Abteilung für Neurophysiologie
Leiter: Professor Dr. W. Becker

Evozierte Hirnaktivität nach unerwarteten Abweichungen bei dargebotenen repetitiven Tönen, Klängen und Melodien: Elektrische (EEG) und magnetische (MEG) Messungen

Dissertation
Zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin
Der Medizinischen Fakultät der
Universität Ulm

Sibylle Ried
Augsburg
2005

Amtierender Dekan	:	Prof. Dr. K.-M. Debatin
1. Berichterstatter	:	Prof. Dr. W. Becker
2. Berichterstatter	:	Prof. Dr. H. Traue
Tag der Promotion	:	08. Juli 2005

Inhaltsverzeichnis 3

Abkürzungsverzeichnis 5

1 Einleitung 6
1.1 Akustisch evozierte Hirnpotenziale 6
1.2 Einsatz evozierter Potentiale bei der Untersuchung von Wahrnehmungen: MMN und P300 10
1.3 Das Magnetoencephalogramm (MEG) im Vergleich mit dem Electroencephalogramm (EEG) 12
1.4 Ziel der Arbeit: Darstellung endogen und exogen evozierter Potenziale und Magnetfelder bei komplexen Tönen und Musik 14

2 Material und Methode 17
2.1 MEG-Aufzeichnung 17
2.2 EEG-Aufzeichnung 18
2.3 Akustische Reizvorrichtung 19
2.4 Probanden 20
2.5 Vorbereitung der Versuche 21
2.6 Reizmaterial 22
2.7 Durchführung des Versuches 25
2.8 Magnetische Lokalisation der EEG-Elektroden 26
2.9 Datenerfassung 29
2.10 Datenverarbeitung 29
2.11 Statistische Auswertung 31

3 Ergebnisse 32
3.1 Einteilung der Probanden 32
3.2 Anzahl der gezählten Fehltöne 35
3.3 Evozierte Aktivität 38
3.3.1 Übersicht 38
3.3.2 Variabilität der evozierten Potenziale 39
3.3.3 Mittelwerte der evozierten Potenziale – Spielt die Musikalität eine Rolle? 42

3.4 Grand-Averages ……..……..50
3.4.1 Übersicht ……52
3.4.2 Einzelbeschreibung der Grand-Averages ……..…… 52
3.4.3 Kurze Beschreibung der MEG-Grand-Averages ……. 58

4 Diskussion ……..…….. 60
4.1 Anmerkungen zur Methodik ……..…… 61
4.2 Bedeutung der N100 ……..……... 63
4.3 Rolle der Aufmerksamkeit bei der Entstehung der MMN ……... 66
4.4 Mögliche Mechanismen der Entstehung der MMN bei den Musikbedingungen ……..….. 69
4.5 Subjektiv empfundene Schwierigkeiten der Bedingungen und Objektivierung anhand von Potenzialen ……..…..72
4.6 Späte evozierte Antworten (P300) in den musikalischen Bedingungen …….. 74
4.7 Quellenlokalisation ……..…… 76
4.8 Klinische Nutzung der MMN …… 79
4.9 Weitere Studien und Ausblicke …… 80

5 Zusammenfassung ……. 83

6 Literaturverzeichnis …… 85

7 Anhang …….. 98
7.1 Beschreibung von exemplarischen Einzelbeispielen ..…… 98
7.2 Grand-Average-Kurven ……..……141
7.3 Ergänzte Daten zur Statistik …… 162

Abkürzungsverzeichnis:

AEP	: Akustisch Evoziertes Potenzial
ANOVA	: Analysis Of Variance
ANS	: Autonomes Nervensystem
CNV	: Contingent Negative Variation
CT	: Computertomografie
dB	: Dezibel
DEV	: Deviant (abweichender Reiz)
EEG	: Electroencephalographie/-gramm
EOG	: Electrooculogramm
ERP	: Event Related Potential
FAEP	: Frühes Akustisch Evoziertes Potenzial
Hz	: Hertz
ISI	: Interstimulus Interval
MAEP	: Mittleres Akustisch Evoziertes Potenzial
MEG	: Magnetencephalographie/-gramm
MMF	: Mismatch Field
MMN	: Mismatch Negativity
N100	: Negatives Potenzial bei 100 ms
P300	: Positives Potenzial bei 300 ms
PN	: Processing Negativity
SAEP	: Spätes Akustisch Evoziertes Potenzial
SQUID	: Supra Conducting Quantum Interference Device
STD	: Standard (häufiger Reiz)
TIA	: Transitorische Ischämische Attacke

1 Einleitung

1.1 Akustisch evozierte Hirnpotenziale

Unter dem Begriff „evozierte Potenziale“ versteht man systematische Änderungen der elektrischen Aktivität des Gehirns, die durch Sinnesreize (oder elektrische Reizung von afferenten Nerven) hervorgerufen (evoziert) werden. Die evozierte Hirnaktivität kann mittels Elektroencephalographie (EEG) oder Magnetencephalographie (MEG) dargestellt werden.

Treffen beispielsweise abrupte Schallreize auf das Ohr, so lösen sie im Sinnesepithel des cortischen Organes eine bioelektrische Aktivität aus, die zu einer synchronen Entladung der Hörnervenfasern führt und dann entlang der Hörbahn fortgeleitet wird.
Versuche, durch eine derartige akustische Reizung ausgelöste Änderungen der elektrischen Hirnaktivität nachzuweisen, reichen etwa 100 Jahre zurück. Dies gelang zunächst nur bei Tieren mittels direkter corticaler Ableitung beim geöffneten Schädel. Erst in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts ermöglichten technische Weiterentwicklungen (Verstärker, Computer) den nichtinvasiven und routinemäßigen Einsatz dieser Methode beim Menschen. Insbesondere die grundlegenden Arbeiten von Sohmer und Feinmesser (1967) Jewett und Williston (1971) sowie Starr und Hamilton (1976) haben der Registrierung von akustisch evozierten Potenzialen einen festen Platz in der neurologischen Funktionsdiagnostik verschafft. Durch häufige Wiederholung des Reizes und Mittelung über viele reizsynchrone EEG-Abschnitte lassen sich die damit einhergehenden sehr schwachen Potenzialverschiebungen darstellen, während nicht reizsynchrone EEG-Wellen anderer Genese relativ zu der evozierten Aktivität abgeschwächt werden. Nach einer derartigen akustischen Stimulation beobachtet man ca. 25 bis 30 „Wellen“, die sich entsprechend ihrer Latenz in frühe, mittlere und späte Potenziale einteilen lassen (Picton und Hillyard 1974, Davis 1976, Hoke 1979, Maurer und Lewitzsch 1982). Siehe hierzu auch Abb. 1.
Die Einteilung dieser akustisch evozierten Potenziale (AEP) erfolgt nach ihrem zeitlichen Auftreten (der Latenz). Unter „Potenzial“ versteht man in diesem

Zusammenhang Schwankungen der von der Kopfhaut abgegriffenen Potenzialdifferenzen um den Ruhewert („Grundlinie“), der während reizfreier Perioden beobachtet wird. Kennzeichnend für ein bestimmtes Potenzial ist zum einen seine Gipfellatenz bezogen auf den Reizbeginn, zum anderen seine Polarität. Typischerweise wächst mit zunehmender Dauer der Aktivitätsausbreitung im Gehirn die Anzahl der involvierten Generatoren im Gehirn und damit die Amplitude bzw. Komplexität der Potenziale. Außerdem werden die Potenziale „träger“, d. h. die Wellen werden breiter und die Abstände zwischen den Maxima werden größer. So sind z. B. die späten akustisch evozierten Potenziale, die im Cortex entstehen, relativ groß und träge und können deshalb mit vergleichsweise niedriger Verstärkung und zeitlicher Auflösung abgeleitet werden.

Der zeitlichen Einordnung der Potenziale entspricht eine anatomische Zuordnung nach Entstehungsorten, die sich aus der Ausbreitung der Aktivität vom Cortischen Organ über Hirnstamm, Mittelhirn, primäre akustische Hirnrinde hin zu den Assoziationsarealen ergibt:

FAEP (frühe akustisch evozierte Potenziale) werden in der Cochlea, dem Hörnerv, dem Hirnstamm, dem Zwischenhirn oder der Hörstrahlung erzeugt, MAEP und SAEP (mittlere und späte Potenziale) im Cortex und den akustischen Assoziationsfeldern.

Während diese Wellen an einen externen Reiz gebunden sind und sich ohne aufgabenbezogene Kooperation der Versuchspersonen bzw. Patienten auslösen lassen, gibt es noch Potenziale, die z.B. mit Aufgabenstellungen verbunden sind: beispielsweise die „Contingent Negative Variation“ (CNV) und die P300. Bei der Gruppe der FAEP, MAEP und SAEP wird auch von exogenen (reizgebundenen) Potenzialen gesprochen, während für CNV und P300 die Bezeichnung „endogene“ Potenziale verwendet wird. Endogene Potenziale sind weniger abhängig von physikalischen Reizeigenschaften als von psychologisch definierbaren Variablen, wie z.B. Aufmerksamkeit, Erwartung und Intention.

Die FAEP und die P300 werden derzeit in Klinik, Praxis und Forschung am häufigsten eingesetzt. Dies ist bedingt durch die multimodale Einsatzmöglichkeit der FAEP (objektive Schwellenbestimmung in der Audiologie und Topologie in der Neurologie) und P300 (Abschätzung kognitiver Funktionen in der Psychiatrie und medizinischen Psychologie).

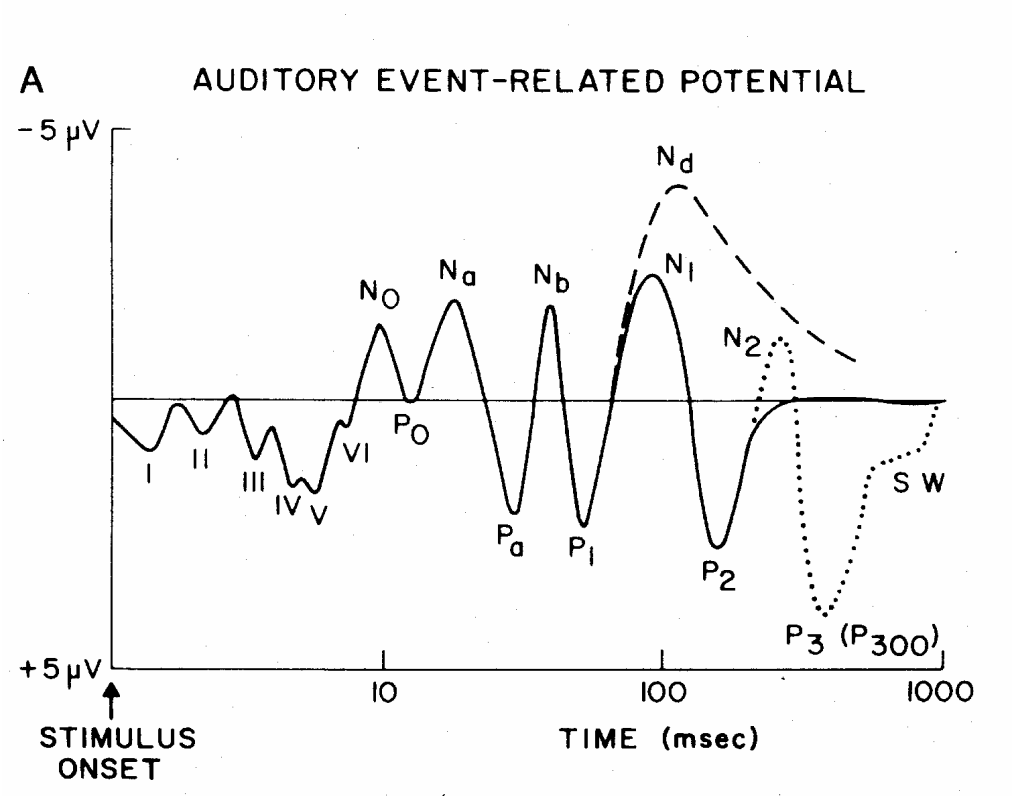


Abb. 1: Akustisch evozierte Potenziale; idealisierte Kurve der Hirnstammpotenziale (Wellen I bis VI) sowie der MAEP (N0, P0, Na, Pa, Nb) und SAEP (Nd, N2, P3, SW=slow wave). Die durchgezogenen Linien zeigen die exogenen, die gestrichelten und gepunkteten Linien die endogenen Komponenten. Aufgezeichnet wurde von einer zentralen Elektrode mit dem Mastoid als Referenzelektrode (Abbildung aus Regan, David: „Human Brain Electrophysiology“, 1989)

Werden die AEPe entsprechend dem 10-/20- System (oder einem anderen systematischen Abtastungssystem) am Schädel abgegriffen, erhält man die räumlich–zeitliche Verteilung der positiven und negativen Spannungswerte der evozierten Potenziale; „Brain-Mapping“, „Brain Electrical Activity mapping“ (Giard et al. 1990). Durch das Brain-Mapping gewinnen die Potenziale später Latenz an Bedeutung, da dadurch auch der topographische Aspekt in die Diagnostik mit einbezogen werden kann.

Bei den SAEP und der P300 finden sich typische topografische Verteilungsmuster mit Prädilektionsstellen für die Gipfel P1, N1, P2 und N2. P300 zeigt eine charakteristische Ausbreitung im Vertexbereich.

Für AEPe interessierten sich neben den Neurologen vor allem Otologen, Psychologen und Physiologen. Physiologen interessieren sich außerdem für die frühen Reizantworten: die Mikrofonpotenziale, das Summationspotenzial (Keidel 1971) und das Nervenaktionspotenzial des 8. Hirnnerven (Spreng und Keidel 1967) sowie für die Eigenschaften einzelner Neurone der Hörbahn. Otologen und Pädiater nutzen diese frühen Komponenten für eine objektive Audiometrie bei Kindern und Erwachsenen. Die frühen akustischen Potenziale (FAEP), im englischen Schrifttum als „brainstem acoustic evoked potenzials“ (BAEP) bezeichnet, wurden erst relativ spät nachgewiesen (Sohmer und Feinmesser 1967, Jewett und Williston 1971). Auch die später als mittlere Antworten bezeichneten Potenziale mit Latenzen zwischen 10 und 50 ms nach Reizdarbietung (auch als myogene Antwort bezeichnet) und die späten Antworten mit Latenzen >50 ms werden für eine objektive Audiometrie (CERA: cortical evoked response audiometrie) verwendet. Die Indikationen, SAEPe abzuleiten, umfassen die objektive Audiometrie bei nichtkooperierenden Erwachsenen, sowie vielfältige Anwendungen in Neurophysiologie, Psychiatrie und Neuropsychologie. Wegen der großen Variabilität später Potenziale gehören diese Untersuchungsmethoden allerdings nicht zur klinischen Routinediagnostik, sondern bleiben speziellen Fragestellungen sowie weiterer Erforschung vorbehalten.

Leider lassen sich akustisch evozierte Potenziale nicht mit einer einzigen Methode untersuchen. Potenziale verschiedener Latenz bedürfen sehr unterschiedlicher Reiz- und Ableitungsbedingungen, um überhaupt bzw. bestmöglich registriert zu werden, so dass nie sämtliche Phänomene in einer Ableitung sichtbar werden. Insbesondere die späten Komponenten, also die Potenziale, die zwischen 50 ms und 300 ms nach dem akustischen Reiz abgeleitet werden können, sind in Latenz und Amplitude sehr variabel. Ihre Latenz und Amplitude hängen vom Kontext und vom psychologischen Zustand des untersuchten Individuums ab. Aufgrund des Ableitorts und des morphologischen Charakters der Antwort werden auch die Bezeichnungen langsame kortikale Antwort und Vertexpotenzial benutzt.
Das bekannteste dieser Potenziale ist die N100, eine fronto-zentrale Negativität mit einer typischen Latenz von 100 ms bei Erwachsenen und gewöhnlich von einer positiven Welle bei 175 ms (P2) gefolgt. Schon Ende der 60er Jahre zeigte

sich, dass die N100 durch eine relativ abrupte Änderung eines Energielevels, die auf sensorische Rezeptoren trifft, hervorgerufen wird. Sie kann somit durch nahezu jeden Klang, Ton oder Sprache wie auch Änderungen in der Lautstärke oder Tonhöhe evoziert werden. Das Potenzial ist jedoch nicht modalspezifisch, es kann z.B. auch durch Angehen eines Lichts oder am Beginn einer Reihe elektrischer Reize am Finger hervorgerufen werden, wenn auch mit größerer Latenz (im Folgenden wird jedoch unter N100 immer die akustisch evozierte N100 verstanden). Die Amplitude, Latenz und Form kann zwischen und innerhalb von Personen beträchtlich variieren, wobei die Latenzen stabiler sind (Hyde 1997). Sie ist endogen, jedoch auch stark exogen beeinflusst und wird nur zum Teil durch Aufgabenkontext und Aufmerksamkeit moduliert.
Die N100 ist neben den Potenzialen MMN und P300 eines der drei in dieser Arbeit näher untersuchten AEPe.

1.2 Einsatz evozierter Potenziale bei der Untersuchung von Wahrnehmungen: MMN und P300

Werden in eine regelmäßige Folge akustischer „Standardreize“ gelegentlich abweichende (unterscheidbare) Reize eingestreut (sog. odd ball Paradigma), so rufen diese eine Mismatch Negativity (MMN) hervor.
Die MMN ist eine negative Potenzialabweichung gegenüber dem vom Standardreiz ausgelösten Potenzial, die in der akustisch evozierten Antwort mit einer Latenz von ca. 150 bis 200 ms erscheint. Die MMN wird durch Änderungen (Zunahme oder Abnahme) eines physikalischen Merkmals, wie z.B. der Frequenz (um die MMN zu evozieren reicht eine Frequenzänderung von 10 Hz aus), der Intensität, der Reizdauer oder auch des ISI (Interstimulus Interval) eines akustischen Reizes hervorgerufen. Jedoch können auch Änderungen in einer komplexen phonetischen Reizung (Aulanko et al. 1993) oder in komplexen Tonmustern (Näätänen et al. 1993) das Potenzial hervorrufen. Entscheidend ist, dass die MMN nicht durch den Reiz an sich sondern durch eine Änderung hervorgerufen wird. Mit zunehmendem Reizunterschied nimmt ihre Amplitude zu und ihre Latenz ab.
Nach Näätänens (ibid) Vorstellung wird die MMN erzeugt, wenn der sensorische „Input“ eines abweichenden Tones mit dem von einer neuronalen sensorischen

Gedächtnisspur (Kurzzeitgedächtnis) repräsentierten Standardreiz verglichen wird. Wird der abweichende Stimulus als solcher „erkannt“, d.h. wird die Abweichung entdeckt, dann wird eine MMN hervorgerufen. Wird er vom Vergleichssystem als gleich wie die vorhergehenden Reize interpretiert, wird demzufolge keine MMN erzeugt.
Nach Näätänen ist dieses „Erkennen“ nicht als bewußter Vorgang zu sehen, da die MMN auch auftritt, wenn der Proband die Reize nicht beachtet und nicht bewußt wahrnimmt, z.B. wenn bei ganz geringen Reizunterschieden keine ANS (autonomic nervous system) Antwort evoziert wird, die oft als Beweis für bewußte Unterscheidung von Reizänderungen angesehen wird. Die MMN erscheint auch, wenn der Proband unfähig oder unwillig ist, mitzuarbeiten. Das Gehirn besitzt demnach einen Mechanismus, der automatisch auf jede Abweichung in einer Folge von akustischen Reizen anspricht, die aufgrund mehrfacher Wiederholungen als „Standard“ gespeichert werden.
Die Bedeutung der MMN liegt u. a. darin, dass sie das früheste reizänderungsspezifische Potenzial darstellt und noch vor der bewußten Wahrnehmung aufzutreten scheint.
Die MMN bietet also ein einzigartiges Fenster zu der zentralen Verarbeitung von akustischen Reizen im Gehirn und ermöglicht, die Genauigkeit der Unterscheidungsfähigkeit zu messen, ohne die Aufmerksamkeit der Versuchsperson zu benötigen.
Klinische Anwendung findet die MMN z.B. bei Läsionen des Frontallappens sowie bei der Schizophrenie und dem M. Parkinson.

Die MMN und die N100 sind sich in einigen Aspekten ähnlich. Das magnetische Feld, das mit der MMN assoziiert ist, ist mit einem Dipol im supratemporalen akustischen Cortex vereinbar, wo auch eine Quelle der N100 liegt. Jedoch hat der Dipol eine etwas andere Lokalisation und Orientierung als derjenige der N100.
Es gibt jedoch noch weitere Unterscheidungsmerkmale: die MMN wird auch evoziert, wenn der abweichende Reiz sich nur gering vom häufigen Reiz unterscheidet. Die N100 auf diese Reize unterscheidet sich jedoch nicht von dem Potenzial, das durch die häufigen Stimuli hervorgerufen wird. Die Amplitude der N100 spiegelt ausschließlich die Intensität des aktuellen Reizes wider, unabhängig von der Beziehung zwischen dem aktuellen und vorhergehenden Stimulus.

Außerdem ist zu erwähnen, dass sich die Latenz der N100 auf einen abweichenden Reiz nicht mit der Größe der Abweichung ändert; die Latenz der MMN variiert hier dagegen beträchtlich.
Die MMN kann durch jede Änderung eines Reizes, auch wenn dieser leiser ist, evoziert werden; die N100 auf einen weniger intensiven Reiz ist dagegen kleiner. Des Weiteren haben die MMN und die N100 eine unterschiedliche Beziehung zum ISI. Zu Beginn einer (Ton)folge oder auch nach einem sehr langen ISI wird die MMN weder durch den häufigen wie auch den seltenen Reiz hervorgerufen, während die hierdurch evozierte N100 sehr groß ist. Wenn das ISI verkürzt wird, wird die MMN größer, während die N100 abgeschwächt ist.
Daraus ist ersichtlich, dass die MMN und die N100 sich zwar teilweise überlappen, aber eigenständige cerebrale Prozesse widerspiegeln (Näätänen und Picton 1987).

Ein anderes Potenzial, die P300 ist eine typischerweise positive Welle bei ca. 300 ms. Auch sie erscheint, wie die MMN, bei abweichenden Reizen im Rahmen eines odd ball Paradigmas. Sie zählt, wie bereits erwähnt, zu den endogenen Potenzialen, ist also weniger abhängig von Reizmodus und Reizmodalität (den physikalischen Eigenschaften) als von psychologisch definierbaren Variablen, wie z.B. Aufmerksamkeit und Erwartung. Sie weist also eine enge Beziehung zur Bereitschaft und Mitarbeit auf. Die P300 wurde erstmals von Sutton et al. (1965) sowie von Walter (1965) beschrieben. Nach Hegerl et al. (1985) muss bei der P300 der Altersunterschied der Versuchspersonen beachtet werden. Jüngere Probanden haben signifikant kürzere Latenzen und größere Amplituden.

1.3 Das Magnetoencephalogramm (MEG) im Vergleich mit dem Electroencephalogramm (EEG)

In der vorliegenden Arbeit wurde die Gehirnaktivität nicht nur mittels des klassischen EEGs sondern auch mit der Methode der Magnetencephalographie aufgezeichnet. Die magnetische Aktivität des Gehirns wurde erstmals 1968 von Cohen mit einem nicht supraleitenden Sensor registriert. Nur vier Jahre später gelang die erste Messung des menschlichen Alpha- Rhythmus mit einem SQUID (s. u.) - Sensor, und in den darauffolgenden Jahren konnten magnetische Signale

von evozierten Hirnaktivitäten der primären sensorischen Areale nachgewiesen werden. Seit Beginn der 80er Jahre konnte mit Hilfe der neuromagnetischen Meßmethodik das Wissen über die strukturelle Organisation der primären Projektionareale, sowie über höhere Hirnfunktionen, wie die Verarbeitung verschiedener Töne und das Gedächtnis erweitert werden.

Die Magnetfelder, die durch das MEG erfaßt werden sollen, sind etwa zehnmillionenfach schwächer als das Erdmagnetfeld. Sie liegen im Bereich von einigen Hundert femto-Tesla (10^{-15}). Diese Felder können nur mit hochempfindlichen Magnetfeldsensoren, den SQUID (supra conducting quantum interference device) Magnetometern, die mit Supraleitung unter Ausnutzung des Josephson-Effektes arbeiten, erkannt werden. Da Supraleitung nur bei sehr tiefen Temperaturen möglich ist, werden die SQUIDs in speziellen Kühlbehältern (Kyostaten) betrieben, die mit flüssigem Helium gefüllt sind und in denen eine Temperatur von 4.2 K oder -269°C herrscht.

Das EEG wird dagegen schon seit ca. 1930 eingesetzt, um den globalen und lokalen Funktionszustand des Gehirns zu beurteilen. Es werden hierbei elektrische Potenziale gemessen, die durch Volumenströme entstehen, die ihrerseits von den in den Zellen ablaufenden Ionenströmen generiert werden. Der technische Aufwand für die Messung des Electroencephalogramms ist erheblich geringer als der für das MEG.

Der Nachteil des EEG gegenüber dem MEG besteht vor allem darin, dass elektrische Potenziale, die an der Kopfhaut abgeleitet werden, durch die unterschiedlichen Leitfähigkeiten von Knochen, Kopfhaut, Hirnhaut und grauem Hirngewebe, sowie wegen der Foramina stark verzerrt werden. Während das EEG durch den Spannungsabgriff der extrazellulär zurückfließenden Ströme entsteht, werden die magnetischen Felder durch den intrazellulären Stromfluß erzeugt. Die Volumenströme, die den Stromkreis außerhalb der Zelle schließen, verhalten sich magnetisch weitgehend neutral. Der Kopf ist deshalb praktisch „transparent“ für Magnetfelder. Außerdem sind die elektrischen Potenziale kein Absolutwert, sondern immer die Differenz zu der Referenzelektrode, die Sensoren des MEG erlauben dagegen eine referenzfreie Messung. Der Vorteil des EEG besteht darin, dass sowohl radiale als auch tangentiale Quellen erkannt werden. Das MEG zeichnet dagegen nur die tangentialen Quellen auf.

Da die Magnetfelder nur gering durch die unterschiedlichen Gewebeleitfähigkeiten zwischen Quellen und Ableitort beeinflußt werden, ist das MEG dem EEG in der Quellenbestimmung überlegen, es besitzt eine hohe dreidimensionale Auflösung. Es ist möglich, aus dem Magnetfeldverlauf an der Oberfläche eines Volumenleiters Position und Orientierung desjenigen äquivalenten Dipols im Inneren des Volumenleiters zu berechnen, der das Feld erzeugt, bzw. erzeugen könnte. Der äquivalente Dipol stellt eine praktikable Näherung für die in den meisten Fällen räumlich über viele Zellen verteilte Dipolschicht dar (Diekmann et al. 1999). Die Wahrscheinlichkeit einer physiologisch richtigen Lokalisation wird durch die simultane Aufzeichnung von MEG und EEG noch weiter verbessert, da das MEG aufgrund der fehlenden Sensibilität bezüglich radial orientierten Quellen grundsätzlich nur eine partielle Aufsicht auf die Gehirnaktivität erlaubt. Da das MEG kein Bild des Gehirns liefert, müssen die Lokalisationskoordinaten noch in einen anatomischen Rahmen eingepaßt werden, entweder durch eine Kernspintomographie oder eine CT. Das MEG wird zunehmend auch in der klinischen Diagnostik verwendet. So z. B. zur Früherkennung und Lokalisation epileptischer Aktivität, zur Früherkennung von endogenen Psychosen oder zur Lokalisation von TIAs (transitorischen ischämischen Attacken) auch noch Wochen nach dem Ereignis.

1.4 Ziel der Arbeit: Darstellung endogen und exogen evozierter Potenziale und Magnetfelder bei komplexen Tönen und Musik

In allen bisher durchgeführten Studien wurde die MMN immer nur durch relativ einfache Tonbedingungen hervorgerufen. In Musikstücken, die aus einer Reihe von verschiedenen Noten aus der Tonleiter bestehen, ändern sich im Gegensatz zum odd ball Paradigma die physikalischen Eigenschaften eines Reizes bei jedem Ton. In einer solchen Bedingung kann keine typische MMN auf der Basis physikalischer Unterschiede hervorgerufen werden.
Neueren Studien zufolge kann eine MMN jedoch nicht nur durch Abweichungen einzelner physikalischer Parameter hervorgerufen werden, sondern auch durch Abweichungen von den Regeln eines bekannten Musters. Näätänen fand, dass die MMN z. B. durch eine absteigende Tonsequenz, die durch einen aufsteigenden Ton unterbrochen wird, hervorgerufen wird. Dies zeigt, dass nicht

nur der letzte Ton, sondern eine extrapolierte Spur, basierend auf musikalischen Regeln und Trends, als Vergleich herangezogen wird. Werden diese Regeln verletzt, wird eine MMN evoziert (Näätänen et al. 2001).

Unsere Studie beinhaltet einen nicht-musikalischen und einen musikalischen Teil. Der nicht-musikalische Teil umfaßt, basierend auf Studien von Alho et al. (1993) und Näätänen et al. (1993) drei verschiedene Reizprotokolle. Ein abweichender Ton wird in eine Reihe von einzelnen Tönen, Akkorden oder Arpeggios eingestreut. In diesem Teil des Experiments ist kein melodischer Zusammenhang zu erkennen. Für den zweiten Teil wurden zwei Melodien ausgewählt, ein sehr bekanntes Weihnachtslied, über das W. A. Mozart Variationen geschrieben hat („Morgen kommt der Weihnachtsmann“) und eine weniger geläufige Invention von Johann Sebastian Bach. Die Probanden wurden instruiert, auf die Reize zu achten und die abweichenden Töne zu zählen; in diesem Aspekt unterscheidet sich das Experiment von anderen Studien, bei denen der Fokus der Aufmerksamkeit entweder abwesend ist oder auf eine „maskierende“ Bedingung gelenkt wird (Paavilainen et al. 1993). Es wird jedoch trotz verschiedener Ansichten bezüglich der Rolle der Aufmerksamkeit beim Hervorrufen der MMN (Näätänen und Alho 1995) allgemein akzeptiert, dass die MMN auch dann evoziert wird, wenn die Aufmerksamkeit auf den Sinneskanal gerichtet wird, in dem der „falsche Reiz“ vorkommt.

Ein Ziel unseres Experiments bestand darin, zu untersuchen, ob eine MMN auch durch „Fehler“ in komplexeren Musikstücken hervorgerufen werden kann. Sollte auch bei einem, in einen komplizierten Melodieverlauf eingestreuten, musikalisch falschen Ton eine MMN evoziert werden, würde das die neueren Theorien von Näätänen und Mitarbeitern unterstützen, ältere Konzepte müssten überdacht werden.

Eine weitere Frage unserer Studie bestand darin, ob es einen Einfluss von „Musikalität“ auf die Mechanismen bei der Erzeugung der MMN gibt. Die auf den Reiz gerichtete Aufmerksamkeit ermöglichte es uns, auch die P300 diesbezüglich zu untersuchen.

Einschränkend ist hier zu sagen, dass das Problem, was Musikalität eigentlich ist, umgangen wurde. Es wurde vielmehr nur ein operativ in Form eines Tests definierter Aspekt betrachtet, der neben der „musikalischen Begabung“ vor allem die musikalische Bildung widerspiegelt.

2 Material und Methode

Die Versuche fanden in der Sektion Neurophysiologie im Rehabilitationskrankenhaus Ulm (RKU) statt. Da in unserem Experiment die Gehirnaktivität auch mittels MEG aufgezeichnet werden sollte, war es unumgänglich, die Messungen im Inneren einer speziell ausgerüsteten magnetischen Abschirmkabine durchzuführen. Eine derartige Kabine ist notwendig, da die Magnetfelder, die durch das MEG erfasst werden ca. zehnmillionenfach schwächer als das Erdmagnetfeld sind, und deshalb möglichst viele Störfelder (Umgebungsrauschen) durch die Kabine abgeschirmt werden müssen.
Das Umgebungsrauschen wird aus einer Vielzahl von Quellen erzeugt: Erdmagnetfeld und dessen Schwankungen, Wechselwirkungen der Magnetosphäre mit dem Sonnenwind und einer Vielzahl artifizieller Störquellen, wie Elektromotoren, Aufzüge, Hubschrauber, Stromversorgung. Magnetische Abschirmkabinen sind aus hochpermeablen Werkstoffen aufgebaut. Sie dämpfen magnetische Störungen typischerweise um 40 dB bis 100 dB im Frequenzbereich zwischen 0.1 Hz und 100 Hz. Die von uns verwendete Kabine AK 3 stammte von der Firma Vakuumschmelze (Hanau) und hatte eine Größe von 3 x 3 x 2,80 m.
Es sei noch erwähnt, dass das Restrauschen innerhalb der Kabine durch so genannte Software-Gradiometer weiter reduziert wurde (Becker et al. 1987), wodurch sich jedoch die Tiefenauflösung der SQUID-Sensoren verringerte.

2.1 MEG-Aufzeichnung

Für unsere Versuche wurde ein MEG-System der Firma DORNIER (Friedrichshafen) mit 28 SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)-Kanälen verwendet (Diekmann et al. 1996). Die 28 SQUID-Sensoren befinden sich am Boden von zwei speziellen Isoliergefäßen (Kryostaten); der Boden ist konkav gewölbt, so dass die Magnetfeld-Aufnahmespulen nahe am Kopf des Probanden sind. Um die supratemporale Schicht des akustischen Kortex zu erfassen, wurden beide Kryostaten nebeneinander über eine Kopfseite plaziert (rechte Kopfseite in der „Vormittagssitzung“, linke Seite nachmittags).

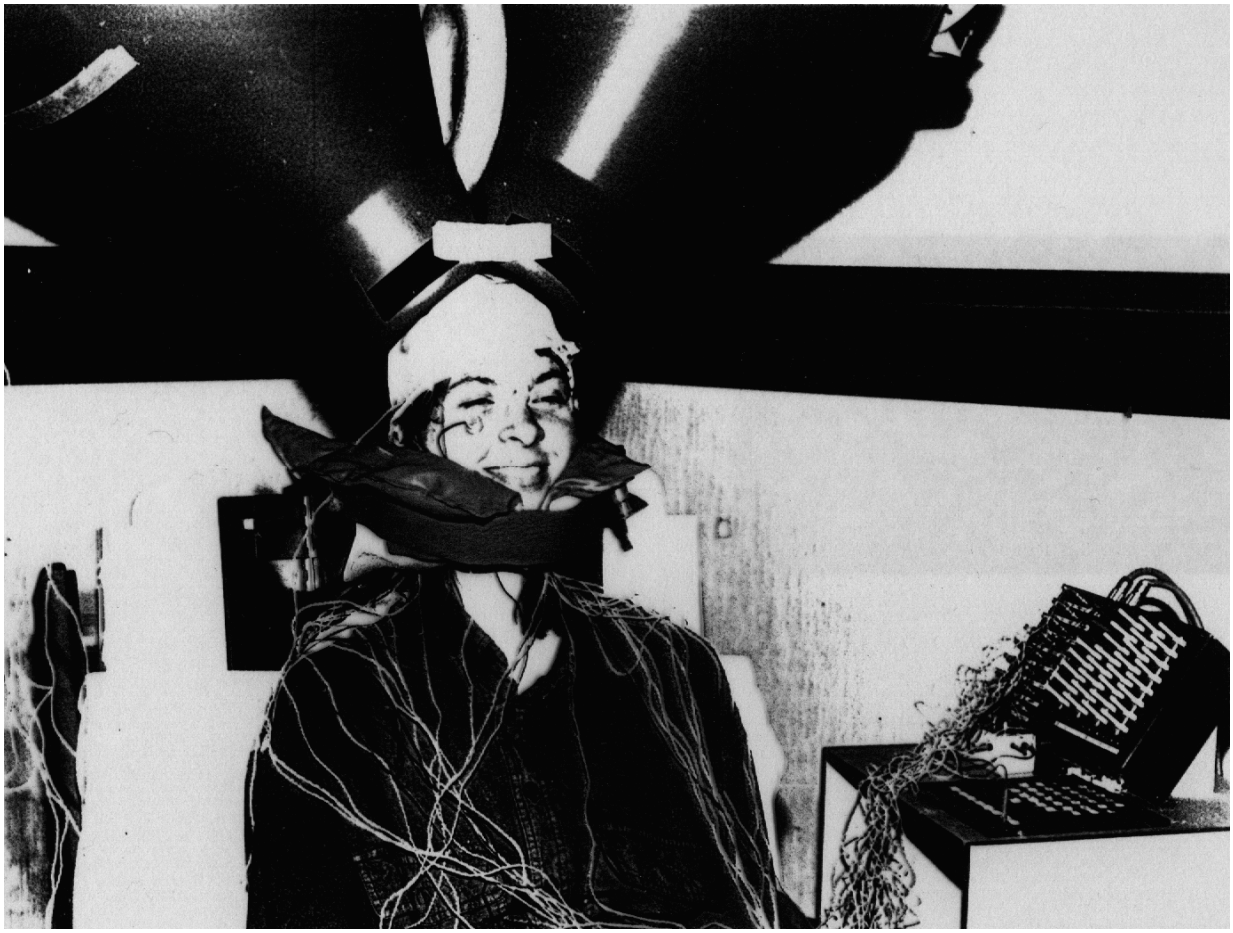


Abb. 2: Das DORNIER MEG-Gerät mit den beiden heliumgefüllten Kryostaten. In der vorliegenden Studie wurden die Probanden auf der Seite liegend gelagert und die Kryostaten auf eine Kopfseite positioniert.

2.2 EEG-Aufzeichnung

Das EEG wurde mit einem 32-Kanal-Meßgerät aufgezeichnet. Zur Simultanregistrierung mit dem MEG wurden 25 speziell gefertigte extraflache Ag-AgCl-Elektroden mit eingebetteter magnetischer Spule (Becker et al. 1992) verwendet. Die Ableitungspositionen entsprachen dem internationalen 10-20-System nach Jasper (1958). Wir registrierten folgende Elektrodenpositionen:
Fpz, Fp1 und Fp2 beidseits über den Augenbrauen und in der Mittellinie, etwas oberhalb des Nasions, F3, F4, FZ frontal, F7, F8, CZ am Vertex, C3, C4 praecentral über dem motorischen Cortex, T3, T4 temporal über dem primären Hörzentrum (Brodmann-Areal 41) in den Heschlschen Querwindungen, P3, P4, PZ

parietal, T5, T6, O1, O2 okzipital rechts und links über der primären Sehrinde, den Arealen 17-19.
Zwischen C3 und C4 einerseits und T3 und T4 andererseits wurden je 3 zusätzliche Elektroden positioniert, um eine genauere räumliche Auflösung über dem akustischen Cortex zu ermöglichen.
Ziel dieser engmaschigen Abtastung der Schädeloberfläche war es, neben den Zeitverläufen der Hirnpotenziale auch ihre Quellen in Form sog. äquivalenter Dipole zu lokalisieren.
Die Ableitung erfolgte unipolar gegen die zusammengeschalteten Ohrläppchen, d.h. das gemittelte Signal der beiden Ohrelektroden diente als Referenz.
Zusätzlich wurden noch EOG-Elektroden am lateralen Augenwinkel und über der Augenbrauenmitte angebracht, um Artefakte durch Augenbewegungen erkennen zu können. Außerdem bekamen die Versuchspersonen einen Bauchgurt mit Dehnungsaufnehmer umgelegt, um die Atemperiodik sichtbar zu machen.
Die Impedanzen der Elektroden lagen meist unter 1 kOhm, nie jedoch über 3 kOhm.

2.3 Akustische Reizvorrichtung

Der Schall wurde mittels Schläuchen aus Plastik in die Gehörgänge der Probanden übertragen. Die Lautsprecher befanden sich außerhalb der Kabine, um magnetische Artefakte zu vermeiden. Alle akustischen Reize wurden mit einem PC-Programm generiert. Dazu wurde ein Soundblaster (SB 16, Creative Labs) über MIDI-Code angesteuert. Die Tonbedingungen bestanden aus Sinus-Signalen von 40 ms Dauer und je 10 ms Ein- und Ausschaltzeit (siehe Reizmaterial). Für die Musikbedingungen wurde ein Klavier-ähnlicher Klang verwendet. Die Reizung erfolgte binaural mit 60 dB Hörpegel, d.h. 60 dB über der individuell ermittelten Hörschwelle auf jedem Ohr. Da die Hörschwelle in einer nicht akustisch abgeschirmten Umgebung ermittelt wurde, kann die tatsächliche Lautstärke um 5 bis 10 dB höher gelegen haben.

2.4 Probanden

Die Versuche wurden bei 20 gesunden Versuchspersonen durchgeführt, 7 davon waren weiblich, 13 männlich. Das Alter der Probanden lag zwischen 16 und 54 Jahren. Die Mehrzahl der Probanden waren Studenten der Universität Ulm. Bei der Auswahl der Personen wurde darauf geachtet, dass nur Rechtshänder an den Experimenten teilnahmen Die Versuchspersonen wurden in zwei Gruppen entsprechend ihrer „Musikalität“ unterteilt. Um etwa die gleiche Anzahl „musikalischer“ und „unmusikalischer“ Versuchspersonen zu rekrutieren, wurde ein kurzes Interview durchgeführt, in dem die Probanden zu ihrer Musikalität befragt wurden. Die Personen, die durch Befragung der Gruppe der „Musiker“ zugeordnet wurden, sollten sich über mehrere Jahre musikalisch betätigt haben, z.B. durch Spielen eines Instrumentes, Mitwirken in einem Orchester, o.ä. Ihr Interesse für Musik sollte über den Unterricht in der Schule hinausgehen. Die Versuchspersonen, die der Gruppe der Nichtmusiker zugeordnet wurden, sollten weder aktiver noch passiver musikalischer Betätigung nachgehen und subjektives Desinteresse insbesondere an klassischer Musik bekunden.
Um diese Einstufung zu objektiveren, wurde mit allen Probanden der Bentley-Test (Bentley 1963) durchgeführt. Dies ist ein Test, der für Schulkinder entwickelt wurde, um deren musikalische Fähigkeiten festzustellen. Die Validität des Testes ist nur für Kinder nachgewiesen, da er eigentlich nicht für Erwachsene vorgesehen wurde. Aufgrund der guten Korrelation des Testes mit der subjektiven Selbsteinschätzung der Probanden halten wir den Einsatz des Tests jedoch für gerechtfertigt.
Der Bentley-Test besteht aus vier verschiedenen Aufgaben:
1. Vergleich von jeweils zwei Tönen und Erkennen ob der zweite Ton höher, tiefer oder gleich hoch wie der erste Ton ist (20 Punkte).
2. Erkennen der Anzahl der Töne von Akkorden, die aus 2 bis 4 gleichzeitig gespielten Tönen bestehen (20 Punkte).
3. Vergleich von jeweils zwei Tonfolgen und Erkennen des jeweils geänderten Tones (10 Punkte).
4. Vergleich von jeweils zwei Rhythmen und Erkennen der geänderten Taktzahl (10 Punkte).

Insgesamt konnten bei diesem Test 60 Punkte erzielt werden. Um die jeweils erreichte Punktzahl der Versuchsperson zu ermitteln, wird die Anzahl der Fehler des jeweiligen Probanden von der maximal erreichbaren Punktzahl subtrahiert. Da die Rhythmusfähigkeit des Probanden in unserem Experiment von eher untergeordnetem Interesse war, berücksichtigten wir die letzte Aufgabe des Tests bei der Auswertung nicht, und kamen somit auf eine Höchstpunktzahl von 50.

2.5 Vorbereitung der Versuche

Zunächst wurden den Versuchspersonen EEG-Elektroden geklebt (siehe Abschnitt „EEG“). Zum Befestigen der Elektroden wurden die markierten Stellen am unbehaarten Kopf mit Alkohol entfettet, am behaarten Kopf mit einer Reinigungspaste gesäubert, um eine gute Leitfähigkeit der Elektroden zu gewährleisten. Die Elektroden wurden dann mit elektrolytischer Elektrodenpaste auf die gescheitelten Haare, oder zusätzlich mit Klebering versehen, auf die Haut geklebt.

Während des Klebens der Elektroden wurden den Probanden die Ton- und Musikbedingungen des Versuches vorgespielt. Zuerst sollten sie sich mit den fehlerlosen Fassungen des Tonmaterials vertraut machen, anschließend wurde ihnen Reizmaterial mit Fehlern vorgespielt. Hier war wichtig, dass die Fehlerliste nicht mit der im Experiment verwendeten Liste identisch war. Die Probanden wurden auf die Fehler hingewiesen. Außerdem wurden ihnen weitere, das Experiment betreffende Instruktionen erteilt (siehe unten).

Danach wurden die Versuchspersonen in der Kabine gelagert. Sie mußten sich in Seitenlage auf eine Liege in der Kabine legen, und zwar in der ersten Sitzung auf die linke, in der zweiten Sitzung auf die rechte Seite. Um ihnen die auf Dauer unbequeme Lage zu erleichtern, wurde ihnen ein Vakuumkissen hinter den Rücken geschoben und zwischen die Knie ein Polster gelegt. Dadurch hofften wir, durch Muskelverspannung und -kontraktion verursachte Artefakte zu vermeiden.

Anschließend wurde die Hörschwelle der Probanden bestimmt. Dazu wurde der Schall so lange auf- und absteigend variiert, bis der Druckpegel erreicht war, bei dem die Versuchsperson angab, gerade noch etwas zu hören. Dieser Druck wurde dann um 60 dB erhöht, und in dieser Lautstärke wurde das Reizmaterial dargeboten.

Danach folgte das Einstellen der Kryostaten. Wichtig dabei war, dass sie einen möglichst kleinen Abstand zum Kopf des Probanden hatten, da das Magnetfeld mit zunehmendem Abstand im Verhältnis $1/(r^2)$ abnimmt. Außerdem sollte zwischen den beiden Kryostaten nur ein minimaler Spalt sein, da dieser sich im Bereich des akustischen Cortex befand, und es für unser Experiment insbesondere wichtig war, von diesem Bereich genaue Informationen zu erhalten.

2.6 Reizmaterial

Das Tonmaterial bestand aus 5 Bedingungen mit den folgenden Bezeichnungen: „Note“, „Chord“ (Akkord), „Arpeggio“, „Mozart“ und „Bach“. Siehe hierzu auch Abb. 3.
Die ersten drei Bedingungen waren Ton-Bedingungen, die letzten beiden Musik-Bedingungen. Die Paradigmen wurden innerhalb jeden Versuches immer in der obenstehenden Reihenfolge dargeboten.

„Note“:
In dieser Bedingung wurden der Versuchsperson eine Zufallsfolge von 300 Standard (STD) Tönen mit einer Frequenz von 1310 Hz und 100 davon abweichende Tönen (DEV) mit einer Frequenz von 1390 Hz vorgespielt. Die Dauer der Töne betrug jeweils 40 ms, das dazwischen liegende Intervall (ISI= interstimulus interval) war jeweils eine Sekunde lang. Die Töne hatten eine sinusoidale Wellenform, die Anstiegs- und Abfallzeit betrug 10 ms. Die Folge von Standard und devianten Tönen war zufällig; abweichende Töne durften jedoch maximal 2 mal unmittelbar aufeinander folgen, um zu vermeiden, dass der Proband sich an die devianten Töne gewöhnte und als Folge die Standard Reize als „falsch“ erkannte. Diese Art der Reizbedingung wird als odd ball Paradigma bezeichnet.

„Chord“:
Diese Bedingung war dem Note-Paradigma sehr ähnlich, jedoch bestand der Stimulus aus drei gleichzeitig erklingenden Tönen, also einem Akkord. Die Frequenzen des Standard Klanges waren 1040 Hz, 1310 Hz und 1560 Hz (Dur-Akkord). Bei den abweichenden Reizen (DEV) blieben die beiden äußeren Töne

gleich, nur der mittlere wurde auf 1390 Hz (entspricht einem Halbton) erhöht. Der Akkord war damit „unrein“.

„Arpeggio“:
Auch diese Bedingung bestand aus jeweils 3 Tönen unterschiedlicher Frequenzen, sowohl beim Standard als auch beim Deviant-Reiz. Die Frequenzen waren die gleichen wie beim Paradigma Chord, jedoch waren die Töne hier sequentiell um 80 ms versetzt.

„Mozart“:
Bei dieser Bedingung wurde das einfache und sehr bekannte Weihnachtslied „Morgen kommt der Weihnachtsmann“ 40 mal wiederholt. Die Melodie ist eigentlich sehr viel älter, wir haben diese Bedingung jedoch „Mozart“ genannt, da dieser Variationen darüber schrieb. Jede Wiederholung bestand aus 12 Takten (96 Tönen). 25% der Takte begannen mit einem von der Originalmelodie abweichenden, um einen Ganztonschritt höher liegenden Ton (DEV).

„Bach“:
Diese Bedingung bestand aus der 15- fachen Wiederholung der Invention Nr. 8 von Bach. Diese Melodie war im Gegensatz zu der vorhergehenden 2-stimmig, und außerdem komplexer und anspruchsvoller als die Bedingung Mozart. Jede Wiederholung bestand aus 34 Takten (427 Tönen). Auch hier begannen 25% der Takte mit einem „falschen“, d.h. um einen Ganztonschritt höher liegenden Ton als bei der ursprünglichen Melodie. Die abweichende Töne (DEV) kamen nur in der ersten Stimme vor.

Schema der Bedingungen:

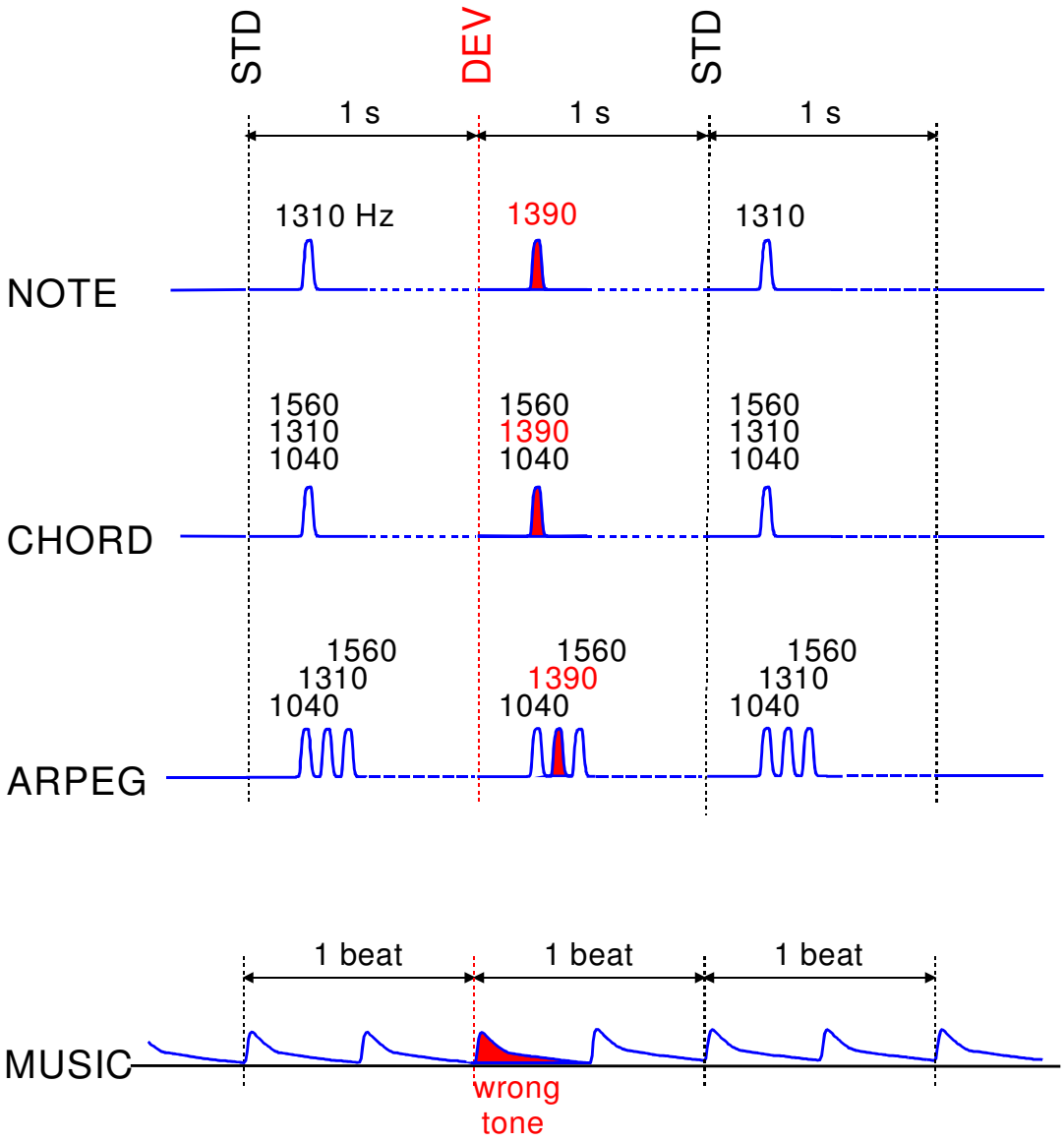


Abb. 3: Schematische Darstellung der Zeitverläufe und Frequenzen (häufiger Ton schwarz, abweichender Ton rot) für die 3 Ton-Reize und den Musik-Reiz „Mozart“ (der bis auf die langsamere Tonfolge dem Reiz „Bach“ ähnelt)

Da die beiden Musik- Bedingungen unter Verwendung eines Computers erzeugt wurden (vgl. oben) gab es keine Abweichungen bezüglich Tonhöhe und zeitlicher Struktur.
Außerdem wiesen die Musikstücke eine regelmäßige rhythmische Struktur auf. Wir konnten deswegen die von den Musikstücken evozierte Hirnaktivität in ähnlicher Weise mitteln („averagen“) wie die Tonbedingungen. Um eine Vorhersage der falschen Töne auszuschließen, erschienen diese bei jeder Wiederholung an einer anderen Stelle, die durch eine pseudozufällige Liste festgelegt wurde, welche für alle Versuchspersonen identisch war.

