

Betrachtungen zur Rolle von Frequenzmodulationen in der sozialen Kommunikation bei Tier und Mensch *

W. Mende, K. Wermke

Die Evolution des auditiv-vokalen Systems der Wirbeltiere ist ein hervorragendes Beispiel für Komposition von Komplexität sowohl im Verlaufe der Stammesgeschichte als auch im Verlaufe der Individualentwicklung. Im nachfolgenden wollen wir die zunehmende Leistungsfähigkeit des auditiv-vokalen Systems vor dem Hintergrund wirkender Selektionsdrücke und Reizfelder betrachten. Dabei konzentrieren wir uns mehr auf den funktionalen Aspekt, weniger auf die morphologischen Korrelate. Unter dem auditiv-vokalen System wollen wir im folgenden die Gesamtheit der Schallerzeugungs- und Schallwahrnehmungsmechanismen verstehen, vom Effektor (Kehlkopf, Vokaltrakt) und Sensor bis hin zu den zentralnervösen Verarbeitungsmechanismen und Verhaltensprogrammen.

Am besten verdeutlicht man die Leistung des auditiv-vokalen Systems und seine Bedeutung für die soziale Kommunikation, wenn man zunächst ontogenetische Entwicklung dieses Systems untersucht. Aus der ontogenetischen Entwicklung können wir auf den Gang der Systemorganisation und auf bestimmte generelle phylogenetische Entwicklungsprinzipien schließen.

Die Analyse von Tier- und Menschenlauten hat schon vor Darwin zu evolutionärem Denken angeregt: Der englische Naturforscher und Musiker William Gardiner hat übrigens bereits 1838 (vor Darwin!) in seinem Buch „The Music of Nature“ durch die Darstellung verschiedener Tierlaute gemeinsam mit Lauten menschlicher Säuglinge in Notenform intuitiv die kommunikative Bedeutung von Säuglingschreien erfaßt. Er stellte die Säuglingslaute in eine Reihe mit tierischen Soziallauten und betonte damit bereits vor 160 Jahren die kommunikative Wirksamkeit der Säuglingsschreie und der Tierlaute und ihre gemeinsame phylogenetische Wurzel.

Zum Zeitpunkt der Geburt des menschlichen Säuglings ist das gekoppelte System „Phonation-Perzeption“, also Lauterzeugung und Hören, das reifste von allen feinkontrollierten, hoch koordinierten neuromuskulären Funktionssystemen des Zentralnervensystems. Das frühzeitige enge Zusammenwirken eines vorwiegend efferenten Systems (der Lautgebung) mit einem vorwiegend afferenten System (dem Hören) führt zu einer qualitativ neuen Funktionseinheit mit höchst effizienter Systemorganisation. Sie beinhaltet die Fähigkeit zur Selbststimulation, Selbstkontrolle und zum Selbsttraining weitgehend unabhängig von der Umwelt. Auch die öko-physikalischen Evolutionsbedingungen, die zu dieser Systemorganisation geführt haben, stellen eine einzigartige Situation innerhalb der Wirbeltierentwicklung dar (Mende & Wermke 1988). Die enge Co-evolution von Phonation und Hören sowohl auf der phylogenetischen als auch auf der Individualebene hat weit über das auditiv-vokale System

* Unserem verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. Günter Tembrock, zum 80. Geburtstag am 7. Juni 1998 gewidmet.

hinaus einen wesentlichen Anteil an der Entwicklung kommunikativ-kognitiver Denkstrukturen im Gehirn (Mende & Wermke in Vorbereitung).

Betrachten wir das auditiv-vokale System wieder aus dem Blickwinkel der Ontogenese. Der menschliche Säugling ist infolge seiner motorischen Unbeholfenheit von Geburt an auf engen sozialen Kontakt mit seiner Mutter angewiesen. Eine Reihe phylogenetischer Adaptationen und kommunikativer Signale sowohl auf seiten des Kindes aber auch auf seiten der Mutter unterstützen diese Interaktion und gewährleisten eine harmonische Mutter-Kind-Beziehung als wichtigste Grundlage für eine ungestörte frühkindliche Entwicklung (siehe z.B. Ainsworth 1969, Bowlby 1969, Korner et al. 1976, Eibl-Eibesfeldt 1986, Hassenstein 1987, Papousek et al. 1996, Wermke 1997).

