

Aus der Klinik für Neurologie
der Universität zu Lübeck
Direktor: Prof. Dr. med D. Kömpf

Vorboten der Einsichtgewinnung in ereignisbezogenen Hirnpotentialen

Inauguraldissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der Universität zu Lübeck
- Aus der medizinischen Fakultät -

vorgelegt von
Nadine Kanngieser
aus Hannover

Lübeck 2008

1. Berichtstatter/Berichtstatterin: Prof. Dr. rer. soc. Rolf Verleger

2. Berichtstatter/Berichtstatterin: Priv.-Doz. Dr. med. Jan Gliemroth

Tag der mündlichen Prüfung: 18.12.2008

Zum Druck genehmigt. Lübeck, den 18.12.2008

Kurzfassung

In dieser Arbeit geht es um die Frage, wie man neue Einsichten in Regelmäßigkeiten und Zusammenhänge gewinnt. Zur Klärung wurde als Aufgabe eine Variante der Number Reduction Task mit einer versteckten Regelmäßigkeit verwendet, über deren Existenz die Versuchspersonen nicht informiert wurden. Je nachdem ob sie die Gesetzmäßigkeit entdeckten und bewusst durch eine Abkürzung der Aufgabe anwandten (Löser) oder unbewusst die Gesetzmäßigkeit verwendeten (Nicht-Löser), wurden die Versuchspersonen in zwei verschiedene Gruppen eingeteilt. Anhand der Aufgabe ließen sich der allgemeine Lerneffekt, das implizite Lernen und bei einem Teil der Versuchspersonen, den Lösern, auch das explizite Lernen untersuchen. Es wurde nach den Unterschieden zwischen den Versuchspersonengruppen sowohl im Verhalten als auch im EEG gesucht.

Die Gruppe der Löser unterschied sich sowohl in den Reaktionszeiten als auch in den ermittelten ERP-Komponenten von der Gruppe der Nicht-Löser. Von den Gruppenunterschieden bei den einzelnen ERP-Komponenten fielen dabei sowohl eine höhere Amplitude der anterioren N1 für die zweite und fünfte Stimuluspräsentation als auch eine höhere Amplitude der P3a für alle Stimuluspräsentationen zu Beginn des Versuchsverlauf auf. Diese können als Vorboten für den Erwerb von explizitem Wissen angesehen werden können. Die bei der Analyse aller Blöcke nachgewiesene größere Amplitude der SPW bei den Lösern muss dagegen erst in weiteren Studien untersucht werden

Die Analyse der Reaktionszeiten lieferte keine Vorboten für die Entstehung von explizitem Wissen. Es zeigte sich jedoch ein Ausbleiben des allgemeinen Lernerfolgs bei den Lösern, was auf eine Interaktion des expliziten Lernens mit dem Entstehen des allgemeinen Lernerfolgs hindeutet. Diese Interaktion fehlt beim impliziten Lernen.

Über die Mechanismen, die zu explizitem Wissen führen, lässt sich aufgrund der bereits im ersten Block auftretenden Unterschiede bei den ERP-Komponenten annehmen, dass der Erwerb des Wissens über zwei verschiedene Systeme abläuft, eines zum Erwerb von implizitem Wissen, ein zweites für die Entstehung von explizitem Wissen. Diese Theorie wird durch die Reaktionszeitanalyse unterstützt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Lerntheorien.....	1
1.1.1	Einführung	1
1.1.2	Der unspezifische Lernerfolg	3
1.1.3	Das implizite Lernen	4
1.1.4	Das explizite Lernen	5
1.1.5	Verfahren zur Unterscheidung von expliziten und impliziten Lernern	6
1.1.6	Theorien zur Entstehung von explizitem Wissen	8
1.1.6.1	Die Transformationshypothese	9
1.1.6.2	Die Zwei-Systeme-Hypothese	11
1.1.6.3	Die Interaktions- bzw. „unexpected event“- Hypothese	13
1.2	Ereigniskorrelierte Potentiale in der Lernforschung.....	15
1.2.1	Grundlagen	15
1.2.2	Einzelne ERP-Komponenten und ihre Interpretation	16
1.2.2.1	Die frühe Verarbeitung visueller Stimuli.....	16
1.2.2.2	Die umstrittene P3	17
1.2.2.3	Gedächtnisprozesse- die SPW („slow positive wave“).....	21
1.2.3	ERP-Studien zum impliziten und expliziten Lernen.....	22
1.3	Fragestellung	25
2	Methoden	28
2.1	Stichprobe.....	28
2.2	Versuchsbeschreibung.....	28
2.2.1	Die Aufgabe	28
2.2.2	Versuchsablauf	30
2.2.2.1	Instruktionen	31
2.2.2.2	Der Versuch.....	31
2.3	Die EEG-Aufnahme.....	34
2.4	Datenanalyse	37
2.4.1	Reaktionszeiten	37
2.4.2	ERPs.....	38

3	Ergebnisse	40
3.1	Postexperimentelle Befragung	40
3.2	Reaktionszeiten	40
3.3	EEG	43
3.3.1	Lange Epochen.....	43
3.3.2	Kurze Epochen	47
3.3.2.1	Stimulus-bezogene ERPs	47
3.3.2.2	Reaktionsbezogene ERPs	50
4	Diskussion	52
4.1	Diskussion der Reaktionszeitergebnisse.....	52
4.2	Diskussion der ERP-Ergebnisse	56
5	Zusammenfassung.....	65
6	Literaturverzeichnis	67
7	Danksagung	76
8	Lebenslauf.....	77

1 Einleitung

1.1 Lerntheorien

1.1.1 Einführung

Um 1666 soll es gewesen sein, als Sir Isaak Newton sich in den Garten seines Elternhauses unter einen Apfelbaum zurückzog und dort einschlief. Plötzlich fiel ihm aus heiterem Himmel ein Apfel auf den Kopf. Dieser Apfel brachte ihn auf die Idee, dass das Gravitationsgesetz universell sei und dass dieselbe Kraft, die den Apfel zu Boden fallen lässt, auch den Mond in der Umlaufbahn der Erde hält¹. Dieser Zusammenhang ist heute als Gegenwirkungsprinzip bzw. als drittes Newtonsches Axiom bekannt. Das bewusste und verbalisierbare Erkennen eines Zusammenhangs, wie es bei Newton geschehen ist, wird als explizites Lernen bezeichnet (Willingham et al., 2002). Wenn dieses Wissen plötzlich erkannt wird, wird das als Einsicht bezeichnet (Köhler, 1917). Die Frage, wie dieses Wissen erworben wird, ist jedoch bis heute ungeklärt.

Ein grundlegendes Problem bei der Erforschung des expliziten Lernvorgangs ist die zeitliche Einordnung, wann ein Mensch bestimmte Zusammenhänge lernt. Hierfür entwickelten Woltz et al. (1996) die Number Reduction Task, kurz NRT genannt, die von Frensch et al. (2003) modifiziert wurde. Ihr Ansatz besteht darin, zunächst den Endpunkt des Lernens zeitlich festzulegen, d. h. den Zeitpunkt zu definieren, an dem explizites Wissen vorhanden ist. Mit Hilfe der bis zu diesem Zeitpunkt gesammelten Informationen lassen sich dann Rückschlüsse über den Lernverlauf ziehen.

Das Prinzip der NRT besteht darin, dass die Versuchsperson nach und nach eine Zahlenkette aufbaut, indem sie jeweils zwei aufeinander folgende Zahlen nach bestimmten einfachen Regeln miteinander kombiniert. Nach mehreren Kombinationen erhält sie das Endergebnis der Zahlenkette. Die Besonderheit im Aufbau jeder Aufgabe beruht darauf, dass die richtigen Eingaben (Responses) der Versuchspersonen einer Regel folgen (siehe Abbildung 1.1), durch die die letzten Eingaben vorhersagbar werden. Weder über die Regel selbst noch über deren

¹ So berichtete es jedenfalls Henry Pemberton 1728 in seiner Newton-Biografie "A View of Sir Isaac Newton's Philosophy".

mögliche Existenz wird die Versuchsperson informiert. Mit ihrer Hilfe kann die Versuchsperson die Aufgabe jedoch wesentlich schneller bearbeiten, da das Endergebnis der Aufgabe einer früheren, in dieser Arbeit der zweiten Eingabe entspricht. Erkennt die Versuchsperson die Regel und kürzt dementsprechend die Aufgabe ab, wird dies vom Computerprogramm, das den Versuch steuert, registriert. Auf diese Weise kann der Zeitpunkt des Vorhandenseins von explizitem Wissen bestimmt und rückwirkend auch der Lernverlauf zeitlich eingeordnet werden.

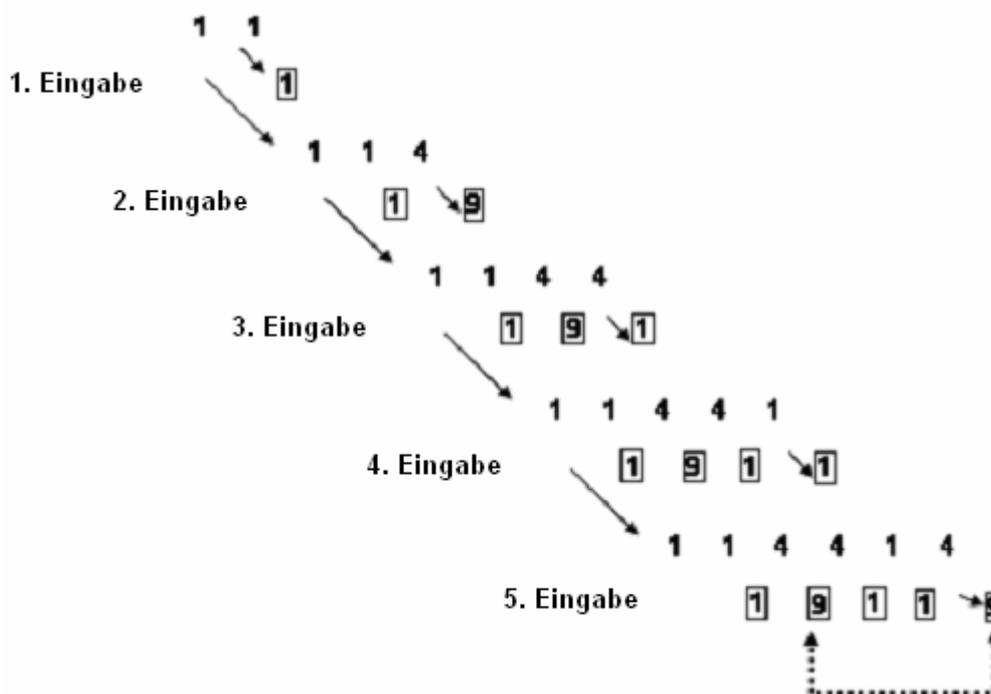


Abbildung 1.1 Darstellung der Lösung einer Aufgabe durch die Kombination der Zahlen. Hierbei zeigen sich die enthaltenen Regeln in der Abfolge der Eingaben (indirekte Wiederholung: Eingabe 2 und 5, direkte Wiederholung: Eingabe 3 und 4).

