

Ein neuronales Modell zur sensomotorischen Entwicklung des Sprechens

Modeling Developmental Aspects of Sensorimotor Control of Speech Production

Autoren

B. J. Kröger¹, P. Birkholz², C. Neuschaefer-Rube¹

Institute

¹ Klinik für Phoniatrie, Pädaudiologie und Kommunikationsstörungen

(Direktorin: Univ.-Prof. Dr. med. C. Neuschaefer-Rube), Universitätsklinikum Aachen und RWTH Aachen

² Institut für Informatik (Direktor: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. A. Heuer), Universität Rostock

Schlüsselwörter

- Sprechen
- Sprachproduktion
- Sensorimotorik
- Spracherwerb
- zerebraler Kortex
- neuronales Modell
- neuronales Lernen
- Sprachentwicklungsstörung

Key words

- speech
- speech production
- sensorimotor control
- speech acquisition
- cerebral cortex
- neural model
- neural learning
- disorders of speech production

eingereicht

26. Mai 2006

akzeptiert

1. September 2006

Bibliografie

DOI 10.1055/s-2006-944981
 Online-Publikation:
 12. 12. 2006
 Laryngo-Rhino-Otol 2007; 86;
 365–370 © Georg Thieme
 Verlag KG Stuttgart · New York
 ISSN 0935-8943

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys.

Bernd J. Kröger

Klinik für Phoniatrie, Pädaudiologie und Kommunikationsstörungen
 Universitätsklinikum Aachen
 Pauwelsstraße 30
 52074 Aachen
 bkroeger@ukaachen.de

Zusammenfassung



Hintergrund: Die detaillierte Kenntnis der Neurophysiologie des Spracherwerbs ist wichtig für das Verständnis der Sprachentwicklung und seiner evtl. auftretenden Störungen.

Methode: Es wurde ein computerimplementiertes neuronales Modell zur Sensorimotorik des Sprechens entwickelt, das in der Lage ist, die neuronale Funktion unterschiedlicher kortikaler Areale beim Sprechen detailliert darzustellen.

Ergebnisse: (i) Zwei sensorische und zwei motorische Repräsentationen und zugehörige neuronale Abbildungen (Projektionen) bilden die sensomotorische Rückmeldesteuerung. Diese Repräsentationen und Abbildungen werden bereits während der prälinguistischen Phase des Spracherwerbs ausgebildet und trainiert. (ii) Im Zentrum der linguistischen Phase des Spracherwerbs steht der Aufbau lexikalischer Laut-, Silben- und

Wortrepräsentation und das Training der Abbildungen vom Lexikon zur Sensorik und Motorik. Dies stellt den Aufbau der sensomotorischen Vorwärtssteuerung dar. (iii) Drei prälinguistische Lernphasen – stumme Artikulation, quasistationäre vokalische Artikulation und die Realisierung artikulatorischer Protogesten – können anhand der mit dem Modell durchgeführten Simulationsstudien definiert und in Relation zu den zeitlichen Phasen des Spracherwerbs gestellt werden.

Schlussfolgerungen: Das neuronale Modell gibt Aufschluss über die detaillierte Funktion bestimmter kortikaler Areale beim Sprechen. Insbesondere kann gezeigt werden, dass Sprachentwicklungsstörungen bereits durch einen verzögerten oder gestörten Verlauf einer der hier definierten prälinguistischen Lernphasen entstehen können.

Einleitung



Phoniatern und Pädaudiologen werden in den letzten Jahren immer häufiger Kinder vorgestellt, die einen gestörten Verlauf der Sprachentwicklung aufzeigen. Dieses Störungsbild ist komplex und zumeist nicht auf einfach greifbare organische Dysfunktionen zurückzuführen. Gestörte Sprachentwicklung bedeutet zumeist verzögerte Entwicklung oder Störungen kortikaler neuronaler Verschaltungen [1–3]. Die Ursachen hierfür sind vielfältig. Sie können extrinsischer Natur (z.B. mangelnde Sprachanregung durch die unmittelbare Umgebung) wie auch intrinsischer Natur (z.B. allgemeine Verzögerung der Hirnreifung) sein. Es ist damit von entscheidender Bedeutung für die Prävention und für die Diagnostik von Sprachentwicklungsstörungen, ein genaues Bild der neuronalen Entwicklung der für das Sprechen relevanten Hirnstrukturen zu erhalten. Die heute

üblichen bildgebenden Verfahren (z.B. fMRI) sind zwar in der Lage, die ungefähre Lokalisation neuronaler Aktivität für bestimmte Hirnfunktionen anzugeben. Sie können jedoch nicht die genaue Funktion einzelner neuronaler Strukturen darstellen [4–6]. Insbesondere ist das Sprechen eine sehr komplexe Aktivität, so dass bildgebende Verfahren bisher nicht geeignet sind, ein detailliertes Bild der Dysfunktionen der beteiligten neuronalen Strukturen zu geben.