Das wirksamste Kommunikationssignal des Säuglings und gleichzeitig auch das bekannteste ist der Säuglingsschrei. Als lebenswichtiges Alarmsignal ist die Fähigkeit zu schreien angeboren. Ein langer Evolutionsprozeß hat dabei die akustischen Eigenschaften des Säuglingsschreies so geprägt, daß er zur höchst effektiven Bio-Sirene wurde: Der Schrei des Säuglings ist auf hohe Durchdringungsfähigkeit optimiert. Typischerweise enthält das Spektrum eines Säuglingsschreies eine schmalbandige Grundfrequenz mit einer Vielzahl Harmonischer (Obertöne), wobei die ersten Harmonischen oft höhere Energien als die Grundfrequenz tragen und über das spektrale Maximum hinaus noch viele weitere energiereiche Harmonische vorhanden sind (Abb. 1). Diese Eigenschaften zusammen mit der Fähigkeit des Ohres Obertöne herauszufiltern gewährleisten, daß eine Mutter auch bei starken Umgebungsgeräuschen imstande ist, den Schrei ihres Babys herauszuhören. Die starke Harmonischenstruktur spielt dabei eine ähnliche Rolle wie das Cembalo als basso continuo in der Barockmusik.

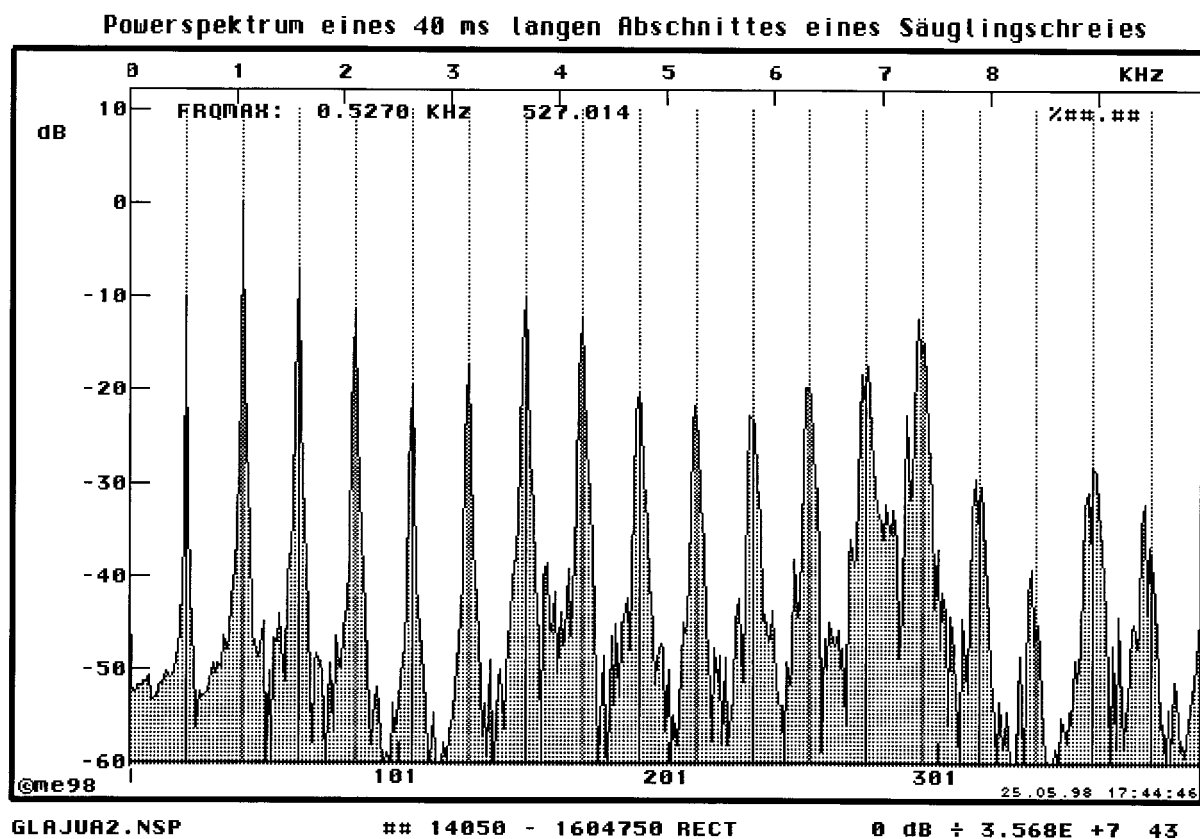


Abb. 1: Typisches Powerspektrum eines Säuglingsschreies (40 ms Ausschnitt). Man beachte die ausgeprägte Harmonischenstruktur mit einer sehr schmalbandigen Grundfrequenz. Die zweite und dritte Harmonische tragen jeweils mehr Power als die Grundfrequenz selbst. Hörbar sind mindestens 14 Harmonische. Diese akustische Signatur ist im Zusammenwirken mit dem Harmonischenfilter des Gehörs Ursache für die starke Durchdringungsfähigkeit des Säuglingsschreies. Die mittlere relative Abweichung von der Idealfrequenz der Harmonischen liegt in der Größenordnung von einem Promille.

Der Säuglingsschrei hat einen sehr starken Aufforderungscharakter. Seine akustische Signatur entspricht in idealer Weise seinem Zweck Aufmerksamkeit und Zuwendung zu fordern. Die Effektivität dieses Mechanismus geht dabei sogar soweit, daß sie unter gestörten Entwicklungsbedingungen oder gestörter Mutter-Kind-Interaktion eine höchst destruktive Wirkung haben kann (siehe z.B. Frodi et al. 1980, Kadushin et al. 1981, Lester et al. 1985, Wilkes 1987): In manchen Fällen von Kindesmißhandlung scheint anormales Schreien dieses Fehlverhalten zu triggern (vgl. Wermke 1997).