In der NRT können neben dem expliziten Lernen noch zwei weitere Lernformen beobachtet werden: der unspezifische Lernerfolg und das implizite Lernen. Der unspezifische Lernerfolg beschreibt die Verkürzung der Reaktionszeiten auf alle Reize, dadurch dass die Versuchspersonen allgemein lernen, mit der Aufgabe besser umzugehen. Explizites und implizites Lernen befassen sich dagegen mit dem Erkennen von komplexeren Regeln und Strukturen z. B. Abhängigkeiten von Reizen und Eingaben untereinander. Der wesentliche Unterschied zwischen

beiden ist, dass explizit gelernte Zusammenhänge der Versuchsperson bewusst sind und verbalisiert werden können. Implizit Erlerntes ist der Versuchsperson dagegen nicht bewusst, wird aber dennoch von ihr angewendet. Alle drei Lernformen werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

1.1.2 Der unspezifische Lernerfolg

Beim Berechnen einer Aufgabe verbessern sich die Leistungen der Versuchsperson kontinuierlich durch Übung. So werden auch die Versuchspersonen beim Bearbeiten der Zahlenkette der NRT beim Kombinieren der zwei aufeinander folgenden Zahlen kontinuierlich besser. Diese Verbesserung bezeichnet man als unspezifischen Lernerfolg. Er zeigt sich in einer gleichmäßigen Abnahme der Reaktionszeiten für alle Eingaben.

Zur Erklärung dieses Phänomens wurde von Logan das „Instance Model of Automaticity“ entwickelt (Logan 1988, 1992). Bei diesem Model geht Logan von der Annahme aus, dass die Auswahl und Durchführung einer Reaktion auf einen Reiz (hier: der Tastendruck auf jede einzelne Zahl) zunächst kontrolliert und mit Aufwand („algorithmusbasiert“) bestimmt werden muss. Zusätzlich wird die Reiz-Reaktionskette bei der Ausführung als eine Gedächtnisspur gespeichert. Bei jeder Wiederholung des Reizes findet ein Wettstreit zwischen dem algorithmusbasierten und dem gedächtnisbasierten Lösungsweg statt. Der schnellere Lösungsweg bestimmt schließlich die Antwort. Anfangs überwiegt der algorithmusbasierte Lösungsweg. Dieser wird mit zunehmender Übung vom gedächtnisbasierten Lösungsweg durch Zunahme von Gedächtnisspuren zurückgedrängt.

Eine weitere Theorie zur Erklärung des unspezifischen Lernerfolgs stammt von Anderson (1982). Dieser erklärt die Abnahme der Reaktionszeiten durch eine optimale Anpassung vorhandener Bearbeitungsstrategien an die spezifischen Merkmale der zu bearbeitenden Aufgabe.

In der NRT können diese beiden Theorien eine generelle Abnahme der Reaktionszeit für die einzelnen Eingaben erklären. Eine Begründung für eine stärkere Abnahme der Reaktionszeiten von durch die versteckte Regel vorhersagbaren Eingaben können die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Lernformen geben.

1.1.3 Das implizite Lernen

Bei der NRT kann eine zweite Lernform auftreten, das implizite Lernen. Sie führt zu einer Reaktionszeitabnahme der vorhersagbaren Eingaben einer Aufgabe, ohne dass der Grund für diese Reaktionszeitabnahme der Versuchsperson bewusst ist. Eine der ersten Definitionen des impliziten Lernens wurde bereits 1967 von Reber aufgestellt. Nach ihm handelt es sich beim impliziten Lernen um unbewusstes Lernen von Regelmäßigkeiten, das ohne das Ziel zu lernen auftritt (Reber, 1967).

Das typische Paradigma zur Untersuchung des impliziten Lernens ist die Serial Reaction Time Task (SRTT), die erstmalig von Nissen und Bullemer 1987 eingeführt wurde. Hierbei werden den Versuchspersonen auf einem Bildschirm visuelle Stimuli (typischerweise ein Sternchen oder der Buchstabe „X“) an einer von vier möglichen Positionen präsentiert. Die Stimuli treten dabei in einer festgelegten Reihenfolge auf (z. B. in der so genannten Nissen und Bullemer Sequenz 4-2-3-1-3-2-4-3-2-1, wobei die Zahlen einer der vier verschiedenen Bildschirmpositionen entsprechen). Nach Abschluss der festgelegten Sequenz beginnt diese wieder von vorne. Als Reaktion auf den Stimulus drücken die Versuchspersonen je nach Stimulusort eine der vier Antworttasten. Die Information, dass die Stimulusorte einer festgelegten Sequenz folgen, wird ihnen vorenthalten. Dennoch lernen sie durch die Wiederholungen die festgelegte Reihenfolge.

Dieses lässt sich überprüfen, indem zu einem bestimmten Zeitpunkt im Experiment in die festgelegte Reihenfolge eine Sequenz von zufällig ausgewählten Stimulusorten eingefügt wird. Die Reaktionszeiten während dieser Zufallssequenz werden mit den Reaktionszeiten während der vorhersagbaren Sequenzen verglichen, und die Reaktionszeitdifferenz wird ermittelt. Man spricht von implizitem Lernen, wenn erstens eine signifikante Reaktionszeitdifferenz festgestellt wird und zweitens die Versuchsperson sich dieser Differenz und des Gelernten nicht bewusst ist (z. B. Nissen und Bullemer, 1987; Reber, 1989; Schacter, 1987; Cleeremans und McClelland, 1991).

Auch die versteckte Regel bei der Number Reduction Task kann von den Versuchspersonen implizit erlernt werden, wie bereits weitere Arbeiten mit Variationen der NRT gezeigt haben (Rose, Haider, Weiller und Büchel, 2002;

Wagner et al. 2004). So findet sich hier eine Abnahme der Reaktionszeiten für die letzten Ziffern, die durch die versteckte Regel vorhersagbar sind, ohne dass die Versuchspersonen die Regel postexperimentell verbalisieren können.

Als weiterer Hinweis für die Existenz von implizitem Lernen wird angeführt, dass Patienten mit Korsakoff-Syndrom (Nissen und Bullemer, 1987) oder gesunde Versuchspersonen, denen Scopolamin injiziert wurde, (Nissen, Knopman und Schacter, 1987) eine Verbesserung der Reaktionszeiten für die durch Regeln vorhersagbaren Eingaben zeigen, ohne dass sie bewusst das Erlernte wahrnehmen.

Einige Autoren stellen jedoch in Frage, ob auch gesunde Versuchspersonen die Regeln implizit, d. h. ohne sich des Gelernten bewusst zu sein, lernen. Ihr Hauptkritikpunkt liegt in den im Anschluss an die SRTT- und NRT-Experimente durchgeführten Tests zur Überprüfung, wie viel der in der Aufgabe enthaltenen Struktur den Versuchspersonen bewusst ist. Hierauf wird in Kapitel 1.1.5 näher eingegangen.

1.1.4 Das explizite Lernen

Explizites Lernen kann auf zwei verschiedene Arten verstanden werden. Gemeinsam ist beiden Definitionen, dass sie explizites Lernen als Erwerb von verbalisierbarem Wissen verstehen.

Die erste Definition setzt die bewusste Suche nach Regelmäßigkeiten voraus. Sie basiert auf einer häufig verwendeten Versuchsdurchführung, in der Vergleiche zwischen zwei Versuchspersonengruppen stattfinden. Das Charakteristikum dieser Versuche ist, dass jeweils nur eine der beiden Gruppen die Anweisung erhält, nach einer Regelmäßigkeit im Aufgabenmaterial zu suchen, während die andere keine Informationen über die Existenz einer Regelmäßigkeit bekommt (Willingham, Salidis und Gabrieli, 2002; Dominey, Lelekov, Ventre-Dominey und Jeannerod, 1998; Lelekov, Dominey und García-Larrea, 2000).

Die zweite Definition geht davon aus, dass explizites Lernen auch ohne die bewusste Suche nach Regelmäßigkeiten stattfinden kann. Sie wird dadurch begründet, dass in bestimmten Experimenten auch ein Teil der Versuchspersonen, die nicht ausdrücklich auf die Suche nach einer Regel hingewiesen wurden, diese lernen und verbalisieren können.

In dieser Arbeit wird von der zweiten Definition ausgegangen, da sich gezeigt hat, dass es auch in NRT-Experimenten immer einen Anteil an Versuchspersonen gibt, die die Regelmäßigkeit postexperimentell verbalisieren können, obwohl sie nicht auf die Möglichkeit einer Regel hingewiesen wurden. Der Anteil dieser expliziten Lerner variiert bei den verschiedenen Arten des Paradigmas und durch die Kriterien, die zur Erkennung der expliziten Lerner eingesetzt werden (Rüsseler, Hennighausen, Münte & Rösler, 2003). Er liegt zwischen 10 und 70 % (Frensch, Haider, Rüniger, Neugebauer, Voigt & Werg, 2002). Die Faktoren, die zum expliziten Lernen führen, sind weitgehend unbekannt. Allerdings scheinen externe Faktoren, z. B. Schlaf, eine wichtige Rolle zu spielen. In einer von Wagner et al. (2004) veröffentlichten Arbeit konnte gezeigt werden, dass sich durch nächtlichen Schlaf die Anzahl der expliziten Lerner mehr als verdoppelt. Die Autoren nehmen an, dass es durch den Schlaf zu einer Rekonfiguration der Gedächtnisinhalte kommt. Über die Mechanismen, die zu der schlafassoziierten Wahrscheinlichkeitssteigerung führen, kann bis jetzt jedoch nur spekuliert werden.

