

Aus dem Sozialpädiatrischem Zentrum Inn-Salzach  
Zentrum für Kinder und Jugendliche Altötting

Leiter: Prof. Dr. med. Ronald G. Schmid

### **EEG-Grundaktivität und Intelligenz**

Zusammenhänge zwischen  
automatisch analysierter EEG-Grundaktivität  
und den Ergebnissen von Intelligenztestverfahren

Dissertation

Zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin  
an der Medizinischen Fakultät der  
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Ursula Frohne

aus  
Menden

2002

Mit Genehmigung der medizinischen Fakultät  
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. R. G. Schmid

Mitberichterstatter: Priv. Doz. Dr. R. Werth

Dekan: Prof. Dr. med. Dr. h.c. K. Peter

Tag der mündlichen Prüfung: 19.12.2002

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	V
Tabellenverzeichnis .....	VI
Abkürzungsverzeichnis .....	VII
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Probanden und Methoden .....</b>	<b>2</b>
2.1 Probanden .....	2
2.2 Methode .....	3
2.2.1 EEG.....	3
2.2.2 Datenerfassung.....	4
2.2.3 Spektralanalyse .....	5
2.2.4 Das angewendete Testverfahren.....	8
2.2.4.1 HAWIK-R (Hamburg-Wechsler Intelligenztest für Kinder, Revision 1983) .....	8
2.2.4.2 Untertests des HAWIK-R.....	9
2.2.4.3 Studienrelevante Unterteilungen.....	11
<b>3 Ergebnisse .....</b>	<b>12</b>
3.1 Korrelationsanalyse .....	12
3.1.1 Ergebnisse der Bandanalyse .....	12
3.1.2 Ergebnisse der Spektralanalyse.....	21
3.1.2.1 EEG-Kanal SP2-okzipital rechts bei 10,0 Hz .....	25
3.1.2.2 EEG-Kanal SP2-okzipital rechts bei 10,5 Hz .....	25
3.1.2.3 EEG-Kanal SP4-okzipital links bei 10,0 Hz .....	26
3.1.2.4 EEG-Kanal SP4-okzipital links bei 10,5 Hz .....	27
3.2 Ergebnis der Varianzanalyse (H12 – H14).....	27
3.2.1 Bänder .....	29
3.2.1.1 Varianzanalyse des HAWIK-R Verbal-IQ (H12) .....	29
3.2.1.2 Varianzanalyse des HAWIK-R Handlungs-IQ (H13).....	30
3.2.1.3 Varianzanalyse des HAWIK-R Gesamt-IQ (H14).....	30
3.2.1.4 Resümee der Varianzanalyse.....	30
3.2.2 Spektren.....	31
3.2.2.1 Ergebnisse der Spektraldaten der Varianzanalyse im Verbal-IQ (H12).....	31
3.2.2.2 Ergebnisse der Spektraldaten der Varianzanalyse im Handlungs-IQ (H13) .....	31
3.2.2.3 Ergebnisse der Spektraldaten der Varianzanalyse des Gesamt-IQ (H14).....	32
3.2.2.4 Resümee der Ergebnisse der Spektraldaten .....	32
3.3 Vergleich der EEG-Ergebnisse bei den einzelnen Untertests (H1 – H11) des HAWIK-R .....	32
3.3.1 Ergebnisse der Bandanalyse der Unterteste H1 – H11 des HAWIK-R .....	33
3.3.1.1 Alpha-Band okzipital .....	33

3.3.1.2	Subdelta-Band okzipital.....	34
3.3.1.3	Weitere signifikante Ergebnisse der Bandanalyse .....	35
3.3.2	Spektren der Varianzanalyse von H1 – H11 .....	35
3.3.2.1	Ergebnisse der Spektralanalyse okzipital.....	35
3.3.2.2	Weitere signifikante Unterschiede der Spektralanalyse im Vergleich mit den Untertests H1 – H11 .....	38
<b>4</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>39</b>
4.1	Ausblick.....	47
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>50</b>
<b>7</b>	<b>Lebenslauf.....</b>	<b>56</b>
<b>8</b>	<b>Danksagung .....</b>	<b>57</b>

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1</b>	Korrelation der EEG-Aktivität in den frontozentralen Bändern Subdelta (a), Delta (b) und Theta (c) mit den Ergebnissen der HAWIK-R Subtests H1–H14 bei 69 Probanden.....	14
<b>Abb. 2</b>	Korrelation der EEG-Aktivität in den frontozentralen Bändern Alpha (a), Beta-1 (b) und Beta-2 (c) mit den Ergebnissen der HAWIK-R Subtests H1–H14 bei 69 Probanden.....	15
<b>Abb. 3</b>	Korrelation der EEG-Aktivität in den parietookzipitalen Bändern Subdelta (a), Delta (b) und Theta (c) mit den Ergebnissen der HAWIK-R Subtests H1–H14 bei 69 Probanden.....	16
<b>Abb. 4</b>	Korrelation der EEG-Aktivität in den parietookzipitalen Bändern Alpha (a), Beta-1 (b) und Beta-2 (c) mit den Ergebnissen der HAWIK-R Subtests H1–H14 bei 69 Probanden.....	17
<b>Abb. 5</b>	Korrelation der EEG-Aktivität in den parietookzipitalen Bändern Alpha und Delta mit den Ergebnissen der HAWIK-R Subtests H1–H14 bei 69 Probanden.....	20
<b>Abb. 6</b>	Spektralanalyse: Die EEG-Aktivität parietookzipital rechts korreliert bei 10,0 Hz mit fast allen HAWIK-R Subtests.....	25
<b>Abb. 7</b>	Spektralanalyse: Die EEG-Aktivität parietookzipital rechts korreliert auch bei 10,5 Hz mit fast allen HAWIK-R Subtests.....	26
<b>Abb. 8</b>	Spektralanalyse: Die EEG-Aktivität parietookzipital korreliert auch links bei 10,0 Hz mit fast allen HAWIK-R Subtests.....	26
<b>Abb. 9</b>	Spektralanalyse: Die EEG-Aktivität parietookzipital korreliert auch bei 10,5 Hz links mit fast allen HAWIK-R Subtests.....	27
<b>Abb. 10</b>	Analyseschritte bei 69 Probanden. Probanden mit IQ > 109 wurden im Analyseschritt I mit Probanden mit IQ < 90 verglichen, im Analyseschritt II mit Probanden mit IQ 90 –109.....	28
<b>Abb. 11</b>	EEG-Bänder mit signifikantem Aktivitätsunterschied zwischen Kindern mit Verbal-IQ < 90 ( $n = 17$ ) und > 109 ( $n = 13$ ) (Analyseschritt I) sowie zwischen Kindern mit Verbal-IQ = 90–109 ( $n = 39$ ) und > 109 ( $n = 13$ ) (Analyseschritt II).....	29
<b>Abb. 12</b>	EEG-Frequenzen mit signifikantem Aktivitätsunterschied zwischen Kindern mit Handlungs-IQ < 90 ( $n = 26$ ) und > 109 ( $n = 16$ ) (Analyseschritt I). Bei Kindern mit IQ > 109 war die höchste Aktivität im Anteil von 10,0 Hz parietookzipital im Alpha-Band nachweisbar.....	31
<b>Abb. 13</b>	Die Probanden mit mehr als 12 Wertpunkten (WP) in den HAWIK-R Untertests haben eine höhere EEG-Aktivität im Alpha-Band p.o. als Patienten mit weniger als 7 Wertpunkten (WP).....	33
<b>Abb. 14</b>	EEG-Aktivität im Subdelta-Band p.o. bei Kindern mit weniger als 7 und mehr als 12 Wertpunkten in den HAWIK-R Untertests.....	34
<b>Abb. 15</b>	Ergebnisse der Spektralanalyse des Kanals SP2 okzipital rechts bei 10,0 Hz (a) und 10,5 Hz (b) in den Subtests H1 – H11. Die okzipitale 10,0 und 10,5 Hz-Aktivität rechts war im Untertest H9 (Bilderordnen) bei Patienten mit besonders wenig Wertpunkten (<7) hochsignifikant niedriger als bei denen mit besonders viel Wertpunkten (>12). .....	36
<b>Abb. 16</b>	Ergebnisse der Spektralanalyse des Kanals SP4 okzipital rechts bei 10,0 Hz (a) und 10,5 Hz (b) in den Subtests H1 – H11. ....	37

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1</b>	Verteilung der 69 Probanden in den drei Intelligenztestgruppierungen bei den Ergebnissen des Verbal-IQ, Handlungs-IQ und Gesamt-IQ .....	2
<b>Tab. 2</b>	Die Untertests des HAWIK-R (Hamburg-Wechsler Intelligenztest für Kinder, Revision 1983).....	9
<b>Tab. 3</b>	Korrelation der EEG-Aktivität in den frontozentralen und parietookzipitalen Bändern Subdelta, Delta, Theta, Alpha, Beta-1 und Beta-2 mit den Ergebnissen der HAWIK-R Subtests H1–H14 bei 69 Probanden. Die meisten Korrelationen mit Signifikanz <0.05 ergeben sich im Alpha- und Delta-Band okzipital .....	13
<b>Tab. 4</b>	Signifikante Korrelationen zum Untertest H3. Die EEG-Aktivität von 10,0 und 10,5 Hz über okzipital links zeigt die deutlichste Korrelation .....	21
<b>Tab. 5</b>	Signifikante Korrelationen zum Untertest H4. Bei diesem Untertest waren Frequenzanteile unter 9,5 Hz frontal durchweg negativ, über 9,5 Hz okzipital durchweg positiv zum Testergebnis korreliert. Besonders hohe Signifikanz fand sich beidseits bei 8,5 Hz frontal und 10,0 Hz okzipital.....	22
<b>Tab. 6</b>	Signifikante Korrelationen zum Untertest H5. Auch bei diesem Untertest war der Frequenzanteil von 10 Hz okzipital beidseits positiv mit dem Testergebnis korreliert. ....	23
<b>Tab. 7</b>	Signifikante Korrelationen zum Untertest H9. Hier waren die Frequenzen 10,0 und 10,5 Hz okzipital positiv mit den Testergebnissen korreliert .....	23
<b>Tab. 8</b>	Signifikante Korrelationen zum Verbal-IQ (H12). Hier liegen die positiven Korrelationen erneut bei 10,0 Hz okzipital .....	24
<b>Tab. 9</b>	Signifikante Korrelationen zum Handlungs-IQ (H13). Die positiven Korrelationen liegen beim Handlungs-IQ mit 10,5 Hz um 0,5 Hz höher als bei Verbal-IQ .....	24
<b>Tab. 10</b>	Signifikante Ergebnisse der Bandanalyse der Untertests H1 – H11 des HAWIK-R fanden sich noch im Alpha-Band frontal und im Delta-Band okzipital und frontal .....	35
<b>Tab. 11</b>	Weitere signifikante Ergebnisse der Bandanalyse H1 – H11 des HAWIK-R.....	38

## Abkürzungsverzeichnis

* / **	$p < 0,05$ / $p < 0,01$
EEG	Elektroenzephalogramm
f.z.	fronto-zentral
Gesamt-IQ	Gesamt-Intelligenzquotient
H 1	Allgemeines Wissen (Untertest der HAWIK-R)
H 2	Allgemeines Verständnis (Untertest der HAWIK-R)
H 3	Rechnerisches Denken (Untertest der HAWIK-R)
H 4	Gemeinsamkeitenfinden (Untertest der HAWIK-R)
H 5	Wortschatz-Test (Untertest der HAWIK-R)
H 6	Zahlennachsprechen (Untertest der HAWIK-R)
H 7	Zahlen-Symbol-Test (Untertest der HAWIK-R)
H 8	Bilderergänzen (Untertest der HAWIK-R)
H 9	Bilderordnen (Untertest der HAWIK-R)
H 10	Mosaik-Test (Untertest der HAWIK-R)
H 11	Figurenlegen (Untertest der HAWIK-R)
H 12	Verbal-Intelligenzquotient
H 13	Handlungs-Intelligenzquotient
H 14	Gesamt-Intelligenzquotient
Handlungs-IQ	Handlungs-Intelligenzquotient
HAWIK-R	Hamburg-Wechsler-Intelligenz-Test für Kinder
HAWIVA	Hannover-Wechsler-Intelligenztest für das Vorschulalter
Hz	Hertz
IQ	Intelligenzquotient
n	Anzahl
N 1	Gruppe der Patienten mit $IQ < 90$
N 2	Gruppe der Patienten mit $IQ 90-109$
N 3	Gruppe der Patienten mit $IQ > 109$
P	Signifikanz
p.o.	parieto-okzipital
r	Korrelationskoeffizient
SP 1	EEG Kanal 1: fronto-zentral rechts
SP 2	EEG Kanal 2: parieto-okzipital rechts
SP 3	EEG Kanal 3: fronto-zentral links
SP 4	EEG Kanal 4: parieto-okzipital links
Verbal-IQ	Verbal-Intelligenzquotient
WP	Wertpunkt (im HAWIK-R)

## 1 Einleitung

Die Bewertung der Ergebnisse von Intelligenztestverfahren wird als schwierig angesehen. Einerseits werden sie sehr stark durch die Motivation und Mitarbeit des Probanden beeinflusst, andererseits sind alle Intelligenztests von der kulturellen Vorbildung und dem sprachlichen Verständnis des Probanden abhängig. Darüber hinaus ist selbst bei Verfügbarkeit validierter allgemeiner anerkannter Testverfahren die Erhebung zuverlässiger Testergebnisse sehr zeit- und personalaufwendig.

Die Analyse der Hirnaktivität durch Ableitung eines Elektroenzephalogramms wurde immer wieder als Alternative zur Erfassung der Hirnfunktionen diskutiert. Solche Zusammenhänge wurden bald nach der Erstbeschreibung des EEG durch Berger (1929) vermutet. Valide Ergebnisse waren aber in Zeiten der analogen EEG-Analyse visuell aus den auf Papier dokumentierten Elektroenzephalogrammen nicht möglich, bzw. konnten trotz zahlreicher Studien nicht überzeugend dargestellt werden.

Seit Mitte der 80iger Jahre wurde zunehmend die digitale computergestützte Ableitung des EEG mit softwareunterstützten Analysen entwickelt. In zahlreichen Untersuchungen wurde immer wieder auf die Zusammenhänge zwischen EEG-Frequenzverteilung und Intelligenz hingewiesen. Als besonders sensitiv erwies sich dabei die im entspannten Wachzustand bei geschlossenen Augen über den hinteren Hirnabschnitten gemessene Aktivität im Alphabandbereich (Wada et al. 1996, Jausovec et al. 2000). Systematische Untersuchungen wurden noch nicht in ausreichendem Maße durchgeführt. Marosi et al. forderten schon (1999) weitere Untersuchungen von automatisch analysierten EEG-Ergebnissen mit standardisierten Intelligenztestverfahren. Sie deuteten an, dass Spektralanalyse-EEG-Befunde intellektuelle Fähigkeiten einer Person reflektieren können. Voraussetzung für eine systematische Untersuchung ist eine große Zahl von Probanden, bei denen eine qualitativ hochwertige Testung zur Bestimmung des IQ vorgenommen und ein automatisch analysiertes EEG abgeleitet wird.

In der vorliegenden Studie wurden retrospektiv EEG-Daten und Ergebnisse eines Intelligenztests erhoben um herauszufinden, ob ein Zusammenhang besteht zwischen dem, was ein Patient im Intelligenztest leistet und den Eigenschaften seines EEG.

Dazu wurden Probanden im Alter von  $10 \pm 1$  Jahr ausgewählt, die im SPZ-Altötting in den Jahren 1996-1997 erstmalig vorgestellt wurden. Bei diesen wurde ein Intelligenz-Test (HAWIK-R) und eine digitale EEG-Ableitung durchgeführt.



## 2 Probanden und Methoden

### 2.1 Probanden

Im Sozialpädiatrischen Zentrum Inn-Salzach in Altötting wurden pro Jahr zwischen 3000 und 4000 Kinder mit unterschiedlichen Entwicklungsauffälligkeiten vorgestellt. Vorwiegend wurden folgende Erkrankungen diagnostiziert: Sprachstörungen, Schulprobleme (bei Behinderung, bei Normalbegabung und bei Hochbegabung), Teilleistungsstörungen (u.a. Lese-Rechtsschreibschwäche und Rechenschwäche), Verhaltensstörungen, hyperkinetische Syndrome, soziale und emotionale Krankheiten und Interaktionsproblematiken.

Die Erstuntersuchung wurde ausnahmslos durch Kinderärzte durchgeführt und dokumentiert. In der Regel wurde dabei auch ein Elektroenzephalogramm abgeleitet und bis zum Jahr 2000 in der Altersgruppe zwischen 6 und 15 Jahren ein HAWIK-R Intelligenztest neben zahlreichen anderen Testverfahren durchgeführt. Diese Ergebnisse dienten im Sozialpädiatrischen Zentrum zur Erstellung eines Therapiekonzeptes.

Von den Patienten, die im Untersuchungszeitraum vom 2/1996 – 6/1997 im SPZ Altötting neu vorgestellt wurden, wurden retrospektiv Probanden im Alter von  $10 \pm 1$  Jahr (108–132 Monate) ausgewählt und dann ein HAWIK-R-Intelligenztest und EEG durchgeführt. 98 Kinder wurden eingeschlossen, in der Hälfte der Fälle hat die Doktorandin die Intelligenztestung selbst durchgeführt.

Zur Auswertung kamen 69 der 98 Kinder, da bei 29 Kindern die EEG-Qualität für die automatische Analyse nicht ausreichte. Von den 69 Kindern waren 39 Jungen und 30 Mädchen.

Die Intelligenztestergebnisse der 69 Probanden wurden in 3 Gruppen (IQ < 90, IQ 90-109, IQ > 109) entsprechen der Ergebnisse des Verbal-IQ, Handlungs-IQ und Gesamt-IQ eingeteilt (Tab. 1).

**Tab. 1** Verteilung der 69 Probanden in den drei Intelligenztestgruppierungen bei den Ergebnissen des Verbal-IQ, Handlungs-IQ und Gesamt-IQ

<b>IQ</b>	<b>&lt; 90</b>	<b>90–109</b>	<b>&gt;109</b>
<b>H12</b> (Verbal-IQ)	17	39	13
<b>H13</b> (Handlungs-IQ)	26	27	16
<b>H14</b> (Gesamt-IQ)	25	35	9

## 2.2 Methode

Bei den Probanden, die in die Studie eingeschlossen wurden, wurden die Eigenschaften des EEG mit den Leistungen im Intelligenztest verglichen. Die Eigenschaften des EEG wurden mit Hilfe der Spektralanalyse ermittelt und diese Eigenschaften dann mit einer Korrelationsanalyse mit den Leistungen im Intelligenztest (HAWIK-R) verglichen.

In einem zweiten Schritt wurden die Probanden in Gruppen eingeteilt und die Ergebnisse in den Untertesten, Verbal-IQ (H 12), Handlungs-IQ (H 13) und Gesamt-IQ (H 14) mit EEG-Besonderheiten durch Varianzanalyse verglichen.

In einem dritten Schritt wurden die EEG-Merkmale der Probanden verglichen, die in den einzelnen Untertests des HAWIK-R außerhalb des Normbereichs von 7 und 12 Wertpunkten lagen.

### 2.2.1 EEG

Die digitale Datenerfassung bei der Aufzeichnung eines EEG gehört mittlerweile zur Standardmethode und ist Stand der Technik der auf dem Markt erhältlichen Geräte. Die klassische, visuelle EEG-Befundung – auf dem Papier oder zunehmend über den Monitor – ist durch eine Digital-Analogwandlung der Signale jederzeit möglich.

Das digital gespeicherte EEG hat erhebliche Vorteile: Es können große Mengen von Daten erfasst und gespeichert werden. Bei der Kurvenauswertung können nach der EEG-Ableitung beliebige Schaltungen gewählt werden. Zudem können auch mathematische Analysen durchgeführt werden. Die computergestützte Analyse erfasst EEG-Merkmale präziser als die visuelle Befundung. Dadurch wird die Definition des normalen EEG in den verschiedenen Altersstufen, trotz geringer Variabilität von einer Alterstufe zur anderen, möglich. Auch die EEG-Normdefinition zwischen den Altersstufen, aber auch zwischen normaler und abnormaler Grundaktivität, wird erheblich verbessert (Lechle et al. 1980, Sadowsky et al. 1983).

Die digitale EEG-Erfassung und automatische EEG-Analyse wurde am Institut für Soziale Pädiatrie und Jugendmedizin der Universität München (*EEG-Basisstudie am Kinderzentrum München*) in Kooperation mit dem Institut für Medizinische Informatik und Systemforschung für Umwelt und Gesundheit (GSF), München seit 1972 praktiziert und systematisch untersucht.

Die hier vorgelegte Studie verwendet Daten der digital abgeleiteten EEG von Probanden am Sozialpädiatrischen Zentrum Inn-Salzach in Altötting. Die Spektralanalyse erfolgte durch eine auf die EEG Basisstudie angepasste Software der Firma Micromed. Die Software der Firma Micromed wurde verwendet, weil sie die derzeit einzige Software auf dem Weltmarkt ist, die

die Spektralanalysen angepasst hat auf ein bestehendes Normwertkollektiv aus allen Altersgruppen.

Die Daten wurden am GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für medizinische Informatik und Systemforschung in Oberschleißheim statistisch ausgewertet.

### **2.2.2 Datenerfassung**

Die EEG-Ableitungen erfolgten ohne medikamentöse Sedierung in Anlehnung an das Ten-Twenty-System.

Die Verbindungslinie von Nasenwurzel und Protuberantia okzipitalis sowie diejenige zwischen beiden vorderen Gehörgangsöffnungen wurden in 10-20-20-20-20-10% Abständen aufgeteilt. Die Elektroden waren beidseits symmetrisch in gleichen Abständen platziert. Die Bezeichnung der Elektrodenpositionen (Ableitungspunkte) stimmten mit entsprechenden anatomischen Bezeichnungen überein.

Es wurden 4 bipolare Montagen bearbeitet:

- Kanal 1: F4-C4 (frontozentral rechts)
- Kanal 2: P4-O2 (parietookzipital rechts)
- Kanal 3: F3-C3 (frontozentral links)
- Kanal 4: P3-O1 (parietookzipital links)

Die 4 Kanäle wurden gewählt, da an Ihnen die Normstichprobe der Münchener Pädiatrischen Längsschnittstudie validiert wurde. Die Kanalwahl entspricht darüber hinaus auch der üblichen, in der Wissenschaft, verwendeten, Ableitung frontozentral und parietookzipital beidseits.

Bei den Kindern wurden mit Gummibändern fixierte Pilzelektroden verwendet. Die Elektroden wurden so angelegt, dass ein Widerstand von 5 k $\Omega$  nicht überschritten wurde. Die Eichung des EEG-Registriergerätes erfolgte täglich.

Die Ableitungen erfolgten an wachen Kindern jeweils über 20 Minuten mit geöffneten und geschlossenen Augen und anschließender Hyperventilation über 3 Minuten mit abschließender 5minütiger weiterer Ableitezeit.

Die Doktorandin prüfte die abgeleiteten EEG auf folgenden Voraussetzungen:

1. Bei jedem Kind wurden 60 Sekunden des Gesamt-EEG der Analyse zugeführt, die von einwandfreier technischer Qualität und artefaktfrei sein mussten. Diese 60 Sekunden konnten sich aus bis zu 6 Teilstücken á 10 Sekunden zusammensetzen.
2. Zur Analyse fanden nur die EEG-Epochen mit geschlossenen Augen Verwendung.

Bei insgesamt 98 Kindern wurde eine derartige EEG-Untersuchung und Analyse vorgenommen, bei 29 EEG reichte aber die technische Qualität trotz visuell einwandfrei erscheinendem EEG für die spätere computergestützte Spektralanalyse nicht aus.

### **2.2.3 Spektralanalyse**

Die Spektralanalyse gilt als das klassische Verfahren in der Wellenvermessung von EEG-Signalen. Dabei ist ein wesentlicher Bestandteil die sogenannte Fourieranalyse, die nichtsinusförmige Signale in Frequenzanteile mit sinusförmiger Struktur zerlegt. In zahlreichen klinischen Anwendungen, insbesondere in der Schlaf- und Pharmaforschung konnte gezeigt werden, dass die Spektralanalyse ein zuverlässiges Instrument zur Messung der Grundaktivität wie auch der Ausprägung von dominanten Frequenzen darstellt (Künkel 1972 a,b; Dumermuth et al. 1975).