Der Säuglingsschrei enthält noch ein weiteres Aufmerksamkeit erregendes Merkmal nämlich seine Grundfrequenzmodulation (starke Melodiebewegungen). Seine akustische Ähnlichkeit zu technischen Warn- und Alarmsignalen ist kaum zu überhören. Beide beruhen auf starken Frequenzmodulationen, einem emotional hoch wirksamen Element.

Oft wird im Verlauf einer Lautäußerung die Grundfrequenz eines Säuglingslautes so verändert, daß in charakteristischer Weise ein frequenzmoduliertes Signal mit einem größeren Frequenzhub zustande kommt. Ein solches Signal verdankt seine Durchdringungsfähigkeit nicht nur der großen Anzahl energiereicher Harmonischer, sondern auch der Tatsache, daß tief frequenzmodulierte Signale in einer natürlichen Umgebung sonst verhältnismäßig selten sind. Sie stehen also in hohem Kontrast zu den Umgebungsgeräuschen. Die meisten natürlichen Umweltlaute werden nämlich durch Anregung von struktur- und geometriebestimmten Oszillatoren erzeugt. Sie stellen elastische Eigenschwingungen dar, die durch einfache Anregung (z.B. Stoß, Schlag) in ihren Eigenschwingungen angeregt werden und die dann amplitudenmoduliert abklingen. Ausnahmen stellen das Heulen des Windes (Modulationsperioden im Sekundenbereich) oder einige wenige windangeregte Schwingungen dar. Der großen Mehrzahl frequenzmodulierter Signale begegnen wir als gezielte Lauterzeugung im Dienste der sozialen Kommunikation.

Auch in der Technik macht man sich zunutze, daß solche Töne stark Aufmerksamkeit erregend sind und Frequenzmodulationen in natürlichen Umweltgeräuschen verhältnismäßig selten sind. Viele technische Warn- und Alarmsignale bestehen aus auf- und absteigenden Heultönen, also starken Frequenzmodulationen.

Der Einsatz von solchen Frequenzmodulationen als Ausdruckselement zeigt auch während der Phontationsentwicklung der Wirbeltiere eine zunehmende Tendenz in der Ausnutzung dieser akustischen Nische. Betrachtet man die auditiv-vokale Entwicklung der Landwirbeltiere, so fällt zunächst einmal der Weg vom breitbandigen Rauschen bis zu schmalbandigen harmonischen Lauten auf (siehe z.B. Tembrock 1977, Tembrock 1996). Parallel dazu erfolgt bezüglich des Hörvermögens eine stetige Steigerung mit Verschiebung des Maximums der Empfindlichkeit hin zu höheren Frequenzen, Verbreiterung des Hörbereiches und eine Erhöhung der Frequenzauflösung (siehe z.B. Fisch 1983, Fleischer 1984, Peck 1994).