1.1.5 Verfahren zur Unterscheidung von expliziten und impliziten Lernern

Um die expliziten Lerner von den impliziten Lernern abzugrenzen, wurden verschiedene Methoden entwickelt. Die meisten Verfahren schätzen das explizite Wissen ihrer Versuchspersonen durch postexperimentelle Tests ein. Hierfür existieren beispielsweise folgende Methoden:

- Generierungsaufgaben: die Versuchspersonen sollen die Position des nächsten Stimulus vorhersagen (z. B. Reed und Johnson, 1994).
- Free-recall Aufgaben: die Versuchspersonen sollen die im Versuch enthaltene Sequenz wiedergeben (z. B. Eimer et al., 1996).
- Wiedererkennungsaufgaben: die Versuchspersonen sollen die im Versuch verwendeten Sequenzen von nicht verwendeten Sequenzen unterscheiden (Perruchet und Amorin, 1992).
- Postexperimentelle Fragebögen: die Versuchspersonen werden gefragt, ob sie eine Struktur im dargebotenen Material erkannt haben.

Nach den Meinungen der Kritiker sind diese Tests anfällig und spiegeln nicht repräsentativ die Anzahl der expliziten Lerner wider. Einige Autoren befürchten eine Unterschätzung des expliziten Wissens, insbesondere bei Generierungsaufgaben (Perruchet und Amorin, 1992). Andere wiederum gehen von einer Überschätzung des explizitem Wissens aus (Destrebecqz et al., 2003), da gerade bei Wiedererkennungsaufgaben ein Gefühl von Bekanntheit die Ergebnisse verfälschen könnte. Dieses Gefühl soll dabei eher auf implizitem als auf explizitem Wissen beruhen. Eine Übersicht über die Kritik an den verwendeten Tests findet sich im Artikel von Shanks und St. John (1994).

Eine neuere von Haider und Frensch (1996) entwickelte Methode, um explizite Lerner zu erkennen, besteht in einer Messung der Reaktionszeiten. Versuchspersonen, die verbalisierbares Wissen entwickeln, sollen aufgrund einer sprunghaften Verringerung ihrer Reaktionszeiten (Reaktionszeitdiskontinuitäten) erkannt werden. Die Annahme, dass nur Versuchspersonen mit verbalisierbarem Wissen Reaktionszeitdiskontinuitäten, bedingt durch die bewusste Anwendung der Regelmäßigkeit, aufweisen, wurde von Haider und Frensch (1996) aufgestellt. Zur Bestätigung dieses Zusammenhangs entwickelten sie die Alphabet Verification Task (AVT).

Bei dieser Aufgabe wird Versuchspersonen auf einem Computerbildschirm eine Kette von Buchstaben in unterschiedlicher Länge gezeigt. Diese Kette besteht aus einer alphabetischen Sequenz, an deren Ende ein Triplet bestehend aus einem Buchstaben, einer Zahl und einem weiteren Buchstaben steht, z. B. „A B C (2) F“, wobei „C (2) F“ das Triplet darstellt. Die Versuchspersonen sollen entscheiden, ob die Kette dem Alphabet folgt, wobei die Zahl die Anzahl der ausgelassenen Buchstaben an der entsprechenden Stelle angibt. Die Zeichenkette „A B C (2) F“ wäre demnach richtig, während die Zeichenketten „A B C (3) F“ und „A A C (2) F“ falsch wären. Die versteckte Regel bei dieser Aufgabe besteht darin, dass die Fehler nur im Triplet auftreten, jedoch nicht in der alphabetischen Aufzählung davor. Das oben genannte Beispiel „A A C (2) F“ kommt somit niemals vor. Haider und Frensch nehmen an, dass die Versuchspersonen, denen die versteckte Regelmäßigkeit bewusst wird, nur noch den aufgabenrelevanten Anteil der Kette, d. h. das Triplet, beachten. Das explizite Erkennen der Aufgabenstruktur zeigt sich dann in einer sprunghaften Verkürzung der Reaktionszeit.

Zur empirischen Bestätigung des Zusammenhangs von sprunghafter Reaktionszeitverkürzung und Erwerb von verbalisierbaren bzw. expliziten Wissen wurden die Reaktionszeiten von 45 Versuchspersonen während der Bearbeitung der AVT untersucht und die Versuchspersonen im Anschluss befragt, ob sie eine Regelmäßigkeit im Aufgabenmaterial erkannt hätten (Haider und Frensch, 1999a und 1999b). Es ergab sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen den Reaktionszeitverkürzungen und der postexperimentellen Befragung. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass zum Strategiewechsel verbalisierbares Wissen vorhanden sein muss.

Frensch et al. (2002) übertrugen diesen Zusammenhang zwischen den Reaktionszeitdiskontinuitäten und dem Vorhandensein von expliziten Wissen auf die NRT. In einer von den Autoren untersuchten Versuchspersonengruppe zeigten sich bei 13 von 50 Versuchspersonen sprunghafte Reaktionszeitverkürzungen. 11 dieser Versuchspersonen waren in einer anschließenden postexperimentellen Befragung in der Lage, die Regelmäßigkeit zu erklären. Von den restlichen 37 Versuchspersonen ohne Reaktionszeitdiskontinuitäten konnten dies lediglich 9. Damit ließ sich auch bei der NRT ein signifikanter Zusammenhang beobachten. Ein Vorteil der NRT im Gegensatz zur AVT besteht darin, dass sich der Strategiewechsel direkt beobachten lässt, da ein Strategiewechsel zur Abnahme der Eingabeanzahl führt. Hierdurch lassen sich die expliziten Lerner bereits während des Versuchs eindeutig bestimmen, was ein wesentlicher Grund für die Wahl der NRT in dieser Arbeit ist.

1.1.6 Theorien zur Entstehung von explizitem Wissen

Doch wie kommt es zur Entwicklung von explizitem Wissen? Die klassische Erklärung, wie Wissen verbalisierbar wird, geht bis 1896 zurück (Wundt, 1896). Sie besagt, dass Wissen verbalisierbar wird, wenn der Inhalt von Gedächtnisspuren, die Informationen über die versteckte Regel enthalten, ins Bewusstsein gelangt. Wie und wann dies geschieht, ist umstritten. Es können drei grundlegende Ansätze voneinander unterschieden werden. Nach dem ersten Ansatz entsteht explizites aus implizitem Wissen (Transformationshypothese). Nach der zweiten Ansicht bestehen zwei unabhängig voneinander arbeitende Lernsysteme zum Erwerb der beiden verschiedenen Wissensformen (Zwei-

Systeme-Hypothese). Schließlich geht man nach dem dritten Ansatz davon aus, dass die beiden Wissensformen miteinander arbeiten (Interaktions- oder „unexpected event“-Hypothese). Diese drei verschiedenen Ansätze werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

1.1.6.1 Die Transformationshypothese

Der zentrale Grundgedanke der Transformationshypothese besteht darin, dass explizites und implizites Wissen nicht durch zwei unterschiedliche Lernsysteme generiert werden, sondern dass es sich bei den verschiedenen Wissensformen um unterschiedliche Stadien, entstanden durch denselben Lernmechanismus, handelt. Eine Vorbedingung für diesen Ansatz besteht in der Annahme, dass Lernen kontinuierlich abläuft und durch viele miteinander agierende Verarbeitungssysteme stattfindet (Cleeremans, 2002; Cleeremans und Jimenez, 2002). Über die Art, wie Wissen ins Bewusstsein gelangt und damit verbalisierbar wird, gibt es verschiedene Meinungen. Nach Cleeremans und Jimenez (2002) entsteht Bewusstsein, also auch verbalisierbares Wissen, durch die Qualität der Repräsentation von Gedächtnisinhalten, z. B. durch ihre Stabilität, ihren Zusammenhang mit anderen Informationen und ihre Repräsentationsstärke (siehe auch Cowan, 1995). Lernen beeinflusst dabei fortwährend die Qualität der Repräsentationen und kann somit schwache, nicht ins Bewusstsein gelangende Informationen in verbalisierbare, explizite Repräsentationen überführen. Damit wird dem Individuum Kontrolle über die sein Verhalten beeinflussenden Prozesse ermöglicht. Die letzte Stufe dieses Lernprozesses sehen die Autoren in einer Automatisierung des Erlernten. Auch das automatisierte Wissen ist dabei dem Individuum bewusst, ebenso wie sein Einfluss auf die Bearbeitung von Aufgaben (siehe auch Tzelgov, 1997)

In eine ähnliche Richtung zielt die neurophysiologische Argumentation einiger Autoren, wonach Bewusstsein nicht mit einer spezifischen Region des Gehirns zusammenhängt, sondern die Informationen jeder Region des Gehirns ins Bewusstsein gelangen können, solange sie die geeignete Repräsentationsqualität haben. So setzen z. B. O`Brian und Opie (1999) das bewusste Erkennen mit stabilen Aktivitätsmustern im neuralen Netzwerk gleich. Mit Zunahme der Verbindungen von parallel arbeitenden Netzwerken nimmt dann der Anteil an

explizitem bzw. verbal verfügbarem Wissen zu. Neben dieser Qualität der Repräsentation (bottom-up) können nach Dehaene und Nacchache (2001) auch andere Faktoren wie Aufmerksamkeitsprozesse (top-down) zum bewussten Erkennen der Informationen führen. Dies soll durch Verbindungen der einzelnen arbeitenden Module mit spezifischen Hirnregionen (wie z. B. den präfrontalen Cortex) über lange neurale Bahnen geschehen.

Andere Autoren gehen davon aus, dass das Arbeitsgedächtnis eine führende Rolle beim Bewusstwerden von Informationen spielt. Als Arbeitsgedächtnis wird dabei im Allgemeinen eine Sammlung von kognitiven Systemen bezeichnet, die aufgabenrelevante Informationen speichern und zur Bearbeitung während dieser Aufgabe zur Verfügung stellen. Stark aktivierte Informationen des Langzeitgedächtnisses werden dabei ins Arbeitsgedächtnis transferiert, wodurch sie bewusst werden können (Norman, 1986). Es existieren drei unterschiedliche Meinungen, inwieweit die Informationen des Arbeitsgedächtnisses dem Individuum bewusst werden:

1. Der gesamte Inhalt des Arbeitsgedächtnisses ist dem Individuum ohne weitere Vorbedingungen bewusst (z. B. Norman, 1986).
2. Der Inhalt des Arbeitsgedächtnisses, der im Fokus der Aufmerksamkeit steht, ist dem Individuum bewusst (Posner, 1994; Simons, 2000). Hiernach ist Aufmerksamkeit eine Vorbedingung, damit Gedächtnisinhalte ins Bewusstsein gelangen können.
3. Der gesamte Inhalt des Arbeitsgedächtnisses ist dem Individuum zwar für einen kurzen Zeitpunkt bewusst, aber ohne das Richten der Aufmerksamkeit auf die spezifischen Inhalte, werden diese schnell wieder vergessen und sind nicht verbalisierbar. Hier bestimmt die Aufmerksamkeit, ob Inhalte ausreichend stabil gespeichert werden, um auch verbalisierbar und für längere Zeit bewusst verfügbar zu sein (Lamme, 2003).

