

Geïntegreerde modellen van normale en afwijkende spraakontwikkeling

Ben Maassen

Medische Psychologie / Kinderneurologie / KNO, UMC St Radboud Nijmegen

De stelling van dit artikel is dat cognitieve en motorische processen veel sterker geïntegreerd verlopen dan volgens recente theorieën wordt aangenomen. Eerst wordt een korte beschrijving gegeven van twee theorieën over spraakproductie: het model van de gegeneraliseerd motorische programma's (GPM) en het 'Task Dynamics' (TD)-model. Vervolgens wordt op basis van een overzichtartikel van Kent (2004) een aantal overwegingen en data beschreven, die tot de conclusie leiden dat "... speech, or any motor behavior, is best viewed as a cognitive-motor accomplishment." Dit artikel besluit met experimentele gegevens over spraakontwikkeling en een model van spraakproductie dat deze stelling verder uitwerkt en illustreert met voorbeelden.

Inleiding

In het dagelijks leven verrichten we voortdurend tal van motorische activiteiten zonder daar veel over na te denken. Alleen als zich een belemmering of beperking voordoet (verstukte enkel, rechter wijsvinger in het verband), of als we een nieuwe vaardigheid aanleren (voor het eerst fietsen op een ligfiets, klanken van een vreemde taal leren uitspreken) worden we ons bewust van de complexiteit van alledaagse motorische verrichtingen als lopen, typen, fietsen en spreken. In het recente verleden zijn twee modellen ontwikkeld ter beschrijving van de mechanismen en processen die ten grondslag liggen aan complexe motorische verrichtingen: de theorie van de gegeneraliseerd motorische programma's (GMP's) en de theorie die bekend staat onder de naam 'Task Dynamics' (TD). Hieronder volgt eerst een korte beschrijving van deze theorieën. Meer recente observaties en metingen, onder andere op basis van brain imaging technieken zoals functionele MRI (fMRI), leveren data die niet kunnen worden verklaard binnen GMP of TD, maar een meer geïntegreerde visie op cognitie en motoriek lijken te vereisen. Deze nieuwe evidentie en de interpretatie daarvan werden uitvoerig beschreven in een literatuuroverzicht van Kent (2004), en worden in dit artikel kort samengevat. De stelling van Kents artikel luidde dat "... cognition exerts

strong influences on motor control, and speech, or any motor behavior, is best viewed as a cognitive–motor accomplishment.” (Kent, 2004, p.3). Dit is tevens de stelling van dit artikel. Dit artikel besluit met experimentele gegevens over spraakontwikkeling en een model van spraakproductie dat deze stelling verder uitwerkt en illustreert met voorbeelden .

Gegeneraliseerd Motorisch Programma's (GMP's)

Een goed uitgewerkt model volgens de GMP-gedachte toegepast op spraak is het model van Van der Merwe (1997). Van der Merwe onderscheidt vier stadia in spraakproductie: (1) Linguïstisch-symbolische planning, (2) Motorische planning, (3), Motorische programmering en (4) Motorische executie (of uitvoering). Dit model sluit goed aan bij het model van Levelt (1989), zie ook Maassen en Bastiaanse (1996) en kan worden gezien als een nadere uitwerking van de articulatorische stadia (planning, programmering en uitvoering), die Levelt slechts summier beschrijft. Stadium (1), linguïstisch-symbolische planning, ook wel fonologische planning, betreft de selectie en sekventiëring van fonemen volgens de regels van de moedertaal. Dit komt overeen met ‘fonologisch coderen’ van Levelts model. Tijdens Van der Merwe’s stadium (2), motorische planning, vindt een transformatie plaats van symbolische elementen (fonemen) naar een code die hanteerbaar is voor het motorisch systeem. Motorische planning behelst het formuleren van de actie-strategie door specificatie van de motorische doelen. Motorische planning is dus doel-georiënteerd en spraakmotorische doelen bestaan uit spatiële en temporele specificaties van spraakbewegingen.

Levelts model suggereert een articulatorisch netwerk als laatste stadium van spraakproductie, dat de exacte bewegingen van de articulatoren berekent. Van der Merwe verdeelt dit niveau in twee stadia: motorische programmering en executie. Tijdens stadium (3): Motorisch programmeren worden de motorische doelen omgezet in precieze articulatorische instructies. Bijvoorbeeld, een motorische doel kan zijn lipsluiting voor de productie van een /p/. Dit motorisch doel kan worden gerealiseerd door beweging van de onderkaak, de onderlip, beide lippen, of een combinatie van deze. Spreekt de spreker met een potlood in de mond (‘pipe speech’), dan blijft de spraak verstaanbaar dankzij compensatie van de gefixeerde onderkaak door meer lip-beweging. Het laatste stadium is stadium (4): Motorische uitvoering, het feitelijk bewegen. Reflexmatige aanpassingen worden tot dit laatste stadium gerekend.

