

„Das Hören von Gefühlen“: Funktionell-neuroanatomische Grundlagen der Verarbeitung affektiver Prosodie

„Hearing Emotions“: The Cerebral Correlates of the Processing of Affective Prosody

Zusammenfassung

Mit dem Begriff der Prosodie wird die Modulation von Tonhöhe, Lautstärke, Sprechrhythmus und Stimmqualität im Verlauf sprachlicher Äußerungen bezeichnet. Neben einer Vielzahl linguistischer, z. B. Wort- und Satzakzent, und pragmatischer Funktionen, z. B. die Spezifizierung von Sprechhandlungen, spiegeln prosodische Merkmale auch aktuelle Stimmung und Befindlichkeit (affektive Prosodie) eines Menschen wider und tragen in Verbindung mit Gestik und Mimik zum nonverbalen Ausdruck von Emotionen bei. Klinische Untersuchungen führten zu diskrepanten Modellen der zerebralen Organisation stimmlich-vokalen emotionalen Verhaltens, z. B. in Bezug auf die Hemisphärenlateralität dieser Leistungen. Funktionell-bildgebende Studien stellen einen weiterführenden Untersuchungsansatz dar. Die vorliegenden Arbeiten weisen auf zwei sukzessive Stufen der Wahrnehmung affektiver Prosodie hin: a) eine vorwiegend rechtshemisphärische Enkodierung von Intonationskonturen, ein akustisches Korrelat affektiver Prosodie, im Bereich posteriorer Anteile des Gyrus temporalis superior und b) eine im Wesentlichen an orbitofrontale Strukturen beidseits geknüpfte Evaluation von Art und Ausprägung der durch affektiv-prosodische Merkmale des Sprachsignals vermittelten Emotionen. Der Befund einer vorwiegend rechtshemisphärisch-temporalen hämodynamischen Aktivierung im Rahmen der Verarbeitung von

Abstract

Besides a sequence of words, spoken utterances are characterized by prosodic (suprasegmental) qualities such as a distinct intonation contour („speech melody“), loudness variations, and a rhythmic structure. In addition to a variety of linguistic and pragmatic functions, these features may reflect a speaker's mood and, thus, contribute, concomitant with facial and gestural movements, to the nonverbal expression of emotions (affective prosody). Clinical studies yielded discrepant data on the cerebral correlates of the processing of affective prosody. Functional imaging provides a more recent approach to the analysis of brain-behaviour relationships. The available investigations indicate two successive stages of the perceptual encoding of affective prosody: (a) predominant right-hemisphere processing of intonation contours within posterior parts of the superior temporal gyrus, (b) evaluation of the conveyed emotion at the level of bilateral orbitofrontal cortex. These findings corroborate and extend the model of a more proficient analysis and short-term storage of tonal information within the right cerebral hemisphere.

Institutsangaben

Hertie Institut für Klinische Hirnforschung, Abteilung Allgemeine Neurologie
(Direktor: Prof. Dr. Johannes Dichgans), Universität Tübingen

Danksagung

Die Untersuchungen unserer Arbeitsgruppe wurden unterstützt durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (Schwerpunktprogramm „Sprachproduktion“ und Sonderforschungsbereich 550 „Erkennen, Lokalisieren, Handeln: Neurokognitive Mechanismen und ihre Flexibilität“) und durch die Heidelberger Akademie der Wissenschaften

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. Hermann Ackermann, M.A. · Neurologische Klinik Universität Tübingen ·
Hoppe-Seyler-Straße 3 · 72076 Tübingen · E-mail: hermann.ackermann@uni-tuebingen.de

Bibliografie

Akt Neurol 2004; 31: 449 – 460 © Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York
DOI 10.1055/s-2004-828377
ISSN 0302-4350

Intonationskonturen verbaler Äußerungen bestätigt und erweitert das Konzept einer effizienteren Verarbeitung tonaler Information (Extraktion von Tonhöhenbewegungen, Kurzzeitspeicherung und motorische Implementierung von Melodien) im Bereich der nicht-sprachdominanten Hirnhälfte. Weiter abzuklären bleiben die Hemisphärenlateralitätseffekte in Verbindung mit der Enkodierung von Silben- bzw. Sprechrhythmus als eines weiteren akustischen Korrelats affektiver Prosodie.

Einleitung

Die Ursprünge einer systematisch-sprachwissenschaftlichen Beschreibung der Prosodie verbaler Äußerungen reichen zurück in das 18. Jahrhundert: Der Sturm-und-Drang-Schriftsteller Karl Philipp Moritz (1756–1793) hatte sich in einem seiner linguistischen Traktate erstmals vorgenommen, die „prosodischen Regeln“ des Deutschen „in ein System zu ordnen“ [1]. Unter Prosodie wird in diesem Zusammenhang die Verteilung der „Längen und Kürzen der Silben in unsrer Sprache“ verstanden, die eine von den „Höhen und Tiefen“ (Intonation) unabhängige Dimension der Rede darstellte.

Eingang in die Medizin hat der Begriff der Prosodie im Jahre 1947 durch eine Arbeit des norwegischen Neurologen Monrad-Krohn gefunden: Eine 30 Jahre alte Patientin, die nie Norwegen verlassen und auch keinen Umgang mit Ausländern gehabt hatte, litt im Gefolge eines offenen Schädel-Hirn-Traumas zunächst an einer Globalaphasie, aus der sich im Verlauf von Monaten über das Bild eines ausgeprägten Agrammatismus wieder eine relativ flüssige Spontansprache entwickelte, die aber den Eindruck eines ausländischen, am ehesten deutschen Akzents hervorrief [2]. Monrad-Krohn bezeichnete diese Konstellation als „Dysprosodie“ („altered melody of language“) und grenzte sie ab von der Aprosodie bzw. Hypoprosodie bei Paralysis agitans und von einer Beeinträchtigung musikalischer Fähigkeiten.

Prosodische Merkmale verleihen verbalen Äußerungen nicht nur einen distinkten Sprachakzent, sondern vermitteln auch sprecherbezogene (indexikalische) Informationen beispielsweise zu Alter, Geschlecht und aktueller Stimmung [3]. Die Bezeichnung „indexikalisch“ geht zurück auf den Terminus „index mentis“ der antiken Rhetorik. Die vokale Dimension emotionalen Verhaltens, eine Konversation meist „unbewusst“ begleitend und mitgestaltend, wird als affektive Prosodie bezeichnet. Klinische Untersuchungen haben bislang zu keinem konsistenten Modell der zerebralen Verarbeitung des stimmlichen Ausdrucks von Emotionen geführt. Funktionell-bildgebende Verfahren geben eine weiterführende Möglichkeit der Analyse an die Hand, insbesondere da die Repräsentation affektiv-prosodischer Merkmale des Sprachsignals nicht an eine singuläre umschriebene Struktur gebunden, sondern mit einem Netzwerk kortikaler und subkortikaler Areale assoziiert sein dürfte [4]. Die vorliegende Übersichtsarbeit will vor dem Hintergrund klinischer Daten den Beitrag funktionell-bildgebender Verfahren, unter Einschluss eigener Experimente, zur Untersuchung der zerebralen Repräsentation affektiv-prosodischer Merkmale des Sprachsignals darstellen und zusammenfassen.

In erster Annäherung können drei Ebenen emotionalen Verhaltens unterschieden werden: Wahrnehmung, Erleben und Ausdruck [5]. Sowohl im expressiven als auch im perzeptiven Bereich kommen neben affektiver Prosodie weitere Modalitäten der Informationsvermittlung wie Gesten und Mimik zum Tragen. Darüber hinaus kann Befindlichkeit auch „in Worte gefasst“ („Ich fühle mich heute nicht so gut“) werden. Es ist noch weit gehend unklar, wo und wie diese unterschiedlichen Domänen der Darstellung von Stimmungen in ein (supramodales) Konzept emotionalen Verhaltens integriert werden („housing of emotional categories“ [6]). Schließlich hat die Untersuchung affektiver Prosodie auch Bedeutung für die Analyse der funktionell-neuroanatomischen Korrelate der Sprachproduktion und -perzeption, da auf der Ebene des akustischen Signals emotionales Verhalten mit den verschiedenen linguistischen Komponenten der Lautstruktur verbaler Äußerungen in eine gemeinsame Datenstruktur verwoben ist, somit Analyse und Implementierung affektiv-prosodischer und phonologischer Information zumindest teilweise über dieselben zentralnervösen Strukturen erfolgen muss.

Die Funktionen von Prosodie im Rahmen lautsprachlicher Kommunikation

Perzeptive und akustische Dimensionen der Prosodie verbaler Äußerungen

Unter den prosodischen Qualitäten sprachlicher Äußerungen fasste Monrad-Krohn [7,8] Akzentsetzung, Sprechrhythmus und Tonhöhenverlauf zusammen. Mit dem erstgenannten Merkmal („stress“ oder „strength of pronunciation“) dürfte sich dieser Autor auf die Modulation der Lautstärke eines Sprechers bezogen haben, ein Parameter, der vor der Entwicklung geeigneter Verfahren akustischer Analyse des Sprachsignals erheblich überschätzt worden war. Darüber hinaus tragen auch schwerer fassbare Komponenten der Lautsprache wie Stimmqualität und Artikulationsschärfe zur Prosodie bei [4]. Beispielsweise vermögen eine knarrende Stimme, bedingt durch langsame und unregelmäßige Schwingungen der Stimmlippen, als auch eine übertrieben deutliche Artikulation situationsabhängig zu einem vorwurfsvoll-drohenden Unterton von Aussagen beizutragen. Etwas zugespitzt formuliert umfasst Prosodie alle diejenigen Dimensionen der Lautstruktur verbaler Äußerungen, die nicht „in Worte gefasst“ wurden, aber dennoch im Verlauf einer Konversation relevante Information vermitteln, sei es durch Präzisierung sprachlichen Verhaltens oder durch die Darstellung von Sprechereigenschaften. Diese Feststellung schließt natürlich nicht aus, wie eingangs erwähnt, dass prosodische Funktionen auch sprachlich-verbal vermittelt werden können und sich zum Beispiel eine vorwurfsvoll-drohende Haltung neben einem entsprechenden Unterton auch durch den Satz: „Und das meine ich bit-terernst!“, ausdrücken lässt.