In diesem Beitrag wird ein computerimplementiertes Modell zur Realisierung von Lauten, Silben und Wörtern vorgestellt, das in der Lage ist, die neuronale Entwicklung des Sprechens in den ersten Lebensjahren eines Kindes zu simulieren [7]. Dieses Modell gibt insbesondere eine detaillierte Darstellung der mehrschichtigen neuronalen Repräsentationen des Sprechens und der neuronalen Abbildungen bzw. Projektionen zwischen diesen Repräsentationen [8] und der zuge-

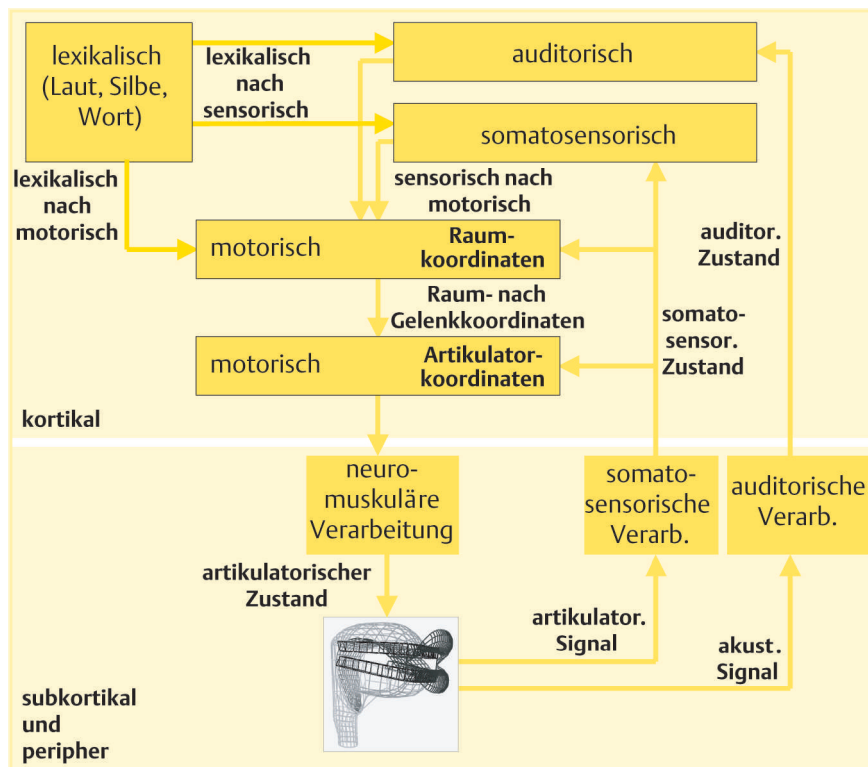


Abb. 1 Das sensomotorische Modell des Sprechens. Die umrandeten Kästchen sind neuronale Repräsentationen (maps), die Verbindungspfeile zwischen den Kästchen sind neuronale Abbildungen (mappings). Die hellgrauen Pfeile stellen die Rückmeldesteuerung (feedback control), die dunkelgrauen Pfeile die Vorwärtssteuerung (feedforward control) dar.

| neuronale Repräsentationen | zugehöriges kortikales Areal |
|---|--|
| lexikalische Zustände (Laute, Silben, Wörter) | Frontallappen, linke Seite: BA 6, 44 (inferiorer Bereich des prämotorischen Kortex; inferiorer und posteriorer Bereich des Broca-Areals) |
| auditorische Zustände | Temporallappen beidseitig: BA 22, 41, 42 (auditorischer Kortex: primär und unimodal) |
| somatosensorische Zustände | Parietallappen beidseitig: BA 1, 2, 40 (inferiorer somatosensorischer Kortex: primär und unimodal; inferiorer Bereich des heteromodalen sensorischen Kortex) |
| motorische Zustände (Raumkoordinaten) | Frontallappen beidseitig: BA 6, 44 (inferiorer Bereich des prämotorischen Kortex) |
| motorische Zustände (Artikulatorkoordinaten) | Frontallappen beidseitig: BA 4 (inferiorer Bereich des primären Motorkortex) |

Tab. 1 Zuordnung der neuronalen Repräsentationen zu kortikalen Arealen (siehe auch [Abb. 2](#))

hörigen Lern- bzw. Trainingsphasen zur Etablierung der neuronalen Repräsentationen und Abbildungen. Diese experimentell ermittelten **Lernphasen** des Computermodells werden mit den aus der Literatur bekannten **zeitlichen Phasen des Spracherwerbs** verglichen.