Task Dynamics (TD)

‘Coordination dynamics’, ofwel ‘task dynamics’, kan worden gezien als reactie op GMP-modellen. Voor een gedegen inleiding in de achtergronden van TD, zie Van Lieshout (2004); voor een gemakkelijker toegankelijke introductie, zie Goldstein

en Fowler (2003). Aanhangers van TD signaleerden een groot probleem waar GMP-modellen geen adequate oplossing voor bieden, te weten het grote aantal vrijheidsgraden van ons articulatie-apparaat. Voor simpele producties van uitingen als ‘patapata..’ moeten tientallen vrijheidsgraden onder controle worden gehouden: beweging van de onderkaak, de onderlip, de bovenlip, het tonglichaam, de tongpunt, de stembanden, de longen, alle aangestuurd door meerdere spiergroepen. Volgens GMP wordt ieder onderdeel van de beweging vanuit een centraal gegenereerd motorisch plan aangestuurd, hetgeen een hoge computationele belasting betekent voor de betrokken hersengebieden, met name de primaire motorische en sensorische cortex, de supplementaire motorische cortex (SMA), en het cerebellum. Als oplossing stelt TD voor ons articulatie-apparaat op te vatten als een conglomeraat van coördinatieve structuren: ‘highly evolved task-specific ensembles of neuromuscular and skeletal components constrained to act as a single unit’ (Kelso 1998, p. 205, in van Lieshout, 2004, p52). In de omschrijving van Goldstein en Fowler (2003) (p.178) als: “physical entities, .. that create and release constrictions in the vocal tract.”

Spraakproductie is dus inherent gecoördineerde actie. In termen van TD kan een eigenschap als ‘equifinaliteit’ goed worden beschreven. In de motorische literatuur betekent ‘equifinaliteit’ dat een motorisch doel op meerdere manieren kan worden bereikt. Steeds meer komt men tot de ontdekking dat een bepaalde beweging door een bepaalde persoon (denk aan het schrijven van een letter, het uitspreken van een woord) nooit twee keer op exact dezelfde wijze wordt uitgevoerd. Het hierboven aangehaalde voorbeeld van compensatie bij distorsie van bilabiale lipsluiting (‘pipe speech’) vereist binnen GMP aanpassingen aan het motorisch programma, maar wordt binnen TD op natuurlijke wijze door ‘coördinatieve structuren’ geregeld, die zijn gecoördineerd om doelen te bereiken. Een bezwaar dat door sommige theoretici tegen TD wordt aangevoerd is, dat het slechts een schijnbare oplossing biedt, een verschuiving van het probleem: Niet het motorisch plan of motorisch programma bepaalt de coördinatie van bewegingen, maar deze coördinatie is een eigenschap van het bewegende systeem zelf. Sterk aspecten van TD zijn de formeel mathematische beschrijving en het rekenen houden met bio-mechanische aspecten.

Integratie Cognitie en Motoriek

Zowel de GMP-visie op motorische aansturing als de TD-benadering koppelen het motorisch aspect van handelen los van het cognitieve aspect. Cognitie heeft betrekking op de voorbereidingen van beweging in de zin van: Bepaling van het doel van de handeling, de te bereiken eindtoestand en strategische beslissingen over de wijze waarop dat doel bereikt moet worden (denk als voorbeeld aan de choreografie bij kunstrijden op de schaats). Bij spraakproductie zijn dat: Bepaling van de boodschap die men wil overbrengen, woordkeuze en zinsconstructie. De stelling van dit artikel is, dat cognitieve en motorische processen sterk geïntegreerde processen zijn, veel sterker dan volgens de beide hierboven uiteengezette TD en GPM-modellen veron-

dersteld wordt. Kent (2004) geeft op basis van vier typen observaties en experimentele bevindingen een overzicht van evidentie voor dit standpunt.

1. Gedragsstudies en gedragsobservaties

TD en GPM-modellen kunnen niet verklaren dat uitsluitend het observeren van een motorische handeling een positief effect heeft op het vervolgens zelf verrichten van die handeling. In de modulaire opvatting komt motorisch leren tot stand door het herhaaldelijk zelf plannen en programmeren van de handeling. Denk hierbij aan motorisch drill-learning (de saaie oefeningen bij het piano spelen), waarbij trainingstechnisch een juiste balans tussen herhaling (programmeren en uitvoeren) en afwisseling (plannen) gevonden moet worden. Volgens TD en GPM komt motorisch leren tot stand door de verrichtingen eerst geïsoleerd in te slijpen en vervolgens in variabele contexten toe te passen. In de logopedie is het een voortdurend aftasten hoeveel herhaling een cliënt nodig heeft en wanneer deze zo ver is dat klankpatronen kunnen worden afgewisseld. Dat louter *observeren* (in dit geval inclusief luisteren) van een handeling hier een positieve invloed op zou kunnen uitoefenen, past niet in de TD en GPM-modellen.

Er is echter toenemend evidentie dat motorisch leren ook door observatie plaatsvindt. Heyes en Foster (2002) maakten gebruik van een paradigma voor impliciet sequentieel leren dat eruit bestaat dat de proefpersoon knoppen (bijv. een paneel met 4 stuks) in een ogenschijnlijk willekeurige volgorde, aangegeven door oplichtende lampjes of een cijfercodering, moet indrukken. Indien de volgorde van in te drukken knoppen bestaat uit repeterende sequenties van 7 tot 10 knoppen, dan neemt de latentie van knop indrukken af, ook in het geval de proefpersoon niet in de gaten heeft dat er sprake is van een vaste volgorde. Heyes en Foster (2002) lieten zien dat dezelfde reductie van latentietijden optreedt indien de proefpersoon niet zelf de acties uitvoert maar een andere persoon dit ziet doen.