Das zu analysierende EEG-Stück wurde nach Tiefpassfilterung mit 50 Hz in Segmente von  $T$  s Dauer mit einer gegenseitigen Überlappung von  $T/2$  s zerlegt und mit einer Abtastfrequenz von 100 Hz transformiert. Jedes Segment wurde nach „Tapering“ (zur Vermeidung von Abbrucheffekten) und nach linearer Trendbeseitigung mit der Fast-Fourier-Transformation (FFT) nach Cooley u. Tukey (1965) transformiert und die Fourierkoeffizienten berechnet. Die somit erhaltenen Periodogramme wurden nach der Spektralschätzmethode von Welch (1967) über alle Segmente gemittelt. Da nach Welch die Varianz des Spektralschätzers umgekehrt proportional der Segmentzahl  $k$  ist, wird mit diesem Segmentierungsverfahren und einer näherungsweise Verdopplung der Segmentanzahl bei überlappter Segmentierung die Varianz des Schätzers erheblich reduziert und die Anzahl der Freiheitsgrade wesentlich erhöht. Das Resultat stellte dann einen konsistenten Schätzer mit erhöhter statistischer Sicherheit für das Spektrum eines EEG-Kanals dar. Dabei ergab sich die Frequenzauflösung  $\Delta f$  als reziproker Wert der Segmentlänge  $T$ .

Ist eine Analyseepoche aus mehreren Teilstücken zusammengesetzt, so wurde jedes Teilstück getrennt Fourier-transformiert und dann der spektrale Schätzwert über alle Stück gemittelt.

Dadurch gingen Unstetigkeiten an den Schnittstellen der Teilstück nicht in die Analyse mit ein. Es wurden folgende Spektren berechnet und abgespeichert:

**Auto- bzw. Powerspektrum:** Für jeden EEG-Kanal wurde die Intensität der einzelnen Schwingungen als Spektral- bzw. Leistungsdichte in  $\mu\text{V}^2/\text{Hz}$  berechnet und in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt.

**Kreuzspektrum:** Für jeweils 2 verschiedene EEG-Kanäle wurde ein Spektrum berechnet, in dem die gemeinsamen Frequenzanteile dargestellt wurden. Dadurch konnte eine Aussage über Frequenzbeziehungen in verschiedenen Hirnregionen gemacht werden.

**Phase:** Die Phase wurde als Winkelgröße aus den Kreuzspektralparametern zwischen 2 EEG-Kanälen bestimmt und gab für jede Frequenz Aufschluss über die Phasenbeziehungen von 2 Schwingungen.

**Kohärenz:** Zwischen jeweils 2 verschiedenen EEG-Kanälen wurde das Kohärenzspektrum als ein frequenzabhängiges Korrelationsmaß bestimmt. Mit Hilfe der Kohärenzspektren war es möglich, Aussagen über die statistische Korrelation verschiedener Frequenzen in verschiedenen Hirnregionen zu machen, wobei das Vorzeichen dieses Korrelationskoeffizienten aus dem Phasenspektrum bestimmt wurde.

**Absolute Gesamtaktivität (Power, Leistung):** Die automatische EEG-Analyse führte bei Einsatz der Spektralanalyse mit der Fast-Fourier-Transformation zu einem frequenzspezifischen Maß, das die Spektral- bzw. Leistungsdichte oder „Power“, der einzelnen Schwingungen im EEG darstellte und in  $\mu\text{V}^2/\text{Hz}$  angegeben wurde. Betrachtete man ein bestimmtes Frequenzband im Powerspektrum, so konnte die Summe der Powerwerte innerhalb dieses Bereiches als Integral bzw. Fläche unter der Spektralkurve aufgebaut werden. Wendete man diese Vorgehensweise auf die klassischen Frequenzbänder (Subdelta, Delta, Alpha, Beta-1, Beta-2) an, so erhielt man als Ergebnis ein Flächenmaß, das die Menge bzw. Aktivität des EEG in jedem Frequenzband angibt. Wurden alle Frequenzbandanteile addiert, so ergab sich die absolute Gesamtaktivität.

**Frequenzbandspezifische Spektralparameter:** Für eine sinnvolle statistische Weiterverarbeitung (z.B. Diskriminanz- und Varianzanalyse) waren die Spektren aufgrund der relativ hohen Dimension (4–80 Spektralwerte) nur wenig geeignet. Deshalb wurden zur Datenreduktion die Spektren in Anlehnung an Matousek u. Petersen (1973) und John et al. (1980 a, b) in 6 Frequenzbereiche eingeteilt. Damit konnten die verdichteten Spektralparameter mit der visuellen Auswertung verglichen und diagnostische Aussagen gemacht werden.

Die Frequenzbänder wurden in dieser Studie folgendermaßen definiert:

F1:	0,4–1,5 Hz	(Subdelta)
F2:	1,6–3,5 Hz	(Delta)
F3:	3,6–7,5 Hz	(Theta)
F4:	7,6–12,5 Hz	(Alpha)
F5:	12,6–19,5 Hz	(Beta1)
F6:	19,6–25 Hz	(Beta2)

**Absolute und relative Power:** Die absolute Power wurde als Summe der Einzelspektralwerte aus dem Powerspektrum berechnet. Sie stellte die globale Spektraldichte innerhalb eines Frequenzbandes dar und wurde später im weiteren Sinne auch als die Aktivität des EEG pro Frequenzband bezeichnet.

Die relative Power wurde als der prozentuale, relative Anteil der absoluten Power innerhalb eines Frequenzbandes angegeben. Die Umrechnung der absoluten Power in die relative erlaubte einen besseren Vergleich mit den Ergebnissen der visuellen Auswertung.

**Spektrale Peakfrequenz:** Bei der maschinellen Bestimmung der dominanten Frequenz in einem EEG-Kanal wurde üblicherweise die Peakfrequenz des entsprechenden Powerspektrums verwendet. Die Lokalisation der Peakfrequenz im Spektrum erfolgte mit einer von der Intervallamplituden-(IA)-Analyse abgeleiteten Methode.

**Amplitude:** Die Amplitude [ $\mu\text{V}$ ] konnte mit Hilfe der Spektralanalyse und Fast-Fourier-Transformation nicht berechnet werden. Ein gewisses Maß für die Amplitude war die absolute Gesamtaktivität. Amplitudenmessverfahren wurden in dieser Arbeit nicht eingesetzt.

## **2.2.4 Das angewendete Testverfahren**

### **2.2.4.1 HAWIK-R (Hamburg-Wechsler Intelligenztest für Kinder, Revision 1983)**

Intelligenztestverfahren haben eine weite Verbreitung gefunden. Es handelt sich dabei um Zusammenstellungen von standardisierten Fragen und Aufgaben, mit denen die Fähigkeiten des Individuums erfasst werden soll, zielbewusst und sinnvoll zu handeln. Das heißt sie messen die geistigen Fähigkeiten, beziehungsweise die allgemeinen intellektuellen Kapazitäten des Individuums.

Wechsler (Hamburg-Wechsler-Intelligenztest für Kinder Revision 1983) gab folgende Definition an: Intelligenz ist die allgemeine Fähigkeit des Individuums, die Welt, in der es lebt, zu verstehen und sich in ihr zurecht zu finden. Intelligenz wird hier als allgemeine und übergeordnete Einheit gesehen; genauer gesagt als eine Einheit, die vielfältige Erscheinungsformen annehmen kann und durch mannigfaltig Einflüsse in ihrer Entwicklung bestimmt wird.

Letztlich stellt die Intelligenz keine spezifische Fähigkeit dar, jedenfalls nicht in dem Sinn, wie das Denkvermögen, das Erinnerungsvermögen oder das Sprachvermögen. Die Intelligenz ergibt sich eher aus der Art und Weise, in der sich diese Fähigkeiten unter bestimmten Bedingungen und verschiedenen Umständen manifestieren. Rückschlüsse auf die Intelligenz eines Individuums können aus der Art und Weise gewonnen werden, wie die Person denkt, spricht oder sich bewegt, aus fast allen Arten von Reaktionen auf die unterschiedlichsten Reize.

Das etablierte Verfahren zur Messung der Intelligenz im Kindesalter zum Zeitpunkt der Durchführung der Studie war der HAWIK-R (Hamburg-Wechsler-Intelligenztest für Kinder Revision 1983).

Der HAWIK-R besteht aus einem Verbalteil und einem Handlungsteil. Der Verbalteil beinhaltet 6 Subtests, davon 1 Zusatztest und der Handlungsteil 5 Subtests (Tab. 2).

Für die Berechnung der altersspezifischen Wertpunkte wurde die Rohpunktverteilung in eine Wertpunktverteilung transformiert, die einen Mittelwert von 10 Punkten und eine Standardabweichung von 3 Punkten aufweist.

Wenn der Test vollständig durchgeführt wird, wird das Ergebnis durch 11 Wertpunktergebnisse beschrieben, je eines pro Untertest. Die quantitative Information des Gesamttests leitet sich aus den 11 Wertpunkten des Ergebnisprofils ab. Die aus dem Wertpunktergebnis abgeleiteten IQ-Werte haben einen Mittelwert von 100 Punkten und eine Standardabweichung von 15 Punkten. Jeder Wertpunkt kann somit auch für sich in einen IQ-Wert transformiert werden (Tewes 1984).

Die Interpretation der Wertpunkte kann sowohl quantitativ als auch qualitativ erfolgen. Da die Wertpunktskalen einen Mittelwert von 10 Punkten und eine Standardabweichung von 3 Punkten aufweisen, erzielen ungefähr 2/3 aller Kinder Leistungen zwischen 7 und 13 Punkten.

Dies entspricht der quantitativen Interpretation. Für die qualitative Interpretation wurde im Folgenden die inhaltliche Bedeutung der einzelnen Skalen etwas ausführlicher dargestellt.

#### 2.2.4.2 Untertests des HAWIK-R

Der HAWIK-R unterteilt sich in 11 Untertests, die in Tabelle 2 aufgeführt werden.

**Tab. 2** Die Untertests des HAWIK-R (Hamburg-Wechsler Intelligenztest für Kinder, Revision 1983)

Verbalteil	Handlungsteil
1. Allgemeines Wissen (H 1)	1. Zahlen-Symbol-Test (H 7)
2. Allgemeines Verständnis (H 2)	2. Bilderergänzen (H 8)
3. Rechnerisches Denken (H 3)	3. Bilderordnen (H 9)
4. Gemeinsamkeitenfinden (H 4)	4. Mosaik-Test (H 10)
5. Wortschatz-Test (H 5)	5. Figurenlegen (H 11)
(6. Zahlennachsprechen) (H 6)	

**Allgemeines Wissen (H 1).** Dieser Test erfasst die Breite des Allgemeinwissens und die Aufgeschlossenheit gegenüber der Umwelt. Erfasst wird insbesondere das Faktenwissen. Die Leistung des Kindes ist von seiner Lernfähigkeit abhängig, aber auch von dem ihm familiär, schulisch und kulturell vermittelten Wissensangebot. Sprachverständnis und sprachliches Ausdrucksvermögen spielen ebenfalls eine Rolle.

**Allgemeines Verständnis (H 2).** Erfasst werden vor allem die praktische Urteilsfähigkeit, die Fähigkeit, aus Erfahrungen zu lernen und in Ursache-Wirkungszusammenhängen zu denken. Der Test zeigt auch inwieweit das Kind Situationen des Lebensalltags zu erfassen vermag. Sprachverständnis und sprachliches Ausdrucksvermögen sind von Bedeutung. Das Leistungsvermögen in diesem Test wird auch durch kulturelle Einflüsse und die soziale Intelligenz des Kindes bestimmt.

**Rechnerisches Denken (H 3).** Erfasst wird vor allem die Fähigkeit, numerische Operationen leichter Art im Kopf durchzuführen. Von Bedeutung sind sowohl das Zahlengedächtnis, als auch das Konzentrationsvermögen. Die Leistung ist in gewissem Umfang vom Sprachverständnis abhängig. Die Belastbarkeit, bzw. die Fähigkeit, auch unter Druck konzentriert nachdenken zu können, ist ebenfalls von Bedeutung.



**Gemeinsamkeitenfinden (H 4).** Dieser Untertest erfasst logisches und abstraktes Denken in Kategorien. Die Leistung ist abhängig vom sprachlichen Denkvermögen, Ausdrucksvermögen und sprachlichem Abstraktionsvermögen. Das Kind muss in der Lage sein, im Bereich der Sprachkategorien zwischen wesentlichen und unwesentlichen Merkmalen zu unterscheiden.

**Wortschatz-Test (H 5).** Dieser Untertest gibt Auskunft über die allgemeine Sprachentwicklung, insbesondere im Hinblick auf den Bestand an sprachlichen Kenntnissen. Die Leistung ist auch abhängig vom Lern- und Erinnerungsvermögen des Kindes, sowie von der Entwicklung der Begriffsbildung. Kulturelle Einflüsse, Interesse, schulische Lernvorgänge, Lesegewohnheiten der Familie haben ebenfalls Einfluss auf den Bestand an Wortkenntnissen.

**Zahlennachsprechen (H 6).** Die Leistung ist insbesondere abhängig von der akustischen Merkfähigkeit, der Aufmerksamkeit und der Selbstkontrolle. Die Übung im Umgang mit Ziffern ist ebenfalls von Bedeutung. Ängstlichkeit und mangelnde Belastbarkeit in Prüfungssituationen wirken sich negativ aus.

**Zahlen-Symbol-Test (H 7).** Dieser Untertest erfasst die allgemeine psychomotorische Geschwindigkeit, die visuell-motorische Koordination und das Konzentrationsvermögen bei Routineaufgaben. Die Leistung ist auch abhängig vom Grad der Belastbarkeit durch Zeitdruck, von der geistigen Flexibilität und dem visuellen Kurzzeitgedächtnis.

**Bilderergänzen (H 8).** Dieser Test erfasst die Fähigkeit, bekannte Formen, Gegenstände oder Figuren zu erkennen und dabei wesentliche von unwesentlichen Details zu unterscheiden. Von Bedeutung ist dabei die Organisation der Wahrnehmungsprozesse, insbesondere die Flexibilität der Wahrnehmung, das schnelle Erfassen von Figur-Hintergrund-Relationen und eine gewisse Toleranz gegenüber Ungewissheiten.

**Bilderordnen (H 9).** Erfasst wird die Fähigkeit, auf visuellem Weg soziale Handlungsabläufe zu erfassen, Ordnungen und Sequenzen herzustellen und dabei zwischen wesentlichen und unwesentlichen Details zu unterscheiden. Die Leistung ist auch abhängig von der Organisation der visuellen Wahrnehmung, vom logischen Denkvermögen, der Lernstrategie (planvolles Handeln vs. Probieren nach „Versuch und Irrtum“) und der sozialen Intelligenz. Geistige Flexibilität und kreative Fähigkeiten sind ebenso von Bedeutung, wie familiäre und kulturelle Einflüsse.

**Mosaik-Test (H 10).** Dieser Test erfasst das räumliche Vorstellungsvermögen, die psychomotorische Koordination und die Kombinationsfähigkeit. Aus den Lösungsstrategien wird ersichtlich, ob das Kind auch „Versuch- und Irrtum“ probiert oder aus Erfahrung lernt. Erfasst wird auch die Flexibilität des Denkens, die daraus ersichtlich ist, wie das Kind bei zunehmend

schwerer werdenden Aufgaben neue Lösungsstrategien erprobt oder ob das Kind erfolgreich Strategien aus leichteren Aufgaben beizubehalten versucht.

**Figurenlegen (H 11).** Mit diesem Test wird die Fähigkeit zur Wahrnehmung und Reproduktion konkreter Figuren erfasst. Die Leistung ist abhängig von der visuell-motorischen Koordination und vom räumlichen Vorstellungsvermögen. Flexibilität des Denkens bei der Suche nach Lösungsstrategien ist ebenso von Bedeutung wie Konzentrationsvermögen und Belastbarkeit unter Zeitdruck.

### 2.2.4.3 Studienrelevante Unterteilungen

Für die vergleichende EEG-Analyse mit den einzelnen Untertestergebnissen wurden folgende Unterteilungen vorgenommen, wobei die Ergebnisse von H1 bis H6 den Verbal-IQ (H12), die von H7 bis H11 den Handlungs-IQ (H13) ergeben. Der Verbal-IQ (H12) und der Handlungs-IQ (H13) ergeben zusammen den Gesamt-IQ (H14).

H1	Allgemeines Wissen	(Wertpunkte)
H2	Allgemeines Verständnis	(Wertpunkte)
H3	Rechnerisches Denken	(Wertpunkte)
H4	Gemeinsamkeitenfinden	(Wertpunkte)
H5	Wortschatz-Test	(Wertpunkte)
H6	Zahlennachsprechen	(Wertpunkte)
H7	Zahlen-Symbol-Test	(Wertpunkte)
H8	Bilderergänzen	(Wertpunkte)
H9	Bilderordnen	(Wertpunkte)
H10	Mosaiktest	(Wertpunkte)
H11	Figurenlegen	(Wertpunkte)
H12	Verbalpunkte = $\sum_{i=1}^6 H_i$	(Verbal-IQ)
H13	Handlungspunkte = $\sum_{i=7}^{11} H_i$	(Handlungs-IQ)
H14	Gesamtpunkte = H12 + H13	(Gesamt-IQ)

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Korrelationsanalyse

Mit Hilfe einer Korrelationsanalyse wurden die Ergebnisse der automatischen EEG-Analyse (Band- und Spektralanalyse) der 69 Kinder den Ergebnissen der einzelnen Unterteste H1-11 sowie des Verbal-, Handlungs- und Gesamt-IQ (H12-H14) des HAWIK-R Intelligenztestes zugeordnet.

Zunächst wurde die relative Power des Subdelta- bis Beta-2-Bandes mit den Testergebnissen in einzelnen Untertests des HAWIK-R + H12-14 verglichen. Diese Analyse erfolgte getrennt nach Hirnregionen frontal und okzipital (Kapitel 3.1.1.).

In einem zweiten Schritt wurden die relativen Spektren analysiert ( Teil 3.1.2.). Es sollten nicht nur die einzelnen Frequenzbänder pauschal (z.B. Alpha-Band (7,5 – 12,5 Hz)) gesehen werden, sondern die einzelnen Frequenzanalysen in 0,5 Hertz Schritten (0,5 – 29,5 Hz) betrachtet werden.

#### 3.1.1 Ergebnisse der Bandanalyse

Alle Ergebnisse der EEG-Aktivität frontozentral und parietookzipital in den Bändern Subdelta, Delta, Theta, Alpha, Beta-1 und Beta-2 wurden mit den einzelnen Untertests des HAWIK-R Intelligenztestes korreliert (Abb.1-4, Tab. 3). Die Ergebnisse mit einem Signifikanzniveau von unter 0,05 wurden fettgedruckt.

Im HAWIK-R Untertest *Allgemeines Wissen* (H1) zeigten sich signifikante positive Korrelationen im Alpha-Band frontal mit  $P = 0,013$  und im Alpha-Band okzipital mit  $P = 0,011$ . Damit korrelierte eine höhere Alpha-Aktivität sowohl frontal als auch okzipital mit besseren Ergebnissen im Untertest Allgemeines Wissen.

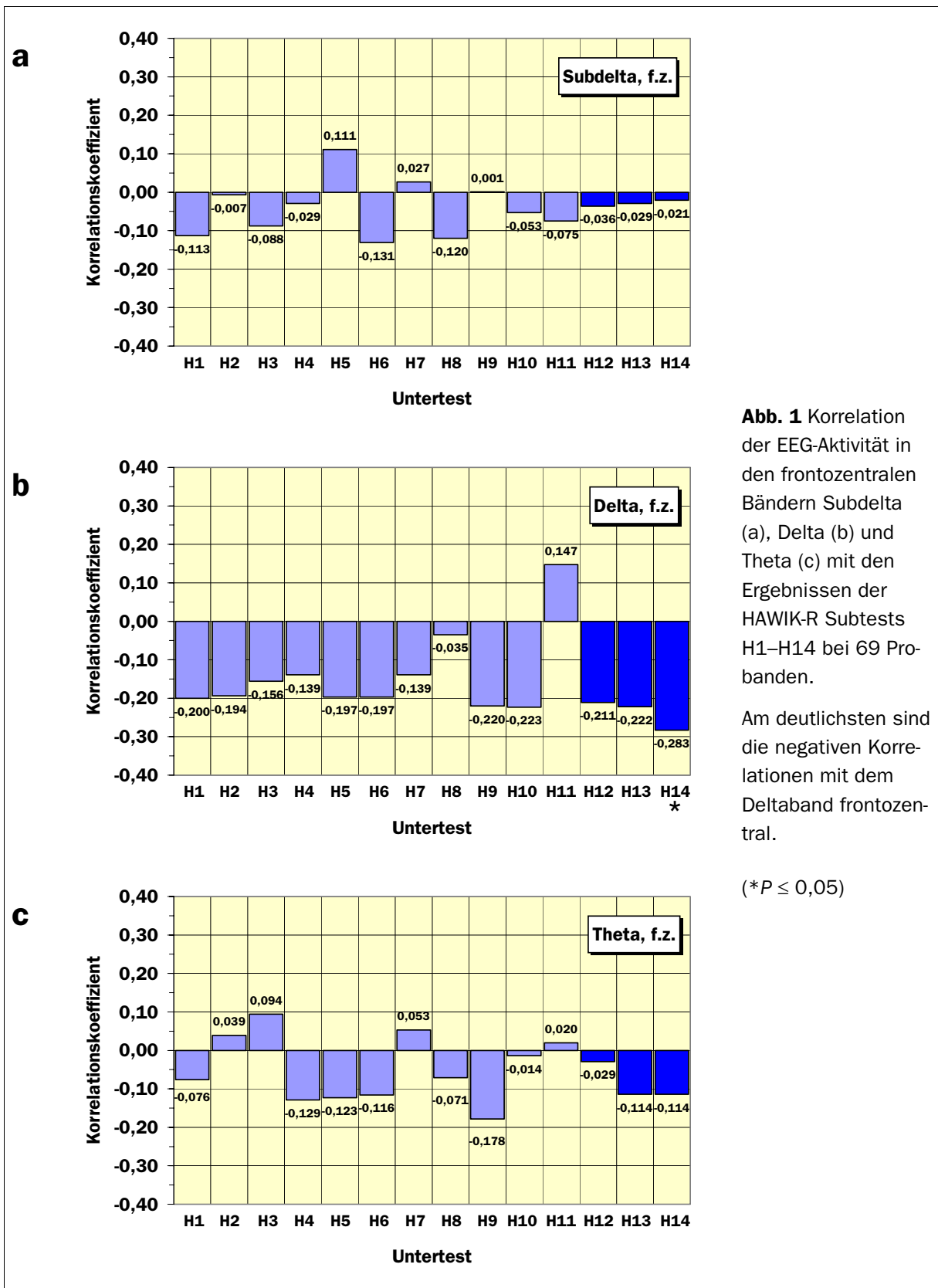
Darüber hinaus waren im Subdelta-Band okzipital und im Delta-Band okzipital Ergebnisse mit signifikanter negativer Korrelation im Subdelta-Band ( $P = 0,049$ ) und im Delta-Band ( $P = 0,017$ ). Je weniger Subdelta- und Delta-Aktivität okzipital vorhanden war, desto besser waren somit die Ergebnisse im Untertest Allgemeines Wissen (Tab. 3).

Im HAWIK-R Untertest *Allgemeines Verständnis* (H2) konnte lediglich eine negative Korrelation im Subdelta-Band okzipital mit einer Signifikanz von  $P = 0,029$  gefunden werden. In diesem Untertest zeigte sich keine signifikante positive Korrelation im Alpha-Band.