Den Höhepunkt der Entwicklung bezüglich der Empfindlichkeit des Hörapparates finden wir bei den Raubtieren. Hier wurden in den Empfindlichkeitsmaxima die physikalischen Grenzen (thermisches Rauschen) erreicht. Die Sensitivitätsmaxima sind dabei stark abhängig von der Anpassung an spezielle Habitate und lassen bei rezenten Arten den einheitlichen Evolutionstrend nur schwer erkennen. Eine für die soziale Kommunikation viel interessantere Leistung des auditiv-vokalen Systems ist das Frequenzunterscheidungsvermögen. Da die Quelle frequenzmodulierter Laute sehr häufig belebten Ursprungs ist, nimmt es nicht Wunder, daß das Frequenzunterscheidungsvermögen vor allem im Verlaufe der Verfeinerung der sozialen Kommunikation entwickelt wurde.

Im Verlaufe der Stammesgeschichte der Wirbeltiere spielte die soziale Kommunikation als flexible Verhaltensdimension eine wesentliche Rolle. Dabei gewannen auditiv-vokale Elemente zunehmend an Bedeutung. Eine wesentliche Rolle spielte dabei die Verfeinerung der Frequenzmodulationsmuster. In Konkurrenz mit natürlichen Umgebungslauten konnten sich frequenzmodulierte Signale besonders deutlich aus dem akustischen Rauschhintergrund abheben, da, wie bereits beschrieben, die natürliche Umgebung relativ arm an frequenzmodulierten Lauten war. Bei allen Wirbeltieren diente die jeweils

erreichte Frequenzpräzision durch Verfeinerung der Frequenzmodulationsmuster der Differenzierung der sozialen Kommunikation. Vor allem die Säugetier- und insbesondere die Primatenevolution ist durch eine immer stärkere Ausnutzung der Frequenzmodulation auf dem Hintergrund einer zunehmend besseren Frequenzkontrolle zur sozialen Kommunikation gekennzeichnet. Die steigende Komplexität sozialer Beziehungen in Gruppen von Individuen hat offensichtlich zu einer immer höheren Differenzierung der Frequenzmodulationsfähigkeit geführt und es ist kein Zufall, daß der Bereich des größten Frequenzunterscheidungsvermögens und der Bereich der häufigsten Sozillaute zusammenfallen (Mende & Wermke 1988). Die Geschichte der Lauterzeugung stellt sich unter diesem Gesichtspunkt als ein Weg von breitbandigen Lauten zu immer besser frequenzkontrollierten und schließlich frequenzmodulierten Mustern dar. Diesbezüglich ist ein einheitlicher Evolutionstrend auch in der Entwicklungsreihe der Primaten, den rezenten Modellen der Ahnenreihe zum Menschen erkennbar (Mende & Wermke 1988).

Ein Selektionsdruck auf die Diskrimination von (sukzedanen) Frequenzunterschieden hat zunächst auf das Auditivum gewirkt. Eine ökophysiologische Vorbedingung war sicher die Struktur des Schall-Reizfeldes in der Atmosphäre, wo die Umgebungsgeräusche aufgrund des kleinen Schallwellenwiderstandes im allgemeinen schmalbandig sind, jedenfalls viel schmalbandiger als im Wasser. Die Säugetiere waren in ihrer langen prätertiären Entwicklungsperiode wahrscheinlich dämmerungs- und nachtaktive Lebewesen für die die präzise Diskrimination von Umgebungslauten und die soziale Kommunikation mittels akustischer Signale überlebenswichtig war. Die erreichte Frequenzauflösung beim Hören führte Schritt für Schritt in einer Co-evolution mit der Phonation zur engen Abstimmung der Präzision beider Teilsysteme und damit zu einer enormen Leistungssteigerung des auditiv-vokalen Funktionssystems. Diese Co-evolution wird auch in dem gleichen Präzisionsniveau, das beide Systeme beim Menschen erreicht haben, erkennbar. Die Präzision der laryngealen Prozesse stimmt erstaunlich gut mit der Unterscheidungsfähigkeit des Hörens bezüglich des Frequenzhubes frequenzmodulierter Signale überein. Beim Menschen hat die Evolution bezüglich des Frequenzunterscheidungsvermögens innerhalb der Primatenreihe einen deutlichen Höhepunkt erreicht. Das Erzeugen und das Erkennen feiner Frequenzmodulationen und schneller Frequenzsprünge waren eine wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung der Sprache des Menschen.