Andere gedragsstudies en –observaties die met TD en GPM-modellen moeilijk te verklaren zijn betreffen de bevinding dat beperkte of uitgestelde feedback gepaard kan gaan met sneller motorisch leren dan frequente en onmiddellijke feedback (Anderson, Magill, & Sekiya, 2001), en dat bij een identieke taak –met vingertoppen een licht gordijn aanraken met minimaal bewegingseffect—de kwaliteit van de uitvoering afhangt van de focus van de aandacht, in dit geval gericht op het stilhouden van de vingertoppen (interne focus) of op het niet laten bewegen van het gordijn (externe focus). Knock, Ballard, Robin, & Schmidt (2000) rapporteerden een onderzoek van de logopedische behandeling van 2 patiënten met een ernstige spraak-apraxie, waaruit bleek dat gerandomiseerde feedback leidde tot betere retentie van de aangeleerde spraakpatronen dan gegropeerde feedback.

Concluderend zijn er talrijke aanwijzingen dat motorisch leren niet alleen is gebaseerd op het herhaald doorlopen van de processen plannen, programmeren en uitvoeren, maar dat er ook andere manieren van motorisch leren bestaan (observatief leren) en dat cognitieve aspecten als aandacht en zelf-controle (bij uitgestelde of gerandomiseerde feedback) daarop een grote invloed uitoefenen.

2. Neurofysiologisch onderzoek

De integratie van cognitie en motorische controle komt eveneens naar voren in recent onderzoek van de neurologische processen die zich voltrekken tijdens het verwerven en uitvoeren van motorische verrichtingen. In een overzichtsartikel liet Georgopoulos (2000) zien dat de motorische cortex niet alleen actief is tijdens het verrichten van motorische handelingen, maar ook bij andere taken zoals het uitvoeren van spatiële transformaties, serieel coderen, stimulus-response incompatibiliteit en motorische verbeelding. Behalve van de motorische cortex is ook van het cerebellum lang gedacht dat de primaire en enige taak bestond uit het aansturen en coördineren van motoriek. Inmiddels is duidelijk geworden dat het cerebellum bij veel meer cognitieve operaties betrokken is, vooral in het stadium waarin nieuwe strategieën moeten worden ontwikkeld. Uit diverse experimenten is gebleken dat het cerebellum een belangrijke rol speelt bij *impliciet leren*, zoals de hierboven genoemde taak waarin de proefpersoon een serie knoppen moet indrukken (Doyon, 1996 ; Toni, 1998). Daarnaast is het cerebellum echter ook actief tijdens de beginfase van de zogenaamde ‘verb generation’ taak, waarin de proefpersoon een zelfstandig naamwoord krijgt aangeboden (bijvoorbeeld ‘schaar’), en hij of zij zo snel mogelijk een bijbehorend werkwoord (‘knippen’) moet noemen. Raichle, Fiez, Videen, MaxLeod, Pardo, en Fox (1994) vonden dat de prestaties op deze taak snel verbeteren door oefening, en – belangrijker in deze argumentatie – dat tijdens de eerste oefenfase het cerebellum verhoogd actief is. Deze activiteit neemt snel af en na de oefenfase is het corticale circuit dat betrokken is bij de response selectie niet te onderscheiden van eenvoudig woorden nazeggen (een taak waarbij het cerebellum nauwelijks betrokken is.)

Een in dit verband belangwekkende bevinding is dat in de rostrale hersengebieden van mensapen groepen neuronenvoorkomen die actief zijn tijdens het *uitvoeren* van een handeling maar ook bij het *observeren* van die handeling door een ander individu. Deze neuronenvoorkomen worden ‘spiegelneuronen’ (‘mirror neurons’) genoemd. Rizzolatti en Arbib (1998) concludeerden dat deze spiegelneuronen kennelijk een systeem representeren dat geobserveerde gebeurtenissen matcht met vergelijkbare, intern gegenereerde acties en op deze wijze een verbinding vormt tussen de observator en de actor. Bij de mens zou met name het gebied van Broca veel spiegelneuronen bevatten. Nishitani en Hari (2000) noemen het gebied van Broca de ‘orchestrator of the human mirror neuron system’ (p. 913) en vonden dat het sterk actief is bij imitatie van acties. EEG-registraties hebben aangetoond dat bij het observeren en uitvoeren van vingerbewegingen dezelfde corticale netwerken actief zijn. Fadiga, Fogassi, Gallese en Rizzolatti (2000) gaven meerdere experimentele voorbeelden van het samenvallen van activiteit bij sensorische en motorische taken en postuleerden op basis daarvan dat het motorisch systeem niet alleen acties uitvoert, maar ook interne representaties van ‘motorische voorstellingen’ herbergen.

Tomassello (1999) gaat nog een stap verder met de interpretatie dat dit systeem ons in staat stelt andere individuen te zien als intentionele actoren zoals het zelf. Dit is een vorm van sociale cognitie die bij kinderen op de leeftijd van ongeveer 1 jaar verschijnt, het stadium waarin kinderen betrokken raken bij gemeenschappelijke acti-

viteit met anderen zoals aanwijzen en volgen met de ogen. Een belangrijk aspect hiervan is het herkennen van het zelf als een onderscheiden individu, dat lijkt op anderen, en dat in staat is tot intentionele activiteit.

3. Ontwikkelingsstudies

In een overzichtartikel liet Diamond (2000) zien dat maturatie van de prefrontale cortex en het cerebellum sterk gerelateerd zijn. Er is een dicht netwerk van zenuwverbindingen tussen prefrontale cortex en cerebellum, en beide structuren zijn betrokken bij tal van cognitieve verrichtingen. In tegenstelling tot de gangbare notie dat motorische ontwikkeling vroeg begint en relatief vroeg eindigt, en cognitieve ontwikkeling op latere leeftijd inzet en langer doorloopt, blijken motorische en cognitieve ontwikkeling van de mens zich beide over een lange periode parallel te voltrekken. In veel ontwikkelings-neurologische stoornissen zijn zowel motoriek als cognitieve aangedaan.