Methode

Das Modell

Im Zentrum des computerimplementierten Modells steht ein dreidimensionales artikulatorisch-akustisches Modell des Sprechtraktes. Dieses Modell wird mittels eines definierten Satzes von motorisch-artikulatorischen Parametern angesteuert und generiert die zugehörige Sprechtraktgeometrie und das zugehörige akustische Signal ([Abb. 1](#)). Diese Daten werden sensorisch verarbeitet und führen zu einer **auditiven** und zu einer **somatosensorischen** (d.h. taktilen und propriozeptiven) **Repräsentation**. Auf der Basis der somatosensorischen Daten wird eine Raumkoordinaten-Darstellung der Artikulation erzeugt, die wiederum in eine Artikulatorkoordinaten- oder Gelenkkoor-

dinaten-Darstellung überführt werden kann. Erläuternd sei angemerkt: Artikulatorkoordinaten oder Gelenkkkoordinaten beschreiben die **relative** Position voneinander abhängiger Artikulatoren – z.B. Zungenspitze relativ zum Zungenrücken und Zungenrücken relativ zum Unterkiefer; Raumkoordinaten beschreiben die resultierende **absolute** Position von Artikulatoren im Bezugssystem des Schädels und damit direkt die z.B. für Vokale akustisch relevante pharyngeale und orale Hohlraumformung bzw. die für Konsonanten akustisch relevante Ausbildung von oralen Engstellen oder Verschlüssen (zur artikulatorischen Beschreibung von Sprachlauten siehe [9,10]). Diese beiden motorischen Repräsentationen werden auch als räumlich-motorische bzw. als artikulatorisch-motorische Repräsentation bezeichnet. Dieser hier beschriebene Kreislauf stellt die **Rückmeldesteuerung** dar ([Abb. 1](#)). Die zugehörigen **neuronalen Abbildungen** werden während der prälinguistischen Phase des Spracherwerbs trainiert. Während der nachfolgenden linguistischen Phase wird dann die lexikalische Repräsentation samt der zugehörigen Abbildungen vom Lexikon zur Sensorik und zur Motorik erlernt. Wir unterscheiden somit **neuronalen Repräsentationen** (maps) und die zwischen diesen Repräsentationen vermittelnden Abbil-

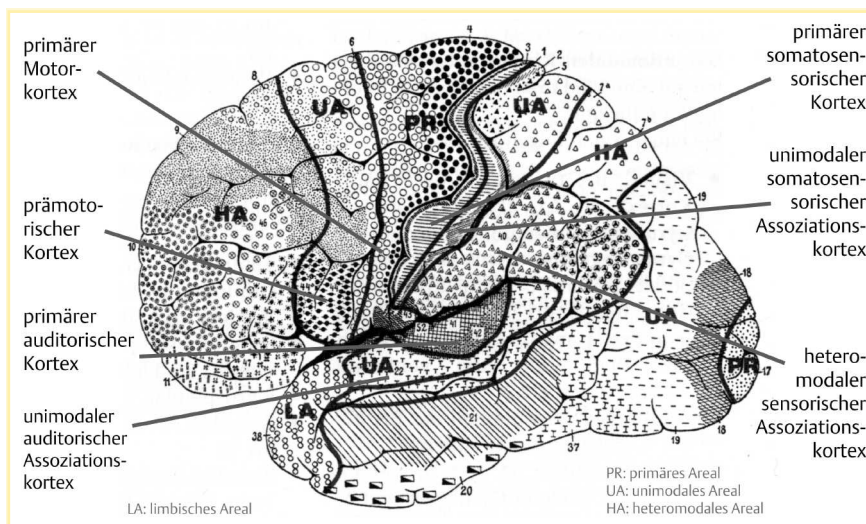


Abb. 2 Lateralansicht des Großhirns mit Markierung der für den frühen Spracherwerb wichtigen kortikalen Areale.