Die Gemeinsamkeit der oben erwähnten Theorien besteht darin, dass die beiden verschiedenen Wissensformen unterschiedliche Stadien des Wissens sind, die durch dasselbe Lernsystem erworben werden.

1.1.6.2 Die Zwei-Systeme-Hypothese

Der zweite Ansatz zur Erklärung der Entstehung von explizitem Wissen geht davon aus, dass es zwei verschiedene Lernsysteme gibt, eines zur Entstehung von implizitem Wissen und ein davon getrenntes für die Entstehung von explizitem Wissen.

Dienes & Berry (1997) unterscheiden die beiden Lernformen, indem sie die Wissensarten durch drei verschiedene Charakteristika voneinander abgrenzen:

1. die Möglichkeit, Wissen auf ähnliche Aufgaben zu transferieren
2. die Beständigkeit des Erlernten
3. die unterschiedliche Art des Lernens

Nach ihrer Annahme wird explizites Wissen über Hypothesentesten erworben, während implizites Wissen unbewusst durch Fokussierung auf die spezielle Aufgabe aufgenommen wird. Auch andere Autoren (Curran und Keele, 1993; Willingham und Goedert-Eschmann, 1999) gehen davon aus, dass aufmerksamkeitsabhängige Prozesse zum Erwerb von explizitem Wissen führen, während implizites Wissen aufmerksamkeitsunabhängig erworben werden kann. Daraus schließen sie, dass die beiden Wissensformen durch unterschiedliche Lernmechanismen entstehen.

Um die Rolle der Aufmerksamkeit beim Erwerb von explizitem Wissen zu untersuchen, beobachteten Curran und Keele (1993) zwei Versuchspersonengruppen, von denen eine instruiert war, in einer SRT-Aufgabe nach Regelmäßigkeiten zu suchen, während die andere keine Informationen über die Regelmäßigkeit in der Aufgabe erhielt. Die instruierte Gruppe lernte mehr über die in der Aufgabe enthaltene Struktur als die nicht instruierte. In einer weiteren Versuchsanordnung wurden beide Versuchspersonengruppen über die enthaltene Struktur informiert, wobei eine Versuchspersonengruppe allerdings noch eine zweite Aufgabe bewältigen musste. Sie zählten zur Ablenkung Töne, die ihnen in einer von zwei Tonhöhen präsentiert wurden. Unter dieser Ablenkung lernte die instruierte Gruppe die in der Aufgabe enthaltene Struktur nicht. Daraus schlossen die Autoren, dass Aufmerksamkeitsprozesse für den Erwerb von explizitem Wissen nötig sind.

Die Annahme, dass beide Lernformen über unterschiedliche Lernsysteme erworben wird, wird neben den oben erwähnten Studien auch durch Studien mit

funktioneller Bildgebung (z. B. PET) unterstützt, da hier bei impliziten Lernern andere Gehirnstrukturen aktiv waren als bei expliziten Lernern. Dabei wurden jedoch in den verschiedenen Studien unterschiedliche Strukturen für das explizite Lernen gefunden. Rauch et al. (1995) ordnen dem expliziten Lernen neuronale Aktivitäten in den primär visuellen und den inferioren parietalen Arealen zu, während Grafton et al. (1995) dem bewussten Sequenzlernen Aktivitäten in inferioren parietalen, prämotorischen, temporalen und anterioren cingulären Arealen zuordneten. Die zum Teil unterschiedlichen Gebiete könnten auf die unterschiedlichen Versuchsanordnungen oder unterschiedlichen Trainingsphasen zurückzuführen sein.

Dem impliziten Lernen ordneten Grafton et al. (1995) und auch Rauch et al. (1995) dagegen Aktivitäten in den Basalganglien zu. Doch auch diese Zuordnung ist nicht unumstritten. So fand Rose et al. (2002) bei einem NRT-Experiment, beobachtet mittels fMRT, einen Zusammenhang zwischen dem allgemeinen Lernerfolg bzw. dem Lernen von Stimulus-Response-Assoziationen und den Basalganglien, während sich das implizite Lernen im medialen Temporallappen und dem superioren Parietallappen widerspiegelte. Gerade dem medialen Temporallappen, mit dem Hippokampus als zentraler Struktur, wird jedoch in anderen Studien das Entstehen von explizitem Wissen zugeordnet (Poldrack et al., 2001; Eldridge et al., 2000). Somit lässt sich auch mit der Bildgebung die Frage nach der Entstehung von explizitem Wissen bislang nicht eindeutig beantworten.

Wie bereits erwähnt, treffen ein großer Teil der Autoren, wie Curran und Keele (1993), ihre Aussagen über zwei unterschiedliche Lernsysteme aufgrund der Vergleiche zwischen zwei Versuchspersonengruppen, von denen eine instruiert wurde, nach einer Regelmäßigkeit im Aufgabenmaterial zu suchen, während die andere, die sogenannte „incidental group“, keine Informationen über die Existenz einer Regelmäßigkeit erhielt (Willingham, Salidis und Gabrieli, 2002; Dominey, Lelekov, Ventre-Dominey und Jeannerod, 1998; Lelekov, Dominey und Garcia-Larrea, 2000). In vielen Arbeiten über implizites Lernen hat sich jedoch gezeigt, dass es auch in der „incidental group“ bei einem Teil der Versuchspersonen zum expliziten Lernen kommt. Dadurch wird die Annahme dieser Autoren, dass die Instruktion, nach einer Regel zu suchen, zum Erwerb von explizitem Wissen nötig ist, in Frage gestellt (siehe dazu auch Kapitel 1.1.3).

1.1.6.3 Die Interaktions- bzw. „unexpected event“- Hypothese

Frensch et al. (2002) beschäftigten sich näher mit der Frage, wie die Versuchspersonen der „incidental group“ bei impliziten Lernexperimenten explizites Wissen über die Regelmäßigkeiten erlangen. Auch sie gehen von der Hypothese aus, dass zwei verschiedene Lernsysteme zur Generierung von implizitem und explizitem Wissen existieren. Ihrer Meinung nach besteht aber eine Zusammenarbeit zwischen den beiden Systemen. Diese Annahme beruht auf Versuchen, die von Frensch et al. (2002) durchgeführt wurden. Neben den oben bereits erwähnten Reaktionszeitdiskontinuitäten, die Frensch et al. (2002) bei ihren Versuchen mit der AVT und der NRT entdeckten, stellten sie noch eine weitere Auffälligkeit fest. Versuchspersonen, die explizites Wissen über die abstrakten Regelmäßigkeiten gewannen, hatten kurz vor Beginn der Reaktionszeitdiskontinuitäten schnellere minimale Reaktionszeiten als Versuchspersonen, bei denen das Wissen über die Regelmäßigkeiten während des gesamten Versuchs implizit blieb.

Aufgrund dieser Beobachtungen entwickelten die Autoren die „unexpected event“ Hypothese. Nach dieser Hypothese wird zum Erwerb von explizitem Wissen bewusstes Hypothesentesten benötigt, d. h. explizites Wissen entsteht durch ein eigenes Lernsystem. Dieses kann durch ein unerwartetes Ereignis („unexpected event“) aktiviert werden. Nach Meinung der Autoren (Frensch et al. 2002) kann dieses unerwartete Ereignis je nach Versuchsanordnung und Versuchsperson etwas Unterschiedliches sein. Der Erfolg des Hypothesentestens hängt dabei von der Art des unerwarteten Ereignisses ab. Auf ihre Versuche bezogen gehen die Autoren davon aus, dass es bei der NRT erst zu einer aufmerksamkeitsunabhängigen Akkumulation von implizitem Wissen über eine abstrakte Regelmäßigkeit kommt, die zur Beschleunigung der Reaktionen der Versuchspersonen führt. Die Versuchspersonen sind überrascht über diese Beschleunigung ihrer Reaktionen („Warum sind meine Finger schneller als meine Wahrnehmung des Stimulus?“). Die Akkumulation des impliziten Wissens startet durch diese Überraschung das Lernsystem für den Erwerb von explizitem Wissen. Es werden Suchprozesse ausgelöst, um eine Begründung für die Beschleunigung der Reaktionen zu finden.

Frensch et al. (2002) ordnen dabei die von ihnen entdeckten Reaktionszeitdiskontinuitäten dem Hypothesentesten zu. Ihre Entdeckung, dass

explizite Lerner kurz vor dem Auftreten von Reaktionszeitdiskontinuitäten kürzere minimale Reaktionszeiten haben, deckt sich mit der Annahme, dass das implizite Wissen akkumuliert und als unerwartetes Ereignis dienen kann.

1.2 Ereigniskorrelierte Potentiale in der Lernforschung

1.2.1 Grundlagen

1929 führte Hans Berger nach 20-jähriger Arbeit das Elektroenzephalogramm (EEG) in die Wissenschaft ein. Hiermit schaffte er eine Möglichkeit, die Arbeit des Gehirns zu beobachten und einen Einblick in Informationsverarbeitungsprozesse zu erhalten. Mit dem EEG lassen sich in Echtzeit schwache, im Mikrovoltbereich liegende elektrische Spannungsschwankungen von der Schädeloberfläche ableiten. In diesen Signalen bilden sich die Summenaktivitäten kortikaler und unter Umständen subkortikaler Neuronenverbände ab, die die Verarbeitung eintreffender Informationen und die kognitive Weiterverarbeitung dieser Informationen widerspiegeln.

Eine spezielle Technik zur Analyse der vom EEG gelieferten Daten stellt die Gewinnung von ereignisbezogenen Potentialen dar (engl. event-related potentials, ERPs). Hierbei werden Spannungsänderungen, die mit bestimmten Ereignissen z. B. dem Auftreten von Stimuli (Reizen) oder der Eingabe von Responses (Antworten) assoziiert sind, durch zeitbezogene Mittelung aus dem Hintergrundrauschen (Spontan-EEG) hervorgehoben. Die gewonnenen ERPs setzen sich dabei aus aufeinander folgenden phasischen Aktivitätsänderungen zusammen, die man auch als Komponenten oder Wellen bezeichnet. Es hat sich gezeigt, dass die spezifischen Komponenten der ERPs Prozesse widerspiegeln, die mit der Speicherung, der Bearbeitung und dem Abruf von Informationen zusammenhängen (siehe Rösler et al., 1997 zur Übersicht). Mit den ERPs lässt sich daher die zum Teil im Millisekundenbereich erfolgende Verarbeitung von Informationen analysieren.

