

# Computersimulation sprechapraktischer Symptome aufgrund funktioneller Defekte

## Symptoms of Apraxia of Speech Resulting from Specific Neural Defects: A Modeling Study

### Autor

B. J. Kröger

### Institut

Klinik für Phoniatrie, Pädaudiologie und Kommunikationsstörungen, Universitätsklinikum Aachen und RWTH Aachen (RWTH Aachen University)

### Schlüsselwörter

- Sprechapraxie
- neurophonetisches Modell
- Sprachproduktion
- motorische Planung
- artikulatorische Planung

### Key words

- apraxia of speech
- neurophonetic model
- speech production
- motor planning
- articulatory planning

### Zusammenfassung

Mittels eines computerimplementierten neuronalen Modells der Sprachproduktion wurde versucht, den Zusammenhang von neuronalen Funktionsstörungen und typischen sprechpraktischen Symptomen zu erhellen. Hierzu wurde im Modell der Ausfall definierter neuronaler Assoziationen und Funktionsmodule simuliert und es wurden die resultierenden Sprechfehler beobachtet. Einige typische sprechpraktische Symptome konnten auf diese Art simuliert werden.

### Abstract

It was attempted to elucidate the relation of functional impairments and typical symptoms of apraxia of speech by means of a computer-implemented neural model of speech production. To this end, the failure of distinct neural associations or of distinct functional modules was simulated and the resulting speech errors were observed. In summary, we were capable of simulating a variety of typical symptoms of apraxia of speech.

### Lernziel

- ▶ Kenntnis der Grundstruktur des dargestellten Modells zur sprechmotorischen Planung
- ▶ Kenntnis typischer vokalischer und konsonantischer artikulatorischer Gesten
- ▶ Kenntnisse zum Aufbau motorischer Ablaufpläne von Silben aus artikulatorischen Gesten

bildes der Sprechapraxie mittels detaillierter quantitativer Modelle der Sprachverarbeitung [1,3,4].

Anhand eines computerimplementierten neuronalen Modells der Sprachproduktion [5] soll in diesem Beitrag gezeigt werden, dass aufgrund von spezifischen Funktionsstörungen in diesem Modell typische Symptome der Sprechapraxie simuliert werden können.

### Bibliografie

DOI <http://dx.doi.org/10.1055/s-0030-1263179>  
 Sprache · Stimme · Gehör  
 2010; 34: 139–145  
 © Georg Thieme Verlag KG  
 Stuttgart · New York  
 ISSN 0342-0477

### Korrespondenzadresse

**Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys.  
 B. J. Kröger**  
 Klinik für Phoniatrie  
 Pädaudiologie und  
 Kommunikationsstörungen  
 Universitätsklinikum Aachen  
 und RWTH Aachen (RWTH  
 Aachen University)  
 Pauwelsstraße 30  
 52074 Aachen  
 bkroeger@ukaachen.de

### Einleitung

Sprechapraxie kann als Störung der motorischen Planung – d.h. als Störung der Umsetzung einer phonologischen Repräsentation in wohl koordinierte Artikulationsabläufe – angesehen werden [1]. Typische Symptome sind:

- ▶ artikulatorisches Suchverhalten,
- ▶ prosodische Störungen, insbesondere monotone Silbenproduktion,
- ▶ Störungen der zeitlich-räumlichen artikulatorischen Koordinierung innerhalb eines Lautes und insbesondere auch in der Verbindung von Lauten [2].

Bisher ist es aber noch nicht gelungen, diese Sprechdefizite (Symptome) auf neurophysiologische Ursachen zurückzuführen. Hierzu fordern mehrere Autoren die Untersuchung des Störungs-

Dabei beschränken wir uns auf simulierte funktionelle Defekte, die – ausgehend von der Definition der Sprechapraxie – der artikulatorischen Planung von Silben, Wörtern und ganzen Äußerungen zugeordnet werden können.

### Ebene der motorischen Planung

Innerhalb unseres quantitativen neuronalen Modells der Sprachproduktion und Sprachwahrnehmung [5] können die Ebene der linguistischen Verarbeitung (symbolisch-diskrete kognitive Ebene), die Ebene der motorischen Planung und die nachgeordnete Ebene der motorischen Ausführung unterschieden werden (○ **Abb. 1**).

### Module der linguistischen, motorischen und sensorischen Verarbeitung

Unterschieden werden:

- ▶ neuronale Karten (schwarz umrandete Kästchen),
- ▶ neuronale Assoziationen (Doppelpfeile),
- ▶ neuronale Weiterleitungen (einfache Pfeile) und
- ▶ neuronale Prozessmodule (nicht umrandete Kästchen).

**Neuronale Karten** Sie repräsentieren – je nach Aktivierungsmuster der innerhalb einer Karte angeordneten Modellneuronen – bestimmte motorische, sensorische, phonetische oder phonemische Zustände. So realisiert ein Modellneuron der phonemischen Karte die phonemische Repräsentation einer Silbe (z. B. /pa/) bzw. ein Modellneuron der phonetischen Karte eine Realisierung dieser Silbe. Ferner repräsentiert ein definiertes Muster aus neuronaler Aktivität mehrerer Modellneuronen der moto-

rischen Karte den zugehörigen motorischen Plan (◉ Abb. 2) und definierte Muster an neuronaler Aktivität mehrere Modellneuronen der sensorischen Karten die zugehörigen sensorischen Zustände; z. B.:

- ▶ das auditive und visuelle Muster der Artikulation einer Silbe,
- ▶ die taktile Vorstellung des sich zeitlich ändernden Ober- und Unterlippenkontakts (bzw. des Gaumen- und Zungenkontakts),
- ▶ die propriozeptive Vorstellung der Kiefer- und Zungenrückenabsenkung.