Der wahrgenommenen Prosodie sprachlicher Äußerungen liegen auf der Signalebene mehrere miteinander verflochtene akustische Parameter zugrunde. Im Folgenden sollen kurz zwei wichtige perzeptive Dimensionen, Sprachmelodie und Sprechrhythmus, näher charakterisiert werden, da sie im Mittelpunkt der bislang vorliegenden psychoakustischen und bildgebenden Untersuchungen zur zerebralen Verarbeitung von Prosodie stehen.

Die Grundfrequenz stimmhafter Anteile des akustischen Sprachsignals (Vokale, stimmhafte Konsonanten etc.) stellt das akustische Korrelat der wahrgenommenen Tonhöhe („pitch“) dar, entspricht dem reziproken Wert der Periodendauern der Stimmbandschwingungen des Kehlkopfes und lässt sich entweder am Oszillogramm bestimmen oder aus der harmonischen Energieverteilung eines Schmalbandspektrogramms ableiten. Das Perzept einer distinkten Tonhöhe kann sich auch dann einstellen, wenn die Grundfrequenz durch Hochpassfilterung aus dem akustischen Sprachsignal entfernt wurde („virtual pitch“). Beispielsweise wird beim Telefonieren die charakteristische Stimmelage eines Sprechers erkannt, obwohl nur in einem Frequenzbereich oberhalb ca. 300 Hz Energie übertragen wird. Der Verlauf der Grundfrequenz über eine Äußerung hinweg (Intonationskontur) wird als Tonhöhenbewegung, d.h. als Sprachmelodie wahrgenommen. Allerdings erwecken unter Umständen auch Veränderungen der Lautstärke oder der Stimmqualität den Eindruck einer „melodischen“ Struktur [4]. Die rhythmische Gestalt einer verbalen Äußerung wird durch die Dauerverhältnisse der verschiedenen hierarchisch geordneten sprachlichen Einheiten wie Segmente, Silben, Wörter und Phrasen bestimmt. Die wichtigste Rolle kommt in diesem Rahmen der Silbe zu. Beispielsweise wird im Deutschen der Wortakzent bei mehrsilbigen lexikalischen Einheiten in erster Linie durch Silbendehnung markiert.

Intonationskontur, Verlauf der Lautstärke, Sprechrhythmus und Stimmqualität charakterisieren nicht einzelne Laute, genauer: phonetische Segmente, sondern längere Einheiten sprachlicher Äußerungen. Aus diesen Gründen werden prosodische Merkmale auch als suprasegmentale Eigenschaften des Sprachsignals bezeichnet. Obwohl Prosodie als eine gegenüber der segmentalen Lautstruktur, d.h. die Abfolge wahrgenommener Konsonanten und Vokale, prinzipiell unabhängige Dimension der Sprache gelten darf, gibt es doch Wechselwirkungen zwischen beiden Ebenen wie beispielsweise die sprachlautspezifische lokale Anhebung oder Absenkung der Grundfrequenz („intrinsic pitch“).

Linguistische und paralinguistische Funktionen von Prosodie

Die einzelnen Dimensionen der Prosodie sprachlicher Äußerungen vermögen spezifische linguistische Funktionen zu vermitteln. Meistens erfolgt im Deutschen beispielsweise die Differenzierung von Aussage, Frage oder Befehl (Satzmodi) durch syntaktische Operationen. Darüber hinaus vermag aber auch allein der Intonationsverlauf den wahrgenommenen Satzmodus zu bestimmen. Mehrsilbige deutsche Wörter besitzen einen Wortakzent (eine Silbe ist gegenüber den anderen prominent, z.B. *umfahren* versus *umfähen*), der in erster Linie durch eine Dehnung der entsprechenden phonetischen Segmente signalisiert, unter Umständen jedoch durch ein F0-Gipfmuster indiziert wird. Schließlich haben distinkte Tonhöhenverläufe, die sich über etwa 300 ms erstrecken, in Tonsprachen bedeutungsunterscheidende Funktion: Abhängig von der Intonation kann die Silbe /ma/ in Mandarin-Chinesisch unter anderem „Mutter“ (erster Ton) oder „Pferd“ (dritter Ton) bedeuten [9]. Diese Komponenten der Prosodie: Satzmodus, Wortakzent und Tonkategorien, sind in ein lexikalisch-syntaktisches Regelwerk eingebunden und tragen zur Spezifizierung des propositionalen Gehaltes einer Äußerung bei (linguistische Prosodie). Auch dem Bereich der linguistischen Prosodie zuzurechnen ist die Akzentuierung eines Satzes, um einem Gesprächspartner den Fokus oder das Thema einer

Aussage zu signalisieren („Er schenkte ihr den Schal“ versus „Er schenkte ihr den Schál“). Über die Spezifizierung von Wörtern und Sätzen hinaus vermittelt Prosodie Informationen zu den Einstellungen („attitudes“) eines Sprechers und vermag beispielsweise die mit einer Aussage vollzogene Sprechhandlung zu präzisieren, z.B. im Falle eines ironischen oder sarkastischen Untertons der Äußerung: „Das haben Sie hervorragend gemacht“. Darüber hinaus lassen sich über die Intonationsmuster von Äußerungen auch die Aufmerksamkeit der Zuhörer und der Verlauf einer Konversation steuern. Beispielsweise indiziert der Tonhöhenverlauf, ob ein Sprecher seine Ausführungen beendet hat und der Gesprächspartner nun „an der Reihe ist“ („turn taking“). Über diese auf die Gestaltung sprachlicher Konversation bezogenen Aspekte von Prosodie hinaus schlagen sich schließlich auch Sprechereigenschaften wie Alter, Geschlecht und aktuelle Befindlichkeit in sprachlichen Äußerungen nieder. Die letztgenannte Dimension, die stimmlich-vokale Vermittlung von Emotionen, wird als affektive oder emotive Prosodie bezeichnet. Beispielsweise ist eine freudig intonierte Äußerung durch ausgeprägtere Fluktuationen von Tonhöhe und Lautstärke gekennzeichnet als eine traurige Mitteilung. Allerdings besteht keine Eins-zu-Eins-Beziehung zwischen emotionalem Verhalten und akustischen Parametern des Sprachsignals [10, 11]. Und darüber hinaus dürften eine Vielzahl akustischer Dimensionen erforderlich sein, um Emotionen auf der Signalebene voneinander abzugrenzen.

Zusammenfassung

Durch diesen kurz gefassten Überblick zum Konzept der Prosodie sollte verdeutlicht werden, dass suprasegmentale Merkmale sprachlicher Äußerungen mehrere kommunikative Funktionen vermitteln und mit einer Vielzahl sich wechselseitig beeinflussender akustischer Parameter verknüpft sind. Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit steht Prosodie als ein Medium des Ausdrucks von Emotionen und Affekten bzw., in zeitgemäßerer Terminologie, als einer Domäne emotionalen Verhaltens.

Klinische Daten: Beeinträchtigungen der Verarbeitung affektiver Prosodie bei umschriebenen Hirnläsionen

Neuroanatomische Korrelate der motorischen Aprosodie

Monrad-Krohn hat das Syndrom eines „fremden Akzents“ nach erworbener Hirnschädigung mit dem Namen Dysprosodie belegt [2]. Im Rahmen der wissenschaftlichen Literatur hat wohl erstmals Marie 1907 auf dieses Phänomen aufmerksam gemacht: Ein in Paris beheimateter Patient entwickelte in Verbindung mit einer rechtsseitigen Halbseitenlähmung einen ausgeprägt elsässischen Dialekt [12]. Und Pick publizierte 1919 die erste eingehendere Beschreibung einer derartigen Konstellation [13]. Meist wird dieses Störungsbild, das fast ausschließlich in Verbindung mit einer linkshemisphärischen Läsion auftritt und wahrscheinlich eine sprechapraktische Beeinträchtigung der Artikulation widerspiegeln dürfte, nun als „foreign accent syndrome“ bezeichnet [12].

Auch Auffälligkeiten von Sprachmelodie und Sprechrhythmus im Rahmen aphasischer Syndrome, die nicht als „foreign accent

syndrome“ imponieren, werden terminologisch als Dysprosodie eingeordnet. Veränderungen dieser Komponenten verbaler Äußerungen als Symptome einer Aphasie wie auch das „foreign accent syndrome“ weisen natürlich nicht auf eine Beeinträchtigung emotionalen Verhaltens hin, sondern haben als Folge gestörter Laut- und Satzbildung zu gelten. Aus diesen Beobachtungen darf aber nicht geschlossen werden, die Implementierung linguistischer Prosodie sei ausschließlich über die linke Hemisphäre vermittelt. Neuere akustische Analysen des Sprachsignals bei Patienten mit unilateraler Hirnschädigung weisen darauf hin, dass in gewissen Grenzen auch die rechte Hirnhälfte an linguistisch-prosodischen Funktionen beteiligt sein dürfte, insbesondere an der Modulation der Intonationskontur [14].

Schon 1879 hatte Hughlings Jackson auf der Grundlage klinischer Beobachtungen die „proper variations of voice“ im Rahmen der „emotional language“ als eine Leistung der nicht-sprachdominanten Hirnhälfte eingeordnet [15]. Aber erst etwa ein Jahrhundert später erfolgte eine systematische Untersuchung der Stimmveränderungen bei Patienten mit unilateraler rechtshemisphärischer Hirnschädigung, und bei einer Untergruppe konnte eine „klagsame“ Stimmqualität in Verbindung mit einer erhöhten (!) Sprechlautstärke festgestellt werden [16]. Tucker u. Mitarb. veröffentlichten 1977 die wohl erste systematische Untersuchung zum Einfluss rechtshemisphärischer Läsionen auf die Fähigkeit, semantisch neutrale Sätze mit einer spezifischen emotionalen Tönung zu verstehen [17]. Im Vergleich zu gesunden Kontrollpersonen konnten die Patienten weniger zuverlässig durch stimmlich-vokale Modulation verbaler Äußerungen einen vorgegebenen Affekt vermitteln. Zwei Kasuistiken von Ross u. Mesulam aus dem Jahr 1979, beide Patienten litten nach einem rechtshemisphärischen frontoparietalen Infarkt unter einer monotonen und affektiv unmodulierten Stimme bei unbeeinträchtigtem emotionalen Erleben, haben diese Beobachtungen bestätigt und als motorische Aprosodie im Gefolge einer Schädigung des Broca-Analogons der nicht-sprachdominanten Hirnhälfte eingeordnet [18]. Einer der beiden Patienten war in der Lage, Fragen durch satzterminale Anhebung des Tonhöhenverlaufs zu markieren; darüber hinaus wurde das Profil linguistischer Prosodie nicht eingehender analysiert. Motorisch-afrosodische Beeinträchtigungen der Sprachproduktion stellen, das sei hier eingefügt, kein bloß „kosmetisches“ Problem dar, sondern können die Kommunikation im Alltag erheblich kompromittieren und auch zur Berufsunfähigkeit führen. Einige nachfolgende Veröffentlichungen dokumentierten ebenfalls ein vermindertes affektiv-prosodisches Ausdrucksvermögen im Gefolge einer Schädigung der rechten Hirnhälfte, auch bei Patienten, die mit einer Tonsprache aufwuchsen [19,20]. Und in Übereinstimmung mit dem Modell einer vorwiegend rechtshemisphärischen Implementierung affektiver Prosodie führte die transiente medikamentöse Deaktivierung dieser Hirnhälfte (Wada-Test) zu einer Beeinträchtigung der emotionalen Intonation von Satzäußerungen [21]. Allerdings konnten mehrere nachfolgende Untersuchungen, auch umfangreiche Gruppenstudien auf der Basis eines systematisch ausdifferenzierten Testmaterials, die Annahme, dass die motorische Aprosodie ein „Lokalzeichen“ des rechtshirnigen dorsolateralen Frontallappens darstellt, nicht bestätigen [4,12,22]. Berücksichtigt werden muss in diesem Zusammenhang, dass Lateralitätseffekte der Implementierung affektiv-prosodischer Eigenschaften von elementaren akustischen Signaleigenschaften abhängen