Cognitief-motorische interacties kunnen worden geobserveerd bij pasgeborenen. Pas geboren baby's zijn in staat lip- en tongbewegingen te imiteren die ze anderen zien uitvoeren (Meltzoff, 1999). Ook imiteren nul- tot twee-jarigen kinderen spontaan spraakgeluiden van volwassenen. Kuhl en Meltzoff (1996) lieten niet alleen zien dat baby's op de leeftijd van 12 tot 18 weken een belangrijke ontwikkeling doormaken die gepaard gaat met uitbreiding van de gebruikte akoestische klinker-ruimte, maar ook in die periode zeer gevoelig zijn voor de klinker-categorieën die ze waarnemen. Daarbij spelen zowel gehoor als visus een rol, maar uitsluitend auditieve aanbidding leidt ook tot imitatie van de klinkers van de moedertaal. Dit ondersteunt de ontwikkelingstheorie dat vroege vocale imitatie, in de vorm van imitatie-brabbelen, een route is naar spraakontwikkeling. In de normale ontwikkeling komen baby's veel in contact met simultane faciale en auditieve stimuli en onder andere Slater en Kirby (1998) hebben aangetoond dat er slechts weinige trials nodig zijn om de associatie tussen faciale beweging en auditieve herkenning te leggen. Kennelijk zijn jonge baby's heel goede intermodale leerders. Masataka (1998) vond dat jonge dove kinderen meer aandacht hadden voor en responsiever waren op tot hen gerichte gebarentaal, dan gebarentaal tussen volwassenen onderling. Vervolgens werden dezelfde video-banden afgespeeld voor horende kinderen die nooit eerder geconfronteerd waren geweest met gebarentaal, en bij deze kinderen werd hetzelfde effect gevonden. Dit resultaat suggereert dat heel jonge kinderen in staat zijn niet alleen in spraak, maar ook in gebarentaal de kenmerken van 'motherese' te herkennen zonder voorafgaande ervaring in deze modaliteit. Kent (2004) geeft als mogelijke verklaring dat de spiegelneuronen een rol spelen. Ervan uitgaande dat tot jonge kinderen gerichte gebarentaal beter aansluit bij de capaciteiten van het kind dan volwassen gebarentaal, sluit deze beter aan bij het motorisch systeem van het kind.

Concluderend kunnen we zeggen dat de faciale en vocale imitaties gedurende de eerste levensmaanden de basis leggen voor het onderscheid tussen zelf-geproduceerd en door anderen geproduceerd gedrag. Dit te kunnen onderscheiden ontwikkelt zich tot het vermogen van observationeel leren. Imitatie is complex gedrag, dat zich aanpast aan het gedragsrepertoire van het kind en dat gedeeltelijk kan worden geoefend.

4. Klinische studies

Informatieve voorbeelden van cognitief-motorische interactie komen we tegen in de revalidatie-sector. Page, Levine, Sisto en Johnston (2001) beschreven een 56-jarige patiënt met hemiparese ten gevolge van rechts-parietaal infarct, die een programma van fysiotherapie en mentale oefeningen kreeg aangeboden. De mentale oefening bestond uit het luisteren naar een audioband die de patiënt instrueerde zich het gebruik van de aangedane arm voor te stellen. Deze instructies vormden een welkome aanvulling op de fysiotherapeutische behandeling. Een meer specifiek effect van mentale oefening werd beschreven bij drie patiënten met rechter hemiparese door Yoo, Park en Chung (2001). De taak bestond uit het trekken van lijnen van 5,9 inch lengte; de nauwkeurigheid waarmee de patiënten dit konden, nam aanzienlijk toe na mentale oefening. Een andere serie studies liet zien dat afwijkende hersenactivatie bij patiënten met de ziekte van Parkinson niet alleen voorkomt tijdens het daadwerkelijk uitvoeren van motorische verrichtingen, maar ook tijdens het zich voorstellen van motorische activiteit. Dus, Cunnington, Egan, O'Sullivan, Hughes, Bradshaw en Colebatch (2001) rapporteerden een PET-studie waaruit bleek dat patiënten met de ziekte van Parkinson gereduceerde activiteit lieten zien in verschillende hersengebieden in de conditie waarin de dopaminerge stimulatie uit stond. De onderzoekers concludeerden dat patiënten met de ziekte van Parkinson gebreken vertonen in de functie van de pre-supplementaire motor area (pre-SMA), maar niet in de SMA zelf en dat er compensatoire overactiviteit plaatsvond in de ipsilaterale premotorische en inferieure parietale cortex. Het interessante aan dit onderzoek was, dat vergelijkbare effecten werden gevonden indien de patiënten zich een voorstelling maakten van de motorische taak (eenvoudige vingebewegingen), in plaats van deze uit te voeren. Een vergelijkbare overeenkomst tussen daadwerkelijk uitgevoerde en zich voorgestelde motorische verrichtingen werd gerapporteerd door Samuel, Ceballos-Baumann, Boecker, en Brooks (2001). Ochipa, Rapsak, Maher, Rothi, Bowers, en Heilman (1997) beschreven een patiënt met ernstige ideomotorische apraxie en intacte taalvaardigheid. De patiënt maakte vooral spatiële en bewegingsfouten tijdens het demonstreren van de wijze waarop je gereedschap gebruikt. Deze patiënt presteerde ook zwak als het erom ging de bewegingen van gewrichten en spatiële verhoudingen uit haar voorstelling te beschrijven. Op tests voor het visueel voorstellen van objecten waren de prestaties adequaat. Dit resultaat van paralleliteit in productie en voorstelling suggereert dat dezelfde representaties die worden gebruikt voor productie ook geactiveerd worden tijdens het zich voorstellen van de motorische activiteit. Tevens bleek in dit onderzoek dat bepaalde aspecten van motorisch voorstellingsvermogen gedissocieerd kan zijn van het voorstellingsvermogen van objecten in de ruimte.