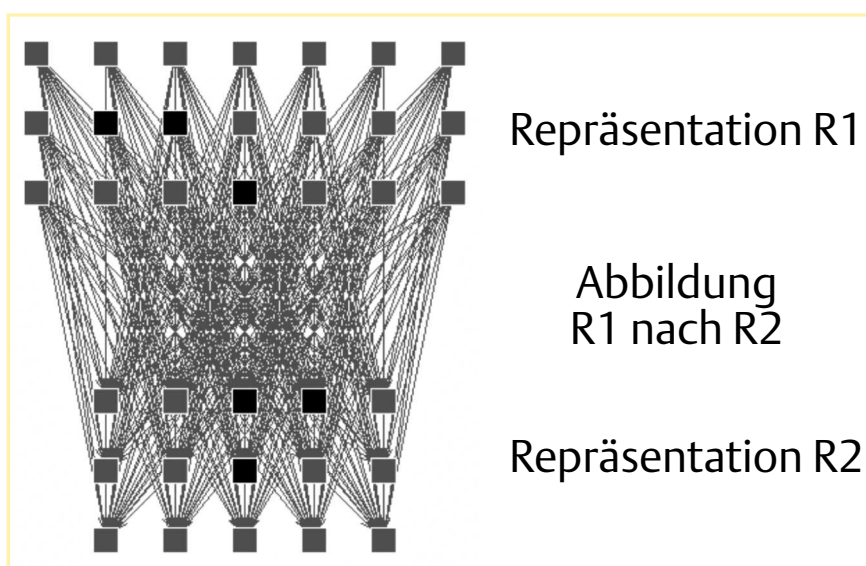


Abb. 3 Schematische Darstellung zweier neuronaler Repräsentationen (z. B. auditorisch und motorisch) und der zugehörigen neuronalen Abbildung innerhalb des computerimplementierten Modells. Jeder Punkt stellt ein Neuron innerhalb einer neuronalen Repräsentation dar. Die Menge der Verbindungslinien zwischen den Neuronen unterschiedlicher Repräsentationen stellen die neuronale Abbildung zwischen diesen Repräsentationen dar. Die dunkel gekennzeichneten Punkte sind die momentan aktivierten Neuronen einer Repräsentation und kennzeichnen das zur Zeit aktuelle neuronale Aktivierungsmuster für eine Repräsentation. Sie kodieren jeweils einen Zustand (z. B. sensorisch oder motorisch). Die Verbindungen zwischen den Neuronen können exzitierend oder inhibierend sein und sorgen für die Koaktivierung von neuronalen Zuständen in den durch sie verbundenen Repräsentationen.

dungen (mappings), die auch als Projektionen oder Assoziationen bezeichnet werden können. Die **kortikalen Areale** der neuronalen Repräsentationen sind in **Tab. 1** und **Abb. 2** angegeben. Bei Aktivierung eines Zustandes einer neuronalen Repräsentation – also bei Aktivierung eines definierten Satzes von Neuronen innerhalb einer neuronalen Repräsentation – werden durch die zugehörigen neuronalen Abbildungen äquivalente Zustände in anderen neuronalen Repräsentationen (ko-)aktiviert (**Abb. 3**). Neuronale Abbildungen stellen somit die Verbindungen bzw. Verschaltungen zwischen den neuronalen Repräsentationen dar und projizieren auf andere Repräsentationen bzw. führen zu neuronalen Assoziationen in anderen Repräsentationen des Sprechens. Das Lexikon in diesem Modell entspricht in etwa dem Silbenlexikon (syllabary) nach [12].

Die zeitlichen Phasen des Spracherwerbs

Während in der **linguistischen Phase des Spracherwerbs** ab Vollendung des ersten Lebensjahres bereits Laute und Wörter einer bestimmten Sprache (der Muttersprache) erlernt werden, dient die vorhergehende postnatale **prälinguistische Phase des Spracherwerbs** dem Ausprobieren des Artikulationsapparates, dem Kennenlernen der aus artikulatorisch-motorischen Zuständen resultierenden auditiven und somatosensorischen Zustände

und damit einhergehend dem Erlernen der Zuordnung sensorischer zu motorischen Zuständen [8]. Ab der Geburt treten neben der Produktion von Schreien, Lachen, Stöhnen und vegetativen Lauten (husten, niesen, rülpsen etc.) bereits sprachähnliche Vokalisierung auf [1]. Diese **Vokalisierungsphase** (phonation stage) zeichnet sich insbesondere durch eine bereits sprachähnliche Phonation bei vokalischer quasistationärer Artikulation aus. Ab dem zweiten oder dritten Monat treten **primitive Artikulationen** hinzu (primitive articulation phase), die in einer Ausweitungphase (expansion stage) bis hin zur Ausbildung von Eng- und Verschlussbildungen reichen. Um den 8. Monat beginnt die **kanonische Phase** (canonical phase) des prälinguistischen Spracherwerbs. Der Beginn dieser Phase kann leicht erkannt werden, da das Kind jetzt zum ersten Mal wohlgeformte, d. h. sprachtypische Silbenstrukturen (Konsonant-Vokal-Folgen) realisiert. Dies wird von den Eltern oftmals als Beginn des Sprechens angesehen, obwohl die jetzt vom Kind produzierten Konsonant- und Vokalrealisierungen noch prälinguistische **Proto-laute** bzw. artikulatorische **Protogesten** – d. h. artikulatorische Schließ- und Öffnungsgesten ohne definierten Artikulationsort – darstellen. Die hier gebildeten artikulatorischen Gesten (Artikulationsbewegungen) sind noch nicht lautbildend im Sinne des Lautinventars einer Sprache – d. h. im Sinne eines linguisti-