**Tab. 3** Korrelation der EEG-Aktivität in den frontozentralen und parietookzipitalen Bändern Subdelta, Delta, Theta, Alpha, Beta-1 und Beta-2 mit den Ergebnissen der HAWIK-R Subtests H1–H14 bei 69 Probanden. Die meisten Korrelationen mit Signifikanz  $<0.05$  ergeben sich im Alpha- und Delta-Band okzipital

Unter test	Subdelta		Delta		Theta		Alpha		Beta-1		Beta-2	
	<i>r</i> =	<i>P</i> =	<i>r</i> =	<i>P</i> =	<i>r</i> =	<i>P</i> =	<i>r</i> =	<i>P</i> =	<i>r</i> =	<i>P</i> =	<i>r</i> =	<i>P</i> =
	<b>Frontale Bänder</b>											
<b>H1</b>	-0,113	0,357	-0,200	0,099	-0,076	0,533	<b>0,298</b>	<b>0,013*</b>	-0,036	0,769	-0,046	0,707
<b>H2</b>	-0,007	0,957	-0,194	0,110	0,039	0,751	0,087	0,477	-0,210	0,862	-0,062	0,614
<b>H3<sup>†</sup></b>	-0,088	0,473	-0,156	0,202	0,094	0,444	0,082	0,505	0,014	0,908	-0,010	0,936
<b>H4</b>	-0,029	0,813	-0,139	0,254	-0,129	0,292	0,191	0,116	0,060	0,622	-0,070	0,952
<b>H5</b>	0,111	0,365	-0,197	0,105	-0,123	0,315	0,144	0,237	-0,106	0,388	-0,101	0,409
<b>H6</b>	-0,131	0,282	-0,197	0,105	-0,116	0,341	<b>0,255</b>	<b>0,034*</b>	0,168	0,168	0,117	0,339
<b>H7<sup>†</sup></b>	0,027	0,824	-0,139	0,255	0,053	0,663	-0,016	0,897	0,016	0,897	0,037	0,764
<b>H8</b>	-0,120	0,922	-0,035	0,773	-0,071	0,561	0,164	0,178	-0,094	0,441	<b>-0,244</b>	<b>0,023*</b>
<b>H9<sup>†</sup></b>	0,001	0,991	-0,220	0,070	-0,178	0,144	0,195	0,109	0,190	0,118	0,031	0,802
<b>H10<sup>†</sup></b>	-0,053	0,664	-0,223	0,065	-0,014	0,911	0,189	0,119	-0,190	0,876	-0,042	0,730
<b>H11<sup>†</sup></b>	-0,075	0,538	0,147	0,228	0,020	0,867	0,040	0,742	-0,124	0,309	-0,089	0,468
<b>H12</b>	-0,036	0,771	-0,211	0,082	-0,029	0,813	0,191	0,115	-0,034	0,783	-0,084	0,490
<b>H13</b>	-0,029	0,815	-0,222	0,067	-0,114	0,352	<b>0,247</b>	<b>0,041*</b>	0,013	0,916	-0,083	0,498
<b>H14</b>	-0,021	0,862	<b>-0,283</b>	<b>0,018*</b>	-0,114	0,352	<b>0,257</b>	<b>0,033*</b>	0,041	0,740	-0,061	0,621
	<b>Okzipitale Bänder</b>											
<b>H1</b>	<b>-0,238</b>	<b>0,049*</b>	<b>-0,287</b>	<b>0,017*</b>	-0,150	0,219	<b>0,304</b>	<b>0,011*</b>	-0,065	0,594	0,050	0,682
<b>H2</b>	<b>-0,262</b>	<b>0,029*</b>	-0,109	0,374	0,037	0,760	0,156	0,201	-0,126	0,303	-0,123	0,313
<b>H3<sup>†</sup></b>	<b>-0,366</b>	<b>0,002*</b>	<b>-0,295</b>	<b>0,014*</b>	0,009	0,939	<b>0,289</b>	<b>0,016*</b>	-0,126	0,301	0,139	0,255
<b>H4</b>	<b>-0,262</b>	<b>0,030*</b>	<b>-0,299</b>	<b>0,013*</b>	-0,224	0,065	<b>0,339</b>	<b>0,004*</b>	0,045	0,712	0,092	0,451
<b>H5</b>	<b>-0,296</b>	<b>0,014*</b>	<b>-0,362</b>	<b>0,002*</b>	0,093	0,447	<b>0,362</b>	<b>0,002*</b>	<b>-0,248</b>	<b>0,040*</b>	-0,167	0,171
<b>H6</b>	-0,025	0,839	-0,132	0,280	0,056	0,648	0,006	0,961	0,168	0,167	0,050	0,683
<b>H7<sup>†</sup></b>	-0,049	0,691	<b>-0,352</b>	<b>0,003*</b>	-0,044	0,720	0,194	0,111	-0,06	0,625	0,061	0,617
<b>H8</b>	-0,063	0,605	<b>-0,250</b>	<b>0,038*</b>	-0,216	0,075	<b>0,237</b>	<b>0,050*</b>	0,026	0,832	0,057	0,645
<b>H9<sup>†</sup></b>	<b>-0,273</b>	<b>0,023*</b>	<b>-0,237</b>	<b>0,050*</b>	<b>-0,239</b>	<b>0,047*</b>	<b>0,320</b>	<b>0,007*</b>	0,089	0,468	0,127	0,300
<b>H10<sup>†</sup></b>	-0,073	0,554	-0,176	0,148	-0,120	0,325	0,151	0,215	0,072	0,554	0,114	0,353
<b>H11<sup>†</sup></b>	-0,120	0,327	-0,111	0,364	-0,051	0,677	0,129	0,292	-0,039	0,748	-0,260	0,833
<b>H12</b>	<b>-0,306</b>	<b>0,011*</b>	<b>-0,337</b>	<b>0,005*</b>	-0,080	0,512	<b>0,327</b>	<b>0,006*</b>	-0,118	0,334	-0,078	0,524
<b>H13</b>	-0,168	0,169	<b>-0,317</b>	<b>0,008*</b>	<b>-0,247</b>	<b>0,041*</b>	<b>0,319</b>	<b>0,008*</b>	0,042	0,731	0,142	0,245
<b>H14</b>	-0,226	0,061	<b>-0,279</b>	<b>0,020*</b>	-0,149	0,221	<b>0,284</b>	<b>0,018*</b>	0,005	0,965	0,083	0,495

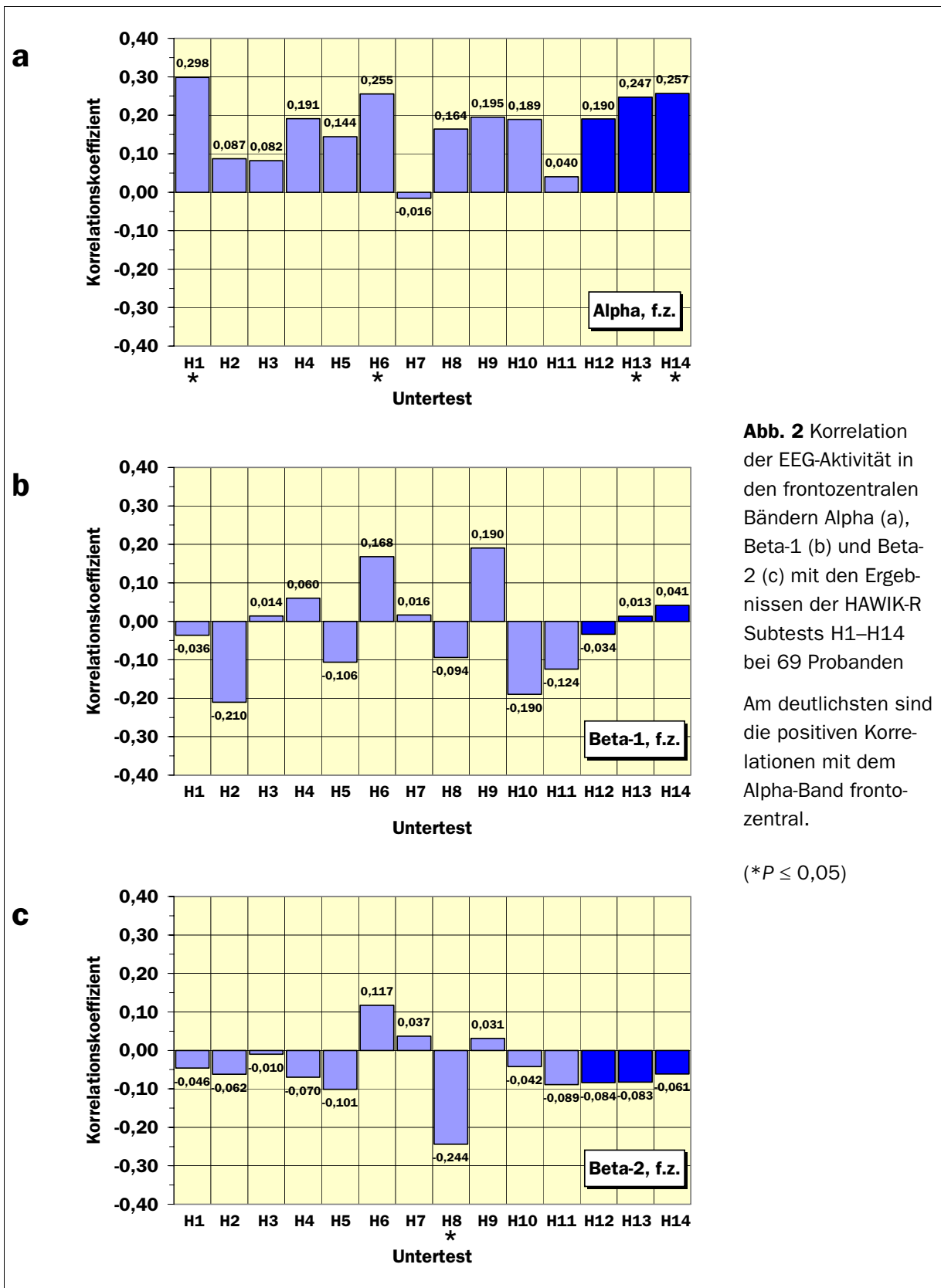
<sup>†</sup>zeitabhängige Tests; *r* = Korrelationskoeffizient; \**P* ≤ 0,05



**Abb. 1** Korrelation der EEG-Aktivität in den frontozentralen Bändern Subdelta (a), Delta (b) und Theta (c) mit den Ergebnissen der HAWIK-R Subtests H1–H14 bei 69 Probanden.

Am deutlichsten sind die negativen Korrelationen mit dem Deltaband frontozentral.

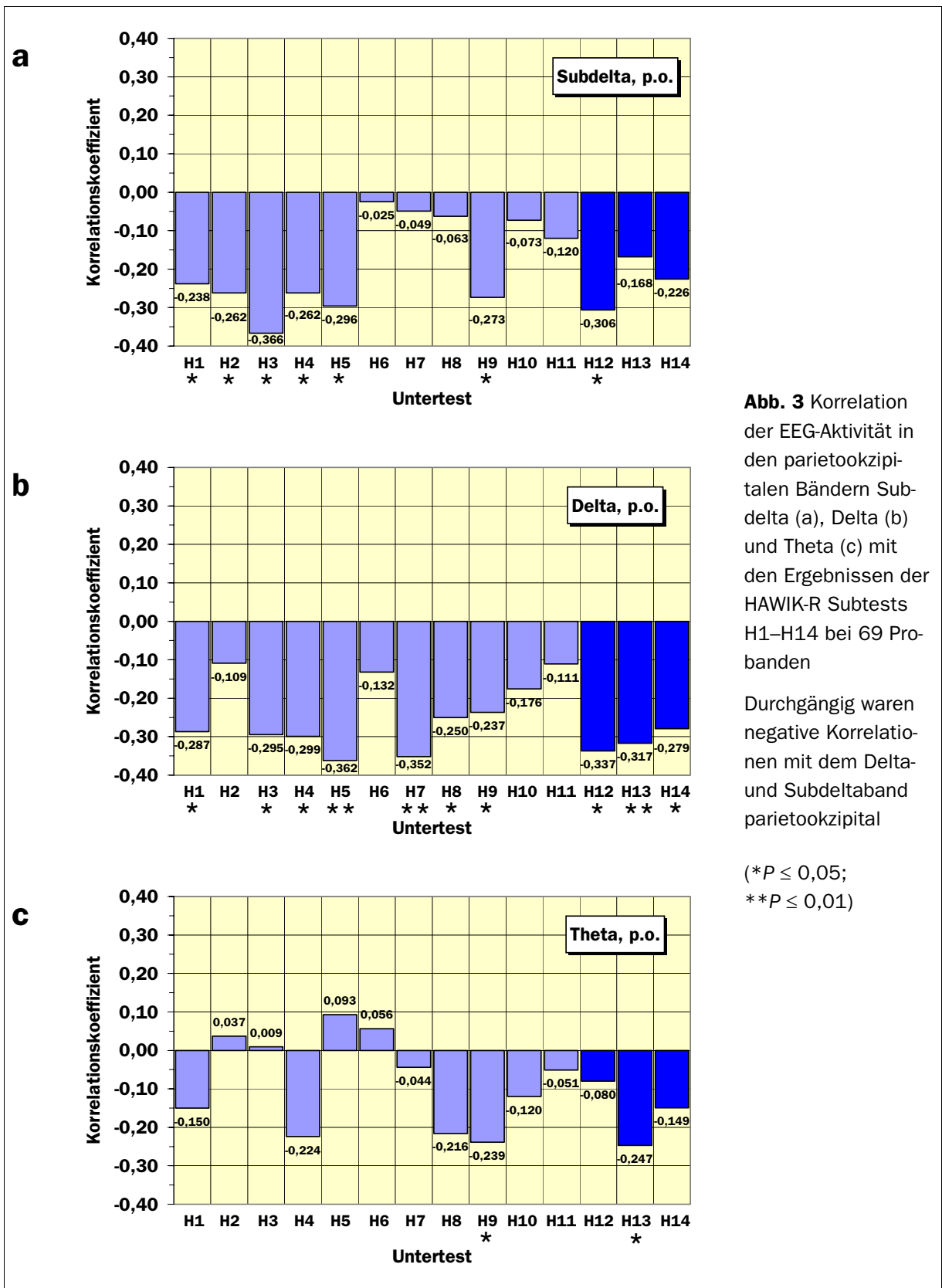
(\* $P \leq 0,05$ )



**Abb. 2** Korrelation der EEG-Aktivität in den frontozentralen Bändern Alpha (a), Beta-1 (b) und Beta-2 (c) mit den Ergebnissen der HAWIK-R Subtests H1–H14 bei 69 Probanden

Am deutlichsten sind die positiven Korrelationen mit dem Alpha-Band frontozentral.

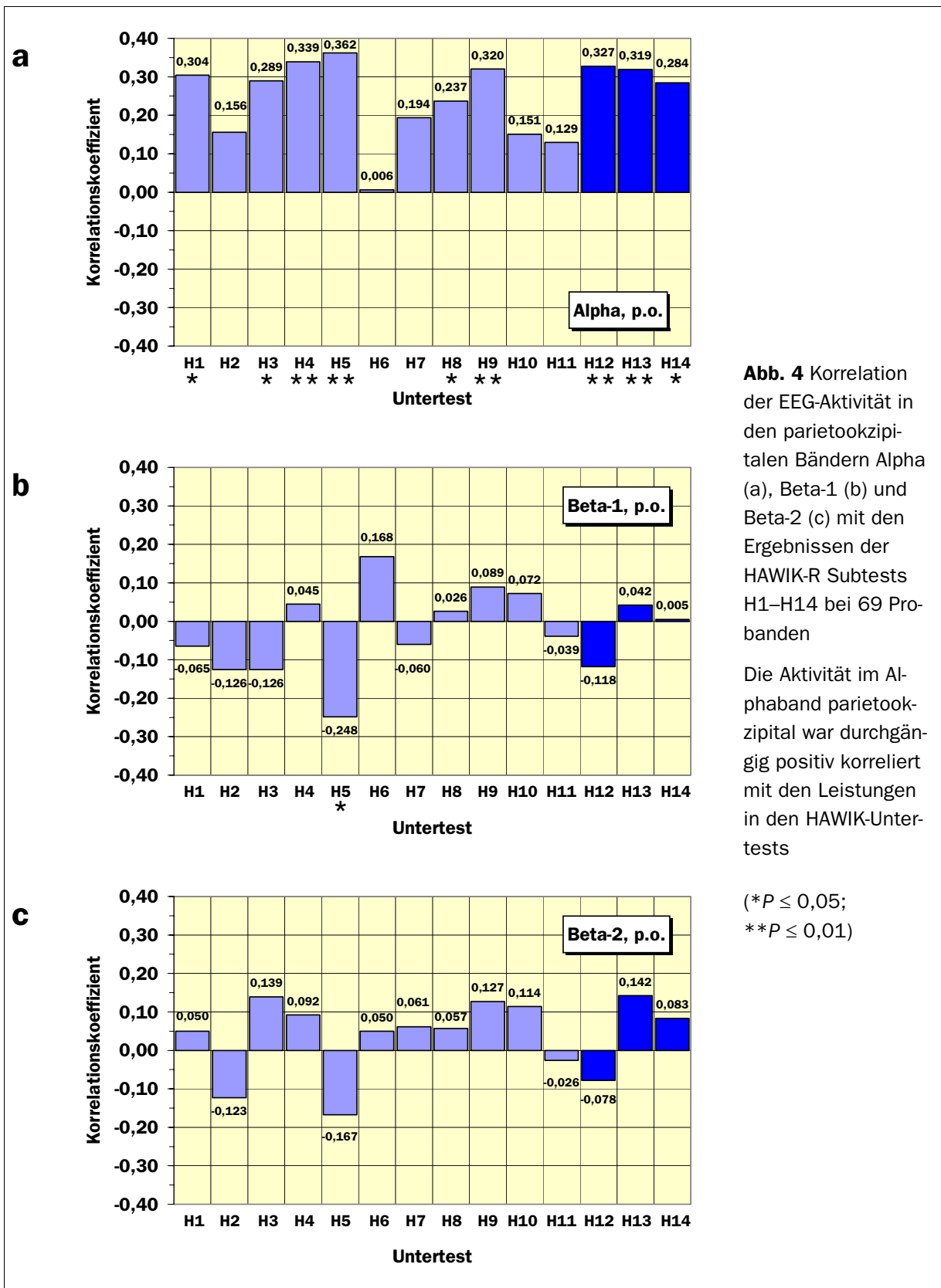
(\* $P \leq 0,05$ )



**Abb. 3** Korrelation der EEG-Aktivität in den parietookzipitalen Bändern Subdelta (a), Delta (b) und Theta (c) mit den Ergebnissen der HAWIK-R Subtests H1–H14 bei 69 Probanden

Durchgängig waren negative Korrelationen mit dem Delta- und Subdeltaband parietookzipital

(\* $P \leq 0,05$ ;  
\*\* $P \leq 0,01$ )



**Abb. 4** Korrelation der EEG-Aktivität in den parietookzipitalen Bändern Alpha (a), Beta-1 (b) und Beta-2 (c) mit den Ergebnissen der HAWIK-R Subtests H1–H14 bei 69 Probanden

Die Aktivität im Alphaband parietookzipital war durchgängig positiv korreliert mit den Leistungen in den HAWIK-Untertests

(\* $P \leq 0,05$ ;  
\*\* $P \leq 0,01$ )



Im zeitabhängigen HAWIK-R Untertest *Rechnerisches Denken* (H3) ergaben sich negative Korrelationen im Subdelta- und Delta-Band okzipital und eine positive Korrelation mit dem Alpha-Band okzipital (Tab. 3). Hier wurde wie im Untertest Allgemeines Wissen (H1) eine signifikante positive Korrelation mit dem Alpha-Band okzipital ( $P = 0,016$ ) gefunden. Hochsignifikant war die negativen Korrelationen im Subdelta-Band okzipital mit  $P = 0,002$  und signifikant im Delta-Band okzipital mit  $P = 0,014$ .

Die Ergebnisse des HAWIK-R Untertests *Rechnerisches Denken* (H3) wurden in dem Untertest Gemeinsamkeitenfinden (H4) sehr ähnlich wiedergefunden. Besonders zeigte sich hier im Alpha-Band okzipital ein hohes Signifikanzniveau von  $P = 0,004$ . Dies war der höchste Wert mit positiver Korrelation in der Bandanalyse. Parallel dazu ergaben sich negative Korrelationen im okzipitalen Subdelta- und Delta-Band mit  $r = -0,262$  bzw.  $-0,299$ .

Im *Wortschatz-Test* (H5) des HAWIK-R konnte neben den signifikant negativen Korrelationen im Subdelta- ( $P = 0,014$ ) und Delta- ( $P = 0,002$ ) Band okzipital auch eine negative Korrelation mit dem Beta-1-Band ( $P = 0,04$ ) okzipital nachgewiesen werden. Darüber hinaus ergab sich eine signifikant positive Korrelation ( $r = 0,362$ ) im Alpha-Band okzipital ( $P = 0,003$ ).

Im HAWIK-R Untertest *Zahlennachsprechen* (H6) fand sich eine positive Korrelation von  $r = 0,255$  im Alpha-Band frontal mit der Signifikanz von  $P = 0,034$ . Im Alpha-Band okzipital ergaben sich keine Korrelationen auf Signifikanzniveau. Es konnten auch keine signifikanten negativen Korrelationen im Subdelta- bzw. Delta-Band okzipital nachgewiesen werden.

Der HAWIK-R Untertest *Zahlen-Symbol-Test* (H7) ist auch zeitabhängig. Es ergab sich eine negative Korrelation im Delta-Band okzipital mit einem hohen Signifikanzniveau ( $P = 0,003$ ). Bei diesem Untertest konnten keine weiteren signifikanten Ergebnisse dargestellt werden.

Im HAWIK-R Untertest *Bilderergänzen* (H8) zeigte sich im Delta-Band okzipital eine negative Korrelation ( $P = 0,038$ ) und ebenso eine positive Korrelation im Alpha-Band okzipital ( $P = 0,05$ ). Es konnte in diesem Subtest auch eine negative Korrelation im Beta-2-Band frontal ( $P = 0,023$ ) gefunden werden.

Im HAWIK-R Untertest *Bilderordnen* (H9), ebenfalls ein zeitabhängiger Test (Tab. 4), lagen ähnliche Ergebnisse wie bei den Untertesten *Allgemeines Wissen* (H1), *Rechnerisches Denken* (H3), *Gemeinsamkeitenfinden* (H4) und *Wortschatz-Test* (H5) vor. Es fanden sich signifikante negative Korrelationen mit dem okzipitalen Subdelta-Band ( $r = -0,273$ ), Delta-Band ( $r = -0,237$ ) und Theta-Band ( $P = 0,047$ ). Im Alpha-Band okzipital lag dagegen eine signifikante positive Korrelation vor ( $P = 0,007$ ).

In den HAWIK-R Untertesten *Mosaik-Test* (H10) und *Figurenlegen* (H11) gab es bei der Korrelationsanalyse mit den Bändern keine Signifikanzen.

Im *Verbal-IQ* (H12) des HAWIK-R (H1 + H2 + ... + H6) waren die höchsten Korrelationen nachweisbar. Im Subdelta-Band okzipital und Delta-Band okzipital fanden sich negative Korrelationen mit dem Signifikanzniveau von  $P = 0,011$  und  $P = 0,005$ . Im Alpha-Band okzipital ergab sich eine positive Korrelation mit dem Signifikanzniveau von  $P = 0,006$ .

Im HAWIK-R *Handlungs-IQ* (H13 = H7 + H8 + ... + H11) zeigte sich im Delta-Band okzipital eine negative Korrelation und im Alpha-Band okzipital eine positive Korrelation jeweils mit einer Signifikanz von  $P = 0,008$ . Darüber hinaus konnte eine weitere positive Korrelation im Alpha-Band frontal nachgewiesen werden ( $P = 0,041$ ). Im Theta-Band okzipital zeigte sich eine negative Korrelation mit dem Signifikanzniveau von  $P = 0,041$ .

Im *Gesamt-IQ* (H14) des HAWIK-R (H12 + H13), der sich ja aus der Summe der Teilergebnisse zusammensetzt, ergab sich erwartungsgemäß ein ähnliches Bild: Eine negative Korrelation wies das Delta-Band okzipital mit  $P = 0,020$  und einer positiven Korrelationen des Alpha-Bandes okzipital mit  $P = 0,018$  auf. Auch fand sich eine negative Korrelation im Delta-Band frontal mit einer Signifikanz von  $P = 0,018$  und eine positive Korrelation im Alpha-Band frontal ( $P = 0,033$ ).

Als wichtigstes Ergebnis der Korrelationen stellte sich heraus:

In den folgenden 6 Untertests des HAWIK-R konnten die besten Korrelationen der Bandanalyse nachgewiesen werden. Die negative Korrelation mit dem Subdelta- (Abb. 3a) und Delta-Band okzipital (Abb. 3b) und die positive Korrelation mit dem Alpha-Band okzipital (Abb. 4a) fanden sich bei *Allgemeines Wissen* (H1), *Rechnerisches Denken* (H3), *Gemeinsamkeitenfinden* (H4), *Wortschatz-Test* (H5), *Bilderordnen* (H9) und *Verbal-IQ* (H12).