2.7 Durchführung des Versuches

Nachdem die oben beschriebenen technischen Vorbereitungen getroffen und die Probanden gelagert waren, wurden die Versuchsanweisungen nochmals wiederholt.
Die Verständigung mit den Versuchspersonen erfolgte über Lautsprecheranlage, da während der Versuche die Kabinentüre geschlossen sein mußte. Die Versuchsperson wurde angeleitet, sich während des Versuchs nicht zu bewegen, vor allem nicht den Kopf, und die Augen während der Reizbedingung offen zu halten. Auch sollten Lidschläge und Augenbewegungen so gut wie möglich unterdrückt werden, um dadurch bedingte Artefakte zu vermeiden. Danach wurde ein kurze Episode Ruhe-EEG aufgezeichnet. Dabei konnte z.B. abgeschätzt werden, ob es Probleme mit häufigen Lidschlägen geben würde. Bei zwei Probanden wurden die Versuche deshalb mit geschlossenen Augen durchgeführt. Anschließend wurde das Experiment mit der ersten Tonbedingung gestartet. Die Probanden waren instruiert, die falschen Töne im Kopf mitzuzählen, ohne die Lippen oder auch die Finger als Zählhilfe zu bewegen. Mindestens nach jeder Bedingung wurde eine Pause gemacht und die Probanden sollten die von ihnen gezählten Abweichungen berichten. Bei vielen Probanden wurden aber auch kleine Pausen innerhalb eines Paradigmas gemacht, um ihnen Gelegenheit zu geben, ihre Augen zu schließen und etwas zu entspannen. Bei den beiden Musikbedingungen wurde grundsätzlich eine Pause eingelegt. Das gesamte Experiment dauerte ca. 2 Stunden und wurde in zwei Sitzungen durchgeführt. In der ersten Session, die gewöhnlich am Vormittag stattfand, wurde mit dem MEG

die rechte Hemisphäre des Probanden abgeleitet, in der zweiten Session am Nachmittag, die linke. Dazwischen lag eine Pause von einer knappen Stunde in der die Elektroden auf dem Kopf des Probanden belassen wurden.

2.8 Magnetische Lokalisation der EEG-Elektroden

Um die Lage der biologischen Dipole im Kopf lokalisieren zu können, muß die Position der MEG-Sensoren wie auch die der EEG-Elektroden in Bezug zum Kopf genau bekannt sein.
Dazu wurden hier besondere Elektroden verwendet. Sie bestehen aus Ag-AgCl-Plättchen (12mm Durchmesser, 1mm Höhe). An einer Seite der Elektrode ist eine Spiralspule (aus Leitermaterial herausgeätzt) aufgebracht und durch Lack isoliert. Die Spirale hat 10 Windungen, mit einem Radius, der um 0.03 mm pro Umdrehung zunimmt und bei 2.7 mm beginnt. Die Elektrode hat insgesamt einen Durchmesser von 16 mm und eine Höhe von 4 mm. Die geringe Höhe ist sehr wichtig, um die Kryostaten möglichst nahe an den Kopf bringen zu können (siehe oben).
Um eine Elektrode zu lokalisieren lässt man durch ihre Spule einen Strom (8Hz, 1 mA) fließen und misst die Feldstärken, die dadurch in den MEG-Kanälen induziert werden (Quantifizierung durch Grundwellenanalyse). Aus der räumlichen Verteilung dieser Feldstärken lässt sich schließlich die Position der betrachteten Elektroden relativ zu den Kryostaten berechnen. Der Vorgang wird für jede Elektrode wiederholt und dauert insgesamt 2 Minuten.
Es reicht jedoch nicht aus, die Position der Elektroden in Bezug auf die Kryostaten zu kennen, sondern es interessiert letztlich die Elektrodenposition in Bezug auf das Kopfkoordinatensystem, das durch das Nasion und die beiden präaurikulären Punkte definiert wird.
Diese drei Punkte werden dazu durch magnetisch lokalisierbare Objekte markiert. Es werden kleine keilförmige Objekte verwendet, an denen in präzise definierten Positionen auf 3 Seiten in Feinstleitertechnik geätzte (vernachlässigbar kleine Toleranz), spiralförmige Spulen angebracht sind. Diese Objekte können ähnlich wie die oben beschriebenen Elektroden magnetisch lokalisiert werden (Diekmann et al. 1995). Aus der Position der Marker kann man die Lage des

Kopfkoordinatensystems relativ zu den Kryostaten bestimmen und damit dann die Lage der Elektroden im Kopfkoordinatensystem berechnen.
Weil sich die Kopfposition in Bezug auf die Kryostaten im Verlauf des Experimentes ändern kann, müssen die Markerlokalisationen wiederholt nachgeprüft werden, die Elektroden müssen dagegen nur einmal lokalisiert werden, da sie ihre Position auf dem Kopf nicht ändern, außer wenn sie sich ablösen.

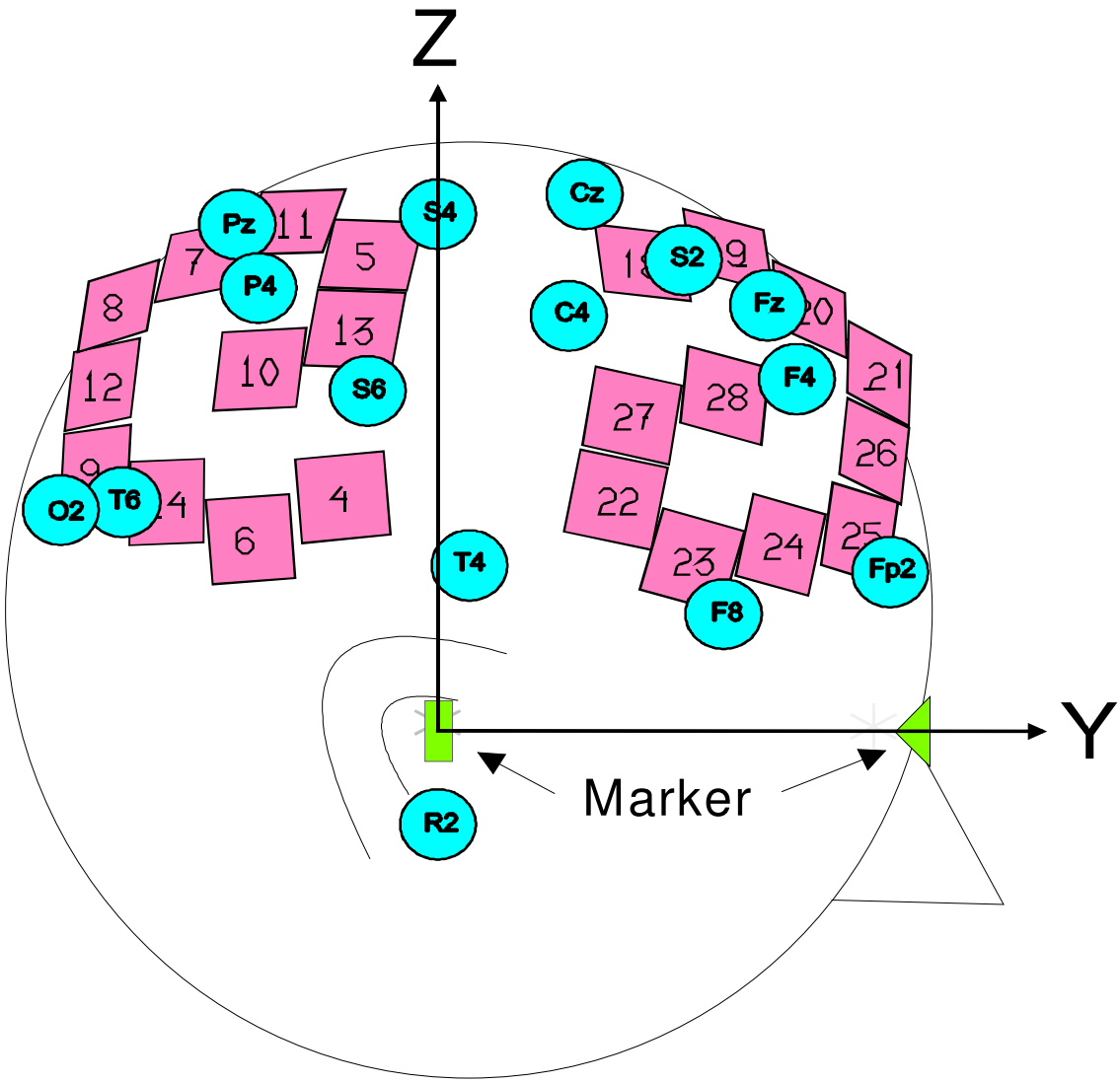


Abb. 4: Lokalisation der magnetischen Feld-Aufnahmer–Spulen (rechteckig) und Elektroden (rund) am Beispiel einer Versuchsperson. Die Achsen y und z markieren das Kopf-Koordinatensystem, das durch Nasion und präaurikuläre Punkte bestimmt wurde; die x-Achse ist auf den Betrachter hin gerichtet. Die Anordnung ist typisch für Messungen während der Vormittagssitzung (rechte Hemisphäre). Zu beachten ist allerdings, dass die genaue Position der Feldaufnehmer von Versuch zu Versuch variiert hat. Während der Nachmittagssitzung (linke Hemisphäre) ist die antero-posteriore Anordnung der Feldaufnehmer spiegelbildlich, d.h. die Kanäle 21, 26 und 25 liegen am weitesten okzipital, die Kanäle 8, 12 und 9 am weitesten frontal.

2.9 Datenerfassung

EEG und MEG wurden simultan mit einer Abtastzeit von 2 ms digitalisiert und gespeichert. Das EEG wurde mit 0,15 Hz (untere Grenzfrequenz, entsprechend einer Zeitkonstante von 1 s) und 64 Hz (obere Grenzfrequenz) gefiltert. Zur Überwachung des Versuchs wurden EEG und MEG gleichzeitig getrennt auf zwei Bildschirmen sichtbar gemacht.

2.10 Datenverarbeitung

Die evozierten Hirnpotenziale wurden getrennt nach Standard (STD) und Deviant (DEV) Ereignissen „geaveraged“ (reizsynchrone Mittelwertbildung). Dabei wird durch Mittelung einer größeren Anzahl von zeitlich mit dem Reiz synchronisierten Registrierintervallen das relativ kleine reizevozierte Potenzial aufsummiert, während andere, nicht reizabhängige Potenziale (z.B. Rauschen, Muskelaktionspotenziale) wegen der zufälligen Summation von positiven und negativen Anteilen weniger stark anwachsen.
Wenn die evozierte EEG-Aktivität und die (physiologischerweise vorhandene) Hintergrundaktivität voneinander unabhängig sind, dann nimmt bei diesem Verfahren das Verhältnis zwischen diesen beiden Aktivitäten („Signal-Rausch-Verhältnis“) mit $\sqrt{N}$ (N = Anzahl der Durchgänge, d.h. der summierten Intervalle) zu. Nimmt man beispielsweise an, dass die Hintergrund EEG-Aktivität eine Maximalamplitude von 50 µV und das evozierte Potenzial eine Amplitude von 10 µV hat, ergibt die Summation von 100 Durchgängen eine Verbesserung um den Faktor 10 ($=\sqrt{100}$), so dass sich evoziertes Potenzial und Hintergrundpotenzial nicht mehr wie 1:5 sondern wie 2:1 verhalten.
Als Voraussetzung für die getrennte Mittelwertbildung entsprechend STD und DEV wurden während des Experimentes in jeder der 5 Bedingungen zwei zusätzliche Triggerspuren aufgezeichnet, wobei eine der Spuren den Standardreiz, die andere den abweichenden Reiz markierte. Bei den ersten 3 Bedingungen befanden sich diese Trigger am Beginn des jeweiligen Tones oder der Tonfolge.
Bei den Musikparadigmen wurde der Trigger an den Beginn des jeweils ersten Tones eines Taktes gesetzt; da die Tonhöhen hier in jedem Takt durch den

Verlauf der Melodie variieren, bestanden die Standard- und die Deviant-Reize aus einer Folge verschiedener Frequenzen. Da wir aber in unserem Versuch Musikstücke mit regelmäßigen rhythmischen Strukturen verwendeten, war das Amplitudenprofil der zu mittelnden Zeitabschnitte stereotyp.

Daher unterschieden sich auch bei den Musikstücken die STD- und DEV Abschnitte im Wesentlichen nur darin, dass der erste Ton des Takts richtig oder falsch war.

Der Zeitabschnitt, über den gemittelt wurde (Sweep), erstreckte sich von 200 ms vor Beginn des Tones bis 700 ms nach dem Ton. Die 200 ms vor dem Ton wurden zur Berechnung der Grundlinie benötigt. Bei „Mozart“ und „Bach“ entfiel die 200 ms Vorperiode und die Periode nach dem Ton war stattdessen auf 900 ms verlängert.

Zu Beginn unserer Auswertungen wurde jeder einzelne Sweep unter manueller Kontrolle gemittelt. Entdeckte man Artefakte, wie z.B. Augenbewegungen, Muskelverspannungen im Bereich des Kopfes oder auch magnetische Artefakte in entweder EEG oder MEG, wurde der entsprechende Sweep aus der Auswertung herausgenommen.

Später wurde ein Programm verwendet, welches, basierend auf Schranken von 100 mV im EEG, 2.5mV im MEG und 50mV in der EOG Spur, automatisch Artefakte erkannte und aus der Auswertung herausnahm. Die Ergebnisse dieser Auswertungen wurden mit denen der manuellen Auswertung verglichen und waren sich so ähnlich, dass kein Nachteil durch die automatische Auswertung erkennbar war. Die meisten Daten wurden deshalb mit der automatischen Methode analysiert. Nachdem diese Auswertung für alle Versuchspersonen durchgeführt war, wurden noch sogenannte Grand Averages angefertigt. Das bedeutet, dass die gemittelten Daten mehrerer Probanden aus der musikalischen Gruppe und, getrennt davon, die der unmusikalischen Gruppe zusammengefaßt wurden. Damit war es möglich, das Kollektiv der musikalischen Versuchspersonen mit dem der unmusikalischen zu vergleichen.

In einem weiteren Schritt wurden die individuellen Averages auf dem Bildschirm dargestellt und die Amplituden und Latenzen der N100, P300 und MMN teilautomatisch ausgewertet. Jeweils an Anfang und Ende der Peaks wurde automatisch ein Cursor gesetzt, der vom Auswerter überprüft und entweder akzeptiert oder abgelehnt wurde. Komponenten, die nicht klar als solche erkannt

wurden, wurden nicht in die Auswertung genommen, auch wenn der Peak theoretisch an dieser Stelle vermutet wurde.

2.11 Statistische Auswertung

Für die statistische Signifikanzprüfung wurde eine multifaktorielle Varianzanalyse verwendet (ANOVA = Analysis Of Variance). Es werden folgende 3 Einflußgrößen mit je 2 Ausprägungen untersucht: Die Gruppenzugehörigkeit (musikalisch/unmusikalisch), Sitzungsnummer (1=Vormittags, 2=Nachmittags) und die Elektrodenposition (links/rechts), wobei im Fall der N100 die Positionen C3 und C4 verwendet wurden, für MMN die Positionen F3 und F4 und für P300 die Positionen P3 und P4; bestimmend für diese Auswahl waren die Positionen mit der jeweils deutlichsten Ausprägung dieser Komponenten. Durchgeführt wurde die Varianzanalyse mit einem kommerziellen EDV-Programm (STATISTICA). Wir akzeptierten ein $p <= 0,05$ als Indikator für statistische Signifikanz.
Die Details der Statistik werden an geeigneter Stelle erläutert.

3 Ergebnisse

3.1 Einteilung der Probanden

Vor Durchführung des Experiments wurden die Versuchspersonen für eine erste Gruppeneinteilung nach der subjektiven Einschätzung ihrer Musikalität befragt, in der Absicht, zwei etwa gleich große, in ihren musikalischen Fähigkeiten aber möglichst unterschiedliche Gruppen zu rekrutieren. Unter den Probanden schätzten sich 8 als musikalisch, 12 als unmusikalisch ein.

Um diese persönliche Einschätzung zu objektiveren, führten wir am Ende der Versuchsreihe den oben bereits beschriebenen Bentley-Test durch. Die Versuchspersonen erreichten Testwerte von 31 bis 48 Punkten (von 50 möglichen). Wir erhielten eine eingipflige Verteilung, mit Häufung der Probanden im Mittelfeld zwischen 34 und 39 Punkten, wo sich 12 der 20 Probanden einordneten. Zwei Versuchspersonen waren mit 31 und 32 erreichten Punkten deutlich schlechter als der Durchschnitt, 6 Versuchspersonen siedelten sich im Bereich von 42 bis 48 Punkten an. Diese Ergebnisse zeigen, dass es entgegen unserer Absicht offenbar nicht gelungen war, zwei „Extremgruppen“ zu bilden.

Für die weitere Auswertung wurden die Probanden anhand des Bentley-Testes in zwei neue Gruppen eingeteilt. In der „musikalischen“ Gruppe befanden sich die Probanden mit einem Bentley-Score von 38 oder mehr (10 Versuchspersonen), in der „unmusikalischen“ Gruppe waren ebenfalls 10 Versuchspersonen, die eine Punktzahl von weniger als 38 erreichten. Wir maßen uns damit nicht an, über die Musikalität der Versuchspersonen zu urteilen. Wir können lediglich bestimmte perzeptive Fähigkeiten bewerten. Trotzdem werden die Gruppen der Einfachheit halber als „musikalische“ und „unmusikalische“ Gruppe[1] bezeichnet. Durch die post hoc Einteilung nach dem Bentley-Test kamen 2 Versuchspersonen, die sich ursprünglich als musikalisch einschätzten in die „unmusikalische“ Gruppe, vier ihrer Selbsteinschätzung nach unmusikalische Probanden gelangten in die „musikalische“ Gruppe. Hierzu ist anzumerken, dass diese Umgruppierung nur Probanden aus dem Mittelfeld der Bentley-Score-Verteilung (36 bis 42 Punkte) betraf, während sich am oberen Ende (Punktzahl >44) und unteren Ende (<35

[1]: Soweit nicht anders erwähnt, bezieht sich die Bezeichnung musikalisch/unmusikalisch im Folgenden immer auf die Einstufung gemäß Bentley-Test und nicht auf die Selbsteinstufung.

Punkte) eine eindeutige Korrelation zwischen Selbsteinschätzung und Bentley-Score ergab (Abb.4).

Die Gruppierung entsprechend der 50%-Quantilen der Bentley-Verteilung wurde insbesondere für die Varianzanalyse sowie die meisten semiquantitativen Vergleiche zwischen „musikalisch“ und „unmusikalisch“ verwendet.

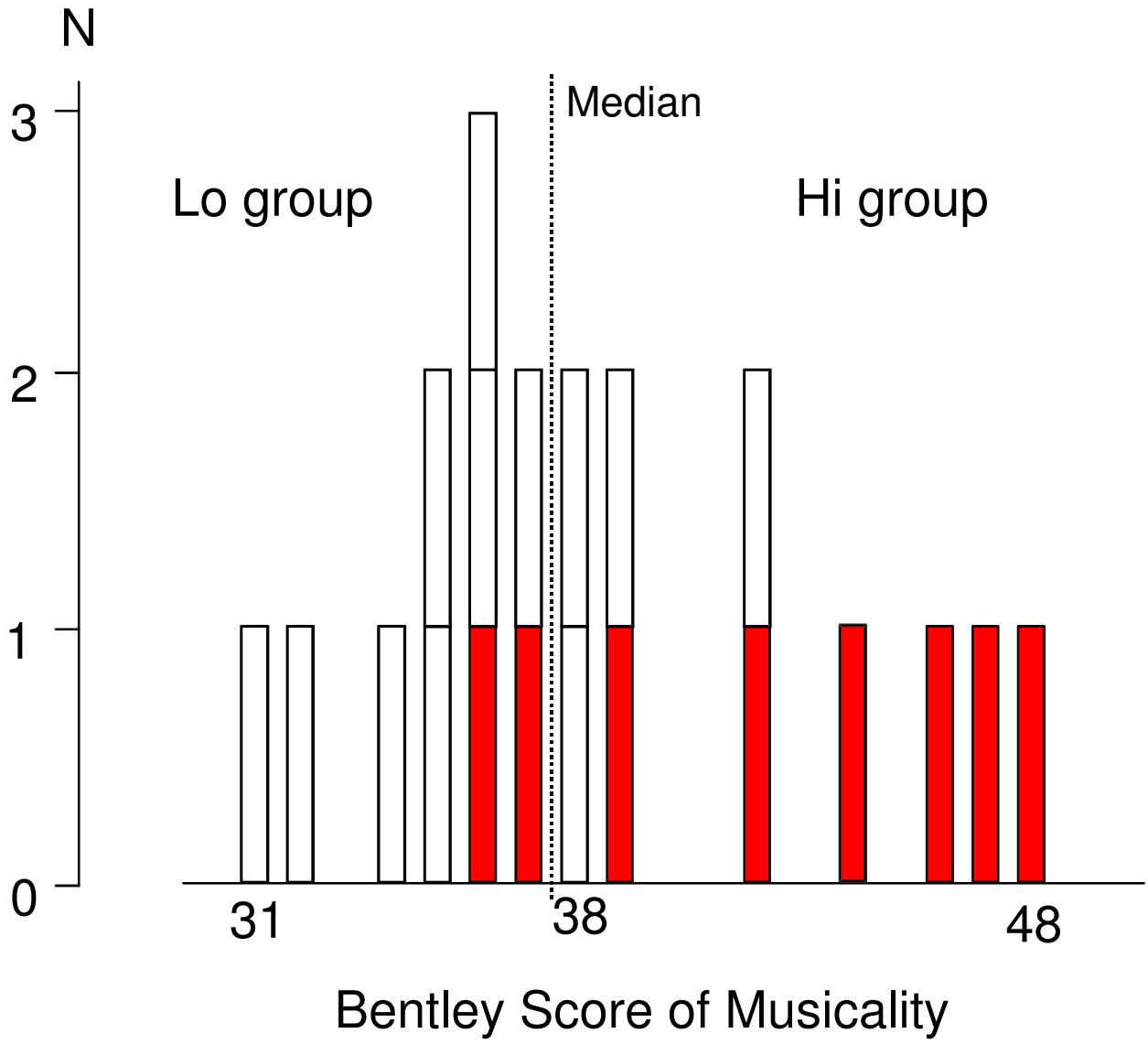


Abb. 5: Häufigkeitsverteilung der Versuchspersonen bezüglich des Bentley-Scores. Die Population wurde willkürlich in zwei Gruppen (Lo und Hi) links und rechts des Medians (37,5) eingeteilt.
Rote Flächen: Probanden, die sich in der ersten Einteilung als musikalisch eingeschätzt haben
Leere Flächen: Probanden, die sich als unmusikalisch eingestuft haben

Im weiteren Verlauf der Auswertung wurde noch eine 3. Gruppierung benutzt, bei der nur das oberste und unterste Drittel (nach dem Bentley-Test) betrachtet wurde. Aus den Kurven dieser Probanden wurden die so genannten „Grand Averages“ erstellt, um die Unterschiede zwischen den beiden Gruppen nicht nur statistisch, sondern auch bildlich sichtbar zu machen.

Um Verwechslungen zu vermeiden, werden die Gruppen im Folgenden (soweit zum Verständnis notwendig) als S-Gruppe (Selbsteinschätzung), B-Gruppe (Bentley-Test) und E-Gruppe (Extremwerte) bezeichnet.

3.2 Anzahl der gezählten Fehltöne

Folgende Tabelle zeigt die durchschnittliche Häufigkeit nicht erkannter und daher nicht gezählter Ton-Abweichungen, aufgeschlüsselt nach den Faktoren Gruppe (B-Gruppe), Sitzung und Paradigma.

Tab. 1: Anzahl der nicht gezählten Abweichungen in Prozent; Mittelwerte über die „musikalische“ und „unmusikalische“ B (Bentley-Test)-Gruppe

Paradigma	**Sitzung**	**unmusikalische Gruppe in %**	**musikalische Gruppe in %**
NOTE	1	3.9	2.8
	2	3.9	1.8
	1+2	3.9	2.3
CHORD	1	19.6	2.9
	2	23.9	8.5
	1+2	21.8	5.7
ARPEGGIO	1	45.2	10.3
	2	38.9	12.6
	1+2	42.1	11.5
MOZART	1	21.6	8.2
	2	21.0	11.3
	1+2	21.3	9.7
BACH	1	46.3	38.9
	2	46.0	33.5
	1+2	46.2	36.2

Wie man aus der Tabelle 1 entnehmen kann, war die Anzahl der Fehler (nicht gezählte falsche Töne) in der Bedingung „Note“ in beiden Gruppen am geringsten. Da bei diesem Paradigma kaum ein Proband Schwierigkeiten damit hatte, die abweichenden Töne in der Probesitzung richtig zu erkennen, ist anzunehmen, dass der Großteil der begangenen Fehler durch Konzentrationsmangel zu erklären ist.

In den Bedingungen „Chord“ und insbesondere „Arpeggio“ wird der Unterschied zwischen den beiden Gruppen deutlicher. Das Paradigma „Chord“ wurde von der Gruppe der musikalischen Probanden als fast ebenso einfach wie das vorhergehende Paradigma empfunden. Dementsprechend war die Fehleranzahl in der ersten Sitzung mit 2.9% im Schnitt fast die gleiche wie in der Bedingung „Note“ mit 2.8%. Dies ist insofern erstaunlich, als von den drei gleichzeitig gespielten Tönen bei den abweichenden Reizen die beiden äußeren die gleichen waren und so den mittleren, um einen Halbton höheren Ton maskierten. Während sich die musikalischen Versuchspersonen bei der ersten Bedingung („Note“) am Nachmittag jedoch verbesserten, verdreifachte sich allerdings die Anzahl der Fehler bei „Chord“ fast, was sich auch hier wieder am ehesten auf Konzentrationsmangel und Müdigkeit zurückführen lässt. Ein Teil der unmusikalischen Gruppe empfand diese Bedingung als deutlich schwerer als die vorhergehende. So konnte z. B. ein Proband am Nachmittag keinen einzigen falschen Ton mehr erkennen, ein anderer konnte in beiden Sitzungen nicht einen einzigen abweichenden Ton hören. Das erklärt, weshalb die unmusikalische Gruppe im Mittel so viel schlechter abschnitt als die musikalische, obwohl auch in dieser Gruppe die meisten Versuchspersonen die falschen Töne relativ gut erkennen konnten.

In der Bedingung „Arpeggio“ hatten erstmals auch die Probanden der musikalischen Gruppe Schwierigkeiten, die falschen Töne zu erkennen. Dass dieses Paradigma den Versuchspersonen so viel schwerer fiel als „Chord“ ist insofern erstaunlich, als dass es sich um Töne der exakt gleichen Frequenz (wie bei „Chord“) handelte, nur dass sie statt gleichzeitig zeitversetzt erklangen. „Arpeggio“ war auch das Paradigma, das den Unterschied zwischen den beiden Gruppen am deutlichsten zum Vorschein brachte. Interessant ist auch, dass ein Proband, der sich selber als musikalisch einstufte und jahrelangen

Geigenunterricht hatte, der im Bentley-Test jedoch in die Gruppe der unmusikalischen Versuchspersonen eingestuft wurde, in beiden Sitzungen keinen einzigen falschen Ton erkannte.

Die folgende Bedingung „Mozart“, war den meisten Versuchspersonen als Weihnachtslied bekannt. In dieser Bedingung konnten auch ungeschulte Versuchspersonen die meisten abweichenden Töne gut erkennen, so dass dieses Paradigma als „relativ einfach“ empfunden wurde. Tatsächlich war die Erkennbarkeit devianter Töne durch die Einbettung in unterschiedliche Stellen innerhalb der Melodie aber variabel. Der Unterschied in der Fehlerrate zwischen den beiden Gruppen basiert vermutlich auf den (im musikalischen Kontext) relativ schwer zu erkennenden abweichenden Tönen. Gleiches gilt sinngemäß auch für das nachfolgende Paradigma „Bach“.

Als abschließendes Paradigma wurde die den meisten Probanden unbekannte Invention Nr. 8 von Bach gespielt. Hier war die Anzahl der nicht gezählten falschen Töne in beiden Gruppen am größten. Was hier sicherlich besondere Probleme bereitete, war einerseits die Zweistimmigkeit, andererseits die musikalische Komplexität. Außerdem war die Erkennbarkeit abweichender Töne sehr unterschiedlich. Während einige Abweichungen von der Originalmelodie von den meisten Versuchspersonen erkannt wurden, waren andere Abweichungen so in den Melodieverlauf eingebettet, dass wohl kaum ein Proband den Fehler erkannte. Bei Mozart war die Spannweite in der Schwierigkeit der verschiedenen Abweichungen sehr viel geringer.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die „musikalische“ Gruppe in allen Bedingungen besser abschnitt als die „unmusikalische“, wobei der Unterschied bei Note am geringsten und bei Arpeggio am größten war, während die beiden Musikbedingungen bezüglich des Unterschiedes dazwischen lagen.

Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass uns die Zahl der falsch positiven Zählungen unbekannt ist, weil die Probanden uns ihr Ergebnis nur in den Pausen und nicht nach jedem Ton mitteilten. Ein weiterer Punkt, der das Ergebnis verfälschen könnte ist, dass es Versuchspersonen geben könnte, die z.B. in der zweiten Sitzung davon ausgegangen sind, dass als Ergebnis der Tonbedingungen die Fehlerzahl Einhundert (als runde Zahl) wahrscheinlich ist.

3.3 Evozierte Aktivität

3.3.1 Übersicht

Exemplarische Mittelwertkurven der elektrischen und magnetischen Aktivität je einer musikalischen und einer unmusikalischen Versuchsperson in den verschiedenen Bedingungen finden sich im Anhang, zusammen mit einer kurzen Beschreibung der identifizierbaren Potenziale und ihrer magnetischen Äquivalente (Seiten 98 bis 140)

Aus der Durchsicht der Mittelwertkurven aller Versuchspersonen ergibt sich, dass mit wenigen Ausnahmen alle Bedingungen bei allen Probanden eine Antwort des primären akustischen Cortex in Form einer N100 hervorriefen. Während wir in den Tonbedingungen einzelne N100 Potenziale erhielten und auch bei Mozart eine Folge noch klar isolierter N100 Potenziale zu erkennen war, verschmolzen die N100-Wellen im Bach Paradigma aufgrund der raschen Wiederholung der Töne zu einem annähernd sinusoidalen Muster („steady state evoked potential“). Bei abweichenden Tönen fand sich in der großen Mehrzahl der Fälle sowohl eine MMN als auch eine späte positive Komponente mit einer Latenz zwischen 250 ms und 450 ms, die P300. Während N100 und MMN ihre deutlichste Ausprägung in frontalen und zentralen Elektroden erfuhren, fand sich die P300 vor allem in den parietalen Ableitungen.
In den magnetischen Messungen fand sich, abgesehen von einzelnen Ausnahmen, bei den meisten Probanden ein Korrelat der N100 (N100m), das sowohl an Hand der Kurvenform als auch des zur N100 korrespondierenden Zeitfensters identifiziert werden konnte.
Die magnetischen Entsprechungen der MMN und P300 wurden hauptsächlich über ihre zeitliche Korrespondenz zu MMN und P300 bestimmt (vgl. Beschreibung im Anhang) und waren in der Mehrzahl der Probanden und Sitzungen auszumachen, jedoch nicht in allen.

Die im Anhang vorgestellten Einzelbeschreibungen je einer musikalischen und einer unmusikalischen Versuchsperson lassen vermuten, dass es besonders bei der Ausprägung der Potenziale MMN und P300 Unterschiede zwischen den

Gruppen der musikalischen und der unmusikalischen Probanden geben könnte. In den folgenden Abschnitten soll diese Möglichkeit genauer untersucht werden. Dazu wird im nächsten Abschnitt auf die teilweise erhebliche Variabilität der evozierten Potenziale N100, MMN und P300 zwischen den Probanden eingegangen. Anschließend werden die Mittelwerte dieser Potenziale über die Populationen „musikalisch“ und „unmusikalisch“ (B-Gruppen) dargestellt, und es wird geprüft, in wieweit die gefundenen Gruppen-Unterschiede sowie Seitenunterschiede bei den Elektroden und dem Effekt Sitzung 1 vs. 2 statistisch bedeutsam sind. In einem weiteren Kapitel werden anhand von Grand Averages Details der Unterschiede zwischen den E-Gruppen „musikalisch und „unmusikalisch“ herausgearbeitet. Zum Abschluss werden die magnetischen Äquivalente der evozierten Potenziale kurz gestreift; eine genaue Analyse der magnetischen Aktivität war nicht möglich, da sie in ihrer Größe und Topographie von zu vielen Randbedingungen (z.B. anatomische Lage der Generatoren im Kopf und der Abstand der Kryostaten vom Kopf der Versuchsperson) abhängt, die in dieser Studie leider nicht ausreichend berücksichtigt werden konnten.

3.3.2 Variabilität der evozierten Potenziale

Um zu einer Übersicht über die Ausprägung der Potenziale N100, MMN und P300 zu kommen, wurden die Amplituden der gemittelten evozierten Potenziale der 20 Probanden in allen 5 Paradigmen vermessen und klassifiziert. Dabei wurden die Ergebnisse der beiden Sitzungen gemittelt und, in Übereinstimmung mit der Literatur, für die N100 Elektrode CZ, für die MMN FZ und für die P300 Elektrode PZ berücksichtigt. Die Größenklassifizierung erfolgte entsprechen den in Tab.2 dargestellten Kriterien.

Tab. 2: Einteilung und Klassifizierung der Amplituden der Potenziale N100 (Elektrode CZ), MMN (Elektrode FZ) und P300 (Elektrode PZ) nach ihrer Größe in µV in 4 bzw. 5 Gruppen.

Amplitudenklasse	Bezeichnung	N100 (CZ)	MMN (FZ)	P300 (PZ)
0	nicht vorhanden			
1	klein	< 3 µV	< 2,5 µV	< 4 µV
2	mittel	3 – 4,5 µV	2,5 – 3,5 µV	4 – 7 µV
3	groß	> 4,5 µV	> 3,5 µV	7 – 10 µV
4	sehr groß			> 10 µV

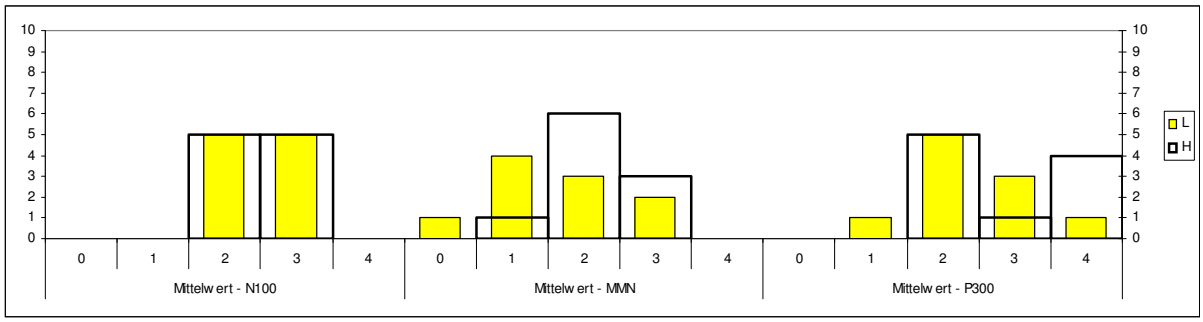
Abbildung 6 vergleicht die aus dieser Klassifizierung resultierende Häufigkeitsverteilung der Amplitudenklassen der evozierten Potenziale der beiden Versuchspersonen-Gruppen „musikalisch“ und „unmusikalisch“. Im obersten Bild links erkennt man, dass im Paradigma „Note“ beide Gruppen etwa gleich große N100-Amplituden hatten (jeweils 5 Versuchspersonen in Kategorie „mittel“ und „groß“); ähnliches gilt auch für die N100 in den anderen Paradigmen. In der Mitte und rechts im oberen Bild erkennt man, dass in der Bedingung „Note“ die MMN und die P300 in der „musikalischen“ Gruppe (breite, dick umrandete Säulen) häufig größere Amplituden hatten als in der „unmusikalischen“ Gruppe (schmale Säulen). Ein ähnliches Bild ergibt sich erwartungsgemäß auch für das Paradigma „Chord“.

Wie schon bei den exemplarischen Versuchspersonen vorgestellt, sieht es bei der Bedingung „Arpeggio“, bei der die Fehlerwahrnehmung relativ schwierig war, anders aus. Hier fehlt die P300 bei 7 von 10 „unmusikalischen“ Versuchspersonen völlig, während sie bei den „musikalischen“ in 8 von 10 Versuchspersonen klar abgrenzbar war. Interessanterweise ist dieser Unterschied in der MMN nicht erkennbar.

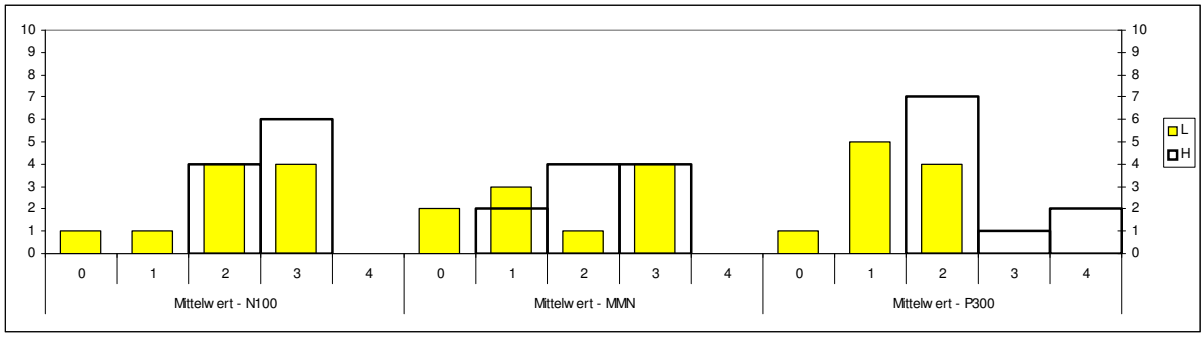
Im Gegensatz dazu löste die Bedingung „Mozart“ bei allen Versuchspersonen eine klare P300 aus. Dies ist nicht überraschend, da genügend viele Abweichungen auch für ungeübte Ohren leicht wahrzunehmen waren. Dennoch gab es nur bei den „musikalischen“ Probanden drei, in denen die P300 sehr groß ausfiel. Die

MMN zeigte dagegen bei der „musikalischen“ Gruppe eine deutliche Verschiebung zu größeren Amplituden, obwohl nur eine einzige „unmusikalische“ Versuchsperson überhaupt keine MMN in dieser Bedingung zeigte.
Schließlich löste auch die komplexe Bedingung Bach (in der sowohl einfach wie auch schwer zu hörende Abweichungen enthalten waren) bei den „musikalischen“ Versuchspersonen größere Amplituden aus als bei den unmusikalischen, und zwar sowohl bei der NNM als auch bei der P300, nur selten fehlte eines dieser Potenziale.

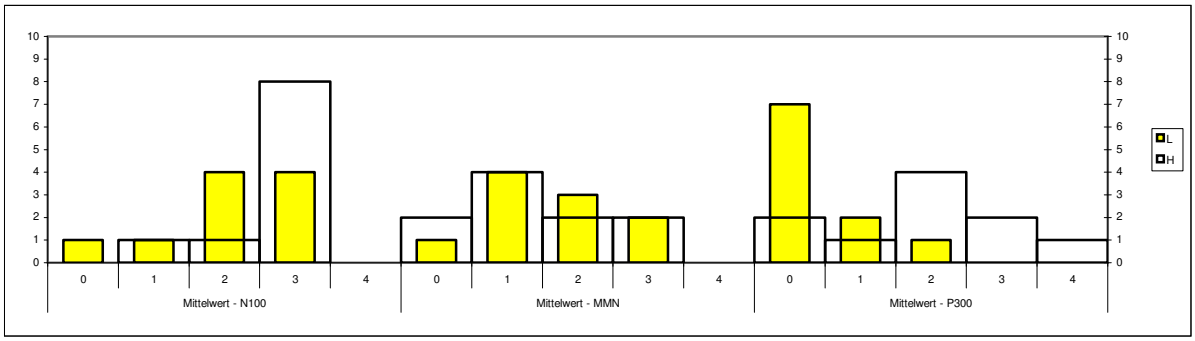
Note



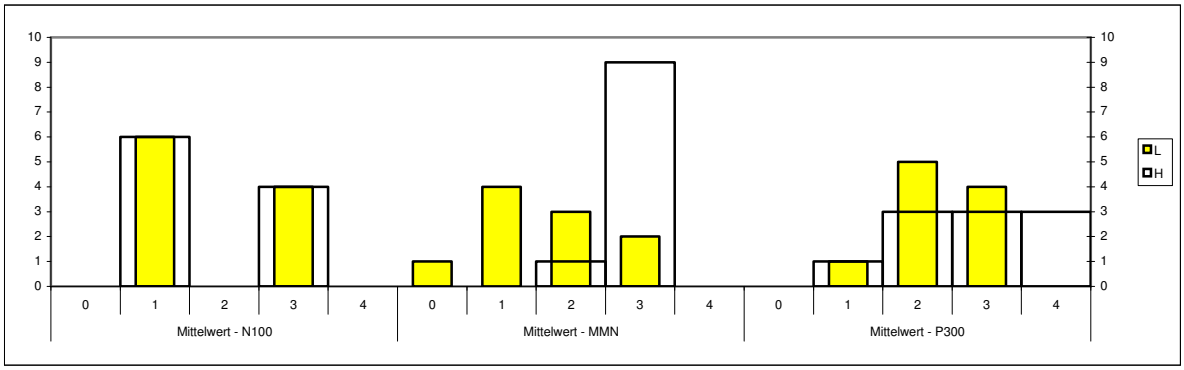
Chord



Arpeggio



Mozart



Bach

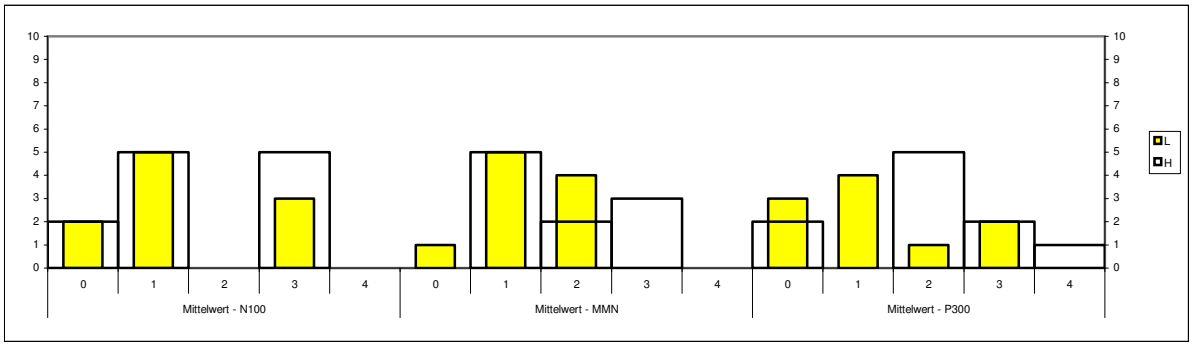
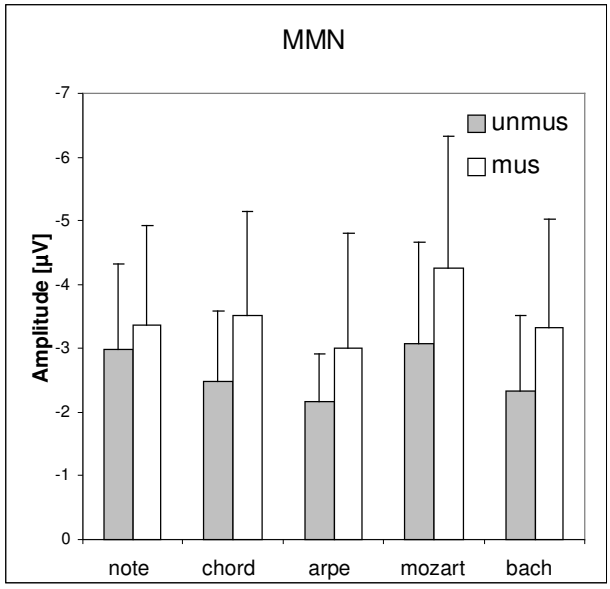
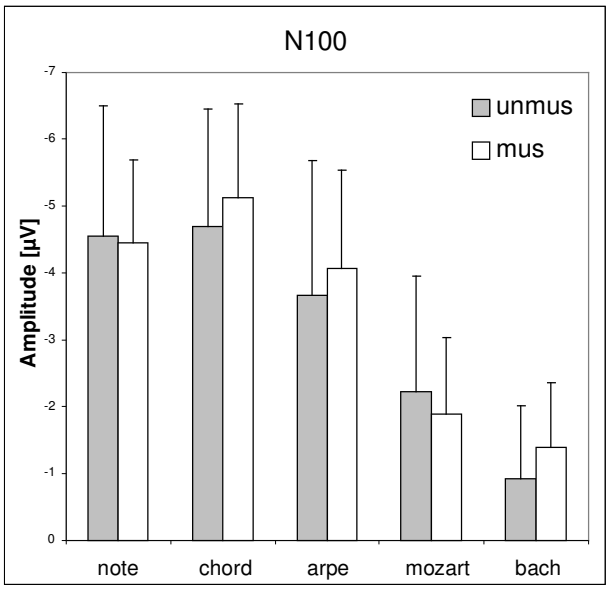


Abb. 6: Häufigkeitsverteilung der musikalischen (H/ breite, farblose Balken) und der unmusikalischen (L/ schmale, gelbe Balken) B-Gruppen (jeweils 10 Probanden) bezüglich Potenzialgröße von N100 (N100/1 bei den Paradigmen Mozart und Bach), MMN und P300 über alle Bedingungen. Zur Definition der auf der Abszisse aufgetragenen Amplitudenklasse vgl. Tab.2.

3.3.3 Mittelwerte der evozierten Potenziale - Spielt die Musikalität eine Rolle?

Im Folgenden werden die Mittelwerte der Amplituden von N100, MMN und P300 zwischen den beiden Probanden-Gruppen verglichen (Abbildung 7).


MMN
unmus
mus
Amplitude [µV]
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
note
chord
arpe
mozart
bach


N100
unmus
mus
Amplitude [µV]
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
note
chord
arpe
mozart
bach

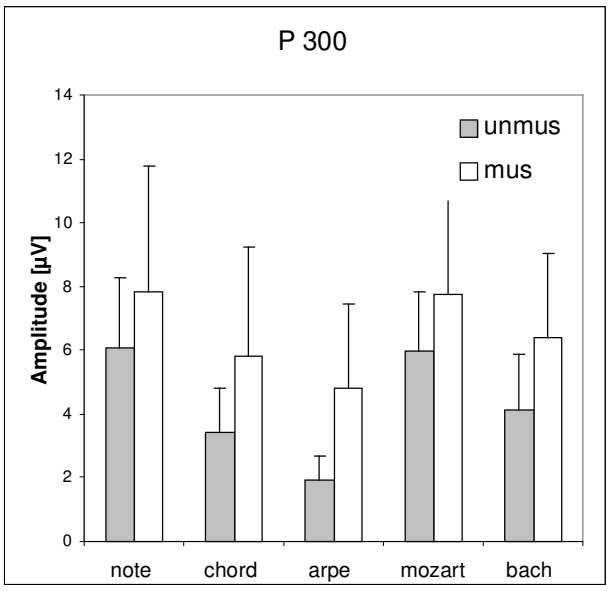

P 300
unmus
mus
Amplitude [µV]
14
12
10
8
6
4
2
0
note
chord
arpe
mozart
bach

Abb. 7: Mittelwerte der Amplituden der evozierten Potenziale im Vergleich zwischen den beiden B-Gruppen musikalisch (leere Flächen) und unmusikalisch (graue Flächen).
Die N100 bei den Bedingungen Mozart und Bach entspricht jeweils der N100/1.

Diese Mittelwerte setzen sich aus Einzelmessungen zusammen, die interaktiv auf dem Bildschirm ermittelt wurden. Dazu wurden die gemittelten Zeitverläufe jeder einzelnen Versuchsperson bei jedem Paradigma, jeder Versuchsbedingung und jeder Sitzung (1 und 2) an den Gipfelpunkten der Potenziale mit Cursoren unter visueller Kontrolle vermessen. Berücksichtigt wurden jeweils 2 Elektroden, und zwar für die N100 die Elektroden C3 und C4, für die MMN F3 und F4 und für die P300 P3 und P4. Bei der Auswertung der Versuche ergab sich gelegentlich die Schwierigkeit, dass aus technischen Gründen in einer oder mehreren Versuchsbedingung(en) an einer bestimmten Elektrode oder in einer Sitzung (1 oder 2) keine artefaktfreie Messung möglich war. So konnte z.B. bei den Versuchspersonen 15 und 20 das Potenzial N100 an der Elektrode C3 nicht gemessen werden, so dass der Datensatz unvollständig war. Aus diesen Gründen fehlten von den 400 (= 20 Versuchspersonen * 5 Bedingungen * 2 Sitzungen * 2 Elektroden) möglichen Einträgen in der P300-Tabelle 27, bei MMN 26 und bei N100 23, im Schnitt also ca. 6%.

Will man der Frage nachgehen, ob Musikalität einen Einfluss hat, ist es nicht korrekt, einfach über alle vorhandenen Messungen zu mitteln und die fehlenden Messungen zu ignorieren, da dann Versuchspersonen mit fehlenden Messungen ein geringeres Gewicht erhielten als Versuchspersonen mit vollständigen Daten. Die Varianzanalyse mit Messwiederholungen („repeated measurements“) schließt unvollständige Datensätze daher von der Analyse aus. Davon wären in der „musikalischen“ Gruppe 3 von 10 und in der „unmusikalischen“ Gruppe sogar 7 von 10 Versuchspersonen betroffen, so dass die Varianzanalyse mit einem derart kleinen Stichprobenumfang keinen Sinn machen würde.

Wir haben uns daher entschlossen, auf eine Analyse des Einflusses der Sitzung (Vormittag-Nachmittag) und der Lateralität über der Hemisphäre (rechts-links) zu verzichten und stattdessen die in diesen Parametern enthaltene Information zu einer Vervollständigung der Tabelle zu benutzen. Das Verfahren wird am besten durch ein fiktives Beispiel erläutert: Die N100 über 19 Versuchspersonen mit vollständigen Daten habe bei C3 einen Mittelwert von 3 μV und bei C4 von 4 μV. Die 20. Versuchsperson habe an der Elektrode C3 7 μV, während der Wert für C4 fehlt. Aus den 19 vorhandenen Wertepaaren geht hervor, dass C4 im Mittel 4/3 der Amplitude von C3 annimmt. Daher wird der fehlende Wert (Versuchsperson 20, Elektrode C4) mit 4/3 * 7 μV = 9,3 μV abgeschätzt. Entsprechend wird mit den fehlenden Werten für Sitzung 1 oder 2 verfahren.

Mit den so ergänzten Werten (siehe Anhang ab S. 162) wurden die Potenzialamplituden P300, MMN und N100 einer 2-fach Varianzanalyse für wiederholte Messungen („repeated measurements“) mit den Effekten *Musikalität* (MusKat, *zwischen* den Gruppen) und *Versuchsbedingung* (Bed *innerhalb* der Gruppen) unterworfen. Dabei wurden als Potenzialamplitude die Mittelwerte aus der jeweils rechten und linken Elektrode und aus der Vor- und Nachmittagssitzung eingesetzt. Die Ergebnisse der Analyse zeigt Tabelle 3.