dürften. Beispielsweise wurde beobachtet, dass die Modulation der Tonhöhe im Wesentlichen über die rechte Hemisphäre gesteuert werden dürfte, die Kontrolle von Silben- und Pausendauern im Rahmen der Sprachproduktion aber vorwiegend über die kontralaterale Hirnhälfte erfolgt [14].

Auf der Grundlage der vorhandenen klinischen Studien lässt sich nicht mit hinreichender Sicherheit die Frage der Hemisphärenlateralität emotionalen Verhaltens im stimmlich-vokalen Bereich klären oder gar eine Zuordnung zu posterioren Abschnitten des dorsolateralen Stirnlappens der rechten Hirnhälfte rechtfertigen. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass expressiv-prosodische Störungen im Gefolge kortikaler Läsionen, unter Einschluss des angrenzenden Marklagers, viel seltener in Erscheinung treten als motorische Aphasien und eher als eine klinische Rarität gelten müssen. Auch diese Befunde sprechen gegen eine im Vergleich zur Sprachverarbeitung homologe Organisation expressiv-prosodischer Funktionen im Bereich der rechten Hirnhälfte. Das Argument, dass im Rahmen der Anamneseerhebung und klinischen Untersuchung vielleicht Veränderungen der Prosodie nicht berichtet werden oder dem Arzt nicht auffallen, ist nicht stichhaltig, da die Patienten durch diese Störungsbilder in ihren Alltagsverrichtungen bzw. beruflichen Tätigkeit beeinträchtigt sind (siehe oben).

Der motorischen Aprosodie vergleichbare Kommunikationsstörungen wurden auch bei Läsionen des anterioren Corpus callosum beobachtet [23]. Als eine mögliche Ursache sind Antriebsstörungen im Gefolge einer Dysfunktion der dem vorderen Balken benachbarten mesiofrontalen Strukturen (supplementär-motorische Area, vorderer zingulärer Kortex) in Betracht zu ziehen, die auch eine leise und unmodulierte Stimme hervorrufen können [24]. Darüber hinaus lag den beiden von Ross u. Mesulam im Jahr 1979 veröffentlichten Fällen einer motorischen Aprosodie jeweils ein sehr ausgedehnter Infarkt zugrunde, der sich von suprasylviischen frontalen und parietalen kortikalen Arealen bis in die Basalganglien hinein erstreckte [18]. Auch im Rahmen des Parkinson-Syndroms kann sich eine zunehmende Hypophonie einstellen, sei es als Folge einer zentralnervösen Bewegungsstörung der Kehlkopfmuskulatur (laryngeale Akinesie oder laryngealer Rigor [25,26]) oder einer Beeinträchtigung vokal-emotionalen Verhaltens [27]. Vor diesem Hintergrund ist in Erwägung zu ziehen, dass eine motorische Aprosodie bei rechtshemisphärischen Läsionen an eine Schädigung mesiofrontaler oder striataler Strukturen bzw. der diese Areale verbindenden Bahnsysteme gebunden ist. Die ausgesprochen geringe Inzidenz dieses Syndroms bei Infarkten der rechten Hirnhälfte wäre dann dadurch zu erklären, dass klinisch auffällige Beeinträchtigungen der Phonation in der Regel bilaterale Dysfunktionen der Basalganglien oder des Frontalhirns voraussetzen.

Neuroanatomische Korrelate der Perzeption affektiver Prosodie

Heilman u. Mitarb. dokumentierten 1975 erstmals bei Patienten mit rechtsseitiger temporoparietaler Läsion eine verminderte Fähigkeit der Rekognition affektiver Prosodie („auditory affective agnosia“) [28]. Eine nachfolgende Studie derselben Arbeitsgruppe konnte diese Befunde bestätigen und erweitern: Probanden mit einer Schädigung der nicht-sprachdominanten Hirnhälfte zeigten neben einer beeinträchtigten Identifikation der emotio-

nalen Tönung von Satzäußerungen auch eine verminderte Fähigkeit der Diskrimination dieser Stimuli [17]. In Übereinstimmung mit diesen Beobachtungen konnte mithilfe der Technik dichotischen Hörens ebenfalls eine bevorzugte Verarbeitung affektiv-prosodischer Merkmale im Bereich der rechten Hirnhälfte dokumentiert werden [29,30].

Auf der Grundlage einer allerdings eher geringen Zahl an Kasus-tiken hat dann Ross 1981 das Störungsbild der auditiven Affekt-agnosie in ein umfassendes Konzept integriert, das klinisch-symptomatologisch und neuroanatomisch eine zur Klassifikation der Aphasien analoge Unterteilung aprosodischer Syndrome in motorische, sensorische, globale, amnestische und transkortikale Varianten vorsieht, gebunden an jeweils homologe Läsionen im Bereich der rechten Hirnhälfte [19]. Vor dem Hintergrund dieses Modells wäre nach Läsion des Wernicke-Analogons der rechten Hemisphäre eine Beeinträchtigung der Perzeption prosodischer „cues“ bei erhaltenem auditiven Sprachverständnis zu erwarten. Darüber hinaus sollte die Spontansprache dieser Patienten eine uneingeschränkte Bandbreite prosodischer Merkmale aufweisen, die aber in Bezug auf den Inhalt der Aussage als inadäquat imponieren können. Nachfolgende Studien zur Perzeption prosodischer Qualitäten sprachlicher Äußerungen konnten aber das Konzept einer Dominanz der rechten Hirnhälfte in Bezug auf die Verarbeitung dieser Merkmale nicht durchgängig bestätigen [22]. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass Gruppenstudien, die Patienten lediglich nach Maßgabe des Vorliegens einer rechtshemisphärischen Schädigung rekrutieren, die Effekte umschriebener kritischer Läsionen maskieren könnten.

Einige klinische Studien deuten darauf hin, dass die Dekodierung linguistischer Aspekte von Prosodie auch über die sprachdominante Hirnhälfte vermittelt wird. Beispielsweise dokumentierten Heilman u. Mitarb. [31] eine Beeinträchtigung der Identifikation des Satzmodus tiefpassgefilterter Stimuli bei fokalen Läsionen beider Hemisphären. Und Emmorey [32] notierte ausschließlich im Gefolge von Funktionsstörungen der linken Hirnhälfte eine verminderte Fähigkeit, das Akzentmuster beispielsweise zusammengesetzter Substantive oder von Adjektiv-Substantiv-Phrasen zu bestimmen. Auch nachfolgende Patientenstudien konnten belegen, dass die Enkodierung linguistisch-prosodischer Merkmale mehr als die affektive Tönung von Äußerungen an die Integrität der sog. sprachdominanten Hemisphäre gebunden ist [33,34]. Zusammengefasst scheint die Abhängigkeit linguistisch-prosodischer Funktionen von der Integrität der linken Hemisphäre besser belegt zu sein als die Verbindung der Perzeption affektiver Prosodie mit der kontralateralen Hirnhälfte.

Anstelle eines eindeutigen Konzepts lassen sich auf der Grundlage der vorliegenden klinischen Daten und/oder psychoakustischer Untersuchungen bei gesunden Probanden lediglich mehrere alternative Modellvorstellungen formulieren:

- Alle prosodischen Merkmale, unabhängig von ihrer kommunikativen Funktion, werden bevorzugt im Bereich der rechten Hirnhälfte repräsentiert und dann über transkallosale Verbindungen mit (nicht prosodischer) linguistischer Information verknüpft [35].
- Prosodische Elemente der Silben- und Wortebene (Tonsprachen, Wortakzent) werden über die sprachdominante Hemisphäre vermittelt, die emotionale Tönung verbaler Äußerungen und die linguistische Prosodie auf der Satzebene sind jedoch an kontralaterale Hirnregionen gebunden [36]. Auch die „dynamic dual pathway view of auditory language comprehension“ [37] scheint nur satzprosodische Komponenten mit rechtsseitigen Strukturen zu assoziieren.

- Linguistisch- und affektiv-prosodische Merkmale weisen im Bereich der Perzeption eine differenzielle Hemisphärenlateralität auf: die linguistische Komponente ist an die linke, die emotionale Dimension an die rechte Hemisphäre gebunden („functional lateralization hypothesis“ [38]).
- Akustische Merkmale des Sprachsignals bestimmen die Hemisphärenlateralität der Wahrnehmung affektiv-prosodischer Merkmale: Zeitstrukturen werden im Bereich der linken, Intonationskonturen auf der Ebene der rechten Hemisphäre entschlüsselt [39]. Beide Hemisphären sind daher an der Verarbeitung affektiv-prosodischer Qualitäten des Sprachsignals beteiligt, vermitteln allerdings unterschiedliche Operationen.
- Perzeption und Implementierung prosodischer Qualitäten erfolgen vornehmlich auf der Ebene subkortikaler Strukturen und weisen keine kortikalen Hemisphärenlateralisationseffekte auf [23].