Tab. 2 Zuordnung der Lernphasen nach dem neuronalen Modell (i: stummes Artikulieren; ii: quasistationäre vokalische Artikulation; iii: artikulatorische Protogesten, iv: Lexikonaufbau) zu den zeitlichen Phasen des frühen Spracherwerbs nach [1] und zugehörige neuronale Abbildungen und Repräsentationen

| Phasen des Spracherwerbs | Beginn (Monat) | Lernphasen des Modells | neuronale Abbildungen | neuronale Repräsentationen |
|--|----------------|------------------------|--|--|
| Vokalisierungsphase | 0 | i, ii | Raum-nach-Artikulator sensorisch-nach-motorisch (quasistationäre Artikulation) | motorisch und sensorisch (BA 1, 2, 6, 40, 41, 42, 44) |
| Phase der primitiven Artikulation mit Ausweitungsphase | 2–3 | i, ii, iii | Raum-nach-Artikulator sensorisch-nach-motorisch | motorisch und sensorisch (BA 1, 2, 6, 40, 41, 42, 44) |
| kanonische Phase | 8 | iii | sensorisch-nach-motorisch (Artikulationsbewegungen) | motorisch und sensorisch (BA 1, 2, 6, 40, 41, 42, 44) |
| 50-Wörter Phase | 12 | iv | lexikalisch-nach-sensorisch lexikalisch-nach-motorisch | lexikalisch (BA 6, 44) |

schen Lautinventars. Eine zeitliche Verzögerung des Einsetzens dieser Phase kann als früher Indikator für Sprachentwicklungsstörungen herangezogen werden [1]. Ab Vollendung des ersten Lebensjahres folgt die **linguistische Phase des Spracherwerbs**. In ihrer ersten Teilphase erlernt das Kind erste Wörter (ca 1–2 Wörter pro Woche). Um den 18. Lebensmonat verfügt das Kind dann über ca. 50 einfache Wörter. Nun setzt die eigentliche Entwicklung des mentalen Lexikons ein, in der das Kind täglich bis zu 9 Wörter hinzulernt (Wortexplosion, vocabulary spurt).

Die Lernphasen nach dem neuronalen Modell

Im Computermodell kann das Erlernen dreier prälinguistischer Funktionen sowie einer linguistischen Funktion zum Spracherwerb unterschieden werden: Das Erlernen der neuronalen Abbildung und die Entwicklung der zugehörigen Repräsentationen (i) für die somatosensorisch-nach-motorisch Relation einschließlich Raum-nach-Artikulator-Koordination, (ii) für die quasistationäre auditorisch-nach-motorisch Relation, (iii) für die dynamische auditorisch-nach-motorisch Relation und (iv) für die lexikalisch-nach-sensorisch und die lexikalisch-nach-motorisch Relation (Abb. 1). Diese Funktionen werden in zugehörigen Lernphasen erreicht: (i) **stumme Artikulation**, (ii) **quasistationäre vokalische Artikulation** und (iii) **artikulatorische Protogesten**. Diese drei Lernphasen können jeweils unterschiedlichen Phasen des prälinguistischen Spracherwerbs zugeordnet werden (Tab. 2). Die **linguistische Lernphase** des Spracherwerbs wird in unserem Modell bis hin zum Erwerb erster einfacher Wörter realisiert. Während dieser Lernphase wird eine erste neuronale Repräsentation für Laute, Silben und Wörter, d. h. für **lexikalische Repräsentation** angelegt.

Anhand des Computermodells kann gezeigt werden, dass die vier vom Modell definierten Lernphasen zeitlich nacheinander ablaufen müssen. Eine spätere Lernphase nutzt immer die innerhalb einer früheren Lernphase erworbenen Repräsentationen und Abbildungen. So werden während der prälinguistischen Phasen des Spracherwerbs die sensorischen Repräsentationen aufgebaut und die Abbildungen von der Sensorik zur Motorik trainiert. Es werden zufällige motorische Zustände generiert und das Modell erlernt den Zusammenhang zwischen motorischen Zuständen und ihren sensorischen Resultaten. Anders ausgedrückt: Das Kind „spielt“ mit seinem Artikulationsapparat und erlernt dabei den Zusammenhang zwischen motorisch-artikulatorischen Zuständen und den aus ihnen resultierenden sensorischen (auditiven und somatosensorischen) Zuständen. Hierbei gilt insbesondere auch, dass das Erlernen der Raum-nach-Artikulator-Koordination stumm erfolgen kann (Lernphase der stummen Artikulation) und dass diese Lernphase zumindest

teilweise vor dem Erlernen vokalischer quasistationärer Zustände und konsonantischer Artikulationsbewegungen realisiert werden muss.