Der Begriff „Modellneuronen“ wurde gewählt, da die im Computermodell simulierten neuronalen Vorgänge eine starke Vereinfachung der realen Vorgänge darstellen.

**Neuronale Assoziationen** Doppelpfeile in ◉ Abb. 1 kennzeichnen komplexe neuronale Assoziationen, z. B. von Modellneuron innerhalb der phonetischen Karte, das einen spezifischen phonetischen Zustand beschreibt, hin zu vielen Modellneuronen innerhalb der neuronalen Karte des motorischen Plans. Vergleichbar komplex sind die Assoziationen von der phonetischen Karte zu den sensorischen Karten. Der Doppelpfeil deutet darüber hinaus an, dass die Aktivierungen in beide Richtungen erfolgen können.

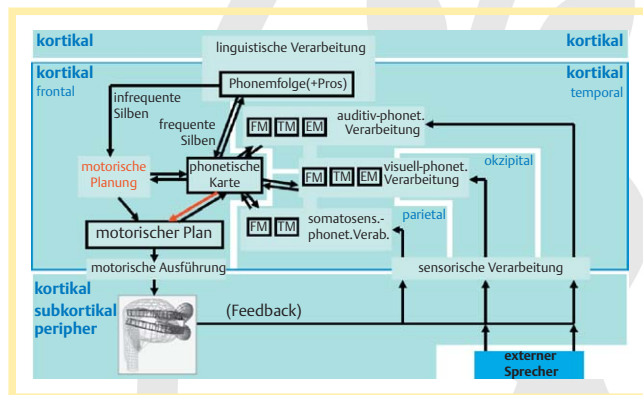
**Neuronale Weiterleitungen** Einfache Pfeile in ◉ Abb. 1 repräsentieren neuronale Projektionen, z. B. zur Weiterleitung von Signalen.

**Neuronale Prozessmodule** Nicht umrandete Kästen in ◉ Abb. 1 kennzeichnen komplexe Prozessmodule. Es wird davon ausgegangen, dass die neuronalen Prozessmodule zur linguistischen Verarbeitung, zur motorischen Ausführung, wie auch die periphere und primär kortikale sensorische Verarbeitung (◉ Abb. 1) bei Sprechapraxie nicht gestört sind. Ebenfalls als nicht gestört wird die sensorisch-phonetische Verarbeitung angenommen. Innerhalb der sensorisch-phonetischen Prozessmodule (◉ Abb. 1) werden zeitlich punktuelle, aber komplexe sensorische Muster (z. B. die Zeitstruktur eines akustischen Signals innerhalb eines kleinen Zeitintervalls) auf wenige sensorische Parameterwerte (hier auf die bark-skalierten Werte der ersten 3 Formanten) reduziert und über das Zeitintervall ganzer Silben oder Worte im Kurzzeitgedächtnis des Modells gespeichert.

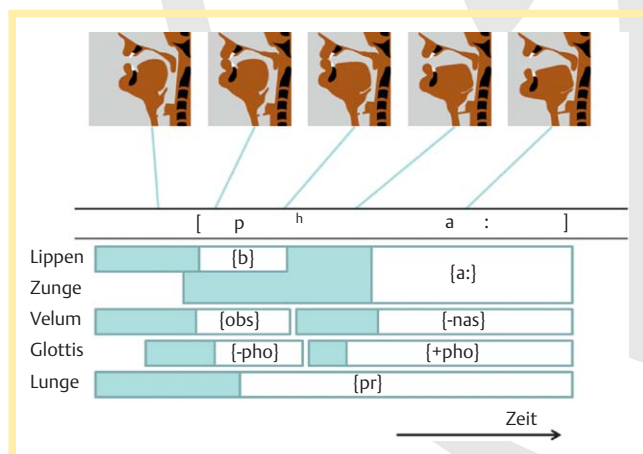
Es ist anzumerken, dass die neuronalen Assoziationen zwischen der phonetischen und der motorischen bzw. den sensorischen Karten nur die motorischen bzw. sensorischen Muster der häufigen (frequenten) Silben der vom Modell erlernten Sprache repräsentieren. Deshalb kann die phonetische Karte zusammen mit ihren Assoziationen zur phonemischen und motorischen Karte und zu den sensorischen Karten auch als Silbenspeicher (Silbenlexikon, vgl. [6]) bezeichnet werden.

**Sensorische Muster** Für jede sensorische Modalität (auditiv, visuell, somatosensorisch) werden 2 oder 3 unterschiedliche neuronale Karten für die aus unterschiedlichen Quellen gewonnenen sensorischen Muster angenommen:

- ▶ eine Karte beinhaltet die sensorischen Muster zu trainierten (d. h. während des Spracherwerbs erlernten) sensorischen Mustern (TM, s. ◉ Abb. 1; diese sind intern aktivierbar; d. h. die sensorische Vorstellung einer gelernten Silbe kann bei „innerem Sprechen“ aktiviert werden),



**Abb. 1** Ebene der motorischen Planung (blau umrandet) innerhalb des Modells der Sprachproduktion und [8] Sprachwahrnehmung mit Kennzeichnung der bei Sprechapraxie potenziell lädierten neuronalen Assoziation und des potenziell lädierten Moduls der motorischen Planung (rot). Zur weiteren Erläuterung des Modells siehe Text. EM: vom Kommunikationspartner produziertes Signal; FM: vom Sprecher produziertes Feedbacksignal; TM: trainierte sensorische Muster.