Die folgenden Aktivitäten im Alpha-Band waren *positiv* mit *allen* Testleistungen korreliert: Die parietookzipitalen (Abb. 4a) Alpha-Aktivitäten und auch die frontozentralen bis auf den Untertest *Zahlensymboltest* (H7) (Abb. 2a). Die meisten *signifikanten* Korrelationen ergaben sich für die parietookzipitale Alpha-Band-Aktivität (Abb. 4a):

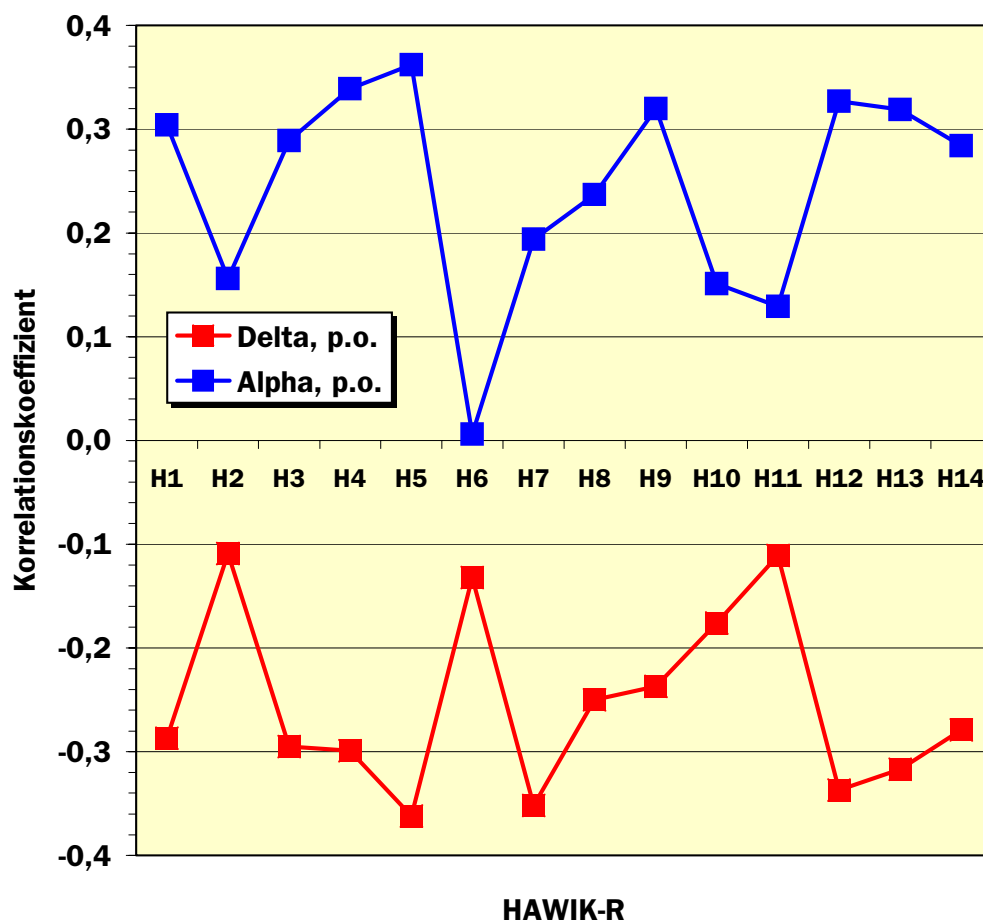
- Allgemeines Wissen (H1)
- Rechnerisches Denken (H3)
- Gemeinsamkeitenfinden (H4)
- Wortschatz-Test (H5)
- Bilderergänzen (H8)
- Bilderordnen (H9)
- Verbal-IQ (H12)
- Handlungs-IQ (H13)
- Gesamt-IQ (H14).

Die positiven Korrelationen der p.o. Alpha-Band-Aktivität mit den Ergebnissen der Subtests H4, H5, H9, sowie H12 und H13 waren hochsignifikant.

Die Leistungen in den Subtests H1 und H6 sowie der Handlungs- und Gesamt-IQ korrelieren signifikant positiv mit der f.z. Alpha-Band-Aktivität (Abb. 2a).

Bemerkenswert war das fast spiegelbildliche Auftreten der positiven und negativen Korrelationen der p.o. Alpha- und p.o. Delta-Band-Aktivitäten. Bis auf das Vorzeichen hatten beide Korrelationen also fast die gleiche Ausprägung (Abb. 5).

Als Ergebnis bleibt festzuhalten, dass eine höhere Alpha-Aktivität im EEG eines  $10\pm 1$ jährigen Kindes mit einem besseren Ergebnis in den Untertests Allgemeines Wissen (H1), Rechnerisches Denken (H3), Gemeinsamkeitenfinden (H4), Wortschatz-Test (H5), Bilderergänzen (H8), Bilderordnen (H9) sowie Verbal-IQ (H12), Handlungs-IQ (H13) und Gesamt-IQ (H14) des HAWIK-R einherging. Je mehr Delta-Aktivität vorhanden war, umso schlechter waren die Ergebnisse des einzelnen Tests.



**Abb. 5** Korrelation der EEG-Aktivität in den parietookzipitalen Bändern Alpha und Delta mit den Ergebnissen der HAWIK-R Subtests H1–H14 bei 69 Probanden.

Je höher die Alpha-Aktivität und/oder je niedriger die Delta-Aktivität um so besser die Leistung in den Untertests

### 3.1.2 Ergebnisse der Spektralanalyse

Bei der Spektralanalyse wurde das Frequenzband von 0,5 bis 29,5 Hz in Schritten von 0,5 Hz analysiert. Die prozentualen Anteile dieser Frequenzspektren an der Gesamtpower wurden als relative Spektralwertpower ermittelt. Diese Berechnung wurde für die 4 Kanäle (SP1 frontal rechts, SP2 okzipital rechts, SP3 frontal links, SP4 okzipital links) getrennt vorgenommen.

Die Untertests bei denen eine signifikante Korrelation in den einzelnen Frequenzbandschritten bestand wurden im folgenden ermittelt.

Im HAWIK-R Untertest Allgemeines Wissen (H1) ergab sich im SP1-Kanal frontal rechts bei 10,5 Hz mit  $r = -0,339$  eine signifikante Korrelation ( $P = 0,004$ ). In den anderen Kanälen frontal links, okzipital rechts und links ergaben sich keine signifikanten Korrelationen.

Im HAWIK-R Untertest Allgemeines Verständnis (H2) zeigte sich im SP1-Kanal frontal rechts bei 9,5 Hz eine signifikante negative Korrelation ( $r = 0,339$ ;  $P = 0,004$ ). In den übrigen Kanälen SP2, SP3 und SP4 waren keine signifikanten Zusammenhänge nachweisbar.

Im HAWIK-R Untertest Rechnerisches Denken (H3) wurden deutlich mehr signifikante Zusammenhänge zwischen den Testergebnissen und der EEG-Aktivität gefunden: Im Kanal SP2-okzipital rechts und SP4-okzipital links bei jeweils 10,0 Hz zeigte sich eine positive Korrelation von  $r = 0,253$  und  $r = 0,312$ . Darüber hinaus waren auch im SP2-Kanal okzipital rechts und SP4-Kanal okzipital links bei 10,5 Hz positive Korrelationen nachweisbar ( $P = 0,027$  und  $P = 0,002$ ).

Bei 9,5 Hz im SP2-Kanal okzipital rechts und SP4-Kanal okzipital links fanden sich positive Korrelationen, die nur auf der rechten Seite signifikant waren (links  $P = 0,052$  und rechts  $P = 0,027$ ). Es zeigte sich eine hohe Korrelation bei 10 und 10,5 Hz, der Hauptfrequenz der Alpha-Aktivität, mit den Testergebnissen. In den übrigen Kanälen und Frequenzen des Untertests H3 ergaben sich keine signifikanten Korrelationen (Tab. 4).

**Tab. 4** Signifikante Korrelationen zum Untertest H3. Die EEG-Aktivität von 10,0 und 10,5 Hz über okzipital links zeigt die deutlichste Korrelation

Kanal SP2-okzipital	Frequenz [Hz]	Korrelation	Signifikanz
rechts	9,5	0,266	0,027
rechts	10,0	0,253	0,036
rechts	10,5	0,266	0,027
links	10,0	0,312	0,009
links	10,5	0,364	0,002

Im HAWIK-R Untertest Gemeinsamkeitenfinden (H4) konnten die in Tab. 5 aufgeführten signifikanten Korrelationen gefunden werden.

Hervorzuheben ist, dass erneut bei 10,0 Hz und bei 10,5 Hz über dem Okzipitalbereich sowohl rechts als auch links die deutlichsten Korrelationen gefunden werden konnten, ebenfalls wieder bei der dominierenden Frequenz der Alpha-Aktivität in der Altersstufe der 10jährigen. Bei Probanden mit guten Leistungen waren frontal die Frequenzen 7,5; 8,0; 8,5 und 9,0 Hz weniger stark ausgeprägt, okzipital die Frequenzen 10,0 und 10,5 Hz deutlich vermehrt.

**Tab. 5** Signifikante Korrelationen zum Untertest H4. Bei diesem Untertest waren Frequenzanteile unter 9,5 Hz frontal durchweg negativ, über 9,5 Hz okzipital durchweg positiv zum Testergebnis korreliert. Besonders hohe Signifikanz fand sich beidseits bei 8,5 Hz frontal und 10,0 Hz okzipital.

Kanal	Frequenz [Hz]	Korrelation	Signifikanz
SP1-frontal rechts	7,5	-0,299	0,013
SP1-frontal rechts	8,0	-0,283	0,018
SP1-frontal rechts	8,5	-0,376	0,001**
SP1-frontal rechts	9,0	-0,290	0,016
SP2-okzipital rechts	10,0	0,353	0,003**
SP2-okzipital rechts	10,5	0,298	0,013
SP3-frontal links	7,5	-0,257	0,033
SP3-frontal links	8,0	-0,307	0,010
SP3-frontal links	8,5	-0,363	0,002**
SP3-frontal links	9,0	-0,244	0,043
SP4-okzipital links	10,0	0,334	0,005**
SP4-okzipital links	10,5	0,271	0,025

Im HAWIK-R Untertest Wortschatz-Test (H5) wurden die in Tab. 6 aufgeführten, signifikanten Korrelationen gefunden. Im SP1-Kanal frontal rechts zeigte sich bei 7,5 Hz ( $P = 0,032$ ) und bei 8,5 Hz ( $P = 0,003$ ) mit jeweils negativer Korrelation. In beiden okzipitalen Kanälen war bei 10,0 Hz eine signifikante positive Korrelation nachweisbar ( $P = 0,011$ ). Darüber hinaus konnte bei 13,0 Hz eine signifikante negative Korrelation ( $P = 0,022$ ) und bei 13,5 Hz ( $P = 0,030$ ) im Kanal SP2 gefunden werden.

Im HAWIK-R Untertest Zahlennachsprechen (H6) war im SP3-Kanal frontal links bei der Frequenz von 10,5 Hz eine Korrelation von  $r = 0,293$  ( $P = 0,014$ ) nachweisbar.

Im HAWIK-R Untertest Zahlen-Symbol-Test (H7) und *Bilderergänzen* (H8) waren keine signifikante Korrelation zu verzeichnen.

**Tab. 6** Signifikante Korrelationen zum Untertest H5. Auch bei diesem Untertest war der Frequenzanteil von 10 Hz okzipital beidseits positiv mit dem Testergebnis korreliert.

Kanal	Frequenz [Hz]	Korrelation	Signifikanz
SP1-frontal rechts	7,5	-0,259	0,032
SP1-frontal rechts	8,5	-0,349	0,003**
SP2-okzipital rechts	10,0	0,303	0,011
SP2-okzipital rechts	13,0	-0,275	0,022
SP2-okzipital rechts	13,5	-0,261	0,030
SP3-frontal links	8,0	-0,260	0,031
SP3-frontal links	8,5	-0,300	0,012
SP3-frontal links	13,5	-0,304	0,011
SP3-frontal links	14,0	-0,296	0,013
SP3-frontal links	14,5	-0,304	0,011
SP4-okzipital links	10,0	0,285	0,018

Im Untertest Bilderordnen (H9) ließen sich bei mehreren Frequenzen signifikante Korrelationen nachweisen (Tab. 7). Im SP1-Kanal frontal rechts war bei 8,5 Hz eine negative Korrelation von  $r = -0,256$  ( $P = 0,034$ ) zu verzeichnen. Im SP2-Kanal okzipital rechts ergab sich bei 10,0 und 10,5 Hz eine signifikante positive Korrelationen ( $P = 0,026$  bzw.  $P = 0,029$ ). Im SP4-Kanal okzipital links fanden sich ebenfalls bei 10,0 und 10,5 Hz deutlich signifikante positive Korrelationen ( $P = 0,010$  bzw.  $P = 0,016$ ).

**Tab. 7** Signifikante Korrelationen zum Untertest H9. Hier waren die Frequenzen 10,0 und 10,5 Hz okzipital positiv mit den Testergebnissen korreliert

Kanal	Frequenz [Hz]	Korrelation	Signifikanz
SP1-frontal rechts	8,5	-0,256	0,034
SP2-okzipital rechts	10,0	0,268	0,026
SP2-okzipital rechts	10,5	0,263	0,029
SP4-okzipital links	10,0	0,307	0,010
SP4-okzipital links	10,5	0,288	0,016

Beim Mosaik-Test (H10) ergaben sich lediglich im SP1-Kanal frontal rechts bei 10,5 und 11,0 Hz mit  $r = 0,301$  und  $r = 0,243$  signifikante Korrelationen ( $P = 0,012$  bzw.  $P = 0,044$ ).

Beim HAWIK-R Verbal-IQ (H12) zeigte sich im SP1-Kanal frontal rechts bei einer Frequenz von 8,5 Hz eine negative Korrelation ( $r = -0,274$ ;  $P = 0,023$ ). Auch beim SP3-Kanal frontal links konnte auch bei 8,5 Hz eine negative Korrelation von  $r = -0,263$  ( $P = 0,029$ ) aufgezeigt werden. Beim SP2-Kanal okzipital rechts fand sich bei 10,0 Hz eine positive Korrelation ( $r = 0,241$ ) mit einer Signifikanz von  $P = 0,046$ . Im okzipitalen SP4-Kanal links war bei 10,0 Hz ein Korrelationskoeffizient von  $r = 0,242$  ( $P = 0,045$ ) nachweisbar (Tab. 8).

**Tab. 8** Signifikante Korrelationen zum Verbal-IQ (H12). Hier liegen die positiven Korrelationen erneut bei 10,0 Hz okzipital

Kanal	Frequenz [Hz]	Korrelation	Signifikanz
SP1-frontal rechts	8,5	-0,274	0,023
SP3-frontal links	8,5	-0,263	0,029
SP2-okzipital rechts	10,0	0,241	0,046
SP4-okzipital links	10,0	0,242	0,045

Beim Handlungs-IQ (H13) fand sich im SP1-Kanal frontal rechts bei 10,5 Hz ein Korrelationskoeffizient von  $r = 0,313$  ( $P = 0,009$ ) und bei 11,0 Hz ( $P = 0,016$ ). Im SP2- und SP4-Kanal okzipital rechts und links wurde jeweils bei 10,5 Hz ein Korrelationskoeffizient berechnet ( $P = 0,014$ ,  $P = 0,030$ ) (Tab. 9).

**Tab. 9** Signifikante Korrelationen zum Handlungs-IQ (H13). Die positiven Korrelationen liegen beim Handlungs-IQ mit 10,5 Hz um 0,5 Hz höher als bei Verbal-IQ

Kanal	Frequenz [Hz]	Korrelation	Signifikanz
SP1-frontal rechts	10,5	0,313	0,009
SP1- frontal rechts	11,0	0,290	0,016
SP2-okzipital rechts	10,5	0,296	0,014
SP4-okzipital links	10,5	0,261	0,030

Im HAWIK-R Gesamt-IQ (H14) zeigte sich nur im SP1-Kanal frontal rechts bei einer Frequenz von 10,5 Hz eine signifikante Korrelation ( $r = 0,243$ ;  $P = 0,044$ ).

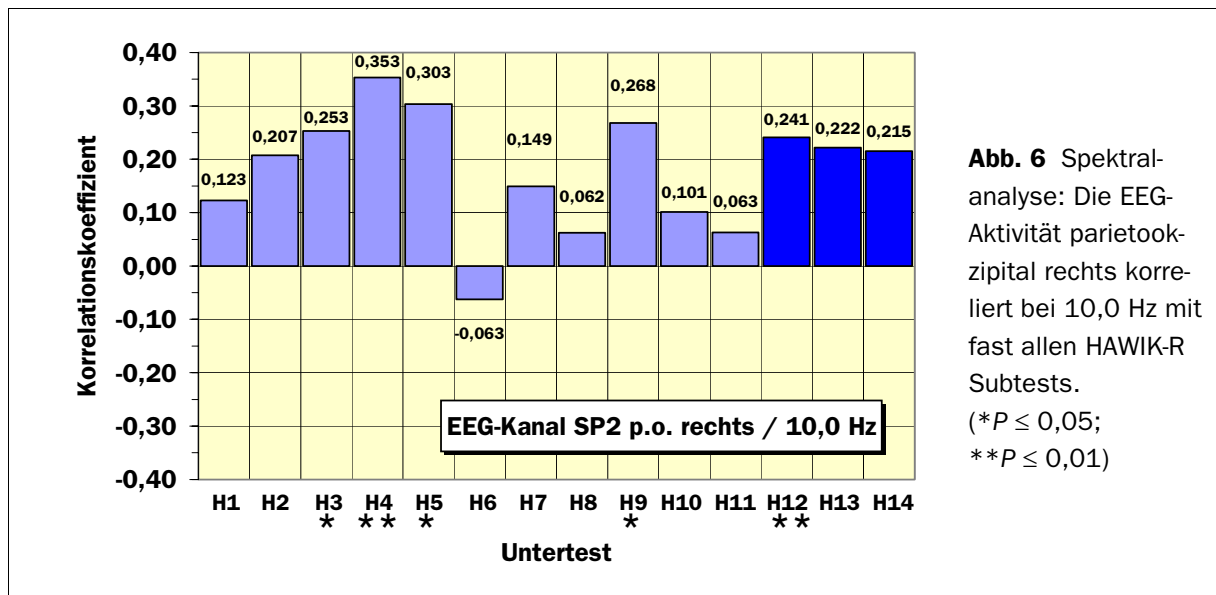
Die Ergebnisse zeigten die deutlichsten Korrelationen in den Frequenzen 10,0 und 10,5 Hz über den okzipitalen Kanälen. Somit korreliert eine höhere Intelligenz häufig mit einem höheren Frequenzbandanteil von 10,0 und 10,5 Hz. Getrennt nach der Lateralität der Hirnregion (SP2-Kanal rechts, SP4-Kanal links) erfolgte deswegen noch die Darstellung der Ergebnisse

der Untertests, bei denen die Unterschiede in diesen beiden Frequenzschritten signifikant waren.

### 3.1.2.1 EEG-Kanal SP2-okzipital rechts bei 10,0 Hz

Die Ergebnisse der Spektralanalyse des EEG-Kanals SP-2 okzipital rechts bei 10,0 Hz zeigten Signifikanzen im HAWIK-R Untertest Gemeinsamkeitenfinden (H4), Rechnerisches Denken (H3), Wortschatz-Test (H5) und Bilderordnen (H9).

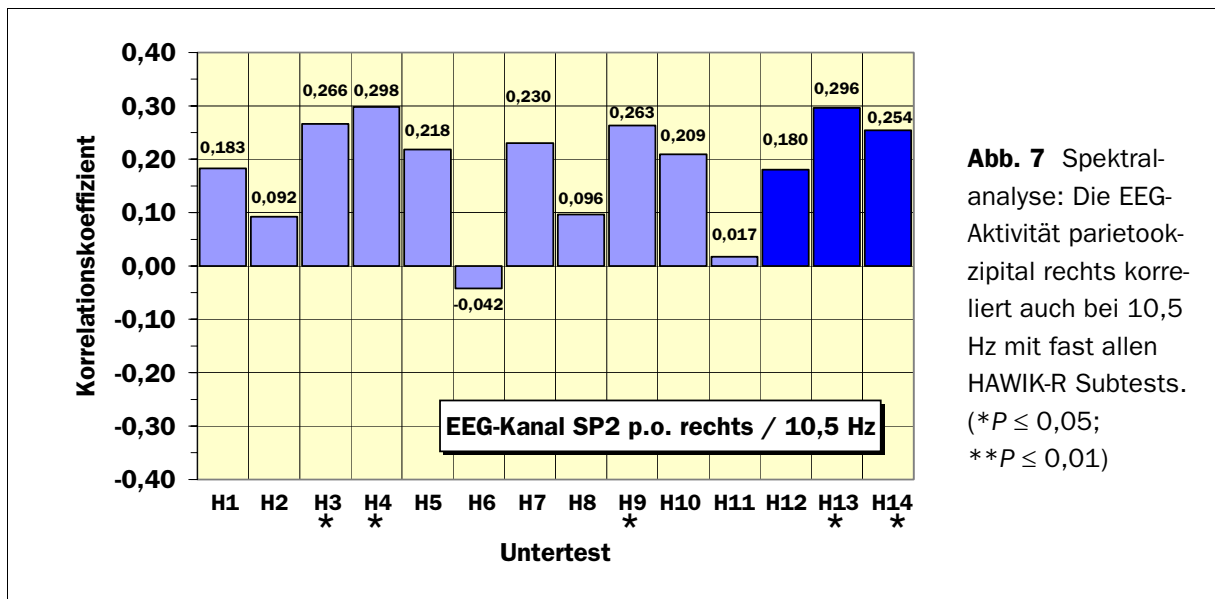
Auch im Verbal-IQ des HAWIK-R-Intelligenztestes konnte bei 10,0 Hz in der rechten okzipitalen Hirnregion mit  $r = 0,241$  ( $P = 0,005$ ) ein hoch signifikanter Korrelationskoeffizient nachgewiesen werden (Abb. 6).



### 3.1.2.2 EEG-Kanal SP2-okzipital rechts bei 10,5 Hz

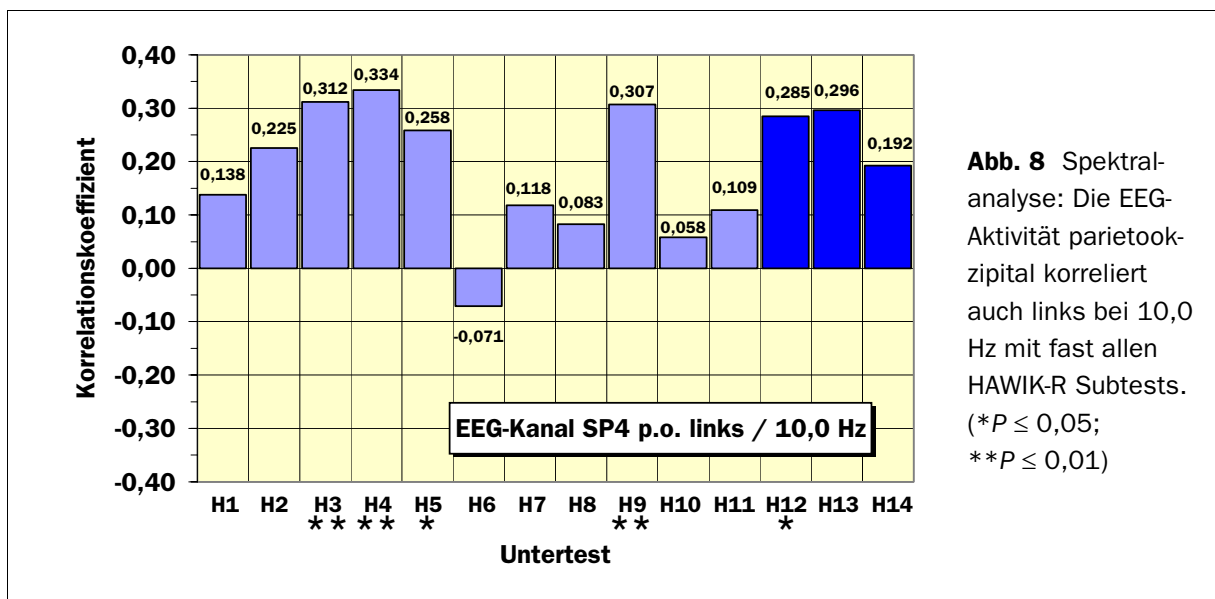
Im SP2-Kanal okzipital rechts konnte bei 10,5 Hz bei den Untertesten Rechnerisches Denken (H3), Gemeinsamkeitenfinden (H4), Bilderordnen (H9), beim Handlungs-IQ (H13) und Gesamt-IQ (H14) des HAWIK-R-Intelligenztestes eine deutlich positive signifikante Korrelation errechnet werden ( $P = 0,010 - 0,035$ ) (Abb. 7).