Bisher entwickelte neuere Techniken wie z. B. die PET (Positronenemissionstomographie) oder die fMRT (funktionelle Magnetresonanztomographie) haben gegenüber den aus den EEG ermittelten Daten zwei wesentliche Vorteile. Sie können eine genauere räumliche Abbildung der Gehirnaktivitäten liefern und erfassen im Gegensatz zum EEG auch besser die Aktivitäten tiefer gelegener Hirnareale. Allerdings bringen sie auch einen entscheidenden Nachteil für die Beobachtung von Informationsverarbeitungsprozessen mit sich. Ihre Daten werden anhand von Änderungen des Blutflusses oder des Stoffwechsels ermittelt.

Dadurch ist ihre zeitliche Auflösung schlechter, und sie sind für die Beobachtung schnell ablaufender Aktivitäten im Gehirn weniger geeignet. Deshalb bleiben ERPs mit ihren besonderen Stärken eine geeignete Methode, um implizites und explizites Lernen zu analysieren.

1.2.2 Einzelne ERP-Komponenten und ihre Interpretation

Bei der Analyse der ERPs fallen verschiedene Komponenten auf, die durch ihre Latenz, ihre Topographie und ihre relative Polarität charakterisiert sind. Potentiale mit einer Latenz von 10 ms bis 100 ms bezeichnet man dabei als exogene Komponenten, die zum Großteil in den spezifischen Projektionsarealen für den auslösenden Reiz entstehen. Sie werden charakteristischerweise durch physikalische Veränderungen des Reizes, also zum Beispiel durch die Änderung der Lautstärke eines Tones, in ihrer Amplitude oder Latenz variiert. Bei Potentialen mit einer Latenz von mehr als 100 ms spricht man dagegen von endogenen Komponenten, auf die unter anderem psychische und kognitive Vorgänge einen Einfluss haben.

Neben den beschriebenen phasischen Komponenten, die sich als positive oder negative Wellen mit einer Länge von weniger als einer Sekunde darstellen, gibt es auch tonische ereigniskorrelierte Potentiale, sogenannte langsame Wellen („slow waves“). Zur Zuordnung der funktionellen Bedeutung der einzelnen Komponenten wurden vielfältige Studien durchgeführt. Eine Auswahl an ERP-Komponenten und die ihnen zugeordnete Bedeutung wird in den folgenden Abschnitten dargestellt.

1.2.2.1 Die frühe Verarbeitung visueller Stimuli

Eine der frühesten Komponenten im EEG, auf die psychische und kognitive Vorgänge einen Einfluss haben, ist die N1. Abhängig von ihrer Lokalisation und vom auslösenden Untersuchungsparadigma werden verschiedene Formen der N1 unterschieden. In dieser Arbeit werden aufgrund des visuellen Aufgabenmaterials die Formen der N1 eine Rolle spielen, die durch visuelle Stimuli evoziert werden. Hierbei unterscheidet man aufgrund der Topographie zwei verschiedene Arten, die anteriore und die posteriore N1.

Die posteriore N1 ist eine negative ERP-Komponente, die ihren Gipfel nach ca. 150-200 ms über den posterioren Elektroden hat. Anatomisch scheint sie im unteren occipitalen oder occipito-temporalen Cortex zu entstehen (Hopf et al., 2002). Andere Autoren ordnen sie dem extrastriären visuellen Cortex zu (Di Russo et al, 2001; Martínez et al., 2001).

Funktionell spiegelt die posteriore N1 Diskriminationsprozesse für visuelle Stimuli wider. Hierbei spielt vor allem die Bedeutung des Stimulus eine Rolle. So zeigen Vogel und Luck (2000), dass die N1 bei einer Wahlreaktionsaufgabe (siehe Kapitel 1.2.3) eine höhere Amplitude hat als bei einfachen Reaktionsaufgaben, unabhängig davon, ob die Objekte durch Farbe oder Form voneinander unterschieden werden sollen. Durch weitere Experimente konnten die Autoren ausschließen, dass diese Amplitudenerhöhung auf erhöhte Aufmerksamkeit oder die vermehrte Datenmenge zurückgeführt werden kann. Sie schließen daraus, dass die N1 einen allgemeinen Diskriminationsprozess widerspiegelt.

Ein weiterer Effekt, der die Amplitude der posterioren N1 verändert, ist der sogenannte „attended-location“ Effekt. Danach ist die N1-Amplitude bei Reizen, die an einem beachteten Ort auftreten, größer als bei Reizen an nicht beachteten Orten (Luck, 1995; Mangun, 1995). Allerdings kommt es zu keiner Amplitudenzunahme beim bloßen Erscheinen eines Stimulus, d. h. wenn keine Reaktion auf den Reiz erforderlich ist. Der attended-location Effekt scheint also nur aufzutreten, wenn ein Diskriminationsprozess für die Reize aktiviert wird (Mangun und Hillyard, 1991).

Die anteriore N1 ist dadurch gekennzeichnet, dass sie ihr Maximum über den fronto-zentralen bis zu den zentral-parietalen Elektroden hat. Ihr anatomisches Korrelat soll im Parietallappen liegen (Di Russo et al, 2001). Funktionell werden ihr räumliche Aufmerksamkeitsprozesse zugeordnet, die von der Versuchsperson steuerbar sind (He et al., 2004). Die anteriore N1 ist von daher ein Indikator für die Relevanz eines Reizes und die Aufmerksamkeit, die dieser auf sich zieht.

1.2.2.2 Die umstrittene P3

Die P3 (P300, LPC) ist eine der meist diskutierten ERP Komponenten. Sie wird als positive Welle mit einer Amplitude zwischen 5 und 30 μ V beschrieben, die mit einer Latenz von 300 bis ca. 1000 ms nach Auftreten des Stimulus hervorgerufen

wird (Verleger, 2000). Allerdings handelt es sich bei der P3 nicht um eine einzelne Komponente, sondern um einen Komplex aus verschiedenen Wellen (z. B. P3a, P3b), die sich in ihrer Latenz, ihrer Topographie und der Art und Weise, wie sie hervorgerufen werden, unterscheiden.

Das Originalexperiment, das zur Entdeckung der P3 geführt hat, stammt von Sutton et al. (1965). Hierbei werden den Versuchspersonen jeweils zwei zusammenhängende Stimuli präsentiert. Dem vorangehenden Stimulus (Warnstimuli) folgt ein durch den Warnstimulus mit unterschiedlicher Sicherheit vorhersagbarer Teststimulus. Die nicht vorhersagbaren Teststimuli rufen dabei eine größere Positivierung über den zentro-parietalen Elektroden ca. 300 ms nach dem Teststimulus hervor. Diese Welle wurde von den Autoren als P3 bezeichnet.

Die P3 konnte durch verschiedene Experimente repliziert werden. Das typische Paradigma ist jedoch das „oddball“-Paradigma, bei dem den Versuchspersonen zwei unterschiedlich häufige Stimuli geboten werden. Der seltenere Reiz („oddball“) ruft dabei eine größere P3 als der häufig dargebotene Reiz hervor. Die „oddball“-P3 hat ihr Maximum zentroparietal und wird als P3b bezeichnet.

Wird in das „oddball“-Paradigma ein dritter „neuer“ Stimulus eingeführt, ruft dieser ebenfalls eine positive Komponente hervor, die jedoch ihr Maximum über den frontalen Elektroden hat und nach einer kürzeren Latenz mit einer Gipfellatenz zwischen 250 und 350 ms auftritt. Diese Komponente wird als P3a bezeichnet (Squires et al. 1975).

Die Einordnung der P3 auf anatomischer Ebene erwies sich bislang als schwierig. Während die P3a wahrscheinlich im frontalen Kortex generiert wird, da sie durch Läsionen dort beeinflusst wird (Knight, 1991), ist das anatomische Korrelat der P3b umstritten. In intrakranialen Ableitungen fand sich ein Korrelat der P3b zumindest in drei verschiedenen Strukturen: der oberen Temporalfurche, dem oberen Parietallappen und dem Hippokampus. Am wahrscheinlichsten scheint dabei der temporo-parietale Übergang zu sein, da nur er für die Entstehung der P3, die sich an der Kopfhaut ableiten lässt, unerlässlich zu sein scheint (Yamaguchi & Knight, 1991; Verleger et al., 1994a).

Bei der Analyse der P3 in verschiedenen Experimenten werden drei verschiedene Charakteristika untersucht:

1. eine Veränderung der Amplitude
2. eine Veränderung der Latenz
3. die Veränderung der Topographie

Zu 1.: Die Amplitudenveränderung der P3b ist abhängig von der Wahrscheinlichkeit des Auftretens bestimmter Stimuli (z. B. Squires et al., 1976; Duncan-Johnson und Donchin, 1977) und der Relevanz des Stimulus im Kontext der Aufgabe (z. B. Gratton et al., 1990). Weiterhin führt es zu einer Vergrößerung der P3, wenn die Versuchsperson aktiv auf den Reiz reagiert, anstatt ihn nur passiv wahrzunehmen (Lang et al., 1997; Iwanami et al., 1996).

Des Weiteren scheinen auch Gedächtnisvorgänge die Amplitude der P3 zu beeinflussen. So zeigen Karis et al. (1984), dass die P3 durch unterschiedliche Merkprozesse unterschiedlich beeinflusst wird. Verwenden die Versuchspersonen keine besondere Strategie, um Wörter auswendig zu lernen, zeigen die Wörter, die später erinnert werden, beim Lernen eine größere P3 Amplitude. Werden dagegen von den Probanden Merkhilfen verwendet, weisen sie eine Amplitudenveränderung in einer anderen ERP-Komponente auf, der sogenannten „slow positive wave“.