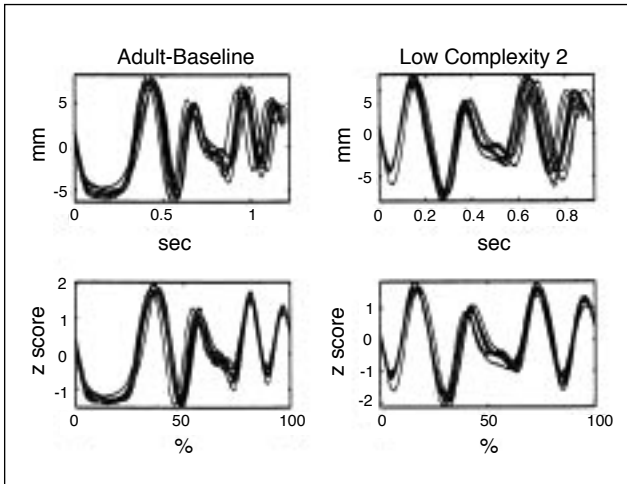
Normale en afwijkende spraakontwikkeling

Hieronder volgt een aantal voorbeelden waarin de integratie tussen cognitie en motoriek in de spraakontwikkeling en het diagnostisch onderzoek bij kinderen met spraak-

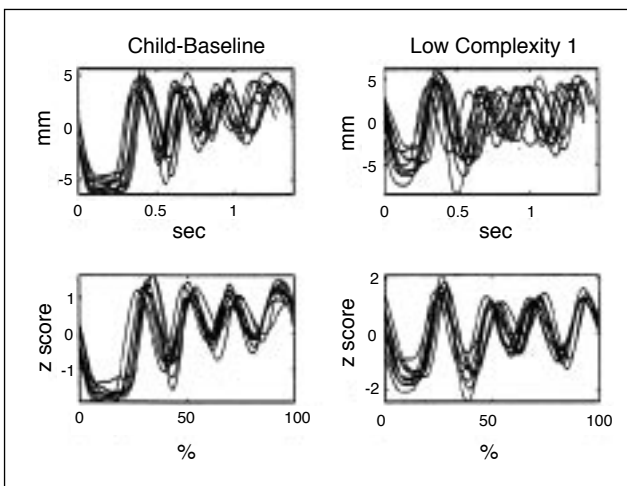
stoornissen een belangrijke rol speelt. We zien in de klinische praktijk vaak kinderen met spraakstoornissen, die op taken als plaatjes benoemen en woord- en nonsense-woord imitatie heel redelijk presteren, maar bij wie de articulatie vrijwel onverstaanbaar wordt zodra ze op enigerlei wijze onder druk worden gezet. Dit kan zijn door emotionele druk of tijdsdruk, maar ook doordat uitingen worden gevraagd die wat langer zijn. Een goed voorbeeld is correcte productie op de geïsoleerde woorden, en zeer slecht verstaanbare articulatie op de taak Zinnen Nazeggen van de Leidse Diagnostische Test, een taak die vooral bedoeld is om het auditief geheugen te testen, maar die daarnaast uitermate geschikt is om de spraakkwaliteit te beoordelen. De spraakkwaliteit komt in de testscore niet tot uiting, maar kan onafhankelijk daarvan worden beoordeeld. De spraakkwaliteit tijdens Zinnen Nazeggen komt naar onze ervaring sterk overeen met die van spontane spraak. Misschien komt de cognitieve belasting tijdens Zinnen Nazeggen aardig overeen met die van spontaan spreken, mede omdat *zinnen* moeten worden nagezegd, hetgeen een reconstructie of herformulering door het kind met zich brengt. De spraakkwaliteit tijdens Zinnen Nazeggen kan behoorlijk afwijken van die tijdens andere korte termijn auditieve geheugentaken, zoals cijfers of onsamenhangende woorden nazeggen. In het laatste geval wordt uitsluitend reproductie uit het auditief geheugen gevraagd, in het eerste geval herformulering van de zin. Dát er sprake is van herformulering kan worden onderbouwd met voorbeelden van een zin nazeggen zoals: ‘De oppasser gooide de bal *aan* de olifant’ (voorgezegd was: *naar*).