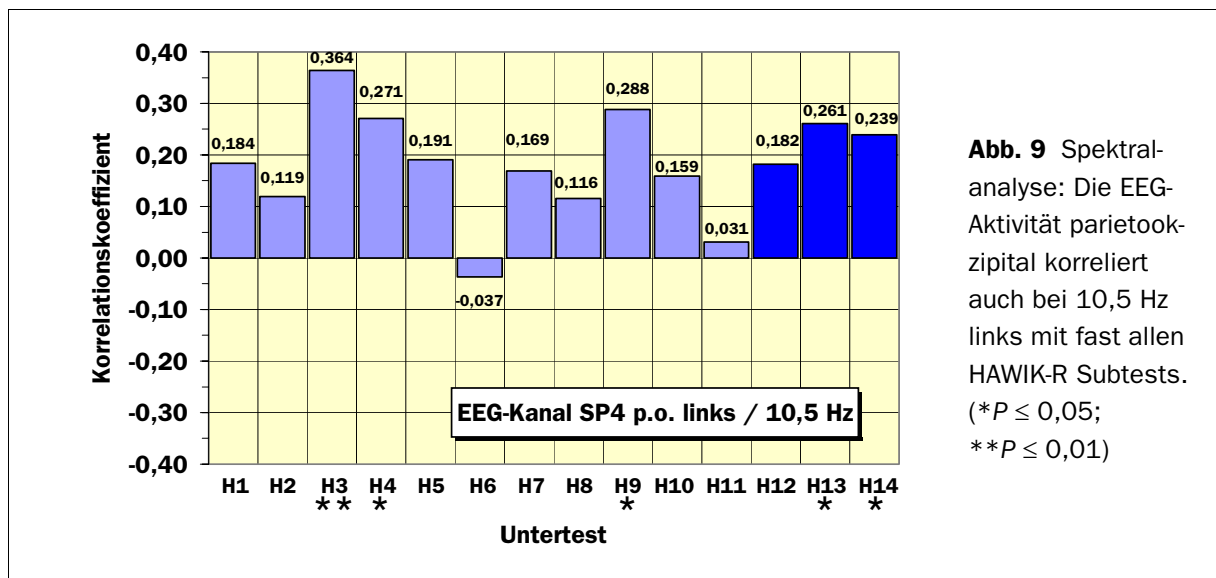
### 3.1.2.3 EEG-Kanal SP4-okzipital links bei 10,0 Hz

Über dem SP4-Kanal okzipital links konnten bei 10,0 Hz in den Untertesten Rechnerisches Denken (H3), Gemeinsamkeitenfinden (H4), Wortschatz-Test (H5), Bilderordnen (H9) und im Verbal-IQ (H12) positive Korrelationen zwischen Testergebnissen und Anteil dieser Frequenz im EEG nachgewiesen werden (Tabelle 10). Die deutlichste Korrelation lieferte der Untertest H4 (Gemeinsamkeitenfinden) ( $r = 0,334$ ;  $P = 0,005$ ) (Abb. 8).



### 3.1.2.4 EEG-Kanal SP4-okzipital links bei 10,5 Hz

Die Ergebnisse bei 10,5 Hz im okzipitalen, linksseitigem EEG korrelierten beim Untertest Rechnerisches Denken (H3) mit dem Frequenzanteil von 10,5 Hz ( $P = 0,002$ ). Ein Signifikanzniveau von kleiner 0,05 fand sich auch im Untertest Gemeinsamkeitenfinden (H4) mit  $P = 0,025$  und beim Handlungs-IQ (H13) mit  $P = 0,03$  (Abb. 9).



## 3.2 Ergebnis der Varianzanalyse (H12 – H14)

In der Varianzanalyse wurde der Fragestellung nachgegangen, ob ein Unterschied in den EEG-Merkmalen nach Unterteilung der Probanden in Gruppen abhängig von ihrem Intelligenzquotienten vorlag.

Für die folgenden Analysen wurden die Kinder in drei Untergruppen unterteilt. Zum einem wurden Kinder mit einem hohen IQ ( $IQ > 109$ ) von denen mit einem niedrigen IQ ( $IQ < 90$ ) unterschieden und von denen, die einen mittleren IQ ( $90 - 109$ ) erreichten.

Der Analyseschritt I bestand aus den Kindern mit  $IQ < 90$  und  $IQ > 109$ .

Der Analyseschritt II bestand aus den Kindern mit mittlerem IQ ( $IQ 90 - 109$ ) verglichen mit denen mit hohem IQ ( $IQ > 109$ ).

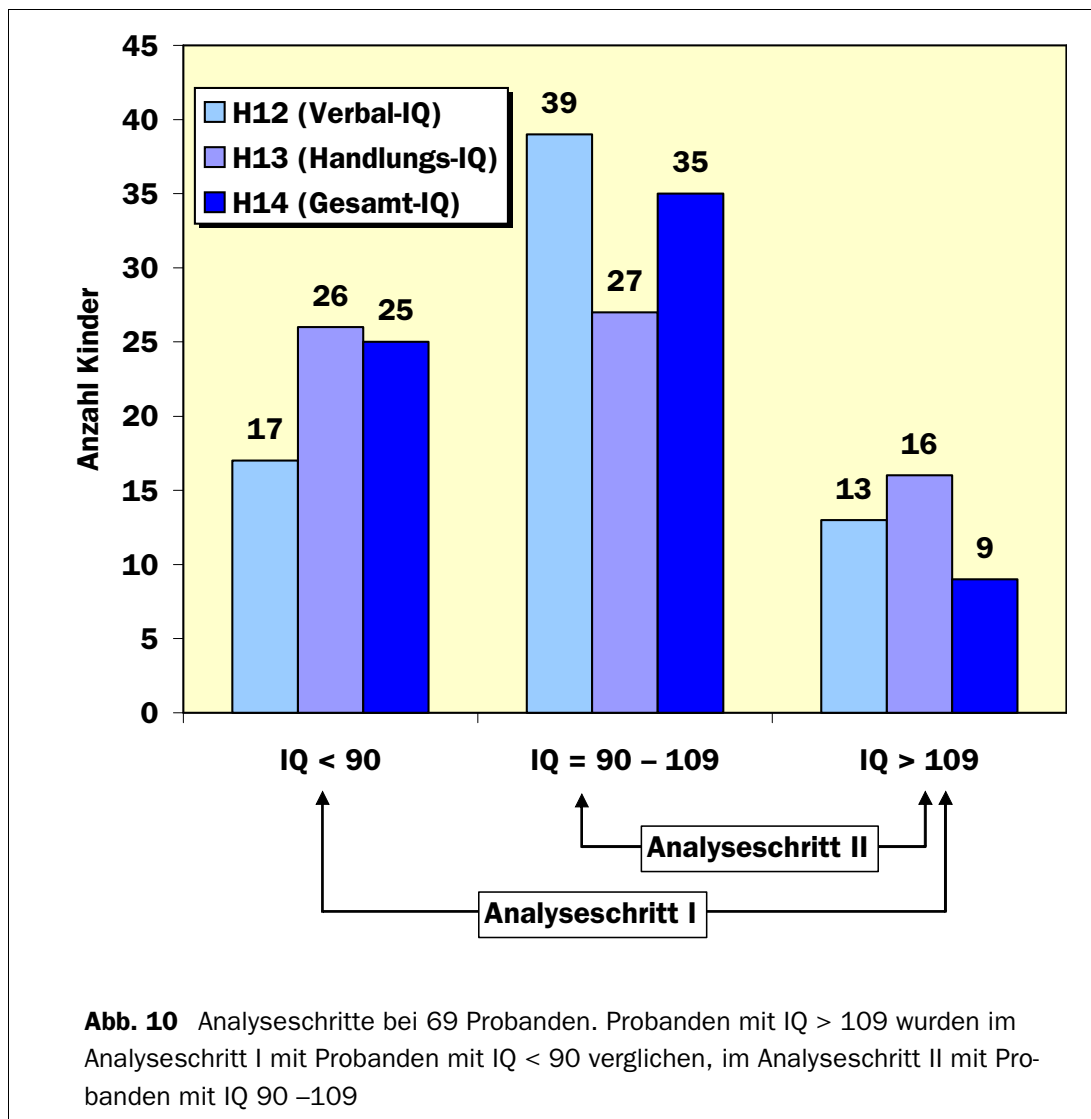
Die Ergebnisse konnten bei 69 Probanden dargestellt werden.

In dem Analyseschritt I hatten 17 Kinder von den 69 Untersuchten einen Verbal-IQ von  $< 90$  und 13 Kinder einen Verbal-IQ  $> 109$ . 26 Kinder zeigten einen Handlungs-IQ  $< 90$  und 16 von den 69 Kindern einen von  $> 109$ . Beim Gesamt-IQ konnten 9 Kinder von den 69 Untersuchten einen Wert von  $> 109$  erreichen, 25 Kinder erreichten einen Gesamt-IQ  $< 90$ . Es wur-

den die EEG der Kinder mit den schlechtesten Ergebnissen im Verbal-, Handlungs- und Gesamt-IQ mit denen verglichen, die die besten Ergebnisse zeigten (Abb. 10).

In dem Analyseschritt II wurde die EEG-Aktivität der Kinder mit dem mittleren Testergebnissen (IQ 90 – 109) verglichen mit denen, die die besten Ergebnisse (IQ > 109) erbracht hatten. Es fanden sich 39 Probanden mit einem IQ 90-109 im Verbal-IQ (H12) versus 13 mit einem IQ > 109. Im Handlungs-IQ (H13) war die Verteilung mit 27 Probanden mit einem IQ 90 – 109 versus 16 mit einem von größer 109. Beim Gesamt-IQ (H14) konnten 39 Probanden einem IQ 90 – 109 zugeordnet werden, 9 erreichten einen IQ > 109 (Abb. 10).

In der Varianzanalyse zwischen den verschiedenen Gruppen beim Verbal-IQ (H12), Handlungs-IQ (H13) und Gesamt-IQ (H14) wurden zunächst die Frequenzbänder analysiert und im zweiten Schritt die Spektralwerte einer Analyse unterzogen.



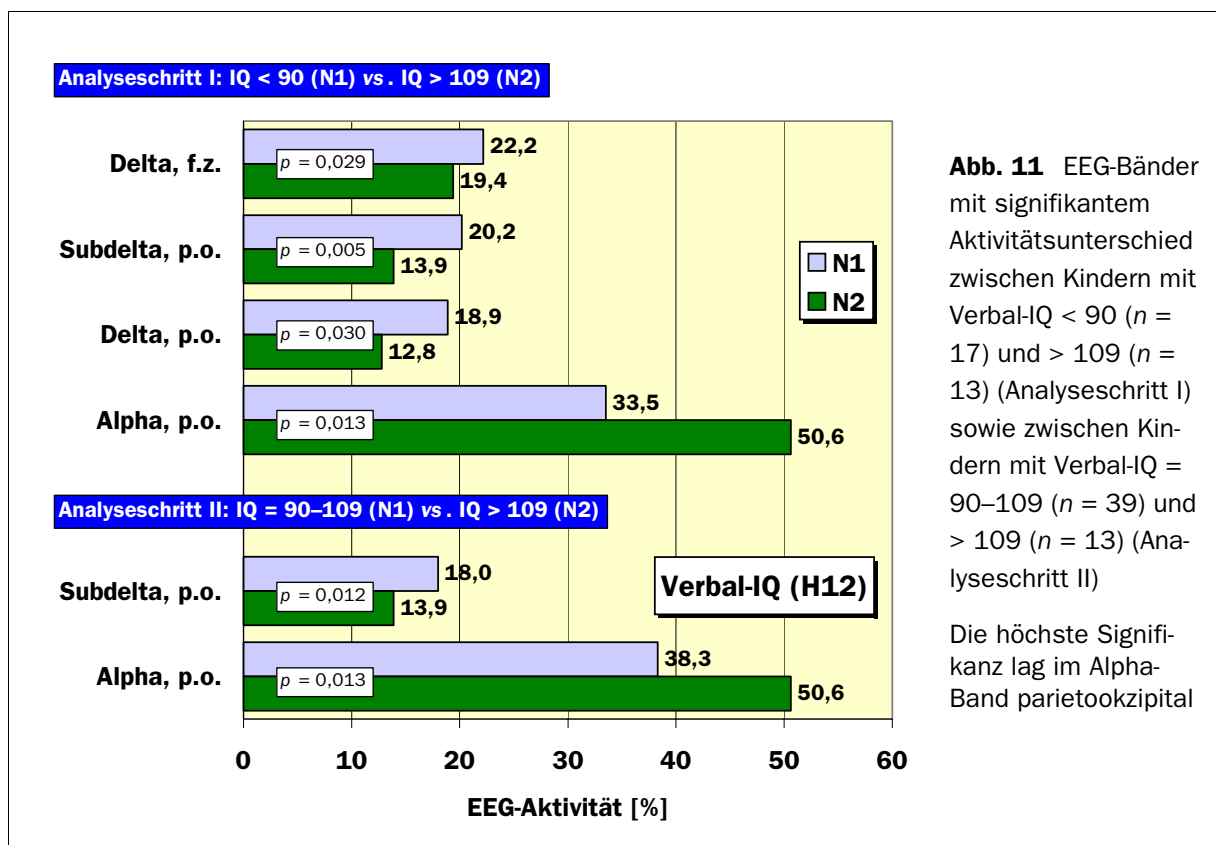
Da EEG-Daten häufig einer breiten Verteilung unterliegen, wurden sämtliche EEG-Daten logarithmiert und die Berechnungen mit den logarithmierten Daten durchgeführt. Es zeigte sich, dass dies zu nicht eindeutigeren Ergebnissen führt. Deshalb wurde in der Ergebnisbeschreibung nicht auf die logarithmierten Daten zurückgegriffen, sondern auf die Originaldaten, da diese für den visuellen Befunder leichter interpretierbar sind.

### 3.2.1 Bänder

Die Ergebnisse von H12 Verbal-, H13 Handlungs- und H14 Gesamt-IQ wurden zunächst mit der Bandanalyse der EEG verglichen. Es zeigte sich, dass zwischen der EEG-Aktivität der Probanden mit einem hohem und der Probanden mit einem niedrigem IQ signifikante Unterschiede bestehen.

#### 3.2.1.1 Varianzanalyse des HAWIK-R Verbal-IQ (H12)

Kinder mit niedrigem IQ ( $< 90$ ) haben im Vergleich mit den Kindern mit hohem IQ ( $> 109$ ) signifikante EEG-Unterschiede im Alpha-Band okzipital, Subdelta-Band okzipital, Delta-Band okzipital und Delta-Band frontal (Abb. 11).



Die deutlichsten Unterschiede waren mit dem Alpha-Band okzipital und mit dem Subdelta-Band okzipital festzustellen. Bei Probanden mit hohem Verbal-IQ war eine höhere Alpha-Aktivität nachweisbar als bei Probanden mit niedrigem Verbal-IQ. Das Alpha-Band zeigte einen Anteil von 50,6% am Gesamt-EEG bei den Probanden mit einem  $IQ(>109)$  versus 33,5% bei der Gruppe mit einem  $IQ(<90)$ .

Die Differenz der Gruppeneinteilung 2 wies im Subdelta-Band okzipital eine Signifikanz von  $P = 0,012$  und im Alpha-Band okzipital von  $P = 0,013$  auf (Abb. 11).

### **3.2.1.2 Varianzanalyse des HAWIK-R Handlungs-IQ (H13)**

Beim Handlungs-IQ (H13) ergaben sich in dem Analyseschritt I (Kinder mit  $IQ < 90$  verglichen mit Kindern mit  $IQ > 109$ ) im Alpha-Band frontal und okzipital statistisch signifikante Unterschiede ( $P \leq 0,05$ ). In den anderen Bändern ergaben sich bei dieser Gruppenbetrachtung keine signifikanten Unterschiede.

### **3.2.1.3 Varianzanalyse des HAWIK-R Gesamt-IQ (H14)**

Bei den Untersuchungen des Gesamt-IQ des HAWIK-R fand sich im Analyseschritt I ein signifikanter Gruppenunterschied der EEG-Aktivität im Alpha-Band okzipital: 32,5% ( $IQ < 90$ ) vs. 46,0% ( $IQ > 109$ ),  $P = 0,011$ .

### **3.2.1.4 Resümee der Varianzanalyse**

Die meisten signifikanten Gruppenunterschiede hinsichtlich der EEG-Aktivität in den untersuchten Bändern konnten bei der Varianzanalyse des Analyseschrittes I gefunden werden. Besonders deutliche Ergebnisse ergaben sich im HAWIK-R Verbal-IQ (H12) ( $P = 0,002$ ).

Bei der Varianzanalyse der EEG-Bänder war bei den höher intelligenten Probanden ( $IQ > 109$ ) die okzipitale Alpha-Aktivität im Durchschnitt bei 44,9%. Beim Verbal-IQ lag der Anteil sogar bei 50,6%. Bei den weniger intelligenten Probanden stellte sich eine okzipitale Alpha-Aktivität von im Durchschnitt 31,8% heraus. Bei den Probanden mit einem  $IQ > 109$  lag die okzipitale Alpha-Aktivität somit um 13,1% höher als bei den Probanden mit einem  $IQ < 90$ . Dies bewies einen Zusammenhang zwischen hohem IQ (insbesondere Verbal-IQ) und hoher okzipitaler Alpha-Aktivität.

Beim Vergleich der frontalen Alpha-Aktivität mit dem IQ wies der Unterschied beim Handlungs-IQ (H13) eine Signifikanz von  $P = 0,0374$  auf. Darüber hinaus wurde aufgezeigt, dass die Gruppe mit einem  $IQ > 109$  auch einen höheren Prozentanteil von Alpha-Aktivität frontal hat gegenüber der Gruppe mit einem  $IQ < 90$ : 21,2% vs. 15,4%;  $P = 0,0648$  (Verbal-IQ) bzw. 20,8% vs. 15,2%;  $P = 0,1218$  (Gesamt-IQ).

### 3.2.2 Spektren

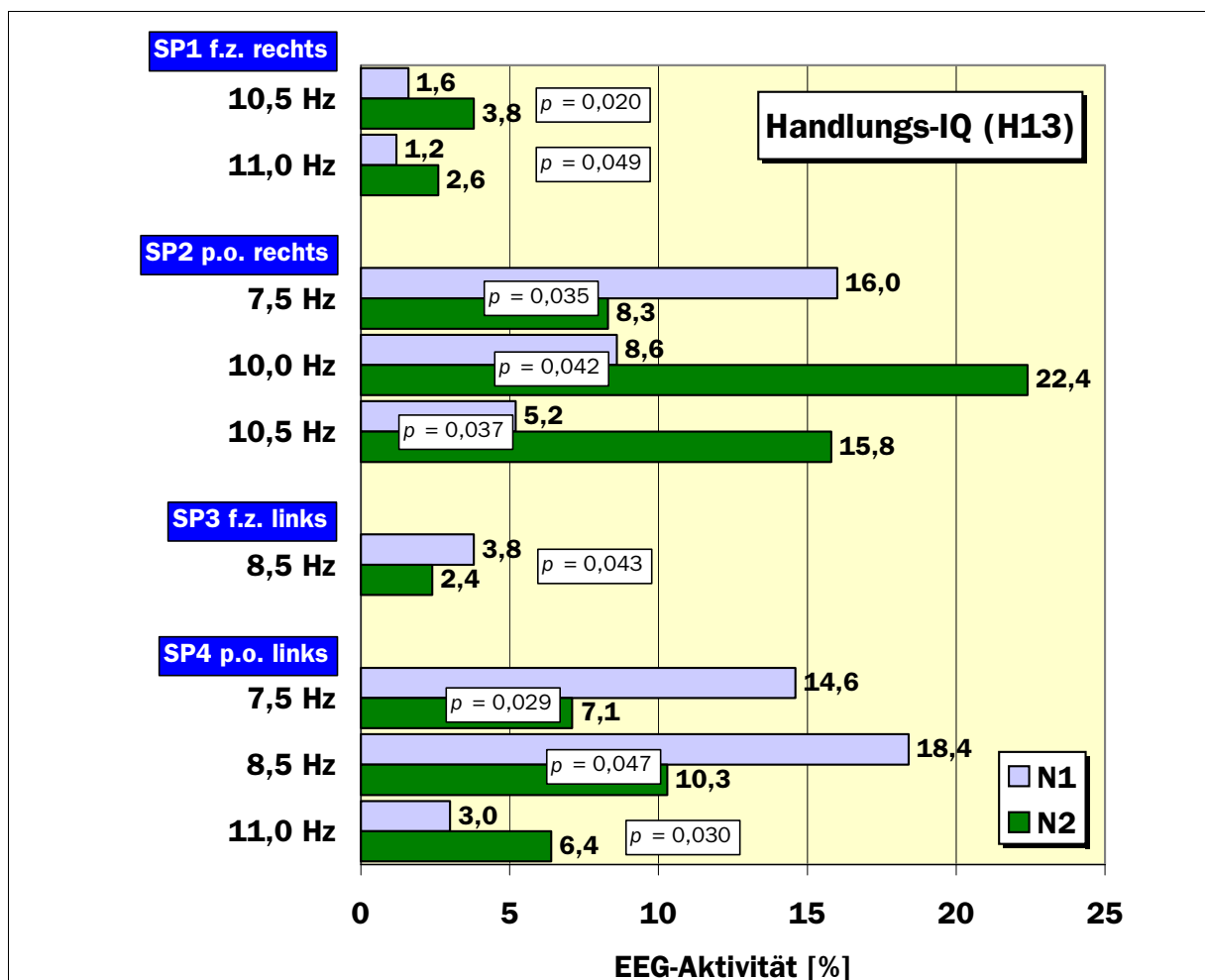
Im Analyseschritt II konnten keine signifikanten Gruppenunterschiede in den 4 genannten Kanälen bei den unterschiedlichen Spektren verzeichnet werden.

#### 3.2.2.1 Ergebnisse der Spektraldaten der Varianzanalyse im Verbal-IQ (H12)

Als einziger signifikanter Gruppenunterschied im Analyseschritt I konnte die EEG-Aktivität im SP2-Kanal okzipital rechts bei 10,0 Hz beim Verbal-IQ ausgemacht werden: 13,0% (IQ < 90,  $n = 17$ ) vs. 40,6% (IQ > 109;  $n = 13$ ),  $P = 0,0468$ .

#### 3.2.2.2 Ergebnisse der Spektraldaten der Varianzanalyse im Handlungs-IQ (H13)

Auch anhand der Ergebnisse beim Handlungs-IQ (H13) wurden die Probanden in Gruppen eingeteilt und die Ergebnisse der Spektraldaten verglichen (Abb. 12).



**Abb. 12** EEG-Frequenzen mit signifikantem Aktivitätsunterschied zwischen Kindern mit Handlungs-IQ < 90 ( $n = 26$ ) und > 109 ( $n = 16$ ) (Analyseschnitt I). Bei Kindern mit IQ > 109 war die höchste Aktivität im Anteil von 10,0 Hz parietookzipital im Alpha-Band nachweisbar

Die deutlichsten Unterschiede zwischen den Gruppen zeigten sich in den okzipitalen Ableitungen in den Frequenzen bei 10,0 und 10,5 Hz mit Signifikanzen von  $P = 0,0032$  und  $P = 0,0029$  im SP2-Kanal okzipital. Ebenso konnten bei 10,0 Hz und 10,5 Hz im SP4-Kanal okzipital große Unterschiede mit einer Signifikanz von  $P = 0,0141$  und  $P = 0,0206$  aufgewiesen werden.

### **3.2.2.3 Ergebnisse der Spektraldaten der Varianzanalyse des Gesamt-IQ (H14)**

Auch beim Gesamt-IQ (H14) konnten in dem SP2-Kanal okzipital rechts bei 10,0 Hz Unterschiede der Aktivität zwischen den Gruppen gezeigt werden: 13,3% (IQ < 90;  $n = 25$ ) vs. 30,4% (IQ > 109,  $n = 19$ ),  $P = 0,0329$ .

### **3.2.2.4 Resümee der Ergebnisse der Spektraldaten**

Es konnte mit Hilfe der Varianzanalyse bei allen 3 IQ-Berechnungen des HAWIK-R deutliche Unterschiede auf dem Signifikanzniveau von  $P \leq 0,05$  insbesondere beim Frequenzanteil von 10,0 Hz rechts okzipital nachgewiesen werden. Dies galt für den Analyseschritt I in der Kinder mit einem IQ < 90 mit Kindern mit einem IQ > 109 hinsichtlich ihrer Testergebnisse und EEG-Aktivität verglichen wurden. Erwähnenswert war, dass die Aktivität dieses Frequenzkanals bei Kindern mit einem IQ > 109 im Verbal-IQ bei fast 41% lag.

