor, terwijl de verbindingen tussen de knopen de betekenisrelaties tussen de woorden representeren. Woorden die qua betekenis verwant zijn hebben meer verbindingen gemeen en liggen in het netwerk dicht bij elkaar dan woorden die in betekenis sterker verschillen. Telkens als een woord wordt herkend, stuurt het via zijn verbindingen kortstondig wat activatie uit naar woorden waarmee het verbonden is. Het "semantic priming" effect wordt hierbij verklaard door de aanname dat verwante woorden op grond van hun tijdelijk verhoogde activatiewaarde makkelijker te verwerken zijn dan woorden die niet verwant zijn met een eerder herkend woord.

In Figuur 5 is te zien hoe het "semantic priming" effect bij woordparen op neurofysiologisch niveau zijn beslag krijgt.

Zoals we kunnen zien in Figuur 5, varieert ook in een woordcontext de amplitude van de N400 op het tweede woord in afhankelijkheid van de mate waarin het qua betekenis gerelateerd is aan het eerste woord. Voor woorden die semantisch niet verwant zijn met het voorafgaande woord is een grotere N400-amplitude zichtbaar dan voor woorden die semantisch wel verwant zijn. Dit N400-effect treedt op bij zowel visuele als auditieve aanbidding van de woordparen. Kortom, N400-effecten worden niet alleen verkregen in zinscontexten, maar ook bij woordparen. In al deze gevallen varieert de amplitude van de N400 in afhankelijkheid van de sterkte van de semantische relatie tussen de context en het woord waarop de voor ons doel kritische meting verricht wordt.

Hoewel zeker niet alle vragen over de relatie tussen de N400 en het taalsysteem beantwoord zijn, staat thans wel vast dat de N400 gemoduleerd wordt door semantische informatie tijdens het verwerken van gesproken en geschreven taal. De relatie tussen N400 en semantiek moge inmiddels duidelijk zijn, minder duidelijk was tot voor kort met welk verwerkingsproces in de cognitieve archi-