Im menschlichen Gesang hat die Präzision der Wahrnehmung und Erzeugung von frequenzstabilen und frequenzmodulierten Lauten ihre höchste Ausprägung erfahren. Sie ist die psycho-physische Grundlage der gesamten Musikkultur. Eindrucksvolle Beispiele für die Ausdruckskraft und emotionale Ausstrahlung/Wirkung der Frequenzmodulation im Bereich der Vibratofrequenzen (einige Herz) berühmter Sänger finden sich z.B. bei Tembrock (1993, 1996).

Werfen wir abschließend noch einmal einen Blick auf die Ontogenese des Menschen bezüglich der Frequenzmodulationsbeherrschung. Untersucht man den Frequenzmodulationsgehalt frühkindlicher Laute, so erkennt man im Verlauf der Ontogenese eine Beherrschung immer schnellerer Frequenzmodulationen und Frequenzsprünge. Zeigen die ersten Säuglingsschreie nur langsame Frequenzmodulationen in Form von Melodiebewegungen (Intonationen), so lernt es der Säugling bereits im Verlaufe der ersten Lebenswochen auch schnellere Frequenzmodulationen zu erzeugen und zu beherrschen (Mende & Wermke 1992). Parallel dazu geht der Anteil geräuschähnlicher Elemente in den Lauten zurück und die Frequenzkontrolle steigt. Der ontogenetische Weg des Erlernens dieser Stimmbausteine (Module) folgt dabei generellen Gesetzmäßigkeiten der Komposition von Komplexität (Modularitätsprinzip), wie wir an anderer Stelle ausgeführt haben (Mende et al. 1990, 1992, Wermke & Mende 1992, 1994). Sprachliche Kommunikation beginnt nicht erst, wie früher angenommen, mit der Äußerung von Mutter-Sprachworten, sondern bereits mit den ersten Schreien. Hier beginnen bereits morphologische und funktionelle Reifungsvorgänge derjenigen Strukturen und Mechanismen, welche der Lauterzeugung zugrunde liegen. Diese Vorgänge erzeugen jene Elementarbausteine, die für den Spracherwerb erforderlich sind. Ein ganz besonders wichtiger dieser Bausteine (Module) stellt das Erlernen schneller Frequenzmodulationen (musikalisches Frequenzvibrato und schneller) dar. Ein anderer Baustein ist zum Beispiel das Erlernen langsamer Frequenzmodulationen etwa in Form von

Intonationsbögen und macrodynamischen Aspekten des Lautverhaltens (z. B. Todt 1988). Ein unbe-
wußtes Training und eine fortschreitende Kombination verschiedener dieser Elementarbausteine wäh-
rend der ersten Lebensmonate befähigen den Säugling zur Erzeugung immer komplexerer Lautmuster.
Diese Entwicklungsmechanismen sind wahrscheinlich notwendig, um die Artikulationsorgane zu ko-
ordinieren, die ihnen zugrundeliegenden zentralnervösen Mechanismen zu trainieren und auf ihre
komplizierte Tätigkeit bei der eigentlichen Sprachproduktion vorzubereiten.

Literaturverzeichnis

Ainsworth, M.D.S. (1969): Object Relations, Dependency and Attachment: A Theoretical Review of
the Infant-Mother Relationship.- *Child development*; 40: 969-1025.

Bowlby, J. (1969): Attachment and loss.- in: Masud, M.; Khan, R. (eds.): Attachment 1. London Ho-
garth Press.- *The Int. Psycho-Analytical Library*; No. 79.

Eibl-Eibesfeldt, I. (1986): Die Biologie des menschlichen Verhaltens.- 2. überarbeitete Aufl.; Piper;
München, Zürich.

Fisch, L. (1983): Integrated Development and Maturation of the Hearing System.- *British Journal of*
Audiology; 17: 137-154.

Fleischer, G. (1984): Evolution of ear and hearing in mammals.- *Acta Zool. Fennica*; 171: 77-81.