**Abb. 2** Motorischer Plan einer Realisierung der Silbe /pa/. Oben: Mediosagittalschnittbilder des Sprechtrakts zu bestimmten Zeitpunkten der Äußerung [10]. Mitte: phonetische Transkription. Unten: motorischer Plan der Silbe; hellblaue Kästchen kennzeichnen die Dauer der Bewegungsphase einer Geste (starke Bewegung der beteiligten Artikulatoren), weiße Kästchen die Dauer der Zielphase der Geste mit nur geringer Weiterbewegung der Artikulatoren. Die Artikulatorien befinden sich hier im Zielgebiet der Geste (z. B. ausgebildete Enge, ausgebildeter Verschluss, ausgebildete Öffnung). Die Symbole der Gesten werden in ◉ Tab. 3 erläutert.

Sonderdruck für private Zwecke des Autors

- ▶ eine weitere Karte beinhaltet die sensorischen Muster zu momentan extern (d.h. von einem Kommunikationspartner) produzierten Signalen (EM),
- ▶ eine letzte Karte beinhaltet die sensorischen Muster von momentan vom Sprecher (d.h. vom Modell) selbst produzierten Feedbacksignalen (FM).

Die Speicherung dieser Muster in unterschiedlichen neuronalen Karten ermöglicht auf der Ebene der sensorisch-phontischen Verarbeitung insbesondere den Vergleich dieser Muster, wie er zur Korrektur von gerade realisierten Sprechmustern nötig ist (vgl. [7]).

### Modul der motorischen Planung

Ein aus der Sicht der Sprechapraxie bedeutsames Prozessmodul ist das Modul der motorischen Planung. Dieser Modul initiiert beim frühen Spracherwerb das „Babbeln“ (Lallen, siehe auch [8]) des Säuglings und setzt damit den Aufbau der phonetischen Karte und den Aufbau der komplexen neuronalen Assoziationen von der phonetischen Karte hin zur motorischen bzw. zu den senso-

rischen Karten (d.h. zum Aufbau des Silbenspeichers) in Gang. Wir nehmen an, dass dieses Prozessmodul 4 hierarchisch aufeinander aufbauende Ebenen umfasst (☉ Tab. 1).

**Ebene 1** Zunächst sorgt dieses Modul zu Beginn des Spracherwerbs für die Initiierung von Artikulationsbewegungen (Babbeln oder Lallen). Diese Bewegungen können auch als Protogesten bezeichnet werden (☉ Tab. 2).

**Ebene 2** Während der sich im frühen Spracherwerb anschließenden Imitationsphase [5] vergleicht das Kind dann die auditorischen Feedbackmuster von ersten aus Protogesten aufgebauten Protosilben mit den von Kommunikationspartnern (z. B. von der Mutter) vorgegebenen sprachspezifischen Silbenmustern und erlernt durch „Feinabstimmung“ der motorischen Parameter der Protogesten (z. B. bei konsonantischen Verschlussgesten die präzise Einstellung des Artikulationsortes, der Verschlussdauer, und einer spezifischen Artikulatorgeschwindigkeit für die Verschlussbildung und -lösung) dann die Realisierung sprachspezifischer Gesten (☉ Tab. 3).

**Ebene 3** Darüber hinaus wird nun auch die exakte zeitliche Koordinierung dieser sprachspezifischen Gesten erlernt (☉ Abb. 2).

**Ebene 4** Auf der obersten (vierten) Ebene der motorischen Planung ist dann das Wissen zur zeitlichen Koordinierung von Silben zu Wörtern und von Wörtern zu Sätzen einschließlich der Modifizierung von Gesten zur Realisierung unterschiedlicher Betonungs- und Intonationsmuster zusammengefasst. Diese Ebene ist im Modell zurzeit noch nicht realisiert.

Tab. 1 Ebenen des neuronalen Prozessmoduls zur motorischen Planung.

Ebene der motorischen Planung	Gespeichertes Wissen zur ...
1	Produktion von Protogesten (☉ Tab. 2)
2	Produktion von sprachspezifischen Gesten (☉ Tab. 3)
3	zeitlichen Koordinierung von Gesten zu Silben (☉ Abb. 2)
4	Produktion von Wörtern und Sätzen (inkl. Prosodie)

Tab. 2 Liste von vorsprachlichen Protogesten.

Abkürzung	Beschreibung der Protogeste
Proto_Vok_tief	Öffnung des Mundes und Absenkung des Zungenrückens; [a]-ähnlicher Öffnungslaut
Proto_Vok_hoch_vorn, _hinten	Öffnung des Mundes und Anhebung des Zungenrückens; [i]-bis-[e]- bzw. [u]-bis-[o]-ähnlicher Öffnungslaut
Proto_Kons_lab, _api, _dors	Anhebung des Zungenrückens zum Verschluss des Mundraums; [p], [t]- bzw. [k]-ähnlicher Verschlusslaut
Proto_Nas, _Obs	Absenkung bzw. Anhebung des Gaumensegels; Nasallaut bzw. Obstruent (Plosiv- oder Frikativlaut)
Proto_SL, _SH	Öffnung bzw. Schließung der Stimmritze; Stimmlosigkeit bzw. Stimmhaftigkeit

Tab. 3 Liste von sprachspezifischen Gesten für das Standarddeutsche (nicht vollständig; vgl. [9]; Abkürzungen: obs = obstruent; pr = pressure). Involvierter Artikulator Zungenbein ermöglicht die Höhenverschiebung des Kehlkopfs.