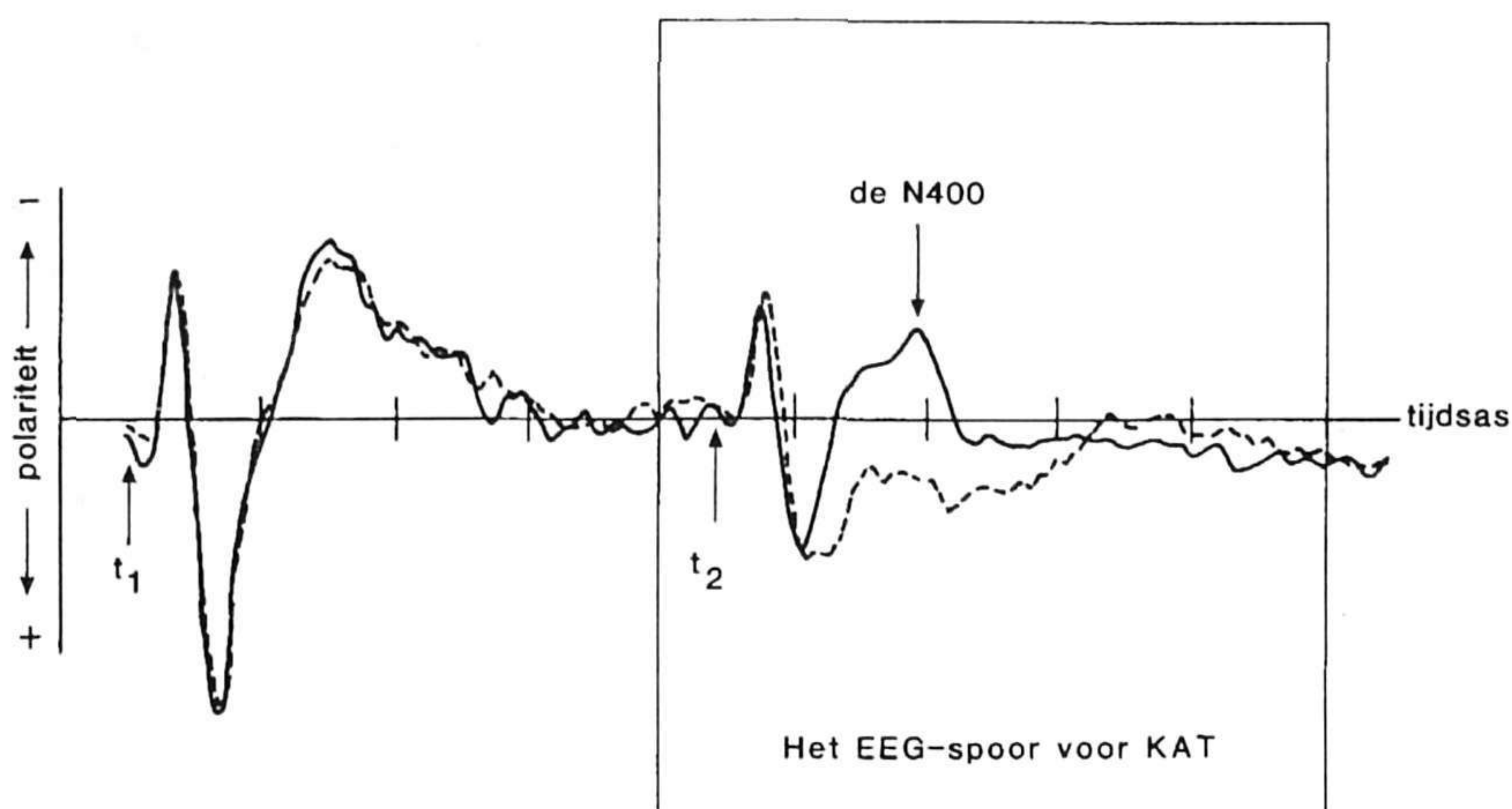


Fig. 5. Het EEG-spoor voor verwante en niet-verwante woordparen. De onderbroken lijn geeft het EEG weer voor verwante woordparen (i.c. *hond-kat*), de doorgetrokken lijn dat voor niet-verwante woordparen (i.c. *lamp-kat*). Op tijdstip t_1 wordt ofwel *hond* ofwel *lamp* aangeboden. Op tijdstip t_2 wordt *kat* aangeboden. Als een functie van de mate waarin *kat* met het voorafgaande woord in betekenis verwant is, blijkt de grootte van de amplitude van de N400 voor het woord *kat* te variëren. Voor niet-verwante woordparen is een grotere amplitude van de N400 zichtbaar dan voor verwante woordparen (uit het werk van de auteurs).

tectuur van taalbegrijpen de N400 samenhang. Brown en Hagoort (1993) hebben mede op basis van eigen onderzoek geargumenteed dat de N400 vooral samenhangt met het proces van semantische integratie. Als een woord in het lexicon is geactiveerd op basis van binnenkomende sensorische informatie, moet vervolgens de geactiveerde woordbetekenis in een representatie van de context geïntegreerd worden. Naarmate de betekenispecificaties van de context en het geactiveerde woord meer met elkaar overeenkomen, verloopt het integratieproces makkelijker en sneller. De N400 is een gevoelige indicator van dit lexicale integratieproces. Gebleken is dat hoe makkelijker een geactiveerde woordbetekenis in de contextrepresentatie geïntegreerd kan worden, des te sterker de reductie van de N400-amplitude voor het te integreren woord is. De N400 blijkt minder of in het geheel niet gevoelig te zijn voor semantische activatieprocessen in het lexicon zelf (Brown & Hagoort, 1993).

In het kader van deze bijdrage is het ondoenlijk om volledig recht te doen aan alle N400-onderzoek in de afgelopen 15 jaar. Voor recente overzichtsartikelen verwijzen we naar Kutas en Van Petten (1988) en naar Pritchard, Shappell en Brandt (1991).

De N400 in onderzoek naar taalbegripsstoornissen

Tot op heden is behalve in het kader van ons eigen onderzoeksproject nog niet eerder gebruik gemaakt van de ERP-methode om onderzoek te doen naar de aard van taalbegripsstoornissen bij afasiepatiënten. Om de mogelijkheden van ERP-onderzoek naar afasie te illustreren, zijn we dus op ons eigen onderzoek aangewezen.

In de afasieliteratuur is een debat ontstaan over de locus van taalbegripsstoornissen bij patiënten met een afasie van Broca en patiënten met een afasie van Wernicke. De reden daarvoor is dat de prestaties van deze patiënten nogal verschillen in afhankelijkheid van de experimentele taak waarop zij getest worden.

Indien patiënten gevraagd wordt van drie woorden (bijvoorbeeld *leeuw – gans – tijger*) aan te geven welke twee qua betekenis het meest bij elkaar horen, blijken met name Wernicke patiënten daartoe niet goed in staat te zijn (Zurif, Caramazza, Myerson, & Galvin, 1974). Broca patiënten daarentegen hebben er weinig of geen moeite mee. Op basis van dit soort resultaten (zie ook Goodglass & Baker, 1976; Whitehouse, Caramazza, & Zurif, 1978) werd aanvankelijk geconcludeerd dat ten gevolge van de hersenbeschadiging bij Wernicke patiënten woordbetekenissen ten dele of geheel verloren waren geraakt, terwijl Broca patiënten daarover nog wel konden beschikken.

Echter in onderzoek waarbij patiënten geen semantisch oordeel over het materiaal hoefden uit te spreken, bleken Wernicke patiënten ineens wel degelijk gevoelig te zijn voor de betekenisaspecten van de aangeboden woorden (o.a. Hagoort, 1993; Milberg & Blumstein, 1981; Milberg, Blumstein, & Dworetzky, 1987). Nu waren het de Broca patiënten die een afwijkend patroon vertoonden.