In der anschließenden linguistischen Phase des Spracherwerbs ist das Modell dann aufgrund der prälinguistisch erworbenen neuronalen Strukturen in der Lage, einen motorischen Zustand (quasistationäre Artikulation oder auch artikulatorische Bewegungen) anhand des zugehörigen sensorischen Zustandes (z. B. Formantmuster eines Lautes, einer Silbe oder eines Wortes) zu reproduzieren. Das Modell ist damit in der Lage, neben der Abbildung Lexikon-nach-auditorisch auch die Abbildungen Lexikon-nach-somatosensorisch und Lexikon-nach-motorisch aufzubauen (Abb. 1). Anders ausgedrückt: Das Kind hört lexikalische Items (Laute, Silben Wörter) einer Sprache, versucht diese artikulatorisch zu reproduzieren, und erlernt dabei die Assoziation von lexikalischen Items mit auditiven, somatosensorischen und motorischen Zuständen.

Rückmeldesteuerung und Vorwärtssteuerung

Während der prälinguistischen Phase wird die Rückmeldesteuerung erlernt, die insbesondere im Fall der **auditiven Rückmeldung** (auditive Reafferenz) sehr aufwändig ist und wegen der hier auftretenden komplexen neuronalen Prozesse nur relativ langsam arbeitet (Rückmeldungszeiten > 50 msec [8]). Während der linguistischen Phase des Spracherwerbs wird die aufwändige **Rückmeldesteuerung** mehr und mehr durch eine **Vorwärtssteuerung** ersetzt: Jedes lexikalische Item wird nun mit dem zugehörigen sensorischen Zustand verknüpft (Lexikon-nach-sensorisch-Abbildung). Aufgrund der bereits prälinguistisch trainierten sensorisch-nach-motorisch-Abbildung (Rückmeldesteuerung) kann ein lexikalisches Item nun überhaupt erst motorisch-artikulatorisch reproduziert werden. Damit kann das entsprechende Item dann mit einem motorischen Zustand verknüpft werden (Lexikon-nach-motorisch-Abbildung). Anders ausgedrückt: Für lexikalische Items wird der motorische Bewegungsablauf vom Kind quasi auswendig gelernt. Damit spielt dann nach dem Erlernen des lexikalischen Items die Rückmeldesteuerung bei der Produktion nur noch eine untergeordnete Rolle. Es kann auch gezeigt werden, dass hoch überlernte **rückmeldesteuerte Bewegungen** (closed-loop-control) auch als **vorwärtsgesteuerte Bewegungen** (open-loop-control) repräsentiert werden können [11]. Allerdings sind die schnellen propriozeptiven Reafferenzen durchaus auch bei der Vorwärtssteuerung wichtig, da diese Steuerung u. a. über die Raumkoordinaten-Repräsentation abläuft. Die Raumkoordinaten-Repräsentation kann somit als auf der Grenze zwischen motorischen und sensorischen Repräsentationen stehend interpretiert werden,

da hier einerseits schnell zurückgemeldete propriozeptive Informationen eingehen (♻️ **Abb. 1**), andererseits hier aber auch bereits die motorische Repräsentation eines quasistationären artikulatorischen Zustandes oder einer Artikulationsbewegung erstellt wird.

Verzögerte oder gestörte Realisierung einer der im Modell definierten Lernphasen

Anhand des Computermodells kann gezeigt werden, dass das in der linguistischen Phase wichtige **artikulatorische Nachvollziehen** gehörter Laute, Silben oder Wörter ohne vorhergehenden Aufbau der sensorisch-nach-motorisch Abbildungen, d. h. ohne vorhergehenden Aufbau der Rückmeldesteuerung nicht möglich ist. Ein lexikalisches Item kann anhand der zugehörigen auditiven Repräsentation nur dann motorisch-artikulatorisch reproduziert werden, wenn die prälinguistisch erlernten sensorisch-nach-motorisch Abbildungen existieren.

Damit konnte gezeigt werden, dass die für das spätere Sprechen wichtige Vorwärtssteuerung, d. h. der Aufbau der neuronalen Lexikon-nach-motorisch Abbildung nur dann entstehen kann, wenn zuvor die sensorisch-nach-motorisch Abbildungen in der prälinguistischen Erwerbsphase erfolgreich trainiert wurden. Anders ausgedrückt: Das Kind kann ein gehörtes lexikalisches Item nur dann artikulatorisch reproduzieren, wenn es zuvor den Zusammenhang zwischen auditiven und motorischen Zuständen für seinen Artikulationsapparat erlernt hat.