Eine Reihe klinischer und elektrophysiologischer Befunde deuten darauf hin, dass das Erleben (!) positiver und negativer Affekte durch eine differenzielle Hemisphärenlateralität gekennzeichnet ist (Valenzhypothese [5]). Dieses Modell wurde ursprünglich eingeführt, um die unterschiedlichen Auswirkungen des Wada-Tests (siehe oben) auf die Befindlichkeit eines Probanden in Abhängigkeit von der inaktivierten Hirnhälfte zu erklären (linke Hemisphäre = depressive Verstimmungen, rechte Seite = euphorische Zustände [40]). Valenzabhängige Lateralitätseffekte wurden auch berichtet im Bereich der Expression und Perzeption mimischen und vokalen emotionalen Verhaltens [41–43]. Allerdings konnten auch diese Befunde nicht durchgängig bestätigt werden [22,24,44,45].

Untersuchungen zur Expression und Perzeption affektiver Prosodie bei gesunden Probanden: funktionell-bildgebende Verfahren

Zerebrale Korrelate der Implementierung expressiv-prosodischer Merkmale

Bislang wurde die prosodische Dimension der Sprachproduktion gesunder Probanden nur ansatzweise mithilfe funktionell-bildgebender Methoden untersucht. Ein allerdings präliminares Experiment unserer Arbeitsgruppe konnte mithilfe der funktionellen Kernspintomographie (fMRI = „functional magnetic resonance imaging“) erste Anhaltspunkte eines Lateralitätseffekts freudig oder traurig intonierter Silbenrepetitionen zugunsten der rechten Hirnhälfte im Bereich des Gyrus temporal superior dokumentieren [46,47]. Darüber hinaus vermochte eine fMRI-Studie zu zeigen, dass die rhythmische Strukturierung von Silbenrepetitionen zur Aktivierung rechtshemisphärischer perisylvischer Strukturen in Verbindung mit den kontralateralen Basalganglien führt [48]. Letztere Untersuchung analysierte jedoch das suprasegmentale Merkmal des Silbenrhythmus nicht im Zusammenhang emotionalen Verhaltens, sodass zunächst offen

bleiben muss, ob diese Befunde auch auf die Domäne stimmlich-emotionalen Ausdrucks übertragen werden können.

Zerebrale Korrelate der Wahrnehmung emotionaler Intonation sprachlicher Äußerungen

Papanicolaou u. Mitarb. haben 1983 erstmals dokumentiert, dass affektiv-prosodische und linguistisch-phonetische Stimuluskomponenten eine differenzielle Hemisphärenlateralität evokeder Potenziale hervorrufen [49]. Da die akustischen Korrelate stimmlich-vokalen emotionalen Verhaltens vor allem Phrasen und Sätze charakterisieren und deshalb als suprasegmentale Eigenschaften verbaler Äußerungen gelten, stellt die Ableitung von DC-Potenzialen, d. h. langsamer Gleichspannungsschwankungen an der Schädeloberfläche, die sich über wenige Sekunden erstrecken, eine alternative elektrophysiologische Methode der Untersuchung der „affektiven Tönung“ von Satzäußerungen dar. Pihan u. Mitarb. haben 1997 erstmals dieses Verfahren zur Untersuchung der Hemisphärenlateralität der Verarbeitung emotionaler Prosodie eingesetzt [50]. Die Probanden hatten, erstens, die dargestellte Emotion und, zweitens, die expressivere Äußerung paarweise dargebotener Sätze, die systematisch entweder in Bezug auf Intonationskontur oder Silbendauer variierten, zu identifizieren. Unter diesen Bedingungen zeigte die Verteilung der DC-Potenziale konsistent eine stärkere rechtshemisphärische Negativierung. Eine nachfolgende Studie dokumentierte eine Interaktion der beobachteten Lateralitätseffekte mit „inner speech“, d. h. nicht-lautierendem bzw. vorgestelltem Sprechen [51]. Ergänzend konnten fMRI Untersuchungen unserer Arbeitsgruppe eine distinkte Linkslateralität der hämodynamischen Aktivierung prärolandischer Strukturen in Verbindung mit „inner speech“ belegen [52–54]. Aus diesen Daten geht hervor, dass in Experimenten zur Verarbeitung affektiver Prosodie Seitendifferenzen der Stimulusverarbeitung maskiert werden können, falls es zu einem „rehearsal“ von Testmaterialien kommt.

George u. Mitarb. veröffentlichten 1996 eine PET(Positronen-emissionstomographie)-Studie, die erstmals das mit der Perzeption emotionaler Prosodie assoziierte Verteilungsmuster hämodynamischer Aktivierung darzustellen versuchte [55]. Die Probanden hatten die Aufgabe, entweder die durch das Intonationsmuster („prosody“) oder die durch den Satzinhalt („content“) derselben verbalen Äußerungen vermittelte Emotion zu identifizieren. Als Kontrollbedingung war in einem separaten Durchgang das zweite Wort jedes vorgegebenen Satzes laut zu wiederholen. Die Evaluation affektiver Prosodie im Vergleich zum Nachsprechen des Zielwortes führte zu einer signifikanten hämodynamischen Reaktion des inferioren dorsolateralen Frontallappens der rechten Hemisphäre (Gyrus frontalis inferior, Pars orbitalis; Koordinaten im Talairach-Atlas: 35, 35, -6) bei grenzwertiger Aktivierung der kontralateralen Seite. Die Berechnung des Kontrasts „prosody versus content“ ergab auf der Ebene der Hirnrinde keine signifikanten Effekte. Diese Ergebnisse bestätigen zwar die auf der Grundlage klinischer Befunde formulierte Annahme einer vorwiegend rechtshemisphärischen Verarbeitung affektiver Prosodie, die Probleme der Interpretation hämodynamischer Aktivierung seien in diesem Zusammenhang außer Acht gelassen, verknüpfen aber diese perzeptiven Leistungen nicht mit temporoparietalen Arealen, sondern mit Strukturen rostral der Zentralfurche.

Nachfolgende Untersuchungen, die affektiv-prosodisch modulierte Wörter, sei es im Vergleich zur Rekognition von Sprechermerkmalen [56] oder zur Detektion von Lautkategorien [57], als Testmaterial verwendeten, konnten den Befund einer frontalen Aktivierung bestätigen. Darüber hinaus führte die Evaluation affektiver Prosodie von Nonsenssilben oder Einzelwörtern zu einer vorwiegend rechtshemisphärischen hämodynamischen Reaktion im Bereich des auditiven Kortex [57,58]. Auch passives Hören emotional „gefärbter“ Satzäußerungen, kongruent oder inkongruent zum jeweiligen propositionalen Gehalt, kann schon eine vorwiegend rechtshemisphärische hämodynamische Aktivierung im Bereich des Temporal- und Frontallappens hervorrufen [59]. Lateralitätseffekte zugunsten der rechten Hirnhälfte auf der Ebene des Planum temporale und der frontooperkulären Rinde scheinen auch bei der Analyse linguistisch-prosodischer Merkmale von Satzäußerungen aufzutreten [60].

Ein an diese Untersuchungen anknüpfendes Experiment unserer Arbeitsgruppe ordnete 100 deutsche Sätze mit emotional neutralem propositionalen Gehalt randomisiert einer von fünf Emotionen (Freude, Ärger, Angst, Trauer, Ekel) zu, die dann sowohl von einer Schauspielerin als auch einem Schauspieler entsprechend intoniert gesprochen wurden. Da beispielsweise Priming-Effekte der affektiv-prosodischen Modulation von Satzäußerungen auf die nachfolgende Verarbeitung eines Zielwortes systematische Geschlechtsunterschiede aufweisen [61], wurden ein männlicher und eine weibliche Sprecherin berücksichtigt.

In einer psychoakustischen Vorstudie hatten zehn Hörer die insgesamt 200 Äußerungen (5 Emotionen \times 20 Sätze \times 2 Sprecher) nach der dargestellten Emotion zu beurteilen. Aus jeder Kategorie wurden die fünf Äußerungen mit der höchsten Treffsicherheit als Testmaterial ausgewählt (5 Emotionen \times 5 Sätze \times 2 Sprecher; Prozentsatz korrekter Antworten über die fünf Emotionen hinweg: 91–94%). Das nachfolgende fMRI-Experiment (zehn rechtshändige Versuchspersonen; 1,5-Tesla-Scanner, Siemens Vision) hatte das Design einer „two-dimensional task“: In zwei separaten Durchgängen hatten die Probanden an derselben Serie von Satzproduktionen einerseits die dargestellte Emotion zu identifizieren und andererseits eine linguistisch-phonologische Aufgabe (Detektion des ersten Vokals nach dem ersten /a/) durchzuführen. Im Vergleich mit der Ruhebedingung führten beide Aufgaben zu einem sich weitgehend überlappenden bilateralen Verteilungsmuster hämodynamischer Aktivierung im Bereich frontaler, temporaler, parietaler, thalamischer und zerebellärer Strukturen. Ein nachfolgender Schritt der Signalanalyse kontrastierte die beiden aufgabengebundenen Aktivierungsmuster miteinander. Die Identifikation affektiver Prosodie (versus Vokaldetektion) ging mit zwei signifikanten hämodynamischen Reaktionen, die jeweils auf die rechte Hemisphäre beschränkt waren, einher: Gyrus temporalis superior (Brodmann Area [BA] 22/42) und Gyrus frontalis inferior, Pars orbitalis (BA 47), die umgekehrte Subtraktion führte zu einer Aktivierung (links)hemisphärischer dorsolateraler frontaler Strukturen (BA 44) und des Lobulus parietalis inferior beidseits (Abb. 1). Der Kontrast jeder Emotion zu den jeweils vier anderen Kategorien konnte keinerlei valenzspezifische Aktivierungseffekte aufdecken.