In het betreffende onderzoek werd proefpersonen (inclusief patiënten) onder andere woordparen aangeboden. Voor het tweede woord van ieder paar moest de proefpersoon zo snel mogelijk aangeven of het een woord uit zijn moedertaal was door op een JA-knop of op een NEE-knop te drukken (lexicale decisie). In sommige gevallen werd het tweede woord voorafgegaan door een semantisch verwant woord (BROOD - BOTER), in andere gevallen door een niet-verwant woord (KLAS - BOTER). Het is een veel gerepliceerde bevinding in taalpsychologisch onderzoek dat de lexicale decisietijd korter wordt wanneer het woord door een semantisch verwant woord wordt voorafgegaan. In dergelijke semantische priming studies blijken Wernicke patiënten wel degelijk semantische priming effecten te vertonen, hetgeen strijdig is met de gedachte dat deze patiënten kennis over woordbetekenissen verloren hebben. Dergelijke kennis is de voorwaarde om de gevonden priming effecten te kunnen observeren. Hoewel deze patiënten automatisch woordbetekenissen uit het geheugen kunnen ophalen, lijkt het erop dat ze daarmee verder weinig kunnen doen. Op het moment dat deze woordbetekenissen expliciet moeten worden gebruikt voor zoiets als het geven van een semantisch oordeel of het leggen van een verband met de zinscontext, blijken Wernicke patiënten daartoe nauwelijks of niet in staat.

De resultaten zijn verrassend genoeg minder eenduidig voor de Broca patiën-

ten. Deze laten in sommige studies semantische priming effecten zien (o.a. Blumstein, Milberg, & Shrier, 1982; Hagoort, 1993; Katz, 1988), terwijl dergelijke priming effecten in andere studies bij dezelfde patiënten niet gevonden zijn (Milberg & Blumstein, 1981; Milberg, Blumstein, & Dworetzky, 1987). Dit heeft geleid tot het vermoeden dat Broca patiënten problemen hebben met het snel en automatisch ophalen van woordbetekenisinformatie uit het geheugen. Woordbetekenissen zijn niet verloren, maar zouden minder efficiënt opgehaald kunnen worden als vereist. Stoornissen in snelle, automatische ophaalprocedures worden soms ook verantwoordelijk gehouden voor specifieke problemen van Broca patiënten met functiewoorden (o.a. Bradley, Garrett, & Zurif, 1980) of met syntactische informatie in het algemeen (Friederici & Kilborn, 1989).

Zoals gezegd is de empirische ondersteuning voor een dergelijke kijk op lexicaal-semantische ontregeldheden bij Broca patiënten verre van eenduidig. Derhalve besloten wij een ERP-experiment te doen om de empirische houdbaarheid van deze visie te testen.

Broca patiënten en een controlegroep bestaande uit personen van gelijkwaardige leeftijd en opleiding, werden gevraagd naar een aantal woordparen te luisteren. Verder hoefden zij niets te doen. 83 woordparen bestonden uit woorden van eenzelfde semantische categorie (bijv. KERK - VILLA), de resterende 83 paren bestonden uit woorden van verschillende semantische categorieën (bijv. ANJER - KANON). Figuur 6 laat voor een groep van 12 neurologisch gezonde personen en voor een groep van 12 Broca patiënten het gemiddelde ERP-spoor zien dat door het tweede woord van het paar wordt opgeroepen. Het weergegeven ERP-patroon is opgepikt op Cz, een centrale afleiding over het midden van het hoofd. Vergelijkbare patronen werden geobserveerd voor de overige electrodeplaatsen.

Weergegeven zijn het ERP-spoor voor de semantische verwante woorden en dat voor woorden die uit een andere categorie komen dan het voorafgaande woord.

Zoals zichtbaar is in Figuur 6 zijn de patronen voor beide groepen goed vergelijkbaar. Dat wil zeggen zo'n 200 milliseconden na het begin van het auditief gepresenteerde woord begint het ERP-patroon voor de verwante woorden af te wijken van dat voor de niet-verwante woorden. Deze laatste vertonen een duidelijk grotere negativiteit in het klassieke N400-bereik. Voor verwante woorden is de amplitude van de N400 aanmerkelijk gereduceerd. Op het oog zijn er geen duidelijke verschillen in aanvang en omvang van het N400-verschil bij Broca patiënten en hun controles, een indruk die bovendien bevestigd wordt door de afwezigheid van een statistische interactie tussen de factoren Groep (Ouderen zonder afasie vs. Broca patiënten) en Semantische Relatie (gerelateerd vs. onge-relateerd).

De conclusie moet dus zijn dat geen evidentie gevonden kan worden in een eerste ERP-experiment voor de gedachte dat Broca-patiënten problemen hebben woordbetekenissen automatisch uit het geheugen op te halen.