Tab. 3: Ergebnisse der Varianzanalyse

Comp	Effect	df Effect	MS Effect	df Error	MS Error	F	p-level
P300-1&2	MusKat	1*	124,6692*	18*	18,56310*	6,71597*	0,018425*
	Bed	4*	46,9056*	72*	1,91076*	24,54820*	0,000000*
	MusKat * Bed	4	11,064	72	191,076	0,57906	0,678741
MMN-1&2	MusKat	1	1,984,634	18	5,920,889	3,351,919	0,083733
	Bed	4*	3,36168*	72*	0,716646*	4,690846*	0,002021*
	MusKat * Bed	4	,46479	72	0,716646	0,648568	0,629717
N100-1&2	MusKat	1	,73494	18	7,852,818	0,0936	0,763172
	Bed	4*	52,47254*	72*	0,496657*	105,6514*	0,000000*
	MusKat * Bed	4	,68590	72	0,496657	13,810	0,249074
P300-1	MusKat	1*	143,1091*	18*	24,48597*	5,84453*	0,026456*
	Bed	4*	65,5439*	72*	2,98963*	21,92376*	0,000000*
	MusKat * Bed	4	17,497	72	298,963	0,58524	0,674329
MMN-1	MusKat	1*	33,98536*	18*	5,899681*	5,760541*	0,027421*
	Bed	4	315,035	72	1,342,727	2,346,231	0,062562
	MusKat * Bed	4	0,90590	72	1,342,727	0,674673	0,611706

Legende: * : signifikant auf dem 5% Niveau
1&2: Beide Sitzungen zusammengefasst
1: Nur Vormittagssitzung
Bed: Bedingung/Paradigma
MusKat: Musikalität

Wie anhand der Mittelwerte in Abbildung 7 schon abzusehen war, hatte die *Musikalität* einen signifikanten Einfluss auf die Amplitude der P300 ($p = 0,018$), der in der ersten Sitzung nicht ganz so deutlich ist ($p = 0,026$). Beim paarweisen posthoc Vergleich zwischen der musikalischen und unmusikalischen Gruppe in den einzelnen Bedingungen fand sich nur für die P300 der Bedingung „Arpeggio“ ein signifikanter Unterschied ($p<0,012$, nach Bonferroni-Korrektur für den 5-fachen Vergleich). Auf die N100 ($p = 0,76$) und die MMN ($p = 0,084$) gab es keinen signifikanten Einfluss der Musikalität, wobei die Irrtumswahrscheinlichkeit für die MMN jedoch nahe an die Signifikanzschranke ($p = 0,05$) herankam. Betrachtet man nur die Vormittagssitzung, bei der die Potenziale üblicherweise deutlicher waren, ergab sich auch für die MMN ein signifikanter Einfluss ($p = 0,027$).
Ebenso war aufgrund von Abb.7 und aufgrund der Inspektion der individuellen Mittelwertkurven ein signifikanter Einfluss des Faktors Bedingung zu erwarten, der sich für alle drei Potenziale als hochsignifikant bestätigte (Tab.3). Dieser Einfluss

war in beiden Probandengruppen sehr ähnlich (Keine signifikante Interaktion Bed * MusKat). In den Abbildungen 8, 9 und 10 wurden die Werte der beiden Gruppen deshalb zusammengefasst und der Größe nach geordnet, so dass die statistisch signifikanten Differenzen zwischen einzelne Bedingungen (posthoc Analyse, Tukeys HSD-Test) einfach markiert werden konnten.

Bei der N100 besteht der auffälligste Unterschied zwischen den einfachen Tönen oder Klängen einerseits (N100 < -3,9 µV) und den beiden Musikbedingungen auf der anderen Seite (N100 > -2,1 µV), obwohl die meisten Unterschiede auch innerhalb dieser Kategorie signifikant sind (Abb.8).

Die MMN weist eine deutlich geringere Variabilität zwischen den Bedingungen auf als die N100 und zeigt keine klare Gliederung in Töne/Klänge einerseits und Musik andererseits; so betrifft einer der insgesamt nur zwei signifikanten Paarunterschiede den Vergleich Mozart versus Bach (Mozart ergab die größte MMN, Bach den zweitkleinsten Wert, vgl. Abb.9).

Ähnliches gilt auch für P300, wo sich ebenfalls keine Gruppierung in Ton/Klang versus Musik anbietet; der größte Paarunterschied betraf hier zwei Bedingungen der Ton/Klang-Gruppe: „Arpeggio“ ergab die kleinsten Amplituden, „Note“ die größten (Abb. 10).

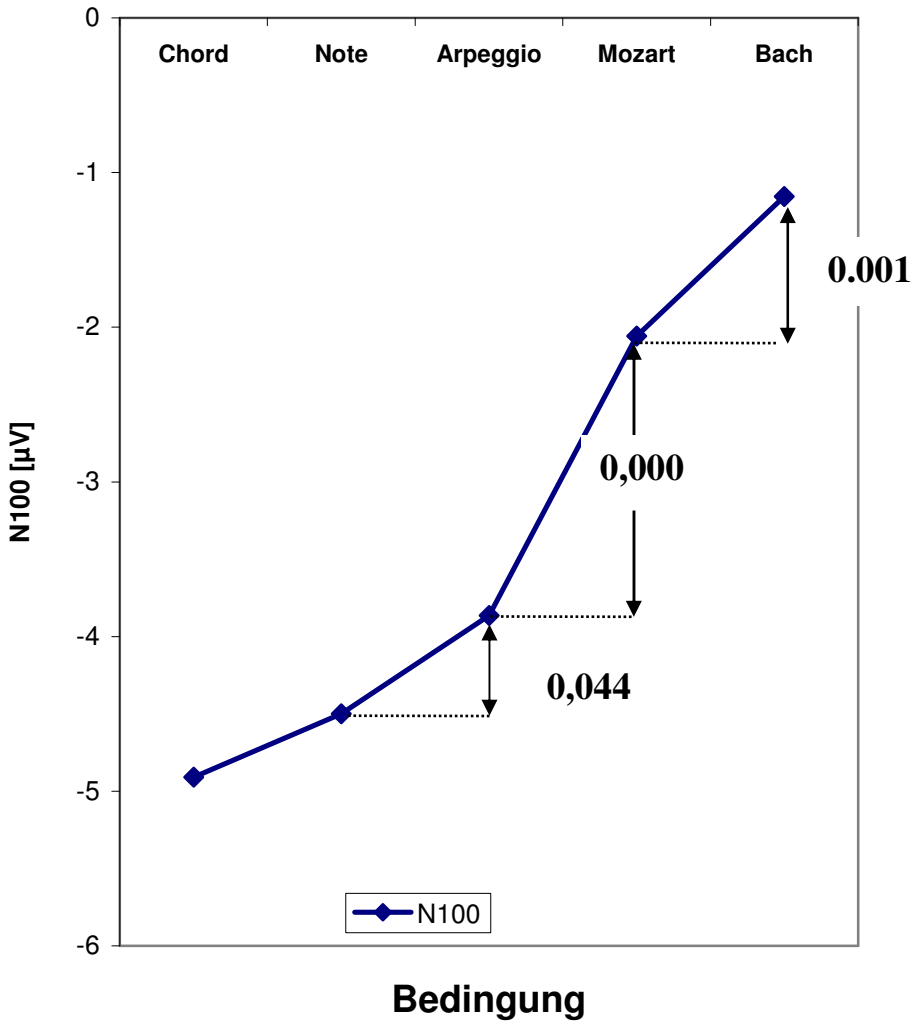


Abb. 8: Abhängigkeit der N100 (STD, N100/1) von der Versuchsbedingung (Mittelwerte über die Elektroden C3 und C4, die Sitzungen 1 und 2 und die Gruppen musikalisch und unmusikalisch; die Bedingungen sind nach der Größe N100 geordnet)

Die jeweils kleinsten, noch signifikanten Paarunterschiede sind durch Pfeile und die Angabe der Irrtumwahrscheinlichkeit gekennzeichnet (Post hoc Analyse, Tukeys HSD-Test)

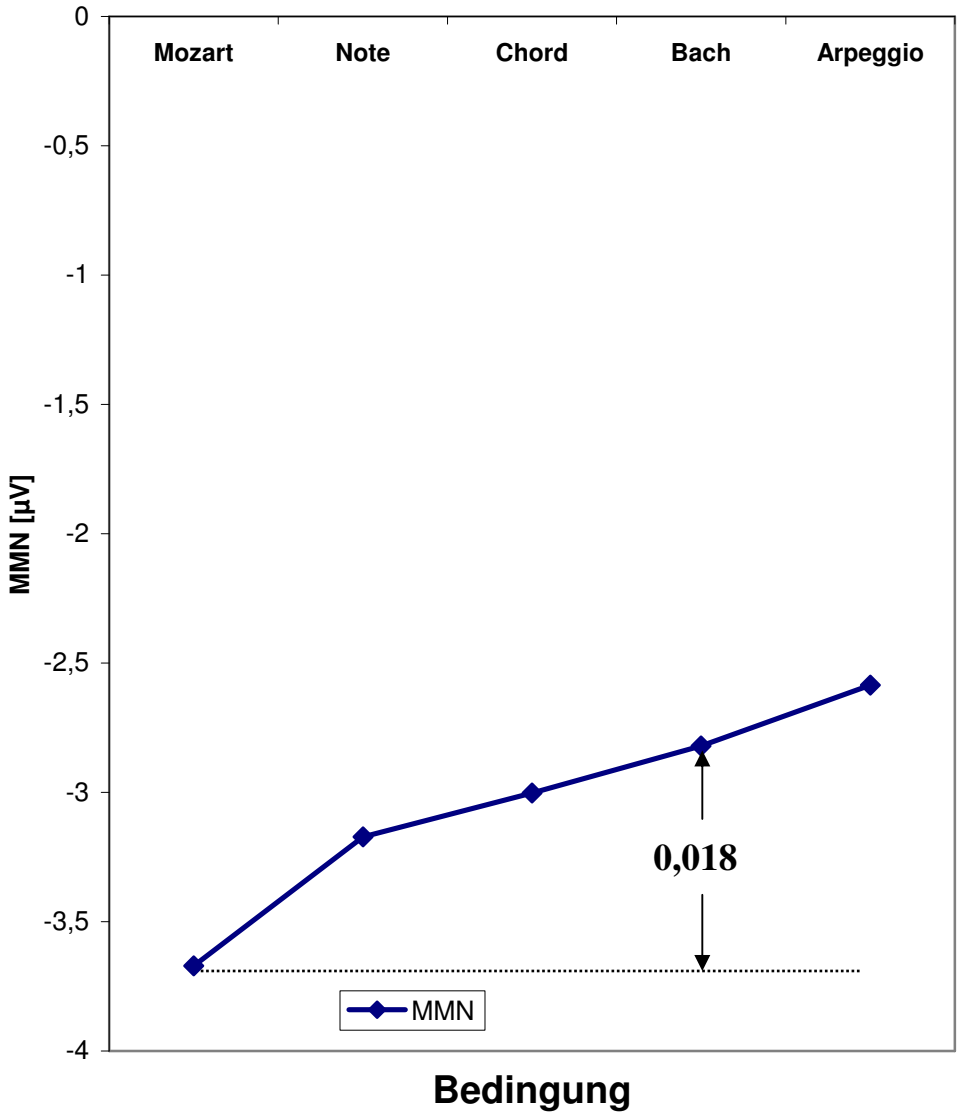


Abb. 9: Abhängigkeit der MMN von der Versuchsbedingung (Mittelwerte über die Elektroden F3 und F4, die Sitzungen 1 und 2 und die Gruppen musikalisch und unmusikalisch; die Bedingungen sind nach der Größe MMN geordnet)

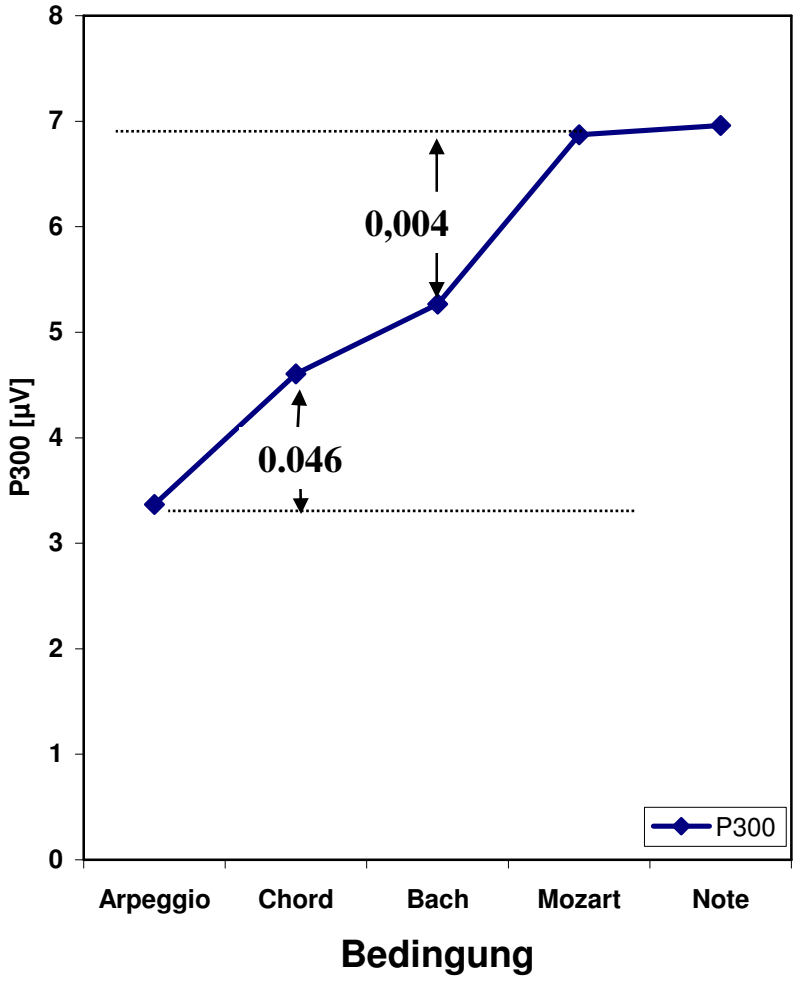


Abb. 10: Abhängigkeit der P300 von der Versuchsbedingung (Mittelwerte über die Elektroden P3 und P4, die Sitzungen 1 und 2 und die Gruppen musikalisch und unmusikalisch; die Bedingungen sind nach der Größe von P300 geordnet)

3.4 Grand Averages

3.4.1 Übersicht

Abb. 7 zeigt, dass die Amplituden der evozierten Potenziale P300 und MMN in der „musikalischen“ B-Gruppe größer waren als in der „unmusikalischen“, während die Musikalität auf die N100 keinen Einfluss zu haben schien. Diese Vermutung wurde

durch die statistische Analyse bestätigt (wenn auch unter dem Vorbehalt, dass die vorgenommene Vervollständigung fehlender Daten keine standardisierte Methode darstellt).

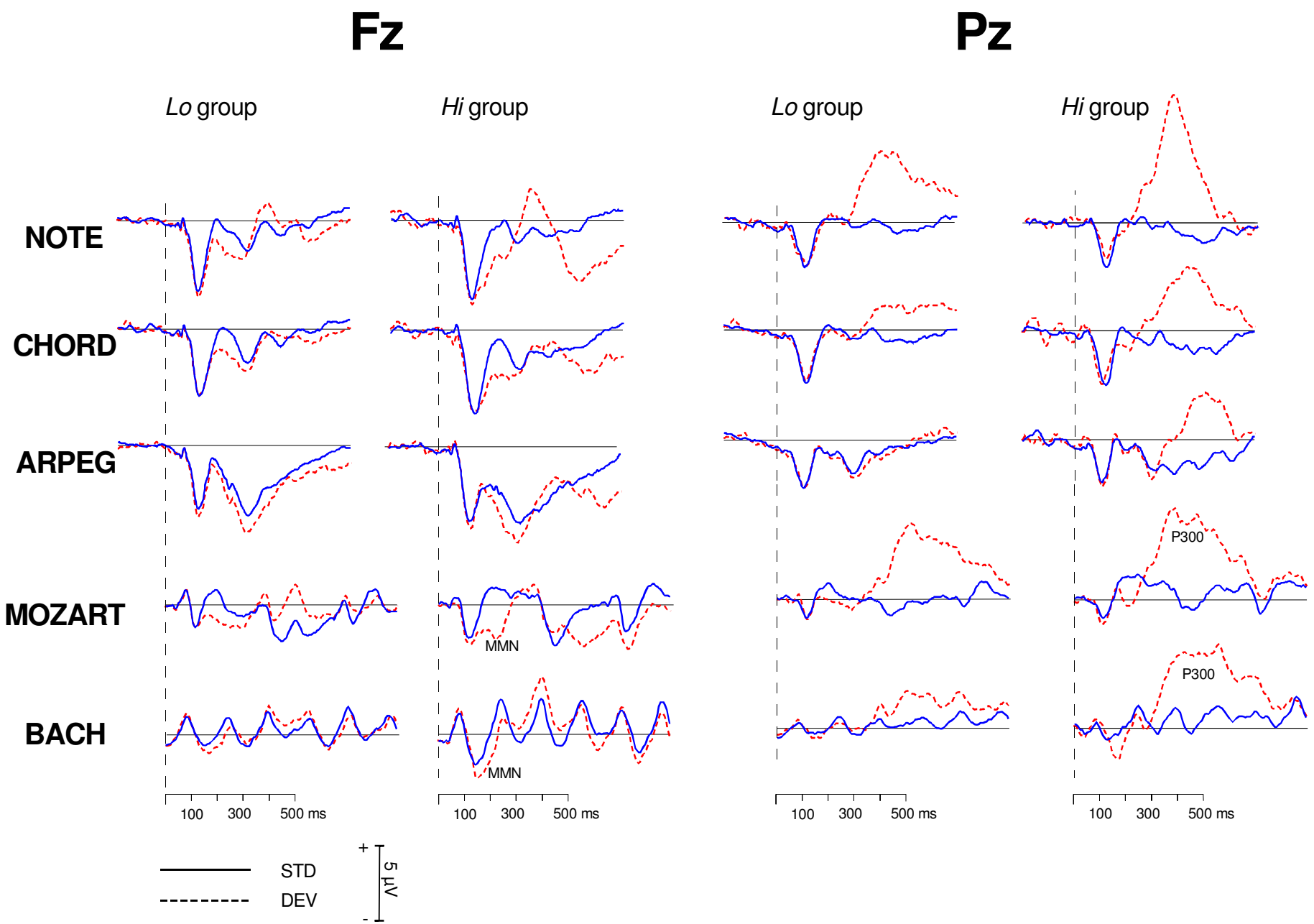
Um die Unterschiede zwischen den beiden Gruppen übersichtlich darzustellen, wurden zusätzlich zu den EEG- und MEG-Kurven der einzelnen Probanden noch die in der Methodik erläuterten Grand Averages angefertigt. Um einen möglichst großen Kontrast zwischen „musikalisch“ und „unmusikalisch“ zu erreichen, wurde das breite musikalische „Mittelfeld“, d.h. diejenigen Versuchspersonen, die im Bentley-Test zwischen 37 und 41 Punkten lagen, im Gegensatz zur statistischen Auswertung nicht in die Auswertung einbezogen. In der Gruppe der musikalischen Probanden wurden die 6 Versuchspersonen mit Testergebnissen über 42 Punkten zusammengefasst. Nur eine Person dieser Gruppe hatte sich nach eigenen Angaben ursprünglich zu den unmusikalischen Probanden gezählt. In der unmusikalischen Gruppe wurden 5 Personen (Bentley-Test <36) zusammengefasst. Dies waren alles Probanden, die sich selbst als unmusikalisch einstuften. Durch diese Einteilung kamen zwei ungefähr gleich große Gruppen (E-Gruppen) zustande.
In der folgenden Beschreibung werden wir uns zunächst auf die EEG-Grand Averages konzentrieren; wie oben schon erwähnt, ist das Grand-Average der MEG-Felder von eingeschränktem Wert, da die Feldaufnehmer bei jedem Probanden eine etwas andere Position hatten.
Was beim Betrachten der Grand Averages (siehe Abb. 11) zunächst auffällt, ist, dass die vorhandenen Potenziale unabhängig von der Musikalität oder dem Paradigma ihre größten Amplituden immer im gleichen Bereich der Kopfoberfläche haben, so dass man auch ohne MEG-Ergebnisse und Berechnung der Dipole auf die ungefähren Entstehungsorte der Potenziale schließen kann. Die N100 hat ihre Amplitudenmaxima in den zentralen und frontalen Elektroden CZ, FZ und S1, S2 (zur Position von S1 und S2 vgl. Methodik). Die MMN ist in den frontalen Elektroden F3, F4, FZ sowie in S1 und S2 am besten zu erkennen. Die P300 schließlich erreicht die größten Amplituden in den parietalen Elektroden P3, P4 und PZ. Auffällig ist außerdem die Symmetrie der Hemisphären. Die Potenziale der rechten und linken Kopfhälfte sind sich in Größe und Form sehr ähnlich.

Die Grand Averages der EEG-Kurven (vollständige Darstellung im Anhang ab Seite 141) zeigen deutliche Unterschiede zwischen den zwei Extrem-Gruppen, die weitgehend den Vermutungen entsprechen, die sich aus der Betrachtung der Einzelkurven ergaben.

3.4.2 Einzelbeschreibung der Grand Averages

Wie oben beschrieben, kann man die Potenziale N100 und MMN sehr gut in der Elektrode FZ und die P300 in der Elektrode PZ erkennen. Die Grand Averages dieser Elektroden dürfen als repräsentativ für die betrachteten Potenziale gelten.
Im Folgenden werden die evozierten Potenziale dieser Abbildung vorgestellt und auf Auffälligkeiten und Unterschiede zwischen den beiden Extrem-Gruppen eingegangen.

Abb. 11: Grand Averages (gemittelte Kurven) der evozierten Potenziale der musikalischen (Hi-group) und unmusikalischen (Lo-group) Probanden (E-Gruppen) in den Elektroden FZ und PZ. Die blauen Kurven sind die Antworten auf die STD-Reize, die roten Kurven entsprechen der Hirnaktivität auf die DEV-Reize.


Fz
Pz
Lo group
Hi group
Lo group
Hi group
NOTE
CHORD
ARPEG
MOZART
BACH
MMN
MMN
P300
P300
100
300
500 ms
100
300
500 ms
100
300
500 ms
100
300
500 ms
STD
DEV
+
5 μV
-

Paradigma Note:

Erwartungsgemäß sind die Amplituden und Latenzen der N100 nach dem Standardreiz (STD) und dem devianten Reiz (DEV) fast genau gleich. Latenz, Form und Amplitude der N100 STD sowie der restliche Verlauf der Kurven der Standardreize ist auch zwischen den beiden Gruppen kaum zu unterscheiden. Ein Unterschied zwischen den musikalischen und den unmusikalischen Versuchspersonen wird erst bei Betrachtung der Kurve der abweichenden Reize deutlich. Man erkennt, dass die MMN in der musikalischen Gruppe früher beginnt. In der unmusikalischen Gruppe beginnt die MMN nach ca. 160 ms; zu diesem Zeitpunkt hat die sich die N100 schon zu mehr als zwei Dritteln der Basislinie wieder angenähert. In der musikalischen Gruppe beginnt die MMN schon im Bereich des Amplitudenmaximums der N100 bei ca. 120 ms. Außerdem ist die MMN der musikalischen Versuchspersonen um ca. 50% größer. Eine eindeutige Latenz als Zeitpunkt des Amplitudenmaximums der MMN ist insbesondere in der unmusikalischen Gruppe nicht sicher zu bestimmen, da kein wirklicher Peak abzugrenzen ist, was sich durch die unterschiedlichen Latenzen der einzelnen Versuchspersonen erklären lässt.

Am deutlichsten fällt der Größenunterschied der P300 auf. Die Amplitude der P300 in der musikalischen Gruppe ist mit ungefähr 9 µV um mehr als 50% größer als die der unmusikalischen Gruppe (5 µV). Sie ist spitz zulaufend und eingipflig. Sie beginnt bei ca. 220 ms und endet bei ca. 600 ms, bei einer Latenz von 400 ms. Die P300 der unmusikalischen Gruppe hat anfangs ebenfalls einen steilen Anstieg, ist dann zweigipflig und läuft flach aus. Das Potenzial beginnt später als bei den musikalischen Versuchspersonen, und zwar bei ca. 270 ms. Das Ende der P300 kann in dem verwendeten Zeitfenster von 700 ms nicht bestimmt werden, da die Kurve der abweichenden Reize die STD-Kurve nicht wieder schneidet.

Paradigma Chord:

Die Grand Averages dieser Bedingung sind denen der Bedingung Note recht ähnlich. Allerdings ist die N100 der musikalischen Versuchspersonen größer als die der unmusikalischen Probanden (Der Unterschied scheint aber nicht bedeutsam zu sein; vgl. dazu die Streuung in Abb. 6 und die Ergebnisse der Varianzanalyse in Tab. 3). Die Latenz beträgt bei beiden Gruppen ca. 120 ms. Die

MMN ist insbesondere bei der unmusikalischen Gruppe sehr ähnlich wie in der Bedingung Note. In der musikalischen Gruppe beginnt sie ca. 20 ms später als bei Note. Auch hier ist in beiden Gruppen keine eindeutige Latenz zu bestimmen.

Bezüglich der P300 ist der Unterschied zwischen den beiden Gruppen noch größer als bei Paradigma Note, obwohl die Potenziale insgesamt kleiner sind (unmusikalische Versuchspersonen: 2,5 µV, musikalische Versuchspersonen: 6 µV). Die Latenz der P300 liegt bei den musikalischen Probanden bei 240 ms, die P300 der unmusikalischen Gruppe hat einen flachen Gipfel, so dass die Latenz nicht eindeutig ist. Das Potenzial beginnt bei 150 ms, das Ende liegt wieder nicht im gewählten Zeitraum.

Paradigma Arpeggio:

Die Potenziale beider Gruppen sehen bei Arpeggio deutlich anders aus als in den vorhergehenden Bedingungen. Dies ist nicht unerwartet, da die Reizung aus drei zeitlich folgenden Tönen bestand, von denen der mittlere in Bedingung DEV um einen Tonschritt erhöht war. Die N100 hat zwar eine ähnliche Latenz wie bei Note und Chord, im Unterschied zu diesen Bedingungen wird hier in beiden Gruppen die Basislinie nach der N100 nicht wieder erreicht und zeigt insbesondere in der musikalischen Gruppe eine nachfolgende lang anhaltende Abweichung der Kurve in den negativen Bereich, die bis zum Ende des Zeitfensters anhält. Die MMN beginnt in beiden Gruppen später (nach jeweils ca. 180 ms, bei den musikalischen Versuchspersonen demnach um etwa 60 ms später als in den ersten beiden Bedingungen. Wie erwähnt, erklingt der abweichende (DEV) Ton bei Arpeggio um 80 ms verzögert, so dass die Latenz in gleicher Weise (wenn nicht aufgrund der Kompliziertheit der Bedingung noch etwas mehr) verzögert sein müsste. Die genauen Latenzen lassen sich jedoch in den Grand-Average-Kurven nicht sicher bestimmen. Vor allem bei den unmusikalischen Probanden ist außerdem fraglich, ob man angesichts der lange annähernd parallel verlaufenden STD- und DEV–Kurven mit lediglich etwas deutlicherer Abweichung der DEV-Kurve in den negativen Bereich überhaupt von einer MMN sprechen kann. Zusammenfassend ist der Unterschied zwischen STD und DEV in den frontalen Elektroden, v.a. bei den unmusikalischen Versuchspersonen, nur gering.

Bezüglich der P300 ergab sich im Vergleich der Paradigmen bei Arpeggio der größte Unterschied zwischen den beiden Gruppen. Während die musikalischen Versuchspersonen eine mit 5 µV fast gleich große P300 wie bei Chord haben (Beginn bei ca. 320 ms und Ende bei ca. 680 ms), ist bei den unmusikalischen Probanden überhaupt keine P300 zu erkennen (kein Unterschied zwischen den Kurven der häufigen und der seltenen Reize). Dies passt prinzipiell zu den schlechten Zählergebnissen der unmusikalischen Probanden bei diesem Paradigma. Tatsächlich sollte man noch schlechtere Zählergebnisse bei dieser Gruppe erwarten, da offenbar keine P300 evoziert wurde und wir deshalb annehmen müssen, dass keine systematischen Unterschiede gehört wurden.

Paradigma Mozart:

Beide Gruppen weisen rhythmische Antworten auf die Takte des Musikstückes auf, die der N100 bei Tonreizen entsprechen. Diese Potenziale sind bei den musikalischen Versuchspersonen nur minimal größer als bei den unmusikalischen. Die MMN ist bezüglich der Latenz und auch der Dauer in beiden Gruppen ähnlich. Sie beginnt bei ca. 120 ms und endet bei 320 ms. Die MMN ist allerdings, anders als bei den Tonbedingungen, bei der musikalischen Gruppe deutlich größer (ungefähr doppelt so groß). Es lässt sich hier erstmals (bei den musikalischen Versuchspersonen) auch ein sicherer Peak mit einer Latenz von etwa 210 ms abgrenzen. Auffällig ist auch das weitere räumliche Ausgreifen der MMN nach parietal, das in dem Potenzialverlauf bei PZ deutlich wird.

Bei der P300 ist der Unterschied zwischen den beiden Gruppen überraschenderweise am geringsten. Die Amplitude der P300 misst in der unmusikalischen Gruppe ca. 5 µV, in der musikalischen ca. 6 µV. Die beiden Potenziale sind in der Form ähnlich, jedoch beginnt die P300 bei den musikalischen Probanden früher, nämlich bei etwa 270 ms, bei den unmusikalischen bei ca. 320 ms. Sie endet bei der musikalischen Gruppe bei ungefähr 730 ms, bei den unmusikalischen Probanden ist das Ende auch hier nicht im Zeitfenster, obwohl dies bei den Musikbedingungen 900 ms beträgt.

Paradigma Bach:

Auch hier kann man wie bei Mozart die mit dem Takt synchronisierten Potenziale auf die einzelnen Reize abgrenzen. Im Gegensatz zum Paradigma Mozart sind bei diesem komplexen und schwierigen Musikparadigma die N100-Potenziale der musikalischen Versuchspersonen größer (knapp doppelt so groß) wie die der unmusikalischen Probanden. Es sei hier angemerkt, dass dieser Unterschied nicht mehr deutlich ist, wenn statt der Einteilung in die Extremgruppen die 50% Quantile der Bentley-Verteilung verglichen werden (vgl. Abb. 7). Das heißt, die Probanden der „Mittelgruppe“ verändern die Ergebnisse stark.

Die MMN beginnt bei beiden Gruppen im Bereich des Amplitudenmaximums der ersten N100 und endet bei Beginn der zweiten N100, also bei ungefähr 270 ms. Sie ist in der Fläche nur ungefähr halb so groß wie bei Mozart, entsprechend der subjektiv größeren Schwierigkeit der Versuchspersonen, in diesem Paradigma abweichende Töne zu erkennen; wie bei Mozart ist auch hier die MMN in der musikalischen Gruppe größer als in der unmusikalischen.

Im Gegensatz zu Mozart weist die P300 hier einen deutlichen Unterscheid zwischen den beiden E-Gruppen auf. Bei der musikalischen Gruppe ist sie in diesem Paradigma mit etwas mehr als 5 µV fast so groß wie bei Mozart. Sie beginnt bei ca. 300 ms und endet bei ca. 840 ms. Die P300 der unmusikalischen Gruppe ist dagegen sehr viel flacher und auch deutlich kleiner als bei Mozart; das Amplitudenmaximum beträgt hier nur ca. 2 µV. Das P300 - Potenzial beginnt bei ungefähr 350 ms, ein eindeutiges Ende ist auch hier nicht zu bestimmen.

Zusammenfassung:

Als Zusammenfassung lässt sich festhalten, dass man, wie in der Literatur beschrieben, die N100 und die MMN besonders gut in den frontalen Elektroden, die P300 in den parietalen Elektroden sehen kann.

Die N100 ist in Form und Latenz in beiden E-Gruppen ähnlich, ebenso die Amplitude, soweit es sich um Antworten auf die Tonbedingungen handelt; in der Musikbedingung Bach weisen die Äquivalente der N100 jedoch deutliche Amplitudenunterschiede auf (größer bei den musikalischen Versuchspersonen).

Dies war aufgrund der Amplitudenmittelwerte der B-Gruppen in dieser Ausprägung nicht zu erwarten.

Die MMN ist bei den Paradigmen Note und Chord ähnlich, wenn auch bei den musikalischen Versuchspersonen etwas größer und früher.
Bei Arpeggio ist das Potenzial in beiden E-Gruppen kleiner und bei den unmusikalischen Versuchspersonen nur angedeutet vorhanden. Insgesamt ist bei diesem Paradigma der Unterschied der MMN zwischen den beiden Extremgruppen auffallend gering.
Auch dies spiegelt nicht ganz die aufgrund der statistischen Auswertung der B-Gruppierung erwarteten Ergebnisse wieder. Hier war (vgl. Abb. 7) der Unterschied zwischen den Gruppen bei Chord am größten, bei Arpeggio am zweitgrößten und bei Note am kleinsten.
Auch der visuell sehr deutliche Unterschied bezüglich der MMN der E-Gruppen bei Mozart war in dieser Ausprägung nicht zu erwarten.
Die größten Unterschiede zwischen den beiden E-Gruppen sind bei der P300 zu erkennen. Außer bei Mozart, wo die Differenz der Amplituden nur gering ist, hat die musikalische Gruppe in allen anderen Bedingungen ein deutlich größeres Potenzial. Der Einfluss der Musikalität auf die P300 scheint bei den Bedingungen Arpeggio (keine evozierte P300 bei den unmusikalischen Versuchspersonen!) und Bach am stärksten zu sein, während die falschen Töne des Musikparadigmas Mozart bei beiden E-Gruppen ähnliche P300-Potenziale evozierten.

3.4.3 Kurze Beschreibung der MEG-Grand Averages

Wie schon mehrfach erwähnt, sind die gemittelten MEG-Kurven nur eingeschränkt zu verwenden, weil die Feldaufnehmer in jedem Versuch eine etwas andere Position hatten. Dennoch sind einige grundsätzliche Aussagen möglich, wie der Vergleich der beiden Extrem(E-)gruppen zeigt (vgl. Grand-Average-Kurven im Anhang): Trotz der im einzelnen nicht kontrollierten Lage der Feldaufnehmer zeigen beide Kurvensätze bei Messungen über der rechten Hemisphäre ein negatives Maximum (eintretendes Feld) des magnetischen Äquivalentes der N100 (d.h. N100m) in den Kanälen 5 und 13 (hochparietal) und ein (sehr viel schwächeres) positives Maximum (austretendes Feld) in den Kanälen 23, 24 und 25 (präzentral-temporal). Bei der Messung über der linken Hirnhälfte sieht man eine annähernd spiegelbildliche Situation mit einem breiten und großen Maximum des austretenden Feldes in der Umgebung von Kanal 28 (parietal) und einem

kleineren und enger begrenzten Maximum des eintretenden Feldes in den Kanälen 6 und 14. Diese Feldverteilung ist kompatibel mit der Annahme eines tangentialen Stromdipols auf jeder Seite, der sich in der Gegend des auditorischen Cortex befinden könnte und der je eine negative y- und z-Komponente hat (vgl. Abb. 4), also nach hinten und innen gerichtet ist.

Soweit sich in den MEG-Grand Averages ein klares Äquivalent der MMN (MMF) abgrenzen lässt (beispielsweise in Bedingung Note), weist das Feld eine sehr ähnliche Verteilung wie N100 auf: Über der rechten Hemisphäre Maxima des ein- und austretenden Feldes in den Kanälen 5 und 13 bzw. 23, 24 und 25, sowie über der linken Hemisphäre in der Umgebung von Kanal 28 (austretend) und bei 6 und 14 (eintretend). Diese Ergebnisse sind kompatibel mit der Annahme eines annähernd ähnlich lokalisierten und orientierten Dipols wie für N100m.

Dagegen stellt sich die Verteilung des der P300 entsprechenden Feldes trotz einer im Detail häufig schwierigen oder unmöglichen Zuordnung völlig anders dar: P300 weist keine Phasenumkehr zwischen prä- und postzentral gelegenen Kanälen auf; das Feld ist auf der rechten Hemisphäre sowohl im präzentralen wie auch parietalen Bereich negativ (eintretend) und umgekehrt über der linken Hemisphäre weitgehend positiv (austretend); die maximalen Feldstärken finden sich eher in mittelliniennahen Kanälen als in temporal gelegenen. Dies deutet auf medial gelegen Quellen mit sagittal nach hinten gerichteten Komponenten hin. Die im Vergleich zur magnetisch greifbaren P300m sehr großen Amplituden des elektrischen Potenzials P300 lassen vermuten, dass zur P300 außerdem eine senkrecht zur Cortexoberfläche gerichtete Komponente beiträgt, die im MEG „stumm“ bleibt (nur tangentiale Dipole erzeugen ein extrakranial messbares Feld).

4 Diskussion

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, wie das menschliche Gehirn die zeitliche Folge von Tönen beim Hören von Musik verarbeitet. Insbesondere hat uns interessiert, ob sich die Wahrnehmung von „falschen“ Tönen durch Messung von Gehirnaktivtät objektivieren lässt und ob Musikalität bei der Ausprägung der Hirnreaktionen eine Rolle spielt. Es liegt auf der Hand, dass diese Zielsetzung über die reine Ableitung sensorisch evozierter Hirnaktivität hinausgeht, da man annehmen muss, dass beim Hören von Musik nicht nur passive (perzeptorische), sondern auch aktive Vorgänge beteiligt sind und somit nicht nur exogene sondern auch endogene Potenziale zu betrachten sind.
Schon Riemann (1916) stellte in seiner „Lehre von den Tonvorstellungen“ fest: „Das Musikhören ist nicht nur ein passives Erleiden von Schallwirkungen im Hörorgan, sondern vielmehr eine hochgradig entwickelte Betätigung von logischen Funktionen des menschlichen Geistes“.
Nach Petsche (1985) setzt sich der musikalische Wahrnehmungsprozess aus verschiedenen Komponenten zusammen:

1. Die Leitung der akustischen Sinneseindrücke in Form von Impulsen vom Cortischen Organ des Innenohrs bis zur Hirnrinde und deren Verarbeitung in den verschiedenen Schaltstationen.
2. Der Vergleich dieser in Form von Impulsmustern an die Hörrinde gelangenden elektrischen Klangäquivalente mit bereits gespeicherten musikalischen Gedächtnisinhalten.
3. Die Umformung dieser Populationen von Signalen zum eigentlichen Musikerleben durch Auseinandersetzung mit der Persönlichkeit.

Wie musikalische Information im akustischen Cortex repräsentiert wird, ist noch nicht vollständig geklärt. Es ist bekannt, dass tonotope „Karten“ im primären akustischen Cortex existieren, wo verschiedene Tonhöhen methodisch in unterschiedlichen corticalen Bereichen repräsentiert werden (z.B. Pantev et al. 1995). Jedoch beruht die Information einer Melodie nicht in erster Linie auf absoluten Frequenzen und Tonhöhen, sondern vielmehr auf Verhältnissen der Töne zueinander – eine Melodie behält ihre Identität, gleich ob sie hoch oder tief

gespielt wird, solange die relativen Tonunterschiede beibehalten werden. Trainor et al. (2002) zeigten bei unmusikalischen Probanden, dass der akustische Cortex nicht nur exakte physikalische Eigenschaften von Tönen wie Tonhöhe, Dauer, Lautstärke usw. tonotop repräsentiert, sondern dass auch corticale „Schaltkreise“ existieren müssen, die Tonunterschiede/Intervalle zwischen Tönen ohne genaue Information der exakten Tonhöhe verschlüsseln. Die exakte Unterscheidungsfähigkeit von Intervallen wird nach Pantel et al. (1998) durch musikalisches Training beeinflusst.

Gegenstand der vorliegenden Studie war die Untersuchung von akustisch evozierten Potenzialen auf komplexe Reize (Töne, Klänge, Melodien), in die Abweichungen eingestreut waren.

Das experimentelle Vorgehen beruht auf dem sog. odd ball Paradigma. Im „klassischen“ odd ball Paradigma werden gelegentliche „Abweichungen“ in eine Folge regelmäßiger Ereignisse eingestreut. Im Fall akustischer Untersuchungen z.B. Abweichungen von der Tonhöhe. Durch diese Abweichungen werden typischerweise charakteristische Potenziale, die MMN und die P300 hervorgerufen. In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, ob solche Potenziale auch ausgelöst werden, wenn es sich bei den Abweichungen nicht um physikalisch definierbare Änderungen handelt, sondern um Abweichungen von abstrakten Regeln der Harmonielehre, indem beispielsweise „Fehler“ in eine fortlaufende Melodie eingestreut werden.

Wie gezeigt konnten tatsächlich auch in diesen Bedingungen MMN und P300 nachgewiesen werden, die denen durch einfache physikalisch definierbare Abweichungen sehr ähnlich waren.

4.1 Anmerkungen zur Methodik

Bezüglich unseres Versuchsaufbaus ist anzumerken, dass sich die akustische Reizvorrichtung außerhalb der Kabine befand und es eine gewisse Zeit dauerte, bis der Schall die Ohren der Versuchspersonen erreichte. Deshalb hatten wir in unserem Experiment etwas längere Latenzen als in der Literatur beschrieben.

Diese methodisch bedingte Verlängerung der Latenzen beträgt 10 ms und ist daher unkritisch.

Ein ernsteres Problem ergab sich bei der Aufzeichnung des MEG, da es nicht möglich war, von beiden Hirnhälften gleichzeitig abzuleiten, und daher in zwei aufeinander folgenden Sitzungen zunächst von der rechten und dann der linken Hemisphäre abgeleitet wurde. Dabei können Effekte wie Lernen, Gewöhnung und Ermüdung eine Rolle gespielt haben. Die Ableitung des EEG (jeweils über beiden Hemisphären) sowie die Zählergebnisse lieferten dazu Hinweise. Das größere Problem der MEG-Aufzeichnungen bestand allerdings darin, dass es nicht möglich war, die magnetischen Aufnehmer in eine genau reproduzierbare Position bezüglich der Hirnregion zu stellen.
Aus diesem Grund hatten die Grand Averages nur eine eingeschränkte Aussagekraft.
Zwar konnte a posteriori für jeden Einzelversuch die Lage der Sensoren rekonstruiert werden. Ihre Variation von Versuch zu Versuch erlaubte es jedoch nicht, Grand Averages für genau definierte Hirnareale zu berechnen. Dennoch führten die MEG-Messungen zu einer qualitativen Orientierung bezüglich der Lokalisation der Strukturen, die für die hier gemessenen elektrophysiologischen Potenziale verantwortlich sind.

Bezüglich der Zählergebnisse (als zuverlässigem Parameter) ist kritisch anzumerken, dass bei den Tonbedingungen immer das Ergebnis 100 richtig war. Einige Versuchspersonen könnten dieses Ergebnis (zumindest in der zweiten Sitzung geschätzt haben). Außerdem konnten sich „eingebildete“ (falsch positive) und fehlende Wahrnehmungen von Abweichungen kompensieren und so das Zählergebnis verfälschen.

Diese methodischen Einschränkungen ändern jedoch nichts am wesentlichen Ergebnis unserer Studie, nämlich am Nachweis, dass die Größe der P300 von der Musikalität abhängt (vgl. hierzu Ergebnisse von Besson und Macar 1986 und 1987) und dass die MMN deutlich von ihr beeinflusst wird. Darüber hinaus zeigten wir erstmals, dass auch durch abweichende Töne in kontinuierlich gespielten Melodien Gehirnaktivität im Latenzbereich der MMN evoziert wird und auch dieses Potenzial (zumindest in der Vormittagssitzung) mit der Musikalität korreliert.

4.2 Bedeutung der N100

Die N100 ist ein negatives akustisch evoziertes Potenzial kortikaler Herkunft, mit einer typischen Latenz von 100 ms, gewöhnlich von einer positiven Welle bei etwa 175 ms (P2) gefolgt. Erwartungsgemäß fanden wir dieses Potenzial oder ein rhythmisches Äquivalent (in den Musikbedingungen) mit Ausnahme einiger weniger Einzelfälle in allen Bedingungen und bei allen Probanden. „Erwartungsgemäß“ deshalb, weil die Literatur (z.B. Näätänen und Picton 1987, Hyde 1997) zeigt, dass die N100 durch jede Änderung in der wahrgenommenen akustischen Umwelt hervorgerufen wird, sofern diese Änderung ausreichend plötzlich ist. Sie kann durch nahezu jeden akustischen Reiz bzw. Änderungen akustischer Reize (z.B. auch Ende eines ausreichend langen Tones), aber auch andere (z.B. visuelle) Reiz evoziert werden. Die Amplitude, Latenz und Form kann beträchtlich zwischen, aber auch innerhalb eines Probanden variieren.

Die Amplitude der N100 wird bei zunehmender Lautstärke eines Reizes gewöhnlich größer, hat jedoch die Tendenz bei sehr großen Lautstärken gleich zu bleiben (Sättigung) oder sogar kleiner zu werden.

Des Weiteren ist die Amplitude der N100 vom Reizintervall (ISI) abhängig. Picton et al. (1987) schlugen vor, dass die Refraktärzeit ein Charakteristikum des Kurzzeitgedächtnisses ist, wann immer es von einem sensorischen Ereignis aktiviert wird. Als Beweis zeigten sie, dass die Amplitude der N100 klein ist, wenn das ISI klein ist. Wenn sich aber die Reize ausreichen unterscheiden (in der Tonhöhe), ist die Amplitude der N100 so groß, als wenn das ISI doppelt so lang wäre. Die Amplitude der N100 wird nach einer Reihe von Reizen merklich kleiner und zwar am schnellsten während der ersten 5 Reize. Dies führt zur Annahme eines aktiven Gewöhnungsprozesses, möglicherweise abhängig von der Vorhersagbarkeit eines Reizes (Wastell 1980). Eine andere Möglichkeit ist eine gewisse Ermüdung des Generators während einer längeren Reizdauer, die eine große Variabilität zwischen den Versuchspersonen aufweist (Ritter et al. 1968).

Die N100-Amplitude scheint nicht mit einem qualitativen Aspekt der Wahrnehmung zu korrelieren.

Entscheidend ist, dass die N100 im Gegensatz zur klar endogenen P300 in einer „Grauzone“ liegt; sie besitzt sowohl endogene wie auch exogene Eigenschaften. Nach Hyde (1997) repräsentiert sie eine initiale, überwiegend exogene Stufe der

Aufdeckung in einer komplexen Verarbeitungssequenz, die Aufdeckung, Aufmerksamkeit, Gedächtnis, Klassifizierung und Bewertung der Bedeutung eines Reizes beinhaltet. Sie kann die Interpretation späterer akustisch evozierter Potenziale, wie der MMN und P300 erleichtern.

Der Einfluss gerichteter Aufmerksamkeit auf die akustische N100 wurde seit dem Originalartikel von Hillyard et al. (1973) kontinuierlich diskutiert. Hillyard interpretierte die Änderungen der N100 (größere Amplitude) zunächst als tatsächlichen N1-Effekt, mit einem intensivierten Generatorprozess, während Näätänen (1990) vorschlug, dass dieser Effekt durch eine Überlagerung einer endogenen Komponente (processing negativity) verursacht wird, die durch einen anderen Mechanismus als die eigentliche N100 erzeugt wird. Die processing negativity (PN) beginnt etwa 150 ms nach Reizbeginn, während der Rückbildung der N100 und kann bis zu 500 ms andauern. Sie wird als eigenständige ERP-Komponente betrachtet, welche die N100 zeitweise überlagert und eine scheinbare Änderung ihrer Amplitude verursacht.

Näätänen und Picton (1987) schlugen vor, dass die N100 Prozesse des Kurzzeitgedächtnisses reflektiert. Die N100 wird von mehreren Komponenten überlagert, die in verschiedenen Bereichen des Gehirns ihren Ursprung haben und möglicherweise in ihrer Wichtigkeit differieren. Jedoch zeigt auch die N100 selbst einen Einfluss der gerichteten Aufmerksamkeit; so kann sie nach Kaufman et al. (1991) um den Faktor zwei größer sein, wenn ein Proband seine Aufmerksamkeit auf den Reiz richtet.

Auch Näätänen (1990) vertritt die Meinung, dass es gerechtfertigt erscheint, dass die PN zwar der dominierende ERP-Effekt bei gerichteter Aufmerksamkeit ist, die Möglichkeit einer Modulation einer exogenen N100-Komponente unter bestimmten Umständen jedoch nicht auszuschließen ist. Nach Näätänen und Picton (1987) reflektiert die N100 nicht einen einzelnen zugrunde liegenden cerebralen Prozess, sondern setzt sich aus mehreren Komponenten (mindestens 6) zusammen, die unterschiedliche zerebrale Lokalisationen haben und unterschiedliche psychophysiologische Funktionen widerspiegeln. Es sind dies:

(1) Eine frontozentrale Negativität, die von beidseitigen, vertikal gerichteten Dipolen im akustischen Cortex, im superioren Bereich des Temporallappens erzeugt wird.

(2) Der T-Komplex, mit einer positiven Welle bei 90 – 100 ms und einer negativen Welle bei 140 – 150 ms, wahrscheinlich im akustischen Assoziationscortex generiert.
(3) Eine unspezifische Komponente, maximal am Vertex, mit einer Latenz von 100 ms, unbekannter Herkunft.
Diese drei Komponenten, die als „wahre“ N100-Komponenten betrachtet werden können, werden durch die physikalischen und zeitlichen Aspekte des Reizes und den Zustand der jeweiligen Person beeinflusst.
(4-6) Die anderen drei (die unten näher erläuterte MMN sowie eine temporale und eine frontale Komponente der processing negativity) werden nicht notwendigerweise durch einen Reiz hervorgerufen, sie hängen von den Bedingungen ab, unter denen ein Stimulus erscheint. Sie dauern oft länger an als die eigentliche N100, die sie überlagern.

Diese Komponenten, insbesondere die supratemporalen (1) und die unspezifischen (2), haben sehr unterschiedliche Beziehungen zum ISI. Die Erholungszeit der unspezifischen Komponenten ist lang (etwa 1 - 2 min), während sich die supratemporale Komponente nach etwa 10 s vollständig erholt hat (MEG-Messungen von Hari et al. 1987).
Dies führt dazu, dass der erste akustische Reiz nach einer längeren Pause eine sehr große N100 hervorruft, die aus großen nichtspezifischen und supratemporalen Komponenten besteht, während die folgenden Reize eine kleinere N100 evozieren, die hauptsächlich aus supratemporalen Komponenten zusammengesetzt ist.
Die Funktion des supratemporalen Generators scheint zu sein, zu informieren, dass ein Reiz aufgetaucht ist, ohne die Merkmale des Stimulus weiter zu bestimmen. Er könnte als eine Art innerer Aufmerksamkeitstrigger dienen, der die bewusste Wahrnehmung eines akustischen Reizes möglich macht oder erleichtert.

Bezüglich unseres Experimentes bleibt festzuhalten, dass die Musikalität auf die Amplitude oder Latenz der N100 als überwiegend exogenes Potenzial erwartungsgemäß in den meisten Fällen keinen Einfluss hatte.
Die kleineren Amplituden in den komplexen Bedingungen Mozart und Bach sind überwiegend technisch bedingt, wobei bei Bach auch die kurzen ISI eine Rolle

spielen könnten. Die von Näätänen (1990) erwähnte Möglichkeit einer Modulation der exogenen Antwort oder die (in den Worten von Hyde, 1997) Zugehörigkeit der N1 zu einer „Grauzone“ zwischen exogenen und endogenen Faktoren kam in unserem Experiment möglicherweise in der Bedingung Bach zum Tragen, wo sich zumindest zwischen den beiden E-Gruppen ein deutlicher Unterschied findet.

4.3 Rolle der Aufmerksamkeit bei der Entstehung der MMN

Im Folgenden wollen wir zunächst diskutieren, ob die von uns als MMN angesprochene Hirnaktivität tatsächlich als mismatch negativity bezeichnet werden darf, oder ob sich dahinter etwas anderes verbirgt, und welche Bedeutung diese Aktivität für die Verarbeitung von Tönen haben könnte.
Ein methodischer Unterschied unseres Experiments zu den meisten Studien, in denen die MMN untersucht wurde ist, dass die Versuchspersonen aufgefordert wurden, ihre Aufmerksamkeit auf den akustischen Reiz zu richten und die abweichenden Töne zu zählen, anstatt die Aufmerksamkeit auf einen anderen Sinneskanal zu richten und die eigentlichen Stimuli zu ignorieren (z.B. bei Paavilainen et al. 1993, Tiitinen et al. 1993 u.v.a.).
Unser Protokoll wurde aus den drei folgenden Gründen gewählt:
1. Aufgrund unserer Eindrücke und Beobachtungen während des Pilotexperiments sind wir der Meinung, dass musikalische Reize, wie sie in unserer Studie den Versuchspersonen dargeboten wurden, nicht dafür geeignet sind, ignoriert zu werden, da die fehlerhafte Melodie zumindest die Aufmerksamkeit musikalischer Probanden automatisch auf sich lenken würde. Deshalb haben wir ein Versuchsprotokoll gewählt, das die ungeteilte Aufmerksamkeit des Probanden auf den Sinneskanal richtet, der die „falschen“ Stimuli enthält, statt eine Situation unkontrollierter oder unklarer Zuwendung der Aufmerksamkeit zu akzeptieren.
Obwohl der hauptsächliche Grund des Zählens war, eine klar definieret Aufmerksamkeitszuwendung zu gewährleisten, wurde es dadurch zusätzlich ermöglicht, eine Rückmeldung der Probanden nach jedem Teilabschnitt des Versuchs zu erhalten. Dadurch konnte die Schwierigkeit der einzelnen Bedingungen beurteilt und die Leistung beider Gruppen verglichen werden.
Darüber hinaus evoziert die bewußte Wahrnehmung der abweichenden Reize zusätzlich zu der MMN noch typische P300-Wellen, die es erlauben, Einblick in die

späteren Stadien der Informationsverarbeitung und deren Abhängigkeit von der Musikalität und der unterschiedlichen Reize zu gewinnen.