Eén parameter die kan dienen ter objectivering van spraakkwaliteit afhankelijk van context is de variabiliteit van kinematische registraties van spraakmotorische bewegingen. Smith en Goffman (2001; 2004) lieten kinderen en volwassenen de eenvoudige zin ‘buy Bobby a puppy’ uitspreken, en de wat langere zin ‘You buy Bobby a puppy now if he wants one’. De zin ‘buy Bobby a puppy’ speelt in het onderzoek van dit laboratorium aan Purdue University een prominente rol: het is een zeer geschikte uiting voor tal van experimenten met betrekking tot de coördinatie van onderlip en bovenlip. Met een optotrak systeem, dat bestaat uit lichtgevende diodes die op de lippen en kaak worden geplakt en twee camera’s die de bewegingen daarvan in 3 dimensies tot op 0,1 mm nauwkeurigheid kunnen registreren, worden deze articulatoren kinematisch gevolgd. De cruciale parameter in dit type onderzoek is de variabiliteit, hetgeen met zich meebrengt dat de proefpersonen de uitingen vaak moeten herhalen. In Figuur 1a staan registraties van onderlip-bewegingen verkregen tijdens 10 producties door een volwassen spreker van de korte zin (links) en de langere zin (rechts). Er is weinig verschil te zien. In de displays daaronder staan dezelfde registraties na tijd- en amplitude normalisatie; de curves vallen mooi over elkaar. Over deze laatste wordt een variabiliteits-index (VI) berekend: de gemiddelde variabiliteit per moment in de curve. Voor deze curves heeft de VI een waard van 9,6 voor de korte zin links, en 9,9 voor de lange zin rechts. Voor een volwassen spreker heeft deze variatie in zinslengte dus geen significant effect op de stabiliteit van de spraak.

1a



1b



Figuur 1a betreft een volwassene. Figuur 1b een 5-jarig kind. Voor verdere uitleg zie tekst. (Ontleend aan: Smith, 2001)

Een geheel ander resultaat wordt verkregen indien deze zinnen worden uitgesproken door kinderen. Figuur 1b geeft de registraties van een 5-jarig kind. Ook na tijd- en amplitude normalisatie vallen de curves niet mooi over elkaar. Over de gehele linie ligt de VI bij kinderen dan ook veel hoger dan bij volwassenen, waaruit kan worden geconcludeerd dat de spraakmotoriek op leeftijd van 5 jaar nog niet is uitgerijpt. Een in deze context nog belangrijker gegeven is het verschil in variabiliteit tussen de korte en lange zin bij kinderen. Bij de korte zin (links in de figuur) bedraagt deze 16,1, bij de lange zin (rechts) is de waarde 21,7. Dit is een significant verschil. Kennelijk heeft de totale cognitieve belasting een groot effect op de spraakmotoriek van kinderen.

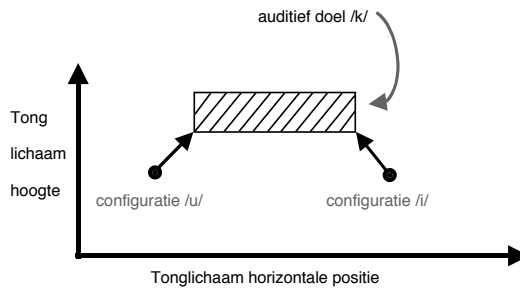
Perceptie-productie koppeling

Guenther (2001; 2004) ontwikkelde een neurologisch en computationeel model van spraakproductie, dat op een andere wijze dan hierboven geschetst de integratie van verschillende functionele en neurologisch systemen veronderstelt. Dit model draagt de naam DIVA: Directions Into Velocities of Actions. Kenmerkend voor het model is de rol van auditieve, tactiele en kinestetische feedback tijdens de on-line controle van spraak en tijdens spraakontwikkeling. Deze on-line controle wordt gerealiseerd door neurale netwerken die over het gehele brein zijn gedistribueerd. Het contrast met de sequentiële modellen kan dit het beste verduidelijken. In sequentiële modellen komt de productie van spraak tot stand door opeenvolgende functies: (1) motorisch plannen, (2) motorisch programmeren en (3) motorisch uitvoeren. Daarbij kunnen globaal de betrokken neurologische structuren worden aangeduid. Globaal zijn dat: (1) gebied van Broca en SMA (supplementary motor area), (2) primaire motorische cortex, en (3) pyramide-baan, cerebellum, striatum (Kent, 1997). Kenmerkend voor sequentiële modellen is dat de informatiestroom in één richting verloopt; er is geen mechanisme voor on-line feedback-gestuurde bijstelling tijdens het productie-proces.

Volgens het DIVA-model is de programmering van spraak niet gelokaliseerd in uitsluitend de motorische gebieden, maar zijn bij de controle van spraak ook sensorische gebieden en het cerebellum betrokken. Guenther (2003) poneert dat de controle van spraakbewegingen een complexe integratie van meerdere soorten informatie vereist, waaronder auditieve, tactiele, proprioceptieve en motorische representaties. In de eerste plaats is DIVA een neurologisch model. Het model beschrijft welke systemen in het brein betrokken zijn bij spraakproductie: behalve het gebied van Broca, de primaire en secundaire motorische cortex, ook de auditieve spraakgebieden in de temporaal-gyrus (BA22), de oraal-sensorische gebieden in de supramarginale gyrus (BA40), en het cerebellum. Essentieel in de controle is het mechanisme van de 'efference copies': projecties van motorische naar sensorische gebieden die 'target sensations' overbrengen. Deze doel-sensaties specificeren de sensorische informatie die verwacht wordt bij succesvolle uitvoering van het spraakmotorisch plan, en kunnen niet alleen worden vergeleken met de feitelijk binnenkomende sensorische formatie (daar zit een tijdsvertraging tussen) maar kunnen ook direct worden gecontroleerd door een interne monitor: komt dit sensorisch signaal inderdaad overeen met wat ik wil zeggen? Nemen we de auditieve efference copy als voorbeeld. Er zijn projecties van de SMA naar de supramarginale gyrus (BA40) en de auditieve temporaal gyrus (BA22) en vandaar door naar het cerebellum. Het cerebellum kan eventuele discrepanties tussen doelsensatie en feitelijk sensatie of door de monitor geconstateerde discrepanties trachten op te lossen met een snelle bijsturing. Vanuit het cerebellum lopen er projecties naar de primair motorische cortex, van waaruit de commando's naar de spieren vertrekken.