Automatische toegang tot lexicale informatie is een noodzakelijke maar niet voldoende voorwaarde voor adequaat taalbegrip. De opgehaalde lexicale infor-

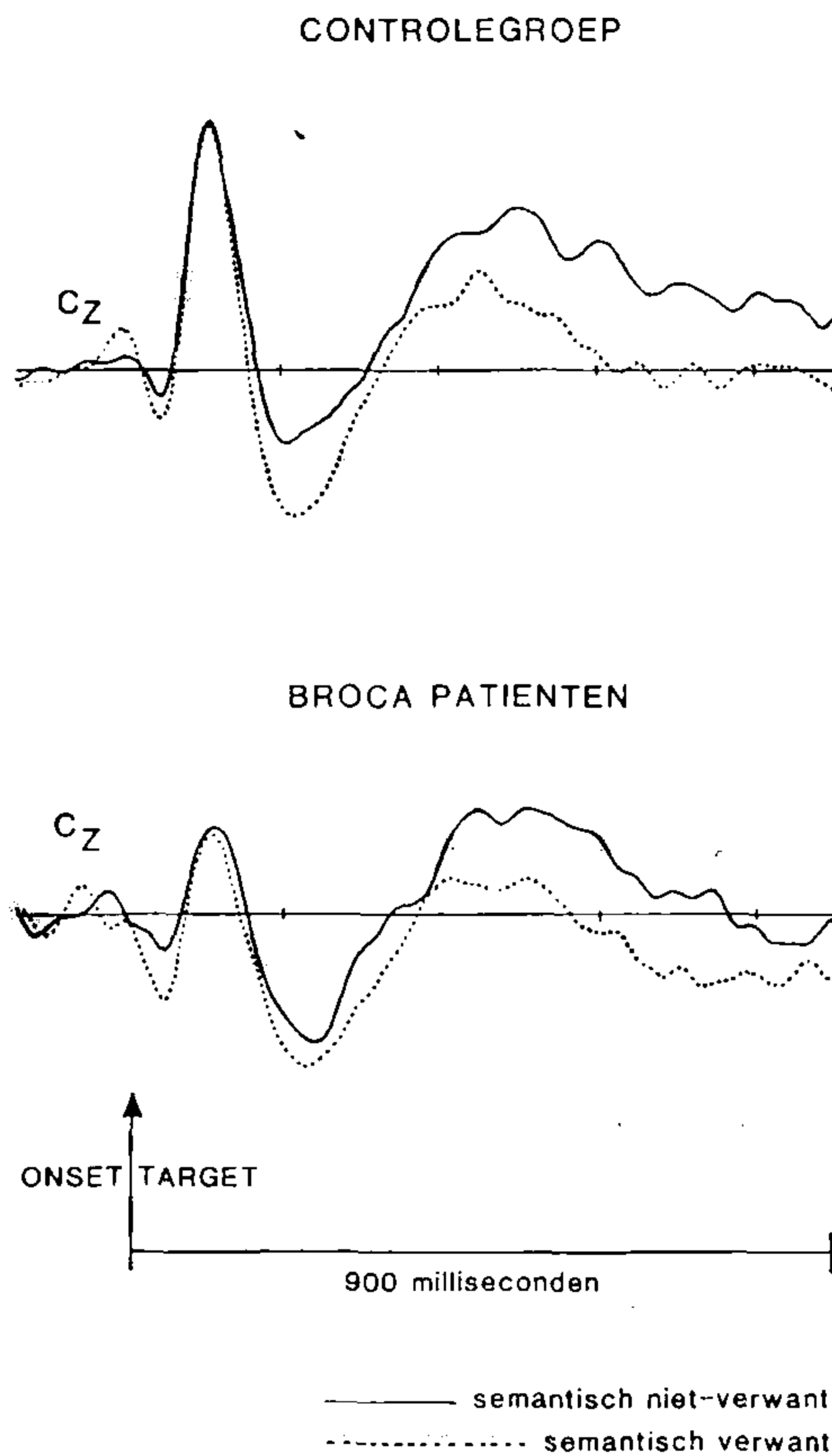


Fig. 6. De N400 voor verwante en niet-verwante doelwoorden. Voor de verwante woordparen komen de doelwoorden uit dezelfde semantische categorie (bijvoorbeeld *kerk-villa*), voor de niet-verwante woordparen uit verschillende semantische categorieën (bijvoorbeeld *anjer-kanon*). In de figuur is alleen het gemiddelde ERP-patroon voor het tweede woord van een woordpaar weergegeven. Gemiddelde ERP-patronen zijn weergegeven voor een groep van 12 oudere personen en 12 patiënten met een afasie van Broca. Voor beide groepen is de amplitude van de N400 groter voor de niet-verwante doelwoorden dan voor de verwante doelwoorden.

matie moet namelijk met de voorafgaande zinscontext samengesmeed worden om een representatie van de gehele uiting tot stand te brengen. Mogelijk hangt de taalbegripsstoornis van Broca-patiënten samen met een probleem op het niveau van dit integratieproces. Dit hebben we onderzocht in een volgend ERP-experiment. Daarin is gevonden dat bij presentatie van hele zinnen het N400-effect dat wordt opgeroepen door een niet passend laatste woord, bij Broca-patiënten op een later moment ontstaat dan bij de controlegroep. Bovendien is de grootte van het effect bij deze patiënten met ongeveer 30% gereduceerd in vergelijking met

de controlegroep. Dit duidt erop dat Broca-patiënten mogelijk last hebben van een vertraging in het integratieproces, hetgeen resulteert in een minder adequate integratie van lexicale informatie in de context. Een mogelijke vertraging in dit proces bij patiënten met een afasie van Broca werd eerder gevonden door Hagoort (1990; 1992).