Ergebnisse

Auf der Basis der durchgeführten Simulationsstudien mit einem computerimplementierten sensomotorischen Modell des Sprechens können drei Thesen zur sensomotorischen Entwicklung des Sprechens untermauert werden. (i) Es existieren mindestens vier sensomotorische Repräsentationsebenen für das Sprechen: **die auditorische, die somatosensorische, die räumlich-motorische und die artikulatorisch-motorische Repräsentation**. Diese Repräsentationen sind durch neuronale Abbildungen verbunden, die in verschiedenen Lernphasen zeitlich aufeinander aufbauend innerhalb der prälinguistischen Phase des Spracherwerbs trainiert werden. Diese Abbildungen bilden den Kern der sensomotorischen Rückmeldesteuerung. (ii) Die linguistische Phase des Spracherwerbs ist durch den Aufbau der lexikalischen Repräsentation und das Training der zugehörigen Abbildungen vom Lexikon zur Sensorik und Motorik gekennzeichnet. Diese Abbildungen bilden den Kern der sensomotorischen Vorwärtssteuerung. Hierbei gilt, dass das Erlernen von lexikalischen Items nicht nur durch das (passive) Erkennen der auditiven Itemmerkmale, sondern insbesondere auch durch das aktive artikulatorische Nachvollziehen des Gehörten erfolgt. **Anhand des Computermodells kann gezeigt werden, dass aktives artikulatorisches Nachvollziehen nur dann möglich ist, wenn die sensomotorische Rückmeldesteuerung bereits existiert.** (iii) Mittels des neuronalen Modells können drei prälinguistische Lernphasen unterschieden werden: die stumme Artikulation, die quasistationäre vokalische Artikulation und die Realisierung artikulatorischer Protogesten. Diese unterschiedlichen Lernphasen des neuronalen Modells wurden den zeitlichen Phasen des frühen Spracherwerbs nach [1] zugeordnet (♻️ **Tab. 2**). Insbesondere ist festzuhalten, dass durch die zwingend notwendige zeitliche Abfolge der Modell-Lernphasen geschlossen werden kann, dass eine Verzögerung einer zeitlichen Phase des frühen Spracher-

werbs die zeitliche Verzögerung aller weiteren Phasen nach sich zieht. **Insbesondere ist die erfolgreiche Realisierung der sensomotorischen Rückmeldesteuerung Voraussetzung für den Aufbau des Lexikons, d. h. für den Beginn der linguistischen Phase des Spracherwerbs.**

Diskussion

In diesem Beitrag wird ein computerimplementiertes Modell zur Realisierung von Lauten, Silben und Wörtern vorgestellt. Das Modell ist in der Lage, die neuronale Entwicklung des Sprechens in den ersten Lebensjahren eines Kindes zu simulieren. Da die In-vivo-Vorgänge der Sprachentwicklung insbesondere auf neuronaler Ebene nur schwer messbar sind, ermöglicht uns die Computersimulation, zu einem besseren Verständnis dieser Vorgänge zu gelangen. Zwar können bildgebende Techniken (z. B. fMRI) aufzeigen, welche kortikalen Areale mit welchen sensomotorischen Funktionen des Sprechens korrespondieren, aber erst ein rechnergestütztes Modell zur Sensomotorik des Sprechens kann ein detailliertes Bild der kortikalen neuronalen Funktionen beim Sprechen geben. Andererseits kann aus dem zufriedenstellenden Funktionieren eines Modells aber nicht geschlossen werden, dass die realen kortikalen und subkortikalen neuronalen Prozesse in exakt der gleichen Weise ablaufen. So ist beispielsweise der detaillierte neurophysiologische Aufbau jeder einzelnen der hier eingeführten neuronalen Repräsentationen (vgl. ♻️ **Abb. 3**) heute noch unklar.

Die anhand unseres neuronalen Modells unterscheidbaren Lernphasen resultieren direkt aus dem strukturellen Aufbau des Modells (♻️ **Abb. 1**). Diese Lernphasen konnten im Rahmen dieser Arbeit in Relation zu den aus der Literatur bekannten zeitlichen Phasen des frühen Spracherwerbs gesetzt werden. Allerdings können anhand des Modells bisher keine Annahmen über den detaillierten zeitlichen Verlauf innerhalb der einzelnen Trainingsphasen gemacht werden. Unklar ist auch, inwieweit diese Lern- oder Trainingsphasen zeitlich überlappen können. So ist beispielsweise denkbar, dass die somatosensorisch-nach-motorisch Abbildung nicht nur stumm trainiert wird, sondern dass diese Abbildung auch fortlaufend während der nachfolgenden Lernphasen weiterentwickelt wird. Dies widerspricht zwar nicht der im Rahmen dieser Arbeit aufgestellten These, dass diese Abbildung zeitlich früher als andere Abbildungen trainiert werden muss, zeigt aber, dass das vom neuronalen Modell bisher gewonnene Bild sicherlich noch verfeinert werden muss.