Symbol	Beschreibung der Geste	Involvierte Artikulatoren
{i:}	traktformende Geste des langen /i/	Unterkiefer, Zunge, Lippen, Zungenbein
{u:}	traktformende Geste des langen /u/	Unterkiefer, Zunge, Lippen, Zungenbein
{a:}	traktformende Geste des langen /a/	Unterkiefer, Zunge, Lippen, Zungenbein
...	...	...
{b}	labiale verschlussbildende Geste	Lippen, Unterkiefer
{d}	apikale verschlussbildende Geste	Zunge, Unterkiefer
{g}	dorsale verschlussbildende Geste	Zunge, Unterkiefer
{v}	labiodentale engebildende Geste	Lippen, Unterkiefer
{z}	alveolare engebildende Geste	Zunge, Unterkiefer
{Z}	postalveolare engebildende Geste	Zunge, Unterkiefer
...	...	...
{nas}	Geste zur Absenkung des Gaumensegels (velopharyngeale Öffnung)	Gaumensegel
{-nas}	Geste zur Anhebung des Gaumensegels	Gaumensegel
{obs}	Geste zur Anhebung des Gaumensegels (dichter velopharyngealer Verschluss)	Gaumensegel
...	...	...
{pho}	Geste zum glottalen Verschluss mit Möglichkeit der Phonation	Ariknorpel, Stimmritze
{-pho}	Geste zur glottalen Öffnung mit Unmöglichkeit der Phonation	Ariknorpel, Stimmritze
...	...	...
{pr}	Geste zum Aufbau eines Lungenüberdrucks	Zwerchfell, Brustkorb

Das Wissen zur zeitlichen Koordinierung entsteht erst mit der Ausbildung der phonetischen Karte und der Ausbildung der neuronalen Phonetik-Motorik-Assoziationen für die häufigen Silben.

nierung einer seltenen (infrequenten) Silbe (z.B./ple/) bestimmen, indem Information zur zeitlichen Koordinierung einer phonetisch ähnlichen frequenten Silbe (z.B./pli/ oder /kle/) über die phonetische Karte gewonnen wird (siehe Doppelpfeil zwischen Modul zur motorischen Planung und der phonetischen Karte in **Abb. 1**).

**Experiment zum frühen Spracherwerb**

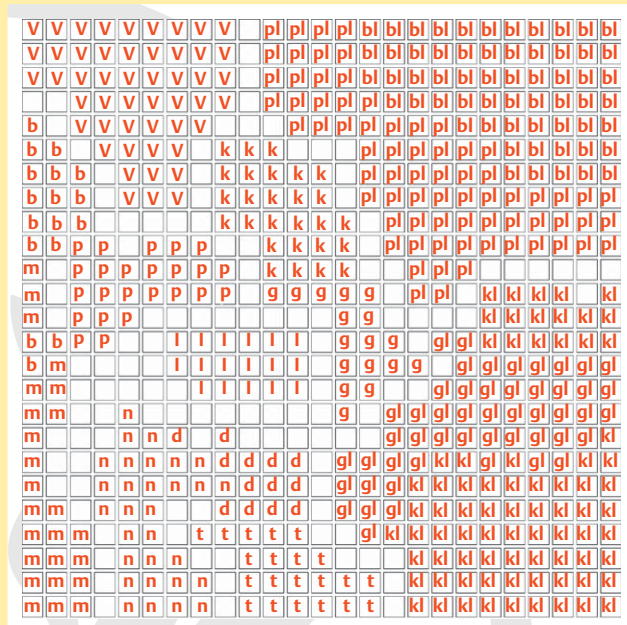
In einem ersten Experiment wurde der frühe Spracherwerb eines sprachgesunden Kindes simuliert.

**Versuchsanordnung** Das Modell erlernte dabei eine „Modellsprache“, die 5 Vokale (/i/, /e/, /a/, /o/ und /u/ (vgl. [5]) und 9 Konsonanten (/b/, /d/, /g/, /p/, /t/, /k/, /m/, /n/, /l/) umfasste. Die Silbenstruktur dieser Modellsprache umfasst CV-Silben (C=Konsonant und V=Vokal) mit allen Vokal-Konsonant-Kombinationen und CCV-Silben, bei denen aber nur /b/, /g/, /p/ oder /k/ als erster Konsonant und nur /l/ als 2. Konsonant in Kombination mit allen Vokalen erlaubt ist.

**Befund** Die nach den simulierten Lernprozessen resultierende Struktur der neuronalen phonetischen Karte dieses Sprechers (**Abb. 3**) zeigt, dass die Silbenstrukturen V, CV und CCV jeweils räumlich getrennt voneinander gespeichert sind.

**Auswertung** Auf der Basis dieses Ergebnisses zur räumlichen Anordnung von Silbenmustern kann angenommen werden, dass somit die artikulatorischen Pläne entweder ganz zerstört sind (gesamte Karte zerstört; kein sprachspezifischer Vokal oder keine Silbe abrufbar) oder dass Zerstörungen im Bereich CCV, CV,

oder V vorliegen (Zerstörungen ganzer Gebiete, Teilgebiete oder auch aneinandergrenzender Gebiete oder Teilgebiete) und damit entsprechende artikulatorische Pläne nicht abrufbar sind.



**Abb. 3** Anordnung der häufigen Silben der Modellsprache in der phonetischen Karte. Das Gebiet V repräsentiert eine (aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargelegte) Anordnung aller 5 Vokale der Modellsprache (vgl. [5]). Die mit konsonantischen Symbolen gekennzeichneten Gebiete repräsentieren CV- oder CCV-Silben, wobei ebenfalls die Anordnung der Vokale in jedem einzelnen konsonantischen Gebiet aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht angegeben ist.