Het gepresenteerde ERP-experiment met afasiepatiënten is de eerste in een hele reeks van ERP-experimenten waarbij de voordelen van ERP-registraties (zoals de afwezigheid van een additionele taak) worden uitgebuit om de aard van afatische taalbegripsstoornissen beter in kaart te kunnen brengen.

Het electrofysiologische signalement van syntactische processen

Uiteraard zijn er naast semantiek andere kennisbronnen die een rol spelen tijdens het verwerken van taal. Een centraal onderscheid in de taalpsychologie is dat tussen de semantiek en de syntaxis, tussen de betekenisaspecten van taal en de grammaticale (structurele) aspecten van taal. Onder het laatste valt de kennis die wij gebruiken om grammaticaal welgevormde zinnen te maken en om de zinnen die wij horen en lezen te ontleden. Tijdens dit ontleedproces krijgen de woorden in de zin hun grammaticale rollen toebedeeld (onderwerp, lijdend voorwerp, enz.). Deze roltoedeling is belangrijk bij het interpreteren van de zin, bijvoorbeeld om uit te maken wie een bepaalde handeling verricht en wie de handeling ondergaat. Uit recent onderzoek in ons laboratorium is gebleken dat ook deze syntactische verwerkingsprocessen kunnen worden waargenomen in het ERP-signaal. Bovendien blijkt het ERP-signaal voor syntactische processen kwalitatief anders te zijn dan de N400.

In een van onze experimenten kregen proefpersonen zinnen te lezen die qua betekenis correct waren, maar die soms een grammaticale fout bevatten. Verschillende soorten schendingen van de grammaticale regels van het Nederlands kwamen in de aangeboden zinnen voor. Ter illustratie bespreken we van deze verschillende typen schendingen alleen de schending in de congruentie tussen het onderwerp van een zin en het daarmee verbonden werkwoord. Zin 1 geeft een voorbeeld van het materiaal (het woord in de zin waarop de schending zich manifesteert is gecursiveerd):

* (1) Het verwende kind *gooien* het speelgoed op de grond.

In zin 1 heeft het werkwoord *gooien* de meervoudsvorm, terwijl het onderwerp van de zin de enkelvoudsvorm vereist. Het experiment vergeleek de neurofysiologische activiteit die opgeroepen werd door een dergelijke schending, met de activiteit die gepaard ging met de correcte versie, zoals in zin 2:

(2) Het verwende kind *gooit* het speelgoed op de grond.

Proefpersonen kregen 30 van dergelijke zinnen aangeboden met een congruen-

tieschending en 30 syntactisch welgevormde zinnen. De zinnen werden woord voor woord op een monitor gepresenteerd. Elke 600 milliseconden verscheen een volgend woord. Het enige dat van de proefpersonen verlangd werd was dat ze de zinnen aandachtig lazen. De centrale vraag in dit experiment was of het ERP-patroon voor het grammaticaal incorrecte *gooien* zou afwijken van het grammaticaal correcte *gooit*. Figuur 7 laat zien dat dit inderdaad het geval is. In Figuur 7 is voor de pariëtale afleiding (Pz) het ERP-spoor weergegeven dat voorafgaat aan het schendingswoord, het schendingswoord zelf en de daarop volgende woorden. Het moment waarop een volgend woord op het scherm verscheen is op de tijdsas weergegeven.

In vergelijking met het correcte woord, ontlokte de grammaticale schending een positief polaire component die zo'n 500 milliseconden na aanbieding van het schendingswoord zichtbaar wordt en die zich uitstrekt tot in het ERP-signaal voor het volgende woord. In vervolgonderzoek met andere syntactische schendingen en met andere zinsvormen (Hagoort et al., 1993; Hagoort & Brown, 1994)