Frodi, A.M. & Lamb, M.E. (1980): Child abuser's responses to infant smiles and cries.- *Child devel-*
opment; 51:238-241.

Gardiner, W. (1838): *The music of nature*.- Wilkins & Carter; Boston.

Hassenstein, B. (1987): *Verhaltensbiologie des Kindes*.- 4. überarbeitete und erweiterte Aufl.; Piper;
München, Zürich.

Kadushin, A.; Martin, J. (1981): *Child abuse - an interactional event*.- Columbia University Press;
New York.

Korner, A.F.; Grobstein, R. (1976): Individual differences at birth: Implications for mother-infant re-
lationship and later development.- *Journal of the American Academy of Child Psychiatry*; 6: 676-690.

Lester, B.M.; Boukydis, C.F.Z. (eds.)(1985): *Infant crying. Theoretical and Research Perspectives*.-
Plenum Press; New York.

Mende, W.; Wermke, K. (1988): Evolution und Ontogenese des auditiv-vokalen Systems.- *Wiss. Zeit-*
schrift der Humboldt-Universität zu Berlin; R. Math./Nat.wiss.; 37; 3: 299-304.

Mende, W.; Wermke, K.; Schindler, S.; Wilzopolski, K.; Hoeck, S. (1990): Variability of the cry mel-
ody and the melody spectrum as indicators for certain CNS disorders.- *Early Child Development and*
Care; 65: 95-107.

Mende, W.; Wermke, K. (1992) Über die Strategie der Komposition komplexer Laute aus einfachen
Schrei- und Nichtschreilaute während der frühen Sprachontogenese.- *Wiss. Zeitschrift Humboldt-*
Universität Berlin; R. Medizin; 41; 2: 31-39.

Papousek, H.; Papousek, M.; Rothaug, M. (1996): A Cross-Cultural View of the beginning of Human
Communication and its Medical Significance.- in: Gottschalk-Batschkus, Ch.E.; Schuler, J. (eds.):
Ethnomedical Perspectives on Early Childhood.- *Curara Special Volume 9*: 301-311.

- Peck, J.E. (1994): Development of hearing. Part I:Phylogeny.- J. Am. Acad. Audiol.; 5; 5: 291-299.
- Tembrock, G. (1977): Tierstimmenforschung.- Lutherstadt Wittenberg.
- Tembrock, G. (1993): Musik und Geschichte: Ein Beitrag der Evolutionsbiologie.- in: Heister,H.-W.; Heister-Grech, K.; Scheit, G. (Hrsg.): Zwischen Aufklärung und Kulturindustrie.- Hamburg: 25-43.
- Tembrock, G. (1996): Akustische Kommunikation bei Säugetieren: Die Stimmen der Säugetiere und ihre Bedeutung.- Wiss. Buchges.; Darmstadt.
- Todt, D. (1988): Serial Calling as a Mediator of Interaction Processes: Crying in Primates.- in: Todt; Goedeking; Symmes (eds.): Primate Vocal Communication.- Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg.
- Wermke, K.; Mende, W. (1992) Sprache beginnt mit dem ersten Schrei.- Spectrum der Wissenschaften; Dezember 1992: 115-118.
- Wermke, K.; Mende, W. (1994) Ontogenetic development of infant cry- and non-cry vocalizations as early stages of speech abilities.- Proceedings of the third congress of the International Clinical Phonetics and Linguistics Association 9.-11.8.1993; Helsinki/Finland: 181-189.
- Wermke, K. (1997): The infant cry - a Biosiren expressing the need for relief of distress, but also a trigger for violence against the child.- in: Reh binder, M.; Gruter, M.: „Gewalt in Kleingruppen und das Recht“- Schriften zur Rechtspsychologie; Verlag Stämpfli & Cie AG; Bern: 129-142.
- Wilkes, J.C. (1987): Maternal response to infant cries: An analogue study of bidirectional influences in child abuse.. Dissertation; California School of professional Psychology; San Diego.

Anschriften der Autoren

Werner Mende
 Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
 Jägerstr. 22-23
 10117 Berlin
 Email: mende@bbaw.de

Kathleen Wermke
 Humboldt-Universität zu Berlin
 Universitätsklinikum (Campus Charité)
 Institut für Anthropologie
 Tucholskystr. 2
 10117 Berlin
 Email: wermke@rz.charite.hu-berlin.de