**Tab. 4** Kombinationen von Störungen innerhalb des Moduls der motorischen Planung und innerhalb der neuronalen Assoziation zwischen phonetischer und motorischer Karte und daraus resultierende Sprechfehler.

Modellsprecher	Erhaltenes Wissen (Phonetik-nach-Motorplan-Assoziation)	Erhaltene Ebene (Prozessmodul der motorischen Planung)	Im Modell auftretende Symptome (Sprechfehler)
1 schwere Form der Sprechapraxie		- Ebene 1: Protogesten	- vokalisches Suchverhalten - keine CV-, CCV-Silben - Dysprosodie
2	- V	- Ebene 1: Protogesten - Ebene 2: vokalische Gesten	- konsonantisches Suchverhalten - Fehler in der zeitlichen Koordinierung von Gesten bei CV-Silben - keine CCV-Silben - Dysprosodie
3a	- V - CV	- Ebene 1 - Ebene 2: alle sprachspezifischen Gesten	- Fehler in der zeitlichen Koordinierung von Gesten bei infrequenten CV-Silben - keine CCV-Silben - Dysprosodie
3b	- V - CV	- Ebene 1 & 2 - Ebene 3: zeitliche Koordinierung von CV-Silben	- Fehler in der zeitlichen Koordinierung von Gesten bei allen CCV-Silben - Dysprosodie
4a	- V - CV - CCV	- Ebene 1 und 2 - Ebene 3: zeitliche Koordinierung von CV-Silben	- Fehler in der zeitl. Koordinierung von Gesten bei infrequenten CCV-Silben; - Dysprosodie
4b leichte Form der Sprechapraxie	- V - CV - CCV	- Ebene 1, 2 und 3	- Fehler in der zeitlichen Koordinierung von Silben zu Wörtern und Sätzen - Dysprosodie
normaler Modellsprecher	- V - CV - CCV	- Ebene 1, 2, 3 und 4	- keine systematischen Fehler

Sonderdruck für private Zwecke des Autors

## Modellierung der Sprechapraxie

Das oben beschriebene Modell des Normalsprechers kann als Ausgangspunkt für die Simulation verschiedener Formen der Sprechapraxie, also als „Modellsprecher vor Schlaganfall“, angesehen werden. Es werden nun unterschiedlich umfassende funktionelle Störungen in dieses Modell eingebracht, um verschiedene Sprechertypen nach Schlaganfall zu simulieren. Hier werden – nach Schweregrad geordnet – 4 hypothetische Störungen und die daraus resultierenden Typen von Sprechfehlern vorgestellt (☉ Tab. 4). Bei einigen Modellsprechern werden darüber hinaus Simulationen (Experimente) vorgestellt, deren Resultate sprachpraktische Symptome darstellen.

### Modellsprecher 1: Artikulatorisches Suchverhalten

Zur Simulation des bei schwerer Sprechapraxie typischerweise auftretenden artikulatorischen Suchverhaltens ist es nötig, im Modell die gesamten neuronalen Assoziationen zwischen phonetischer Karte und motorischer Karte außer Funktion zu setzen. Darüber hinaus ist es nötig, den Modul der artikulatorischen Planung so stark außer Funktion zu setzen, dass nur noch Modulebene 1 (☉ Tab. 1) ungestört bleibt.

Das Modell ist nun nicht mehr in der Lage, Laute, Silben oder Wörter der Modellsprache zu produzieren, verfügt aber neben der linguistischen Kompetenz noch über das Wissen, wie die Laute, Silben und Wörter der Modellsprache klingen bzw. wie sich deren Produktion „anfühlt“, da die neuronalen Assoziationen zwischen der phonetischen Karte und allen sensorischen Karten intakt sind.

### Experiment

**Ziel** Der Modellsprecher soll den Vokal /u/ der Modellsprache realisieren.

**Ablauf** Durch die Aktivierung des zugehörigen Modellneurons innerhalb der phonologischen Karte (☉ Abb. 1) wird über die phonetische Karte der sensorische (auditive, visuelle und somatosensorische) Zustand dieses Vokals aktiviert. Das Modell „weiß“ nun, wie der Vokal klingt (auditives Muster) und wie sich die Produktion des Vokals „anfühlt“ (somatosensorisches Muster).

Das Modell versucht, über den Modul der artikulatorischen Planung (Ebene 1) zunächst ohne Phonation die Zungen-, Kiefer- und Lippenstellung eines phonetisch ähnlichen Protovokals zu realisieren und kann dann das somatosensorische (d. h. das propriozeptive und taktile) Resultat seiner Produktion mit dem abgespeicherten sensorischen Wissen zum Vokal /u/ vergleichen, das im noch intakten Teil des Silbenspeichers vorgehalten wird. In einem „Trial-and-Error“-Verfahren sucht es so lange nach einer (stummen) Vokalartikulation, bis das somatosensorische Feedbacksignal mit dem abgespeicherten somatosensorischen Signal für /u/ übereinstimmt.

**Ergebnis** Da dem Modell zu diesem Zeitpunkt noch kein Wissen zur Koordinierung von Artikulation und Phonation vorliegt, wird diese Koordinierung erst in einem 2. Schritt trainiert. Somit versucht der Modellsprecher nun auch noch gleichzeitig zu phonieren, um das Resultat seines stummen Suchverhaltens auch auditiv überprüfen zu können und um die Realisierung des

Vokals ggf. mittels auditiver Kontrolle – ähnlich wie im frühen Spracherwerb – zu verbessern.