SYNTACTISCHE SCHENDING

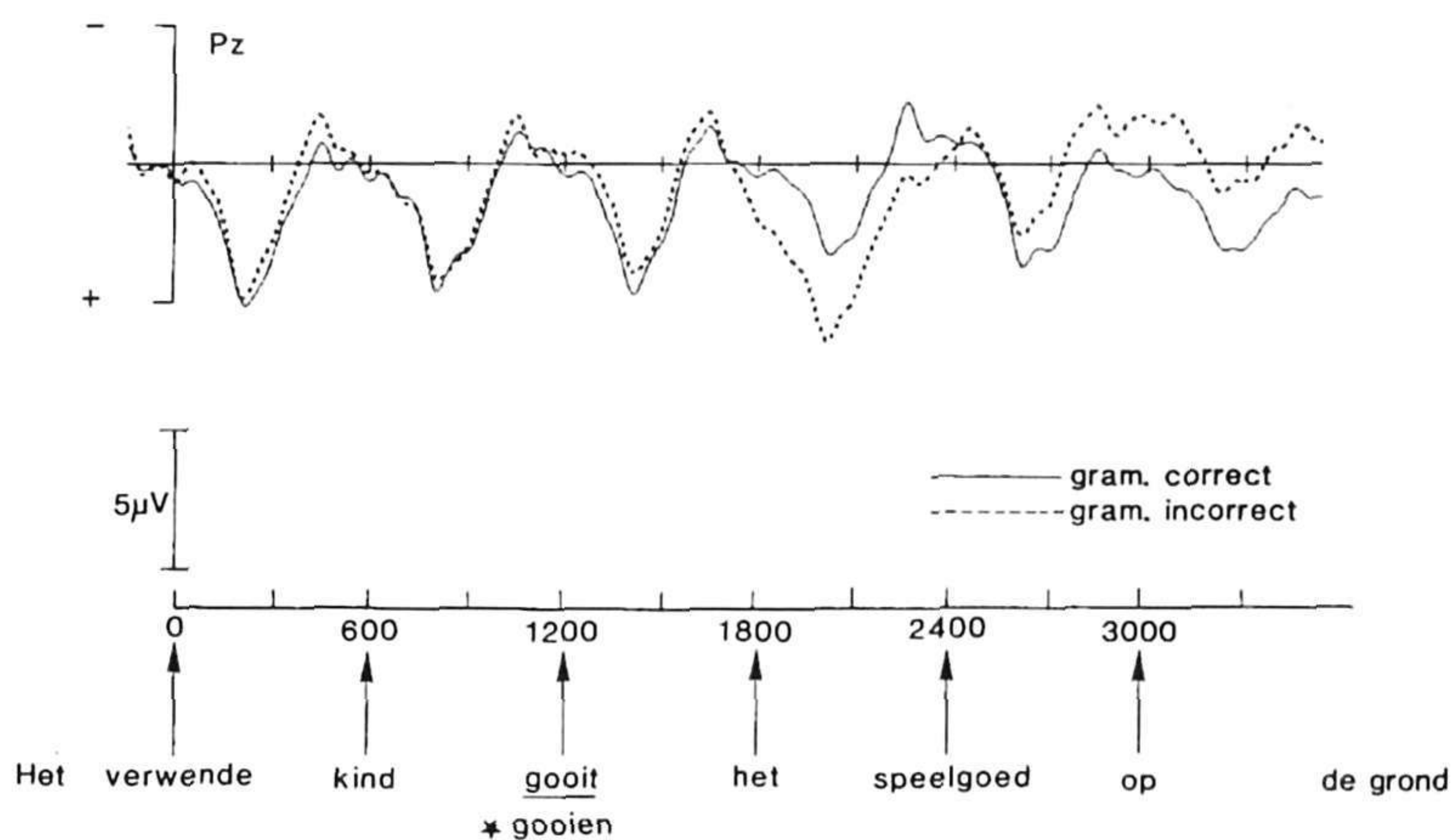


Fig. 7. Het gemiddeld ERP-spoor voor grammaticaal correcte zinnen (de doorgetrokken lijn) en zinnen met een grammaticale schending (de gestippelde lijn). De aangebrachte schending is in dit geval een verschil in getal tussen het onderwerp van de zin en het hoofdwerkwoord. De zinnen zijn woord voor woord in het centrum van het scherm aangeboden. Elke 600 milliseconden verscheen een volgend woord van de zin. Het woord dat de grammaticale schending belichaamt is onderstreept en wordt voorafgegaan door een sterretje. De momenten waarop een nieuw woord wordt aangeboden zijn gemarkeerd op de tijdsas. Duidelijk zichtbaar is de toegenomen positiviteit in het ERP-spoor na aanbieding van het schendingswoord. Deze positiviteit (SPS) wordt gevolgd door een toegenomen negativiteit (N400) voor woorden volgend op de grammaticale schending (uit het werk van de auteurs).

hebben wij inmiddels kunnen aantonen dat dit een betrouwbaar en robuust effect is. Dit syntactische effect is door ons de "Syntactic Positive Shift" (SPS) gedoopt. De SPS blijkt een gevoelige neurofysiologische index te zijn van syntactische processen die zich afspelen tijdens het begrijpen van taal.

Behalve de SPS is in Figuur 7 nog een ander effect zichtbaar in het ERP-patroon voor de geschonden zinnen. Voor woorden volgend op het schendingswoord wordt een aanhoudende negatieve uitslag in het hersenspoor geobserveerd. Bij het lidwoord onmiddellijk na het schendingswoord gaat deze negativiteit nog schuil onder de sterke uitslag van de SPS, maar voor de daaropvolgende woorden is er sprake van een evident (en statistisch significant) verschil in vergelijking met de grammaticaal welgevormde conditie. We hebben hier te maken met een N400-effect. Wat dit effect weerspiegelt, is het interpretatieve probleem waarmee de lezer worstelt nadat het schendingswoord verwerkt is. De grammaticale fout bemoeilijkt het verder opbouwen van een syntactische structuur voor de zin. De onmogelijkheid een volledige en correcte syntactische structuur op te bouwen maakt het voor de lezer lastiger om de resterende woorden van de zin te integreren in een coherente en betekenisvolle zinsrepresentatie. Dit interpretatieprobleem manifesteert zich in een grotere amplitude van de N400 voor de woorden die volgen op het schendingswoord.