## **3.3 Vergleich der EEG-Ergebnisse bei den einzelnen Untertests (H1 – H11) des HAWIK-R**

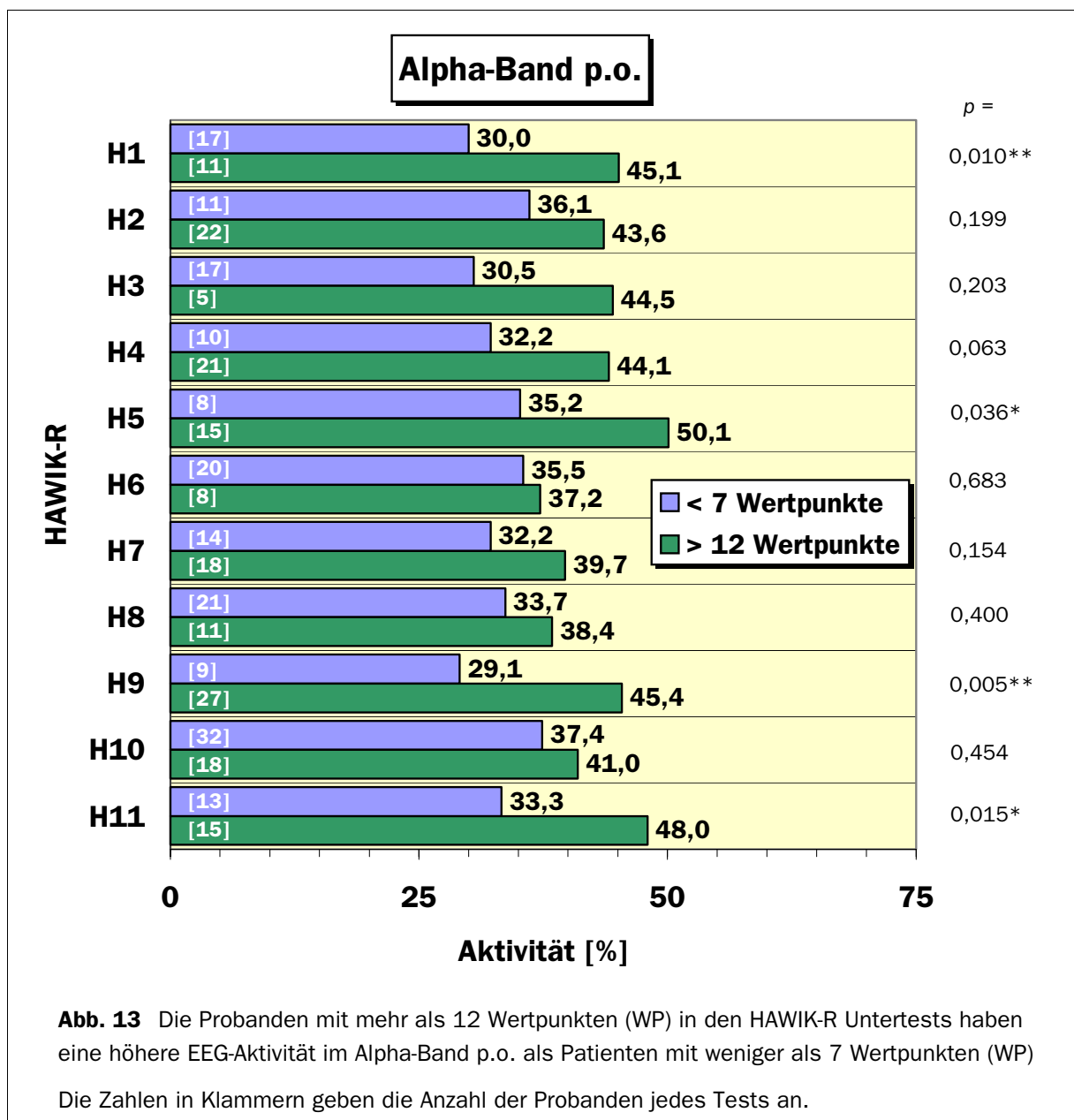
Im dritten Teil wurden die Ergebnisse der einzelnen HAWIK-R Untertests (H1 – H11) unter Bildung von Wertpunktgruppen in einer weiteren Varianzanalyse mit den EEG-Ergebnissen verglichen.

Zeigten die Probanden, die in einem Untertest besonders schlecht abschnitten (< 7 Punkte), charakteristische EEG-Unterschiede zu den Probanden, die besonders gut waren (> 12 Punkte)? Der Normbereich des HAWIK-R Intelligenztestes liegt in jedem Untertest bei 7 – 13 Wertpunkten. Zur Untersuchung herangezogen wurden die Probanden mit Wertpunkten < 7 und > 12. Es wurde der Zusammenhang zwischen den einzelnen Untertests und den Ergebnissen der Band- und Frequenzanalyse des EEG berechnet. Das Frequenzband wurde von 0,5 bis 29,5 Hz in 0,5 Hertz Schritten unterteilt. Die Berechnung erfolgte zu den Kanälen SP1 frontal rechts und SP3 frontal links sowie SP2 okzipital rechts und SP4 okzipital links.

### 3.3.1 Ergebnisse der Bandanalyse der Unterteste H1 – H11 des HAWIK-R

#### 3.3.1.1 Alpha-Band okzipital

Es konnte wie schon in der automatischen EEG-Bandanalyse von (H12 - H14) auch bei der Untersuchung der 11 Subtests festgestellt werden, dass in der Gruppe mit Wertpunkten > 12 eine höhere Alpha-Aktivität okzipital von im Durchschnitt 43,3% vorlag. In der Gruppe mit Wertpunkten < 7 ergab sich im Durchschnitt eine okzipitale Alpha-Aktivität von 33,2%. Damit lag ein Unterschied von 10,1% vor (Abb. 13).

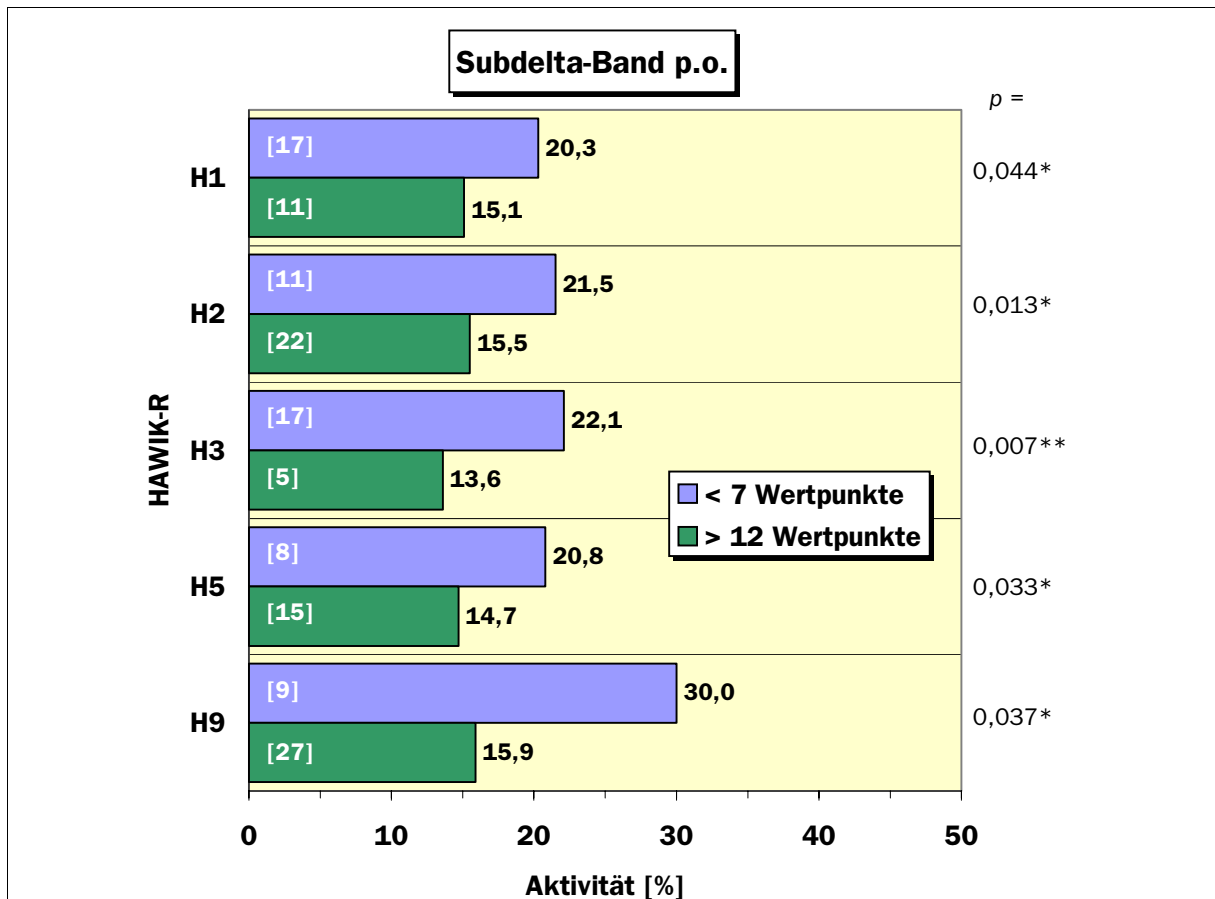




Beim Alpha-Band okzipital konnte in 4 Untertests eine Differenz zwischen den Gruppen mit einer Signifikanz von  $P \leq 0,05$  gefunden werden. In den Untertests Allgemeines Wissen (H1) und Bilderordnen (H9) bestand ein sogar ein Unterschied mit einer Signifikanz von  $P \leq 0,01$  ( $P = 0,0098$  und  $P = 0,0051$ ). Die Alpha-Band-Aktivität okzipital lag jeweils über 45%.

### 3.3.1.2 Subdelta-Band okzipital

Ein hoher Unterschied zeigte sich bei der Subdelta-Aktivität okzipital (Abb. 14). Beim Untertest Rechnerisches Denken (H3) hatten Probanden mit über 12 Wertpunkten 13,6% Subdelta-Aktivität und bei unter 7 Wertpunkten 22,1%. Diese Differenz ergab eine Signifikanz von  $P = 0,007$ . Je weniger Subdelta-Aktivität okzipital vorlag, desto besser waren die Ergebnisse im Untertest.



**Abb. 14** EEG-Aktivität im Subdelta-Band p.o. bei Kindern mit weniger als 7 und mehr als 12 Wertpunkten in den HAWIK-R Untertests

Die Probanden mit mehr als 12 Wertpunkten (WP) in den HAWIK-R Untertests haben eine niedrigere EEG-Aktivität im Subdelta-Band p.o. als Patienten mit weniger als 7 Wertpunkten (WP). Die Zahlen in Klammern geben die Anzahl der Probanden jedes Tests an.

### 3.3.1.3 Weitere signifikante Ergebnisse der Bandanalyse

Neben den vorgestellten Ergebnissen des okzipitalen Alpha- und Subdelta-Bandes wurden auch bei anderen Bändern signifikante Gruppenunterschiede gefunden ( Tab. 10).

**Tab. 10** Signifikante Ergebnisse der Bandanalyse der Untertests H1 – H11 des HAWIK-R fanden sich noch im Alpha-Band frontal und im Delta-Band okzipital und frontal

<b>HAWIK-R-Untertest</b>	<b>WP &lt;7 [n]</b>	<b>WP &gt;12 [n]</b>	<b>Band</b>	<b>Aktivität WP &lt;7 [%]</b>	<b>Aktivität WP &gt;12 [%]</b>	<b>Signifikanz [p]</b>
<b>H1</b> Allgemeines Wissen	17	11	Alpha- frontal	13,4	20,6	0,0445*
<b>H2</b> Allgemeines Ver- ständnis	11	22	Delta- frontal	22,8	20,0	0,0052**
<b>H5</b> Wortschatz-Test	8	15	Delta- okzipital	18,1	12,6	0,0132*
<b>H9</b> Bilderordnen	9	27	Delta- okzipital	18,8	14,0	0,0118*
<b>H10</b> Mosaik-Test	32	18	Delta- frontal	21,6	19,4	0,0445*
<b>H11</b> Figurenlegen	13	15	Alpha- frontal	11,7	20,8	0,0008**

### 3.3.2 Spektren der Varianzanalyse von H1 – H11

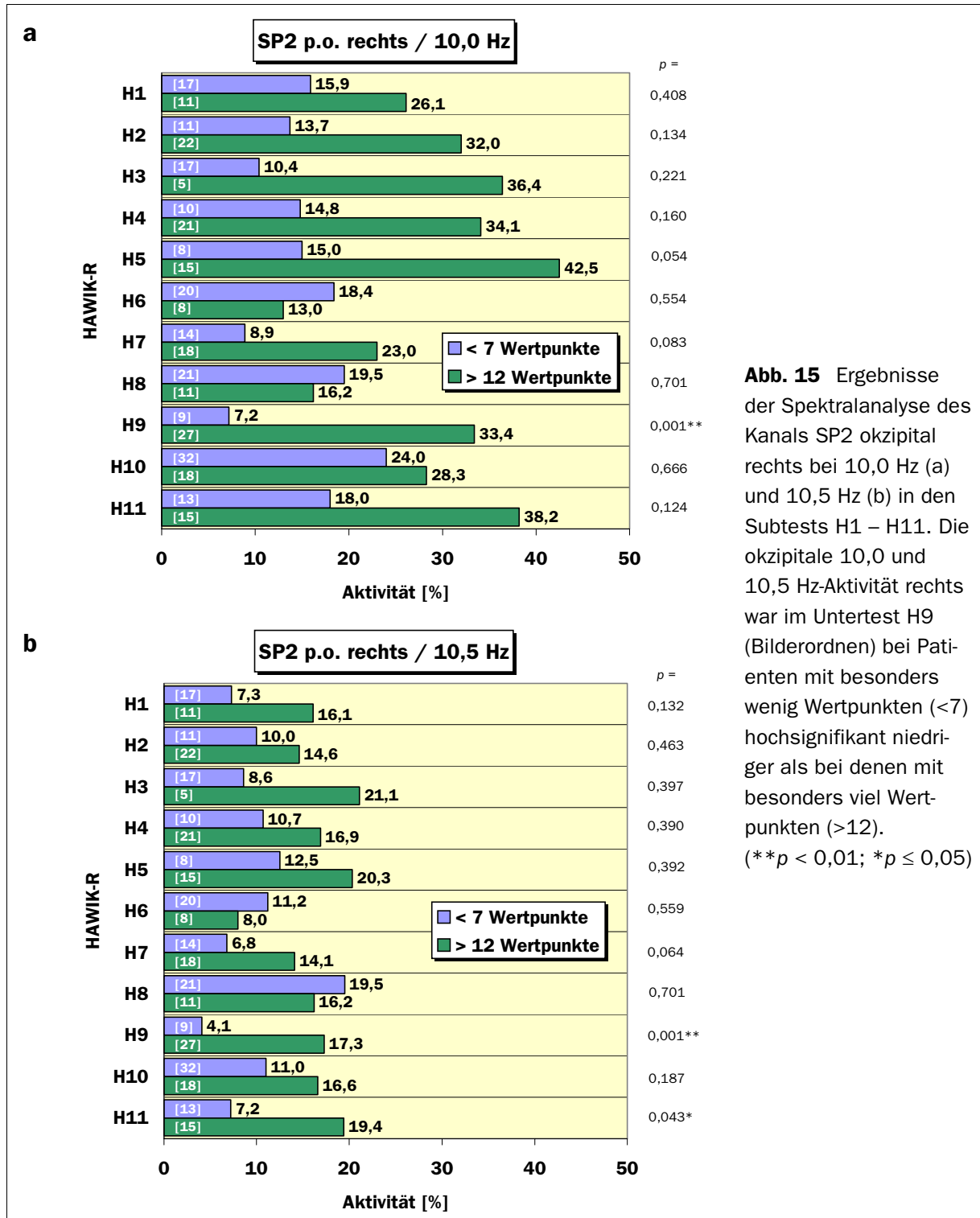
Die Varianzanalyse wurde auch zum Vergleich der Spektralanalyse-Ergebnisse mit den Ergebnissen der einzelnen 11 HAWIK-R Untertests herangezogen. Wie bei der Bandanalyse wurden einer Gruppe diejenigen Probanden zugeordnet, die in diesem Subtest einen Wertpunkt von < 7 erreichten und der anderen Gruppe diejenigen, die einen Wertpunkt > 12 erlangten.

Signifikante Ergebnisse bei den Berechnungen der Frequenzspektren fanden sich im Untertest Allgemeines Wissen (H1), Gemeinsamkeitenfinden (H4), Wortschatz-Test (H5), Bilderordnen (H9), Mosaik-Test (H10) und Figurenlegen (H11).

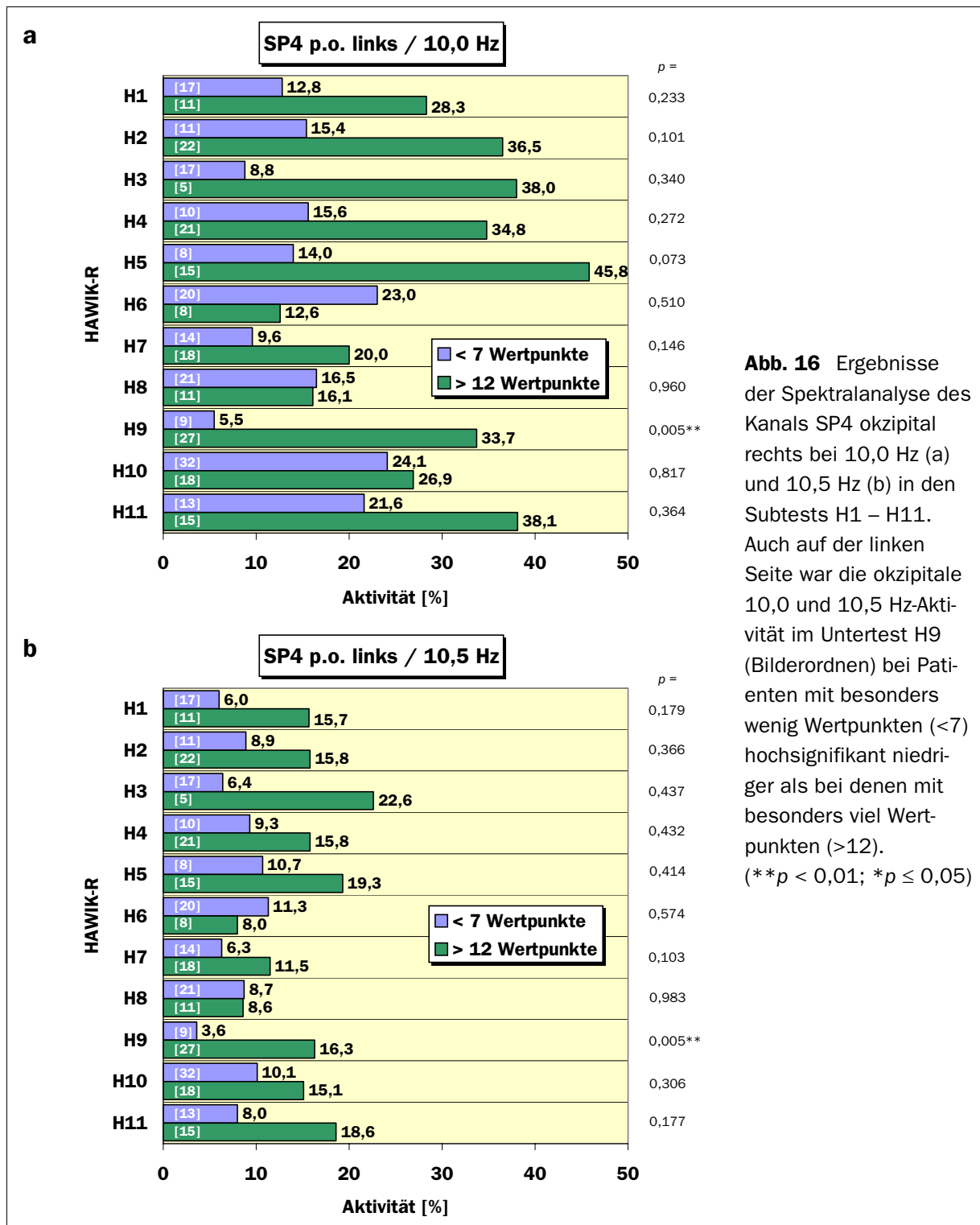
#### 3.3.2.1 Ergebnisse der Spektralanalyse okzipital

Nach den vorangehend geschilderten Ergebnissen stellte sich die Frage, ob bei den 11 Subtests auch im Frequenzbereich von 10,0 oder 10,5 Hz ähnliche Ergebnisse im Alpha-Band nachzuweisen waren.

Die Kanäle SP2-okzipital rechts (Abb. 15) und SP4-okzipital links (Abb. 16) bei 10,0 und 10,5 Hz wurden getrennt berechnet.



**Abb. 15** Ergebnisse der Spektralanalyse des Kanals SP2 okzipital rechts bei 10,0 Hz (a) und 10,5 Hz (b) in den Subtests H1 – H11. Die okzipitale 10,0 und 10,5 Hz-Aktivität rechts war im Untertest H9 (Bilderordnen) bei Patienten mit besonders wenig Wertpunkten (<7) hochsignifikant niedriger als bei denen mit besonders viel Wertpunkten (>12). (\*\*p < 0,01; \*p ≤ 0,05)



**Abb. 16** Ergebnisse der Spektralanalyse des Kanals SP4 okzipital rechts bei 10,0 Hz (a) und 10,5 Hz (b) in den Subtests H1 – H11. Auch auf der linken Seite war die okzipitale 10,0 und 10,5 Hz-Aktivität im Untertest H9 (Bilderordnen) bei Patienten mit besonders wenig Wertpunkten (<7) hochsignifikant niedriger als bei denen mit besonders viel Wertpunkten (>12). (\*\* $p < 0,01$ ; \* $p \leq 0,05$ )

Signifikante Unterschiede zeigten sich im Untertest Bilderordnen (H9) okzipital rechts und links bei 10,0 und 10,5 Hz. Hierbei lag die Aktivität von 10,0 Hz rechts und links bei 33,4 bzw. 33,7% während sie bei 10,5 Hz nur bei 17,3 bzw. 16,3% der Gesamtbandwerte lag.

In den meisten Untertests war der prozentuale Anteil der jeweiligen Frequenz in der Gruppe mit >12 Wertpunkten deutlich besser war als in der Gruppe mit <7 Wertpunkten. Gegensätzliche, aber nicht signifikante Ergebnisse waren nur bei den Untertesten Zahlennachsprechen (H6) und Bilderergänzen (H8) nachweisbar.

Die Frequenz von 10,0 Hz rechts und links okzipital zeigte jeweils den höheren Anteil an der Alpha-Band-Aktivität mit Werten zwischen 23,0 und 45,8 % (Abb. 15a, Abb. 16a). Bei 10,5 Hz lag der prozentuale Anteil an der Alpha-Band-Aktivität des EEG zwischen 11,5 und 22,6% (Abb. 15b, Abb. 16b).

### 3.3.2.2 Weitere signifikante Unterschiede der Spektralanalyse im Vergleich mit den Untertests H1 – H11

Neben den im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Ergebnissen der Spektralanalyse der Kanäle SP2-okzipital rechts und SP4-okzipital links bei 10,0 Hz und 10,5 Hz wurden weitere Kanäle bzw. Frequenzen ermittelt, die signifikante Gruppenunterschiede aufwiesen (Tab. 11).