### Modellsprecher 2: Konsonantisches Suchverhalten und Fehler der zeitlichen Koordinierung von Artikulationsbewegungen für CV-Silben

Zur Simulation konsonantischen Suchverhaltens und zur Simulation von Fehlern in der zeitlichen Koordinierung von CV-Silben müssen die gleichen neuronalen Läsionen wie bei Sprecher 1 vorliegen. Jedoch ist jetzt die phonetisch-motorische Assoziation für Vokale intakt.

Vokale der Modellsprache können gebildet werden, jedoch müssen sprachspezifische Konsonanten „gesucht“ werden. Darüber hinaus kann die korrekte zeitliche Koordinierung der Gesten auch innerhalb einfacher CV-Silben nur mittels eines „Trial-and-Error“-Verfahrens ausprobiert werden.

### Experiment

Produktion der Silbe /pa/:

- ▶ Die Auswahl eines „falschen“ Artikulators für die konsonantische Konstriktion ist möglich und es entstehen zunächst auch apikale und dorsale Verschlussbildungen (konsonantisches Suchverhalten).
- ▶ Aufgrund falscher zeitlicher Koordinierung von Verschlussgeste, glottaler Öffnungs- und Schließgeste und vokalischer Geste entstehen auch bei richtiger Artikulatorwahl für die Realisierung des /p/ unterschiedliche Segmentfolgen; z. B. [p<sup>h</sup>əa] aufgrund eines zu späten Einsetzens der Vokalgeste oder [h<sup>b</sup>ba] bzw. [ba] aufgrund des zu frühen Einsetzens der glottalen Öffnungsgeste vor bzw. während labialen Verschlussgeste (vgl. mit ☉ Abb. 2: bei korrekter zeitlicher Koordinierung wird die glottale Öffnungsgeste zeitlich spät innerhalb des Verschlussintervalls der labialen Verschlussgeste realisiert, sodass die maximale glottale Öffnung mit dem Zeitpunkt der labialen Verschlusslösung zusammenfällt).

### Modellsprecher 3a: Fehler der zeitlichen Koordinierung infrequenter CV-Silben

Die phonetisch-motorische Assoziation ist nun für V und CV intakt. Damit sind auch Ebene 1 und 2 der motorischen Planung intakt. Alle sprachspezifischen Gesten sind nun bekannt. Das Wissen zur zeitlichen Koordinierung von CV-Gesten liegt allerdings nicht im Modul zur motorischen Planung vor, sodass (wie oben beschrieben) infrequente Silben nur aufgrund der Übernahme der Parameter zur zeitlichen Koordinierung von phonetisch ähnlichen Silben, die in der phonetischen Mappe vorliegen (also phonetisch ähnliche frequente Silben), gebildet werden können. Ist also – wie hier angenommen – die neuronale Verbindung von phonetischer Karte und dem Modul der motorischen Planung nicht gestört (☉ Abb. 1), kann die zeitliche Koordinierung von Gesten infrequenter Silben nun recht schnell wiedererlernt werden.

### Modellsprecher 3b: Fehler in der zeitlichen Koordinierung von CVV-Silben

Neben der intakten phonetisch-motorischen Assoziation für V und CV sind bei diesem Modellsprecher nun auch Ebene 1 und 2 der motorischen Planung vollständig intakt. Vor allem die Bildung von CCV-Silben ist nun problematisch.

## Experiment

Produktion der Silbe /gla/. Aufgrund falscher zeitlicher Koordination der beteiligten konsonantischen und vokalischen Gesten entstehen hier insbesondere Insertionen des Schwa-Lautes ([gəla]).

### Modellsprecher 4a: Fehler in der zeitlichen Koordination infrequenter CCV-Silben

Bei diesem Modellsprecher ist nun die phonetisch-motorische Assoziation vollständig intakt. Im Modul der motorischen Planung liegen aber die gleichen Störungen wie bei Sprecher 3b vor. Somit können nun zwar – im Unterschied zu Sprecher 3a – frequente, nicht aber infrequente CCV-Silben gebildet werden. Die zeitliche Koordination der Gesten dieser Silben muss von phonetisch ähnlichen frequenten CCV-Silben aus dem Silbenspeicher kopiert werden (Assoziation zwischen phonetischer Karte und Modul der motorischen Planung, siehe oben).

### Modellsprecher 4b: Fehler in der zeitlichen Koordination von Silben und Dysprosodie

Zur Simulation von Fehlern zur zeitlichen Koordination von Silben und zur Simulation von Dysprosodie sind nun im Unterschied zu Sprecher 4a auch die Regeln zur zeitlichen Koordination von CCV-Silben im Modul der motorischen Planung verankert. Die Ebenen 1, 2, und 3 dieses Moduls sind hier intakt. Es sind nun alle Vokale, CV- und CCV-Silben bildbar. Nur das Wissen zur zeitlichen Koordination von Silben zu Wörtern und Sätzen und zur Modifikation von Silben im Fall von Betonung bzw. Reduktion ist nicht vorhanden.

Die Bildung von Wörtern oder Sätzen ist von den vorhergehenden gestörten Modellsprechern nicht versucht worden, da diese Sprecher noch starke Probleme bei der Bildung einzelner Silben aufwiesen. Ansonsten gelten die bei Modellsprecher 4b geschilderten auftretenden Sprechdefizite, aber auch für alle vorhergehenden gestörten Modellsprecher: Die Wort- und Satzproduktion klingt bei Modellsprecher 4b monoton, alle Silben werden mit gleicher Länge realisiert und die Betonung aller Silben ist monoton gleichartig. Es treten Pausen zwischen den Silben auf, da die Koordination der Gesten an den Silbengrenzen erst wieder erlernt werden muss.