Het meest interessante aspect van de SPS is het feit dat deze component kwalitatief geheel anders is dan de N400. De N400 is een negatief polaire component, terwijl de SPS een positief polaire component is. Op grond van de neurofysiologische kennis die voorhanden is over de wijze waarop ERPs gegenereerd worden, moeten wij daaruit concluderen dat niet-identieke neurale generatoren betrokken zijn bij het tot stand komen van de N400 en de SPS. Met andere woorden, wij hebben hier te maken met een onderscheid op neurofysiologisch niveau tussen semantiek en syntaxis. Deze verschillende soorten kennis blijken te corresponderen met verschillende 'ERP-signalen'. Niet alleen vormt dit ondersteunende evidentie voor een conceptueel onderscheid tussen betekenis en structuur van taal, maar het biedt ook nieuwe perspectieven om de rol van en interactie tussen de semantische en syntactische kennisbronnen tijdens het taalbegripsproces beter te kunnen onderzoeken. Met de SPS en de N400 hebben wij twee ERP-componenten in handen waarmee de invloed van verschillende kennisbronnen op het taalverwerkingsproces geregistreerd kan worden, met een temporele precisie die aansluit op het in milliseconden verlopend begripsproces.

Tot slot

De bovenstaande voorbeelden van eigen ERP-onderzoek dienden als illustratie van de mogelijkheden die de ERP-methode biedt voor taalpsychologisch onderzoek. Daarbij stonden niet zozeer de achterliggende theoretische vragen in het afasie-onderzoek of in de literatuur over zinsontleding centraal, maar veeleer hoe bepaalde eigenschappen van de ERP-methode van nut blijken te zijn voor dit

type onderzoeksvragen. Het registreren van hersenpotentialen in taalpsychologisch onderzoek lijkt kortom een relevante aanvulling te zijn op andere onderzoeksmethoden in de psycho- en neurolinguïstiek.

Taalpsychologisch gemotiveerd ERP-onderzoek is pas vrij recent 'populair' geworden onder psycholinguïsten. Derhalve moet nog het nodige aan voorwerk verricht worden om optimaal profijt te kunnen trekken van deze methode. Tevens zullen meer realistische presentatiecondities in onderzoek gebruikt moeten worden. Het vrij traag laten lezen van woorden benadert onvoldoende de karakteristieken van het normale leesproces. Eveneens is het belangrijk meer duidelijkheid te verkrijgen omtrent de precieze temporele relatie tussen het optreden van een bepaald informatieverwerkingsproces en het moment waarop de daarmee samenhangende ERP-component zichtbaar wordt. Pas als dat bekend is, kan de temporele organisatie van de bij taalverwerking betrokken deelprocessen nauwkeuriger in beeld worden gebracht.

Ondanks deze slagen om de arm is er reden tot een zeker optimisme. Steeds meer wordt bekend over de fundamentele eigenschappen van neurofysiologische signalen. Recente technologische ontwikkelingen maken het thans mogelijk om bij de mens hersenactiviteit op verschillende niveaus (electrofysiologisch, metabolisch, doorbloeding) zichtbaar te maken met een precisie waarover tien jaar geleden nog slechts gedroomd werd. Het einde van deze innovaties is nog lang niet in zicht. Derhalve zullen maten voor hersenactiviteit steeds beter inzetbaar blijken voor onderzoek naar het menselijk taalvermogen. Het registreren van ERPs als oudste van deze methoden zal vanwege de besproken eigenschappen ook in de toekomst een belangrijke rol blijven spelen, maar naar alle waarschijnlijkheid steeds meer in samenspel met andere registraties van hersenactiviteit (zoals MEG, PET, functionele MRI) tijdens taalverwerkingsprocessen.

De bijdrage van de ERP-methode aan onderzoek naar verschillende vormen van taal- en spraakpathologie is tot op heden gering geweest. Nu steeds meer bekend wordt over ERP-correlaten van verschillende aspecten van taalverwerking is de weg open voor een vruchtbaar gebruik van ERPs bij onderzoek naar dyslexie, afasie en andere vormen van pathologisch taalgedrag. Een combinatie van ERP-registraties met recente beeldvormingstechnieken van hersenstructuur en -activiteit kan daarbij veel nieuwe informatie verschaffen over een grotendeels onontgonnen terrein, namelijk dat van de relatie tussen de afwijkingen en aanpassingen op het niveau van de neurale architectuur en die op het nivo van de cognitieve architectuur.