Zu 2.: Die Latenz der P3 wird im Allgemeinen als Maß für die „Stimulus-Beurteilungs-Zeit“ interpretiert (z. B. Donchin und Coles, 1988a und 1988b). Diese Interpretation beruht darauf, dass sich die Latenz der P3 verlängert, wenn mehr Stimuli zu bearbeiten sind (z. B. Ford et al., 1979) oder die Bedingungen durch Ablenkungsreize (Distraktorreize) erschwert werden (Brookhuis et al., 1983). Sie bleibt indessen gleich, wenn die Wahl der Antwortmöglichkeiten schwieriger wird. So zeigte Smid et al. (1992), dass die P3 Latenz unverändert bleibt, wenn die Wahl der Antwortmöglichkeiten erschwert wird, obwohl die Reaktionszeit ansteigt. Dagegen stieg die Latenz der P3 bei erhöhter Schwierigkeit der Stimulusidentifizierung ebenso wie die Reaktionszeit an. Auch die Aufforderung, Aufgaben richtig und nicht schnell zu bearbeiten, erhöht die Latenz der P3 (Kutas et al., 1977). Diese Interpretation ist jedoch umstritten. Verleger (1997) zeigte in einer umfassenden Übersicht über die Literatur, dass auch die Reaktion einen Einfluss auf die Latenz hat und dass es für die Beeinflussung der P3-Latenz offenbar darauf ankommt, ob die Reaktion schnell erfolgt.

Zu 3.: Nach Johnson (1989 und 1991) ist die Topographie der P3 abhängig von der Reizmodalität. So rufen visuelle Reize nach seiner Meinung eine signifikant größere Amplitude der P3 an zentroparietalen Elektroden hervor als auditive Reize, die ein parietales Maximum haben, oder somatosensorische Reize, deren Maximum im zentralen Bereich liegt. Naumann et al. (1992) führten dagegen die Topographieunterschiede bei Johnson auf eine verschiedene Mischung von P3a und P3b und auf eine unterschiedliche zeitliche Überlagerung dieser beiden bereits oben erwähnten Komponenten zurück.

Zur Bedeutung der P3a ist die allgemein anerkannte Interpretation, dass sie mit Prozessen, die mit dem unwillkürlichen Lenken der Aufmerksamkeit auf hervorstechende Stimuli zusammenhängen, assoziiert ist (Knight, 1991).

Die funktionale Bedeutung der P3b wurde dagegen in vielen Arbeiten diskutiert. Das bekannteste Modell zur Deutung der P3b ist Johnsons triarchisches Modell (1986). Danach hängt die P3b-Amplitude von drei Faktoren ab: der subjektiv eingeschätzten Auftretenswahrscheinlichkeit, der Stimulusbedeutung und der Transmission der Information. Unter Transmission der Information versteht man dabei den Informationsverlust während der Übertragung der Informationen, der auf geringere Erkennbarkeit des Reizes und auf Unachtsamkeit zurückzuführen ist. Ein weiteres bekanntes Modell ist das „context updating“ Modell von Donchin und Coles (1988), bei dem davon ausgegangen wird, dass die P3 mit Speicherprozessen im Arbeitsgedächtnis zusammenhängt. Der Mensch bildet sich nach diesem Modell Konzepte über die Reize in seiner Umwelt. Tritt dann ein seltenes unerwartetes Ereignis auf, muss das Konzept remodelliert werden. Diese Anpassung des mentalen Modells wird als „context updating“ verstanden und führt nach Ansicht der Autoren zur P3. Die Amplitude wird danach vom Ausmaß der nötigen Modifikation des Arbeitsspeichers bestimmt.

Diese Theorie würde mit der Lokalisation der P3 im Hippokampus zusammenpassen, da dieser eine wesentliche Rolle für das Arbeitsgedächtnis spielt. Da für die P3 jedoch der temporo-parietale Übergang eine entscheidendere Rolle spielt, nimmt Verleger (1998) an, dass die P3 die Verarbeitung von Reizen nach der primären Wahrnehmung darstellt. Er ordnet die P3 den von Milner und Goodale (1995) vorgeschlagenen zwei Pfaden zu, die auf der Hypothese von Ungerleider und Mishkin (1982) aufbauen:

1. dem temporalen Pfad zur Objekterkennung, dargestellt in der reizbezogenen Komponente der P3, die im oberen Temporalbereich generiert wird
2. dem oberen parietalen Pfad zur Transferierung des Wahrgenommenen in Handlung, präsentiert in der reaktionsbezogenen Komponente der P3.

Während in den anderen Theorien die P3 vor allem durch Eigenschaften des Stimulus beeinflusst wird, ist für Verleger (1998) auch die Reaktion von Bedeutung.

Neben diesen Theorien gibt es noch diverse weitere Theorien zur funktionellen Bedeutung der P3. Einig sind sich die Autoren jedoch darin, dass die P3 die Bearbeitung von Reizen nach der primären Wahrnehmung widerspiegelt.

1.2.2.3 Gedächtnisprozesse- die SPW („slow positive wave“)

Die SPW zählt zu den langsamen, tonischen ERP-Komponenten. Sie kann analysiert werden, indem sich die gemittelte EEG-Strecke über mehrere Sekunden erstreckt. Funktionell scheint sie mit dem Arbeitsgedächtnis und dessen Inhalt und Prozessen assoziiert zu sein. Diese Assoziation zeigt sich sowohl in den Versuchen von Rösler und Heil (1991) als auch in den Arbeiten von Donchin und Fabiani (1991) und Ruchkin et al (2003). Rösler und Heil (1991) konnten zeigen, dass Kopfrechnen (Dividieren) und Erinnerungsprozesse (Zahlen merken) eine SPW hervorrufen. Beide Prozesse benötigen eine Speicherung der Stimuli im Arbeitsgedächtnis. Durch Variationen der Arbeitsgedächtnisbelastung, d. h. durch mehr zu bearbeitende Zahlen, stieg bei beidem die Amplitude der jeweiligen SPW an. Auch in Versuchen zur Wiedererkennung von Items zeigt sich ein Zusammenhang zwischen Informationsspeicherung und der SPW (z. B. Fabiani et al, 1986; Friedman und Sutton, 1987). Dabei sieht es aber so aus, als ob vor allem die Anwendung von Merkstrategien von Bedeutung ist (Donchin und Fabiani, 1991). Das reine Auswendiglernen ohne Strategie führt laut Donchin und Fabiani (1991) zu einer Erhöhung der P3 Amplitude und nicht zu einer Veränderung der SPW.

Die Topographie und die Latenz der SPW in den verschiedenen Experimenten sind sehr unterschiedlich. Es treten z. B. langsame positive Wellen mit einer Latenz von 1 bis 4 s nach dem Stimulus und einem Maximum über Fpz beim

Dividieren und andere mit einer mit Latenz von 500 bis 2000 ms und einem Maximum über Oz bei Erinnerungsprozessen auf (Rösler und Heil 1991). Einen Grund für die unterschiedliche Lage der SPWs liefert die Arbeit von Ruchkin et al. (2003). Die Autoren nehmen an, dass das Arbeitsgedächtnis aus aktivierten Langzeitgedächtnisinhalten besteht. Die Abspeicherung von verschiedenen Informationsarten (z. B. visuelle, semantische usw.) erfolgt dabei in dem jeweiligen dafür zuständigen System. Dies führt dazu, dass zur Bearbeitung von Aufgaben das jeweilige System aktiviert wird und damit im Rahmen des Arbeitsgedächtnisses funktioniert. Daher liegt das Maximum der SPW über dem jeweiligen Speicher- bzw. Bearbeitungsort der Informationen. Auch die Ansichten anderer Autoren, dass das Arbeitsgedächtnis und das Langzeitgedächtnis aus verschiedenen neuronalen Strukturen besteht, widersprechen der räumlichen Verteilung der SPW nicht, da auch hier verschiedenen Prozessen und Informationsarten im Arbeitsgedächtnis unterschiedliche Orte im Gehirn zugeordnet werden (z. B. Baddeley, 2001).

Die SPW kann also nach diesen Arbeiten als Maß für die Belastung des Arbeitsgedächtnisses genommen werden.

1.2.3 ERP-Studien zum impliziten und expliziten Lernen

Zur Untersuchung von impliziten und expliziten Lernvorgängen entwickelten Eimer et al. (1996) als Variante der „serial reaction time task“ (siehe Kapitel 1.1.3) eine Wahlreaktionsaufgabe mit seltenen Abweichungen, die nicht der sonst vorhandenen festgelegten Sequenz entsprechen. Die Versuchspersonen wurden in diesem Experiment angewiesen, möglichst schnell auf einen gezeigten Buchstaben zu reagieren. Jeder präsentierte Stimulus war dabei einem Finger zugeordnet, den die Versuchsperson bei Erscheinen des Stimulus drücken musste. Die Stimuli folgten einer festgelegten Sequenz, die zum Teil durch Abweichungen in der Sequenz unterbrochen wurde. Im Anschluss an den Versuch wurden die Versuchspersonen aufgrund ihrer Ergebnisse in den durchgeführten postexperimentellen Tests entweder in die Gruppe der expliziten Lerner oder in die der impliziten Lerner eingeteilt.

Ausgewertet wurden die ERPs der Abweichungen in der Sequenz. Die Ergebnisse beider Gruppen wurden miteinander verglichen. Es zeigte sich, dass die expliziten

Lerner eine größere N2b Amplitude als die impliziten Lerner aufwiesen, die keine oder nur eine kleine N2b hatten, und dass die N2b Amplitude bei den expliziten Lernern im Lauf des Versuchs zunahm. Daraus schlossen die Autoren, dass unterschiedliche Lernsysteme für die Entwicklung von expliziten und impliziten Wissen verantwortlich sind. Die Abwesenheit von Lerneffekten bei den impliziten Lernern begründeten sie durch mehrere fMRT Studien (z. B. Grafton et al., 1995), die darauf hinweisen, dass implizites Lernen in subkortikalen Strukturen wie z. B. den Basalganglien abläuft. Dadurch sind die Auswirkungen der impliziten Lernvorgänge nur unter Umständen mit dem EEG erfassbar.

Zur weiteren Erklärung und Interpretation der erhöhten N2b führten Rösler et al (1997), Rüsseler und Rösler (2000) und Rüsseler et al. (2003) weitere Versuche mit Wahlreaktionsaufgaben durch, die Fehler in der festgelegten Struktur enthalten. Durch Zuordnung von gleichen Reaktionen auf je zwei verschiedene Stimuli modifizierten sie dabei den Versuch insoweit, dass zwei verschiedene Arten von Abweichungen auftreten: zum einen perzeptuelle Abweichungen, bei denen sich die erforderliche Eingabe nicht änderte, und zum anderen motorische Abweichungen, bei denen auch die erforderliche Eingabe verändert ist. Sowohl bei impliziten als auch bei expliziten Lernern fanden die Autoren „lateralized readiness potentials“ (LRP) für die erwartete, aber falsche Reaktion bei motorischen Abweichungen. Bei dem LRP handelt es sich um eine ERP-Komponente, die in einer langsamen Negativierung kurz vor der Bewegung besteht. Das LRP tritt jeweils auf der zur Bewegung kontralateralen Seite auf, z. B. bei einer Bewegung der rechten Hand auf der linken Seite. Aus dem Auftreten dieser Komponente für beide Lernformen schlossen die Autoren, dass sowohl implizites als auch explizites Lernen auf die Motorik Einflüsse haben. Des Weiteren riefen die motorischen Abweichler bei expliziten Lernern eine erhöhte N2b und eine erhöhte P3b hervor. Dieses wird als N2b/P3b Effekt bezeichnet. Die perzeptuellen Abweichler hatten dagegen nur eine Erhöhung der N2b zur Folge. Rüsseler et al. (2003) argumentierten aufgrund dieser Ergebnisse, dass die N2b kein Prozess zur Unterdrückung der falschen Antwort sein kann, sondern ein Prozess zur Bewusstwerdung von Wissen sein muss, da auch bei impliziten Lernern die falsche Antwort unterdrückt werden muss. Die P3b scheint eine Änderung des Aktionsmodells zu repräsentieren.