## Diskussion und Ausblick

Das hier dargestellte Modell der Sprachproduktion [5] integriert über das Modell von Guenther [7] hinausgehend ein Konzept für den motorischen und sensorischen Silbenspeicher (frequente Silben; vgl. [11]).

**Voraussetzungen des eigenen Modells** In unserem Modell wird postuliert, dass während des frühen Spracherwerbs nicht nur die motorischen, sondern auch die sensorischen Muster frequenter Silben (oder auch frequenter einfacher Wörter) als Ganzes erlernt und gespeichert werden. Die Speicherung dieses Wissens erfolgt in unserem Modell in den synaptischen Verbindungsgewichten zwischen phonetischer Karte und der motorischen bzw. den sensorischen Karten für jede einzelne frequente Silbe. Die Ausbildung einer – in unserem Modell angenommenen – phonetischen Karte resultiert aus der Tatsache, dass wir selbstorganisierende neuronale Netze (Kohonen-Netze

und deren Derivate, siehe [12]) zur Realisierung des Silbenspeichers annehmen (vgl. Li et al. [13] zur Modellierung der Entstehung des mentalen Lexikons als Prozess des Spracherwerbs).

Ein wichtiges Merkmal unseres Modells ist darüber hinaus, dass die beiden Routen zur Verarbeitung frequenter Silben (via phonetische Karte, **Abb. 1**) und zur Verarbeitung infrequenter Silben (via Modul zur motorischen Planung, **Abb. 1**) nicht – wie bei anderen Autoren angenommen – voneinander unabhängig sind, sondern in enger Abhängigkeit zueinander stehen (siehe neuronale Assoziation zwischen phonetischer Karte und Modul zur motorischen Planung in **Abb. 1**). Damit können Regeln zur Parameterspezifikation der zeitlichen Koordination infrequenter Silben aus der Parameterspezifikation phonetisch ähnlicher frequenter Silben – also aus dem in der phonetischen Karte und in den phonetisch-motorischen Assoziationen gespeicherten Wissen – erworben werden (Pfeil zum Modul der motorischen Planung in **Abb. 1**).

Werden nun Regeln anhand des „Abschauens“ von frequenter Silben im Modul zur motorischen Planung etabliert, so erlauben diese Regeln dann den schnelleren Aufbau der phonetischen Karte und der phonetisch-motorischen und damit auch der phonetisch-sensorischen Assoziationen (Pfeil zur phonetischen Karte in **Abb. 1**).

**Zwei-Routen-Ansatz** Der Zwei-Routen-Ansatz in seiner einfachen Form nach Varley und Whiteside [14] wird aus der Sicht sprechapraktischer Störungen heute kritisch diskutiert [15–17]. Die hier vorgestellte modifizierte Version des Zwei-Routen-Ansatzes mit neuronaler Kopplung ist eher in der Lage, den bei Sprechapraxie auftretenden Silbenfrequenzeffekt und Silbenstruktureffekt [15: S. 155] zu erklären. So kann der kontinuierliche Anstieg der Fehlerrate als Funktion der Häufigkeit dieser Silben in unserem Ansatz genau auf diese Kopplung zurückgeführt werden. Es kann angenommen werden, dass für häufige, aber bei einem Patienten im lädierten Silbenspeicher nicht mehr aufzufindende Silben eher phonetisch ähnliche Silben im (Rest-) Silbenspeicher zu finden sind als für seltene Silben. Der Silbenstruktureffekt kann ansatzweise ebenfalls mittels unseres Modells erklärt werden: Die Simulation des Spracherwerbs zeigt, dass beispielsweise CV- und CCV-Silben in unterschiedlichen Gebieten des Silbenspeichers liegen, die damit wechselseitig gestört sein könnten.

**Charakteristika des eigenen Modells** Zwar baut unser Modell auf dem von Guenther [7] vorgestellten Ansatz auf, geht aber über diesen Ansatz hinaus. Dies erscheint bei unserer Zielsetzung der Erklärung sprechapraktischer Symptome auch geboten, da sprechapraktische Defizite nicht nur auf ein pathologisch verstärktes sensorisches Feedback zurückgeführt werden können [4], zumal dieser Pathomechanismus von anderen Autoren auch zur Modellierung des Stotterns herangezogen wird [18]. Symptome wie artikulatorisches Suchverhalten, starke segmentale Änderungen aufgrund von fehlerhafter zeitlicher Koordination von Gesten und Dysprosodie können anhand des Guenther-Modells in seiner momentanen Form nicht erklärt werden (s. auch [19]).

## Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) Projekt Nr. Kr 1439/13-1 und Projekt Nr. Kr 1439/15-1.

## Fazit

In dem hier dargestellten Modell können zwar Aussagen über die Produktionsfehler nach spezifischen neuronalen Funktionsstörungen gemacht werden, jedoch ist es nur grob möglich, diese Funktionsstörungen kortikalen Läsionsgebieten zuzuordnen, da das hier dargestellte Modell funktional ist und die Zuordnung von den hier beschriebenen Funktionsmodulen zu spezifischen Hirnregionen oftmals schwierig ist (vgl. [7,20]). Dies resultiert auch aus der Tatsache, dass die meisten funktionalen neuronalen Assoziationen in kortikalen und subkortikalen Regionen weiträumig distribuiert sind [21], sodass schon deshalb die Frage nach einer genauen Lokalisierung einer funktionalen Störung nicht sinnvoll erscheint. Darüber hinaus können anhand unsers Modells bisher auch keine Aussagen zum Wiedererlernen der korrekten motorischen Sprechmuster nach Schlaganfall gemacht werden, da ja die vom Modell angenommenen neuronalen Karten und Assoziationen für die Aktivierung dieser Muster gerade gestört sind. Es liegt zurzeit noch außerhalb der Möglichkeiten unseres Modells, Annahmen darüber zu machen, wie der Patient nach Schlaganfall korrekte motorische Silbennuster in alternativen nicht lädierten Hirnarealen speichert. Dennoch kann das hier vorgestellte quantitative neuronale Modell der Sprachproduktion als ein wichtiger Baustein zur Diskussion sprechapraktischer Störungen angesehen werden. Aufgrund der funktionalen Detailliertheit dieses Modells sind wir nun nicht nur in der Lage, ein differenzierteres Bild der sensomotorischen Funktion des Sprechens zu geben, sondern – wie in diesem Beitrag beschrieben – nun auch in der Lage spezifische sprechmotorische Störungen in einen Zusammenhang mit spezifischen neurofunktionalen Modulen und neurofunktionalen Assoziationen zu stellen.