Die beobachteten Effekte einer lateralisierten hämodynamischen Aktivierung im Bereich des Gyrus temporalis superior und

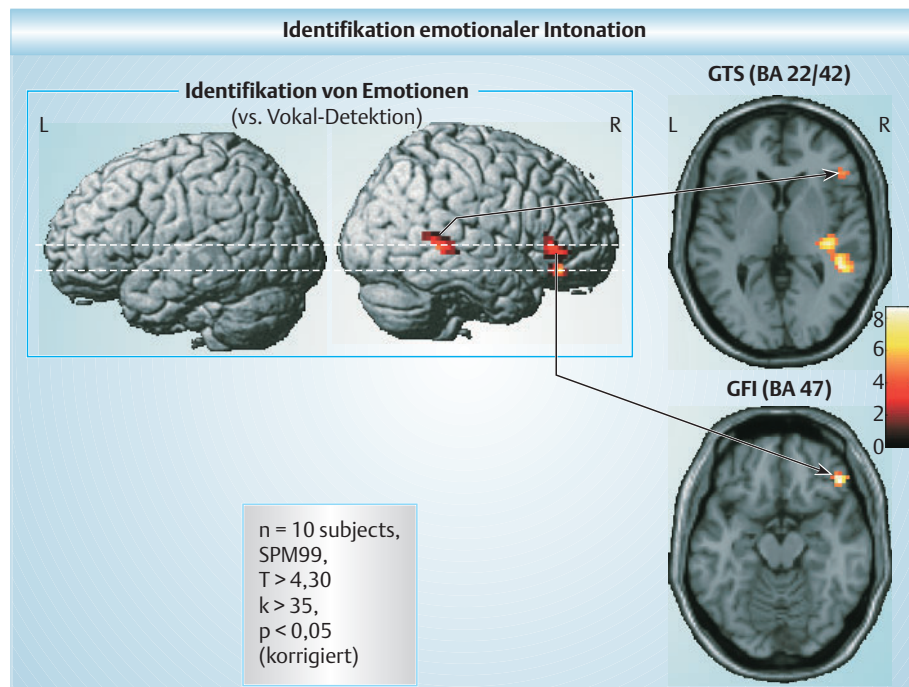


Abb. 1 Verteilung hämodynamischer Aktivierung (funktionelle Kernspintomographie) unter einer Aufgabe der Identifikation affektiver Prosodie: In getrennten Durchgängen hatten die Probanden entweder die stimmlich „ausgedrückte“ Emotion auditiv vorgegebener Satzäußerungen zu bestimmen oder aber den ersten Vokal nach dem ersten /a/ zu detektieren (linguistisch-phonologische Aufgabe). Dargestellt ist der Kontrast „Emotionsidentifikation“ versus „Vokaldetektion“. GTS = Gyrus temporalis superior, GFI = Gyrus frontalis inferior.

der Pars orbitalis des Gyrus frontalis inferior rechts bei Identifikation der emotionalen Tönung sprachlicher Äußerungen sind natürlich nicht notwendigerweise das Ergebnis einer bevorzugten Verarbeitung emotionaler Information im Bereich der rechten Hirnhälfte.

- Klinische und funktionell-bildgebende Befunde deuten darauf hin, dass die rechte Hemisphäre bevorzugt die Tonhöhe („pitch“) auditiver Signale extrahiert und darüber hinaus ein auf tonales Material ausgerichtetes Arbeitsgedächtnis umfasst [62,63].
- Der „Double filtering by frequency“-Theorie zufolge weisen die perceptiven Leistungen der beiden Hirnhälften unterschiedliche Zeitfenster der Informationsverarbeitung auf [64,65]. Zugespielt formuliert: Es wird angenommen, dass die linke Hemisphäre eine Hochpass-, die kontralaterale Seite eine Tiefpassfilterung afferenter auditiver Information vornimmt. Linguistisch- und affektiv-prosodische suprasegmentaler Datenstrukturen, die durch Zeitkonstanten im 100-ms-Bereich charakterisiert sind, sollten deshalb bevorzugt im Bereich der rechten Hemisphäre, segmental-linguistischer Elemente, die sich vor allem über eine Spanne von wenigen 10 ms erstrecken, vorwiegend linksseitig verarbeitet werden.

Vor dem Hintergrund dieser Modellvorstellungen könnten die beobachteten hämodynamischen Lateralitätseffekte Seitenunterschiede perceptiver Leistungen des zentral-auditiven Systems widerspiegeln, die der Identifizierung von Emotionen vorausgehen. Um die Mechanismen der zerebralen Verarbeitung affektiver Prosodie weiter einzugrenzen, wurde eine zweite „two-dimensional task“ konstruiert, die eine Evaluation der linguistischen und affektiven Prosodie von Sätzen auf der Grundlage akustisch streng kontrollierter Intonationskonturen beinhaltete [66]. Durch Subtraktion der an diese beiden Aufgaben geknüpften Aktivierungsmuster voneinander müssten sich Lateralitätseffekte der Verarbeitung tonaler suprasegmentaler Merkmale „herausrechnen“ lassen. Die verbleibenden hämodynamischen

Reaktionen sollten dann spezifische linguistische und emotionale Enkodierungsoperationen widerspiegeln. Als Testmaterial dienten 140 resynthetisierte Varianten eines semantisch neutralen deklarativen Satzes („Der Schal ist in der Truhe“) sowohl von einem männlichen und von einem weiblichen Sprecher produziert. Abhängig davon, ob das erste oder das zweite Substantiv betont wird („Der Schal ist in der Truhe“ versus „Der Schal ist in der Truhe“), stellt diese Äußerung eine Antwort auf die Frage „Was ist in der Truhe?“ oder „Wo ist der Schal?“ dar (Satzfokus). Unter Verwendung des Analyse- und Resynthesemoduls des Speech Lab CSL 4300 (Kay Elemetrics) wurden in einem ersten Schritt fünf Varianten der Intonationskontur der beiden gesprochenen Sätze hergestellt (Übergang von Fokus 1 [„Schal“) zu Fokus 2 [„Truhe“) in fünf Stufen). Als zweiter Schritt wurde dann in ebenfalls fünf Schritten der Umfang der Tonhöhenbewegung jeder der fünf Fokusvarianten verändert (Abb. 2). Insgesamt umfasste das Testmaterial zwei Serien (männlicher/weiblicher Sprecher) von jeweils 25 Sätzen, die systematisch in zwei orthogonal zueinander stehenden prosodischen Dimensionen variierten: Satzfokus (akustisches Korrelat: Lokalisation des Tonhöhenmaximums) und Expressivität (akustisches Korrelat: Tonhöhenumfang).

Die Versuchspersonen hatten, in zwei getrennten Durchgängen des Experimentes, zu entscheiden, welcher der beiden dargebotenen Sätze eher eine Antwort auf die Frage „Wo ist der Schal?“ und „Was ist in der Truhe?“ darstellt. Die fMRI-Messungen erfolgten an einem 1,5-Ganzkörper-Scanner (Siemens Vision). Im Vergleich zur Ruhebedingung waren beide Aufgaben mit einem bilateralen und sich weit gehend überlappenden Aktivierungsmuster im Bereich des Frontalhirns (mediale, dorsolaterale und orbitoventrale Strukturen), der vorderen Insel, oberer Anteile des Temporallappens, des motorischen Kortex, des Thalamus und des Kleinhirns verknüpft. Nach Berechnung des Kontrastes „affektive versus linguistische Prosodie“ zeigte sich lediglich eine beidseitige hämodynamische Antwort im Bereiche des orbi-

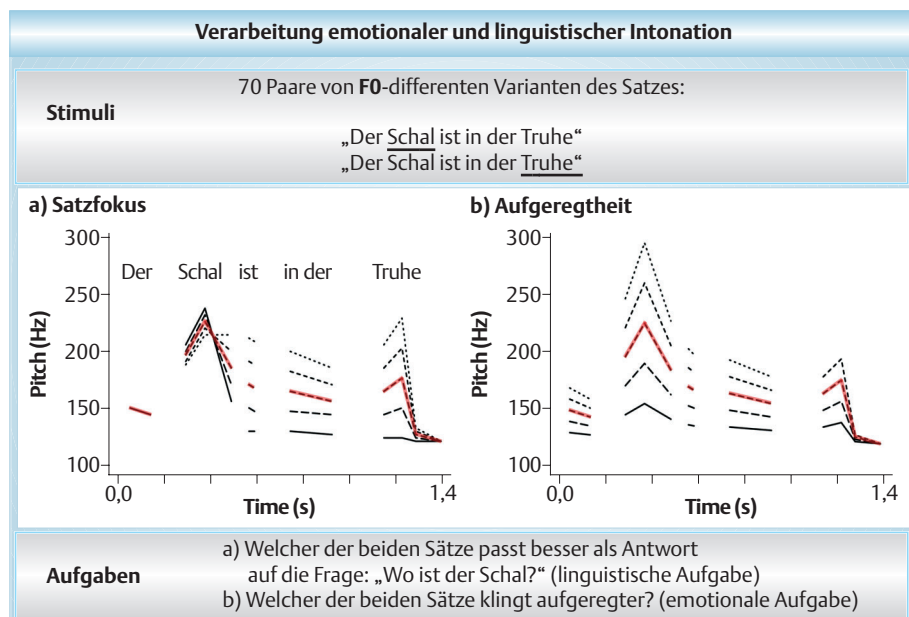


Abb. 2 Schematische Darstellung der Manipulation der Intonationskontur eines vom Inhalt her emotional neutralen deklarativen Satzes in zwei Schritten: **a)** fünf Varianten der Fokussierung, d. h. des Tonhöhenmaximums, **b)** fünf Varianten des Tonhöhenumfangs jeder der fünf Fokusvarianten (Details zur Methodik in [66]). Die erste Stufe der Manipulation verändert eine Komponente linguistischer Prosodie (Satzfokus), die zweite die affektiv-prosodische Qualität.

tobasalen frontalen Kortex (Abb. 3). Die umgekehrte Subtraktion führte zu einer umschriebenen Aktivierung des linkshemisphärischen dorsolateralen Frontalhirns unter Einschluss der Broca-Area (BA 44/45).

In Übereinstimmung mit der vorausgegangenen Untersuchung führte die Analyse der affektiven Prosodie verbaler Äußerungen, als Kontrast diente wieder eine linguistische Aufgabe, zu einem orbitofrontalen Aktivierungsmuster. Auch emotional „aufgeladene“ visuelle [67,68] und gustatorische Stimuli [69] gehen mit hämodynamischen Antworten dieser Strukturen einher. Diese orbitofrontalen Areale, die reziproke Bahnverbindungen mit sensorischen Hirnregionen als auch limbischen Strukturen aufweisen, könnten das neuroanatomische Substrat der Integration multimodaler sensorischer Information mit affektiven Reaktionen darstellen. Darüber hinaus führte die Evaluation linguistischer und affektiver Prosodie zu ausgeprägteren hämodynamischen

Reaktionen im Bereich des rechtsseitigen Temporallappens (höhere T-Werte, allerdings wurde die Signifikanz dieser Laterali-tätseffekte nicht explizit geprüft). Möglicherweise, so eine erste tentative Interpretation, ist die Repräsentation von Intonationskonturen nicht durch eine differenzielle zerebrale Asymmetrie gekennzeichnet, sondern die Analyse linguistischer als auch affektiver Sprachmelodie wird bevorzugt über die rechte Hirnhälfte vermittelt. Diese Schlussfolgerung würde sich einfügen in das „Double-filtering-by-frequency“-Modell der Hemisphärenlateralität, das eine Verarbeitung suprasegmentaler Merkmale unabhängig von ihrer kommunikativen Funktion im Bereich der rechten Hirnhälfte impliziert [64,65]. Die Untersuchungen unserer Arbeitsgruppe zur Enkodierung von Intonationskonturen sind mit diesem Modell vereinbar.