Um den Zusammenhang des N2b/P3b Effekts mit dem expliziten Lernen weiter zu verdeutlichen, ließen Schlaghecken et al. (2000) ihre Versuchspersonen eine 16-stellige Sequenz erlernen. Die explizit erlernten Teile dieser Sequenz wurden anhand der Prozess-Dissoziations-Prozedur (entwickelt von Jacoby, 1991; Kritik an dem Verfahren siehe Reingold und Toth, 1996) identifiziert. Es zeigte sich, dass der N2b/P3b Effekt nur bei Fehlern in den explizit erlernten Strukturen auftrat. Dies werteten die Autoren als weiteren Beweis für den Zusammenhang zwischen dem N2b/P3b Effekt und dem expliziten Lernen.

Ganz ähnliche Ergebnisse wie die anderen Studien, aber eine unterschiedliche Interpretation findet sich bei Baldwin und Kutas (1997). Auch bei ihnen induzieren Abweichungen in der Sequenz einer Wahlreaktionsaufgabe eine größere P3 bei expliziten Lernern als bei impliziten Lernern. Doch die Autoren argumentieren, dass diese geringen Unterschiede eher auf eine unterschiedliche Ausprägung des Wissens als auf verschiedene Prozesse zurückzuführen sind.

Diese unterschiedliche Interpretation der Ergebnisse weist auf das Problem der Studien hin. Der Rückschluss auf die Entstehung von explizitem Wissen ist schwierig, weil immer die ERPs von Abweichungen in der Sequenz ausgewertet werden. Aus keiner der Studien geht hervor, ob der N2b/P3b Effekt während des Lernens oder beim Vorhandensein von explizitem Wissen auftritt. Tritt er erst nach dem Lernen in Erscheinung, so kann nur daraus gefolgert werden, dass explizites Wissen bei Abweichungen andere Prozesse in Gang setzt als implizites Lernen. Über die Entstehung des expliziten Wissens, z. B. aus vorhandenem implizitem Wissen oder durch ein eigenes Lernsystem, lässt sich dagegen nichts aussagen. Die Frage, wie explizites Wissen entsteht und wie es mit implizitem Wissen zusammenhängt, bleibt also weiterhin offen.

1.3 Fragestellung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit zwei zusammenhängenden Fragestellungen. Das vorrangige Ziel ist es, mit Hilfe des EEGs und der während des Erwerbs von explizitem Wissen ermittelten ERPs Vorläufer zu finden, die die Entstehung von explizitem Wissen vorhersagen können. Weiterhin soll diese Arbeit helfen, den bisher nicht verstandenen Informationsverarbeitungsprozessen, die zu expliziten Wissen führen, auf den Grund zu gehen.

Um den Lernverlauf optimal analysieren zu können, ist es wichtig, die ERPs für jedes einzelne Ereignis getrennt zu ermitteln. Aus diesem Grund werden die Stimuli einer Aufgabe in dieser Arbeit nicht zusammen präsentiert, wie in den Studien von Wagner et al. (2004) und Rose et al. (2002), sondern erscheinen nacheinander auf dem Bildschirm (Frensch et al., 2002). Den Versuchspersonen wird, wie auch in den anderen Studien, nicht mitgeteilt, dass eine Regel im Aufgabenmaterial enthalten ist. Auf diese Weise soll die Interaktion von explizitem und implizitem Lernen untersucht werden und eine Beeinflussung der Lernvorgänge durch vorab gegebene Informationen verhindert werden.

Die Länge der Aufgabe wurde von sieben auf fünf Eingaben verkürzt. Auf diese Weise soll die Wahrscheinlichkeit erhöht werden, dass die Versuchspersonen die Regel im Aufgabenmaterial explizit erlernen.

Die Zuordnung der Versuchspersonen zu den beiden unterschiedlichen Gruppen wird anhand des Verhaltens während des Versuchs bestimmt. Die Versuchspersonen können aufgrund der in der Aufgabe enthaltenen Struktur der Eingaben (ABCCB) die Aufgabe bereits nach der zweiten Eingabe beenden, wenn ihnen diese Struktur bewusst wird. Beendet also eine Versuchsperson einen bestimmten Anteil der Aufgaben eines Blocks nach der zweiten Eingabe, wird sie der Gruppe der expliziten Lerner zugeordnet. Löst sie die Aufgaben dagegen bis zum Ende des Versuchs komplett, zählt sie zur Gruppe der impliziten Lerner. Zusätzlich werden die Versuchspersonen im Anschluss an den Versuch befragt, ob sie eine Regel im Aufgabenmaterial erkannt haben. Hiermit soll ausgeschlossen werden, dass Versuchspersonen, die die Regel bewusst erkannt, aber nicht angewendet haben, als implizite Lerner gewertet werden.

Die ermittelten ERPs der beiden Gruppen werden zunächst miteinander verglichen, um Unterschiede festzustellen, die die Entstehung von explizitem Wissen

repräsentieren. Hierbei findet insbesondere der erste Aufgabenblock Beachtung. Auf diese Weise sollen Vorboten gefunden werden, die den Erwerb von explizitem Wissen bereits in einer sehr frühen Phase des expliziten Lernens ankündigen.

Sowohl die Reaktionszeiten als auch die ermittelten ERPs der beiden Gruppen werden analysiert, um Einblicke in den Erwerb des expliziten Wissens und dessen Interaktion mit dem impliziten Lernen zu erhalten. In Kapitel 1.1.5 wurden drei verschiedene Hypothesen zur Entstehung des expliziten Wissens vorgestellt. Je nachdem, welche Hypothese zutrifft, werden unterschiedliche Ergebnisse bei der Analyse der ERPs erwartet.

Nach der Transformationshypothese soll sich explizites Wissen aus implizitem Wissen entwickeln. Daher werden zur Bestätigung dieser Hypothese erst Unterschiede im Lernverlauf vermutet. Weiterhin spielen nach dieser Hypothese Arbeitsgedächtnisprozesse eine sehr wichtige Rolle. Hierbei handelt es sich nicht nur um Prozesse des Kurzzeitgedächtnisses, sondern auch um aktivierte Informationen, die im Intermediär- oder Langzeitgedächtnis gespeichert sind. Auch diese werden nach der Aktivierung dem Arbeitsgedächtnis zugerechnet (Ruchkin et al., 2003). Die länger anhaltende Aktivierung von Arbeitsgedächtnisinhalten spiegelt sich typischerweise in langsamen Potentialen wider (Ruchkin et al., 2003). Auch die Speicherung von Zahlen im Arbeitsgedächtnis führt nach den Arbeiten von Rösler und Heil (1991) zu „slow positive waves“. Dabei sind in den Versuchen die Potentiale umso größer, je mehr Kapazität des Arbeitsgedächtnisses von den Versuchspersonen für die Speicherung der Zahlen benötigt wird. Wenn also Arbeitsgedächtnisprozesse eine entscheidende Rolle beim expliziten Lernen spielen, sollten die Versuchspersonen, die die Regel explizit erlernen, größere langsame Potentiale aufweisen als die Versuchspersonen, denen die Regel nicht bewusst wird.

Nach der zweiten Hypothese, der Zwei-Systeme-Hypothese, soll implizites und explizites Lernen über zwei verschiedene Lernsysteme erlernt werden. Die Vertreter dieser Hypothese gehen davon aus, dass explizites Lernen im Vergleich zum impliziten aufmerksamkeitsabhängig ist. Wenn aufmerksamkeitsabhängige Prozesse eine wichtige Rolle beim Bewusstwerden der Regel spielen, kann man erwarten, dass die Versuchspersonen, die Einsicht in die Regel gewinnen, bereits zu Beginn des Versuchs aufmerksamer auf die Versuchssituation und die Stimuli

reagieren. Daher werden aufmerksamkeitsabhängige Unterschiede bei den ERPs bereits zu Beginn des Versuchs erwartet.

Als dritte These steht noch die „unexpected event“- bzw. Interaktionshypothese im Raum. Frensch und Haider (1997 und 2003) gehen davon aus, dass das implizite Wissen mit der Zeit akkumuliert und ab einer bestimmten Akkumulation das Hypothesentesten induziert. Bei Zutreffen dieser Hypothese sollten die Gruppenunterschiede bedingt durch den unterschiedlichen Grad der Akkumulation des Wissens mit der Zeit zunehmen. Um dieses zu überprüfen, werden die Daten des ersten Blocks mit den Daten des letzten Blocks vor der Erkenntnis der Regel verglichen.

Nach der „unexpected event“-Hypothese von Haider und Frensch (1997 und 2003) wird weiterhin davon ausgegangen, dass die Versuchspersonen im Versuchsverlauf über die schnelleren Reaktionen bei bestimmten Eingaben überrascht sind und aktiv nach einer Regel suchen, die diese Beschleunigung verursacht. Zur Beurteilung dieser ausgelösten expliziten Suchprozesse werden die reaktionsbezogenen ERPs der beiden Gruppen analysiert. ERP-Unterschiede zwischen den beiden Gruppen sollten sich besonders im letzten Block vor der Erkenntnis finden. Des Weiteren wird die P3, die durch die Eingaben evoziert wird, analysiert. Hier werden Unterschiede zwischen den Gruppen und auch zwischen dem ersten und dem letzten Block erwartet. Diese Unterschiede ließen sich durch eine erhöhte Relevanz einer Eingabe oder durch die ausgelöste Überraschung durch die Eingabe erklären.