Es besteht in der Literatur eine allgemeine Übereinstimmung darin, dass Aufmerksamkeit nicht unbedingt notwendig ist, um die MMN hervorzurufen („MMN ist eine ERP-Komponente, die durch jeden erkennbaren Unterschied in einer Folge von Reizen evoziert wird, auch in Abwesenheit der Aufmerksamkeit", Kropotov et al. 1995), aber das entsprechende Material, das die Rolle der Aufmerksamkeit in der Entstehung der MMN behandelt, ist in der Literatur eher spärlich. Näätänen et al. (1993) fanden, dass die MMN, die bei streng fokussierter Aufmerksamkeit auf Frequenzunterschiede hervorgerufen wird, eine ähnlich große Amplitude hat wie die MMN, bei der die Reize ignoriert wurden. Auch Alho et al. zeigten 1994, dass die Amplitude der MMN nicht durch die gerichtete Aufmerksamkeit beeinflußt wird, was die Vorstellung unterstützt, dass die MMN von einem automatischen cerebralen Unterscheidungsprozess erzeugt wird.

Andere Studien gehen dagegen davon aus, dass die Aufmerksamkeit die Größe der MMN verändert; z.B. wurde bei Woldorff et al. (1991) eine Abschwächung der Amplitude der MMN in Zusammenhang mit einer strengen Fokussierung auf einen anderen Reiz gefunden. Salo et al. zeigten 1995, dass die Amplitude der MMN durch kontralaterale Maskierung („weißes Rauschen") beträchtlich abgeschwächt wird, während die Latenz unverändert bleibt.

Auf der anderen Seite kann argumentiert werden, dass die MMN als Antwort auf abweichende Töne sowohl in musikalischen wie auch in Tonbedingungen durch die sogenannte „processing negativity (Nd)", die von der gerichteten Aufmerksamkeit abhängig ist, überlagert (kontaminiert) werden könnte (Hillyard und Kutas 1983). Die Nd ergibt sich aus der Differenz von Antworten auf beachtete und unbeachtete Reize. Anders ausgedrückt repräsentiert die Nd die zusätzlich Hirnaktivität, wenn Reize beachtet werden. Sie entspricht dem oben erwähnten, von Näätänen als PN bezeichneten Potenzial. Wir hatten nicht die Absicht und unser Versuchsprotokoll gestattete es auch nicht im Nachhinein, die Nd zu identifizieren. Jedoch kann Nd als ein Potenzial das die vor Standard- und Deviant-Reizen gleichermaßen bestehende gerichtete Aufmerksamkeit widerspiegelt, nicht die MMN beeinflussen - zumindest nicht, solange man eine additive Überlagerung zugrunde legt: Bei additiver Überlagerung hätten wir im Regelfall N1+Nd und in Fällen von Abweichungen N1+Nd+MMN, so dass wir als

Differenz nur die MMN erhalten. Lediglich bei Annahme einer multiplikativen Überlagerung würde sich ein Einfluss von Nd bemerkbar machen: Regelfall: N1+Nd; Abweichung: N1+Nd+MMN+m*Nd*MMN; Differenz: MMN+m*Nd*MMN. (m = Faktor, der das Ausmaß der multiplikativen Überlagerung beschreibt). Im übertragenen Sinne gibt es möglicherweise tatsächlich eine solche multiplikative Komponente in Form einer N2b. So beschreiben Pekkonen et al. (1996), dass bei aufmerksam beachteten Tönen die abweichenden Reize zusätzlich eine N2b-Komponente hervorrufen, die die MMN partiell überlappt und die bei unbeachteten Tönen nicht auftritt. Wei et al. schlugen 2002 vor, dass die MMN bei solchen Untersuchungen eine „gemischte“ Welle ist, die aus der eigentlichen MMN, einer N2b und wahrscheinlich noch einer P165 besteht.

Wir können dennoch nicht ausschließen, dass die elektrischen Potenziale und Magnetfelder, die in unserem Experiment als MMN und MMF bezeichnet werden, aus einerseits einer MMN im eigentlichen Sinne (wie sie ohne gerichtete Aufmerksamkeit evoziert wird) und andererseits einer spezifischen zusätzlichen Aktivität bestehen.

Tervaniemi et al. (2001) vermuteten, dass N2b ähnlich wie P3b höhere kognitive Prozesse widerspiegelt. Sie boten Musikern und unmusikalischen Versuchspersonen reine Akkorde (Dreiklänge) als Standardreize und diskret verunreinigte Akkorde (der mittlere Ton wich um <1% ab) als abweichenden Reiz dar. Dieses Reizmaterial wurde den Probanden einmal präsentiert, während sie ein Buch lasen (die Reize also ignorierten), ein weiteres Mal sollten sie den abweichenden Reiz erkennen. Bei der den Reiz ignorierenden Bedingung wurde die MMN nur bei den Musikern evoziert. Bei der Bedingung mit gerichteter Aufmerksamkeit entdeckten die Musiker etwa 80% der Abweichungen, die unmusikalischen Versuchspersonen nur etwa 10%. Die MMN war bei den Musikern von einer N2b und P3b gefolgt. Dieser N2b-P3b-Komplex reflektiert seiner Meinung nach höhere kognitive Prozesse, die an der bewussten Entdeckung und Bewertung der Abweichungen beteiligt sind. Die unmusikalischen Probanden hatten eine kleine, aber statistisch signifikante MMN.

Dieses Ergebnis hat insofern Bedeutung für unsere Studie, als die Unterschiede zwischen den Gruppen möglicherweise größer wären, wenn die Versuchspersonen den Reiz ignoriert hätten.

Trainor et al. (2002) untersuchten akustisch evozierte Potenziale bei unmusikalischen Probanden einerseits bei unregelmäßig ansteigenden Tonfolgen in unterschiedlichen Tonarten, wobei sie als Abweichung den letzten Ton tiefer, statt weiter ansteigend darboten („Contour Stimuli“). In einer zweiten Bedingung wurde in unterschiedlichen Tonleitern der letzte Ton zwar weiter ansteigend, jedoch statt einen Ganzton höher einmal nur einen halben Ton und einmal zwei Töne höher dargeboten („Interval Stimuli“). Zusätzlich führten sie die Studie einmal mit auf die Abweichungen gerichteter Aufmerksamkeit durch, ein weiteres Mal ließen sie die Probanden ein Buch lesen.
Als interessante Ergebnisse lassen sich festhalten: Die ERPs auf die abweichenden Reize waren bei der Bedingung mit gerichteter Aufmerksamkeit durch eine N2 charakterisiert, die über der fronto-centralen Region die größten Amplituden hatte. Nach Meinung der Autoren dürften diese frontal gemessenen Potenziale eine Überlagerung von MMN und N2b darstellen, wogegen eine (positive) Abweichung über dem Mastoid bds. einer wirklichen MMN entsprechen dürfte. Bei der statistischen Auswertung zeigte sich, dass nur die N2b, nicht jedoch die MMN durch die Aufmerksamkeit beeinflusst wurde. Das Fehlen einer Modulation der MMN durch Aufmerksamkeit ist nach Meinung der Autoren darauf zurückzuführen, dass das Lesen eines Buches nicht genüge, die Aufmerksamkeit der Probanden komplett von den akustischen Reizen wegzulenken. Allerdings seien die Effekte der Aufmerksamkeit auf die MMN bei der Verarbeitung von Melodien sowieso klein, falls überhaupt existent.

4.4 Mögliche Mechanismen der Entstehung der MMN bei den Musikbedingungen

Nach vorherrschender Meinung entsteht die MMN, wenn der Vergleich eines Reizes mit den physikalischen Merkmalen einer regelmäßigen Reihe vorangegangener Reize ergibt, dass der aktuelle Reiz von diesen abweicht. Näätänen (1995) und Näätänen et al. (1989) gehen davon aus, dass die regelmäßige Wiederholung eines Standardreizes zur Ausbildung einer automatischen „Spur“ im Kurzzeitgedächtnis führt, die als Referenz für den aktuellen Reiz dient. Abweichende Reize allein oder lange Intervalle zwischen den Stimuli rufen keine MMN hervor, da die Kapazität des akustischen

Kurzzeitgedächtnisses maximal ca. 10 Sekunden andauert (Cowan 1984, Sams et al.1993). Dies wurde 1999 nochmals von Näätänen bestätigt. Hier verglich er (1) elektrische und magnetische Antworten auf seltene Reize, eingestreut in eine Folge von häufigen Reizen (odd ball Paradigma), mit (2) seltenen Tönen, die alleine dargeboten wurden. Es zeigte sich, dass im ersten Fall eine MMN und MMF evoziert wurden, im zweiten Fall nur eine größere N100 bzw. N100m. Dies unterstützte seine Idee, dass eine Gedächtnisspur, die im akustischen Cortex durch die vorhergehenden repetitiven häufigen Reize entsteht, eine notwendige Vorbedingung für die Evozierung der MMN oder des MMF ist.
Die MMN, die bei unseren Versuchspersonen als Antwort auf die relativ einfachen Bedingungen Note, Chord und Arpeggio evoziert wurde, ist der von anderen Autoren gefundenen ähnlich und (natürlich) vereinbar mit dem Konzept von Näätänen. Es ist jedoch weitaus schwieriger, zumindest auf der Basis des Vergleichs mit einer Information aus dem Kurzeitgedächtnis, den Entstehungsmechanismus der MMN bei den Musikstücken zu erklären. Bei der Musik ändern sich die relevanten physikalischen Eigenschaften eines Tones kontinuierlich, so dass keine stabile Referenz festgesetzt werden kann, es sei denn man postuliert, dass das gesamte Musikstück im Kurzeitgedächtnis gespeichert wird.
Auf der Basis des gespeicherten Melodieverlaufs könnte dann jeder einzelne folgende Ton richtig vorausgesagt werden und wäre so verfügbar für einen schnellen Vergleich mit dem „falschen“ Ton. Eine solche Annahme steht allerdings in krassem Widerspruch, zu allem was über das akustische Kurzzeitgedächtnis bekannt ist (vgl. oben).

Das Entstehen einer MMN in unserem Experiment erfordert eine alternative Deutung: Die Abweichungen werden bereits auf der Stufe der Informationsverarbeitung, die der MMN zugrunde liegt, als falsche Töne erkannt, weil sie nicht mit den erlernten musikalischen Regeln zu vereinbaren sind.
Die MMN spiegelt also nicht nur Abweichungen vom Inhalt eines Kurzzeitgedächtnisses wider, sondern auch die Verletzung von im Verlauf der Ontogenese erworbenen Regeln. Nach dieser steht jeder wahrgenommene Ton in Beziehung mit dem von den vorhergegangenen Tönen gebildeten Muster. Basierend auf verinnerlichte Regeln wird abgeschätzt, ob er zu der Tonart, in

welcher ein Musikstück geschrieben ist, passt; d.h., ob er das Muster gemäß dieser Regeln richtig ergänzt.

Die Regeln, deren Verletzung die MMN widerspiegelt, müssen nicht unbedingt explizit erworben sein (wie im Fall der Harmonielehre), sondern können auch durch kurzfristige Erfahrung impliziert werden.

So zeigt Tervaniemi (1994), dass eine MMN auch in einer kontinuierlich absteigenden Tonfolge evoziert wird, wenn sie durch einen aufsteigenden oder sogar einen gleichbleibenden Ton unterbrochen wird. Dieses Ergebnis führte ihn zu der Annahme, dass der akustische Cortex nicht nur die gerade zurückliegende akustische Vergangenheit speichert, sondern auch extrapolierte Spuren auf der Basis von Regelmäßigkeiten oder Trends aus der akustischen „Vergangenheit“ bildet. Da die MMN als Abbild eines frühen, unbewussten Stadiums der Sinnesverarbeitung gilt, zeigen diese Ergebnisse, dass bereits auf hochkomplexe Regeln zurückgegriffen werden kann.

Auch der Befund von Paavilainen et al. (2001), dass die vor der bewussten Wahrnehmung stattfindenden Mechanismen der Tonanalyse auch fähig sind abstrakte Beziehungen zwischen zwei Tonmerkmalen zu „erkennen“, unterstützt diese Schlussfolgerung. In den Versuchen dieser Arbeit variierten die Standardreize beträchtlich in Frequenz und Intensität, so dass es keine physikalische Konstante gab. Stattdessen folgten die verschiedenen Exemplare des „Standardreizes“ einer Regel, z.B. je höher die Frequenz, desto lauter er Ton. Ein gelegentlicher abweichender Reiz, der diese Regel verletzte (z.B. hochfrequent und leise) evozierte eine MMN.

Die Ergebnisse aus unserer Studie lassen sich verstehen als ein besonders eindrucksvolles Beispiel komplexer Informationsverarbeitung in einer frühen und unbewussten (automatischen) Stufe. Bedeutsam ist, dass die Latenz der MMN bei den Musikbedingungen nahezu gleich ist wie bei den Tonbedingungen. Die Bewertung eines neuen Tones in Bezug auf eine komplexe Referenz nach musikalischen Regeln, verbraucht anscheinend nicht mehr Zeit als die Bewertung vergleichsweise einfacher physikalischer Parameter an Hand einer automatisch angelegten Gedächtnisspur. Als eine mögliche Erklärung kann spekuliert werden, dass jeder künftige Ton (oder eine Reihe aufeinanderfolgender Töne) durch einen Prozeß der parallel zu einem Wahrnehmungsmechanismus abläuft, vorhergesagt wird und für einen schnellen Vergleich zur Verfügung steht.

Die größere MMN der musikalischen Versuchspersonen bei den Musikstücken könnte möglicherweise durch eine bessere Verankerung/Verfügbarkeit der musikalischen Regeln bedingt sein.

4.5 Subjektiv empfundene Schwierigkeiten der Bedingungen und Objektivierung anhand von Potenzialen

Obwohl in allen Tonbedingungen unseres Experiments die abweichenden Töne jeweils einen Halbton über dem „Originalton“ lagen, war die Leistung der Versuchspersonen in den einzelnen Bedingungen sehr unterschiedlich und hing von der spezifischen Schwierigkeit jeder Bedingung ab. Alle, und insbesondere die unmusikalischen Probanden berichteten, dass die abweichenden Töne in Arpeggio deutlich schwieriger zu identifizieren waren als bei Note und Chord, welche als einfachste Bedingungen empfunden wurden. Bei Arpeggio wird der abweichende (mittlere) Ton durch die beiden umgebenden, unveränderten Töne maskiert, was das Erkennen deutlich erschwerte. Der große Unterschied zwischen den Leistungen der musikalischen und der unmusikalischen Gruppe bei Arpeggio ist daher nicht überraschend. Die Ergebnisunterschiede waren bei Chord und Note aufgrund des wesentlich einfacheren Materials erwartungsgemäß geringer.
Bei den Musikbedingungen unterschied sich der abweichende vom häufigen Reiz durch einen Ganzton. Hier wurde naturgemäß das Paradigma Bach aufgrund der Komplexität als deutlich schwieriger empfunden, während die Bedingung Mozart nur als gering schwieriger als die beiden Tonbedingungen Note und Chord beschrieben wurde, jedoch weniger kompliziert als Arpeggio.

Interessant ist, dass die Amplitude der P300 in der Elektrode PZ sowohl die Unterschiede zwischen den beiden Gruppen wie auch den Schwierigkeitsunterschied der verschiedenen Bedingungen widerspiegelt. Bei genauerem Betrachten sind die Unterschiede zwischen den beiden Gruppen bezüglich der Amplitude der P300 größer als beim Zählen. Bei Arpeggio z. B. als extremstes Beispiel ist die P300 in der unmusikalischen Gruppe „verschwunden“, d.h. es ist kein eindeutiges Potenzial mehr zu erkennen. Beim Zählen hat dieselbe Gruppe jedoch nur eine Fehlerquote von ca. 40% (nicht etwa 100% wie man vielleicht erwarten könnte). Wie ist diese Diskrepanz zu erklären?

Es ist bekannt, dass die Amplitude der P300 eher von der Entdeckung – oder vermeintlichen Entdeckung- eines abweichenden Tones als von den objektiven physikalischen Merkmalen des Materials abhängt; d.h. das Nichterkennen eines abweichenden Tones produziert keine P300 Aktivität, während die Einbildung einer Abweichung eine P300 hervorruft.

Vermutet man, dass die unmusikalische Gruppe keine Abweichungen im Paradigma Arpeggio erkennen konnte, so liegt es nahe, dass diese Probanden (statt Nichterkennen) zu Verwechslungen von STD und DEV neigten. Technisch gesehen mischen sich dann STD-Antworten in DEV-Reize und umgekehrt, so dass die gemittelten Zeitverläufe für STD und DEV-Reize ähnlich waren. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass die Latenz der P300 auch vom Grad der Sicherheit abhängt, mit der die Entscheidung (DEV gegenüber STD) getroffen wird. Dies kann zu einer Streuung der Zeitverteilung des positiven Potenzials führen, so dass die aktuelle Anwort in ihrer Latenz nicht nur vom Reiz abhängt; diese Streuung führt insgesamt zu kleineren Amplituden in den gemittelten Kurven. Unter Berücksichtigung dieser Überlegungen sind wir der Meinung, dass einige Versuchspersonen der unmusikalischen Gruppe aufgrund der fehlenden P300 beim Paradigma Arpeggio nicht in der Lage waren, Abweichungen zu identifizieren und „falsch“ gezählte Töne tatsächlich „richtige“ Töne waren. So kamen auch Versuchspersonen, die abweichende Reize nicht sicher identifizieren konnten, auf relativ gute Ergebnisse beim Zählen.

Eine andere denkbare Möglichkeit ist, dass Versuchspersonen erst nach längerer Verarbeitungszeit (länger als unser Analyseintervall), letztlich eine Abweichung entdeckt haben, oder dass sie unter dem „moralischen Druck“, Abweichungen zu erkennen, konfabuliert haben.

Ein anderer interessanter Gesichtspunkt bei Arpeggio ist das entgegengesetzte „Verhalten“ der beiden Potenziale MMN und P300. Während die unmusikalischen Versuchspersonen häufig eine MMN in der Elektrode FZ zeigten, fehlte, wie oben geschildert eine P300 in den posterioren Elektroden. Die geringe und späte MMN deutet aber darauf hin, dass die Fehler nur schwer zu entdecken waren. Dies könnte zu einer Verzögerung der bewussten Wahrnehmung führen und zu einer P300, die wie oben erwähnt außerhalb unseres Analyseintervalls liegt. Da der Kurvenverlauf bei Arpeggio sich von den Kurven (insbesondere der MMN) bei Note und Chord unterscheidet, könnte es auch sein, dass es sich bei der

Abweichung der Kurve der seltenen Reize um ein N2 (und nicht die MMN) handelt.

4.6 Späte evozierte Antworten (P300) in den musikalischen Bedingungen

Genereller Zweck der Untersuchung war, Antworten die durch Musik evoziert werden, zu quantifizieren. Es ist bekannt, dass im Gegensatz zu sprachwissenschaftlichen Untersuchungen, bei denen unpassende Endungen eines Satzes typischerweise negative Antworten mit langer Latenz (N400) hervorrufen (Kutas und Hillyard 1980), nicht-sprachliche Reize, wie zum Beispiel ein falsches Ende einer bekannten Melodie, keine N400 evoziert (Besson und Macar 1986, Paller et al. 1992). Stattdessen wird eine P300 beobachtet, wenn Probanden angeleitet wurden, die Abweichungen zu zählen. Unter unseren experimentellen Bedingungen wurde tatsächlich bei Mozart und Bach eine P300 hervorgerufen. Und wie nach einer vorhergehenden Studie von Besson et al. (1994) zu erwarten, waren die Amplitude und Latenz der P300 bei der musikalischen Gruppe signifikant verschieden von denen der unmusikalischen Gruppe.

In unserer Studie gibt es aber einen wichtigen Unterschied zu vorhergehenden Untersuchungen. Typischerweise wurde die Betonung bisher auf den Schluß einer musikalischen Einheit gelegt, in einigen Studien (z.B. bei Paller et al. 1992) wurde der Schluß sogar verzögert, um mehr Zeit für die Konstruktion eines richtigen Musters zur Verfügung zu haben. Es gab einige Diskussionen, ob die P300 nur als Antwort von abweichenden Endungen auftritt, die laut Verleger keine eigentlich unerwarteten Verstöße sind, da sie in einem Zeitfenster auftreten, innerhalb dessen die Versuchsperson während des Experimentes gelernt hat, den abweichenden Reiz zu erwarten (Verleger 1990).

In unserer Studie erschienen die abweichenden Töne immer am Anfang einer musikalischen Einheit, so dass die Ergebnisse nicht durch die Erwartung der Versuchspersonen, dass die abweichende Note die letzte der musikalischen Einheit ist, beeinflußt werden konnte. Zudem wurden die Tonfolgen und Melodien kontinuierlich ohne Pausen wiederholt.

Nichtsdestotrotz hat die Diskussion bezüglich des Einflusses der Erwartungshaltung auch für unseren Fall möglicherweise eine gewisse Relevanz: wir setzten das interessante Ereignis (seltener oder häufiger Reiz) absichtlich auf den musikalisch relevanten Teil einer Melodie (Hauptakzent). Dies impliziert, dass die Probanden der musikalischen Gruppe einen weiteren Anhaltspunkt für das richtige Erkennen der abweichenden Töne hatten, da sie im Laufe ihrer musikalischen Ausbildung bessere Strategien entwickelt haben, um musikalisch wichtige Töne herauszufinden. Sie konnten daher möglicherweise gezielt auf das Zeitfenster fokussieren, innerhalb dessen abweichende Töne zu erwarten waren, und so die Chance einer Entdeckung von Abweichungen im Vergleich zu unmusikalischen Probanden erhöhen; dies könnte zu ihrer größeren P300 beigetragen haben.

Ein weiterer Faktor, der zu einem Vorteil für die musikalischen Probanden geführt haben könnte, ist durch die unterschiedlichen Aspekte bedingt, in denen sich die „Fehler“ von den richtigen Tönen unterscheiden konnten.

Einige der abweichenden Reize waren melodischer Art, das heißt sie gehörten zu der selben Tonart, waren jedoch so nicht vom Komponisten vorgesehen, andere waren „harmonisch“, sie gehörten also weder zu der gleichen Tonart noch entsprachen sie dem ursprünglichen Melodieverlauf. Letztere konnten auch von der unmusikalischen Gruppe erkannt werden, während die melodischen Abweichungen für diese Gruppe sicherlich schwierig zu identifizieren waren.

Komplizierend war außerdem noch die zweite Stimme bei Bach, die eine Rückmeldung gab, ob der vermeintlich falsche Ton auch tatsächlich falsch war. So konnten melodische Abweichungen auch von den unmusikalischen Probanden erkannt werden, wenn sie dissonant zur gleichzeitig gespielten zweiten Stimme waren.

Umgekehrt bedeutet dies aber auch, dass es eine Reihe von „einfacheren“ Abweichungen gab, die den unmusikalischen Probanden das Erkennen erleichterte. Wir sehen darin mit einen Grund, warum in der unmusikalischen Gruppe im komplexen Musikstück Bach eine P300 evoziert wurde (auch wenn diese signifikant kleiner war und eine längere Latenz hatte) und die Unterschiede der beiden Gruppen im Erkennen der falschen Töne weniger deutlich waren, als die Komplexität des Reizes erwarten ließ.

Interessanterweise ist bei der Bedingung Bach auch die Fehlerquote der beiden Gruppen bezüglich des Erkennens der Abweichungen nicht signifikant verschieden. Dies führt ähnlich wie oben (Arpeggio) ausgeführt zu der Annahme, dass die Zählrate der unmusikalischen Versuchspersonen durch ein gewisses Maß an Raten und Schätzen positiv beeinflußt wurde.
Bei der einfacheren Melodie „Mozart“ gab es keine großen Unterschiede zwischen den Gruppen, weil die meisten abweichenden Töne auch für die unmusikalischen Versuchspersonen leicht zu erkennen waren (und die sehr eingängige Melodie den meisten Probanden als Weihnachtslied bekannt war).

4.7 Quellenlokalisation

Ursprünglich war ein weiteres Ziel unserer Studie, mehr Informationen über Generatoren und neuronale Strukturen, die an der Aufdeckung abweichender Reize beteiligt sind, zu gewinnen. Dies sollte insbesondere mittels der MEG-Daten erfolgen, da z.B. nach Diesch und Luce (1997) magnetische Felder eine genauere Lokalisation der neuronalen Generatoren der Signalkomponenten ermöglichen als elektrische Potentiale.
Wie schon erwähnt, scheiterte die genaue Lokalisation der evozierten Aktivität an den Unzulänglichkeiten der Anlage, die uns zur Verfügung stand:
Erstens war eine zu geringe Anzahl von Kanälen vorhanden, so dass immer nur ein Teil des Kopfes in einer Sitzung abgedeckt werden konnte.
Zweitens war eine exakte Positionierung nicht möglich, so dass keine zuverlässigen Grand Averages gerechnet werden konnten.

Daher sind nur qualitative Aussagen möglich, die aber mit den Angaben der Literatur vereinbar sind (siehe hierzu auch Aussagen im Ergebnisteil).

N100: Unsere Feldverteilung ist kompatibel mit der Annahme eines tangentialen Dipols auf jeder Seite, der sich im Bereich des akustischen Cortex befinden könnte und nach hinten und innen gerichtet ist.
Nach Näätänen und Picton (1987) und anderen Autoren besteht die N100 aus mehreren unabhängigen Komponenten, die sich teilweise überlappen. Eine negative Komponente mit einer Latenz von 100 ms wird im supratemporalen

akustischen Cortex erzeugt. Eine weitere (T-Komplex) besteht aus einer positiven Welle bei etwa 100 ms (T_a) und einer negativen (T_b) bei etwa 150 ms. Der T-Komplex wird im Assoziationscortex im lateralen Bereich des temporalen und parietalen Cortexes erzeugt. Diese Komponente hat einen radial orientierten Dipol und wird daher magnetisch nicht erfasst. Die T_a scheint in den akustischen Assoziationsarealen, aktiviert durch Verbindungen vom primären akustischen Cortex und möglicherweise auch direkt vom Thalamus, erzeugt zu werden. Eine dritte, am Vertex negative Komponente, mit einer Latenz von etwa 100 ms, wird im motorischen und prämotorischen Cortex unter dem Einfluss des Thalamus generiert. Diese letzte Komponente der N100 spiegelt wahrscheinlich die Richtung der Aufmerksamkeit auf den Reiz wider.
Scherg und von Cramon (1986) modellierten zwei Dipolquellen in jedem Temporallappen. Eine Quelle ist vertikal (tangential zur lateralen Oberfläche des Schädels) orientiert, die andere horizontal (radial).
Der Dipol der akustischen N100m ist konstant und wiederholt im superioren temporalen Cortex lokalisiert worden, trotz Verfahrensunterschiede bei der Aufzeichnung der MEG-Daten (z.B. Hari et al. 1980). Reite et al. (1994) lokalisierten den Generator der N100m im akustischen Koniocortex im oder benachbart des Heschlschen Gyrus. Detaillierte magnetische Aufzeichnungen von Lütkenhöner und Steinsträter (1998) deuten darauf hin, dass die N100m mit einer Latenz von etwa 100 ms im planum temporale entsteht und eine tonotope Organisation aufweist.

P300: Hier deuten unsere Ergebnisse auf medial gelegene Quellen mit sagittal nach hinten gerichteten Komponenten hin. Da die elektrische P300 größer ist als die magnetische, könnte außerdem eine senkrecht zur Cortexoberfläche gerichtete Komponente (die magnetisch nicht erfasst wird) zur Erzeugung des Potenzials beitragen.
Die meisten Versuche, die P300 zu lokalisieren, wurden auf der Basis elektrischer Aufzeichnungen gemacht. Von verschiedenen Autoren (z.B. Simson et al. 1977, Yamaguchi and Knight 1991) wurden als mögliche Dipolquellen verschiedene Anteile des Cortexes, der Gyrus parahippocampus oder auch der Thalamus vorgeschlagen.

1993 fanden O`Donnell et al. nur zwei Quellen für die P300, symmetrisch in den medialen Temporallappen lokalisiert. Magnetische Quellenlokalisationen (Rogers et al. 1991) fanden eine Beteiligung der Sylvischen Fissur, aber auch tiefere Quellen in der Nachbarschaft des Thalamus und/oder Hippocampus.
Tarkka et al. bestätigten 1995 teilweise die Ergebnisse von Rogers, sie nahmen den supratemporalen Cortex bds. sowie tiefere Quellen im Hippocampus als Generatoren der P300 an. Da jedoch Polich und Squire (1993) bei 5 Patienten mit Läsionen des Hippocampus eine nahezu normale akustisch evozierte P300 fanden, sind die Generatoren der P300 in ihrer Komplexität wohl noch nicht vollständig zu begreifen.

MMN/MMF: Soweit sich in unseren Daten ein klares magnetisches Gegenstück der MMN abgrenzen lässt, weist das Feld eine ähnliche Verteilung wie die N100 auf, so dass unsere Ergebnisse mit der Annahme eines ähnlich lokalisierten und orientierten Dipols vereinbar sind.
Bei unseren Versuchen, die MMN genauer zu lokalisieren, stellten wir aber fest, dass die Verteilung der Quellen weit komplexer erschien, als nach der vorhandenen Literatur zu erwarten war.
Wie schon erläutert bestehen die Potentiale und Felder (MMN und MMF) unserer Studie einerseits aus einer MMN im eigentlichen Sinne, wie sie ohne Richtung der Aufmerksamkeit auf den Reiz ausgelöst wird, andererseits aus gleichzeitiger Aktivität anderer Hirnareale, bedingt durch die gerichtete Aufmerksamkeit. Bei den evozierten Potentialen auf die Musikparadigmen beobachteten wir Aktivität im Latenzbereich der MMN auch in den parietalen Elektroden. Daher denken wir, dass die Entstehung der MMN nur durch eine komplexe Verteilung von mehreren simultanen Quellen möglich ist, die unsere Methodik nicht zu differenzieren gestattet.

Nach Näätänen (2001) ist das frontale Amplitudenmaximum der MMN zumindest teilweise durch Generatoraktivität im supratemporalen akustischen Cortex bds. erklärt, was durch Dipolmodellierung von ERPs, intracraniellen Aufzeichnungen bei Katzen, Affen und auch Menschen, sowie durch magnetische Aufzeichnungen, PET und funktionelle Kernspintomografie belegt wurde.

Giard et al. vermuteten bereits 1990 aufgrund von EEG-Aufzeichnungen, dass die MMN von mindestens 2 Generatoren erzeugt wird: Einem im akustischen Cortex supratemporal gelegenen (vertikal orientiert), der stärker in der, zum stimulierten Ohr contralateralen Hemisphäre aktiviert ist, und einem zweiten, frontal gelegenen, der zumindest teilweise cortikaler Herkunft ist und die rechte Hemisphäre bevorzugt betrifft. Die Summe der Aktivitäten der beiden Generatoren führte ihrer Meinung nach zur Beobachtung größerer Amplituden über der rechten Hemisphäre.
Nach Giards Meinung wäre es überraschend, wenn ein so komplexer psychophysiologischer Mechanismus wie die MMN mit neuronaler Aktivität nur im akustischen Cortex assoziiert wäre.
Dies wird durch Näätänen (2001) bestätigt. Er ist der Meinung, dass der akustische Cortex frontale Cortexaktivität triggert (was durch die frontale MMN-Subkomponente widergespiegelt wird), die vermutlich durch die Richtung der Aufmerksamkeit auf den Reiz zurückzuführen ist.
Des Weiteren ist z.B. nach Paavilainen et al. (1991) der exakte Ort der MMN im akustischen Cortex von den physikalischen Eigenschaften und auch der Komplexität des abweichenden Reizes abhängig.

4.8 Klinische Nutzung der MMN

Nyman et al. zeigten schon 1990, dass nur akustische (Töne und Sprache), nicht jedoch z.B. visuelle Reize eine MMN evozieren, diese also keine Manifestation eines allgemeinen Aufmerksamkeitsmechanismus ist, sondern spezifisch für das akustische Wahrnehmungssystem. Die MMN ist die früheste physiologische meßbare Antwort des Gehirns auf neue akustische Reize. Sie wird durch jede unterscheidbare Änderung in einer repetitiven Folge von akustischen Reizen z.B. der Frequenz, der Lautstärke oder der Dauer eines Reizes, aber auch durch Weglassen eines erwarteten Tones bei kurzem ISI (Tervaniemi et al. 1994), aber auch durch Abweichungen in komplexen akustischen Reizen wie z.B. rhythmische Muster oder auch Sprache (Näätänen und Winkler 1999 und die vorliegende Arbeit) hervorgerufen.
Die MMN ist darüber hinaus von großem Interesse bezüglich des Verständnisses der zentralen akustischen Funktion (Näätänen und Alho 1995).

Sie ist derzeit die einzige Möglichkeit die Genauigkeit der Unterscheidungsfähigkeit akustischer Reize objektiv zu messen (Näätänen 2001). Es gibt eine enge Beziehung zwischen der Genauigkeit der Unterscheidung und der Amplitude der MMN. Darüber hinaus kann die MMN auch als Index der trainingsabhängigen Verbesserung der Unterscheidungsfähigkeit herangezogen werden (Näätänen 1993). Wegen dieser Eigenschaften wird die MMN erfolgreich in der Erforschung der Dyslexie genutzt, z.B. um die Effektivität unterschiedlicher Trainingsmethoden und Rehabilitationsprogramme zu untersuchen (Baldeweg 1999).

Da sie auch in Abwesenheit der Aufmerksamkeit und ohne spezielle Aufgabenstellung gemessen werden kann, ist sie geeignet, verschiedene Personengruppen, unter anderem auch Kranke (nach Schädelhirntrauma oder neurologischen Erkrankungen, wie z.B. Schizophrenie, Alkoholkrankheit, M. Alzheimer) und Kinder zu testen, die nicht fähig oder willig zur Mitarbeit sind. So bringt z.B. die MMN zusätzlich zu der Klinik Information über Status und Genesung von Komapatienten (Morlet et al. 2000). Kane et al. zeigten 1996 in einer Untersuchung an Komapatienten mit einem Glasgow Coma Scale (GCS) <8 nach schwerem Schädelhirntrauma, dass die Präsenz der MMN eine gute Voraussage bezüglich des Wiedererlangens des Bewusstseins darstellt; die Latenz der MMN war der beste Indikator für den Zustand der Patienten nach 90 Tagen.

Wichtig hierfür ist auch die gute individuelle Test – Retest Stabilität der MMN, bei beträchtlicher interindividueller Variationsbreite (Pekkonen et al 1995).

4.9 Weitere Studien und Ausblicke

Ob zwischen musikalischen und unmusikalischen Versuchspersonen Unterschiede in akustisch evozierten Potenzialen bestehen, wurde inzwischen auch in anderen Studien untersucht.

Hier ist z.B. ein Experiment von Tervaniemi et al. (1997) zu erwähnen, in dem die Auswirkung der Musikalität auf die Amplitude der MMN untersucht wurde. Es zeigte sich, dass die MMN bei einer regelmäßigen Wiederholung von Tonmustern, bei denen gelegentlich die zeitliche Struktur geändert wurde, bei den musikalischen Personen größer als bei den unmusikalischen Versuchspersonen

war. (Die Versuchspersonen wurden in dieser Studie angewiesen, die Töne zu ignorieren und ein Buch zu lesen).

In neueren Studien (2001) untersuchte der gleiche Autor mittels der MMN, wie Versuchspersonen lernen, Änderungen in Melodien, die in verschiedenen Tonlagen gespielt wurden, zu identifizieren. Zusätzlich untersuchte er, ob Musikalität dieses Lernen erleichtert. Er fand heraus, dass nach dem bewußten Lernen des Melodieverlaufs, Änderungen in einem hochkomplexen akustischen Muster automatisch durch den akustischen Cortex entdeckt werden und das dieser Prozess durch musikalische Kenntnisse erleichtert wird.

In einer weiteren interessanten Studie fand Tervaniemi (2000), dass eine evozierte MMN eine größere Amplitude und kürzere Latenz hat, wenn Probanden Töne mit einem breiten Spektrum und zusätzlich harmonischem Anteil hören, als bei einfachen sinusoidalen Tönen. Dies deutet darauf hin, dass komplexe Töne die Unterscheidung (vor der bewußten Wahrnehmung) erleichtern.

Koelsch et al. verglichen 1999 eine Gruppe Berufsmusiker mit einer Gruppe unmusikalischer Probanden, indem sie in eine Reihe Dur-Akkorde diskret unreine Akkorde „einstreuten“. Bei den Musikern konnte eine klare MMN evoziert werden, bei den unmusikalischen Versuchspersonen nicht. Dies weist darauf hin, dass die Musiker besser in der Lage sind, vor der aktiven Wahrnehmung Information aus musikalisch wichtigen Reizen zu ziehen. Die größere Amplitude der MMN, die eine genauere Gedächtnisfunktion bei den musikalischen Probanden anzeigt, zeige, dass auch die anscheinend bewußte Komponente der Musikalität auf neuronalen Prozessen im Vorwahrnehmungsbereich basiert. Im Unterschied zu unserer Untersuchung wurden hier jedoch nur „einfache“ Tonbedingungen, keine komplexen Musikstücke verwendet.

Rüsseler et al. ließen 2001 bei einem odd ball Paradigma mit einer zeitlich strukturierten Tonfolge Töne aus (was z. B. nach Yabe et al. 1997 ebenfalls eine MMN evoziert). Sie kamen zu dem Ergebnis, dass das Zeitfenster (das zum Vergleich zur Verfügung steht) bei musikalischen Versuchspersonen länger und präziser als bei unmusikalischen Probanden ist, da die musikalischen Probanden auch bei längeren ISI bzw. kleineren Unterschieden zwischen den Reizen eine eindeutige MMN (im Gegensatz zu den unmusikalischen Probanden) evozierten. Dieses Zeitfenster wurde von Yabe et al. (1997) bei „normalen“ Versuchspersonen auf 150 ms geschätzt.

Nach Rüsseler (2001) scheint die Überlegenheit der Musiker in der vor der bewussten Wahrnehmung stattfindenden akustischen Verarbeitung überwiegend durch eine effektivere Informationsverarbeitung infolge eines längeren Trainings bedingt. Dieses führe zu einer Rekrutierung von mehr Neuronen in der automatischen akustischen Wahrnehmung, aber nicht von zusätzlichen Hirnarealen. Diese Idee wird dadurch unterstützt, dass sich der Ort der neuronalen Generatoren der MMN nicht zwischen Musikern und unmusikalischen Versuchspersonen unterscheiden.

Nach einer Studie von Koelsch et al. (1999) können Unterschiede der MMN zwischen Musikern und Nicht-Musikern auch allein durch die Annahme einer präziseren Abstimmung der Frequenz-spezifischen Neuronen bei den Musikern erklärt werden.

Hier ist auch noch eine neuere Studie von Koelsch et al. (2001) zu erwähnen. Diese Gruppe ist der Meinung, dass bei der bewussten Verarbeitung von komplexen, auf Regeln basierenden Informationen, wie z.B. musikalischen Regeln keine MMN im eigentlichen Sinne, sondern ein negatives Potential mit einer längeren Latenz und größeren Amplitude evoziert wird. Dieses Potenzial bezeichnet er als ERAN (early right-anterior negativity). Koelsch ist der Meinung, dass ERAN und MMN unterschiedliche Mechanismen bei der Detektion von Abweichungen (vor der bewussten Wahrnehmung) darstellen und dass, obwohl beide Komponenten einige gemeinsame Merkmale haben und die ERAN nicht in den klassischen Rahmen der MMN passt.

Für nachfolgende Studien wäre sicherlich ein Vergleich zwischen Berufsmusikern und unmusikalischen Probanden bei komplexen Musikstücken interessant. Es sollte trotz obiger Ausführungen auch ein Versuchsaufbau ohne gerichtete Aufmerksamkeit, am besten im Vergleich mit einer auf den Reiz fokussierten Aufmerksamkeit erfolgen, um Überlagerungen der MMN zu identifizieren. Außerdem sollte die Rolle der ERAN als eigenständiges Potential neben der MMN weiter untersucht werden.

5 Zusammenfassung

Zu den akustisch evozierten Potenzialen, die durch seltene Reize in einer Folge häufiger Reize hervorgerufen werden, gehören MMN (mismatch negativity) und P300. In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, ob im Unterschied zum klassischen odd ball Paradigma, bei dem physikalisch definierte „Abweichungen“ in eine Folge regelmäßiger Ereignisse eingestreut werden, die charakteristischen Potentiale MMN und P300 auch durch Abweichungen von abstrakten Regeln der Harmonielehre hervorgerufen werden. Hierzu wurden „Fehler“ in eine fortlaufende Melodie eingestreut. Als weiteres Potenzial wurde die stark exogen beeinflusste N100, die sowohl von den häufigen, wie auch den seltenen Reizen hervorgerufen wird, betrachtet.
Darüber hinaus interessierte uns, ob sich die Potenziale musikalischer von denen unmusikalischer Versuchspersonen unterscheiden.

Wir wählten dementsprechend ein Versuchsprotokoll mit einem nicht-musikalischen Teil (odd ball Paradigma bei Tönen, Akkorden und Arpeggio) und einem musikalischen Teil (einfache und komplexe Melodien mit eingestreuten abweichenden Reizen), das mit 20 Probanden (7 weiblich, 13 männlich, Alter 16-54 Jahre) durchgeführt wurde.
Die Probanden wurden anhand eines „Bentley-Testes“ (ein etablierter Test zur Einschätzung von Musikalität) in eine musikalische und eine nicht-musikalische Gruppe eingeteilt (je 10 Probanden).
Das Experiment wurde in zwei Sitzungen durchgeführt. Die Versuchspersonen lagen in einer magnetisch abgeschirmten Kabine und bekamen das akustische Reizmaterial dargeboten. Die evozierten Potenziale wurden elektrisch (Electroencephalogramm/EEG) und magnetisch (Magnetoencephalogramm/MEG) aufgezeichnet. Die Amplituden, Latenzen und Flächen der Potenziale N100, MMN und P300 wurden ausgewertet und auf statistische Signifikanz geprüft.

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass tatsächlich auch durch „Fehler“ in komplexen Musikstücken MMN und P300 evoziert wurde, die denen bei den einfachen, physikalisch definierbaren Abweichungen sehr ähnlich waren. Außerdem zeigte sich, dass die Musikalität einen signifikanten Einfluß auf die

Amplitude der P300 hatte und zumindest teilweise auf die MMN, nicht aber auf die N100.

Das bisherige Konzept, dass die MMN durch einen Vergleich der abweichenden Reize mit einer Gedächtnisspur im Kurzzeitgedächtnis hervorgerufen wird, welche durch die vorhergehenden häufigen Reize entsteht, ist für Musik nicht anwendbar. Eine mögliche alternative Deutung ist, dass die Abweichungen bereits auf der Stufe der Informationsverarbeitung, die der MMN zugrunde liegt, als falsche Töne erkannt werden, weil sie nicht mit erlernten musikalischen Regeln vereinbar sind. Die MMN spiegelt also nicht nur Abweichungen vom Inhalt eines Kurzzeitgedächtnisses wider, sondern auch die Verletzung von im Verlauf der Ontogenese erworbenen Regeln.
Möglicherweise spiegelt die größere MMN der musikalischen Versuchspersonen eine bessere Verankerung der musikalischen Regeln wider.

Welcher Aspekt der Musikalität für die größere Amplitude der P300 bei den musikalischen Versuchspersonen verantwortlich ist, kann nicht sicher beantwortet werden. Möglicherweise konnten diese, mittels spezifischer Strategien gezielt auf das Zeitfenster fokussieren, innerhalb dessen abweichende Töne zu erwarten waren und so die Wahrscheinlichkeit Abweichungen zu entdecken erhöhen.

6 Literaturverzeichnis

1. Alho K, Huotilainen M, Tiitinen H, Ilmoniemi R J, Knuutila J, Näätänen R
   Memory relatet processing of complex sound patterns in human auditory cortex: a MEG study
   Neuroreport, 4, 391-394 (1993)

2. Alho K, Woods D L, Algazi A
   Processing of auditory stimuli during azditory and visual attention as revealed by event-related potentials
   Psychophysiology, 31, 469-479 (1994)

3. Aulanko R, Hari R, Lounasmaa O V, Näätänen R, Sams M
   Phonetic invariance in the human auditory cortex
   Neuroreport, 4, 1356-1358 (1993)

4. Baldeweg T
   Impaired auditory frequency discrimination in dyslexia detect with mismatch evoked potentials
   Ann Neurol, 4, 1-9 (1999)

5. Becker W , Diekmann V, Kaufmann R, Kornhuber H H, Ludwig W
   Hirnfunktionsdiagnostik mit Hilfe von SQUID´s
   Dornier Post, 1, 12-15 (1987)

6. Becker W, Diekmann V, Jürgens R
   Magnetic localisation of EEG electrodes for simultaneous EEG and MEG measurements
   Satellite Symposium on Neuroscience and Technology
   14th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Lyon, France, Nov. 1992

7. Bentley A
A study of some aspects of musical ability amongst young children, including those unable to sing in tune
Doctoral Dissertation in musicology, School of music/Indiana University 1963

8. Besson M, Macar F
Visual and auditory event-related potentials elicited by linguistic and non-linguistic incongruities.
Neurosci Lett, 63, 109-114 (1986)

9. Besson M, Macar F
An event-related potentials analysis of incongruity in music and other non-linguistic contexts
Psychophysiology, 24, 14-25 (1987)

10. Besson M, Faita F, Requin J
Brain waves associated with musical incongruities differ for musicians and non-musicians
Neurosci Lett, 168, 101-105 (1994)

11. Cowan N
On short and long auditory stores
Psychol Bull, 96, 341-370 (1984)

12. Davis H
Principles of electric response audiometry
Ann Otol Rhinol Laryn, 85, 1-96 (1976)

13. Diekmann V, Jürgens R, Becker W
Magnetische Lokalisation von Markern
Biomed Tech, 40, 211-212 (1995)

14. Diekmann V, Jürgens R, Becker W, Elias H, Ludwig W, Vodel W
RF-SQUID to DC-SQUID upgrade of a 28-channel magnetoencephalography (MEG) system
Meas Sci Technol, 7, 844-852 (1996)

15. Diekmann V, Erne S, Becker W
Magnetoencephalographie
In: Windhorst U, Johansson H (Hrsg) Modern Technics in Neuroscience Research, 1. Aufl.,
Springer, Berlin Heidelberg, S.1025-1053 (1999)

16. Diesch E, Luce T
Magnetic mismatch fields elicited by vowels and consonants
Exp Brain Res, 116, 139-152 (1997)

17. Duffy F H, Bartels P H, Burchfiel J L
Significance probability mapping: An aid in the topographic analysis of brain electrical activity
Electroen Clin Neuro, 51, 455-462 (1981)

18. Giard M-H, Perrin F, Pernier J, Bouchet P
Brain generators implicated in the processing of auditory stimulus deviance: A topographic event-related potential study
Psychophysiology, 27, 627-639 (1990)

19. Hari R, Aittoniemi K, Järvinen M-L, Katila T, Varpula T
Auditory evoked transient and sustained magnetic fields of the human brain. Lokalization of neural generators
Exp Brain Res, 40, 237-240 (1980)

20. Hari R, Pelizzone M, Mäkelä J P, Hällström J, Leinonen L, Lounasmaa O V
Neuromagnetic responses of the human auditory cortex to on- and offset of noise bursts
Audiology, 26, 31-43 (1987)

21. Hegerl U, Klotz S, Ulrich G
Late acoustically evoced potentials-effects of age, sex and different study conditions
EEG-EMG-Z Elek Elekt, 16, 171-178 (1985)

22. Hillyard S A, Hink R F, Schwent V L, Picton T W
Electrical signs of selective attention in the human brain
Science, 182, 177-180 (1973)

23. Hillyard S A, Kutas M
Eletrophysiology of cognitive proesses
Ann Rev Psychol, 34, 33-61 (1983)

24. Hoke M
Grundlagen und diagnostische Möglichkeiten der ERA (Electric Response Audiometry)
Aktuel Neurol, 6, 53-70 (1979)

25. Hyde M
The N1 Response and its Applications
Audiol Neurootol, 2, 281-307 (1997)

26. Jewett D L, Williston J S
Auditory-evoced far fields averaged from the scalp of humans
Brain, 94, 681-696 (1971)

27. Kane N M, Curry S H, Rowlands C A, Manara A R, Lewis T, Moss T, Cummins B H, Butler S R,
Event-related-potentials—neurophysiological tools for predicting emergence and early outcome from traumatic coma
Intens Care Med, 22, 39-46 (1996)

28. Kaufman L, Curtis S, Wang J Z, Williamson S J
Changes in cortical activity when subjects scan menory for tones
Electroen Clin Neuro, 82, 266-284 (1991)

29. Keidel W D
The use of quick correlators in electro-cochleography both in oto-audiography (OAG) and in neuro-audiography (NAG)
Rev Laryngol Otol Rhinol, 92, 709-720 (1971)

30. Koelsch S, Schröger E, Tervaniemi M
Superior pre-attentive auditory processing in musicians
Neuroreport, 10, 1309-1313 (1999)

31. Koelsch S, Gunter T C, Schröger E, Tervaniemi M, Sammler D, Friederici A D
Differentiating ERAN and MMN: an ERP study
Neuroreport, 12, 1387-1389 (2001)

32. Kropotov J D, Näätänen R, Sevostianov A V, Alho K, Reinikainen K, Kropotova O
Mismatch negativity to auditory stimulus change recorded directly from the human temporal cortex
Psychophysiology, 32, 418-422 (1995)

33. Kutas M, Hillyard S A
Reading sensless sentences: brain potentials reflect semantic incongruity
Science, 207, 203-205 (1980)

34. Lütkenhöner B, Steinsträter O
High-precision neuromagnetic study of the functional organization of the human auditory cortex
Audiol Neurootol, 3, 191-213 (1998)

35. Maurer K, Lowitzsch K
Brainstem auditory evoked potentials in reclassification of 143 MS patients
Adv Neurol, 32, 481-486 (1982)

36. Morlet D, Bouchet P, Fischer C
Mismatch negativity and N100 monitoring: potential clinical value and methodological advances
Audiol Neurootol, 5, 198-206 (2000)

37. Näätänen R, Picton T
The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound: A review and an analysis of component structure
Psychophysiology, 24, 375-425 (1987)

38. Näätänen R, Paavilainen P, Alho K, Reinikainen K, Sams M
Do event-related potentials reveal the mechanism of the auditory sensory memory in the brain?
Neurosci Lett, 98, 217-221 (1989)

39. Näätänen R
The role of attention in auditory information processing as revealed by event-related potentials and other brain measures of cognitive function
Behav Brain Sci, 13, 201-288 (1990)

40. Näätänen R, Paavilainen P, Tiitinen H, Jiang D, Alho K
Attention and mismatch negativity
Psychophysiology, 30, 436-450 (1993)

41. Näätänen R, Schröger E, Tervaniemi M, Karakas S, Paavilainen P
Development of a memory trace for complex sound patterns in the human brain
Neuro Report, 4, 503-506 (1993)

42. Näätänen R
The mismatch negativity: a powerful tool for cognitive neurosciene
Ear Hearing, 16, 6-18 (1995)

43. Näätänen R, Alho K
Generators of electrical and magnetic mismatch responses in humans
Brain Topogr, 7, 315-320 (1995)

44. Näätänen R, Alho K
Mismatch negativity, a unique measure of sensory processing in audition
Int J Neuroscience, 80, 317-337 (1995)

45. Näätänen R
Electromagnetic responses of the human auditory cortex generated by sensory memory based processing of tone-frequency changes
Neurosci Lett, 276, 169-172 (1999)

46. Näätänen R, Winkler I
The concept of auditory stimulus representation in cognitive neuroscience
Psychol Bull, 6, 826-859 (1999)

47. Näätänen R
The perception of speech sounds by the human brain as reflected by the Mismatch negativity (MMN) and ist magnetic equivalent MMNm
Psychophysiology, 38, 1-21 (2001)

48. Näätänen R, Tervaniemi M, Sussman E, Paavilainen P, Winkler I
Primitive intelligence in the auditory cortex
Trends Neurosci, 5, 283-288 (2001)

49. Nyman G, Alho K, Laurinen P, Paavilainen P, Radil T, Reinikainen K, Sams M, Näätänen R
Mismatch negativity (MMN) for sequences of auditory and visual stimuli: evidence for a mechanism specific for auditory modality
Electroen Clin Neuro, 77, 436-444 (1990)

50. O´Donnell B R, Cohen R A, Hokama H, Cuffin B N, Lippa C, Shenton M E, Drachman D A
Electrical source analysis of auditory ERPs in medial temporal lobe amnestic syndrome
Electroen Clin Neuro, 87, 394-402 (1993)

51. Paavilainen P, Alho K, Reinikainen K, Sams M, Näätänen R
Right hemisphere dominance of different mismatch nrgativities
Electroen Clin Neuro, 78, 466–479 (1991)