In de tweede plaats is DIVA een functioneel, computationeel model. Omdat de doelsensaties een sturende rol in het productieproces spelen, kunnen de doelsensaties gebruikt worden om het doel te specificeren. Dit impliceert dat het doel van een

motorische opdracht niet (alleen) is gespecificeerd in termen van beweging (kracht, richting, spiercontracties), maar voor een belangrijk deel in termen van *resultaat* van die beweging. Nemen we als voorbeeld de productie van een /k/ in de woorden ‘koel’ en ‘kiel’. Articulatorisch kenmerkend voor de /k/ is een volledige afsluiting met het tonglichaam tegen het velum. Het auditief resultaat (zie voetnoot 1) is de waarneming van een stilte (plofferpauze) gevolgd door ruisburst, gevolgd door spectrale overgangen naar de klinker. Dat er een pauze en een ruisburst worden geproduceerd, dus dat er een volledige afsluiting plaatsvindt, is essentieel. Daarom is er in de articulatorische specificatie van de /k/ slechts weinig variatie in verticale richting toegestaan. Waar precies deze afsluiting plaatsvindt, iets verder naar achteren of iets verder naar voren, is niet zo erg belangrijk: de spectrale kenmerken van de ruisburst en van de formantovergangen zijn tamelijk robuust tegen geringe verplaatsing. Daarom is in Figuur 2 de toegestane variatie in horizontale richting veel groter. Het verschijnsel coarticulatie kan nu worden verklaard uit overwegingen van efficiëntie: de spreker tracht de gewenste auditieve doelen te realiseren met zo min mogelijk beweging. De plaats van afsluiting van /k/ in ‘kiel’ wordt om deze reden wat verder frontaal gerealiseerd dan in ‘koel’.



Figuur 2. Anticipatorische coarticulatie in ‘kiel’ en ‘koel’. Naar: Guenther en Perkell (2004)

Conclusie

Recente ontwikkelingen in de theorievorming over spraakproductie laten zien dat de motorische aansturing van spraak veel meer als een geïntegreerd proces tot stand komt dan volgens TD en GPM-modellen werd verondersteld. Het lijkt niet zo te zijn dat cognitieve processen uitsluitend hiërarchisch bóven motoriek staan in de zin van

Voetnoot 1. Hier staat opzettelijk niet ‘akoestisch resultaat’ omdat de representaties in de hersenen niet bestaan uit akoestische informatie, maar de daarvan afgeleide auditieve informatie. De werking van ons auditieve systeem (hoe nemen we klankkleur waar, welke temporele en toonhoogte-verschillen en -variëaties kunnen we waarnemen, etc.) speelt hierbij derhalve een essentiële rol. De beschrijving van de /k/ is niettemin in akoestische termen, omdat de onderzoeker geen toegang heeft tot de auditieve impressie daarvan bij de luisteraar, behalve dat deze rapporteert een /k/ waar te nemen.

opdrachtgever, gevolgd door een motorisch systeem dat de opdrachten zo goed mogelijk uitvoert. Cognitie en motoriek lijken veel sterker geïntegreerd: cognitie oefent invloed uit op motorische processen, en andersom: cognitieve processen maken gebruik van motorische aspecten van een taak. Evenzo lijkt het niet zo te zijn dat sensorische processen uitsluitend functioneren als controle achteraf of als feedback ter verbetering van een volgende motorische poging. Sensorische processen maken geïntegreerd deel uit van zowel motoriek als cognitie. In het denken over spraak, spraakproductie, spraakstoornissen en spraakontwikkeling zijn dit belangrijke uitgangspunten. Tevens maken deze overwegingen ons bewust van het feit dat psycholinguïstiek en taal-spraakpathologie enerzijds en neuropsychologie anderzijds niet zonder elkaar kunnen.

Literatuurlijst

- Anderson, D.L., Magill, R.A., & Sekiya, H. (2001). Motor learning as a function of KR schedule and characteristics of task-intrinsic feedback. *Journal of Motor Behavior*, 33(1), 59-66.
- Cunnington, R., Egan, G.F., O'Sullivan, J.C., Hughes, A.J., Bradshaw, J.L., & Colebatch, J.G. (2001). Motor imagery in Parkinson's disease: A PET study. *Movement Disorders*, 16, 849-857.
- Diamond, A. (2000). Close interrelation of motor development and cognitive development and of the cerebellum and prefrontal cortex. *Child Development*, 71, 44-56.
- Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (2000). Visuomotor neurons: ambiguity of the discharge or 'motor' perception? *International Journal of Psychophysiology*, 35, 165-177.
- Georgopoulos, A.P. (2000). Neural aspects of cognitive motor control. *Current Opinion in Neurobiology*, 10, 238-241.
- Goldstein, L., & Fowler, C.A. (2003). Articulatory phonology: A phonology for public language use. In N. O. Schiller & A. S. Meyer (Eds.), *Phonetics and phonology in language comprehension and production: Differences and similarities*. Berlin: Mouton de Gruyter.
- Guenther. (2001). Neural Modeling of Speech Production. In B. Maassen, W. Hulstijn, R. D. Kent, H. F. M. Peters, & P. H. H. M. Van Lieshout (Eds.), *Speech Motor Control in Normal and Disordered Speech. Proceedings of the 4th International Speech Motor conference, Nijmegen, June 13-16, 2001*. (pp. 12-15). Nijmegen: Uitgeverij Vantilt.
- Guenther, F.H., & Ghosh, S.S. (2003). A model of cortical and cerebellar function in speech. In Anonymous,
- Guenther, F.H., & Perkell, J.S. (2004). A neural model of speech production and its application to studies of the role of auditory feedback in speech. In B. Maassen, R. D. Kent, H. F. M. Peters, P. H. H. M. Van Lieshout, & W. Hulstijn (Eds.), *Speech motor control in normal and disordered speech*. (pp. 29-50). Oxford: Oxford University Press.
- Heyes, C.M., & Foster, C.L. (2002). Motor learning by observation: evidence from a serial reaction time task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, 55(2), 593-607.
- Kent, R.D. (1997). *The Speech Sciences*. San Diego, London: Singular Publisher Group, Inc.