## Zur Person



Prof. Dr. Bernd J. Kröger absolvierte 1979–1985 sein Physikstudium an der Universität Münster (Dipl.-Phys.), promovierte 1989 und habilitierte sich 1997 an der Universität zu Köln im Fach Phonetik bei Univ.-Prof. Dr. Georg Heike (Direktor des Instituts für Phonetik der Universität zu Köln). Bis 1998 arbeitete er am Institut für Phonetik der Universität zu Köln als wissenschaftlicher

Assistent mit dem Schwerpunkt artikulatorische und akustische Phonetik. 1999–2001 war er als Gastprofessor am Institut für Deutsche Sprache und Linguistik der Humboldt-Universität zu Berlin und am Zentrum für Allgemeine Sprachwissenschaft (ZAS) in Berlin tätig. Seit 2001 ist er wissenschaftlicher Angestellter an der Klinik für Phoniatrie, Pädaudiologie und Kommunikationsstörungen des Universitätsklinikums Aachen (Direktorin: Univ.-Prof. Dr. med. Christiane Neuschaefer-Rube) und außerplanmäßiger Professor an der medizinischen Fakultät der RWTH Aachen.

## Literatur

- 1 Croot K. Diagnosis of AOS: definition and criteria. *Semin Speech Lang* 2002; 23: 267–279
- 2 Ziegler W. Sprechapraxie: Symptome und Erklärungen. *Sprache Stimme Gehör* 2010; 34: 122–127
- 3 Miller N. The neurological bases of apraxia of speech. *Semin Speech Lang* 2002; 23: 223–230
- 4 Terband H, Maassen B, Guenther FH et al. Computation neural modeling of motor control in childhood apraxia of speech. *J Speech Lang Hear Res* 2009; 52: 1595–1609
- 5 Kröger BJ, Kannampuzha J, Neuschaefer-Rube C. Towards a neurocomputational model of speech production and perception. *Speech Commun* 2009; 51: 793–809
- 6 Levelt WJM, Wheeldon L. Do speakers have access to a mental syllabary? *Cognition* 1994; 50: 239–269
- 7 Guenther FH. Cortical interaction underlying the production of speech sounds. *J Commun Disord* 2006; 39: 350–365
- 8 Kröger BJ, Birkholz P, Neuschaefer-Rube C. Ein neuronales Modell zur sensomotorischen Entwicklung des Sprechens. *Laryngo-Rhino-Otologie* 2007; 86: 365–370
- 9 Kröger BJ, Birkholz P. A gesture-based concept for speech movement control in articulatory speech synthesis. In: Esposito A, Faundez-Zanuy M, Keller E, Marinaro M, eds. *Verbal and nonverbal Communication Behaviours*. LNAI 4775. Berlin: Springer; 2007; 174–189
- 10 Kröger BJ. Ein visuelles Modell der Artikulation. *Laryngo-Rhino-Otologie* 2003; 82: 402–407
- 11 Levelt WJM, Roelofs A, Meyer A. A theory of lexical access in speech production. *Behavioral and Brain Sciences* 1999; 22: 1–17
- 12 Kohonen T. *Self-Organizing Maps*. Berlin: Springer; 2001
- 13 Li P, Farkas I, MacWhinney B. Early lexical development in a self-organizing neural network. *Neural Networks* 2004; 17: 1345–1362
- 14 Varley R, Whiteside S. What is the underlying impairment in acquired apraxia of speech. *Aphasiology* 2001; 15: 39–49
- 15 Aichert I, Ziegler W. Syllable frequency and syllable structure in apraxia of speech. *Brain Lang* 2004; 88: 148–159
- 16 Staiger A, Ziegler W. Syllable frequency and syllable structure in the spontaneous speech production of patients with apraxia of speech. *Aphasiology* 2008; 22: 1201–1215
- 17 Staiger A, Aichert I. Die Einheiten der phonetischen Planung: theoretische Aspekte und therapeutische Implikationen. *Sprache Stimme Gehör* 2010; 34: 128–133
- 18 Max L, Guenther FH, Gracco VL et al. Unstable or insufficiently activated internal models and feedback-biased motor control as sources of dysfluency: a theoretical model of stuttering. *Contemporary Issues in Communication Science and Disorders* 2004; 31: 105–122
- 19 Bohland JW, Bullock D, Guenther FH. Neural representations and mechanisms of the performance of simple speech sequences. *J Cognitive Neurosci* 2009; 22: 1504–1529
- 20 Brendel B, Ackermann H. Sprechplanungsprozesse in der funktionellen Bildgebung. *Sprache Stimme Gehör* 2010; 34: 134–139
- 21 Hickok G, Poeppel D. Dorsal and ventral streams: a framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. *Cognition* 2004; 92: 67–99