Dankbetuiging

Onze erkentelijkheid geldt Tamara Swaab en Jolanda Groothusen die verantwoordelijk waren voor het verzamelen van de gerapporteerde data. Tevens spreken wij onze dank uit aan twee anonieme beoordelers voor hun opbouwend commentaar. Het gerapporteerde onderzoek werd mede mogelijk gemaakt door onderzoekssubsidies van de Volkswagen-Stiftung en Psychon (NWO).

Summary

In this article we discuss how the recording of electrical brain activity can contribute to psycholinguistic and neurolinguistic research. The aspects of brain potentials that are most relevant for this type of research are discussed. In addition, a summary is given of research on the brain potential that is most relevant for psycholinguistics (i.e., the N400). Finally, by way of illustration, we present some of our own electrophysiological research on language comprehension deficits in aphasic patients, as well as some research on parsing.

Literatuur

- Besson, M., & Macar, F. (1987). An event-related potential analysis of incongruity in music and other non-linguistic contexts. *Psychophysiology*, 24, 14-25.
- Blumstein, S.E., Milberg, W., & Shrier, R. (1982). Semantic processing in aphasia: Evidence from an auditory lexical decision task. *Brain and Language*, 17, 301-315.
- Bradley, D.C., Garrett, M.F., & Zurif, E. (1980). Syntactic deficits in Broca's aphasia. In D. Caplan (Ed.), *Biological studies of mental processes*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Brown, C.M., & Hagoort, P., (1993). The processing nature of the N400: Evidence from masked priming. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5, 34-44.
- Friederici, A.D., & Kilborn, K. (1989). Temporal constraints on language processing: Syntactic priming in Broca's aphasia. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1, 262-272.
- Goodglass, H., & Baker, E., (1976). Semantic field, naming, and auditory comprehension in aphasia. *Brain and Language*, 3, 359-374.
- Hagoort, P. (1990). *Tracking the time course of language understanding in aphasia*. Dissertatie, Universiteit van Nijmegen.
- Hagoort, P. (1992). Vertraagde lexicale integratie bij afatisch taalverstaan. *Stem-, Spraak- en Taalpathologie*, 1, 5-22.
- Hagoort, P. (1993). Impairments of lexical-semantic processing in aphasia: Evidence from the processing of lexical ambiguities. *Brain and Language*, 45, 189-232.
- Hagoort, P., & Brown, C.M. (1994). Brain responses to lexical ambiguity resolution and parsing. In C. Clifton Jr., L. Frazier, & K. Rayner (Eds.), *Perspectives on sentence processing*. Hillsdale, N.J: Lawrence Erlbaum Associates, in druk.
- Hagoort, P., Brown, C.M., & Groothusen, J. (1993). The Syntactic Positive Shift (SPS) as an ERP-measure of syntactic processing. *Language and Cognitive Processes*, in druk.
- Hillyard, S.A., & Kutas, M. (1983). Electrophysiology of cognitive processing. *Ann. Rev. Psychol.*, 34, 33-61.
- Katz, W.F. (1988). An investigation of lexical ambiguity in Broca's aphasics using an auditory lexical priming technique. *Neuropsychologia*, 26, 747-752.
- Kutas, M., & Hillyard, S.A. (1980). Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, 207, 203-205.
- Kutas, M., & Hillyard, S.A. (1983). Event-related brain potentials to grammatical errors and semantic anomalies. *Memory & Cognition*, 11, 539-550.
- Kutas, M. & Van Petten, C. (1988). Event-related brain potential studies of language. In P.K. Ackles, J.R. Jennings, & M.G.H. Coles (Eds.), *Advances in Psychophysiology*, Volume 3. Greenwich, Connecticut: JAI Press.
- Kutas, M., Lindamood, T., & Hillyard, S.A. (1984). Word expectancy and event-related potentials during sentence processing. In S. Kornblum & J. Requin (Eds.), *Prepa-*

- ratory States and Processes*. NJ: Lawrence Erlbaum.
- Milberg, W., & Blumstein, S.E. (1981). Lexical decision and aphasia: Evidence for semantic processing. *Brain and Language*, *14*, 371-385.
- Milberg, W., Blumstein, S.E., & Dvoretzky, B. (1987). Processing of lexical ambiguities in aphasia. *Brain and Language*, *31*, 138-150.
- Osterhout, L., & Holcomb, P.J. (1992). Event-related brain potentials elicited by syntactic anomaly. *Journal of Memory and Language*, *31*, 785-806.
- Pritchard, W.S., Shappell, S.A., & Brandt, M.E. (1991). Psychophysiology of N200/N400: A review and classification scheme. In J.R. Jennings, P.K. Ackles, & M.G.H. Coles (Eds.), *Advances in Psychophysiology*, Volume 4. London: Jessica Kingsley Publishers.
- Whitehouse, P., Caramazza, A., & Zurif, E. (1978). Naming in aphasia: Interactivity effects of form and function. *Brain and Language*, *6*, 63-74.
- Zurif, E., Caramazza, A., Myerson, R., & Galvin, J. (1974). Semantic feature representations for normal and aphasic language. *Brain and Language*, *1*, 167-187.