52. Paavilainen P, Tiitinen H, Alho K, Näätänen R
Mismatch negativity to slight pitch changes outside strong attentional focus
Biol Psychol, 37, 23-41 (1993)

53. Paavilainen P, Simola J, Jaramillo M, Näätänen R, Winkler I
Preattentive extraction of abstract feature conjunctions from auditory stimulation as reflected by the mismatch negativity (MMN)
Psychophysiology, 38, 359-365 (2001)

54. Paller K A, McCarthy G, Wood C C
Event-related potentials elicited by deviant endings to melodies
Psychophysiology, 29, 202-206 (1992)

55. Pantel A D, Peretz I, Tramo M J, Labreque R
Processing prosodic and musical patterns: A neuropsychological investigation
Brain Lang, 61, 123-144 (1998)

56. Pantev C, Bertrand O, Eulitz C, Verkindt C, Hampson S, Schuierer G, Elbert T
Specific tonotopic organizations of different areas of the human auditory cortex revealed by simultaneous magnetic and electric recordings
Electroen Clin Neuro, 94, 22-40 (1995)

57. Pekkonen E, Rinne T, Näätänen R
Variability and replicability of the mismatch negativity
Electroen Clin Neuro, 96, 546-554 (1995)

58. Pekkonen E, Rinne T, Reinikainen K, Kujala T, Alho K, Näätänen R
Aging effet of auditory processing: an event-related potential study
Exp Aging Res, 22, 171-184 (1996)

59. Petsche H, Pockberger H, Rappelsberger P
Music perception, EEG and musical training
EEG-EMG-Z Elek Elekt, 16, 183-190 (1985)

60. Picton T W, Hillyard S A
Human auditory evoked potentials. II. Effects of attention
Electroen Clin Neuro, 36, 191-199 (1974)

61. Picton T W, Campbell K R, Baribeau-Brown J, Proulx J B
The neurophysiology of human attention: a titorial review
In: Requin J (Hrsg), Attention and Performance VII., 1. Aufl., Erlbaum, Hillsdale, New Jersey, S. 429-467 (1987)

62. Polich J, Squire L R
P300 from amnestic patients with bilateral hippocampal lesions
Electroen Clin Neuro, 86, 408-417 (1993)

63. Reite M, Adams M, Simon J, Teale P, Sheeder J, Richardson D, Grabbe R
Auditory M_{100} component 1: Relationship to Heschl`s gyri
Cogn Brain Res, 2, 13-20 (1994)

64. Riemann H
Ideen zu einer „Lehre von den Tonvorstellungen“
In: Schwartz R (Hrsg), Jahrbuch der Musikbibliothek Peters 21/22, für 1914/15, 1. Aufl., Musikbibliothek Peters, Leipzig, S.1-26 (1916)

65. Ritter W, Vaughan H, Costa L
Orienting and habituation to auditory stimuli: A study of short-term changes in average evoked responses
Electroen Clin Neuro, 25, 550-556 (1968)

66. Rogers R L, Papanicolao A C, Baumann S B, Bourbon W T, Alagarsamy S, Eisenberg H M
Localization of P3 sources using magnetoencephalography and magnetic resonance imaging
Electroen Clin Neuro, 79, 308-321 (1991)

67. Rüsseler J, Altenmüller E, Nager W, Kohlmetz C, Munte T F
Event-related brain potentials to sound omissions differ in musicians and non-musicians
Neurosci Lett, 308, 33-36 (2001)

68. Salo S K, Lang A H, Salmivalli A J
Effect of contralateral white noise masking on the mismatch negativity
Scand Audiol, 24, 165-173 (1995)

69. Sams M, Hari R, Rif J, Knuutila J
The human auditory sensory memory trace persists about 10 sec: Neuromagnetic evidence
J Cognitive Neurosci, 5, 363-370 (1993)

70. Scherg M, von Cramon D
Evoked dipole source potentials of the human auditory cortex
Electroen Clin Neuro, 65, 344-360 (1986)

71. Simson R, Vaughan M G, Ritter W
The scalp topography of potentials in auditory and visual discrimination tasks.
Electroen Clin Neuro, 24, 528-535 (1977)

72. Sohmer H, Feinmesser M
Cochlear action potentials recorded from the external ear in men
Ann Otol Rhinol Laryngol, 76, 427-435 (1967)

73. Spreng M, Keidel W D
Seperation of the cerebro-audiogram (CAG), neuro-audiogram (NAG) and oto-audiogram (OAG) in the objection audiometry
Arch Klein Exp Ohren Nasen Kehlkopfheilkd, 189, 225-246 (1967)

74. Starr A, Hamilton A E
Correlation between confirmed sites of neurological lesions and abnormalities of far-field auditory brainstem responses
Electroen Clin Neuro, 41, 595-608 (1976)

75. Sutton S, Braren M, Zubin J, John E R
Evoked-potential correlates of stimulus uncertainty
Science, 150, 1187-1188 (1965)

76. Tarkka I M, Stokic D S, Basile L H F, Papnicolaou A C
Electric source localization of the auditory P300 agrees with magnetic source localization
Electroen Clin Neuro, 96, 538-545 (1995)

77. Tervaniemi M
Neural representation of abstract stimulus features in the human brain as reflected by the mismatch negativity
Neuroreport, 5, 844-846 (1994)

78. Tervaniemi M, Saarinen J, Paavilainen P, Danilova N, Näätänen R
Temporal integration of auditory information in sensory memory as reflected by the mismatch negativity
Biol Psychol, 38, 157-167 (1994)

79. Tervaniemi M, Ilvonen T, Karma K, Alho K, Näätänen R
The musical brain: brain waves reveal the neurophysiological basis of musicality in human subjects
Neurosci Lett, 226, 1-4 (1997)

80. Tervaniemi M, Ilvonen T, Sinkkonen J, Kujala A, Alho K, Huotilainen M, Näätänen R
Harmonic partials facilitate pitch discrimination in humans: electrophysiological and behavioral evidence
Neurosci Lett, 279, 29-32 (2000)

81. Tervaniemi M, Rytkonen M, Schröger E, Ilmoniemi R J, Näätänen R
Superior formation of cortical memory traces for melodic pattern in musicians
Learn Mem, 8, 295-300 (2001)

82. Tiitinen H, Alho K, Huotilainen M, Ilmoniemi RJ, Simola J, Näätänen R
Tonotopic auditory cortex and the magnetoencephalographic (MEG) equivalent of the mismatch negativity
Psychophysiology, 30, 537-540 (1993)

83. Trainor LJ, Mc Donald KL, Alain C
Automatic and controlled processing of melodic contour and interval information measured by electrical brain activity
J Cogn Neurosci, 14, 430-442 (2002)

84. Verleger R
P3-evoking wrong notes: unexpected, awaited, or arousing?
Intern J Neurosci, 55, 171-179 (1990)

85. Walter W G
Effects on anterior brain responses of an expected association between stimuli
J Psychosom Res, 9, 45-49 (1965)

86. Wastell D G
Temporal uncertainty and the recovery function of the auditory EP
In: Barber C (Hrsg): Evoked Potentials, 1. Aufl, MTP Press, Lancaster, S. 491-498 (1980)

87. Wei J H, Chan T C, Luo Y J
A modified oddball paradigm „cross-modal delayed response“ and the research on mismatch negativity
Brain Res Bull, 57, 221-230 (2002)

88. Woldorff M, Hackley S A, Hillyard S A
The effects of channel-selective attention on the mismatch negativity wave elicited by deviant tones
Psychophysiology, 29, 337-349 (1991)

89. Yabe H, Tervaniemi M, Reinikainen K, Näätänen R
Temporal window of integration revealed by MMN to sound omission
Neuroreport, 8, 1971-1974 (1997)

90. Yamaguchi S, Knight R T
P300 generation by novel somatosensory stimuli
Electroen Clin Neuro, 68, 132-148 (1991)

7 Anhang

7.1 Beschreibung von exemplarischen Einzelbeispielen

Im Folgenden geben wir eine exemplarische Beschreibung der EEG- und MEG-Mittelwertkurven je einer musikalischen und einer unmusikalischen Versuchsperson.
Die Beschreibungen bestehen jeweils aus einem Textteil (1. Blatt) und dem entsprechenden Satz individueller Mittelwertkurven (2. Blatt). Die Mittelwertkurven sind in 4 Spalten angeordnet. Die beiden linken Spalten zeigen die magnetische Aktivität in den Meßkanälen 4 – 14 und 18 – 27 (zur Anordnung dieser Kanäle siehe Abb. 4) sowie das Elektrookulogramm (EOG), die Atmung (ATM) und die Signale zur Triggerung der Standard- (TR_2) und der Deviant-Mittelwerte (TR_1). Die beiden rechten Spalten zeigen die Potenzialverläufe an ausgewählten Positionen des 10-20-Systems sowie den Reiz in Form des Schallpegels (TON). Die Standardmittelwerte sind als durchgezogene, die Deviant-Mittelwerte als gestrichelte Kurve dargestellt. Der Beginn der Reizung (Ton oder Tonfolge) ist durch gestrichelte vertikale Linien markiert. Bei den horizontalen Linien handelt es sich um gerätetechnische Nulllinien der MEG- und EEG-Kanäle (die Normalisierung der Grundlinie auf das 200 ms lange Prästimulusintervall erfolgte erst im Zuge des Auswerteprogrammes, mit dem die Amplituden und Latenzen bestimmt wurden).
Zum Verständnis der nachfolgenden Beschreibungen sei nochmals auf Abbildung 4 verwiesen. Wie dort ersichtlich, sind in der Vormittagssitzung (rechte Hemisphäre) die Kanäle 18 bis 28 (linke Spalte der nachfolgenden Kurvenblätter) präzentral gelegen, wobei die Kanäle 21, 26 und 25 am weitesten frontal liegen. Die Kanäle 4 bis 14 (rechte Spalte) liegen postzentral, mit den Kanälen 8, 12 und 9 am weitesten okzipital.
In der Nachmittagssitzung (linke Hemisphäre) ist dies umgekehrt, die antero-posteriore Anordnung ist spiegelbildlich, d.h. die Kanäle 21, 26 und 25 liegen okzipital, die Kanäle 8, 12 und 9 am weitesten frontal.

Die Differenz der größten Auslenkung zur Nulllinie des jeweiligen Potenzials (N100, P300) wird wie üblich als Amplitude bezeichnet, die Latenz ist der Zeitpunkt des Maximums der Auslenkung.
Dagegen sind die MMN (und das MMF) immer Differenzen zwischen zwei Kurven und keine Absolutwerte. Als Amplitude wird das Maximum der Abweichung der DEV-Kurve gegenüber der STD-Kurve in den negativen Bereich innerhalb eines Latenzfensters von 100 bis 250 ms bezeichnet.

Musikalische Versuchsperson (SR):

Paradigma „Note“:

1. Session (0 Fehler):

EEG: Die Versuchsperson zeigt im ersten Paradigma alle 3 untersuchten Potenziale deutlich ausgeprägt. N100 STD (durchgezogen) und N100 DEV (gestrichelt) sind nahezu gleich und erreichen in der Elektrode CZ die größte Amplitude mit ca. 7 µV bei einer Latenz von 100 ms. Im Folgenden wird die N100 STD (außer bei Unterschieden) daher stellvertretend für die N100 STD und DEV-Potenziale beschrieben. Sie ist außer bei CZ auch in den Elektroden S1, S2, S3 und S4 mit Amplituden $\geq$ 5 µV noch sehr deutlich und auch in C3, C4 und PZ gut zu erkennen. In den Elektroden T3, T4, T6 und S6 sowie in den okzipitalen Elektroden O1 und O2 stellt sich N100 teilweise nicht, teilweise nur angedeutet dar. Die MMN ist in den Elektroden FZ, F3 und F4 mit einer Amplitude von ca. 8 µV (Latenz ca. 170 ms) am größten. Weitere, annähernd ähnlich große Potenziale sind in allen Elektroden außer F7, F8, T4 und T6 zu erkennen. Die P300 ist in den parietalen Elektroden mit Abstand am größten: so misst sie in der Elektrode PZ beispielsweise ca. 21 µV bei einer Latenz von 370 ms.

MEG: Insbesondere in den parietal lokalisierten Kanälen 13, 5 und 11 ist ein deutliches negatives (d.h. kraniopetales) magnetisches Feld zu sehen, das der N100 STD entspricht. Die größte Amplitude (Kanal 5) beträgt ca. 200 fT (Latenz ca. 100 ms). In den mehr frontal gelegenen Kanälen ist im gleichen Zeitbereich ein positives (kraniofugales) Feld mit einer kleineren Amplitude von ca. 100 fT zu erkennen. Auch im Latenzbereich der elektrischen MMN ist in den hinteren Kanälen (besonders deutlich in 13, 10, 12, 5, 11, 7 und 8) ein deutliches magnetisches Korrelat (MMF) dieses Potenzials zu erkennen, und zwar in Form eines bis zu 180 fT negativeren Feldes in der DEV-Bedingung als in der STD-Bedingung (Kanal 5). Das MMF dauert ca. 120 ms. Anschließend kehrt sich die Differenz zwischen DEV und STD in positive Werte um, in einem Zeitbereich, der dem Beginn der elektrischen P300 entspricht. Auch in den mehr frontal lokalisierten Kanälen ist ein negatives MMF mit einer Latenz von 150 ms zu erkennen (z.B. in den Kanälen 23, 22, 28 und 27); der nachfolgende biphasische Verlauf (positiv - negativ) des DEV-Feldes müßte bei Zugrundelegung eines Latenzkriteriums ein Äquivalent der elektrischen P300 sein.

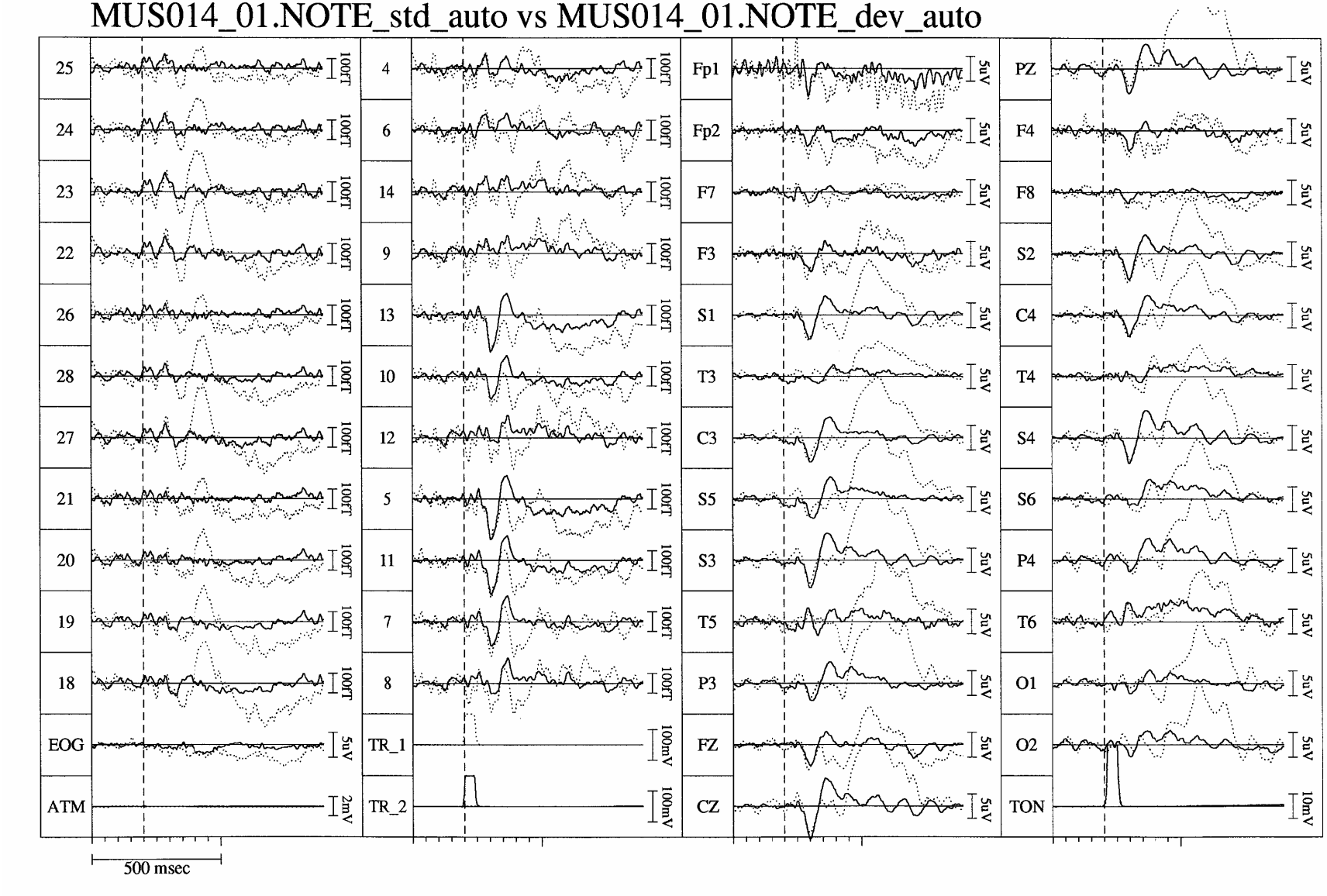


Abb.12: EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen musikalischen Versuchsperson für das Paradigma Note in der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

2. Session (1 Fehler):
EEG: Die N100 STD ist im Vergleich zum Vormittag etwas kleiner, die maximale Amplitude in der Elektrode CZ misst ca. 5µV, die Latenz beträgt 100 ms. Die MMN ist in vielen Elektroden gut zu erkennen, jedoch deutlich kleiner als am Vormittag. Die größte Amplitude beträgt ca. 2,5 µV (Elektrode FZ), bei einer Latenz von ca. 170 ms. Die in fast allen Elektroden sichtbare P300 ist deutlich kleiner als in der ersten Sitzung, sie misst maximal 14 µV (Elektrode PZ), die Latenz ist 350 ms.
MEG: In der 2. Sitzung ist in den parietal gelegenen Kanälen in den Kurven der häufigen Reize ein positives (kraniofugales) Feld mit einer Amplitude von ca. 200 fT (z. B. Kanal 27) und einer Latenz von etwas mehr als 100 ms zu sehen, entsprechend der N100 STD. Die Kurven der abweichenden Reize gehen, ohne die Nullinie nochmals zu erreichen in ein größeres positives Feld mit einer Latenz von 150 ms und einer größten Amplitude von 300 fT (Kanal 20) über, das in den Zeitbereich der elektrischen MMN fällt und das mit einer Latenz 250 ms annähernd zur Nullinie zurückkehrt. Im Zeitbereich von 250 bis 500 ms (Dauer der elektrischen P300) ist kein eindeutiges Feld zu erkennen, die Kurven der abweichenden Reize verlaufen in fast allen Kanälen ab ca. 350 ms oberhalb der STD-Kurve. In den frontal liegenden Kanälen sind die magnetische N100 und MMF zur Nulllinie spiegelverkehrt und kleiner.

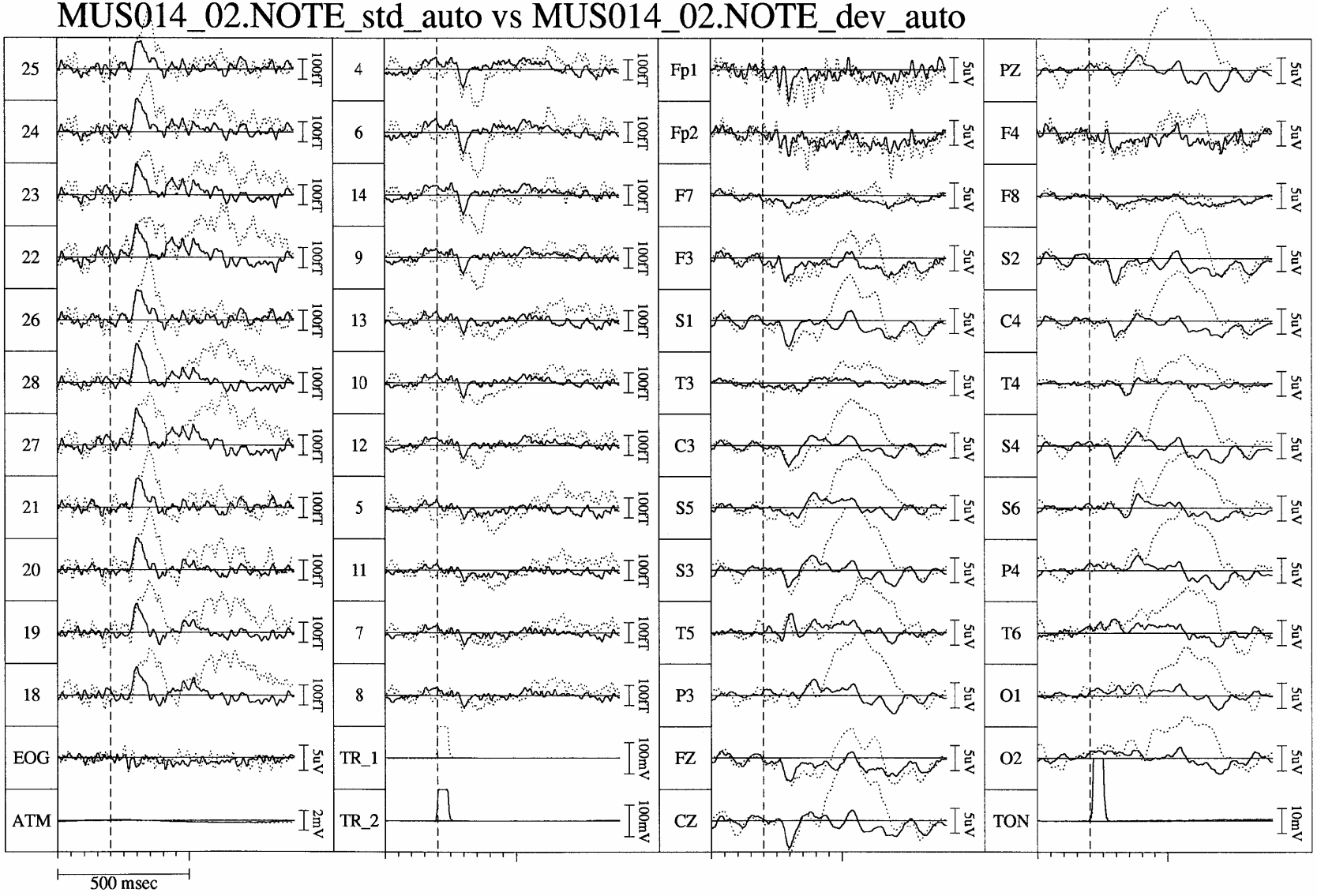


Abb.13: EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen musikalischen Versuchsperson für das Paradigma Note in der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

Paradigma „Chord“:

1. Session (0 Fehler):

EEG: Die N100 STD hier erscheint im Gegensatz zum ersten Paradigma nicht so spitz zulaufend, sondern etwas abgeflacht. Die größte Amplitude in der Elektrode CZ ist mit ca. 5 µV kleiner als bei „Note“ (Latenz: ca. 110 ms, die Latenz der N100 DEV scheint minimal früher). Die Größenverteilung über die Elektroden entspricht der Bedingung „Note“. Die MMN, die in allen Elektroden außer F7, F8, T3 und T4 deutlich ist, hat eine größte Amplitude mit 6,5 µV z.B. in FZ (Latenz ca. 240 ms). Die P300 ist wieder in den parietalen Elektroden PZ, P3 und P4 sowie in den Elektroden CZ, S3 und S4 groß, wobei die größte Amplitude mit ca. 12 µV deutlich kleiner als bei „Note“ ist (Latenz: ca. 470 ms).

MEG: Auch in den magnetischen Ableitungen erscheint der Gipfel der N100 breiter als bei „Note“. Das größte negative Feld in den parietal gelegenen Kanälen 13 und 5 misst ca. 170 fT, die Latenz beträgt ca. 120 ms. Auch ein negatives MMF lässt sich insbesondere in den Kanälen 13, 10 und 5 erkennen: Seine maximale Amplitude in Kanal 13 (und 5) ist ca. 90 fT bei einer Latenz von ca. 260 ms. Im Latenzbereich der elektrischen P300 (Dauer von 350 bis 600 ms, Peak bei ca. 450 ms) findet man in den hinteren Kanälen kein eindeutig ihr zuordenbares Feld.

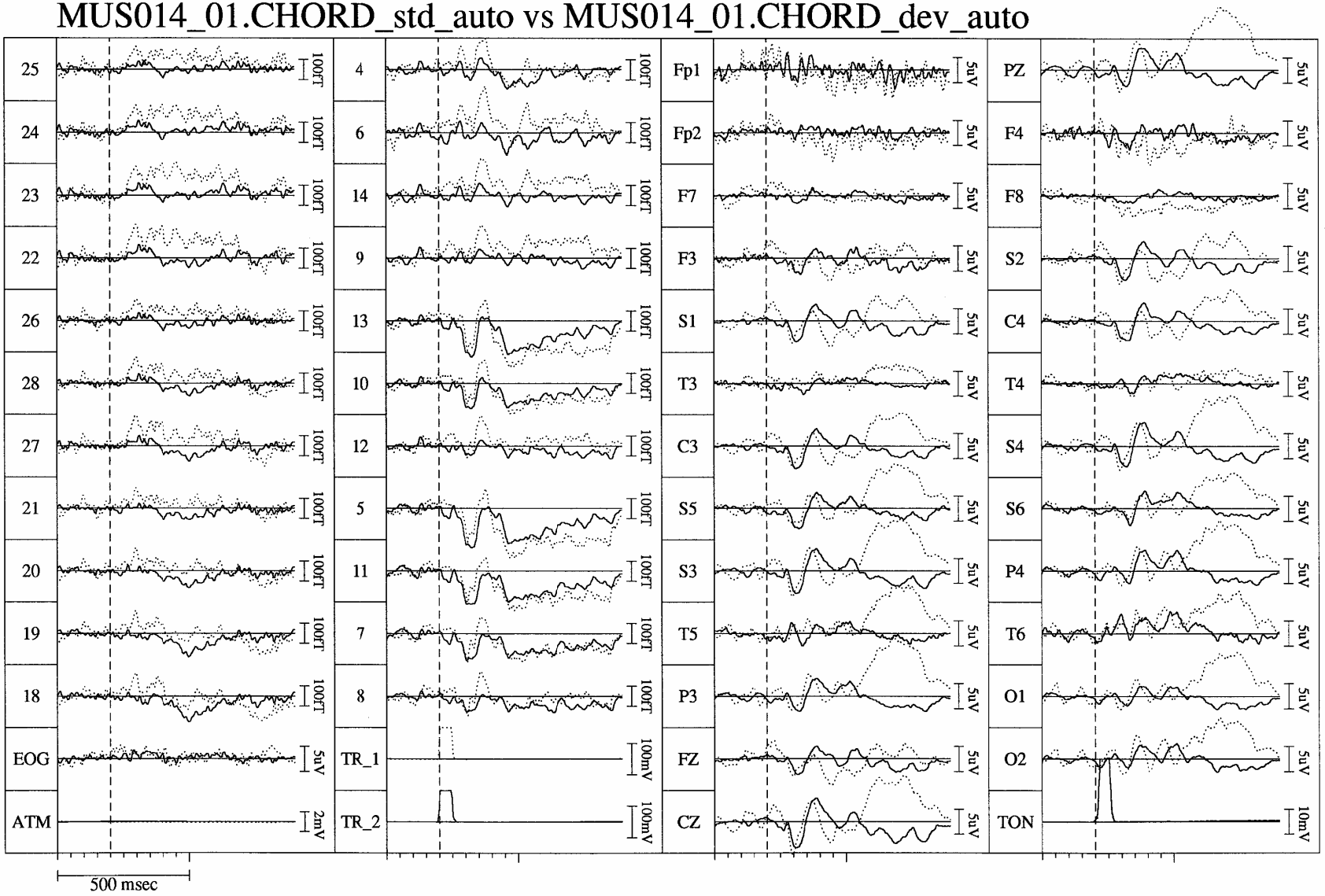


Abb.14: EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen musikalischen Versuchsperson für das Paradigma Chord in der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

2. Session (1 Fehler):

EEG: Im Vergleich zur ersten Sitzung ist die N100 (STD und DEV) mit einer Amplitude von ca. 7 µV (Elektrode CZ) größer, die Latenz beträgt 100 ms. Abgesehen der Elektroden F7, F8, T3 und T4 ist in allen Elektroden eine MMN zu erkennen, die Amplitude in FZ beträgt ca. 6 µV bei einer Latenz von 170 ms. Die P300 stellt sich ähnlich wie vormittags mit einer Amplitude von ca. 15 µV und einer Latenz von 350 ms dar.

MEG: Die Kurven sind denen der 2. Sitzung des Paradigmas „Note“ sehr ähnlich, abgesehen davon, dass der positive Peak bei 100 ms (magnetische N100 STD) in der STD-Bedingung in den parietalen Kanälen angedeutet „zweigipflig“ ist. Auf eine detaillierte Beschreibung wird daher verzichtet.

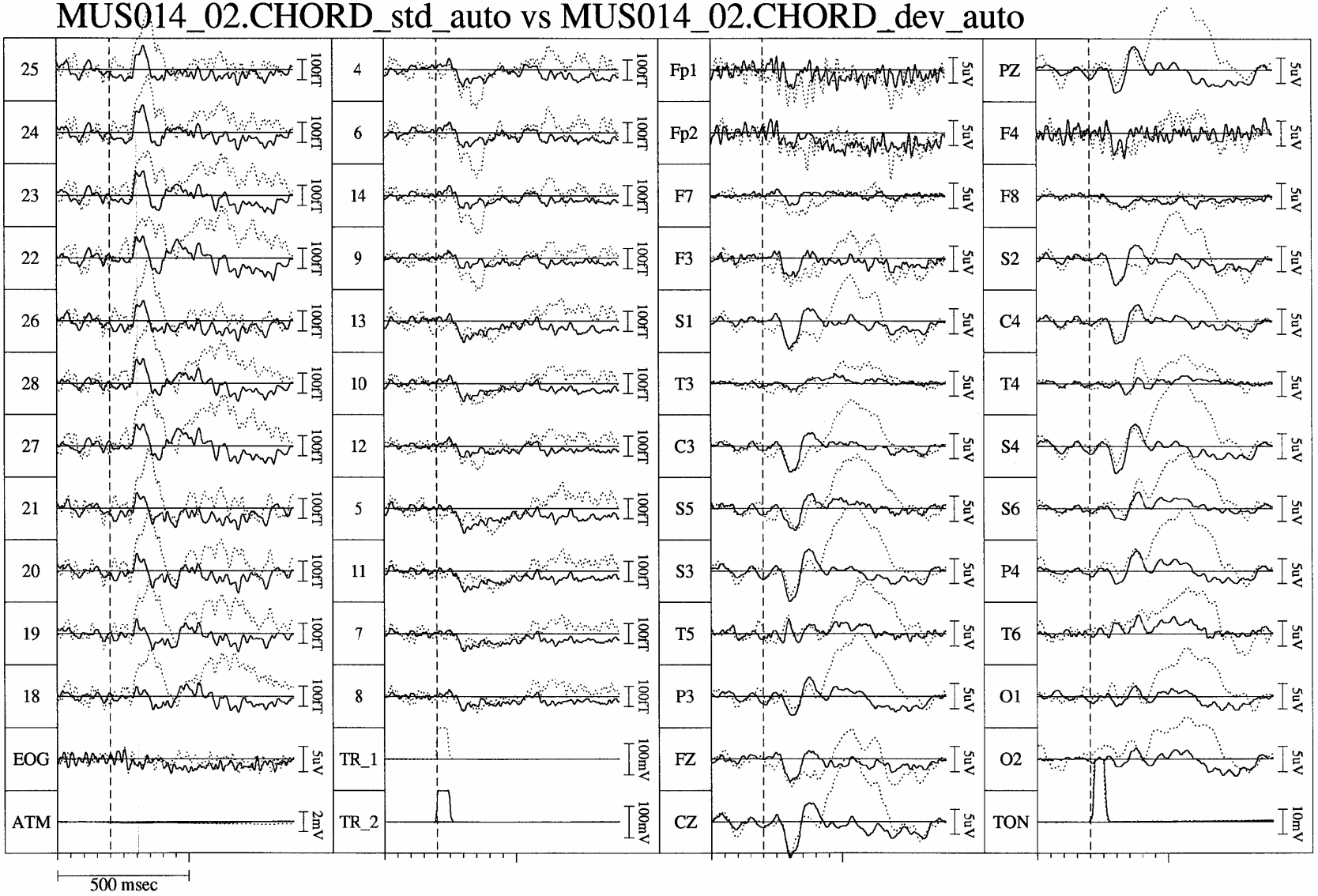


Abb.15 EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen musikalischen Versuchsperson für das Paradigma Chord in der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

Paradigma „Arpeggio“:

1. Session (3 Fehler):

EEG: In dieser Bedingung fällt ein größerer Unterschied zwischen der N100 STD und der N100 DEV auf, so misst die N100 STD z.B. in der Elektrode CZ nur ca. 5 µV, während die Amplitude der N100 DEV ca. 9 µV groß ist. Ähnlich sind die Verhältnisse in den Elektroden C3, S3 und S4, in der Elektrode C4 sind die Potenziale etwas kleiner.

Eine MMN ist auch in dieser Bedingung in den meisten Elektroden zu erkennen, wobei das Potenzial insbesondere in PZ, P3 und P4 sowie in S3 und S4 mit Amplituden um 6 µV groß ist, etwas kleinere Amplituden finden sich in den Elektroden FZ, F3 und F4, die Latenz beträgt ca. 230 ms. Nahezu keine MMN ist in den Elektroden F7, F8, T3 und T4 zu erkennen.

Eine P300 ist in den meisten Elektroden (außer F3, F4, F7 und F8) zu sehen. Das größte Potenzial in der Elektrode PZ misst knapp 15 µV (Latenz: ca. 470 ms).

MEG: Im Vergleich zu „Chord“ ist die magnetische N100 (STD und DEV) hier wieder „spitzgipflig“ und in den Kanälen 13, 10, 5, 11 und 7 (parietal rechts) als deutliche Negativität zu sehen. Das größte Feld in Kanal 5 misst ca. 215 fT bei einer Latenz von 100 ms. Im Bereich der elektrischen MMN erkennt man überwiegend in den hinteren Kanälen, in denen auch eine magnetische N100 zu sehen ist eine Negativität, die im Vergleich zum EEG etwas später (bei ca. 250 ms) beginnt. Auch der Peak ist mit ca. 300 ms später, die maximale Amplitude des Feldes in Kanal 11 beträgt ca. 100 fT. Im Bereich zwischen 400 und 650 ms (entspricht der elektrischen P300) ist in fast allen Kanälen ein negatives magnetisches Feld zu sehen, dieses ist in Kanal 13 am größten und hat hier eine Amplitude von knapp 200 fT.

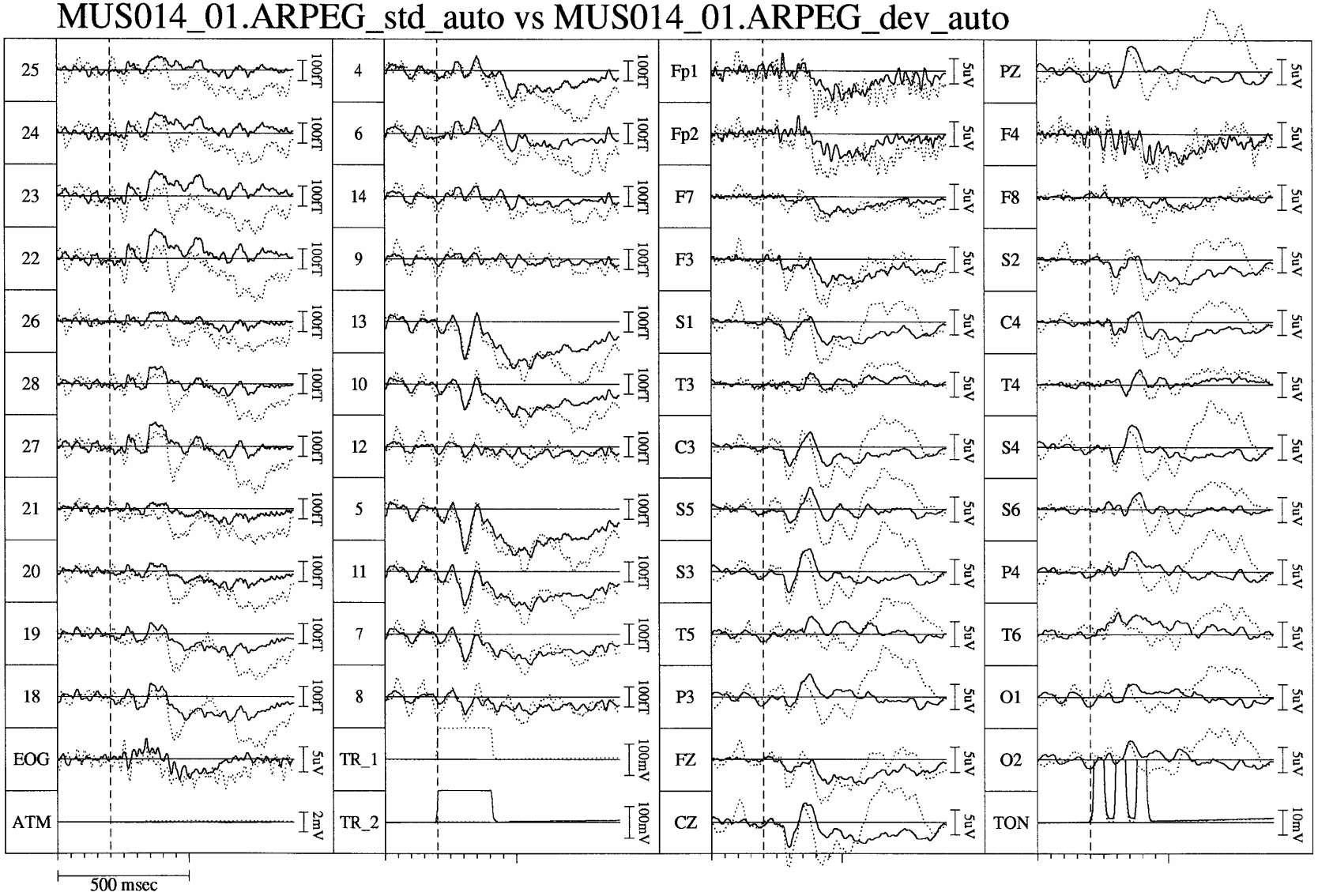


Abb.16: EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen musikalischen Versuchsperson für das Paradigma Arpeggio in der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

2.Session (8 Fehler):

EEG: In dieser Sitzung ist die N100 STD etwas größer als die N100 DEV, die größte Amplitude in der Elektrode CZ misst ca. 8 µV, die Latenz beträgt 100 ms. Eine MMN ist nur angedeutet zu erkennen, teilweise scheint sich in diesem Latenzbereich sogar ein positives Potenzial zu befinden. Die P300 ist nachmittags kleiner, die maximale Amplitude in Elektrode PZ misst 8 µV, die Latenz beträgt ca. 460 ms.

MEG: Wie in den beiden anderen Tonbedingungen ist auch hier in den meisten parieto-okzipital gelegenen Kanälen ein deutliches positives Feld mit einer maximalen Amplitude von knapp 200 fT (z. B. Kanal 28) und einer Latenz von 100 ms zu sehen, während in den präzentralen-frontalen Kanälen keine sicheren Korrelate der N100 sichtbar sind. In den okzipital gelegenen Kanälen zeigt sich während DEV bei ca. 240 ms ein scharfer, kurz dauernder, positiver Peak mit einer Amplitude von maximal ca. 160 ms (Kanal 24), der sich keinem elektrischen Potenzial zuordnen lässt. Die gleiche Aktivitätsspitze deutet sich mit umgekehrter Polarität in den präzentral gelegenen Kanälen (z.B. 5) an. In fast allen Kanälen ist ab ca. 500 ms (Beginn der elektrischen P300 ist bei ca. 400 ms) eine positive Welle mit einer maximalen Amplitude von ca. 250 fT (Kanal 19) zu sehen.

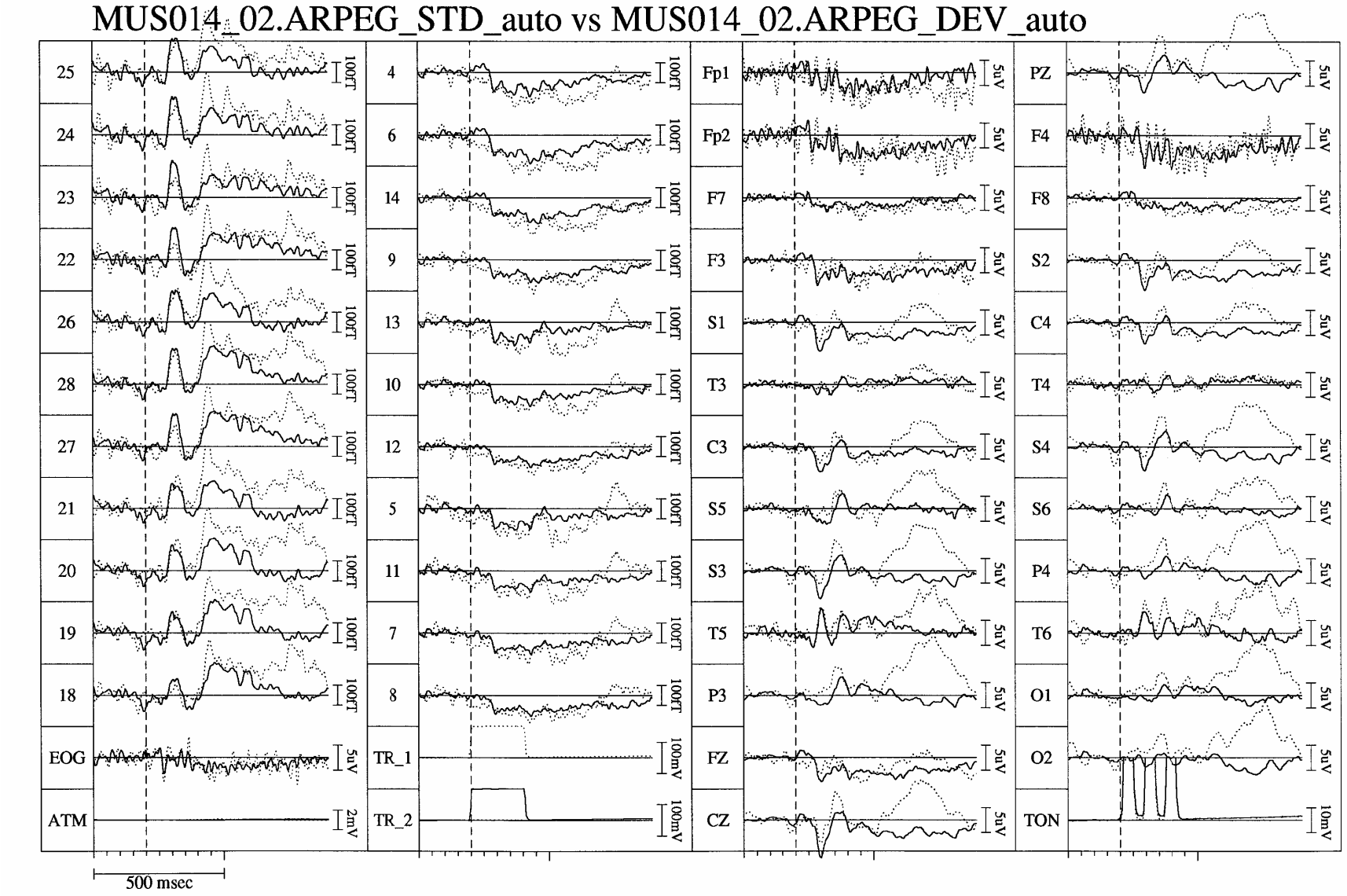


Abb.17: EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen musikalischen Versuchsperson für das Paradigma Arpeggio in der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

Zusammenfassend sind sich die EEG-Kurven der Tonbedingungen, insbesondere von „Note“ und „Chord“, sehr ähnlich; auffällig ist hier lediglich, dass die P300 in der Bedingung „Note“ größer als bei „Chord“ und „Arpeggio“ war und die MMN bei „Arpeggio“ in der zweiten Sitzung nicht sicher abzugrenzen war.
Arpeggio weicht insofern von den beiden anderen Tonbedingungen ab, als hier nicht einer, sondern 3 kurz aufeinander folgende Klangimpulse dargeboten wurden und der kritische (STD oder DEV) davon der mittlere war. Arpeggio war aus diesem Grund die schwierigste der Tonbedingungen (und wurde subjektiv auch so empfunden). Dies mag die fehlende bzw. umgekehrte Polarität der MMN im Nachmittagsversuch erklären.
Deutlich größere Unterscheide, vor allem bezüglich des MMF und der magnetischen P300 zeigen sich in den MEG-Kurven.

Paradigma „Mozart“:

Wie schon erwähnt (siehe auch Abb.3) besteht dieses Paradigma aus drei Tönen pro Reiz, die jeweils zu einer N100 Antwort führen, die im Folgenden als N100/1, N100/2 und N100/3 bezeichnet werden.

1.Session (1 Fehler):

EEG: Dem ersten Ton folgt in vielen Elektroden eine N100/1 (STD und DEV), die in der Elektrode CZ mit einer Amplitude von ca. 4 µV am größten ist. Die Latenz beträgt 100 ms. Eine N100/2 auf den 2. Ton lässt sich allenfalls angedeutet abgrenzen, dagegen ist die N100/3 (auf den 3. Ton) wieder deutlicher ausgeprägt (ebenfalls ca. 4 µV in der Elektrode CZ, Latenz 100 ms).

Eine MMN ist in allen Elektroden außer F7, F8 und T4 sichtbar; das größte Potenzial (8µV) findet sich bei CZ mit einer Latenz von 220 ms. Die P300 ist bei dieser Bedingung sehr groß, die maximale Amplitude beträgt um 17 µV, Latenz: ca. 380 ms (in Elektrode PZ, P3).

MEG: In den magnetischen Ableitungen sind keine Äquivalente der N100 auf die Töne 1, 2 und 3 zu erkennen.

Das MMF dagegen lässt sich in den präzentral gelegenen Kanälen als negatives Feld mit den größten Amplituden in Kanal 27 (ca. 100 fT) abgrenzen. Die anschließende Umkehr dieses Bereiches in ein positives Feld kann zeitlich nicht mehr der elektrischen MMN zugeordnet werden und entspricht eher dem beginnenden Anstieg der P300. In den übrigen Kanälen findet sich ein negatives Potenzial mit einer maximalen Amplitude von ca. 170 fT (11 und 7).

Im Latenzbereich der elektrischen P300 sieht man überwiegend in den vorderen Kanälen eine Abweichung der Kurve in den negativen Bereich, das Feld dauert jedoch länger. Die maximale Amplitude in Kanal 17 und 18 misst ca. 140 fT, das Feld dauert von 350 bis 800 ms.

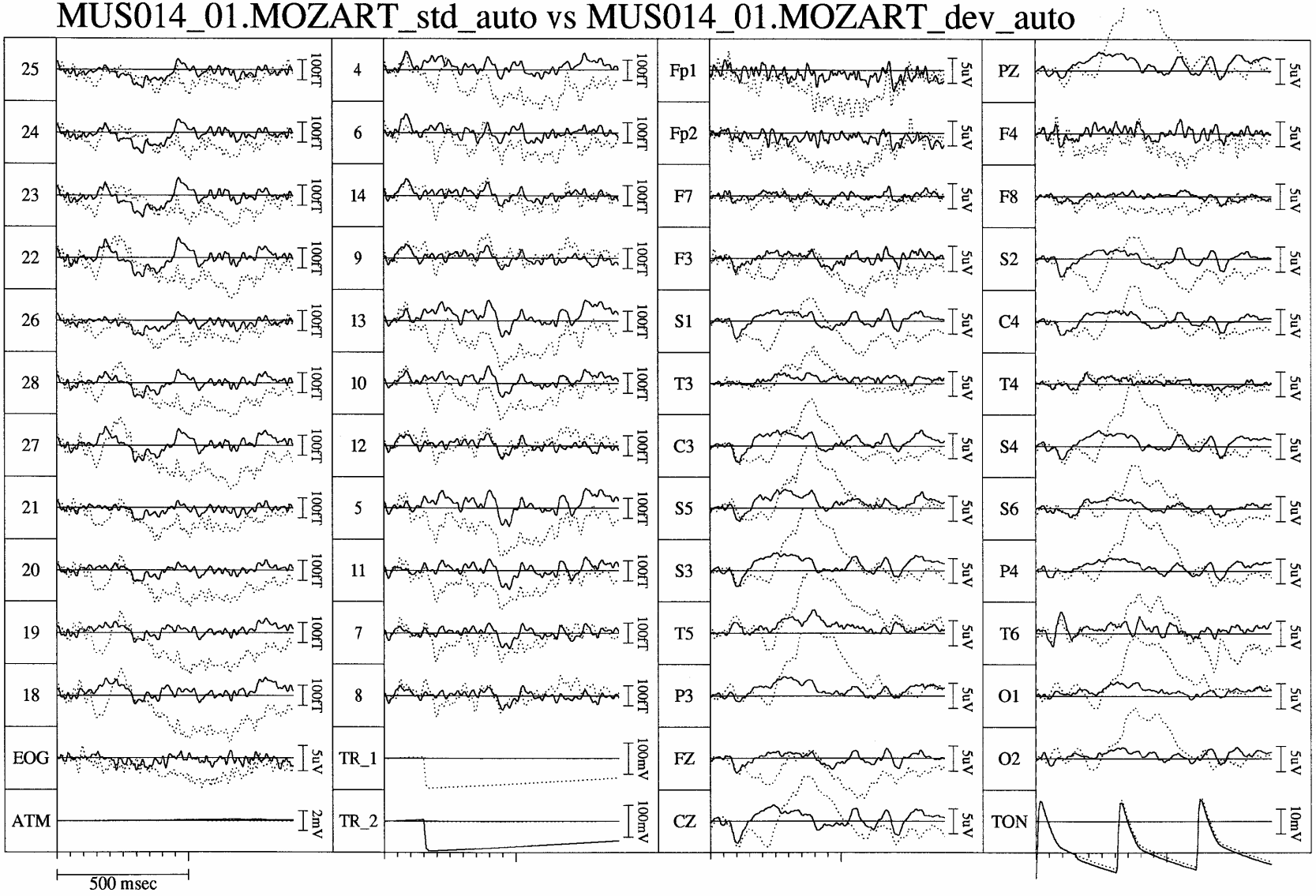


Abb.18: EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen musikalischen Versuchsperson für das Paradigma Mozart in der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

2. Session (2 Fehler):

EEG: Im Gegensatz zur ersten Sitzung lassen sich hier die Potenziale N100/1, N100/2 und N100/3 zumindest bei CZ abgrenzen, mit Amplituden von ca. 3,5 µV (Latenz 100 ms), 3,5 µV (140 ms) und 6 µV (110 ms).

Eine MMN lässt sich in allen Elektroden außer F7, F8, T3 und T4 erkennen; die größte Amplitude (Elektrode S3) misst knapp 6 µV (Latenz 250 ms), in der Elektrode FZ ist das Potenzial 3 µV groß.

Die Amplitude der P300 ist nachmittags deutlich kleiner, der maximale Wert beträgt ca. 8 µV (Elektroden PZ, P3), die Latenz liegt bei ca. 400 ms.

MEG: In den präzentral gelegenen Kanälen lassen sich die Äquivalente der drei N100-Potenziale als negative Auslenkung abgrenzen. Zwischen den verschiedenen Kanälen gibt es keine wesentlichen Größenunterschiede; die Amplituden messen jeweils ca. 100 fT, die Latenzen liegen bei 100 ms (N100/1), 140 ms (N100/2) und 120 ms (N100/3).

In den meisten Kanälen, insbesondere den parieto-okzipitalen, lässt sich ein negatives MMF erkennen, die größten Amplituden, z. B. in den Kanälen 5,11 und 7 liegen bei 100 fT (Latenz: 220 ms).

Ein magnetisches Äquivalent der P300 lässt sich als positive Auslenkung insbesondere über den parietalen Kanälen erkennen (maximale Amplitude 170 fT, Kanal 20). Die Latenz beträgt 450 ms, das Feld dauert von 400 bis ca. 700 ms.