- Kent, R.D. (2004). Models of speech motor control: Implications from recent developments in neurophysiological and neurobehavioral science. In B. Maassen, R. D. Kent, H. F. M. Peters, P. H. H. M. Van Lieshout, & W. Hulstijn (Eds.), *Speech motor control in normal and disordered speech*. (pp. 1-28). Oxford: Oxford University Press.
- Knock, T.R., Ballard, K.J., Robin, D.A., & Schmidt, R.A. (2000). Influence of order of stimulus presentation on speech motor learning: A principled approach to treatment for apraxia of speech. *Aphasiology*, *14*, 653-668.
- Kuhl, P.K., & Meltzoff, A.N. (1996). Infant vocalizations in response to speech: vocal imitation and developmental change. *Journal of the Acoustical Society of America*, *100*, 2425-2438.
- Levelt, W.J.M. (1989). Speaking: From intention to articulation. In Anonymous, (pp. 406-411 & 446-457). Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Maassen, B., & Bastiaanse, R. (1996). Het taal- en spraakproductiemodel van Levelt. *Stem-, Spraak- en Taalpathologie*, *5*(3), 127-133.
- Masataka, N. (1998). Perception of motherese in Japanese sign language by 6-month-old hearing infants. *Developmental Psychology*, *34*(2), 241-246.
- Meltzoff, A.N. (1999). Origins of theory of mind, cognition and communication. *Journal of Communication Disorders*, *32*(4), 251-269.
- Nishitani, N., & Hari, R. (2000). Temporal dynamics of cortical representation for action. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *97*, 913-918.
- Ochipa, C., Rapcsak, S.Z., Maher, L.M., Rothi, L.J., Bowers, D., & Heilman, K.M. (1997). Selective deficit of praxis imagery in ideomotor apraxia. *Neurology*, *49*(2), 474-480.
- Page, S.J., Levine, P., Sisto, S.A., & Johnston, M.V. (2001). Mental practice combined with physical practice for upper-limb motor deficit in subacute stroke. *Physical Therapy*, *81*(8), 1455-1462.
- Raichle, M. E., Fiez, J. A., Videen, T. O., MaxLeod, A. M., Pardo, J. V., Fox, P. T. et al. (1994). Practice-related changes in human brain functional anatomy during nonmotor learning. *Cerebral Cortex New York*, *4*, 8-26.
- Rizzolatti, G., & Arbib, M.A. (1998). From grasping to speech: imitation might provide a missing link-Reply. *Trends in Neurosciences*, *22*, 152
- Samuel, M., Ceballos-Baumann, A.O., Boecker, H., & Brooks, D.J. (2001). Motor imagery in normal subjects and Parkinson's disease patients; an (H2OPET)-O-15 study. *Neuroreport*, *12*, 821-828.
- Slater, A., & Kirby, R. (1998). Innate and learned perceptual abilities in the newborn infant. *Experimental Brain Research*, *123*(1-2), 90-94.
- Smith, A. (2001). Dynamic Interaction of Motor and Language Factors in the Development of Speech Production. In B. Maassen, W. Hulstijn, R. D. Kent, H. F. M. Peters, & P. H. H. M. Van Lieshout (Eds.), *Speech Motor Control in Normal and Disordered Speech. Proceedings of the 4th International Speech Motor conference, Nijmegen, June 13-16, 2001*. (pp. 351-354). Nijmegen: Uitgeverij Vantilt.
- Smith, A., & Goffman, L. (2004). Interaction of motor and language factors in the development of speech production. In B. Maassen, R. D. Kent, H. F. M. Peters, P. H. H. M. Van Lieshout, & W. Hulstijn (Eds.), *Speech motor control in normal and disordered speech*. (pp. 225-252). Oxford: Oxford University Press.
- Tomassello, M. (1999). The human adaptation for culture. *Annual Review of Anthropology*, *28*, 509-529.

- Van der Merwe, A. (1997). A theoretical framework for the characterization of pathological speech sensorimotor control. In M. R. McNeil (Ed.), *Clinical management of sensorimotor speech disorders*. (pp. 1-25). New York: Thieme Medical Publishers Inc.
- Van Lieshout, P.H.H.M. (2004). Dynamical systems theory and its application in speech. In B. Maassen, R. D. Kent, H. F. M. Peters, P. H. H. M. Van Lieshout, & W. Hulstijn (Eds.), *Speech motor control in normal and disordered speech*. (pp. 51-82). Oxford: Oxford University Press.
- Yoo, E., Park, E., & Chung, B. (2001). Mental practice effect on line-tracing accuracy in persons with hemiparetic stroke: A preliminary study. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 82, 1213-1218.