Eine einzige Studie hat bislang versucht, die mögliche differenzielle Hemisphärenlateralität von Intonationskonturen und Sil-

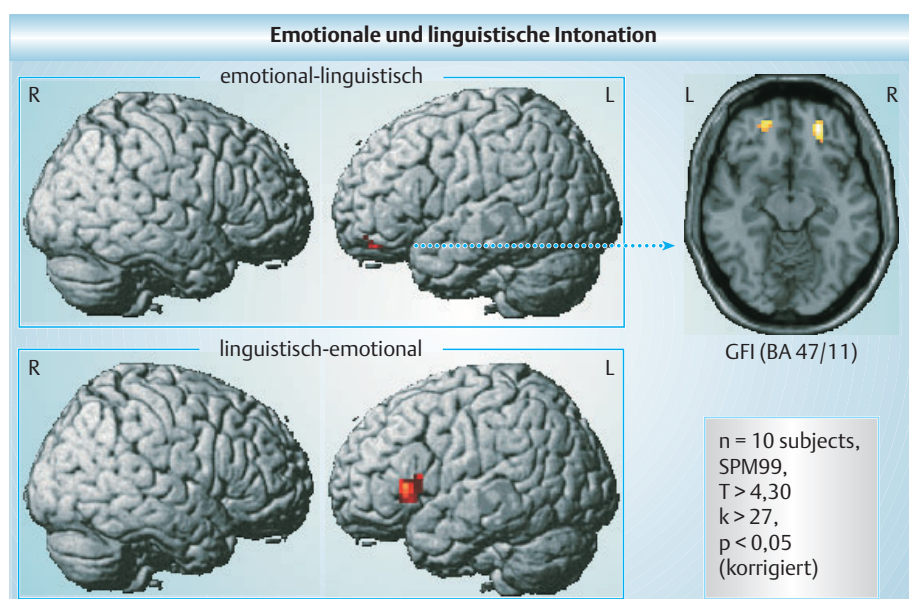


Abb. 3 Hämodynamische Reaktionen (funktionelle Kernspintomographie) unter einer Aufgabe der Beurteilung affektiv-prosodischer Qualitäten (oben) bzw. der Evaluation linguistischer Prosodie (unten): In getrennten Durchgängen hatten die Probanden an paarweise dargebotenen Sätzen, die in der Position des Tonhöhenmaximums und/oder im Umfang der Tonhöhenbewegung systematisch variierten (vgl. Legende zu Abb. 2), zu entscheiden, welcher der beiden Sätze emotional lebhafter wirkt oder ob der Fokus auf dem ersten oder dem zweiten Substantiv liegt. Dargestellt sind die Kontraste der Aktivierungsmuster (vgl. [66]). GFI = Gyrus frontalis inferior.

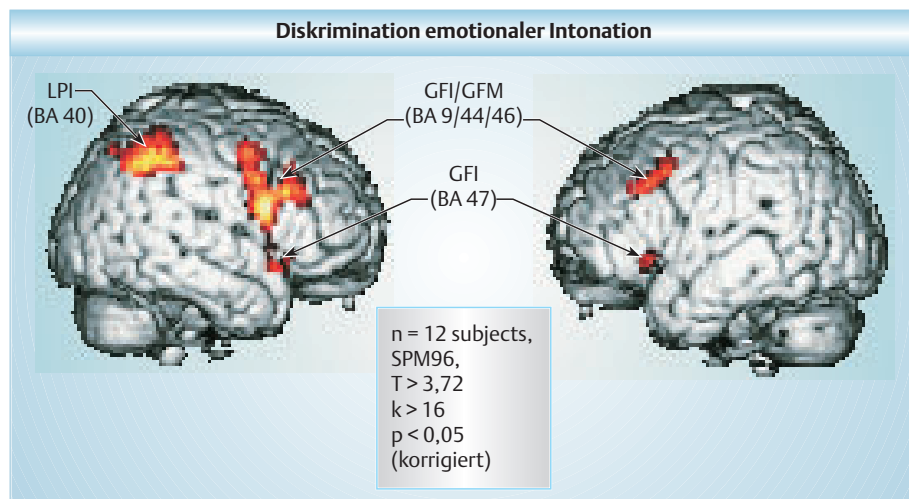


Abb. 4 Verteilung hämodynamischer Antworten (funktionelle Kernspintomographie) bei Diskrimination der affektiv-prosodischen Qualität paarweise angebotener Sätze, die entweder in ihrer Intonationskontur oder in ihrer rhythmischen Struktur systematisch variierten (Subtraktion der Aktivierung bei Applikation des zweiten versus des ersten Satzes). GFI = Gyrus frontalis inferior, GFM = Gyrus frontalis medius, LPI = Lobulus parietalis inferior (Details zu Methodik und den Ergebnissen in [70]).

benrhythmus als der beiden wichtigsten suprasegmentalen Parameter des Sprachsignals herauszuarbeiten [70]. Die Evaluation der emotionalen Expressivität von Satzäußerungen führte sowohl im Fall einer Modifikation der Zeitstruktur als auch der Tonhöhenfluktuationen zur Aktivierung eines bevorzugt rechtsseitigen Netzwerkes, das frontodorsolaterale, orbitofrontale, temporale und parietale Regionen beinhaltet (Abb. 4). Auch ein vorausgegangenes elektrophysiologisches Experiment hatte eine stärkere rechtshemisphärische Negativierung der registrierten DC-Potenziale sowohl bei Manipulation der Intonationskontur als auch der (suprasegmentalen) Zeitstruktur von Satzäußerungen gezeigt [52]. Allerdings kann bislang nicht ausgeschlossen werden, und insofern handelt es sich um präliminare Daten, dass auch bei Manipulation des Silbenrhythmus die parallele Verarbeitung tonaler Information eine stärkere rechtshemisphärische Aktivierung hervorruft.

Klinische Implikationen der funktionell-bildgebenden Befunde zur Perception affektiver Prosodie

Die bislang vorliegenden funktionell-bildgebenden Daten deuten auf zwei distinkte und wahrscheinlich hierarchisch angeordnete kortikale Verarbeitungsstufen der Perception affektiver Prosodie hin:

- a) eine vorwiegend rechtshemisphärische Repräsentation von Intonationskonturen verbaler Äußerungen im Bereich posteriorer Anteile des Gyrus temporalis superior und
- b) eine im Wesentlichen an orbitofrontale Strukturen geknüpfte Evaluation von Art und Ausprägung des von affektiv-prosodischen Merkmalen des Sprachsignals vermittelten emotionalen Verhaltens.

Rechtsseitige temporoparietale Läsionen können das Syndrom einer auditiven Affektagnosie hervorrufen [28]. In Übereinstimmung mit diesem klinischen Befund führt die Enkodierung affektiv-prosodischer Merkmale des Sprachsignals zu einer hämodynamischen Aktivierung vor allem posteriorer Anteile des oberen Temporallappens der nicht-sprachdominanten Hirnhälfte. Darüber hinaus wurde vor allem in Verbindung mit rechtshemisphärischen Schädigungen die Konstellation einer Phonagnosie beobachtet, d.h. eine Beeinträchtigung der Fähigkeit, Sprecher an-

hand ihrer Stimme zu identifizieren (indexikalische Information) [71]. Möglicherweise geht neben der Intonationskontur des Sprachsignals auch die Verarbeitung der Stimmqualität als eines Korrelats der auditiven Sprecheridentität mit einem vergleichbaren Lateralitätseffekt hämodynamischer Aktivierung einher. Da allerdings die Syndrome auditiver Affektagnosie und Phonagnosie doch eher selten zur Beobachtung kommen, muss angenommen werden, dass die linke Hirnhälfte, wenn auch wahrscheinlich weniger effizient, ebenfalls zur Enkodierung affektiv-prosodischer und indexikalischer Komponenten des Sprachsignals befähigt ist. Andere Konstellationen einer auditiven Agnosie, insbesondere die so genannte reine Worttaubheit, sind weitgehend ausschließlich mit einer bilateralen Läsion des auditiven Kortex und/oder der entsprechenden afferenten Bahnsysteme assoziiert [72]. Es bleibt zu klären, welche Stufen bzw. Domänen der zentralauditiven Verarbeitung komplexer Signale im Bereich des oberen Temporallappens bzw. des temporoparietalen Übergangs Lateralitätseffekte aufweisen und unter welchen Bedingungen die kontralaterale Seite vikariierend „einspringen“ kann.

Im Bereich des orbitofrontalen Kortex führte die Evaluation affektiv-prosodischer Merkmale verbaler Äußerungen, sowohl die Identifikation von Art als auch Expressivität der zugrunde liegenden Emotion, zu einem bilateralen bzw. rechtsbetonten Aktivierungsmuster. In Übereinstimmung mit diesen Ergebnissen deuten klinische Studien darauf hin, dass schon einseitige orbitofrontale Läsionen zu einer Beeinträchtigung der Fähigkeit, Emotionen anhand der Stimme oder des Gesichtsausdrucks eines Gesprächspartners zu erkennen, führen können, ausgeprägtere Störungsbilder aber nach bilateralen Läsionen beobachtet werden [73, 74].