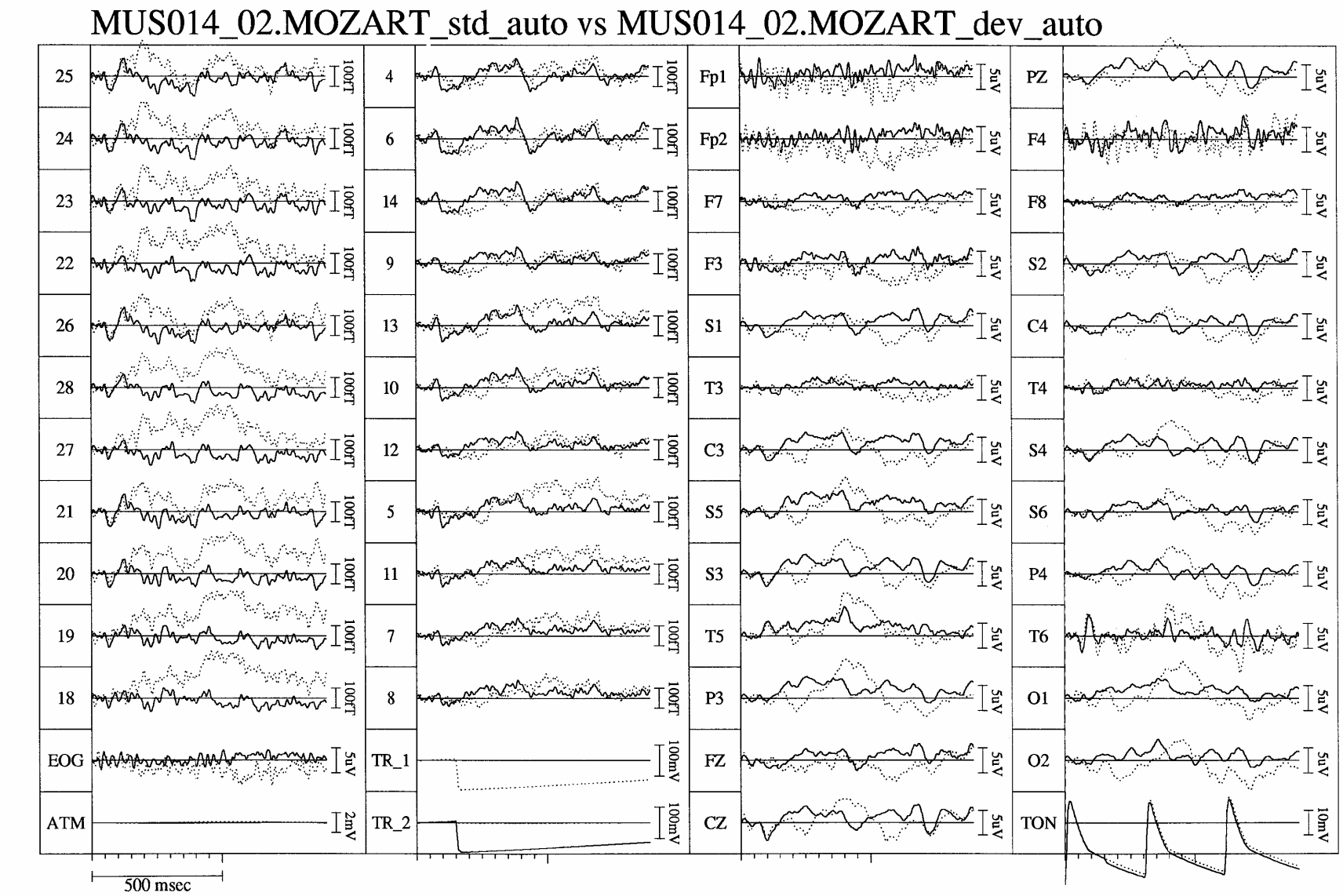


Abb.19: EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen musikalischen Versuchsperson für das Paradigma Mozartin der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

Paradigma „Bach“:

1. Session (28 Fehler):

EEG: Hier lassen sich, wie bereits erwähnt, keine einzelnen N100-Potenziale unterscheiden, vielmehr zeigen sich sinusoidale Schwingungen. Dagegen lassen sich sowohl eine deutliche MMN wie auch eine P300 abgrenzen. Die maximale MMN in der Elektrode PZ misst 7µV (FZ dagegen nur 4 µV), die Latenz liegt bei 160 ms.

Die deutliche P300 in Elektrode PZ misst ca. 10 mV, Latenz 400 ms.

MEG: Auch hier zeigen sich ausgeprägte Schwingungen um die Grundlinie, mit einer Amplitude von bis zu 90 fT und einer Phasenumkehr zwischen prä- und postzentralen Kanälen (vgl. z.B. Kanäle 23 und 13). Auch das MMF und die P300m lassen sich in diesen Kanälen besser abgrenzen. Das (negative) MMF ist in den Kanälen 13, 5 und 11 mit ca. 100 fT besonders groß (Latenz: 170 ms), und in den gleichen Kanälen erreicht auch eine negative Auslenkung im Zeitraum der elektrischen P300 zwischen 400 und 600 ms ihre größten Werte (ca. 150 fT).

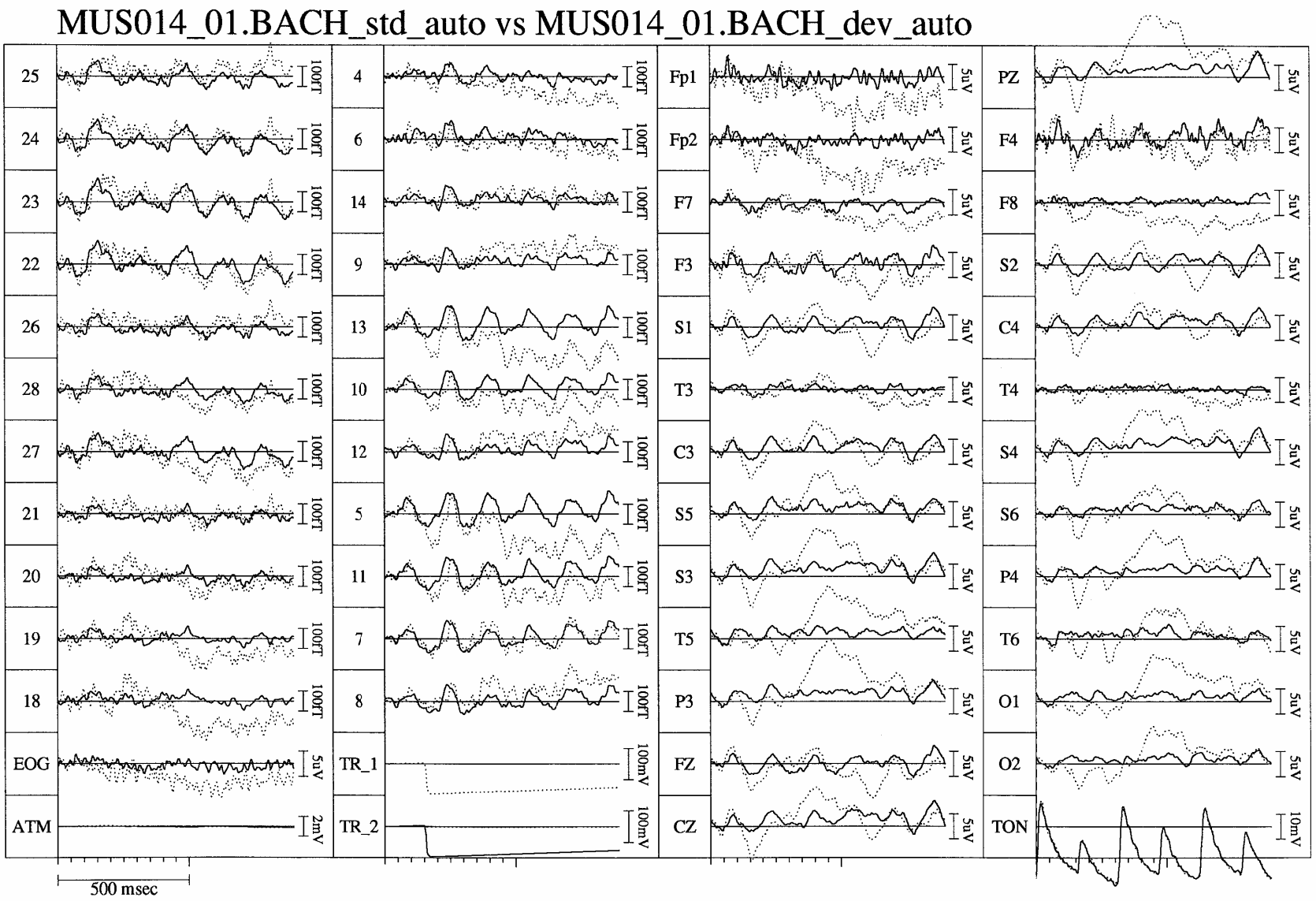


Abb.20: EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen musikalischen Versuchsperson für das Paradigma Bach in der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

2.Session (53 Fehler):
EEG: Es zeigen sich Schwingungen mit einer Amplitude von ca. 2 µV. Die MMN ist kleiner als vormittags und misst ca. 3 µV (z. B. Elektrode P3, nur gering kleiner in FZ), die Latenz beträgt ca. 170 ms. Auch die P300 ist in dieser Sitzung kleiner, das maximale Potenzial in der Elektrode PZ misst 7 µV (Latenz: 450 ms).
MEG: Die Schwingungen um die Grundlinie sind etwas kleiner als in der ersten Sitzung, zeigen aber wieder eine antero-posteriore Phasenumkehr; die größte Amplitude in Kanal 27 beträgt ca. 80 fT. Im Latenzbereich zwischen 125 und 280 ms ist besonders in den postzentralen Kanälen ein positives Feld mit einer maximalen Amplitude von 120 fT (Kanal 26) zu erkennen, in den vorderen Kanälen ist nur ein kurzer positiver Peak bei 200 ms zu sehen. Sichere Korrelate von P300 sind nicht erkennbar, allenfalls angedeutet positive Abweichung in den parieto-okzipitalen Kanälen 18 – 20.

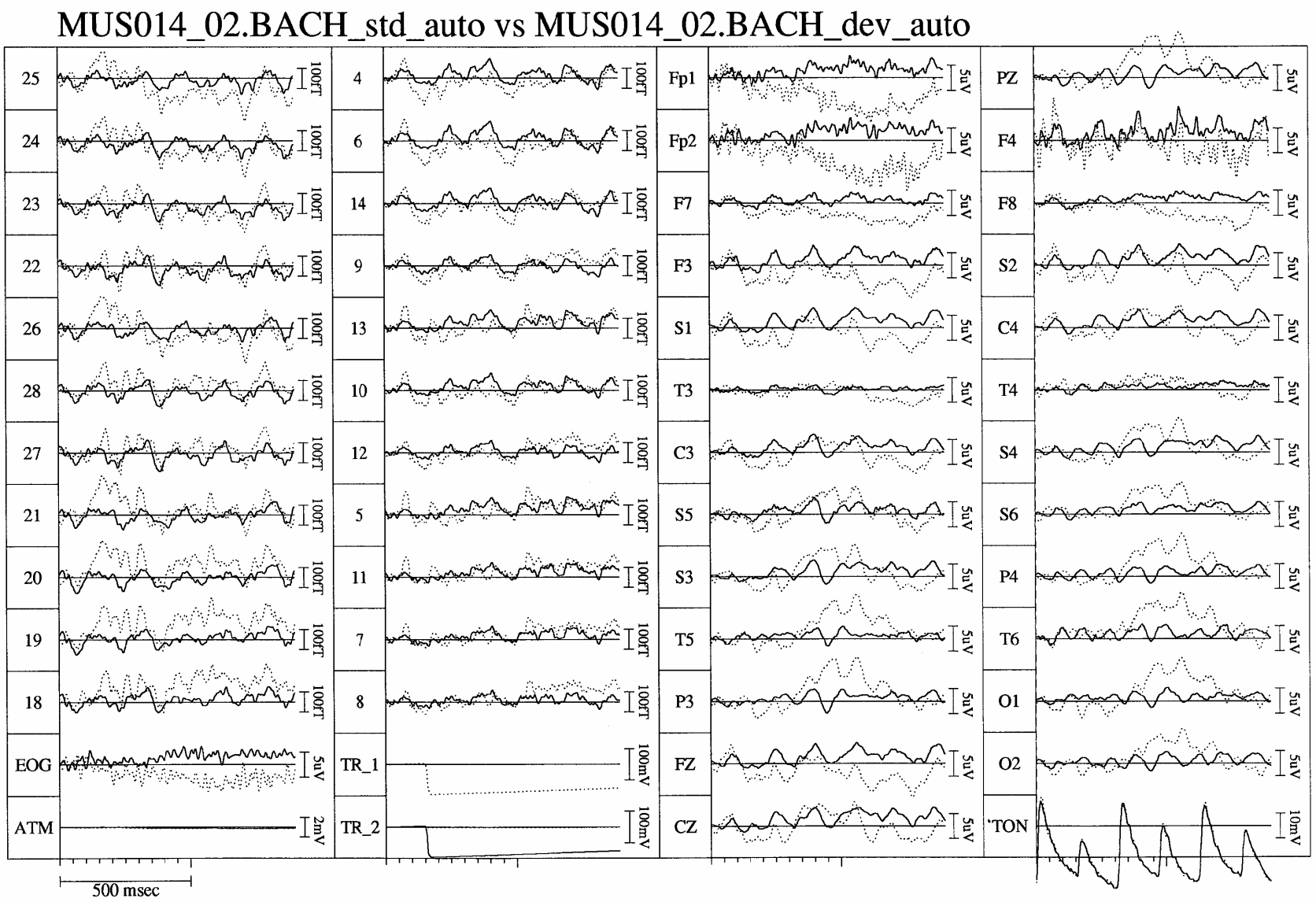


Abb.21: EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen musikalischen Versuchsperson für das Paradigma Bach in der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

Unmusikalische Versuchsperson (AG):

Paradigma „Note“:

1. Session (4 Fehler):

EEG: Bei der unmusikalischen Versuchsperson ist in den frontalen und zentralen sowie in den zusätzlichen Elektroden eine N100 STD und DEV zu sehen; das Potenzial erreicht Werte von bis zu 5µV (Elektroden CZ, SZ) bei einer Latenz von 100 ms. Eine MMN ist hauptsächlich in den frontalen Elektroden zu erkennen, mit einer maximalen Amplitude von 4,5 µV (z.B. in FZ, Latenz: 250 ms).

Im Vergleich zu der musikalischen Versuchsperson fällt insbesondere die deutlich kleinere Amplitude der P300 auf, die maximal ca. 7 µV (PZ) bei einer Latenz von 400 ms misst.

MEG: In den parietalen/postzentralen Kanälen ist eine deutliche N100m mit einer maximalen Amplitude von knapp 200 fT (z.B. Kanal 13, 10 und 5) und einer Latenz von 100 ms zu sehen, in den präzentralen Kanälen 23, 24 und 25 ist ein kleines positives Äquivalent derselben Latenz zu erkennen. Ein (negatives) MMF ist ebenfalls überwiegend in den postzentralen Kanälen abzugrenzen mit Amplituden von bis zu 120 fT bei einer Latenz von 200 ms (z.B. Kanäle 15, 10 und 5). Ein positives Feld mit einer Latenz von ca. 300 ms (P300m) lässt sich in den präzentralen Kanälen 26, 21, 20 und 19 geringer in 28, 27 und 18 abgrenzen, die maximale Amplitude in Kanal 21 beträgt etwa 110 fT.

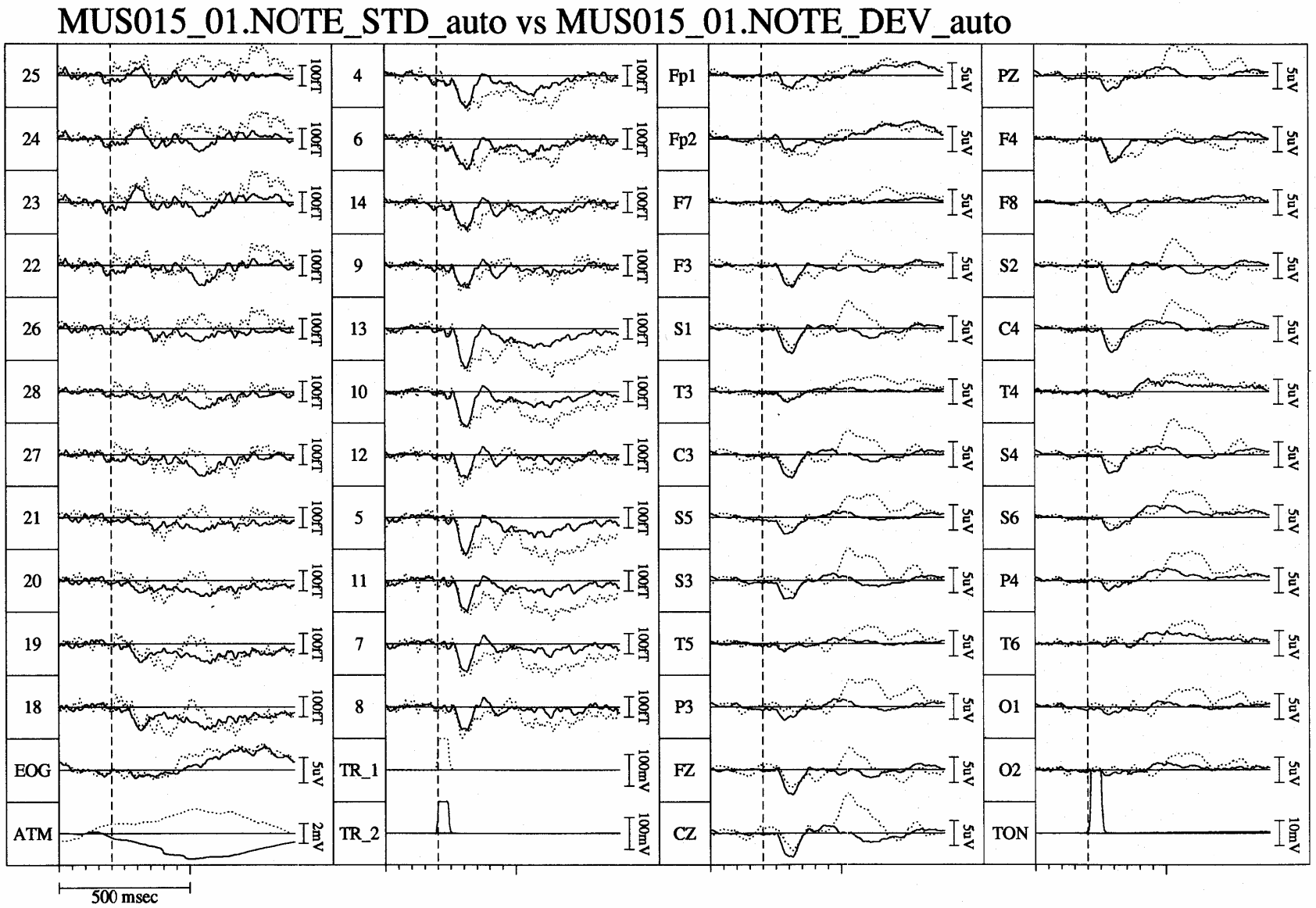


Abb.22: EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen unmusikalischen Versuchsperson für das Paradigma Note in der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

2.Session (3 Fehler):

EEG: Im Vergleich zur Vormittagssitzung zeigen sich bezüglich der N100 keine großen Unterschiede, die maximale Amplitude der N100 STD und DEV beträgt (in der Elektrode CZ) knapp 5 µV bei einer Latenz von 100 ms. Eine MMN lässt sich dagegen allenfalls in FZ und F3 andeutungsweise erkennen. Die P300 ist nachmittags etwas größer (ca. 9 µV in Elektrode CZ und PZ) und dauert in den meisten Ableitungen länger (z.B. von 260 bis 600 ms in o.g. Elektroden). Durch ein mögliches EOG-Artefakt (siehe Abb.) wird die Beurteilung der P300 erschwert, so darf das scheinbare Maximum in den frontalen Elektroden nicht als P300 gedeutet werden, die parietalen Werte sind dagegen wahrscheinlich richtig.

MEG: Hier sind über den postzentral gelegenen Kanälen positive Felder mit einer maximalen Amplitude von etwa 200 fT (25, 24, 23 und 26) und einer Latenz von 100 ms, entsprechend der N100m zu erkennen. Ein positives MMF ist besonders deutlich über den Kanälen 23, 22, 26 und 27 und misst ca. 110 fT, bei einer Latenz von 200 ms. Eine kleine negative P300m zeigen die präzentralen Kanäle 4, 6 und 14.

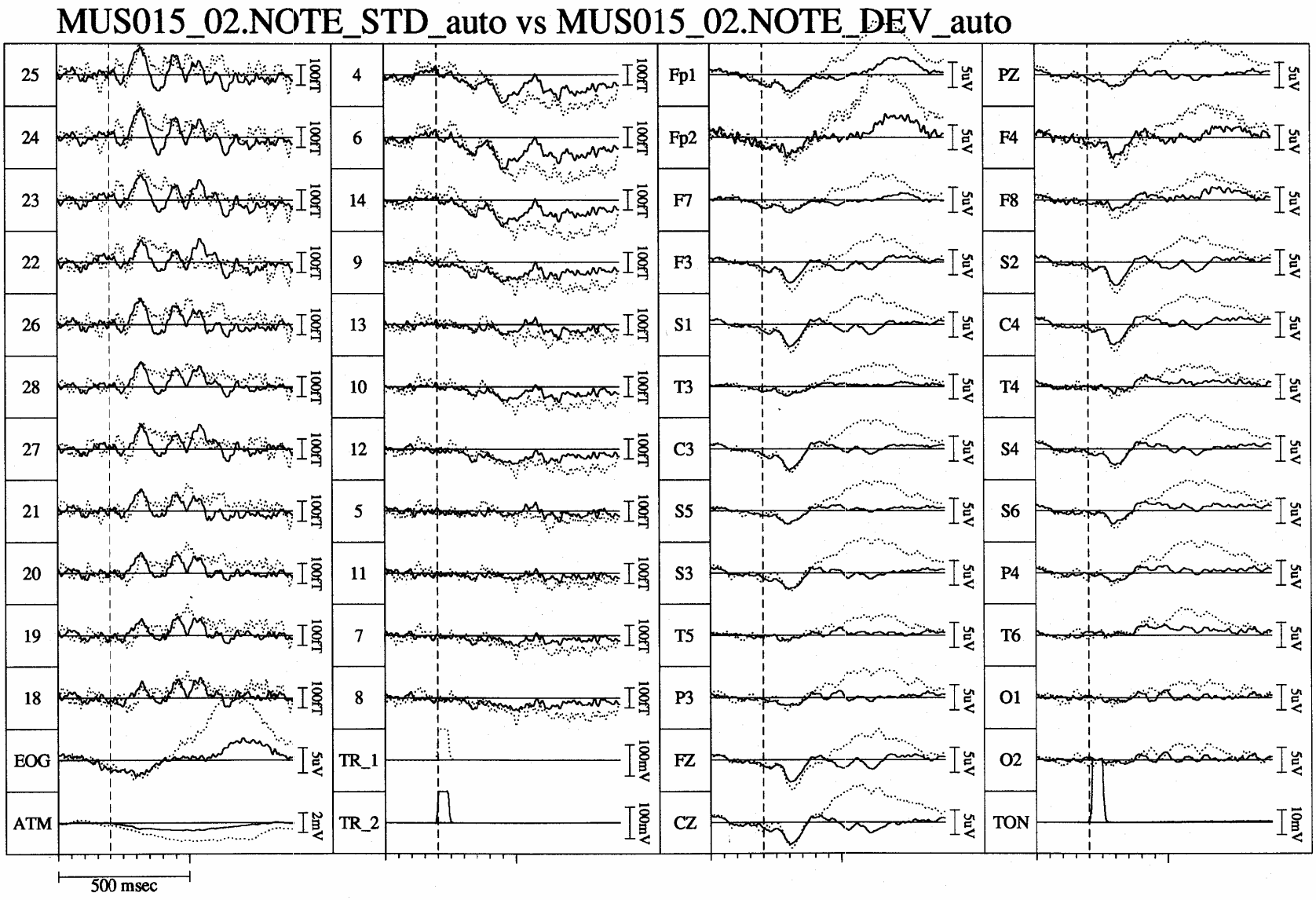


Abb.23: EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen unmusikalischen Versuchsperson für das Paradigma Note in der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

Paradigma „Chord“:

1.Session (100 Fehler):

EEG: Die Amplitude der N100 (STD und DEV) ist vor allem fronto-zentral ausgeprägt und beträgt in der Elektrode CZ 4 µV. Wie schon aufgrund der 100 Fehler zu vermuten war, ist weder eine MMN noch eine P300 zu erkennen: Die Kurven der häufigen und seltenen Reize zeigen einen annähernd gleichen Verlauf.

MEG: Über allen postzentral gelegenen Kanälen ist eine typische negative N100m mit einer maximalen Amplitude von ca. 160 fT zu sehen. Magnetisch stellt sich in den postzentralen Kanälen auch ein kleines, positiv gerichtetes MMF dar (z.B. in Kanal 6: 50 fT). Ein sicheres Äquivalent einer P300m ist nicht zu erkennen, in Übereinstimmung mit dem Fehlen einer P300 in den EEG-Elektroden.

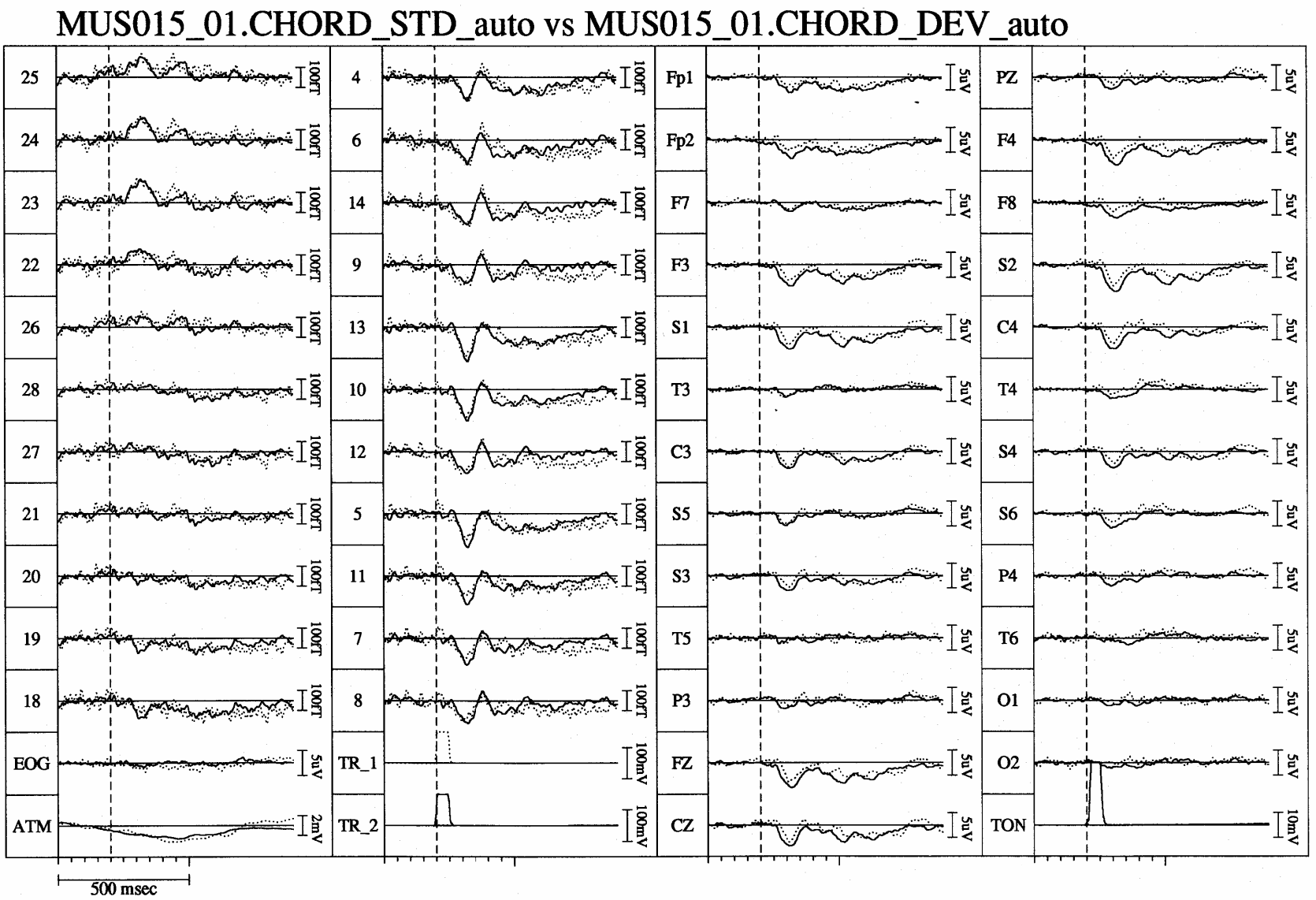


Abb.24: EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen unmusikalischen Versuchsperson für das Paradigma Chord in der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

2. Session (100 Fehler):

EEG: Die Kurven der Nachmittagssitzung ähneln, bei der gleichen Fehleranzahl, denen der 1. Sitzung.

MEG: In den postzentralen Kanälen ist ein positiver Peak mit einer Latenz von 100 ms und einer maximalen Amplitude von 110 fT (z.B. 22 und 27) zu erkennen. Ansonsten verlaufen die beiden Kurven der häufigen und seltenen Reize ähnlich; es lässt sich kein eindeutiges MMF oder eine P300m abgrenzen.

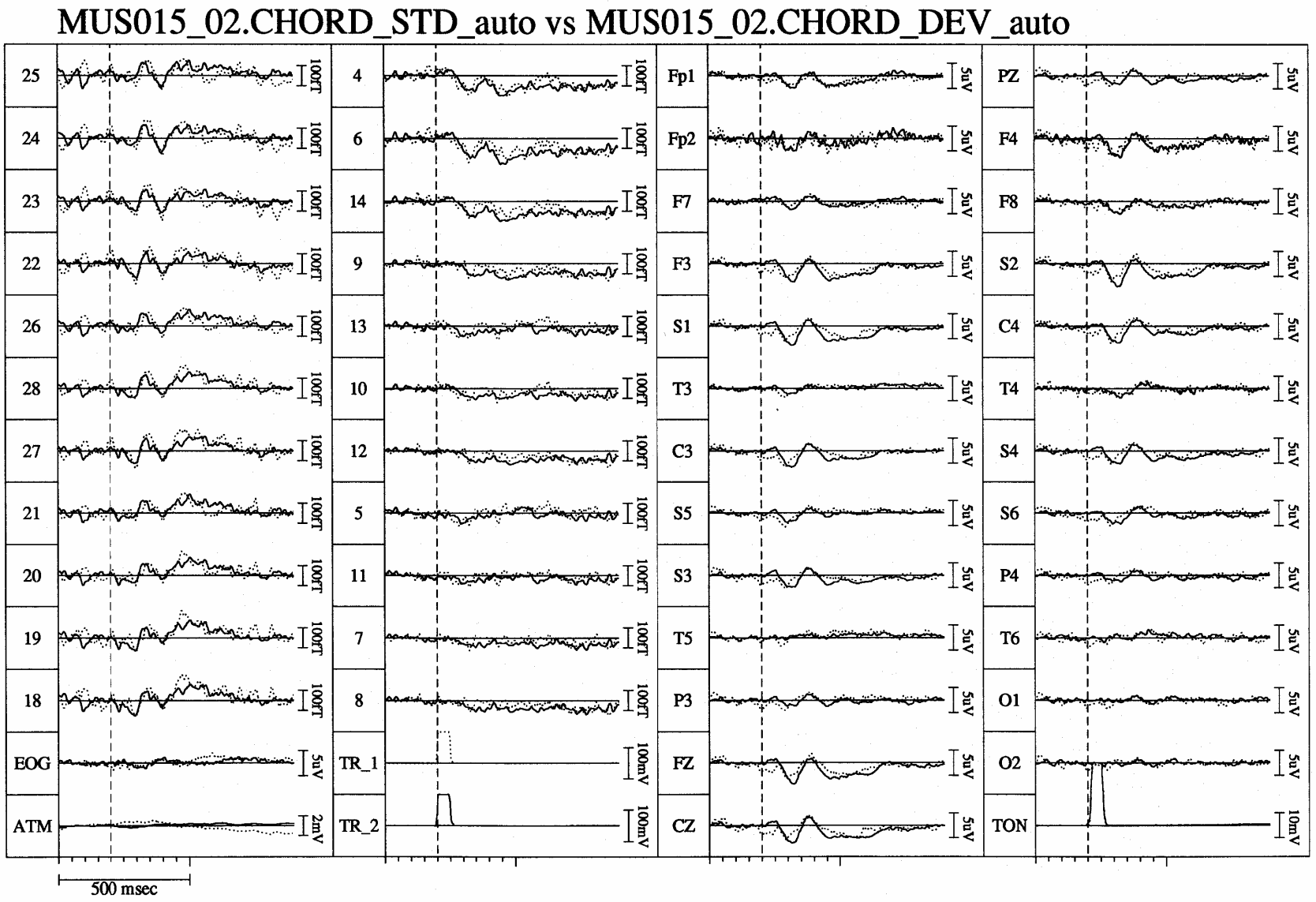


Abb.25: EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen unmusikalischen Versuchsperson für das Paradigma Chord in der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

Paradigma „Arpeggio“:

1.Session (1 Fehler):

EEG: Eine N100 STD und DEV ist in den frontalen, zentralen und den zusätzlichen Elektroden zu sehen, die Amplitude in CZ misst ca. 5 µV. Trotz der geringen Fehlerzahl (Zählergebnis vermutet?) ist keine MMN oder P300 abzugrenzen. Beide Kurven beschreiben eine negative Abweichung ab ca. 170 ms und kehren erst bei 500 ms wieder zur Grundlinie zurück.

MEG: Auch in den magnetischen Ableitungen ist in den hinteren Kanälen eine deutliche N100m zu sehen, das größte Potenzial misst 170 fT (Kanal 13 und 5). Ähnlich wie in der elektrischen Ableitung weichen auch hier beide Kurven nach der N100m in den negativen Bereich ab, ein eindeutiges MMF oder P300m lassen sich wiederum nicht abgrenzen.

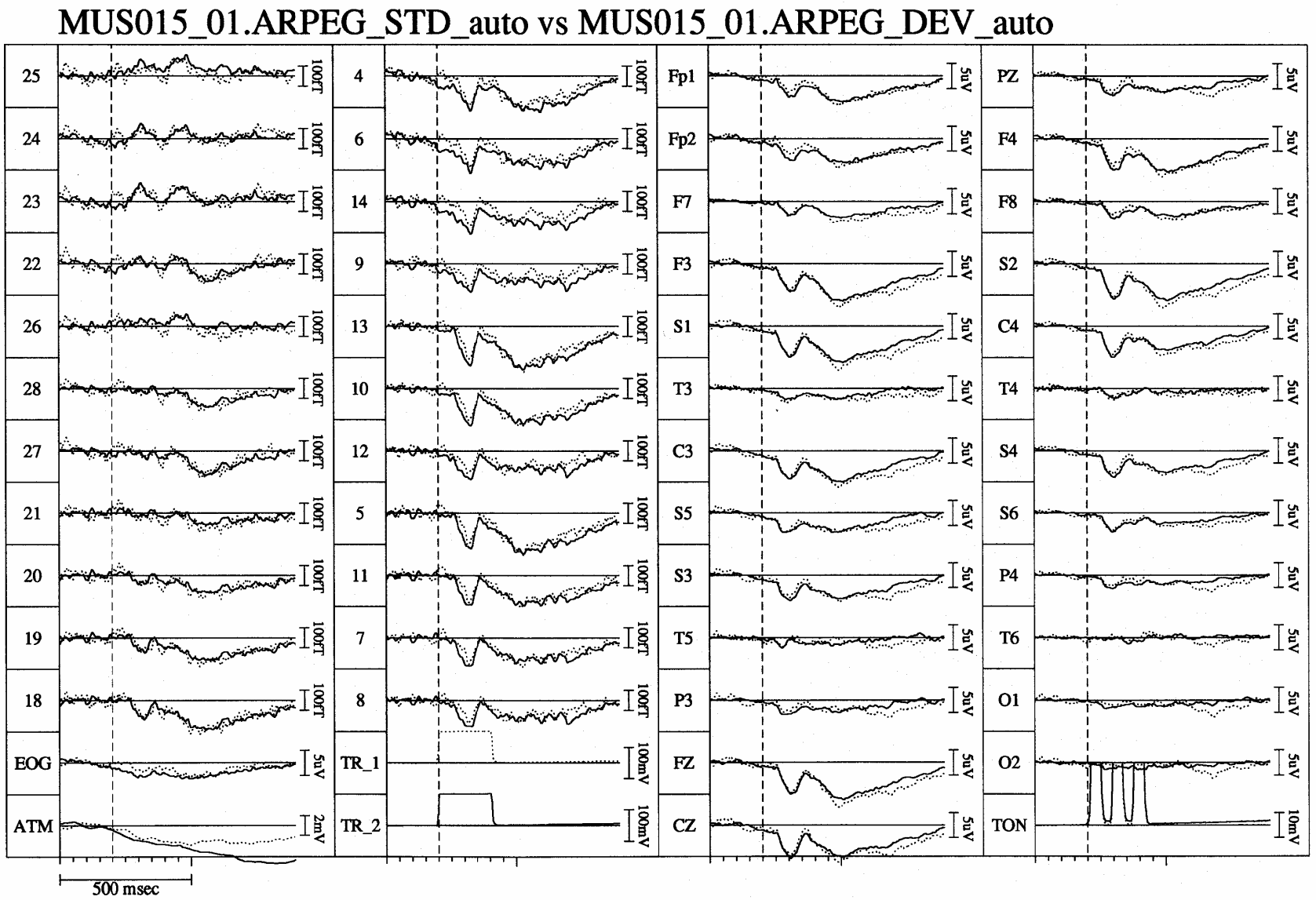


Abb.26: EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen unmusikalischen Versuchsperson für das Paradigma Arpeggioin der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

2. Session (7 Fehler):

EEG: Ähnlicher Kurvenverlauf wie in der ersten Sitzung.

MEG: Hier lassen sich keine eindeutigen Felder, auch keine N100m identifizieren. In den postzentralen Kanälen zeigt sich ab etwa 200 ms eine Abweichung der Kurve in den positiven Bereich, bei ca. 550 ms kehrt sie zur Grundlinie zurück. Dieser Kurvenverlauf ist als Äquivalent der negativen Abweichung in der Vormittagssitzung zu sehen.

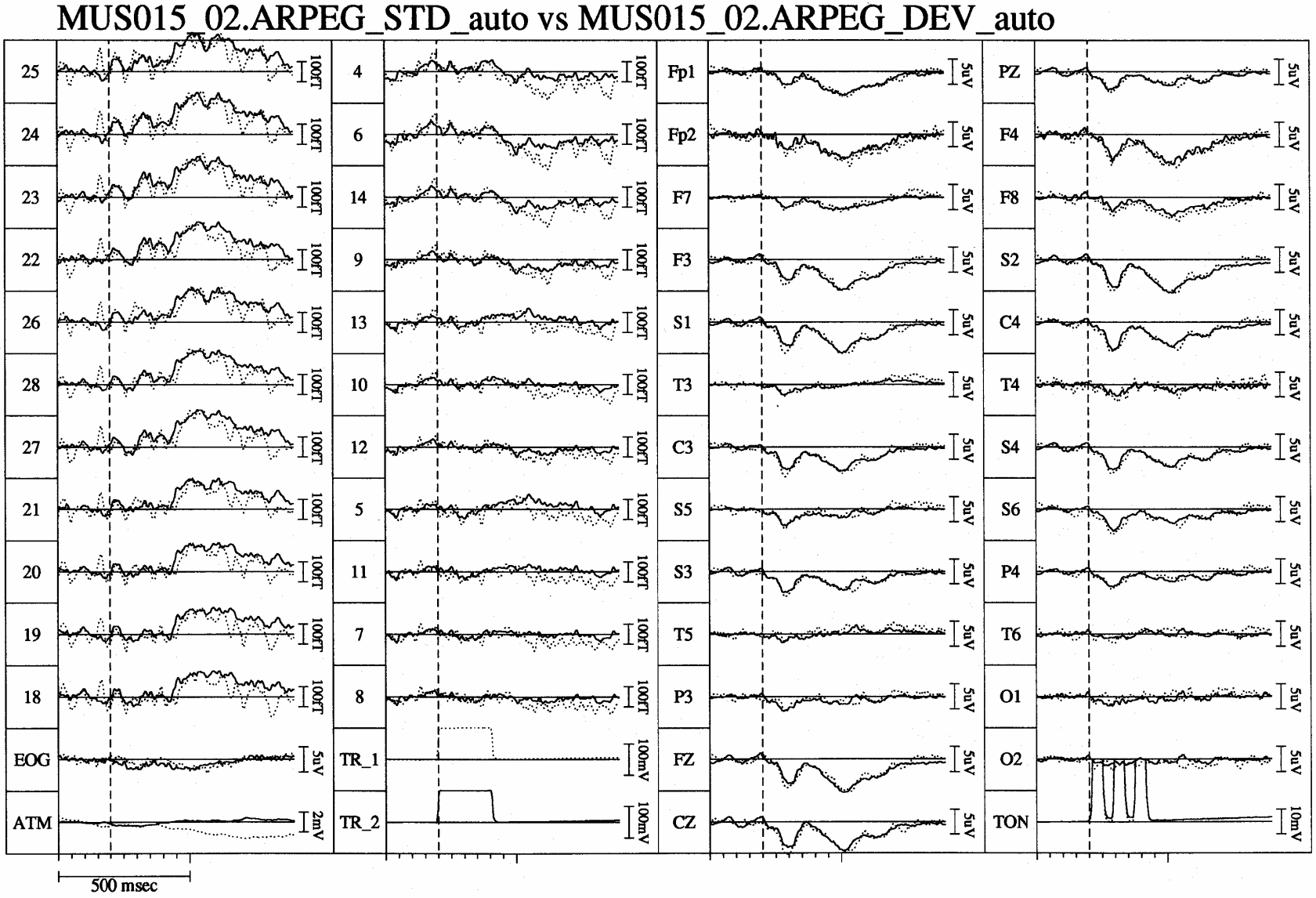


Abb.27: EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen unmusikalischen Versuchsperson für das Paradigma Arpeggio in der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

Paradigma „Mozart“:

1. Session (6 Fehler):

EEG: Die drei N100-Potenziale N100/1, N100/2 und N100/3 sind annähernd gleich groß, die maximalen Amplituden in der Elektrode CZ (sowie S1 und S2) messen 4 µV. Die MMN ist mit ca. 7 µV (Latenz: 180 ms) in der Elektrode FZ wie auch die P300 mit 8 µV (Elektrode PZ, Latenz: 380 ms) relativ groß.

MEG: Die N100/1 und N100/3 sind mit 120 fT (z.B. negativ in den Kanälen 13, 10 und 5) größer als die N100/2 (80 fT). In den meisten Kanälen (auch den frontal gelegenen) ist ein negatives MMF zu sehen, dieses ist in den postzentralen Kanälen 4, 6, 14 und 9 mit ca. 120 fT (Latenz: 180 ms) am größten. Insbesondere in diesen Kanälen ist auch eine positive Abweichung zwischen 400 und 600 ms mit einer Amplitude von 120 fT, der P300m entsprechen zu erkennen.

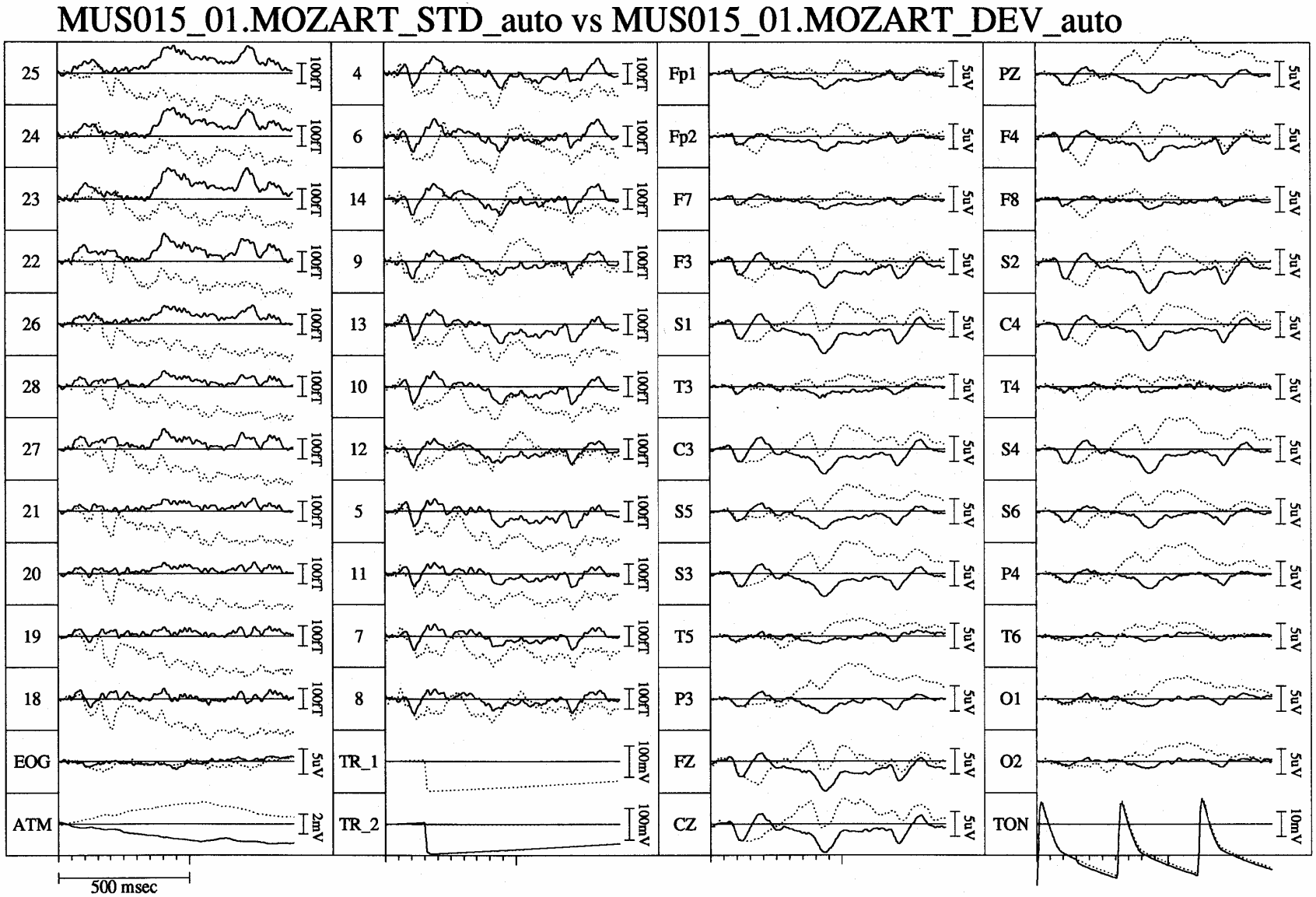


Abb.28: EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen unmusikalischen Versuchsperson für das Paradigma Mozart in der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

2. Session (20 Fehler):

EEG: Es lassen sich mit ähnlichen Amplituden wie vormittags die Potenziale N100/1, N100/2 und N100/3, ebenso wie die MMN sicher abgrenzen. Die P300 ist ebenfalls ähnlich, aber etwas kleiner.

MEG: Auch in den MEG-Ableitungen lassen sich die der N100m entsprechenden Felder eindeutig erkennen, sie sind in allen hinteren Kanälen annähernd gleich groß (ca. 180 fT, Kanal 24). Insbesondere in den Kanälen 25, 24, 23, 22 und 27 ist ein deutliches positives MMF mit einer Amplitude von 140 fT bei einer Latenz von knapp 200 ms zu sehen. Im Gegensatz zur Vormittagssitzung ist kein sicheres Äquivalent der P300 zu erkennen.

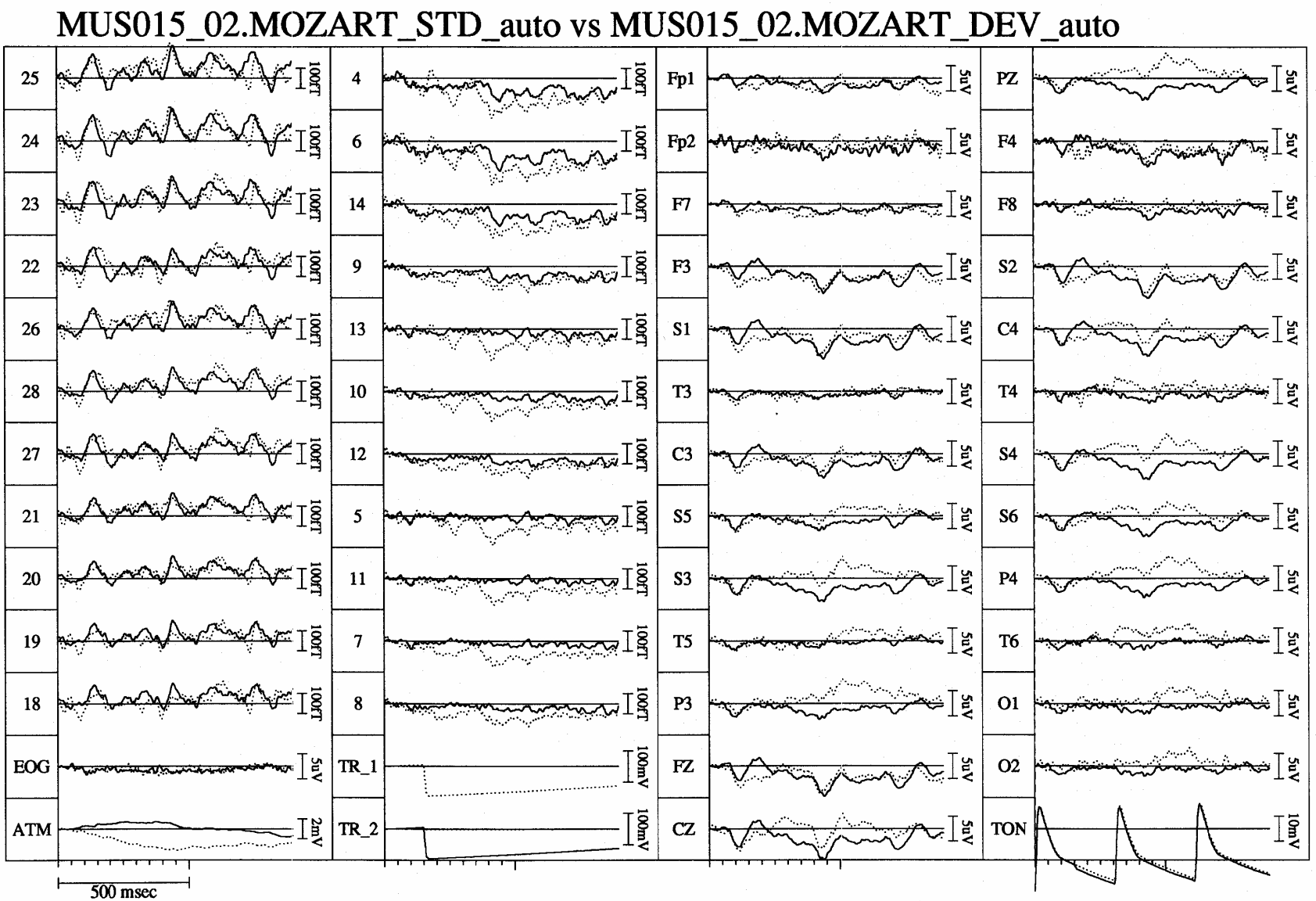


Abb.29: EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen unmusikalischen Versuchsperson für das Paradigma Mozart in der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

Paradigma „Bach“:

1. Session (67 Fehler):

EEG: Die sinusoidalen Schwingungen sind zu erkennen, haben jedoch kleine Amplituden (ca. 2 µV in der Elektrode CZ). Eine eindeutige MMN lässt sich nicht abgrenzen, die P300 ist zwar relativ klein (etwa halb so groß wie bei der musikalischen Versuchsperson), jedoch in den meisten Ableitungen identifizierbar. Die größte Amplitude in der Elektrode PZ misst knapp 3 µV (Latenz: 480 ms).

MEG: Hier lassen sich in den hinteren Kanälen Schwingungen um die Grundlinie mit einer Amplitude von 80 fT sehen. Ein MMF und auch eine P300m sind nicht sicher abgrenzbar.