**Tab. 11** Weitere signifikante Ergebnisse der Bandanalyse H1 – H11 des HAWIK-R

HAWIK-R (Untertest)	WP < 7 [n]	WP > 12 [n]	Kanal der Spektralanalyse	Frequenz	Signifikanz [p]
<b>H1</b> (Allgemeines Wissen)	17	11	SP1-frontal rechts	10,5 Hz	0,026
<b>H4</b> (Gemeinsamkeiten finden)	10	21	SP1-frontal rechts	7,5 Hz	0,0441
<b>H5</b> (Wortschatz-Test)	8	15	SP1-frontal rechts	7,5 Hz	0,0381
				8,0 Hz	0,0461
			SP3-frontal links	7,5 Hz	0,0234
				8,0 Hz	0,0393
			8,5 Hz	0,0219	
<b>H9</b> (Bilderordnen)	9	27	SP1-frontal rechts	10,5 Hz	0,0093
			SP4-okzipital links	9,5 Hz	0,0016
<b>H10</b> (Mosaik-Test)	32	18	SP1-frontal rechts	10,5 Hz	0,0337
<b>H11</b> (Figurenlegen)	13	15	SP1-frontal rechts	9,5 Hz	0,0123
				10,0 Hz	0,0044
				10,5 Hz	0,0074
				11,0 Hz	0,0422
			SP2-okzipital rechts	9,5 Hz	0,0147
				11,5 Hz	0,0484
			SP3-frontal links	9,5 Hz	0,0295
				10,0 Hz	0,0212
				10,5 Hz	0,0229
				11,0 Hz	0,0325
SP4-okzipital	9,5 Hz	0,0273			

## 4 Diskussion

Das Hauptergebnis der vorgelegten Studie ist, dass der Anteil der Alpha-Band-Aktivität parieto-okzipital positiv mit guten Testergebnissen im HAWIK-R korreliert. Innerhalb des Alpha-Bandes (7,5-12,5 Hz) korrelieren besonders die Frequenzen 10,0 und 10,5 Hz, so dass je höher also der prozentuale Anteile dieser Frequenzen parieto-okzipital ist, desto besser sind die Testergebnisse im Intelligenztest. Je mehr Delta-Aktivität okzipital gefunden wird, um so schlechter waren die Ergebnisse in den einzelnen Tests.

In der vorliegenden Studie konnte ein Zusammenhang zwischen den Ergebnissen automatischer EEG-Analyse und standardisierter Intelligenztestverfahren gezeigt werden. Vorbild war die Münchener Pädiatrische Längsschnittstudie 1986 (Schirm et. al.) bei der bereits Zusammenhänge zwischen Ergebnissen von Intelligenztestverfahren und EEG gezeigt werden konnten und in der die Methode der Spektralanalyse etabliert werden konnte. Schon in der Münchener Pädiatrischen Längsschnittstudie (1986) wurden Korrelationsuntersuchungen zwischen den Ergebnissen der Testverfahren und EEG durchgeführt. Untersucht wurde dies beim Hannover-Wechsler-Intelligenztest für das Vorschulalter (HAWIVA), dem Frostig-Test und dem Mann-Zeichen-Test. Das Probandenalter lag bei 5 Jahren. Bei den Spektralwerten mit einer Frequenzauflösung von 0,8 Hz lag die parieto-okzipitale dominante Frequenz der 5-jährigen bei geschlossenen Augen bei durchschnittlich 8,0 Hz. Bei den 10jährigen in der vorliegenden Studie bestanden die höchsten positiv signifikanten Korrelationen zur Frequenz 10,0 Hz parieto-okzipital mit geschlossenen Augen. Die Frequenzauflösung konnte auf 0,5 Hz erhöht werden.

In der Korrelationsanalyse konnten signifikant positive Korrelationen zwischen höherer Alpha-Aktivität und besseren Testergebnissen im Intelligenztestverfahren festgestellt werden. Besonders deutlich war dies bei der Spektralanalyse, da der Anteil des okzipitalen Alpha am EEG bei 10 – 10,5 Hz mit hohen IQ-Werten positiv korrelierte. Ristanovic et al. (2000) fanden ebenfalls den höchsten Anteil an relativer Alpha-Power parietookzipital bei intelligenteren Personen. Jauvosec et al. (2000) beschrieben eine höhere Synchronisation im oberen Alpha-Bereich (10-13 Hz). Sie interpretierten dies mit der besseren neuronalen Vernetzung bei intelligenteren Personen.

Bei den eigenen Ergebnissen fiel eine fast spiegelbildliche Korrelation der EEG-Aktivität in den parietookzipitalen Bändern Alpha und Subdelta auf (Abb. 5), wobei die Alphaaktivität positiv und die Deltaaktivität negativ korrelierte. Ebenso konnte gezeigt werden, dass die Aktivität im Delta- und im Theta-Band mit den Ergebnissen der Testverfahren negativ korrelierte, d.h. je mehr Delta- bzw. Theta-Aktivität im EEG zu finden war, desto schlechter

waren die Testergebnisse. Ähnliches wurde 1981 durch Esser et al. bei 400 8jährigen neurologisch ungeschickten Kindern als wesentliches Ergebnis veröffentlicht.

Darüber hinaus lag bei 9 von 14 Untertesten des HAWIK-R eine negative Korrelation mit dem Subdelta-Band vor. Subdelta- und Delta-Aktivität okzipital korrelierten bei allen 14 untersuchten Testparametern negativ. Beim frontalen Subdelta-Band konnten ebenfalls negative Korrelationen mit Ausnahme der Unterteste Wortschatz-Test (H5) und Bilderordnen (H9) gefunden werden. Für das Delta-Band beschrieben Matsuura et al. (1994) in einer Untersuchung bei chronisch schizophrenen Patienten ebenfalls eine negative Korrelation der Deltaaktivität mit den Intelligenztestparametern.

Somsen et al. (1997) wiesen mit der Spektralanalyse einen Zusammenhang zwischen EEG-Aktivität und Alter in der mittleren Kindheit nach. Es zeigte sich, dass mit zunehmendem Alter die Delta-Aktivität ab und die Theta-Aktivität zunahm. Die relative Alpha-Aktivität wurde als ein Indikator für die generelle mentale Entwicklung interpretiert. Diese Interpretation konnte durch die vorliegenden Studienergebnisse bestätigt werden, denn je mehr Alpha-Aktivität verlag, desto besser waren die Ergebnisse des Intelligenztestes und je mehr Delta-Aktivität umso schlechter.

Das Design der vorliegenden Studie basiert auf Vorarbeiten und Ergebnissen der Münchener pädiatrischen Längsschnittstudie 1986 (Schirm et al.).

Die Entwicklung des kindlichen EEG wurde an Hand der Daten der Münchener Pädiatrischen Längsschnittstudie durch Mann et al. (1978), Sadowsky et al. (1983), Schmid (1984) und Schmid et al. (1986) publiziert. Die Bedeutung einer EEG-Analyse im Kindesalter konnte durch vergleichende Untersuchungen mit Down-Syndrom-Probanden sowohl durch die vergleichende Betrachtung absoluter und relativer Aktivität (Schmid et al. (1985)) als auch mit Hilfe der Kohärenzanalysen (Schmid et al. (1992)) gezeigt werden.

In der Münchener Pädiatrischen Längsschnittstudie 1986 (Schirm et al.) wurden altersadaptierte Testverfahren zur Messung des Entwicklungsstandes eingesetzt. Korrelationsuntersuchungen zwischen den Ergebnissen der Testverfahren und EEG liegen zum Hannover-Wechsler-Intelligenztest für das Vorschulalter (HAWIVA), zum Frostig-Test und zum Mann-Zeichen-Test vor. Der HAWIVA wurde bei 372 Patienten im Alter von 5 Jahren durchgeführt, bei denen auch ein standardisiertes EEG abgeleitet wurde. Die Gesamtzahl der Kinder wurde in eine Kontrollgruppe nach den Kriterien von Petersen u. Eeg-Oloffsen (1971) und in eine Untersuchungsgruppe, die diese Kriterien nicht erfüllte, aufgeteilt. Sowohl beim Handlungs- teil als auch beim Verbalteil ergaben sich zwischen den Gruppen über den frontozentralen und parietookzipitalen Ableitungen signifikante negative Korrelationen im Frequenzbereich von 6,6-8,4 Hz. Damit lagen die signifikanten negativen Korrelationen der EEG der auffälli-

gen Kinder im Bereich der dominanten Frequenz der 5jährigen. Diese lag frontozentral bei offenen Augen bei durchschnittlich 7,3 Hz, bei geschlossenen Augen bei durchschnittlich 6,9 Hz und parietookzipital bei offenen Augen bei durchschnittlich 7,4 Hz, bei geschlossenen Augen bei durchschnittlich 8,0 Hz. Zur statistischen Auswertung wurden in diesem Teilprojekt die Spektralwerte der Powerspektren mit einer Frequenzauflösung von 0,8 Hz herangezogen. Schmid et al. (1983 a,b) konnten zeigen, dass unter Einsatz der Spektralanalyse und der Z-Transformation in einem sehr engen Frequenzband auch vermeintlich nichtsignifikante Korrelationen signifikant herausgearbeitet werden können. Negative Korrelationen der Aktivität im schmalen Frequenzbandbereich der dominanten Frequenz wurden durch den Mischwert der klassischen EEG-Bänder stark verwischt.

Auch die Auswahl der 4 EEG-Kanäle lehnt sich an das Design der Münchener Pädiatrischen Längsschnittstudie an, da an Ihnen die Normstichproben der Münchener Pädiatrischen Längsschnittstudie validiert wurden. Es handelt sich dabei um frontozentrale und parietookzipitale bipolare Montagen der linken als auch der rechten Seite. Die Kanalwahl entspricht darüber hinaus auch der üblichen, in der Wissenschaft verwendeten, Ableitung frontozentral und parietookzipital.

Da eine EEG-Ableitung bei einem Kind kaum je über längere Strecken artefaktfrei möglich ist, mussten Kompromisse gefunden werden. Das heißt, unter Berücksichtigung der technischen Möglichkeiten des EEG-Spektral-Analyse-Programmes wurden die Epochen zu 60 Sekunden, maximal aus 6 Teilstücken á 10 Sekunden gewählt. Diese wurden durch Flags in den abgeleiteten digitalen EEG markiert und danach analysiert.

Die EEG-Merkmale sind innerhalb einer Person konstant (Zschocke, 1995) und bilden sich deshalb auch in jedem Teilabschnitt des EEG ab.

Die Software der Firma Micromed wurde verwendet, weil sie die derzeit einzige Software auf dem Weltmarkt ist, die die Spektralanalysen auf ein bestehendes Normwertkollektiv aus allen Altersgruppen angepasst hat.

Von den ursprünglich 98 untersuchten Kindern konnten nur etwa 2/3 ausgewertet werden, da bei etwa einem Drittel die EEG-Qualität für die automatische Analyse nicht ausreichte, obwohl die EEG für den visuellen Befunder von einwandfreier Qualität erschienen. Dies stellt das Verfahren von vornherein als ein zuverlässiges diagnostisches Instrument in Frage. Dies kann darin begründet sein, dass für diese Studie das komplette Frequenzband von 0,5 bis 29,5 Hz analysiert wurde. Bei zukünftigen klinischen Anwendungen könnte man sich jedoch voraussichtlich auf das Alphaband beschränken, das ja die höchsten Signifikanzen gezeigt hat, somit sind viel weniger Ausfälle zu erwarten.



Es sind einige Normvarianten des EEG bekannt, wie zum Beispiel die Beta-Variante des Grundrhythmus, die 4/s-Variante des Grundrhythmus und das *okzipitale Delta der Jugend* (Delta de la jeunesse), die keinen Krankheitswert haben (Zschocke, 1995), die aber das Ergebnis der Spektralanalyse beeinflussen können. Probanden mit diesen EEG-Besonderheiten wurden bewusst den gleichen Analyseschritten unterzogen wie alle anderen, da diese Varianten auch Teil des individuellen EEG sind und somit ja auch neuropsychologisch bedeutsame Besonderheiten sein könnten. Andererseits könnte es sein, dass diese Normvarianten die Ergebnisse verfälschen.

Die Beeinflussung der EEG-Aktivität durch mögliche epilepsietypische Potentiale kommt nicht in Betracht, da Patienten mit solchen Mustern aus der Untersuchung ausgeschlossen wurden.

Wenn die Daten etwa zeigen, dass der okzipitale Anteil an Delta-Aktivität negativ mit den Testleistungen korreliert, kann das entweder heißen, dass das Delta de la jeunesse in seiner Ausprägung vom Intelligenzquotienten unabhängig oder dass es bei niedrig intelligenten Probanden stärker ausgeprägt ist als bei intelligenteren Probanden.

Der HAWIK-R wurde gewählt, weil dieser Test im Erhebungszeitraum der in Deutschland am häufigsten verwendete und am besten validierte Intelligenztest für diese Altersgruppe war (Tewes, 1984).

Gemessen an der hohen Anzahl der im Erhebungszeitraum im SPZ-Altötting vorgestellten Patienten (3000-4000/Jahr) erscheint die Anzahl der eingeschlossenen Patienten zunächst etwas niedrig, allerdings ist zu bedenken, dass nur Patienten eingeschlossen werden konnten, bei denen eine Intelligenztestung und eine EEG-Ableitung im gleichen Zeitraum durchgeführt werden konnte. Das trifft nur für die Erstvorstellungen der Patienten im SPZ-Altötting routinemäßig zu. Dauertherapiepatienten im gleichen Alter wurden nicht einbezogen. Zudem wurden alle Patienten mit Epilepsie ausgeschlossen.

Hinsichtlich der Übertragbarkeit der Ergebnisse oder Auswahl der Probanden ist zu diskutieren, dass die Probanden, die in die Studie mit aufgenommen wurden sämtlich Patienten waren, die alle wegen einer speziellen Fragestellung im Sinne einer Entwicklungsauffälligkeit (Verhalten, Schulleistung, Teilleistungsstörung u.a.m.) im SPZ-Altötting vorgestellt wurden. Somit entsprachen sie keinem Normkollektiv, das wäre für weitere Studien zur Bestätigung der hier vorgestellten Ergebnisse zu fordern.

Erste Ergebnisse über die automatische EEG-Analyse bei gesunden Probanden stammen von Gibbs u. Knott (1949) und von Penuel et al. (1955) sowie von Matousek und Petersen (1973).

Sie entstanden in der Zeit vor der digitalen EEG-Ableitung und –Analyse, die sich erst in den 80iger Jahren etablieren konnte.

Die schon 1949 dargestellten Befunde, dass mit dem zunehmenden Alter und damit zunehmender Reife der Probanden eine kontinuierliche Zunahme der Alpha-Band-Bereiches (10-12 Hz) erfolgt, konnten in der Varianzanalyse der eigenen Studie bestätigt werden. Es fand sich eine parieto-okzipitale Alpha-Aktivität von 50,6% bei Kindern mit einem IQ > 109 mit einem Signifikanzniveau von  $P = 0,013$ .

In der Varianzanalyse konnte sowohl im Verbal-IQ (H12) als auch im Handlungs-IQ (H13) und im Gesamt-IQ (H14) bei 10,0 Hz rechts okzipital die höchste Aktivität in diesem Frequenzbereich mit über 22,4 % an der Gesamt-Alpha-Aktivität des EEG nachgewiesen werden.

Penuel et al. (1955) haben die Zunahme der Alpha-Aktivität in Abhängigkeit vom zunehmenden Alter von Probanden im Kindesalter beschrieben. In der vorgelegten Studie wurde eine Alphazunahme mit zunehmender Intelligenz beobachtet. Als gemeinsamer Schluss wäre eine Zunahme der Reife mit zunehmenden Alter aber auch mit zunehmender Intelligenz zu interpretieren.

Unsere Ergebnisse zeigten eine, wie schon von John et al. (1980 a,b) beschrieben, abnehmende bzw. geringere relative Delta- und Theta-Aktivität bei gesunden 10jährigen Kindern im Vergleich mit Lernbehinderten. In der vorgelegten Studie wurde im weiteren nur eine Zunahme der Alpha-Aktivität gefunden und nicht auch der Beta-Aktivität wie John et al. darstellen konnten. Die Alpha-Aktivitätszunahme korrelierte positiv signifikant mit den Ergebnissen des HAWIK-R, wie dargelegt werden konnte. John zeigte die Beziehung zwischen Zunahme der Alpha-Aktivität und dem Alter, hingegen konnte in der vorgelegten Studie die Zunahme der Alpha-Aktivität mit Zunahme der Intelligenz nachgewiesen werden.

Übereinstimmung fand sich bezüglich der Ergebnisse von Ohtahara (1981) hinsichtlich seiner Aussagen zur Alpha-Energie. In der vorliegenden Studie wurde ein Anteil von bis zu 50,6% Alpha-Aktivität parieto-okzipital mit dem Schwerpunkt bei 10,0 Hz gefunden.

Die Forderung von Chabot et al. (1996) nach einer stärkeren Einbeziehung der quantitativen EEG-Analyse bei der Untersuchung intellektueller Leistungsfähigkeit in einer Untersuchung zum ADS (attention-deficit-syndrom) wird durch die vorliegenden positiven Korrelationen von Alpha-Aktivität und zunehmender Intelligenz bzw. negativer Korrelation von geringer Alpha-Aktivität bei abnehmender Intelligenz unterstrichen.

Solders et al. (1998) gaben erste Hinweise darauf, dass der Verbal-Intelligenzquotient am besten mit dem EEG korreliert. Die eigenen Ergebnisse zeigten beim Verbal-IQ des HAWIK-R eine positive Korrelation mit dem Alpha-Band parietookzipital mit einem Signifikanz-Niveau

von  $p = 0,006$ . Korrelationen wurden aber auch beim Handlungs-IQ resultierend beim Gesamt-IQ gefunden. Damit stimmen die Ergebnisse bei den 10-jährigen Probanden mit denen der 28-jährigen Patientin von Solders mit adulter metachromatischer Leukodystrophie vor und 4 Jahre nach Knochenmarkstransplantation inhaltlich überein. Es ist anzunehmen, dass die Verbesserung der Grundaktivität bei der Patientin von Solders einer verbesserten neuroanatomischen, neurophysiologischen Grundsituation nach der Knochenmarkstransplantation entsprach.

Dafters et al. (1999) untersuchten, ob die Höhe von Drogeneinnahme (Ecstasy) mit EEG Power und Kohärenz korreliert. 23 Personen, die Ecstasy als Erholungsdroge benutzen, wurden mit EEG und kognitiven Variablen untersucht. IQ-Test, das direkte und indirekte Erinnerungsvermögen, frontale Funktionen und die Stimmung wurden getestet. Die Ergebnisse zwischen Erstmessung und Drogenkonsum nach 12 Monaten wurden untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die Alpha-Power negativ korreliert mit Zunahme des Drogenkonsum. Eine indirekte Messeinheit für mentale Funktionen wurde postuliert. Dies war im Sinne der indirekten Messeinheit in der vorliegende Studie ebenfalls der Fall, da der Anteil der Alpha-Aktivität positiv mit dem Verbal-IQ (H 12) korrelierte.

Byring et al. (1991) verglichen 13jährige Jungen mit Sprachstörungen gegenüber einer Kontrollgruppe. Sie fanden eine niedrigere Alpha- und Beta-Aktivität bei den sprachgestörten Kindern. Dies stimmt überein mit einer niedrigeren Alpha-Aktivität bei den weniger intelligenteren Probanden gegenüber denen mit höherer Intelligenz in der vorliegenden Studie. Da Sprachstörungen im Ergebnis mit einem niedrigen Verbal-Quotienten bei der Intelligenzmessung einhergehen, ist eine Übereinstimmung der Ergebnisse von Sprachstörungen und verminderten Intelligenzquotient plausibel.

EEG von Kindern mit Entwicklungsstörungen zeigten mehr langsame und weniger höhere Frequenzbandanteile. Darüber hinaus konnte eine gewisse Beziehung zwischen Intelligenzminderung und Reduktion der hohen Frequenzbandanteile, besonders des Alpha-Bandes parieto-okzipital mit der dominanten Frequenz bei 10,0 Hz nachgewiesen werden. Während die Defizite bei Kindern der Münchener Pädiatrischen Längsschnittstudie (1986) im Alter von 5 Jahre am stärkstem im Frequenzbandbereich von 6,8-8,4 Hz imponieren, lagen die höchsten Defizite bei 10jährigen Kindern im Frequenzbandbereich von 10,0 – 10,5 Hz. Betrachtet man die quantitativen Unterschiede des Defizits an relativer Alpha-Aktivität bei Kindern mit Entwicklungsstörungen, so sind sie nur durch automatische EEG-Analysen ermittelbar. Kinder mit psychomotorischen Defiziten, aber auch mit Lernstörungen, könnten durch die Ableitung eines EEG unter Einsatz einer automatischen EEG-Analyse von Gesunden differenziert werden, folgerte Schmid (1995). Schmid und Tirsch (1995) stellten bei Kindern

im Alter von 10 Jahren im EEG dar, dass bei der Berechnung der relativen Aktivität die Alpha- und Beta-1-Aktivitätsanteile relativ konstant blieben, während die relative Theta-Aktivität sank. Dies führte zu einer Verschiebung des Theta/Alpha-Quotienten parietookzipital auf 1,4. Die dominante Frequenz stieg frontozentral auf 8,8 Hz, parietookzipital auf 9 Hz an. Die Kohärenzwerte stiegen im Theta-, Alpha- und Beta-1-Band als Ausdruck einer zunehmenden Synchronie an.

Weitere Studien, wie die hier vorgelegte, sollten in anderen Altersstufen, wie hier die 10jährigen, zur Differenzierung von Entwicklungsauffälligkeiten durchgeführt werden.

Auf der Basis des heutigen Kenntnisstandes ist anzunehmen, dass psychosoziale und neuro-motorische Faktoren sich gegenseitig beeinflussen. Gleichwohl ließen sich durch den Einsatz der automatischen EEG-Analyse EEG von Kindern mit guten von denen mit schlechten Test-ergebnissen im HAWIK-R unterscheiden. Das EEG war somit im Bereich der Diagnostik von morphologischen und funktionellen Störungen nicht krankheitsdefinierend einzusetzen, konnte aber gleichwohl als ein Faktor zur Diagnosefindung herangezogen werden (Harmony et al. 1990, Otero 1997).

Es blieb zu diskutieren, ob Untersuchungen auf der Ebene altersbezogener Spektralwerte und damit das Verlassen der klassischen Frequenzbandanalyse nicht klarere Antworten erbringen könnten. Darüber hinaus waren neue Erkenntnisse durch die Analyse der dominanten Frequenz und Korrelation zu erwarten.

Bei den 11 Subtests bestanden erhebliche Unterschiede. Die Auswertung der Subtests in Korrelation zur quantitativen EEG-Analyse zeigte bei zahlreichen Subtests eine positive Korrelation, bei den höheren Frequenzbandanteilen insbesondere im Alphabereich, eine negative Korrelation bei den niedrigen Frequenzbandanteilen insbesondere im Theta-Delta-Bereich. Die Korrelation ist allerdings nicht bei allen 11 Subtesten signifikant. Eine endgültige Interpretation der Ursache ist nicht sicher möglich. Es ist jedoch durchaus auch im Bereich der Möglichkeiten zu diskutieren, dass die Normierung der Subtests nicht ausreichend stabil für eine derartige Aussage ist. Andererseits wäre es auch möglich, dass die mit diesen Subtests gemessenen Leistungen der Intelligenz eine nur geringe oder keine Korrelation zu der neuro-physiologischen Leistung des zerebralen Netzwerkes haben.

In der visuellen Beurteilung war schon aufgefallen, dass weniger intelligente Kinder ein langsamere Grundaktivität haben oder vielmehr häufig die Alpha-Grundaktivität okzipital durch langsamere Theta-Aktivität unterlagert ist. Standardisierte Untersuchungsergebnisse aus der Literatur sind nicht bekannt.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigten, dass bei einem Optimum an Alpha-Aktivität sehr gute Testergebnisse vorlagen. Der Peak lag bei 10,0 – 10,5 Hz okzipital. Dieser Frequenz-Peak bei  $10 \pm 1$  Jahren korreliert mit einer guten Intelligenzleistung. Daraus resultierend haben weniger intelligente Kinder ein langsames EEG als intelligentere Kinder. Die maximale Differenz-Frequenz lag bei  $10 \pm 1$ -jährigen bei 10,0 Hz bzw. 10,5 Hz parieto-okzipital. Maltseva (1997) fand ebenfalls eine positive Korrelation zwischen den Alpha-Band Parametern und der Gedächtnisleistung. Dies bestätigten dann 1 Jahr später Vogt et al. (1998). Sie gaben sogar eine hohe Korrelation zwischen der Alpha-Aktivität zwischen 10-12 Hz und der Gedächtnisleistung an, dies wurde bei den nun vorliegenden Ergebnisse noch exakter für den Frequenzbereich von 10,0-10,5 Hz parieto-okzipital beschrieben. Jausovec et al. (2000) gaben den Alpha-Bereich von 10-13 Hz an, und fügten hinzu, dass höher intelligente Personen weniger Theta-Aktivität Synchronisation (4-7 Hz) und mehr Synchronisation im oberen Alpha-Bereich (10-13Hz) zeigten. Sie interpretierten dies mit der besseren neuronalen Verschaltung.

Verschiedenen Milieustudien (Harmony et al. 1990, Otero 1997) zeigten, dass mit einem gewissen Anteil auch das soziale Milieu und die Förderung Einfluss auf die intellektuelle Leistungsfähigkeit haben kann. Der genetische Faktor scheint hinsichtlich der intellektuellen Entwicklung bzw. Hirnreifung eine herausragende Rolle zu spielen.