Zusammenfassung: Der Beitrag der rechten Hirnhälfte zur Verarbeitung affektiver Prosodie

Unter dichotischer Applikation spektral komplexer Klänge konnte ein Links-Ohr-Vorteil dokumentiert werden als Hinweis auf eine bevorzugte Verarbeitung dieser Stimuli im Bereich der rechten Hirnhälfte [75]. Dieser Effekt war nicht nachweisbar bei Darbietung von Sinustönen. Vor diesem Hintergrund muss angenommen werden, dass vor allem die Extraktion harmonischer In-

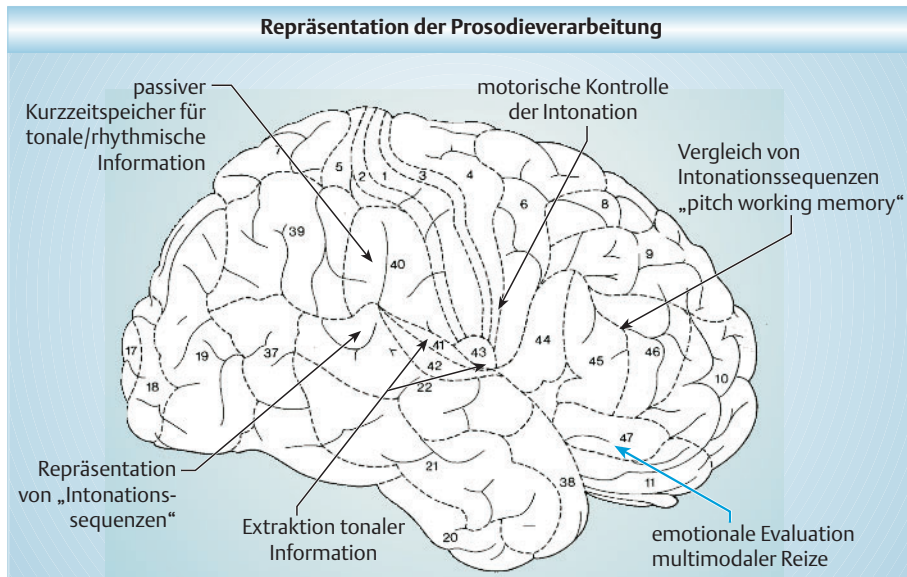


Abb. 5 Schematische Darstellung des postulierten rechtshemisphärischen Netzwerkes der Verarbeitung tonaler Information („pitch“ und Melodie): Funktionelle Komponenten und topographische Zuordnung.

formation an die nicht-sprachdominante Hemisphäre gebunden ist. Nachfolgende klinische und funktionell-bildgebende Studien konnten dieses Modell erweitern und unter anderem herausarbeiten, dass die Perception von Tonhöhenbewegungen vor allem an die Integrität der rechtsseitigen Hörrinde gebunden ist [76] und die Kurzzeitspeicherung von Melodien („pitch working memory“) mit einer Aktivierung des ipsilateralen dorsolateralen Frontallappens einhergeht [77] (Überblick in [62, 63]). Auch elektrophysiologische Daten weisen auf einen gewichtigeren Beitrag der rechten Hemisphäre zur Verarbeitung tonaler Information im Bereich der Hörrinde hin [78, 79]. Entsprechende Lateralitätseffekte scheinen auch auf den expressiven Bereich überzugreifen, zum Beispiel kann bei nicht-lyrischem Singen eine ausgeprägtere hämodynamische Aktivierung der rechten vorderen Inselregion beobachtet werden [55, 80]. Demgegenüber ruft monotones Sprechen, d.h. ein „Herunterleiern“ von hochüberlerten Wortfolgen eine bevorzugt linksseitige Reaktion derselben Struktur hervor. Vor diesem Hintergrund eines rechtshemisphärischen Netzwerkes der Extraktion und Sequenzierung tonaler Information könnte die ausgeprägtere ipsilaterale Aktivierung temporaler und parietaler Strukturen im Rahmen der Wahrnehmung affektiver Prosodie die Repräsentation der Intonationskonturen sprachlicher Äußerungen widerspiegeln (Abb. 5).

Allerdings muss zurzeit offen bleiben, ob dieses Modell als hinreichender Erklärungsansatz der in Verbindung mit der Verarbeitung affektiver Prosodie beobachteten Lateralitätseffekte gelten kann. Erste präliminare funktionell-bildgebende Daten zur Implementierung und Perception prosodischer Aspekte verbaler Äußerungen deuten darauf hin, dass neben Intonationskonturen eine weitere suprasegmentale Komponente des akustischen Sprachsignals, der Silbenrhythmus, bevorzugt über die rechte Hemisphäre vermittelt werden könnte [48, 70]. Die „Double filtering by frequency“-Theorie (siehe oben) nimmt, etwas verkürzt dargestellt, an, dass afferente auditive Information im Bereich der rechten Hemisphäre einer Tiefpassfilterung unterworfen wird. Eine fMRI-Untersuchung konnte in Übereinstimmung mit dieser Vorstellung zeigen, dass bei passiver Darbietung von Klickserien tatsächlich die hämodynamische Aktivierung der

rechten Insel eine negativ-lineare Antwortfunktion mit ansteigender Stimulusfrequenz aufweist, also wie ein Tiefpassfilter zu wirken scheint [81, 82]. Es bleibt durch weiterführende Untersuchungen zu klären, inwieweit das Modell einer effizienteren rechtshemisphärischen Verarbeitung tonaler Information durch das Konzept eines ipsilateralen Tiefpassfilters ergänzt werden muss.

Literatur

- 1 Moritz KP. Versuch einer deutschen Prosodie. Berlin, 1786 (unveränderter Nachdruck, mit einem Vorwort von T. P. Saine). Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1973
- 2 Monrad-Krohn GH. Dysprosody or altered „melody of language“. Brain 1947; 70: 405 – 415
- 3 Johnson K, Mullenix JW (eds). Talker Variability in Speech Processing. San Diego, London, Boston: Academic Press, 1997
- 4 Sidtis JJ, Lancker DS Van. A neurobehavioral approach to dysprosody. Semin Speech Lang 2003; 24: 93 – 105
- 5 Heilman KM, Bowers D, Valenstein E. Emotional disorders associated with neurological diseases. In: Heilman KM, Valenstein E (eds): Clinical Neuropsychology, 3rd ed. New York, Oxford: Oxford University Press, 1993: 461 – 497
- 6 Bowers D, Coslett HB, Bauer RM et al. Comprehension of emotional prosody following unilateral hemispheric lesions: processing defect versus distraction defect. Neuropsychologia 1987; 25: 317 – 328
- 7 Monrad-Krohn GH. The prosodic quality of speech and its disorders. Acta Psychiatr Neurol Scand 1947; 22: 255 – 269
- 8 Monrad-Krohn GH. The third element of speech prosody and its disorders. In: Halpern L (ed): Problems of Dynamic Neurology. Jerusalem: The Department of Nervous Diseases of the Rothschild Hadassah University Hospital and the Hebrew University Hadassah Medical School, 1963: 101 – 118
- 9 Ramsey SR. The Languages of China. Princeton: Princeton University Press, 1987
- 10 Banse R, Scherer KR. Acoustic profiles in vocal emotion expression. J Pers Soc Psychol 1996; 70: 614 – 636
- 11 Scherer KR. Vocal communication of emotion: a review of research paradigms. Speech Commun 2003; 40: 227 – 256
- 12 Ackermann H, Hertrich I, Ziegler W. Prosodische Störungen bei neurologischen Erkrankungen: eine Literaturübersicht. Fortschr Neurol Psychiatr 1993; 61: 241 – 253
- 13 Pick A. Über Änderungen des Sprachcharakters als Begleiterscheinung aphasischer Störungen. Z ges Neurol Psychiatr 1919; 45: 230 – 241