Insbesondere ist die Weiterentwicklung des hier vorgestellten sensomotorischen Modells des Sprechens über die Darstellung der ersten 18 Lebensmonate hinaus wichtig, da gerade die Auswirkungen von neuronalen Störungen der Sprechfunktion in Hinblick auf die spätere sprachliche Entwicklung des Kindes (z. B. in der Schule) von großem Interesse sind. Somit soll in weiteren Arbeiten zunächst versucht werden, die im zweiten und dritten Lebensjahr auftretende Entwicklung des mentalen Lexikons zu simulieren. Darüber hinaus soll das sensomotorische Modell mit neurolinguistischen Modellen des Sprechens (z. B. [12]) verbunden werden, um einen umfassenden quantitativen Ansatz zur Steuerung des Sprechens zu realisieren. Definierte Störungen der Sprechfunktion können dann auf Störungen innerhalb bestimmter Funktionsbereiche des Modells zurückgeführt werden.

Danksagung



Diese Arbeit wurde teilweise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert (KR 1439/10-1 und JA 1476/1-1).

Abstract

Modeling Developmental Aspects of Sensorimotor Control of Speech Production



Background: Detailed knowledge of the neurophysiology of speech acquisition is important for understanding the developmental aspects of speech perception and production and for understanding developmental disorders of speech perception and production.

Method: A computer implemented neural model of sensorimotor control of speech production was developed. The model is capable of demonstrating the neural functions of different cortical areas during speech production in detail.

Results: (i) Two sensory and two motor maps or neural representations and the appertaining neural mappings or projections establish the sensorimotor feedback control system. These maps and mappings are already formed and trained during the prelinguistic phase of speech acquisition. (ii) The feedforward sensorimotor control system comprises the lexical map (representations of sounds, syllables, and words of the first language) and the mappings from lexical to sensory and to motor maps. The training of the appertaining mappings form the linguistic phase of speech acquisition. (iii) Three prelinguistic learning phases – i.e. silent mouthing, quasi stationary vocalic articulation, and realisation of articulatory protogestures – can be defined on the basis of our simulation studies using the computational neural model. These learning phases can be associated with temporal phases of prelinguistic speech acquisition obtained from natural data.

Conclusions: The neural model illuminates the detailed function of specific cortical areas during speech production. In particular it can be shown that developmental disorders of speech production may result from a delayed or incorrect process within one of the prelinguistic learning phases defined by the neural model.

Literatur

- 1 Oller DK, Eilers RE, Neal AR, Schwartz HK. Precursors to speech in infancy: the prediction of speech and language disorders. *Journal of Communication Disorders* 1999; 32: 223–245
- 2 Grimm H. *Störungen der Sprachentwicklung*. Göttingen, Bernd, Toronto, Seattle: Hogrefe, 1999
- 3 von Suchodoletz W. Hirnorganische Repräsentation von Sprache und Sprachentwicklungsstörungen. In: von Suchodoletz W (Hrsg.) *Sprachentwicklungsstörung und Gehirn*. Stuttgart, Berlin, Köln: Kohlhammer, 2001
- 4 op de Beek H, Wagemans J, Vogels R. Can neuroimaging really tell us what the human brain is doing? The relevance of indirect measures of population activity. *Acta Physiologica* 2001; 107: 323–351
- 5 Munhall KG. Functional imaging during speech production. *Acta Physiologica* 2001; 107: 95–117
- 6 Fiez JA. Neuroimaging studies of speech. An overview of techniques and methodological approaches. *Journal of Communication Disorders* 2001; 34: 445–454
- 7 Kröger BJ, Birkholz P, Kannampuzha J, Neuschaefer-Rube C. Somatosensory, auditory, and motor representations in a neural model of speech production. *Proceedings of the 5th International Conference on Speech Motor Control* 2006. Nijmegen, Netherlands
- 8 Guenther FH, Ghosh SS, Tourville JA. Neural modeling and imaging of the cortical interactions underlying syllable production. *Brain and Language* 2006; 96: 280–301
- 9 Kröger BJ. Ein visuelles Modell der Artikulation. *Laryngo-Rhino-Otologie* 2003; 82: 402–407
- 10 Grassegger H. *Phonetik Phonologie*. Idstein: Schulz-Kircher, 2001
- 11 Todorov E. Optimality principles in sensorimotor control. *Nature Neuroscience* 2004; 7: 907–915
- 12 Indefrey P, Levelt WJM. The spatial and temporal signatures of word production components. *Cognition* 2004; 92: 101–144