Ahn et al. (1980) leiteten bei 1177 teils gesunden, teils neurologisch gestörten sowie teils lernbehinderten Kindern und Jugendlichen von 5-16 Jahren EEG ab und werteten diese mit Hilfe der Spektralanalyse aus. Anschließend berechneten sie die relative Aktivität. Sie fanden bei den neurologisch gestörten und lernbehinderten Kindern eine signifikante Vermehrung der Delta- und Theta-Aktivität und eine signifikante Reduktion der Alpha-Aktivität über den frontalen, temporalen, zentralen und insbesondere parieto-okzipitalen Hirnabschnitten. Sie schlossen aus den Ergebnissen, dass mit dem EEG eine ökonomische Methode zur Diagnostik von Kindern mit zerebralen Dysfunktionen oder zerebralen Störungen vorliegt. In dieser Studie mit einer grossen Probandenzahl wurde schon vor Beginn der Ära des digitalen EEG eine Erweiterung der diagnostischen Möglichkeiten durch das EEG gefolgert. Die nun vorliegenden Ergebnisse, wenn auch zunächst mit einer kleinen Probandenzahl, bestätigen die von Ahn angeführte Schlussfolgerung. Denn es fanden sich bei intelligenteren Probanden deutlich mehr Alpha-Aktivität und weniger Delta-Aktivität, ebenso so auch bei weniger intelligenten Probanden weniger Alpha-Aktivität, da besonders im Frequenz-Bereich 10,0-10,5 Hz, und mehr Delta-Aktivität.

Fasst man vorliegende Literaturstellen (u.a. Ahn et al. (1980), Esser et al. (1981), Kiroi et al. (1995), Scher (1997), Schmid et al. (1997)) zusammen, so zeigte sich weitgehend übereinstimmend, dass die EEG von Kindern mit Entwicklungsstörungen mehr langsame Frequenz-

bandanteile und weniger höhere Frequenzbandanteile zeigten. Bei Kindern im Säuglings- und Kleinkindalter äußerten sich diese Differenzen am ehesten im Theta-Bereich, mit beginnendem Schulalter im Alpha-Bereich, im höherem Schulalter im hohen Alpha-Bereich.

Die aus einem positiven genetischen Potential und Umfeld resultierende Intelligenzentwicklung korreliert mit einem höheren Reifegrad des EEG, mit einem höheren Anteil an Alpha-Aktivität und einem niedrigen Anteil an Delta-Theta-Aktivität gegenüber gleichaltrigen, nicht so gut entwickelten Probanden. Legt man die neurophysiologischen, neuroanatomischen und neuropathologischen Grundkenntnisse der Korrelation an EEG-Ausprägung und morphologischen Hirnaufbau zu Grunde, so lässt sich durch ein spektralanalisiertes EEG der Reifegrad der Hirnentwicklung definieren, im Rahmen der statistischen Varianz ließe dies auch Schlüsse auf neuroanatomische und neurophysiologische Grundlagen zu. Die EEG-Analyse ist somit nicht diagnostisch definierend einsetzbar, sondern Ausdruck eines zerebralen Funktionszustandes, dessen Ergebnis durch kulturelle und genetische Faktoren mitbeeinflusst wird.

#### **4.1 Ausblick**

Die Untersuchungen zeigten, dass eine hohe Korrelation der EEG-Analyseergebnisse mit den verschiedenen Testergebnissen im HAWIK-R-Intelligenztest bestand.

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse wären zunächst durch ein größere Untersuchungsgruppe von 10jährigen Kindern im Sinne einer Normstichprobe, dann aber auch mit anderen Altersgruppen zu bestätigen.

Die vorgestellte automatische EEG-Analyse lieferte zusätzliche Informationen hinsichtlich der intellektuellen Leistungsfähigkeit von Probanden. Sie könnte in die Diagnostik der Probanden mit einbezogen werden, die Defizite in der deutschen Sprache aufgrund von rezeptiven oder expressiven Sprachstörungen oder durch eine andere Muttersprache bedingt haben. Probanden, die durch eine mangelnde Compliance weniger gute Testergebnisse zeigen und/oder auch jene Kinder, die durch andere Krankheiten wie u.a. Teilleistungsstörungen, Aufmerksamkeitsstörungen, mit oder ohne hyperaktive Komponente, relativ schlechte Ergebnisse in Intelligenztesten zeigen, könnten durch die Anwendung einer computergestützte EEG-Analyse in der Beurteilung ihrer Basisintelligenz profitieren. Die Spektralanalyse könnte bei der Einschätzung der wahren Leistungsfähigkeit des Kindes unterstützend herangezogen werden kann.

Obwohl zahlreiche andere Faktoren wie Genetik und psychosoziale Faktoren auf das Ergebnis Einfluss nehmen, erscheint der Einsatz der computergestützten EEG-Analyse unter dem Aspekt der Messung neurophysiologischer Reife sinnvoll, und durch die umfassenden thera-

peutischen Konsequenzen auch angemessen. Durch die Verfügbarkeit der Hardware und Software in vielen peripheren Krankenhäusern, ja sogar in der Praxis, ist seit 1999 der breite Einsatz technisch möglich. Denn digitale Ableitplätze sind heute in Krankenhäusern und auch zum Teil in der Praxis vorhanden, die Software zur Erstellung einer Spektralanalyse ist kommerziell erhältlich. Wenn durch entsprechende Fallzahlen die Ergebnisse dieser Studie bestätigt werden können, ist die breite Einführung der Methode als Zusatzbeurteilung für die Intelligenz eines Kindes denkbar.

Das Ergebnis einer quantitativen EEG-Analyse ist von statistischem Wert, es kann jedoch zu diesem Zeitpunkt nicht im Einzelfall zur Definition eines Intelligenzquotienten herangezogen werden, sondern die hier vorgestellte Methode bedarf der Sicherung der Vorgehensweise durch grosse und breit gefächerte Normkollektiv-Untersuchungen auch in verschiedenen Altersgruppen.

## 5 Zusammenfassung

Um zu untersuchen, ob ein Zusammenhang zwischen EEG-Merkmalen und Leistung im Intelligenztest besteht, wurde retrospektiv bei 69 Kindern im Alter  $10 \pm 1$  Jahr, die in den Jahren 1996 und 1997 am Sozialpädiatrischen-Zentrum Inn-Salzach in Altötting untersucht wurden, die Intelligenztestung mit dem HAWIK-R mit dem EEG verglichen. Die Hirnaktivität wurde mittels der Spektralanalyse analysiert. Die Ergebnisse wurden mit den Ergebnissen der 11 Subtests und der drei berechneten Intelligenzquotienten des HAWIK-R korreliert.

Zunächst erfolgte ein Vergleich der Ergebnisse der 11 Subtests jeweils mit den Spektralwerten in 0,5 Hz Abständen sowie mit den klassischen EEG-Bändern. In weiteren Schritten wurde eine spektral- und bandbezogene Korrelations- und Varianzanalyse durchgeführt.

Die Spektralanalyse zeigte die ausgeprägtesten Zusammenhänge bei 10,0-10,5 Hz. Die Bandanalyse ergab signifikante Ergebnisse im Alpha-Bereich okzipital. Die besten Korrelationen zwischen Testergebnis und Alpha-Aktivität wurden bei sprachlich gebundenen kognitiven Fähigkeiten (HAWIK-R Verbal-IQ (H12)) nachgewiesen, aber auch bei den Untertesten Allgemeines Wissen (H1), Wortschatz-Test (H5), Bilderordnen (H9) und Figurenlegen (H11).

Bei der okzipitalen Alpha-Aktivität waren die Unterschiede zwischen Kindern mit hohem und niedrigem IQ signifikant auf dem Niveau  $< 5\%$ . Das Vorhanden-Sein von Norm-Varianten, wie etwa das Delta de la jeunesse können potentiellen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Durch die Einbeziehung solcher Normvarianten wäre wahrscheinlich bei der relativen kleinen Patientenzahl von 69 Probanden ein weniger klares Ergebnis zu erwarten.

Bei der Bewertung war festzustellen, dass das Ergebnis der Spektralanalyse keine spezifische Krankheitsdiagnostik darstellt, sondern eine Aussage über den Grad der neurophysiologischen Reife des Gehirns. Ein höherer Anteil schnellerer Frequenzbandanteile, in der Regel vorwiegend aus dem Alphaband, entspricht einer höheren neuronalen Verschaltung und damit einer höheren Synapsenzahl. Dies korreliert unter Umständen mit einem höheren Intelligenzquotienten, ist aber wie die Literatur zeigt, auch korrelierend mit genetischen und psychosozialen Faktoren. Die Ableitung und Auswertung eines quantitativen EEG kann eine gründliche differenzierende neurophysiologische und neuropsychologische Untersuchung/-Testung des Kindes nicht ersetzen. Das Ergebnis einer quantitativen EEG-Analyse ist von statistischem Wert, aber nicht im Einzelfall zur Definition eines Intelligenzquotienten geeignet. Auf dem heutigen Erkenntnisstand kann angenommen werden, dass das Ausmaß der quantitativen EEG-Entwicklung in hohem Maße Ausdruck der morphologischen und neurophysiologischen Hirnreifung ist und damit als zusätzliches Diagnostikum bei der Bewertung der häufig sehr komplexen Krankheitsbilder in Neuropädiatrie, Sozialpädiatrie bzw. Kinder- und Jugendpsychiatrie, insbesondere bei Vorliegen von Kommunikationsstörungen, sinnvoll ist.



## 6 Literatur

1. Ahn et al. (1980)  
Ahn, H.; Prichep, L.; John, E.R.; Baird, A.; Treptin, M.; Kaye, H.;  
Developmental equations reflect brain dysfunctions  
Science 1980, 210: 1259-1262
2. Berger (1929)  
Berger, H.;  
Über das Elektrenkephalogramm des Menschen I  
Arch Psychiatr 1929, 94: 160-179
3. Byring et al.(1991)  
Byring, R.F.; Salmi, T.K.; Sainio, K.O.; Örn, H.P.;  
EEG in children with spelling disabilities  
Electroencephalogr Clin Neurophysiol 1991, 79: 247-255
4. Chabot et al. (1996)  
Chabot, R.J.; Serfontein G.;  
Quantitative electroencephalographic profiles of children with attention deficit disorder  
Biol Psychiatry 1996, 40 (10): 951-963
5. Cooley et al. (1965)  
Cooley, J.W.; Tukey, J.W.;  
An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series  
in: Math Comput 1965, 19: 297-301
6. Dafters et al. (1999)  
Dafters, R. I.; Duffy F.; O'Donnel P.J.; Bouquet C.;  
Level of use of 3,4-methylenedioxymethamphetamine (MDMA or Ecstasy) in humans  
correlates with EEG power and coherence  
Psychoharmacology (Berl) 1999, 145 (1): 82-90
7. Dumermuth et al. (1975)  
Dumermuth, G.; Gasser, T.; Lange, B.;  
Aspects of EEG analysis in the frequency domain  
in: Dolce G, Künkel H(eds) CEAN-Computerized EEG analysis  
Fischer, Stuttgart 1975, pp 429-457
8. Esser et al. (1981)  
Esser, G.; Schmidt, M.H.; Allehoff, W.; Geisel, B.;  
Zerebrale Funktionsstörungen bei Achtjährigen: Mehrebenenfalldefinition in einer  
epidemiologischen Untersuchung.  
Z Kinder Jugendpsychiatr 1981, 9: 399-441

9. Gibbs et al. (1949)  
Gibbs, F.A.; Knott, J.R.;  
Growth of the electrical activity of the cortex  
Electroencephalogr Clin Neurophysiol 1949, 1: 223-229
10. Grunwald et al. (1999)  
Grunwald, M.; Weiss, T.; Krause, W.; Beyer, L.; Rost, R.; Gutberlet, I.; Gertz, H.J.;  
Power of the theta waves in the EEG of human subjects increases during recall of haptic  
information  
Neurosci Lett 1999, 260(3): 189-192
11. Harmony et al. (1990)  
Harmony, T.; Marosi, E.; Diaz de León, A.E.; Becker, J.; Fernández, T.;  
Effect of sex, psychosocial disadvantages and biological risk factors on EEG maturation  
Electroencephalogr Clin Neurophysiol 1990, 75: 482-491
12. Jausovec et al. (2000)  
Jausovec N.; Jausovec K.;  
Differences in event-related and induced brain oscillations in the Theta and Alpha  
frequency bands related to human intelligence  
Neurosci Lett 2000, 293 (3): 191-194
13. John et al. (1980 a)  
John, E.R.; Ahn, H.; Prichep, L.; Trepetin, M.; Brown, D.; Kaye, H.;  
Developmental equations for the electroencephalogram  
Science 1980, 210: 1255-1258
14. John et al. (1980 b)  
John, E.R.; Ahn, H.; Prichep, L.; Trepetin, M.; Brown, D.; Kaye, H.;  
Developmental equations reflect brain dysfunctions  
Science 1980, 210: 1259-1262
15. Kiroi et al. (1995)  
Kiroi, V.N.; Voinov, V.B.; Vasil'eva, V.V.;  
The electroencephalographic correlates of the intellectual abilities of adolescents  
Zh Vyssh Nerv Deiat Im I P Pavlova 1995, 45 (4): 669-675
16. Künkel (1972 a)  
Künkel, H.;  
Die Spektraldarstellung des EEG  
Z. EEG-EMG 1972, 3: 15-24
17. Künkel (1972 b)  
Künkel, H.;  
Simultane Vielkanal-on-line-EEG-Analyse  
Z. EEG-EMG 1972, 3: 38-38

18. Lechle et al. (1980)  
Lechle, M.; Michels, P.; Tirsch, W.S.; Pöpl, S.J.;  
Ansätze zur maschinellen Erkennung der altersgemäßen Entwicklung des kindlichen EEG  
im Rahmen einer 5-Jahres-Längsschnittstudie  
Neuropediatrics 1980, 11: 302-322
19. Maltseva et al. (1997)  
Maltseva, I.V.; Masloboev, Y.P.;  
Alpharhythm parameters and short-term memory span.  
Int J Psychophysiol 1997, 26 (1-3): 369-380  
(published erratum appears in Int J Psychophysiol 1997, 27 (2): 169)
20. Mann et al. (1978)  
Mann, H.; Pöpl, S.J.; Michels, P.; Lechle, M.; Tirsch, W.S.; Lange, H.J.;  
Münchener Pädiatrische Längsschnittstudie: Früherkennung entwicklungsgefährdender  
Störungen mittels Vorsorgeuntersuchungen. Beschreibung und erste Ergebnisse des  
Teilvorhabens EEG-Untersuchungen BPT-Bericht 9. Gesellschaft für Strahlen- und  
Umweltforschung Bereich Projektträgerschaften, München 1978
21. Marosi et al. (1997)  
Marosi, E.; Harmony, T.; Reyes, A.; Bernal, J.; Fernandez, T.; Guerrero, V.; Rodriguez, M.;  
Silva, J.; Yanez, G.; Rodriguez, H.;  
A follow-up study of EEG coherences in children with different pedagogical evaluations  
Int J Psychophysiol 1997, 3: 227-235
22. Marosi et al. (1999)  
Marosi E.; Rodriguez H.; Harmony T.; Yanez G.; Rodriguez M.; Bernal J.; Fernandez T.;  
Silva J.; Reyes A.; Guerrero V.,  
Broad Band spectral EEG parameters correlated with different IQ measurements  
Int J Neurosci 1999, 97 (1-2): 17-27
23. Matousek und Petersen (1973)  
Matousek, M.; Petersen, I.;  
Frequency analysis of the EEG in normal children and in normal adolescents. in:  
Kellaway, P.; Petersen, I. (eds);  
Automation of clinical electroencephalography  
Raven, New York, 1973, 75-102
24. Matsuura et al. (1994)  
Matsuura, M.; Yoshino, M.; Ohta, K.; Onda, H.; Nakajima, K.; Kojima, T.;  
Clinical significance of diffuse delta EEG activity in chronic schizophrenia  
Clin Electroencephalogr 1994, 25 (3): 115-121

25. Ohtahara (1981)  
Ohtahara, S.;  
Neurophysiological development during infancy and childhood  
in: Yamaguchi, N.; Fujisawa, K.; (eds);  
Recent advances in EEG and EMG data processing  
Elsevier/North Holland Biomedical 1981, 369-375
26. Otero (1997)  
Otero, G.A.;  
Poverty, cultural disadvantage and brain development: a study of pre-school children in Mexico  
Electroencephalogr Clin Neurophysiol 1997, 102 (6): 512-516
27. Penuel et al. (1955)  
Penuel, H.; Corbin, F.; Blickford, R.C.;  
Studies of the electroencephalogram of normal children: Comparison of visual and automatic frequency analyses  
Electroencephalogr Clin Neurophysiol 1955, 7: 15-28
28. Petersen und Eeg-Olofsson (1971)  
Petersen, I.; Eeg-Olofsson, O.;  
The development of the electroencephalogram in normal children from the age of 1 through 15 years Non-paroxysmal activity  
Neuropädiatrie 1971, 2: 247-304
29. Ristanovic et al. (2000)  
Ristanovic, D.; Marinovic, Z.; Jovanovic-Cupic;  
Quantitative analysis of the electroencephalogram in healthy school-age children  
Srpski Arhiv Celok Lek 2000, 128 (1-2): 1-9
30. Sadowsky et al. (1983)  
Sadowsky, K.; Weinmann, H.M.; Tirsch, W.S.; Pöppel, S.J.; Schmid, R.G.;  
Die Entwicklung des kindlichen Elektroenzephalogramms - Vergleich visueller und maschineller Auswertung  
Z. EEG-EMG 1983, 3: 115-168
31. Scher (1997)  
Scher, M.S.;  
Neurophysiological assessment of brain function and maturation  
II. A measure of brain dysmaturity in healthy preterm neonates  
Pediatric Neurology 1997, 16; 4: 287-295
32. Schirm et al. (1986)  
Schirm, H.; Sadowsky, K.; Faus-Keßler, Th.;  
Münchener Pädiatrische Längsschnittstudie  
Früherkennung neuromotorischer Entwicklungsstörungen im Vorschulalter Fischer,  
Stuttgart New York 1986

33. Schmid et al. (1983 a)  
Schmid, R.G.; Weinmann, H.M.; Tirsch, W.S.; Pöpl, S.J.; Sadowsky, K.;  
EEG-Spektralanalysen bei gesunden Kindern und Kindern mit Verhaltensstörungen,  
minimaler cerebraler Dysfunktion und Down-Syndrom  
Monatsschr Kinderheilkd 1983, 131: 684
34. Schmid et al. (1983 b)  
Schmid R.G.; Sadowsky K.; Weinmann H.M.; et al.;  
Vergleichende Betrachtung von EEG mit entwicklungsdiagnostischen Tests und  
Intelligenztests bei gesunden Kindern und Kindern mit Down-Syndrom  
Poster  
Third European Conference of EEG and Clinical Neurophysiology  
Basel 1983 (unveröff.)
35. Schmid (1984)  
Schmid, R.G.;  
Zur Differenzierung zerebraler Störungen mittels automatischer EEG-Analyse am Beispiel  
des Down-Syndroms  
Habilitationsschrift, Universität München 1984
36. Schmid et al. (1985)  
Schmid, R.G.; Sadowsky, K.; Weinmann, H.M.; Tirsch, W.S.; Pöpl, S.J.;  
Z-transformed EEG power spectra of children with Down Syndrome vs a control group  
Neuropediatrics 1985, 16: 218-224
37. Schmid et al. (1986)  
Schmid, R.G.; Weinmann, H.M.; Tirsch, W.S.; Sadowsky, K.; Pöpl, S.J. ;  
Untersuchung der EEG-Entwicklung bei Gesunden und beim Down-Syndrom mit Hilfe  
der Spektralanalyse  
Z. EEG-EMG 1986, 17: 99
38. Schmid (1995)  
Schmid, R.G.; Tirsch, W.S.;  
in: Klinische Elektroenzephalographie des Kindes- und Jugendalters;  
Ein Atlas der EEG-Aktivität: Altersbezogene Normkurven und Pathologie Springer, Berlin  
Heidelberg New York 1995,
39. Schmid et al. (1997)  
Schmid, R.G.; Tirsch, W.S.; Reitmeir, P.;  
Correlation of developmental neurological findings with spectral analytical EEG  
evaluation in pre-school age children  
Electroencephalogr Clin Neurophysiol 1997, 103 (5): 516-527
40. Solders et al. (1998)  
Solders G.; Celsing G.; Hagenfeldt L.; Ljungman P.; Isberg B.; Ringden O.;  
Improved peripheral nerve conduction, EEG and verbal IQ after bone marrow  
transplantation for adult metachromatic leukodystrophy  
Bone Marrow Transplant 1998, 22 (11): 1119-1121

41. Somsen et al. (1997)  
Somsen, R.J.; van't Klooster, B.J.; van der Molen, M.W.; van Leeuwen, H.M.; Licht, R.;  
Growth spurts in brain maturation during middle childhood as indexed by EEG power  
spectra  
Biol Psychol 1997, 44 (3): 187-209
42. Tewes (1984)  
Tewes, U.;  
Hamburg-Wechsler-Intelligenztest für Kinder (HAWIK-R) - Revision 1983  
in: HAWIK-R, Handbuch und Testanweisung 2. korrigierte Auflage  
Huber, Bern Stuttgart Wien 1984
43. Vogt et al. (1998)  
Vogt, F.; Klimesch, W.; Doppelmayr, M.;  
High-frequency components in the alfaband and memory performance  
J Clin Neurophysiol 1998, 2: 167-172
44. Wada et al. (1996)  
Wada, M.; Ogawa, T.; Sonoda, H.; Sato, K.;  
Development of relative power contribution ratio of the EEG in normal children: a  
multivariate autoregressive modeling approach.  
Electroencephalogr Clin Neurophysiol 1996, 98 (1): 69-75
45. Welch (1967)  
Welch, P.D.;  
The use of fast Fourier transform for the estimation of powerspectra. A method based on  
time averaging over short modified periodograms  
IEEE-Transactions 1967, AU-15, No 2: 70-73
46. Zschocke, S. (1995) Zschocke, S.;  
Klinische Elektroenzephalographie  
Springer (1995), Kp. 4.5.2., p. 147-149

## 7 Lebenslauf

Ursula Frohne  
Am alten Bahnhof 1a  
46244 Bottrop

### **Persönliches:**

Geburtsdatum: 08.04.1964  
Geburtsort: Menden  
Eltern: Werner Frohne, Schuhmachermeister  
Elisabeth Frohne, Schneiderin

### **Schulbildung:**

1970 – 1974 Josef-Schule, Menden  
1974 – 1983 Walburgis-Gymnasium, Menden

### **Studium:**

1983 – 1984 Studium der Biologie, Universität zu Köln  
1984 – 1990 Studium der Medizin, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf  
1989 – 1990 Praktisches Jahr: Städtische Krankenanstalten, Krefeld

### **Berufsausübung:**

1990 – 1991 Ärztin im Praktikum, Marienhospital Bottrop, Kinderklinik  
1991 – 1996 Assistenzärztin, Marienhospital Bottrop, Kinderklinik,  
Allgemeine Pädiatrie und neonatologische Intensivstation  
1996 – 1997 Sozialpädiatrisches Zentrum Inn-Salzach, Altötting,  
Entwicklungsdiagnostik  
1997- 2001 Oberärztin, Marienhospital Bottrop, Kinderklinik  
seit 2002 Leitung des Sozialpädiatrischen Zentrums der Stadt Essen

### **Abschlüsse:**

10.06.1983 Allgemeine Hochschulreife  
03.05.1990 Staatsexamen (3. Abschnitt)  
25.11.1995 Facharztprüfung „Kinderheilkunde“  
22.04.2002 Anerkennung Zusatzbezeichnung „Psychotherapie“

## 8 Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Herrn Prof. Dr. R. Schmid möchte ich Dank sagen für die Überlassung des Themas, die Bereitstellung des Arbeitsplatzes und die ausdauernde, umfassende, wissenschaftliche Betreuung.

Herrn Dipl.- Ing. W. Tirsch gebührt besonderer Dank, für die gründliche und aufwendige Aufbereitung des statistischen Datenmaterials.

Ein ganz besonders herzliches Dankeschön geht an Dr. med. Joachim Opp, der mir mit Rat und Tat zur Seite stand.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen langjährigen Freunden Dr. med. Doerthe Nicolas, Stefan Nicolas, Dr. med. Britta Schramm-Gross, Peter Gross, Dr. rer. nat. Marion Lammertz, Dr. med. Corinna Weißhaar, Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Bernd Weißhaar, Sabine und Martin Weber danken, die mich während der ganzen Zeit moralisch unterstützt haben.