- 14 Schirmer A, Alter K, Kotz SA, Friederici AD. Lateralization of prosody during language production: a lesion study. *Brain Lang* 2001; 76: 1–17
- 15 Hughlings Jackson J. On affections of speech from disease of the brain (reprint from *Brain* 1879). *Brain* 1915; 38: 107–129
- 16 Dordain M, Degos JD, Dordain G. Troubles de la voix dans les hémiplegies gauches. *Rev Laryngol* 1971; 92: 178–188
- 17 Tucker D, Watson R, Heilman K. Discrimination and evocation of affectively intoned speech in patients with right parietal disease. *Neurology* 1977; 27: 947–950
- 18 Ross ED, Mesulam MM. Dominant language functions of the right hemisphere? Prosody and emotional gesturing. *Arch Neurol* 1979; 36: 144–148
- 19 Ross ED. The aprosodias: functional-anatomic organization of the affective components of language in the right hemisphere. *Arch Neurol* 1981; 38: 561–569
- 20 Edmondson J, Chan JL, Seibert G, Ross E. The effect of right-brain damage on acoustical measures of affective prosody in Taiwanese patients. *J Phonet* 1987; 15: 219–233
- 21 Ross E, Edmondson J, Seibert G, Homan W. Acoustic analysis of affective prosody during right-sided Wada test: a within-subjects verification of the right hemisphere's role in language. *Brain Lang* 1988; 33: 128–145
- 22 Baum SR, Pell MD. The neural bases of prosody: insights from lesion studies and neuroimaging. *Aphasiology* 1999; 13: 581–608
- 23 Cancelliere A, Kertesz A. Lesion localization in acquired deficits of emotional expression and comprehension. *Brain Cogn* 1990; 13: 133–147
- 24 Ackermann H, Ziegler W. Akinetischer Mutismus: eine Literaturübersicht. *Fortschr Neurol Psychiat* 1995; 63: 59–67
- 25 Ackermann H, Ziegler W. Die Dysarthrophonie des Parkinson-Syndroms. *Fortschr Neurol Psychiat* 1989; 57: 149–160
- 26 Ackermann H. Acquired disorders of articulation: classification and intervention. In: Fabbro F (ed): *Concise Encyclopedia of Language Pathology*. Amsterdam, Lausanne, New York: Elsevier, 1999: 261–268
- 27 Breitenstein C, Daum I, Ackermann H. Emotional processing following cortical and subcortical brain damage: contribution of the frontostriatal circuitry. *Behav Neurol* 1998; 11: 1–14
- 28 Heilman KM, Scholes R, Watson RT. Auditory affective agnosia: disturbed comprehension of affective speech. *J Neurol Neurosurg Psychiatr* 1975; 38: 69–72
- 29 Ley RG, Bryden MP. A dissociation of right and left hemispheric effects for recognizing emotional tone and verbal content. *Brain Cogn* 1982; 1: 3–9
- 30 Shipley-Brown F, Dingwall WO, Berlin CI et al. Hemispheric processing of affective and linguistic intonation contours in normal subjects. *Brain Lang* 1988; 33: 16–26
- 31 Heilman KM, Bowers D, Speedie L, Coslett HB. Comprehension of affective and nonaffective prosody. *Neurology* 1984; 34: 917–921
- 32 Emmorey KD. The neurological substrates for prosodic aspects of speech. *Brain Lang* 1987; 30: 305–320
- 33 Pell MD, Baum SR. The ability to perceive and comprehend intonation in linguistic and affective contexts by brain-damaged adults. *Brain Lang* 1997; 57: 80–99
- 34 Geigenberger A, Ziegler W. Processing of emotional prosodic information in patients with unilateral brain lesions. In: Ziegler W, Deger K (eds): *Clinical Phonetics and Linguistics*. London: Whurr, 1998: 359–366
- 35 Klouda G, Robin D, Graff-Radford N, Cooper W. The role of callosal connections in speech prosody. *Brain Lang* 1988; 35: 154–171
- 36 Baum S, Pell M. Production of affective and linguistic prosody by brain-damaged patients. *Aphasiology* 1997; 11: 177–198
- 37 Friederici AD, Alter K. Lateralization of auditory language functions: a dynamic dual pathway view. *Brain Lang*, 2004, in press
- 38 Lancker D Van. Cerebral lateralization of pitch cues in the linguistic signal. *Int J Human Commun* 1980; 13: 227–277
- 39 Lancker D Van, Sidtis JJ. The identification of affective-prosodic stimuli by left- and right-hemisphere-damaged subjects: all errors are not created equal. *J Speech Hear Res* 1992; 35: 963–970
- 40 Ahern GL, Herring AM, Labiner DM et al. Affective self-report during the intracarotid sodium amobarbital test: group differences. *J Int Neuropsychol Soc* 2000; 6: 659–667
- 41 Davidson RJ, Tomarken AJ. Laterality and emotion: an electrophysiological approach. In: Boller F, Grafman J (eds): *Handbook of Neuropsychology*, vol. 3. Amsterdam, New York, Oxford: Elsevier, 1989: 419–441
- 42 Canli T, Desmond JE, Zhao Z et al. Hemispheric asymmetry for emotional stimuli detected with fMRI. *NeuroReport* 1998; 9: 3233–3239
- 43 Davidson RJ, Abercrombie H, Nitschke JB, Putnam K. Regional brain function, emotion and disorders of emotion. *Curr Opin Neurobiol* 1999; 9: 228–234
- 44 Pell MD. Recognition of prosody following unilateral brain lesion: influence of functional and structural attributes of prosodic contours. *Neuropsychologia* 1998; 36: 701–715
- 45 Kucharska-Pietura K, Phillips ML, Gernand W, David AS. Perception of emotions from faces and voices following unilateral brain damage. *Neuropsychologia* 2003; 41: 1082–1090
- 46 Dogil G, Ackermann H, Grodd W et al. The speaking brain: a tutorial introduction to fMRI experiments in the production of speech, prosody and syntax. *J Neuroling* 2002; 15: 59–90
- 47 Dogil G, Ackermann H, Grodd W et al. Brain dynamics induced by language production. In: Pechmann T, Habel C (eds): *Multidisciplinary Approaches to Language Production*. Berlin, New York: Mouton de Gruyter, 2004: 397–429 (*Trends in Linguistics: Studies and Monographs* 157)
- 48 Riecker A, Wildgruber D, Dogil G et al. Hemispheric lateralization effects of rhythm implementation during syllable repetitions: an fMRI study. *NeuroImage* 2002; 16: 169–176
- 49 Papanicolaou AC, Levin HS, Eisenberg HM, Moore BD. Evoked potential indices of selective hemispheric engagement in affective and phonetic tasks. *Neuropsychologia* 1983; 21: 401–405
- 50 Pihan H, Altenmüller E, Ackermann H. The cortical processing of perceived emotion: a DC-potential study on affective speech prosody. *NeuroReport* 1997; 8: 623–627
- 51 Pihan H, Altenmüller E, Hertrich I, Ackermann H. Cortical activation patterns of affective speech processing depend on concurrent demands on the subvocal rehearsal system: a DC-potential study. *Brain* 2000; 123: 2338–2349
- 52 Wildgruber D, Ackermann H, Klose U et al. Functional lateralization of speech production at primary motor cortex: a fMRI study. *NeuroReport* 1996; 7: 2791–2795
- 53 Riecker A, Ackermann H, Wildgruber D et al. Opposite hemispheric lateralization effects during speaking and singing at motor cortex, insula and cerebellum. *NeuroReport* 2000; 11: 1997–2000
- 54 Ackermann H, Riecker A, Wildgruber D. Functional brain imaging of motor aspects of speech production. In: Maassen B, Kent RD, Peters HFM, Lieshout PHM van, Hulstijn W (eds): *Speech Motor Control in Normal and Disordered Speech*. Oxford, New York, Auckland: Oxford University Press, 2004: 85–111
- 55 George MS, Parekh PI, Rosinsky N et al. Understanding emotional prosody activates right hemisphere regions. *Arch Neurol* 1996; 53: 665–670
- 56 Imaizumi S, Mori K, Kiritani S et al. Vocal identification of speaker and emotion activates different brain regions. *NeuroReport* 1997; 8: 2809–2812
- 57 Buchanan TW, Lutz K, Mirsazade S et al. Recognition of emotional speech prosody and verbal components of spoken language: an fMRI study. *Cogn Brain Res* 2000; 9: 227–238
- 58 Stiller D, Gaschler-Markefski B, Baumgart F et al. Lateralized processing of speech prosodies in the temporal cortex: a 3-T functional magnetic resonance imaging study. *MAGMA* 1997; 5: 275–284
- 59 Mitchell RL, Elliott R, Barry M et al. The neural response to emotional prosody, as revealed by functional magnetic resonance imaging. *Neuropsychologia* 2003; 41: 1410–1421
- 60 Meyer M, Alter K, Friederici AD et al. fMRI reveals brain regions mediating slow prosodic modulations in spoken sentences. *Hum Brain Mapp* 2002; 17: 73–88
- 61 Schirmer A, Kotz SA, Friederici AD. Sex differentiates the role of emotional prosody during word processing. *Cogn Brain Res* 2002; 14: 228–233
- 62 Zatorre RJ. Hemispheric asymmetries in the processing of tonal stimuli. In: Hugdahl K, Davidson RJ (eds): *The Asymmetrical Brain*. Cambridge, London: MIT Press, 2003: 411–440
- 63 Zatorre RJ. Sound analysis in auditory cortex. *Trends Neurosci* 2003; 26: 229–230
- 64 Ivry RB, Robertson LC. *The Two Sides of Perception*. Cambridge, London: MIT Press, 1998
- 65 Poeppel D. Pure word deafness and the bilateral processing of the speech code. *Cognitive Science* 2001; 25: 679–693

- ⁶⁶ Wildgruber D, Hertrich I, Riecker A et al. Distinct frontal regions subserve the evaluation of linguistic and emotional aspects of speech intonation. *Cereb Cortex*, 2004, in press
- ⁶⁷ Nakamura K, Kawashima R, Ito K et al. Activation of the right inferior frontal cortex during assessment of facial emotion. *J Neurophysiol* 1999; 82: 1610–1614
- ⁶⁸ Blair RJR, Morris JS, Frith CD et al. Dissociable neural responses to facial expressions of sadness and anger. *Brain* 1999; 122: 883–893
- ⁶⁹ Small DM, Zatorre RJ, Dagher A et al. Changes in brain activity related to eating chocolate: from pleasure to aversion. *Brain* 2001; 124: 1720–1733
- ⁷⁰ Wildgruber D, Pihan H, Ackermann H et al. Dynamic brain activation during processing of emotional intonation: influence of acoustic parameters, emotional valence, and sex. *NeuroImage* 2002; 15: 856–869
- ⁷¹ Lancker DR Van, Canter GJ. Impairment of voice and face recognition in patients with hemispheric damage. *Brain Cogn* 1982; 1: 185–195
- ⁷² Ackermann H, Mathiak K. Symptomatologie, pathologisch-anatomische Grundlagen und Pathomechanismen zentraler Hörstörungen (reine Worttaubheit, auditive Agnosie, Rindentaubheit): eine Literaturübersicht. *Fortschr Neurol Psychiat* 1999; 67: 509–523
- ⁷³ Hornak J, Rolls ET, Wade D. Face and voice expression identification in patients with emotional and behavioural changes following ventral frontal lobe damage. *Neuropsychologia* 1996; 34: 247–261
- ⁷⁴ Hornak J, Bramham J, Rolls ET et al. Changes in emotion after circumscribed surgical lesions of the orbitofrontal and cingulate cortices. *Brain* 2003; 126: 1691–1712
- ⁷⁵ Sidtis JJ. Music, pitch perception, and the mechanisms of cortical hearing. In: Gazzaniga M (ed): *Handbook of Cognitive Neuroscience*. New York: Plenum Press, 1984: 91–114
- ⁷⁶ Johnsrude IJ, Penhune VB, Zatorre RJ. Functional specificity in right human auditory cortex for perceiving pitch direction. *Brain* 2000; 123: 155–163
- ⁷⁷ Zatorre RJ, Evans AC, Meyer E, Gjedde A. Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing. *Science* 1992; 256: 846–849
- ⁷⁸ Mathiak K, Hertrich I, Lutzenberger W, Ackermann H. Functional cerebral asymmetries of pitch processing during dichotic stimulus application: a whole-head magnetoencephalography study. *Neuropsychologia* 2002; 40: 585–593
- ⁷⁹ Hertrich I, Mathiak K, Lutzenberger W, Ackermann H. Time course and hemispheric lateralization of complex pitch processing: evoked magnetic fields in response to rippled noise stimuli. *Neuropsychologia*, 2004, in press
- ⁸⁰ Ackermann H, Riecker A, Wildgruber D. Cerebral correlates of singing capabilities in humans: clinical observations, experimental-behavioural studies, and functional imaging data. In: Altenmüller E, Kesselring J, Wiesendanger M (eds): *Music, Motor Control, and the Brain*. Oxford, New York, Auckland: Oxford University Press, 2005 in press
- ⁸¹ Ackermann H, Riecker A, Mathiak K et al. Rate-dependent activation of a prefrontal-insular-cerebellar network during passive listening to trains of click stimuli: an fMRI study. *NeuroReport* 2001; 12: 4087–4092
- ⁸² Ackermann H, Riecker A. The contribution of the insula to motor aspects of speech production: a review and a hypothesis. *Brain Lang* 2004; 89: 320–328