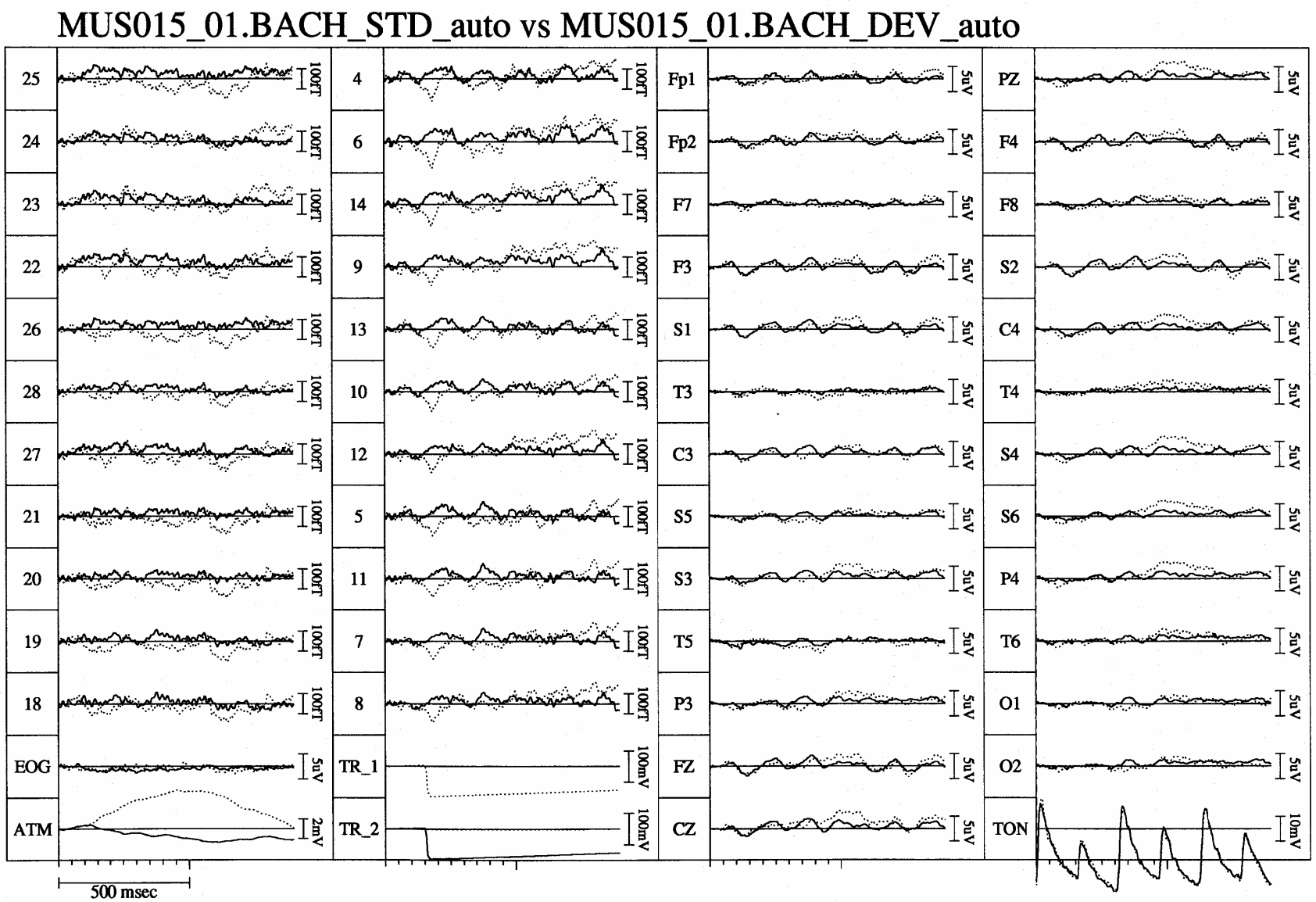


Abb.30: EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen unmusikalischen Versuchsperson für das Paradigma Bach in der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

2. Session (41 Fehler):

EEG: Die Schwingungen haben die gleiche Amplitude wie in der ersten Sitzung, eine MMN ist wieder nicht sicher abzugrenzen, es lässt sich hier auch keine P300 erkennen.

MEG: Die Amplituden der Schwingungen um die Grundlinie sind etwas größer als vormittags, sie betragen z.B. im Kanal 24 (ähnlich 23, 22 und 27) 180 fT. Auch hier lassen sich weder ein MMF noch eine P300m erkennen.

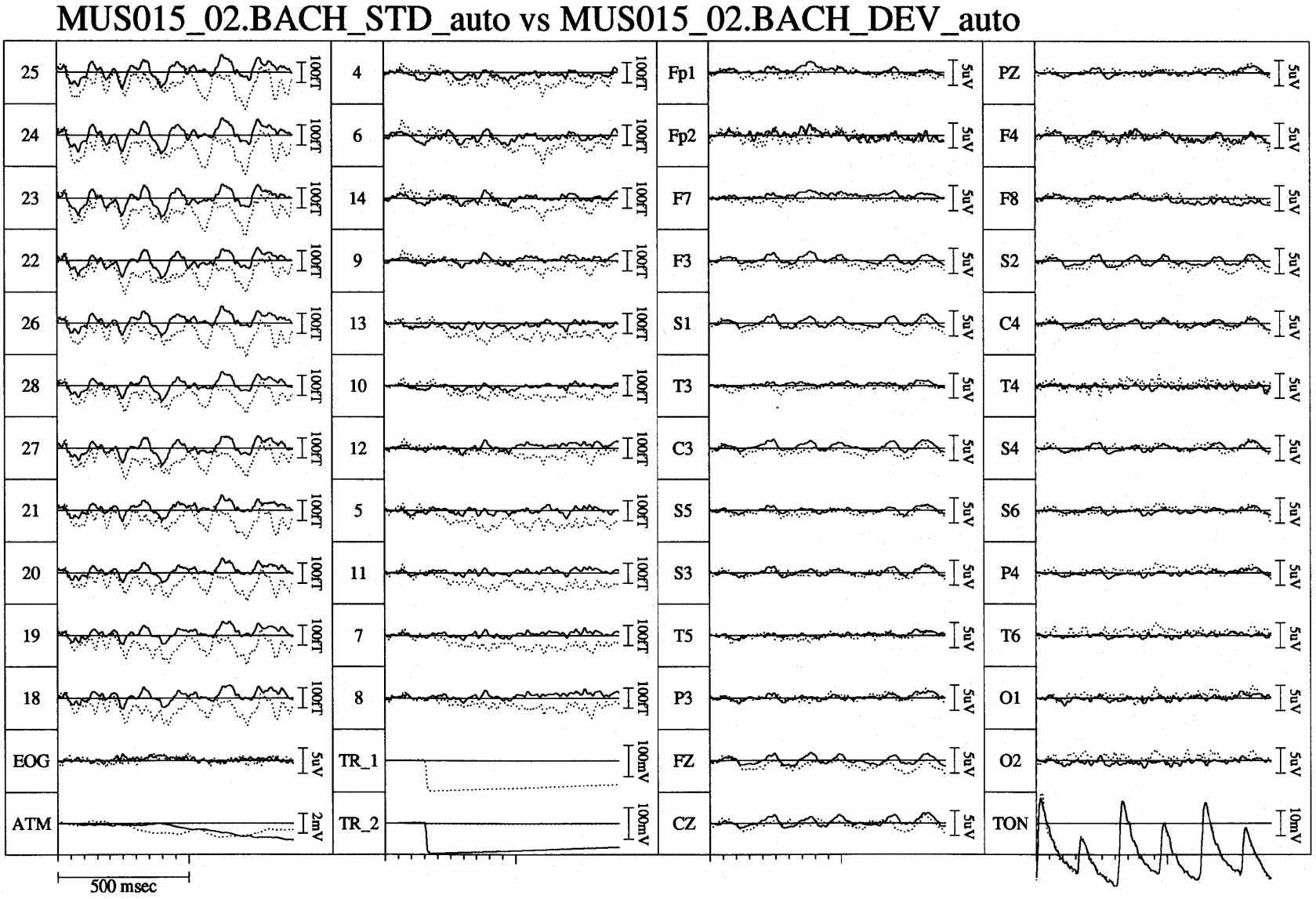


Abb.31: EEG (rechte Spalten) – und MEG (linke Spalten) –Mittelwertkurven einer exemplarischen unmusikalischen Versuchsperson für das Paradigma Bach in der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogenen Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

7.2 Grand-Average-Kurven

Siehe folgende Seiten

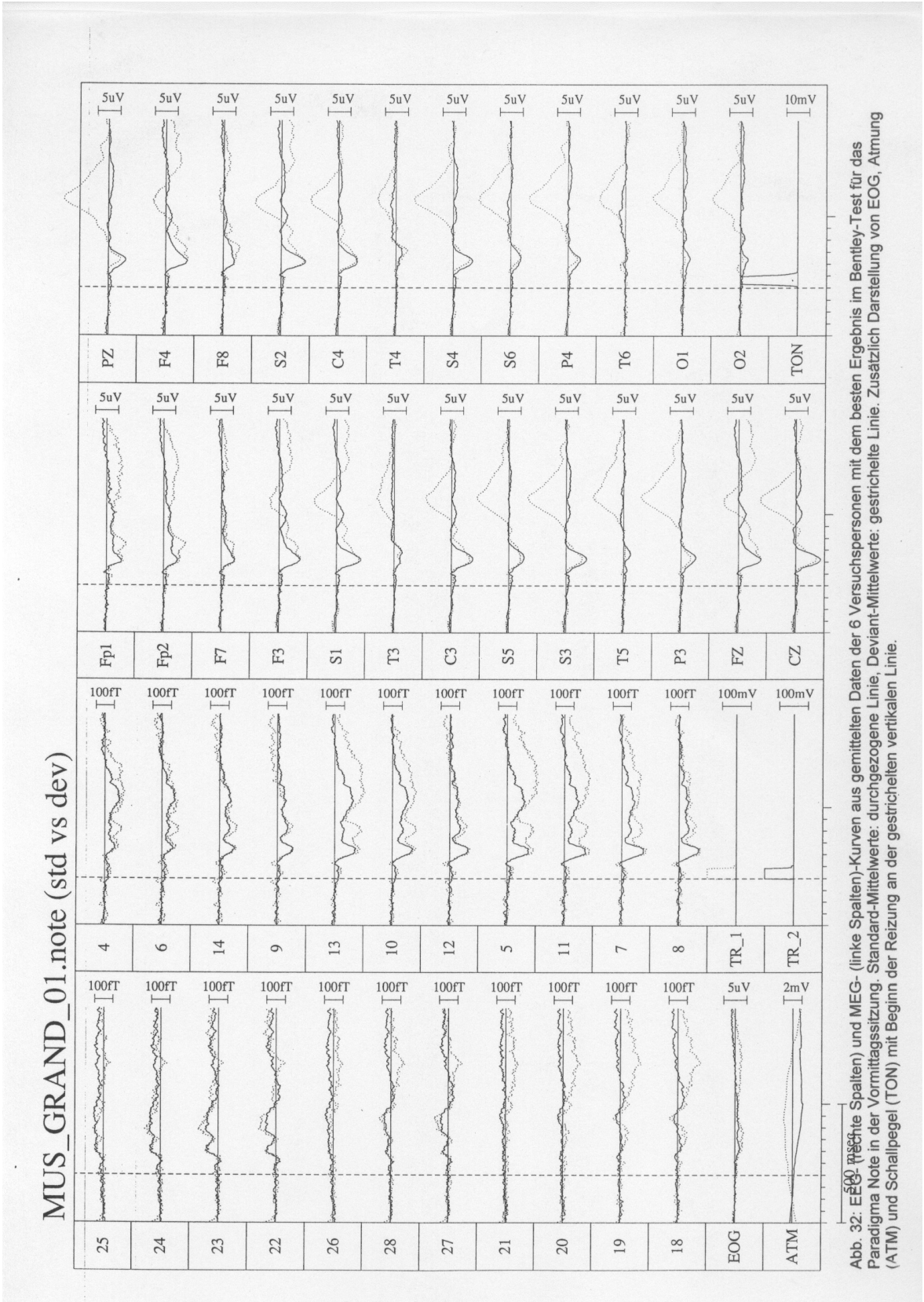


Abb. 32: EEG- (linke Spalten) und MEG- (linke Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 6 Versuchspersonen mit dem besten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Note in der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

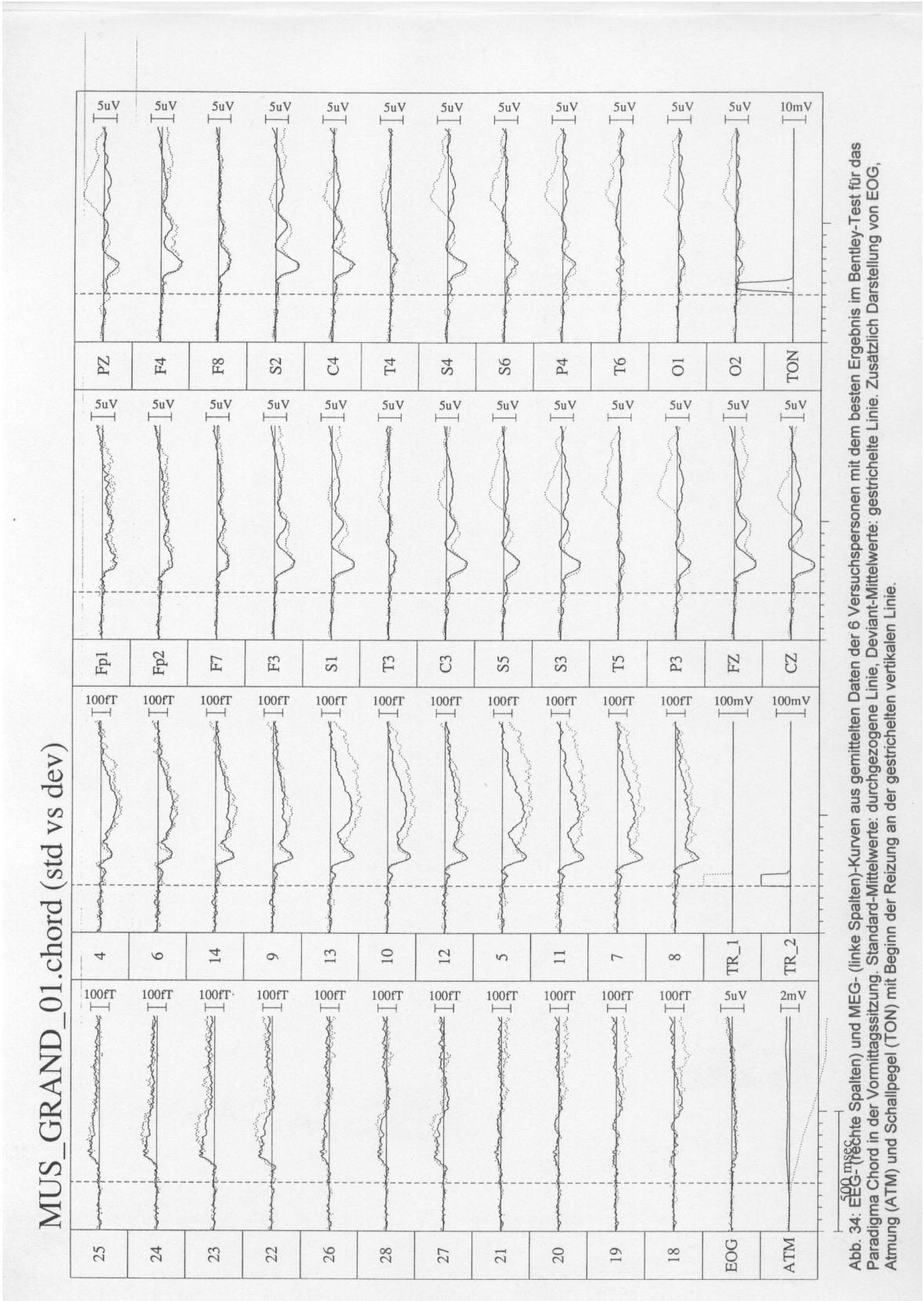


Abb. 34: EEG- (rechte Spalten) und MEG- (linke Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 6 Versuchspersonen mit dem besten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Chord in der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

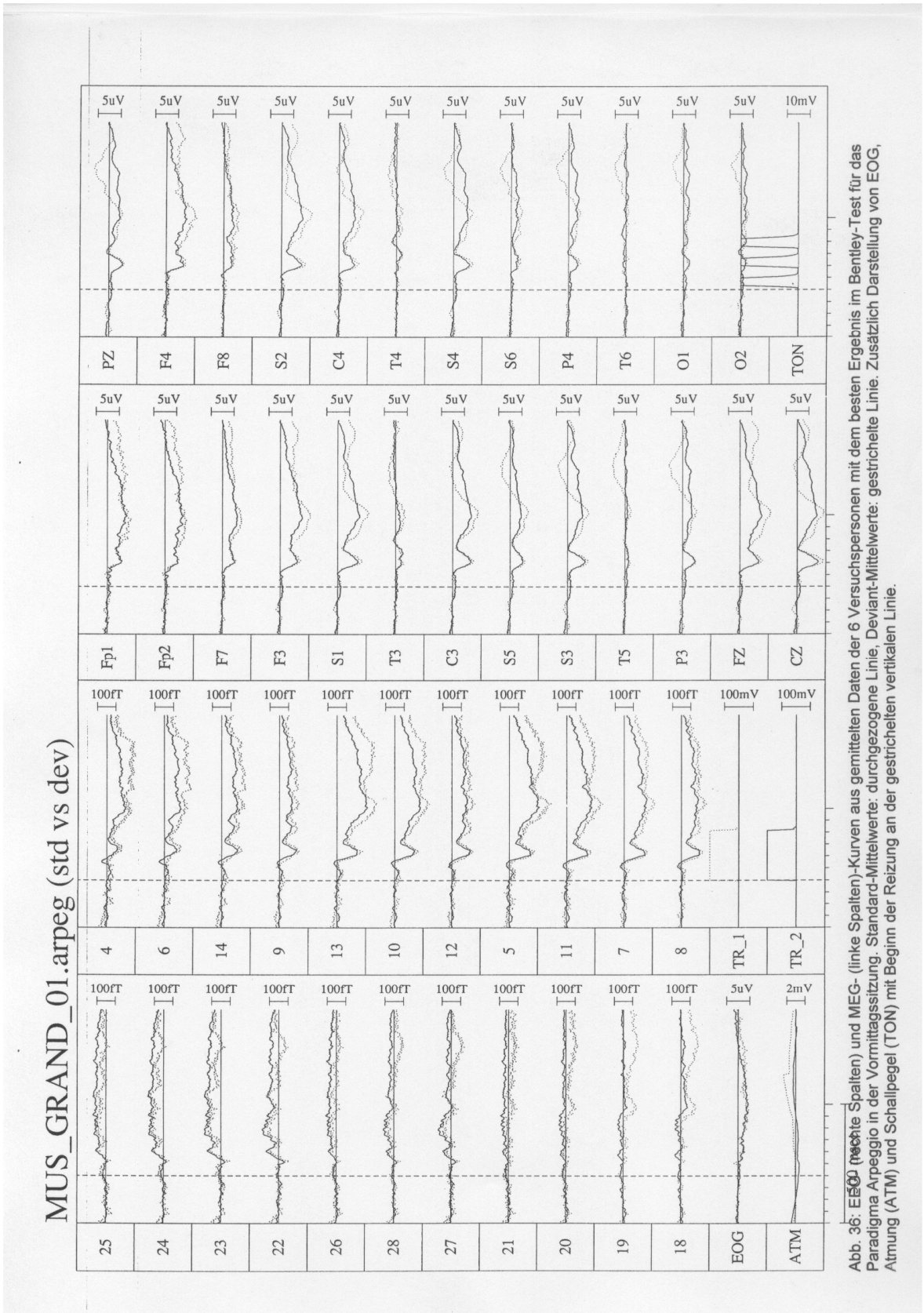


Abb. 36: EEG (rechte Spalten) und MEG- (linke Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 6 Versuchspersonen mit dem besten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Arpeggio in der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

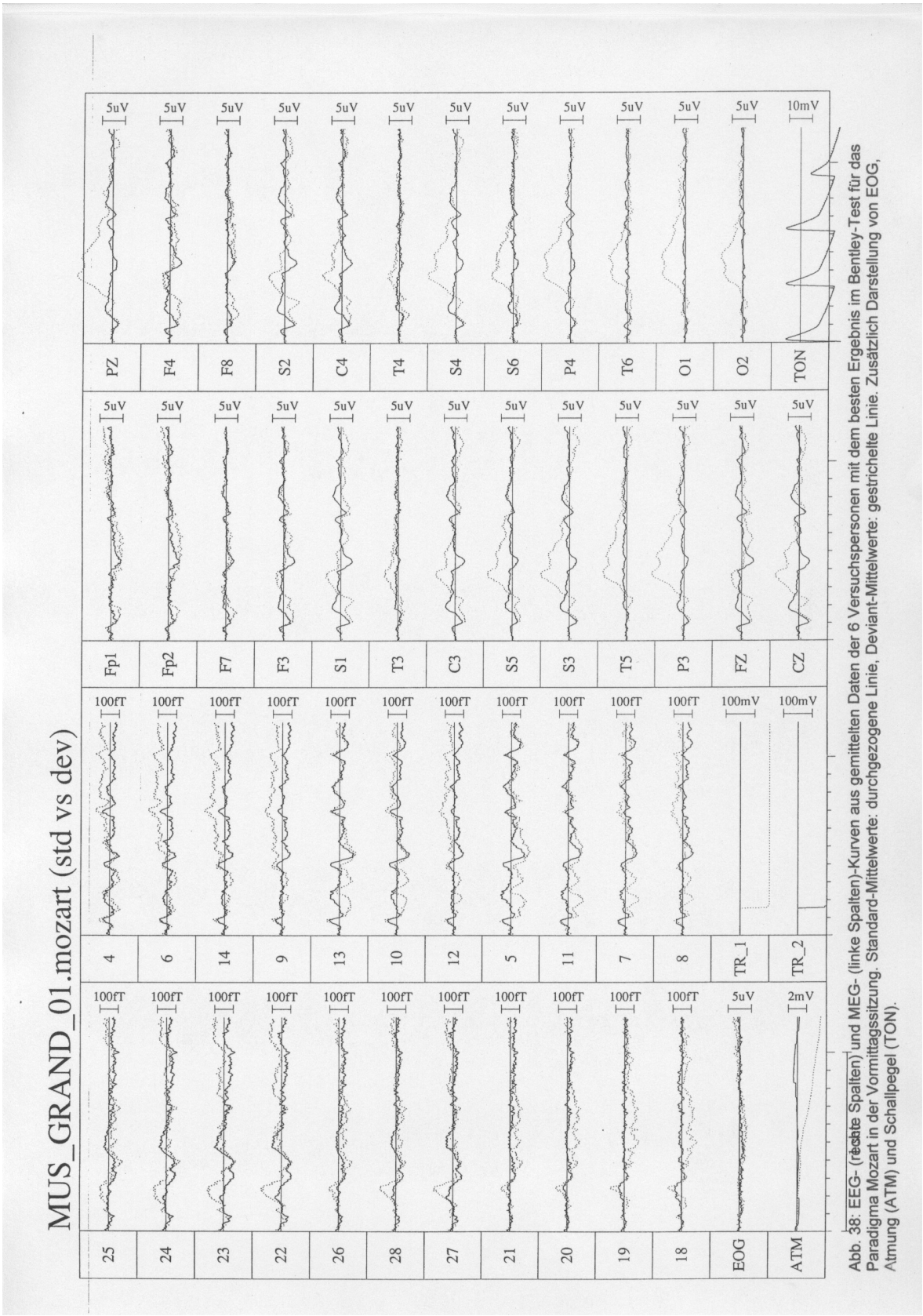


Abb. 38: EEG- (rechte Spalten) und MEG- (linke Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 6 Versuchspersonen mit dem besten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Mozart in der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON).

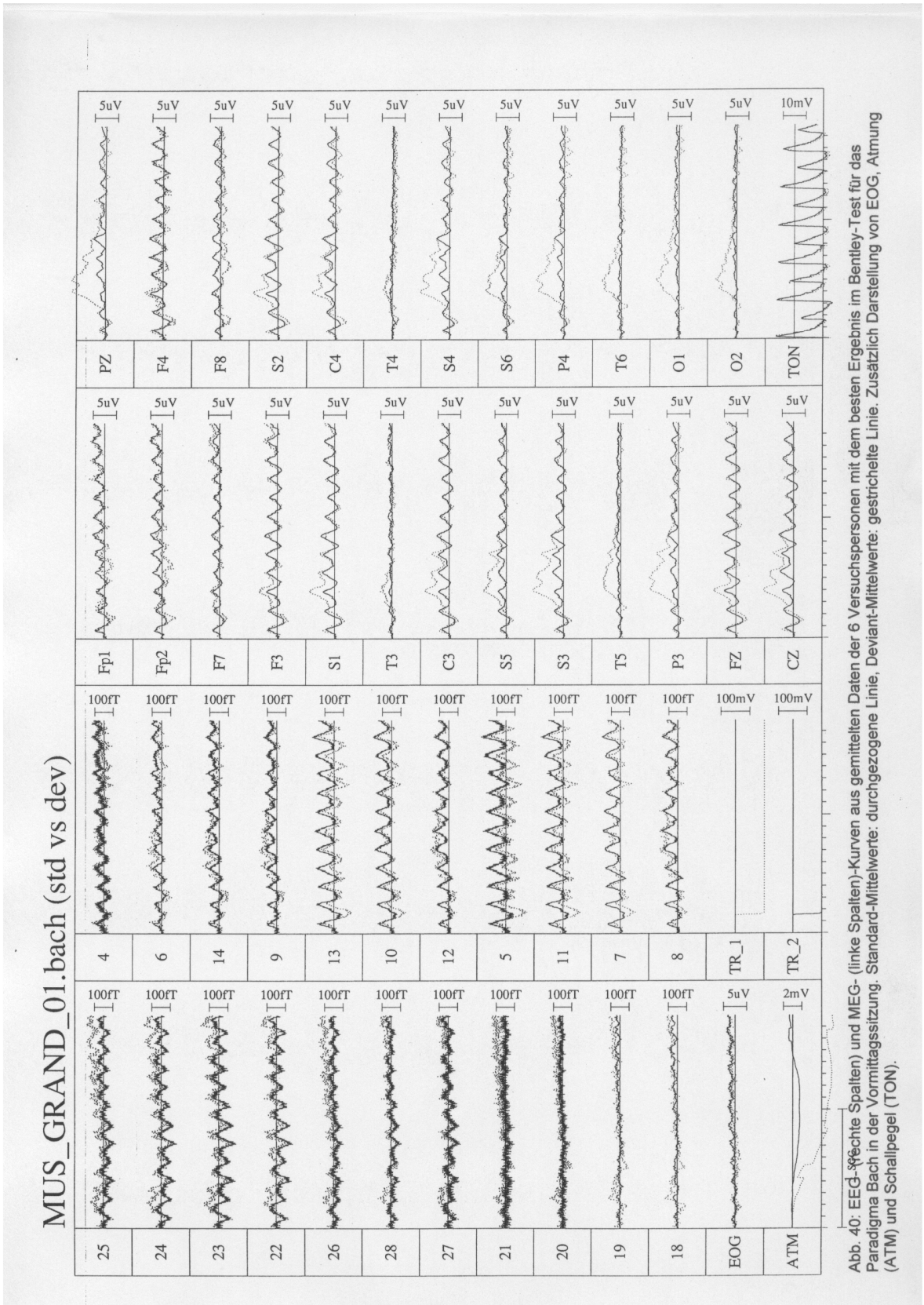


Abb. 40: EEG- (rechte Spalten) und MEG- (linke Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 6 Versuchspersonen mit dem besten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Bach in der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON).

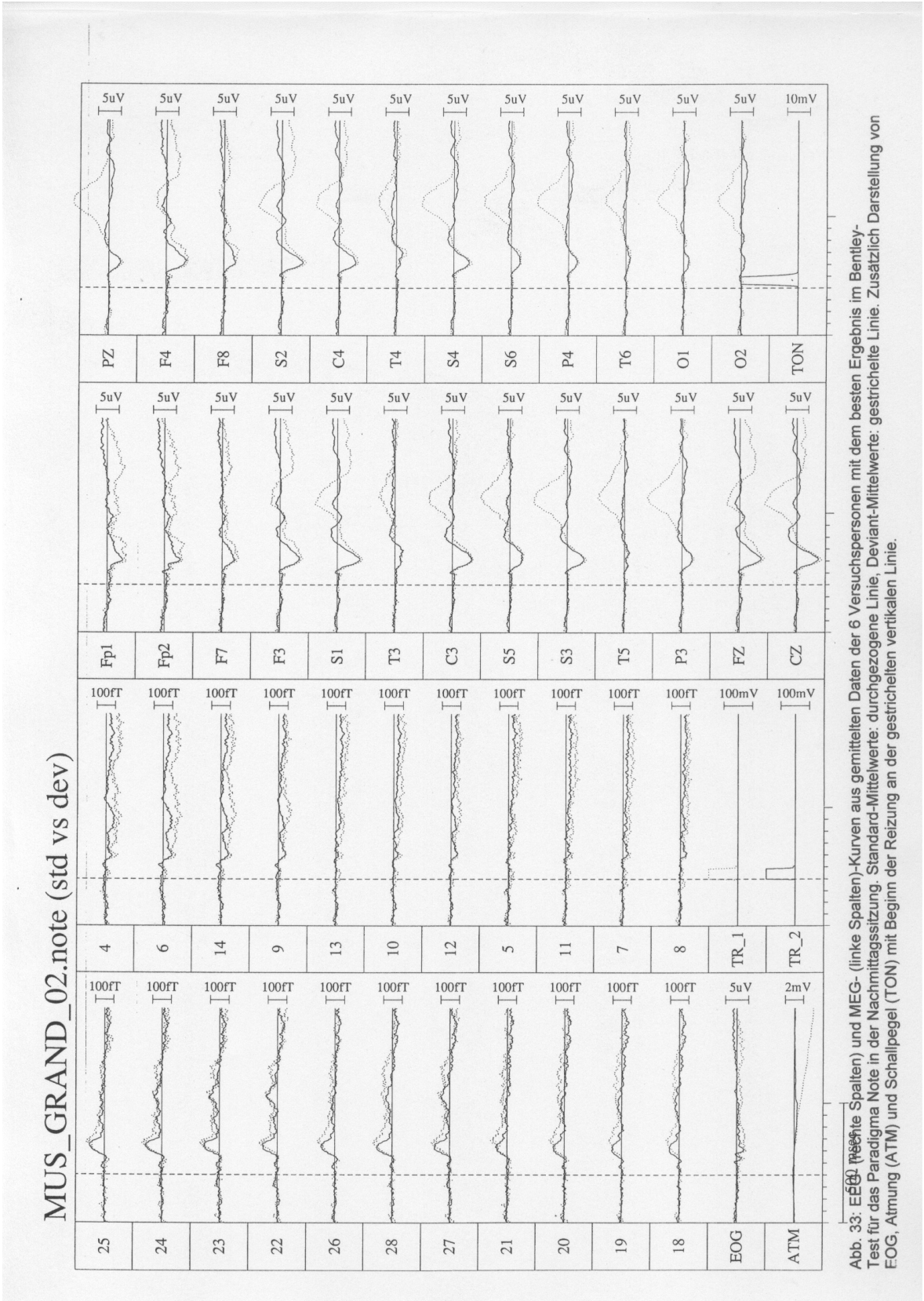


Abb. 33: EEG (linke Spalten) und MEG- (rechte Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 6 Versuchspersonen mit dem besten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Note in der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

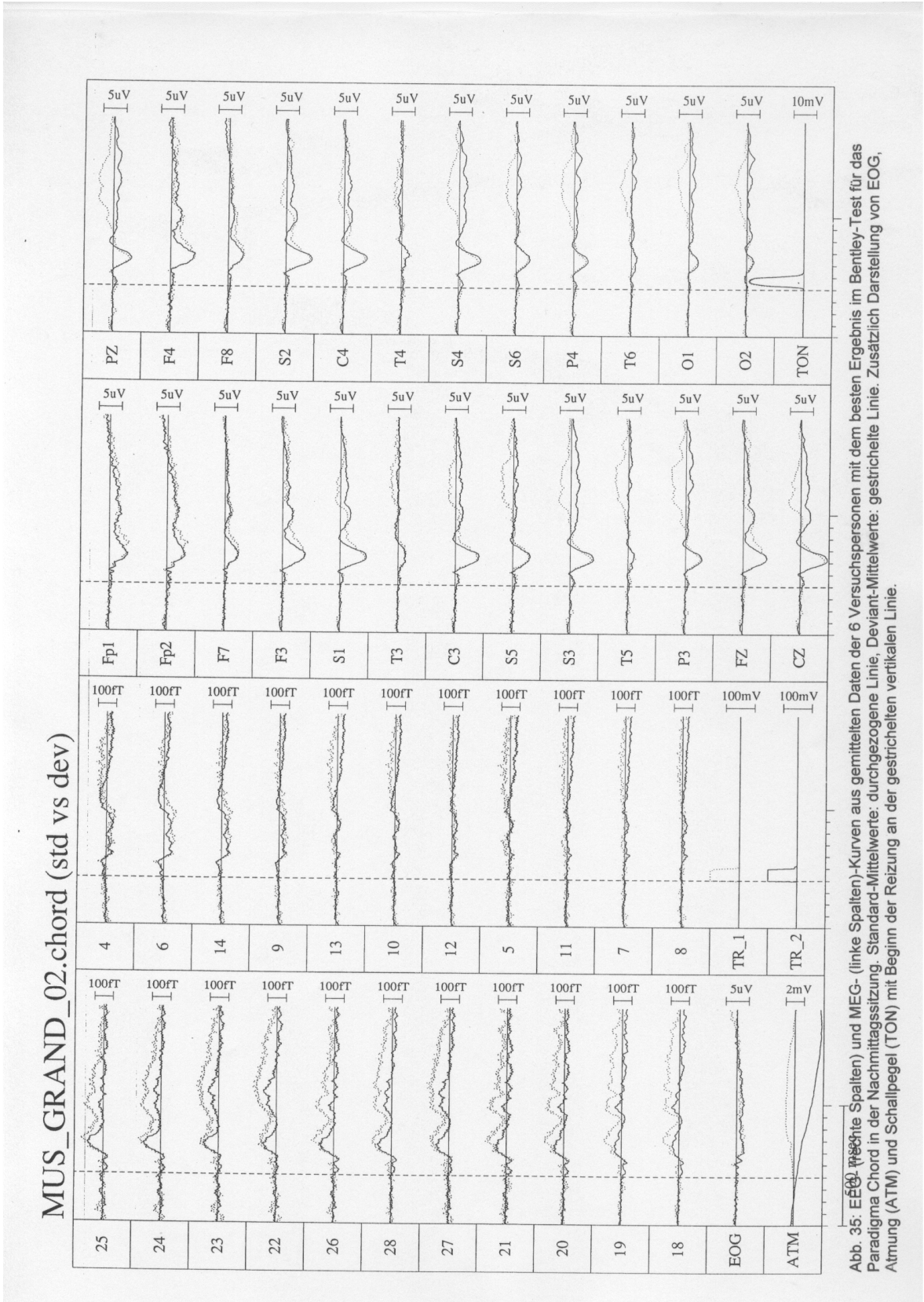


Abb. 35: EEG- (rechte Spalten) und MEG- (linke Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 6 Versuchspersonen mit dem besten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Chord in der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

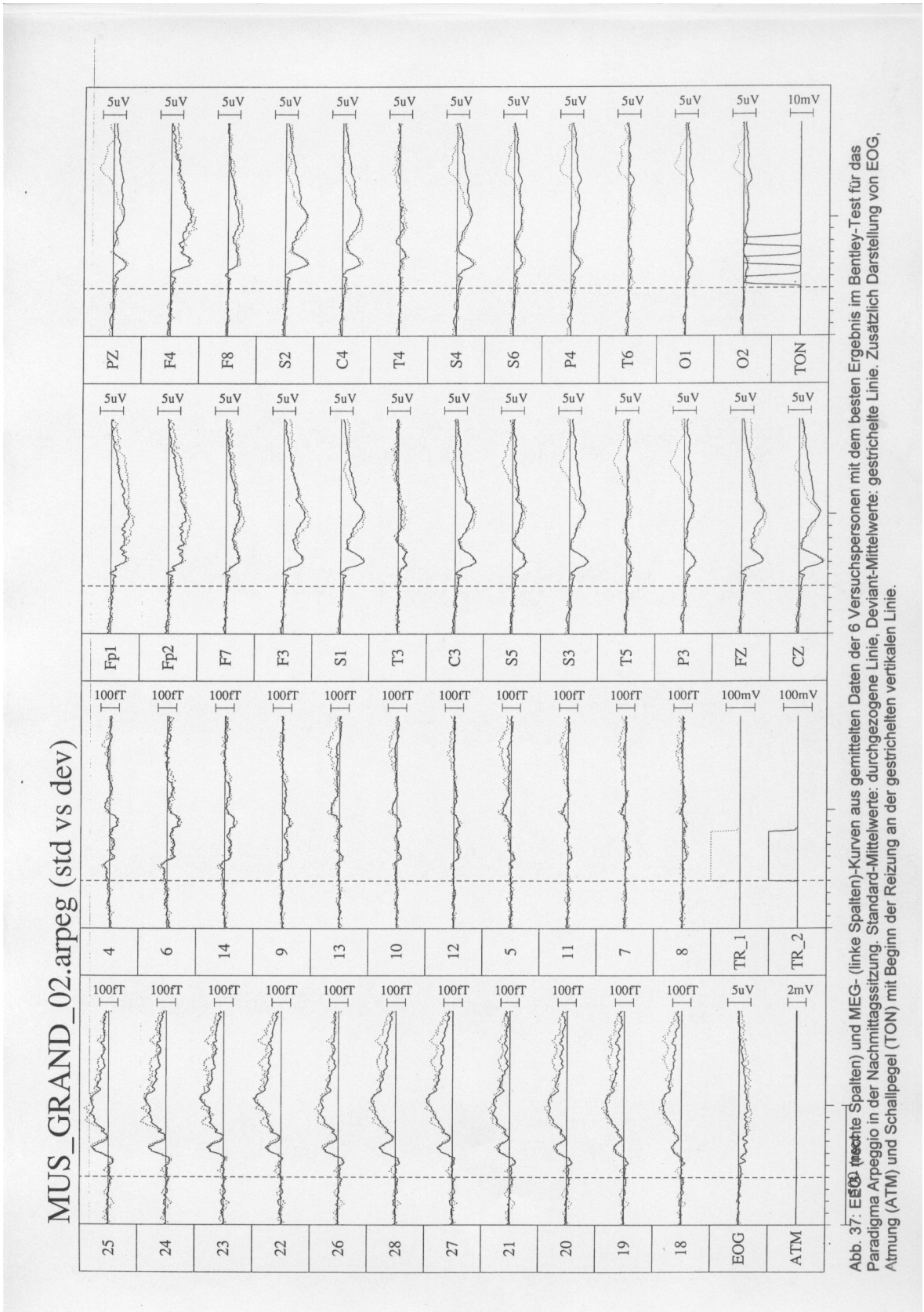


Abb. 37: EEG (rechte Spalten) und MEG- (linke Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 6 Versuchspersonen mit dem besten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Arpeggio in der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

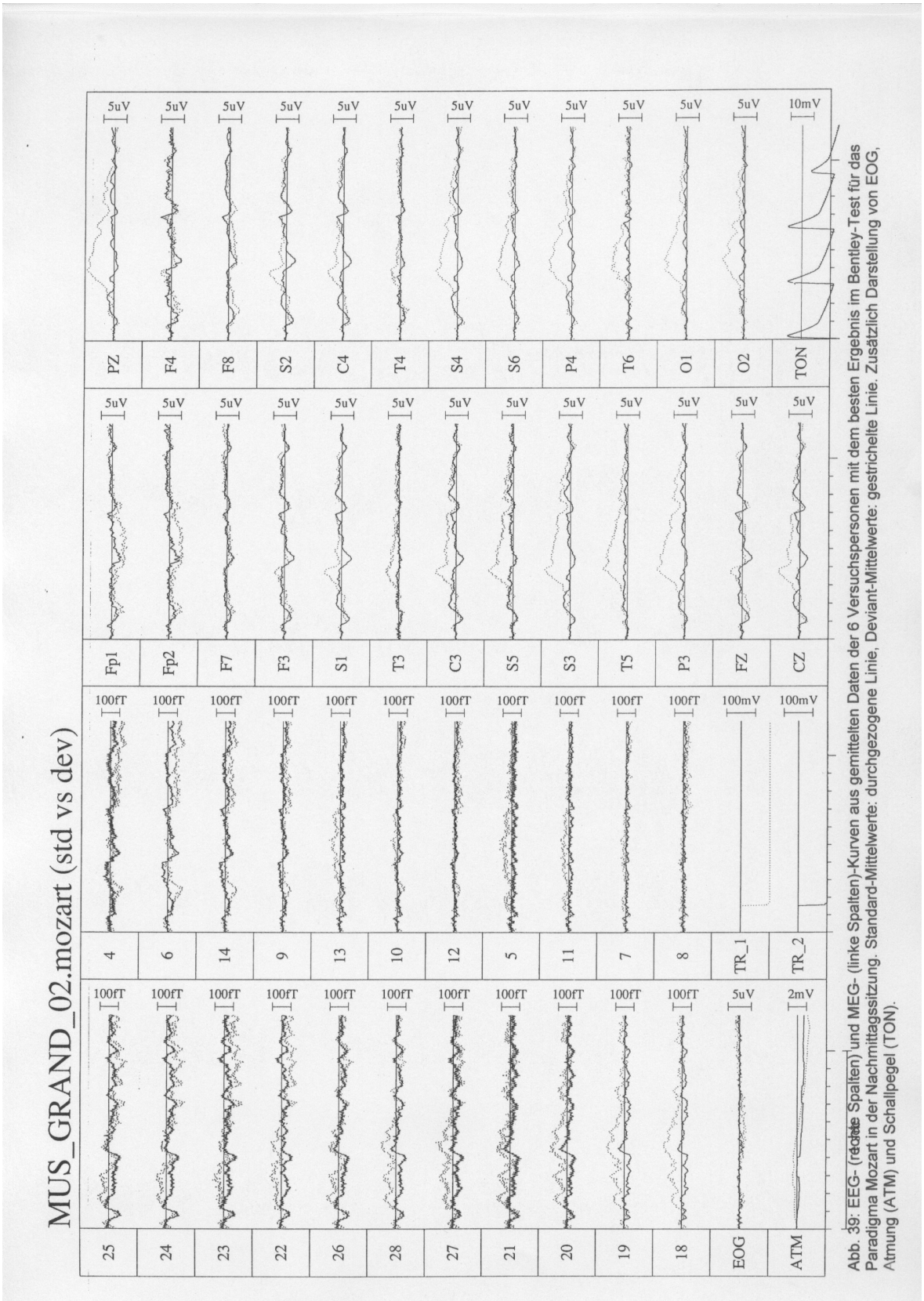


Abb. 39: EEG- (rechte Spalten) und MEG- (linke Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 6 Versuchspersonen mit dem besten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Mozart in der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON).

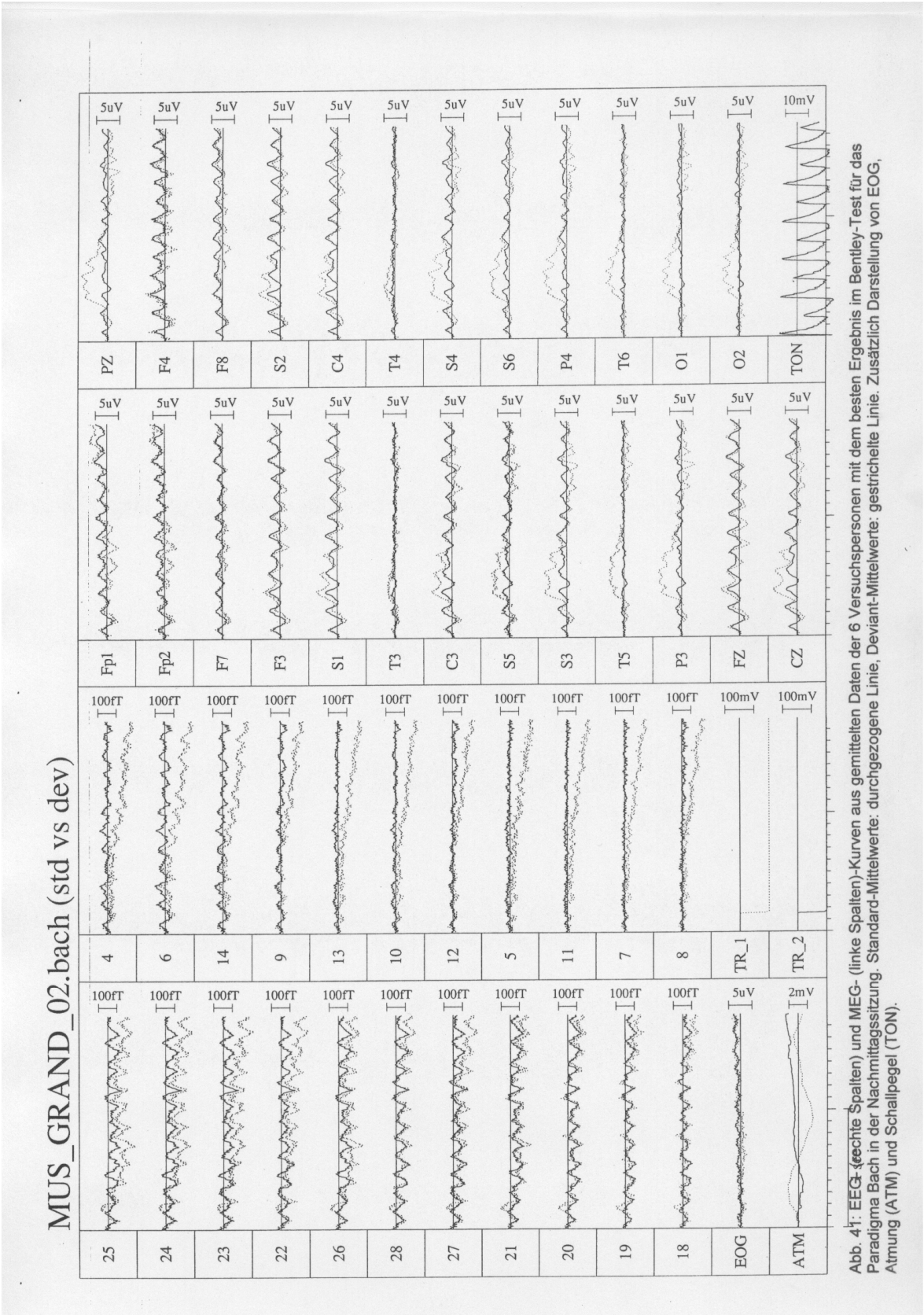


Abb. 41: EEG- (rechte Spalten) und MEG- (linke Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 6 Versuchspersonen mit dem besten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Bach in der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON).

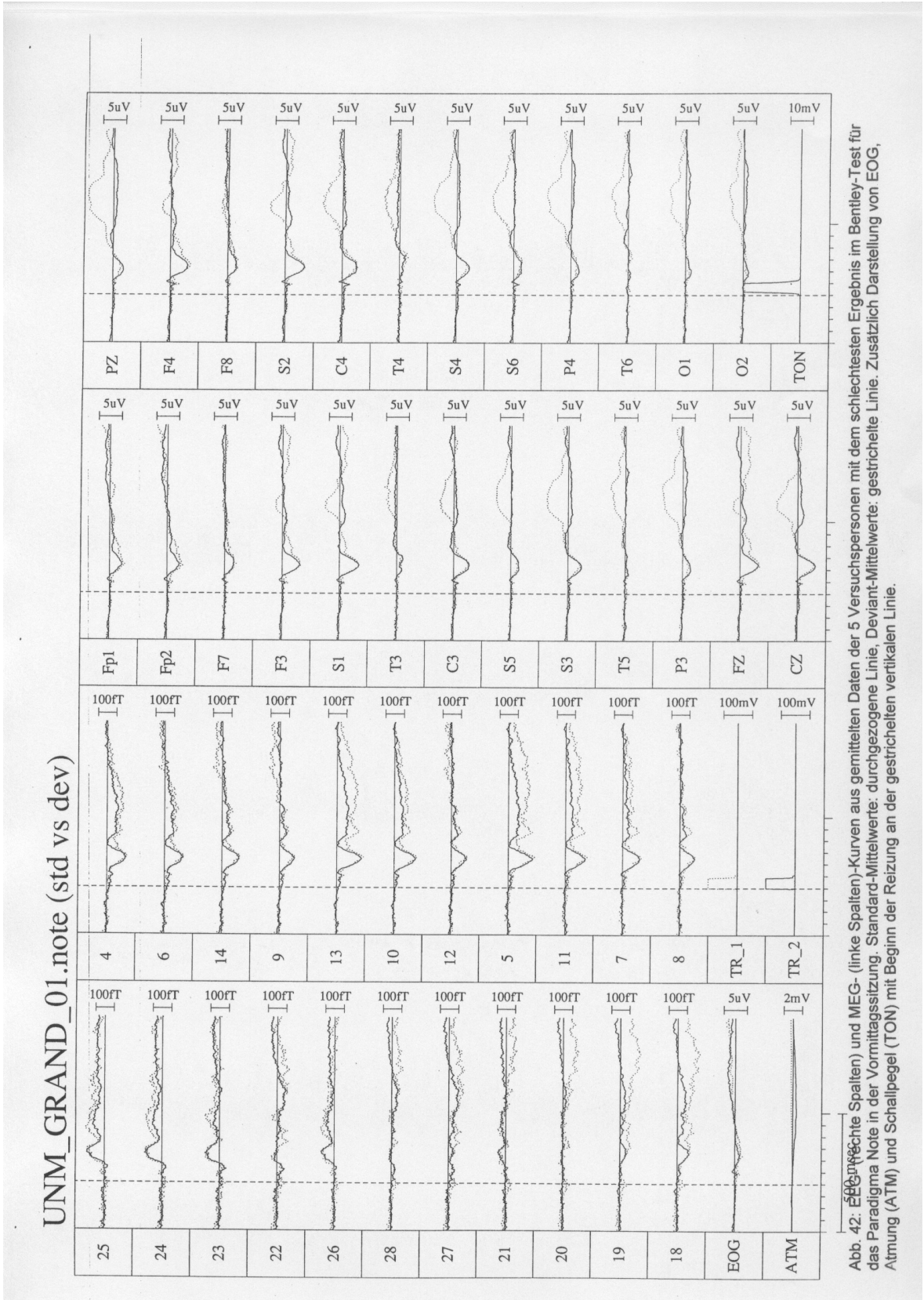


Abb. 42: EEG (rechte Spalten) und MEG- (linke Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 5 Versuchspersonen mit dem schlechtesten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Note in der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

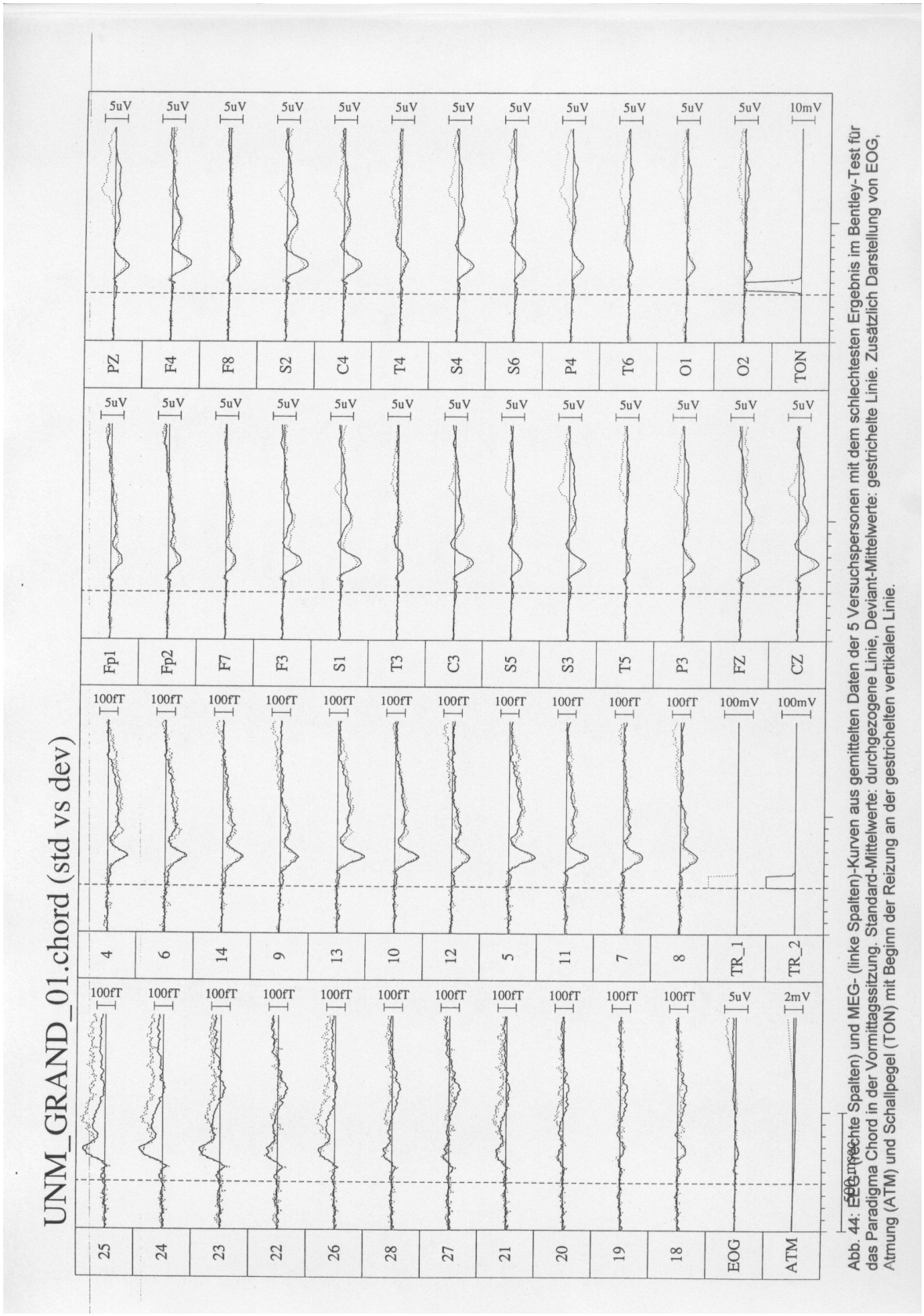


Abb. 44: EEG (rechte Spalten) und MEG- (linke Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 5 Versuchspersonen mit dem schlechtesten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Chord in der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

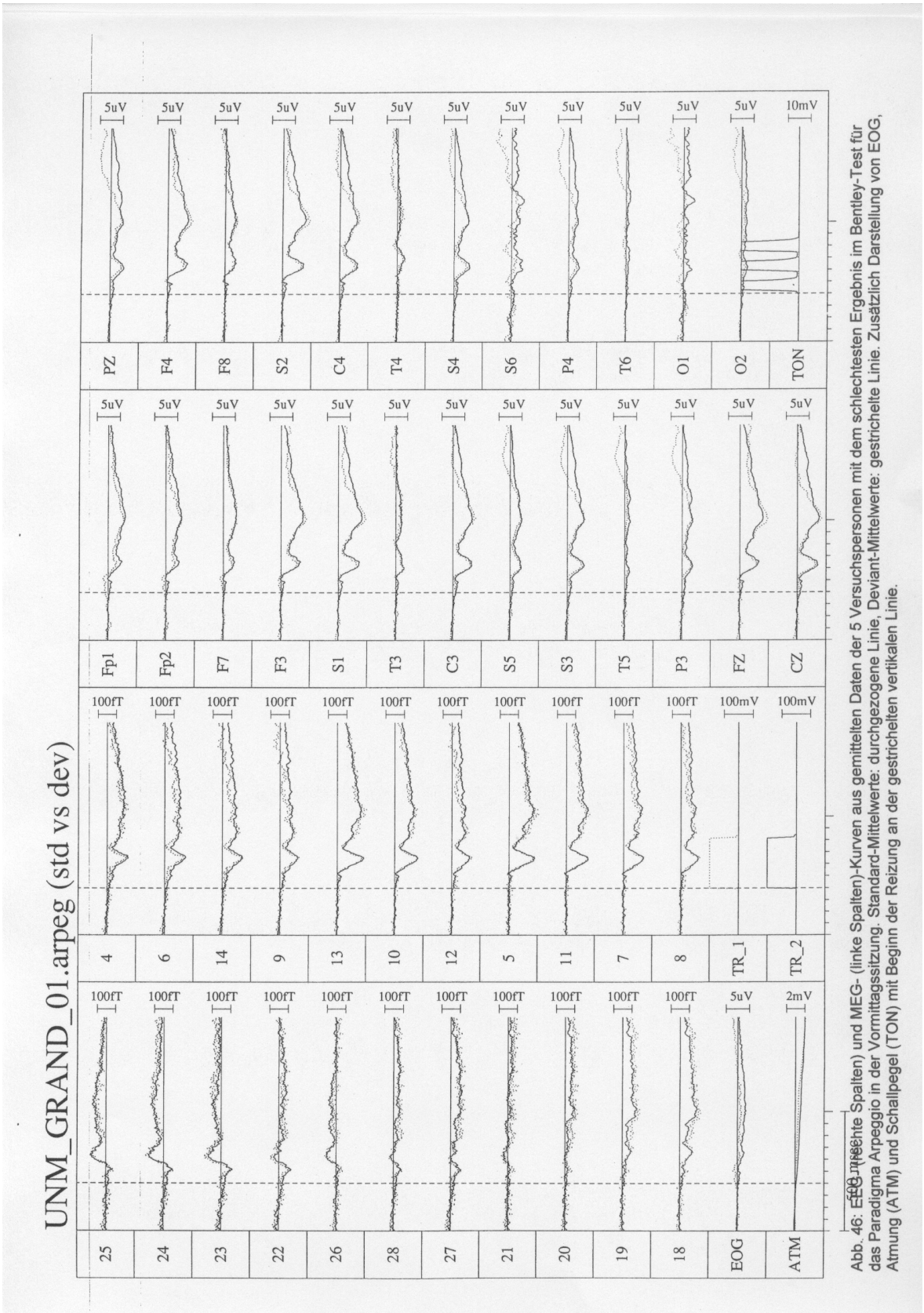


Abb. 46: EEG- (linke Spalten) und MEG- (linke Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 5 Versuchspersonen mit dem schlechtesten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Arpeggio in der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

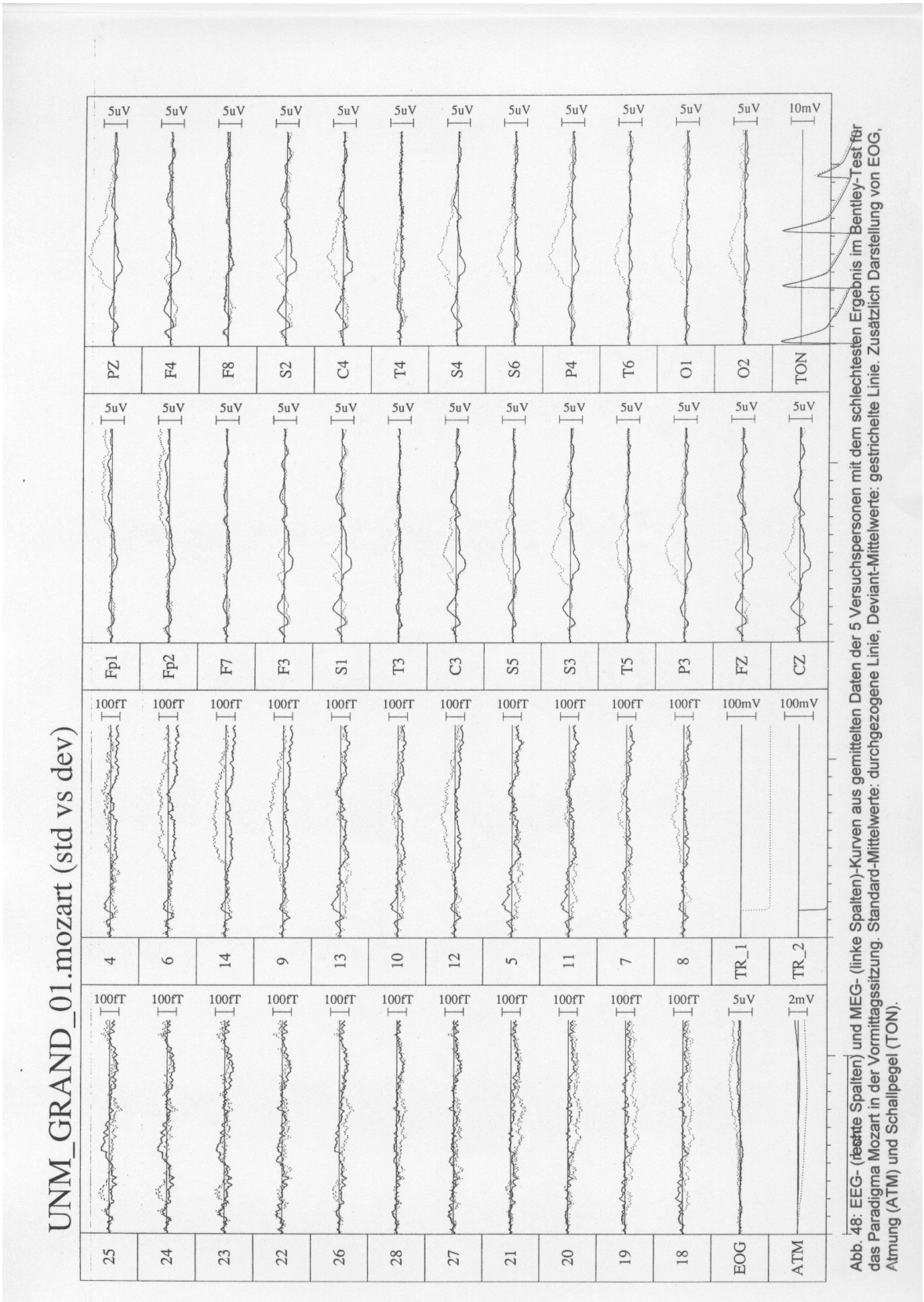


Abb. 48: EEG- (rechte Spalten) und MEG- (linke Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 5 Versuchspersonen mit dem schlechtesten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Mozart in der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON).

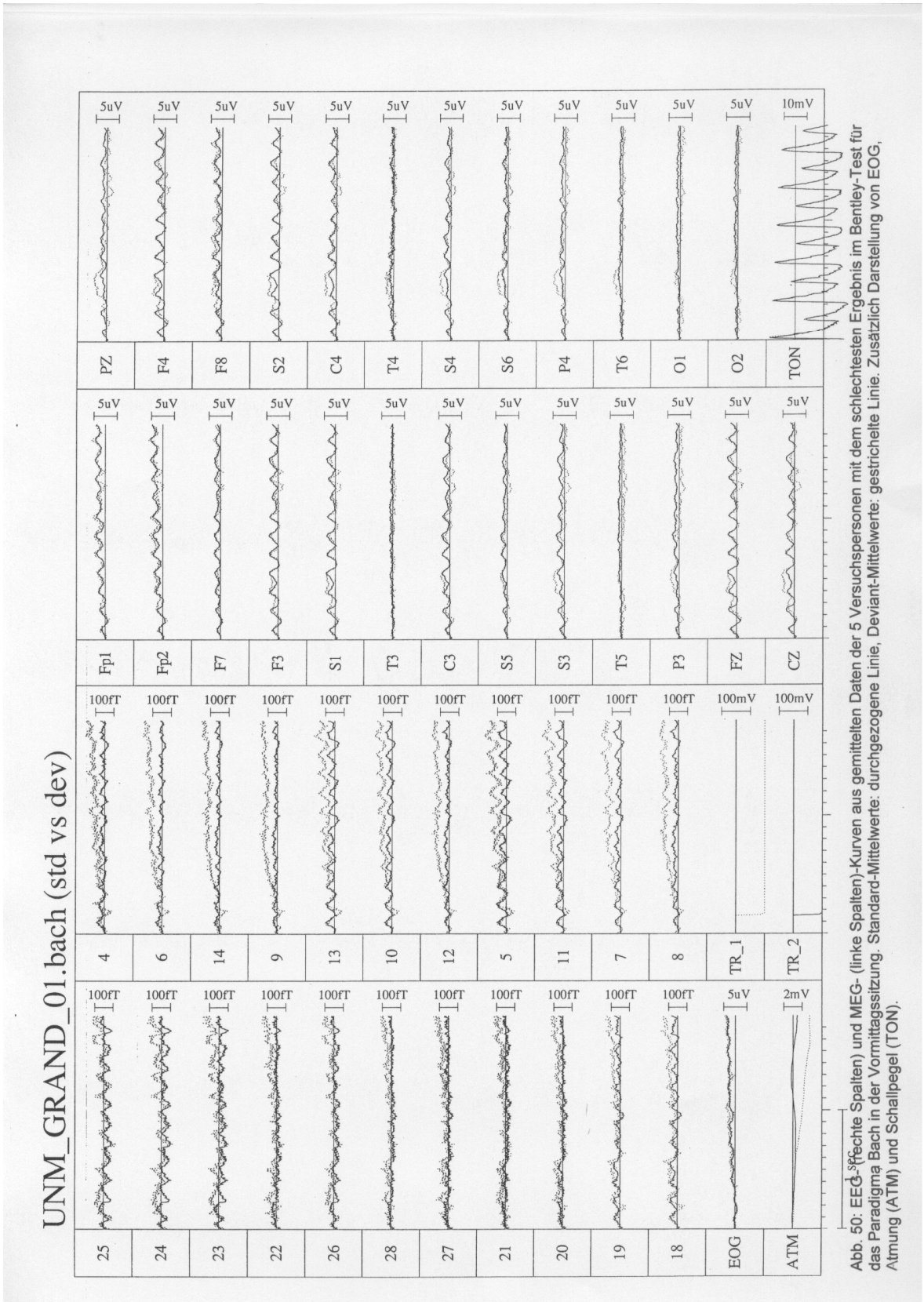


Abb. 50: EEG- (rechte Spalten) und MEG- (linke Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 5 Versuchspersonen mit dem schlechtesten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Bach in der Vormittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON).

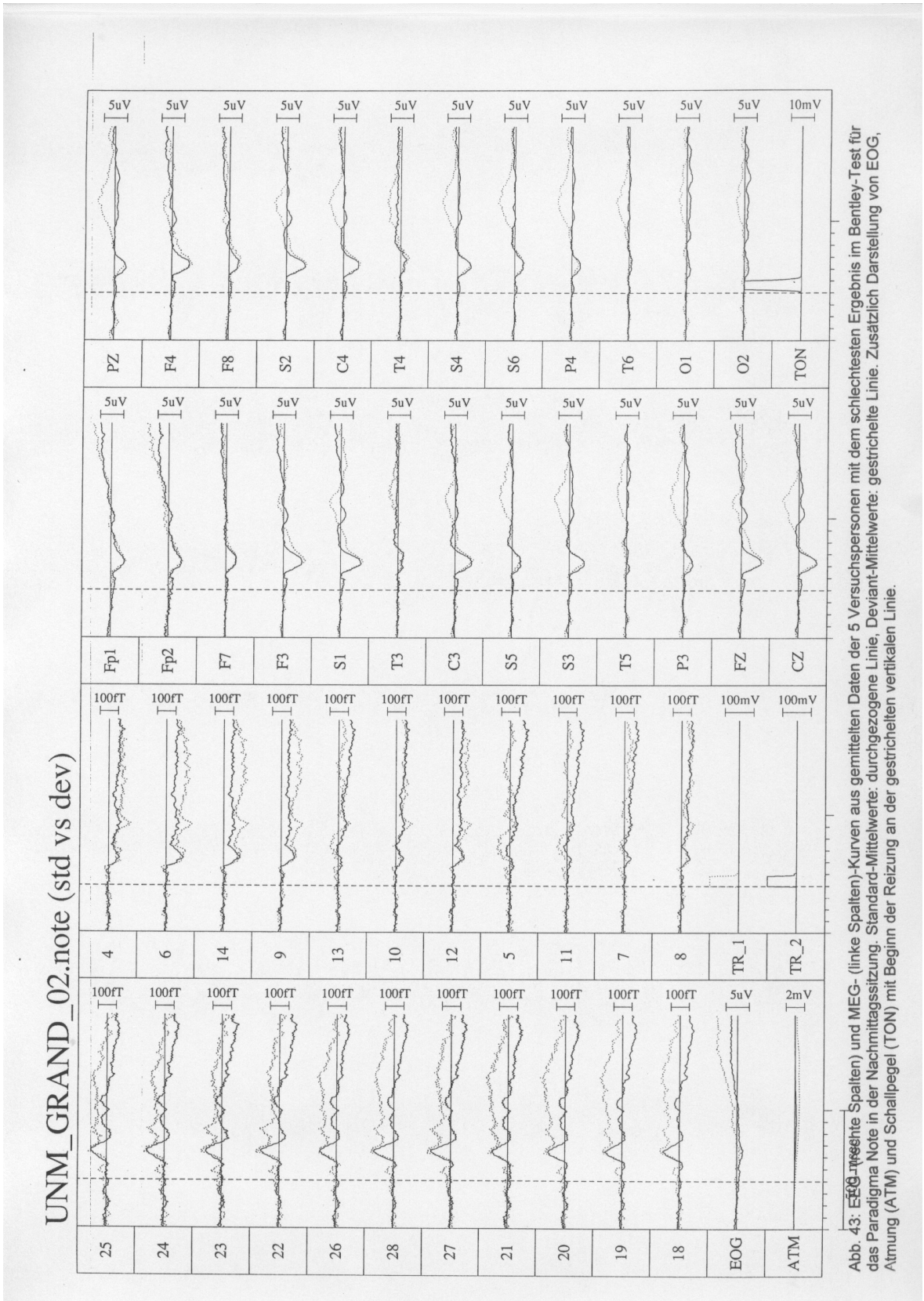


Abb. 43: EEG (rechte Spalten) und MEG- (linke Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 5 Versuchspersonen mit dem schlechtesten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Note in der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

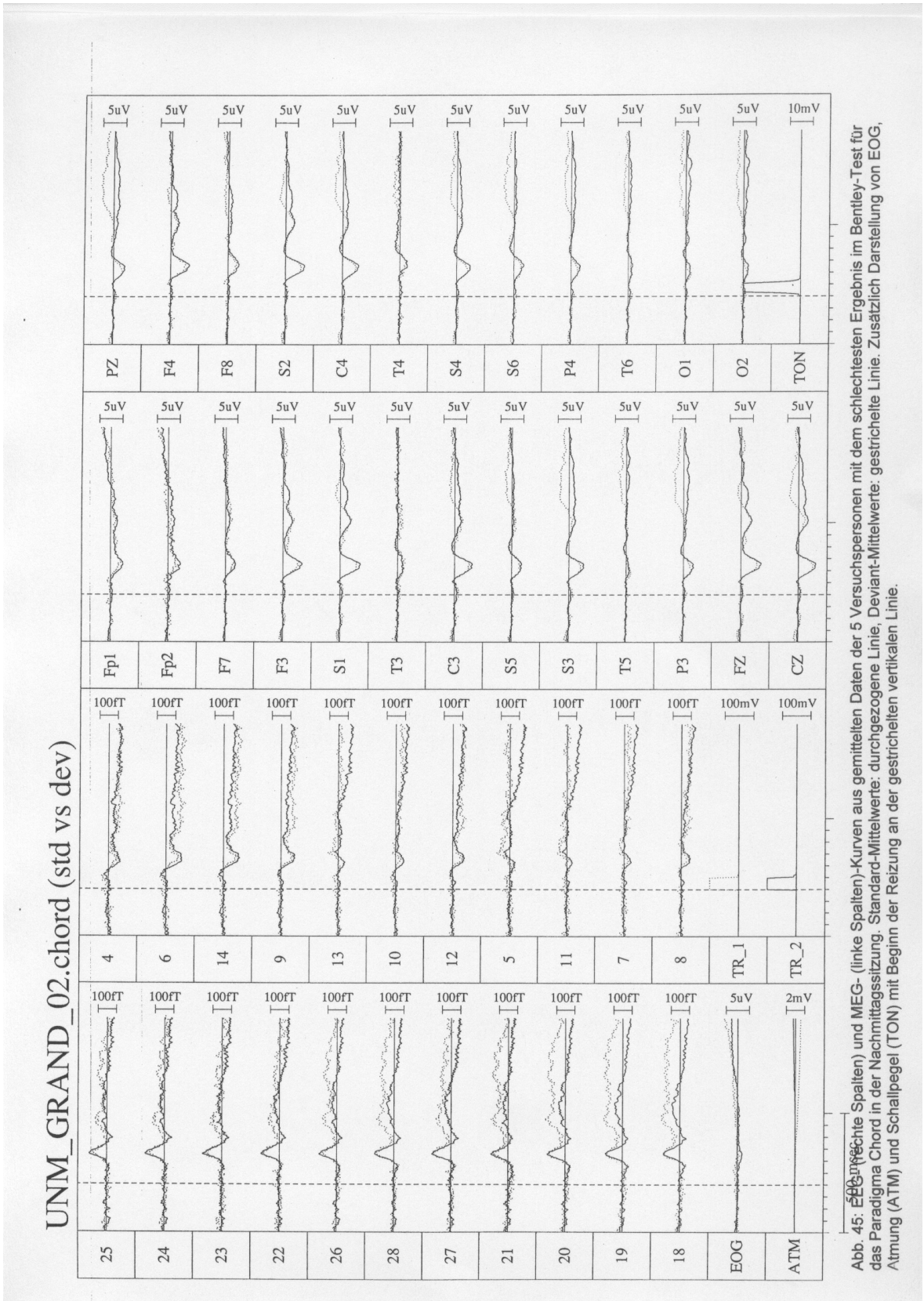


Abb. 45: EEG- (rechte Spalten) und MEG- (linke Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 5 Versuchspersonen mit dem schlechtesten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Chord in der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

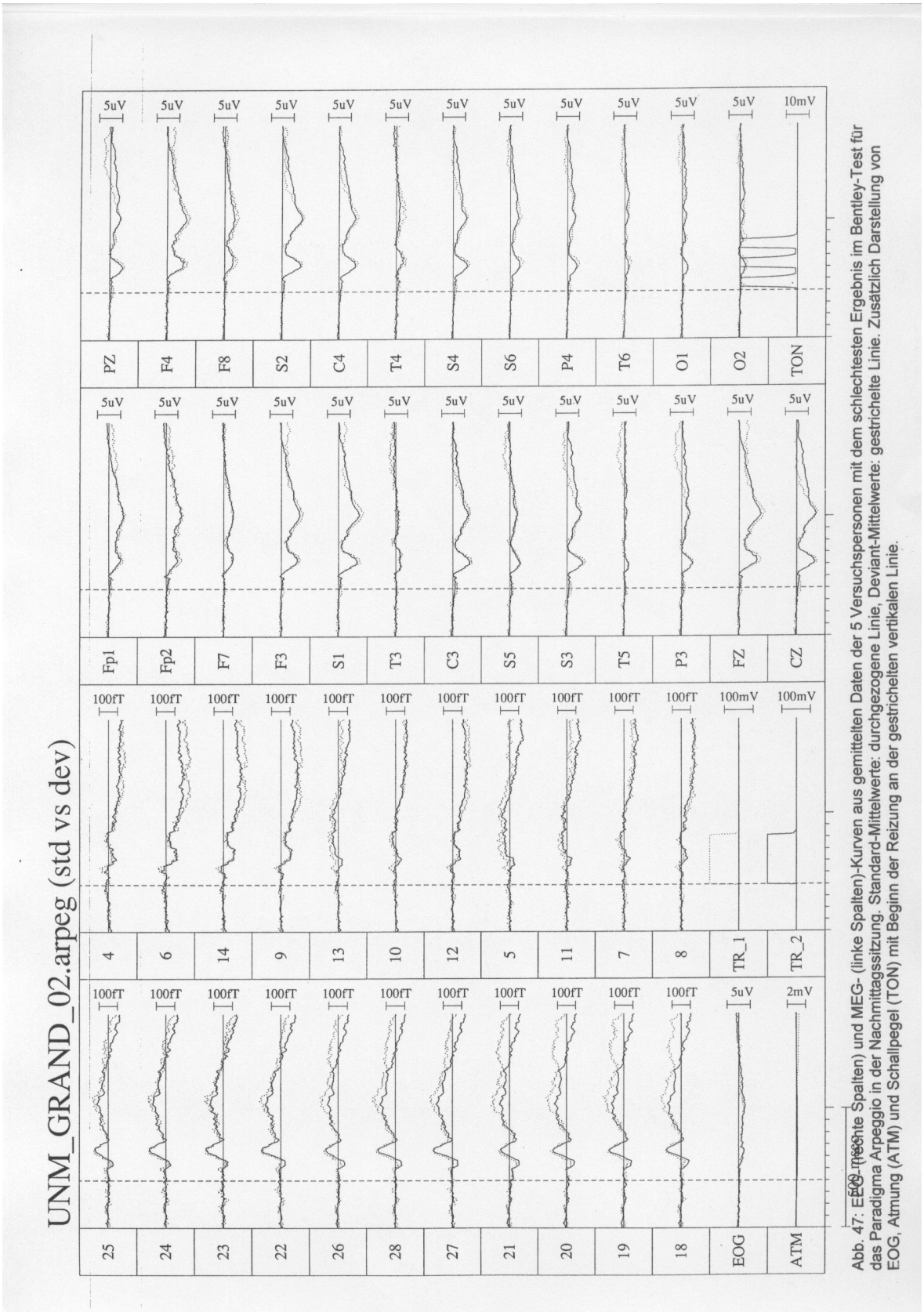


Abb. 47: EEG- (linke Spalten) und MEG- (rechte Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 5 Versuchspersonen mit dem schlechtesten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Arpeggio in der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON) mit Beginn der Reizung an der gestrichelten vertikalen Linie.

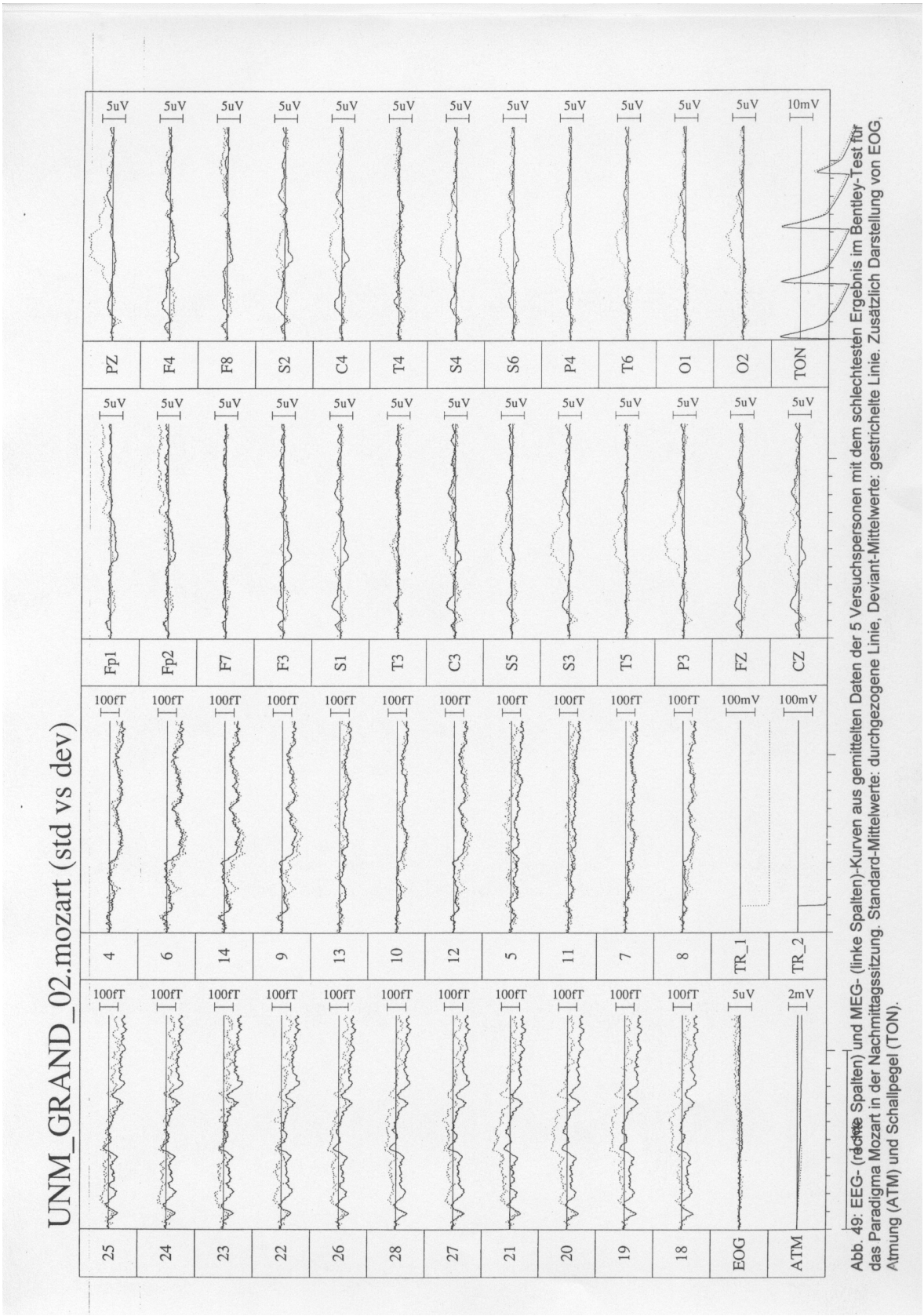


Abb. 49: EEG- (rechte Spalten) und MEG- (linke Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 5 Versuchspersonen mit dem schlechtesten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Mozart in der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON).

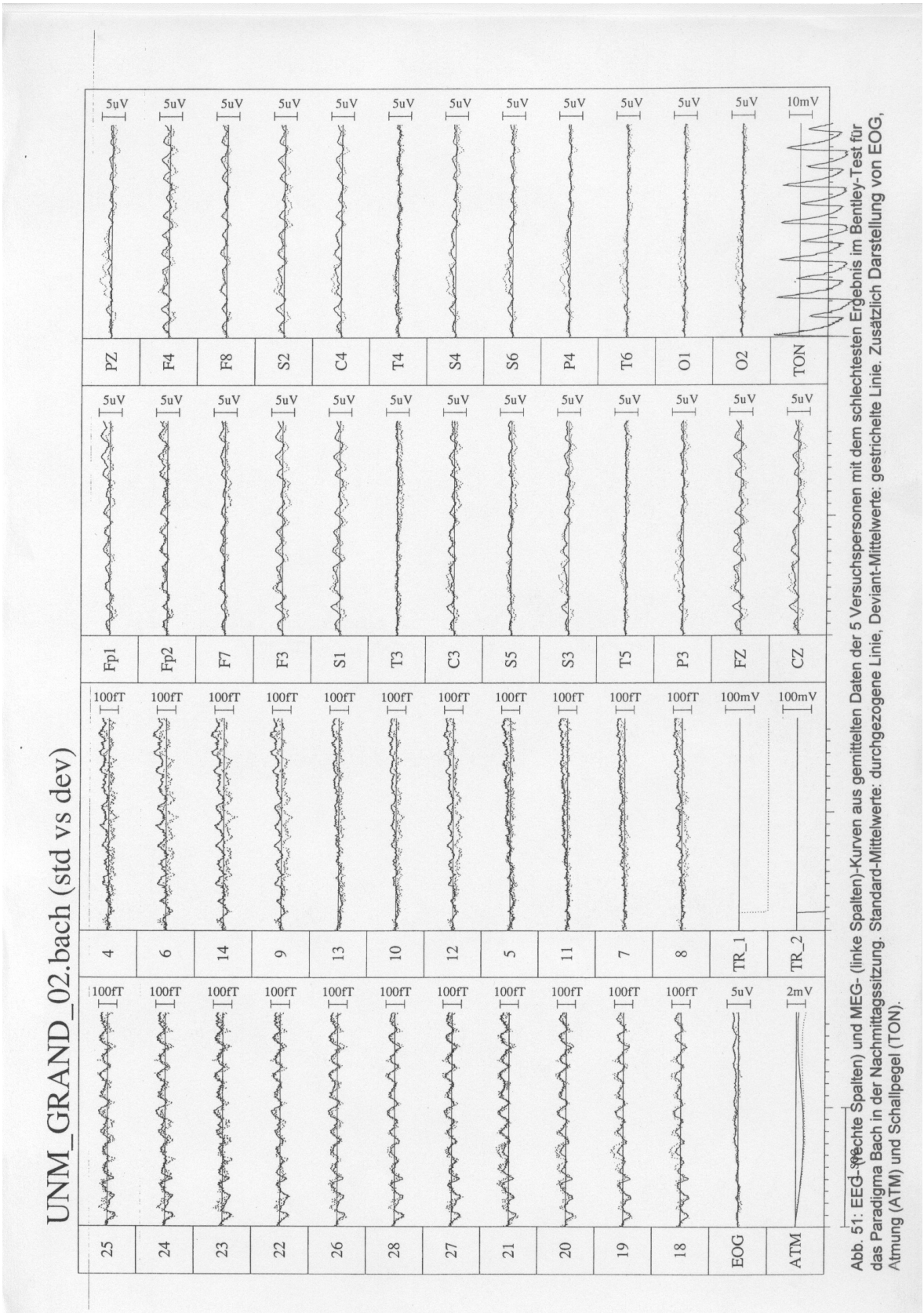


Abb. 51: EEG- (rechte Spalten) und MEG- (linke Spalten)-Kurven aus gemittelten Daten der 5 Versuchspersonen mit dem schlechtesten Ergebnis im Bentley-Test für das Paradigma Bach in der Nachmittagssitzung. Standard-Mittelwerte: durchgezogene Linie, Deviant-Mittelwerte: gestrichelte Linie. Zusätzlich Darstellung von EOG, Atmung (ATM) und Schallpegel (TON).

Tab. 4: Gemessene Potenzialamplituden der N100 aller Probanden (NUM 7 bis 28; MusKAT1: unmusikalisch, MusKAT2: musikalisch) in den Elektroden C3 und C4 über die 1. (Vormittags-) und 2. (Nachmittags-) Sitzung. Die fehlenden Werte (farbig) wurden nach untenstehenden Kriterien ergänzt.

N100

		Sitzung 1										Sitzung 2									
		Elektrode C3					Elektrode C4					Elektrode C3					Elektrode C4				
NUM	MusKAT	arpe	bach	chor	moza	note	arpe	bach	chor	moza	note	arpe	bach	chor	moza	note	arpe	bach	chor	moza	note
7	2	-4,59	-3,54018	-5,57	-2,848	-4,592	-3,269	-3,90597	-6,032	-3,708	-4,925	-4,643	-3,314	-7,03	-1,523	-5,768	-4,436	-2,575	-7,154	-1,444	-6,413
8	2	-2,527	-0,095	-3,33	-1,3839	-3,89	-3,08	-0,022	-4,065	-1,404	-4,316	-2,554	-0,548	-4,138	-0,518	-3,647	-2,664	-0,389	-4,777	-0,949	-4,216
9	1	-3,528	-0,097	-5,484	-1,679	-4,363	-4,22	-0,10702	-6,224	-1,896	-4,292	-3,936	-0,866	-4,93	-1,84483	-4,982	-3,843	-1,01	-4,435	-2,004	-4,077
10	1	-3,051	-1,431	-4,032	-2,531	-4,824	-3,078	-1,648	-4,205	-2,476	-4,244	-4,061	-1,078	-5,87	-2,309	-6,135	-3,77	-0,498	-6,862	-2,885	-5,154
11	2	-3,798	-2,727	-4,727	-2,023	-3,904	-3,248	-2,226	-3,867	-1,952	-2,951	-3,713	-2,301	-4,953	-2,053	-3,66	-3,289	-2,344	-3,635	-1,927	-2,643
12	1	-1,507	-0,46949	-3,536	0,163	-3,469	-1,265	-0,518	-3,79	0,029	-3,932	-2,603	-0,42988	-3,671	-0,20965	-2,339	-2,021	-0,351102	-3,209	-0,193	-3,048
14	2	-4,177	-1,71	-4,795	-3,445	-5,026	-2,749	-1,749	-4,001	-2,89	-4,369	-4,191	-1,262	-5,239	-2,274	-4,167	-3,302	-1,453	-4,386	-1,636	-3,364
15	1	-2,628	-1,195	-3,528	-2,757	-4,533	-3,621	-1,466	-4,294	-3,348	-4,704	-4,548	-0,583	-3,23	-2,953	-2,642	-5,654	-0,934	-3,277	-3,371	-2,842
16	1	-0,929	0,16501	-1,385	-0,207	-2,47	-1,776	0,18206	-1,93	0,009	-3,907	-0,71847	0,1525	-1,816	-0,09106	-1,561	-0,62	0,122	-1,692	-0,08452	-1,843
17	2	-1,148	-0,37976	-3,939	-0,902	-2,544	-1,011	-0,419	-4,267	-0,9	-3,385	-2,103	-0,92748	-2,474	2,068	-2,074	-2,248	-0,742	-2,985	-0,289	-2,879
18	1	-2,171	0,172	-4,154	-1,106	-3,614	-1,929	-1,503	-4,483	-1,215	-3,335	-1,444	1,003	-4,203	-1,137	-2,338	-0,898	0,8024181	-4,371	-1,011	-3,693
19	2	-3,058	-1,045	-4,993	-1,424	-4,966	-2,284	-0,683	-4,147	-1,03	-3,814	-4,727	-0,674	-4,782	-0,841	-4,116	-4,213	-0,005	-3,476	0,207	-2,642
20	2	-5,857	-1,61	-5,538	-1,598	-4,377	-5,196	-1,303	-4,445	-1,165	-4,233	-5,269	-0,984	-5,327	-2,295	-3,544	-4,536	-0,694	-4,164	-2,19	-3,495
21	2	-7,707	-0,173	-6,014	-2,789	-6,736	-5,855	-0,515	-4,688	-3,455	-4,542	-6,75	-1,557	-5,341	-3,21	-6,262	-5,002	-1,309	-4,582	-3,767	-5,049
22	2	-5,796	-1,83899	-7,792	-2,33	-7,059	-5,095	-2,029	-8,184	-2,816	-5,78	-6,199	-1,315	-8,471	-2,93	-6,723	-5,299	-0,827	-7,651	-2,475	-5,598
23	1	-2,686	-0,32162	-4,236	-0,921	-3,546	-2,58	-0,35485	-4,03	-0,915	-3,283	-3,475	-0,428	-4,568	-0,58	-3,935	-2,76	-0,107	-3,754	-1,276	-3,794
25	1	-6,7	-1,581	-6,686	-3,747	-8,667	-6,0841	-1,344	-7,012	-3,131	-8,999	-6,121	-0,289	-9,057	-5,143	-9,528	-2,528	-0,231205	-2,666	-1,367	-2,159
26	1	-6,768	-3,061	-5,945	-5,611	-7,194	-6,573	-2,943	-5,326	-5,507	-6,577	-8,202	-4,042	-7,751	-5,119	-7,275	-7,62	-3,388	-7,425	-4,591	-6,267
27	2	-4,907	-1,825	-6,056	-1,991	-5,448	-4,133	-2,255	-5,995	-1,939	-4,342	-4,117	-1,397	-6,212	-2,962	-4,948	-3,793	-0,949	-5,784	-2,447	-5,494
28	1	-5,93	-1,759	-6,593	-4,15	-6,042	-5,112	-2,247	-5,282	-4,209	-4,435	-5,195	-1,818	-6,867	-4,181	-6,741	-4,423	-1,252	-5,905	-3,527	-5,296
MW1		-3,8296	-1,38769		-2,2056		-3,4776	-1,53108		-2,23758		-4,36978	-1,4778		-2,23294		-3,7709	-1,182267		-2,05559	
MW2			-1,27223		-2,2675			-1,40369		-2,31195			-1,1649		-2,10603			-0,951424		-1,95484	

MW1: Mittel über alle Fälle, für die von einer Sitzung ein kompletter Wertesatz (Werte von beiden Elektroden) vorliegt;
wird benutzt um fehlende Messung x(a) an der Elektrode a aus dem Wert x(b) an der Elektrode b zu extrapolieren: x(a)=X(b) / MW1(b)*MW2(b)

MW2: Mittel über alle Fälle, für die von beiden Sitzungen komplette Wertesätze vorliegen oder extrapoliert (rote Werte) werden konnten
wird benutzt, um fehlende Messungen x(a,A) und x(b,A) der Sitzung A aus den Werten der Sitzung B zu extrapolieren: x(a,A)=MW2(a,A)*[x(a,B)+x(b,B)] / (MW2(a,B)+MW2(b,B)]
Dieses Verfahren bewirkt,
(1) daß das Verhältnis Elektrode a zu Elektrode b in der Sitzung A im Mittel nicht verändert wird, d.h.x(a,A):x(b,A)=MW2(a,A):MW2(b,A)
und (2) daß das Verhältnis von Sitzung A zu Sitzung B im Mittel nicht verändert wird, d.h. [x(a,A)+x(b,A)]:[x(a,B)+x(b,B)]=[MW2(a,A)+MW2(b,A)]:[MW2(a,B)+MW2(b,B)]

Tab. 5: Gemessene Potenzialamplituden der MMN aller Probanden (NUM 7 bis 28; MusKAT1: unmusikalisch, MusKAT2: musikalisch) in den Elektroden F3 und F4 über die 1. (Vormittags-) und 2. (Nachmittags-) Sitzung. Die fehlenden Werte (farbig) wurden nach untenstehenden Kriterien ergänzt.

MMN

		Sitzung 1										Sitzung 2									
		Elektrode F3					Elektrode F4					Elektrode F3					Elektrode F4				
NUM	MusKAT	arpe	bach	chor	moza	note	arpe	bach	chor	moza	note	arpe	bach	chor	moza	note	arpe	bach	chor	moza	note
7	2	-4,164	-8,171	-4,356	-7,667	-3,279	-4,911	-7,626	-4,354	-8,995	-3,522	-2,195	-5,648	-6,304	-7,781	-5,076	-1,783	-4,891	-5,88	-6,976	-3,651
8	2	-0,8448	-2,122	-1,993	-3,482	-2,374	-0,859	-2,721	-1,866	-3,615	-3,019	-1,213	-2,298	-1,764	-2,56	-2,015	-1,423	-1,154	-2,182	-2,711	-2,293
9	1	-1,533	-1,395	-2,248	-3,112	-1,711	-1,066	-1,548	-2,862	-3,493	-2,077	-1,537	-1,471	-1,374	-2,534	-2,761	-1,869	-1,45209	-1,36287	-2,622	-1,348
10	1	-2,716	-1,048	-3,11	-1,741	-1,648	-2,469	-1,271	-2,932	-2,696	-2,525	-3,67	-2,631	-3,129	-4,529	-2,323	-3,814	-4,194	-4,015	-3,85	-2,781
11	2	-2,777	-1,999	-4,481	-3,052	-3,278	-2,821	-3,891	-4,434	-4,038	-2,858	-3,82216	-1,356	-4,185	-2,914	-5,325	-4,377	-1,776	-4,76	-3,807	-5,302
12	1	-1,964	-1,4651	-2,48	-1,92	-1,867	-1,919	-1,62578	-1,963	-2,422	-3,033	-1,477	-1,66	-2,542	-1,332	-2,189	-1,544	-1,63866	-2,495	-2,569	-2,181
14	2	-7,081	-4,291	-6,094	-5,748	-8,069	-8,088	-5,467	-7,735	-6,424	-8,312	-4,949	-4,294	-5,421	-6,003	-4,614	-8,668	-4,2388	-6,498	-7,854	-4,574
15	1	-1,766	-1,4752	-0,797	-5,653	-2,968	-1,758	-1,637	-0,80382	-6,829	-3,443	-1,775	-3,106	-0,79591	-4,589	-2,258	-2,818	-2,648	-0,78946	-5,442	-4,029
16	1	-1,478	-4,692	-0,992	1,65208	-1,4073	-1,801	-2,718	-1,00049	-3,42279	-1,415	-1,252	-0,87221	-1,07	-3,237	-0,54994	-0,994	-0,861	-1,06133	-3,206	-0,543
17	2	-3,326	-1,025	-3,795	-4,837	-3,541	-3,276	-1,315	-3,368	-5,754	-2,087	-2,021	-4,905	-2,696	-7,019	-3,786	-1,84	-4,551	-2,531	-9,183	-2,809
18	1	-2,551	-2,696	-3,689	-2,798	-2,8524	-2,239	-2,987	-2,947	-3,252	-2,868	-1,852	-2,313	-4,442	-2,9	-4,253	-1,524	-1,925	-3,794	-1,516	-4,248
19	2	-3,138	-2,281	-4,531	-3,07	-3,383	-3,325	-2,017	-5,481	-3,96	-2,815	-2,515	-2,999	-1,989	-2,212	-2,263	-1,782	-3,707	-1,013	-2,932	-2,399
20	2	-1,952	-1,779	-2,748	-3,486	-3,362	-2,823	-2,782	-2,52	-4,207	-3,913	-1,427	-2,968	-3,047	-2,736	-2,609	-2,722	-2,953	-3,958	-3,264	-2,427
21	2	-3,124	-1,68	-2,567	-4,601	-3,591	-2,231	-1,322	-2,58897	-2,808	-2,231	-1,061	-3,389	-2,393	-3,185	-1,657	-1,21502	-3,209	-1,682	-2,089	-1,63609
22	2	-3,585	-4,817	-0,921	-3,365	-4,573	-5,257	-5,945	-1,419	-4,339	-4,456	-2,415	-3,826	-4,532	-2,649	-3,54	-2,766	-3,734	-3,154	-3,298	-3,698
23	1	-1,739	-2,357	-1,777	-0,92	-3,762	-1,781	-3,335	-1,227	-1,147	-3,738	-1,333	-0,766	-2,131	-1,663	-1,818	-1,815	-0,75615	-2,894	-1,346	-2,413
25	1	-3,135	-0,818	-4,339	-4,434	-4,003	-2,956	-1,504	-4,026	-4,394	-5,439	-3,056	-5,073	-3,796	-4,012	-5,307	-3,461	-5,105	-3,856	-4,612	-6,48
26	1	-2,863	-2,239	-3,284	-3,04	-5,424	-1,057	-2,303	-2,841	-1,524	-4,82	-3,249	-4,402	-2,809	-5,581	-4,256	-2,703	-3,551	-1,838	-5,107	-2,324
27	2	-2,313	-2,896	-3,082	-2,657	-2,272	-2,59	-2,666	-3,034	-2,613	-0,904	-2,007	-1,812	-2,637	-0,959	-1,007	-1,985	-2,139	-2,924	-1,506	-2,024
28	1	-1,933	-2,485	-2,807	-2,376	-3,425	-1,665	-2,724	-3,203	-2,962	-3,58	-2,822	-2,824	-2,952	-2,701	-2,68	-3,172	-3,376	-2,835	-3,524	-2,366
MW1		-2,7967	-2,788	-3,27853		-3,4739	-2,8438	-3,09376	-3,30659		-3,49289	-2,25588	-3,30333	-3,33935		-3,22667	-2,58335	-3,26087	-3,31229		-3,18594
MW2			-2,6456	-3,12074	-3,5768			-2,93574	-3,14745	-3,97221			-2,99754	-3,11647	-3,57153			-2,959	-3,09122	-3,9057	

MW1: Mittel über alle Fälle, für die von einer Sitzung ein kompletter Wertesatz (Werte von beiden Elektroden) vorliegt;
wird benutzt um fehlende Messung x(a) an der Elektrode a aus dem Wert x(b) an der Elektrode b zu extrapolieren: x(a)=X(b) / MW1(b)*MW2(b)

MW2: Mittel über alle Fälle, für die von beiden Sitzungen komplette Wertesätze vorliegen oder extrapoliert (rote Werte) werden konnten
wird benutzt, um fehlende Messungen x(a,A) und x(b,A) der Sitzung A aus den Werten der Sitzung B zu extrapolieren: x(a,A)=MW2(a,A)*[x(a,B)+x(b,B)] / (MW2(a,B)+MW2(b,B)]
Dieses Verfahren bewirkt,
(1) daß das Verhältnis Elektrode a zu Elektrode b in der Sitzung A im Mittel nicht verändert wird, d.h.x(a,A):x(b,A)=MW2(a,A):MW2(b,A)
und (2) daß das Verhältnis von Sitzung A zu Sitzung B im Mittel nicht verändert wird, d.h. [x(a,A)+x(b,A)]:[x(a,B)+x(b,B)]=[MW2(a,A)+MW2(b,A)]:[MW2(a,B)+MW2(b,B)]

Tab. 6: Gemessene Potenzialamplituden der P300 aller Probanden (NUM 7 bis 28; MusKAT1: unmusikalisch, MusKAT2: musikalisch) in den Elektroden P3 und P4 über die 1. (Vormittags-) und 2. (Nachmittags-) Sitzung. Die fehlenden Werte (farbig) wurden nach untenstehenden Kriterien ergänzt.

P300

		Sitzung 1										Sitzung 2									
		Elektrode P3					Elektrode P4					Elektrode P3					Elektrode P4				
NUM	MusKAT	arpe	bach	chor	moza	note	arpe	bach	chor	moza	note	arpe	bach	chor	moza	note	arpe	bach	chor	moza	note
7	2	7,134	12,85	12,01	12,424	15,625	7,271	10,109	11,44	12,588	15,549	9,201	10,465	8,921	12,819	13,548	7,66	10,251	7,648	11,109	11,243
8	2	0,53	2,616	1,766	6,279	6,662	0,66	2,527	1,865	6,848	6,87	0,915	2,837	1,518	7,004	6,72	0,915	2,927	0,677	7,065	6,631
9	1	0,973	2,43776	5,089	4,405	6,741	0,954	2,55519	6,372	5,054	8,216	1,893	2,31319	2,372	4,047	5,841	1,403	2,144	2,3	5,731	6,856
10	1	2,518	6,3	5,028	2,672	6,252	2,756	8,539	6,528	4,212	10,223	2,744	6,342	4,091	5,848	5,768	3,109	5,996	5,449	6,682	6,396
11	2	7,196	8,619	4,249	6,924	8,208	5,549	9,578	3,34	6,973	5,982	5,702	9,959	7,317	7,938	9,297	5,809	8,463	8,779	5,749	7,697
12	1	2,409	4,907	2,043	5,767	4,444	2,17	4,718	1,45	5,804	6,813	1,619	3,488	3,494	8,393	2,471	2,171	2,624	3,895	8,642	2,29
14	2	12,512	10,292	14,163	13,198	17,763	8,955	7,202	12,006	10,965	13,532	7,811	10,238	11,697	6,398	13,278	7,659	8,83	9,646	6,748	13,087
15	1	1,76811	2,048	1,993852	7,088	5,401	1,707	2,495	2,18228	6,11	4,897	1,33	1,522	1,872	5,894	6,462	1,066	2,599	1,82031	5,513	6,192
16	1	1,527	3,71637	6,154	7,07	7,052	1,64	3,8954	5,887	7,899	8,086	2,018	3,641	2,199	4,77	6,04262	0,748	3,154	2,469	4,393	5,57083
17	2	4,74	3,706	7,257	5,921	5,764	6,115	4,837	10,104	8,77	5,91	4,368	4,204	5,949	7,191	7,445	1,939	3,296	4,049	4,38	4,215
18	1	1,556	5,43531	2,36	5,237	5,343	1,332	5,69714	3,317	5,984	5,074	1,613	5,15757	2,269	4,788	4,46458	1,592	4,7803	2,603	6,191	4,116
19	2	3,939	6,381	5,651	10,787	10,758	4,518	6,523	5,925	11,501	11,583	4,736	4,68	6,006	10,821	4,463	4,015	4,265	5,726	10,145	4,387
20	2	4,568	5,43531	4,427	3,548	4,292	4,68	5,69714	3,793	2,803	3,952	4,683	5,15757	3,855	2,212	3,765	4,535	4,7803	4,244	2,095	3,723
21	2	2,508	6,404	2,845	6,384	5,21	2,5978	6,798	2,974	5,414	5,98	2,131	6,073	3,725	4,44	4,7	2,729	4,31	3,088	4,678	4,938
22	2	7,014	6,862	7,295	9,554	11,044	6,405	8,419	6,689	7,942	10,12	5,633	4,807	5,635	7,415	5,142	5,047	6,042	6,888	7,454	5,973
23	1	1,52262	2,64746	3,141	5,854	4,942	1,47	2,775	4,874	8,275	5,953	2,997	3,387	2,717	2,924	3,26	2,192	4,107	2,624	3,225	3,00547
25	1	3,547	7,628	3,592	9,105	14,009	4,346	7,901	2,909	10,269	11,267	1,645	5,965	3,519	3,642	8,468	2,519	3,997	2,806	4,021	6,118
26	1	1,06066	2,258	1,839	5,587	6,209	1,024	5,048	2,033	6,262	5,813	3,127	4,353	3,567	5,832	7,008	2,4	4,504	3,341	5,916	5,764
27	2	3,088	5,548	2,351	9,022	6,447	3,714	5,403	2,313	9,74	6,743	1,43	4,185	2,295	9,09	2,706	2,327	4,254	2,379	8,271	3,392
28	1	1,225	2,615	4,787	9,242	5,265	1,1827	3,226	4,458	9,731	5,091	1,606	4,377	3,158	5,714	4,923	1,947	4,283	3,365	5,374	4,358
MW1		4,21673	5,9356				4,071	6,22153					5,32488	4,43705		6,58853		4,9354	4,31453		6,07412
MW2			5,73009	5,055105		7,91468		6,00613	5,17247		7,872		5,43013	4,43705		6,30156		5,0468	4,31453		5,80955
MW3			5,43531					5,69714					5,15757					4,7803			

MW1: Mittel über alle Fälle, für die von einer Sitzung ein kompletter Wertesatz (Werte von beiden Elektroden) vorliegt;
wird benutzt um fehlende Messung x(a) an der Elektrode a aus dem Wert x(b) an der Elektrode b zu extrapolieren: x(a)=X(b) / MW1(b)*MW2(b)

MW2: Mittel über alle Fälle, für die von beiden Sitzungen komplette Wertesätze vorliegen oder extrapoliert (rote Werte) werden konnten
wird benutzt, um fehlende Messungen x(a,A) und x(b,A) der Sitzung A aus den Werten der Sitzung B zu extrapolieren: x(a,A)=MW2(a,A)*[x(a,B)+x(b,B)] / (MW2(a,B)+MW2(b,B)]
Dieses Verfahren bewirkt,
(1) daß das Verhältnis Elektrode a zu Elektrode b in der Sitzung A im Mittel nicht verändert wird, d.h.x(a,A):x(b,A)=MW2(a,A):MW2(b,A)
und (2) daß das Verhältnis von Sitzung A zu Sitzung B im Mittel nicht verändert wird, d.h. [x(a,A)+x(b,A)]:[x(a,B)+x(b,B)]=[MW2(a,A)+MW2(b,A)]:[MW2(a,B)+MW2(b,B)]

MW3: Mittelwert über alle gemessenen und extrapolierten Werte
wird benutzt um alle Fälle aufzufüllen, in denen von keiner Elektrode und keiner Sitzung Werte vorliegen