2 Methoden

2.1 Stichprobe

An der Studie nahmen insgesamt 30 gesunde Versuchspersonen teil. Sie wurden für ihren Zeitaufwand entschädigt. Aufgrund technischer Probleme (z. B. fehlender Triggersetzung) bzw. zu starker Artefaktüberlagerung konnten nur die Daten von 26 Versuchspersonen (14 Männer, 12 Frauen) verwendet werden. Die Versuchspersonen waren zwischen 20 und 27 Jahre alt (Durchschnittsalter 24). Sie waren mit einer Ausnahme Rechtshänder und hatten volle Sehkraft, gegebenenfalls durch Brille oder Kontaktlinsen korrigiert. Alle Versuchspersonen hatten Deutsch als Muttersprache.

Aufgrund ihres Verhaltens während des Versuchs wurden die Versuchspersonen nach dem Experiment in zwei Gruppen eingeteilt, 20 Personen wurden als Nicht-Löser (NL) und sechs als Löser (L) klassifiziert.

2.2 Versuchsbeschreibung

Zunächst werden in Abschnitt 2.2.1 die Regeln zur Bearbeitung der verwendeten Aufgabe beschrieben. Diese wurden der Versuchsperson an einem Beispiel sowie einer folgenden Übungsphase eingehend erklärt.

Anschließend wird eine dem Aufgabenmaterial zugrunde liegende Struktur dargestellt, die die Versuchsperson im Laufe des Versuchs erkennen und anwenden kann.

In Abschnitt 2.2.2 werden der Versuchsablauf und die Rahmenbedingungen des Versuchs beschrieben.

2.2.1 Die Aufgabe

Bei der Aufgabe handelt es sich um eine Variation der Number Reduction Task, die 1996 von Woltz et al. als „letter reduction task“ eingeführt und von Frensch et al. (2002) modifiziert wurde.

Die Versuchsperson und der Computer wählen bei dieser Aufgabe abwechselnd eine von den drei möglichen Zahlen 1, 4 oder 9 aus und bilden auf diese Weise

eine wachsende Zahlenreihe von insgesamt 11 Zahlen. Während der Computer seine Zahlenwerte scheinbar zufällig auswählt, fällt die Versuchsperson ihre Wahl nach zwei Regeln, die sich auf die beiden aktuellen Zahlen beziehen. Die Regeln lauten:

Regel 1: Sind zwei Zahlwerte gleich, dann ist das Ergebnis gleich dem Zahlwert.
Regel 2: Sind zwei Zahlenwerte ungleich, dann ist das Ergebnis der Zahlwert, der weder dem ersten noch dem zweiten entspricht.

Tabelle 2.1 zeigt alle richtigen Kombinationsmöglichkeiten:

Zahl 1	Zahl 2	Ergebnis
1	1	1 (Regel 1)
4	4	4 (Regel 1)
9	9	9 (Regel 1)
1	4	9 (Regel 2)
4	9	1 (Regel 2)
9	1	4 (Regel 2)
1	9	4 (Regel 2)
4	1	9 (Regel 2)
9	4	1 (Regel 2)

Tabelle 2.1 Richtige Kombinationsmöglichkeiten.

Bei jeder Aufgabe trifft die Versuchsperson insgesamt fünf Entscheidungen, die letzte Entscheidung ist dabei der Endwert. Der Endwert muss durch Drücken der Entertaste auf der Tastatur bestätigt werden. Da die Versuchsperson für jede Entscheidung zwei Zahlenwerte benötigt, erzeugt der Computer am Blockanfang zwei Startwerte.

Zur Verdeutlichung zeigt das folgende Beispiel (Abbildung 2.1) das Entstehen der Zahlenreihe [9,9,9,4,1,9,4,4,4,9,1]:

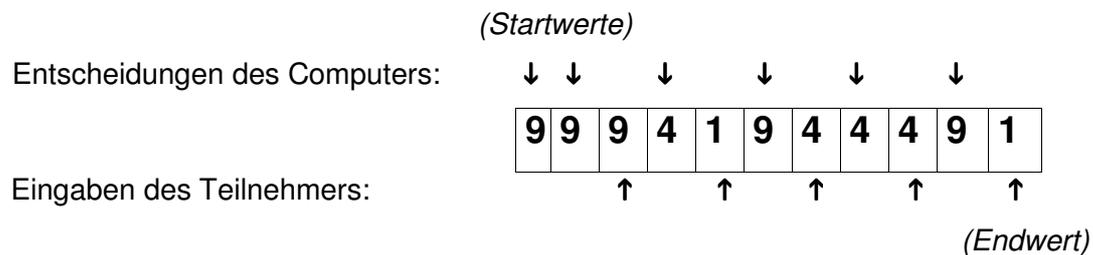


Abbildung 2.1 Entstehung einer Zahlenreihe.

Die Versuchsperson hat die Möglichkeit, das Endergebnis bereits vor Beendigung der Zahlenreihe anzugeben. Hierzu muss sie nach ihrer aktuellen Eingabe die Entertaste drücken. Die entsprechende Eingabe wird dann als Endwert der aktuellen Aufgabe gespeichert und die Zahlenreihe wird abgebrochen. Näheres zu den Rahmenbedingungen der Eingaben ist in Abschnitt 2.2.2 beschrieben.

Die gewählten Zahlenwerte des Computers sind nur scheinbar zufällig, in Wirklichkeit werden sie so gewählt, dass die sogenannte *Tiefenregel* erfüllt ist. Die Tiefenregel fasst zwei Regeln zusammen, die beschreiben, wie die korrekten Eingaben der Versuchsperson voneinander abhängen. Sie lauten:

- Regel 1:** Die vierte Eingabe ist mit der Dritten identisch.
- Regel 2:** Das Endergebnis ist mit der zweiten Eingabe identisch.

Demnach kann die Versuchsperson den Endwert vorzeitig bestimmen, wenn sie Regel 2 erkannt hat.

2.2.2 Versuchsablauf

Das Experiment fand in einem elektrisch abgeschirmten, schallisolierten und abgedunkelten Raum statt. Sowohl die Instruktionen als auch die Aufgaben wurden der Versuchsperson auf einem 14' Farbmonitor präsentiert.

2.2.2.1 Instruktionen

Die Instruktionen der Versuchsperson erfolgten über den Präsentationsmonitor in weißer Schrift auf grauem Hintergrund. Zu Beginn der Instruktionen wurden die Teilnehmer ausführlich mit den Regeln zur Bearbeitung der Zahlenfolgen vertraut gemacht. Hierbei wurde angemerkt, dass

1. nur das Endergebnis und nicht die Zwischenergebnisse von Bedeutung sind und
2. die Anzahl der Eingaben beliebig sein kann, da das Endergebnis erst durch Betätigung der Entertaste festgelegt wird.

Diese Hinweise erfolgten mit der Absicht, der Versuchsperson mit explizitem Wissen die Anwendung der Tiefenregel zu erleichtern. Am Ende der Einleitung bearbeitete die Versuchsperson 10 Übungsaufgaben, von denen sie 7 richtig lösen musste, um zum nächsten Abschnitt des Versuchs überzugehen.

2.2.2.2 Der Versuch

Der Versuch bestand aus insgesamt 432 Aufgaben. Sie waren gleichmäßig aufgeteilt in 8 Blöcken mit je 54 Aufgaben. Nach jedem Block durfte die Versuchsperson eine maximal fünfminütige Pause einlegen. Das Zeitlimit für die Eingabe einer Zahl lag bei 4 Sekunden, das einer Aufgabe bei 12 Sekunden. Bei Überschreiten des Zeitlimits wurde das Endergebnis als falsch gewertet.

Für die Zahleneingabe stand der Versuchsperson eine handelsübliche PC-Tastatur zur Verfügung. Sie konnte dabei zwischen den Tasten für 1, 4, 9 und „Enter“ wählen. Die Taste für 1 entsprach hierbei der Taste 1 des Nummernblocks, die für 4 der Taste 2 des Nummernblocks und die für 9 der Taste 3 des Nummernblocks. Für „Enter“ wurde die übliche Entertaste gewählt. Die Tasten wurden je nach ihrer Bedeutung mit Klebeband markiert.

Zu Beginn der Aufgabe erschien eine Reihe mit sechs weißen Strichen 1 cm unterhalb der Bildschirmmitte. Das erste Zahlenpaar trat 500 ms später auf. Beim Fortschreiten der Aufgabe bauten sich die Zahlenreihen der Reize und der Antworten von links nach rechts auf. Die Reize erschienen dabei in einer oberen Zeile in roter Farbe, während die Antworten in einer unteren Reihe 3 cm unterhalb der Bildschirmmitte in gelber Farbe angezeigt wurden.

Gab die Versuchsperson eine Zahl ein, wurde sie direkt unter die letzte vom Computer generierte Zahl gesetzt. Der nächste Reiz erschien 500 ms nach der Eingabe der Versuchsperson.

Durch Betätigung der Entertaste wurde das Endergebnis blau, und der Computer gab 1 s später ein Feedback, ob die Aufgabe richtig gelöst wurde. Wurden alle Zahlen blau, dann entsprach das Ergebnis dem richtigen Endergebnis. Blieb die Farbe unverändert, war das Ergebnis nicht korrekt. Das Entstehen einer Zahlenreihe mit korrektem Endergebnis verdeutlicht Abbildung 2.2.

Die Aufgabe wurde 500 ms nach dem Feedback gelöscht. Wenn die Versuchsperson innerhalb eines Blocks bei 36 der 54 Aufgaben das richtige Endergebnis bereits durch Betätigung der Entertaste bei der zweiten Eingabe eingab, wurde der Versuch vorzeitig beendet.

Aufgrund der beschriebenen vorzeitigen Beendigung des Versuchs wurden diese Versuchspersonen in die Gruppe der Löser (L) eingeteilt. Die übrigen Versuchspersonen wurden der Gruppe der Nicht-Löser (NL) zugeordnet. Zur Absicherung der Gruppenzuordnung wurde eine postexperimentelle Befragung der Versuchspersonen vorgenommen, in der ihr Wissen über die Tiefenregel überprüft wurde.

Die Aufgaben, die Antworten der Versuchsperson und die Richtigkeit des Endergebnisses wurden in einer Datei gespeichert.

Ähnliche Aufgaben wurden bereits in den Veröffentlichungen von Rose et al. (2002) und Wagner et al. (2004) präsentiert. Jedoch erschienen bei diesen beiden Studien die vom Computer generierten Zahlen gleichzeitig auf dem Bildschirm, d. h. die Aufgabe wurde der Versuchsperson komplett präsentiert. Beim jetzigen Experiment werden die Reize dagegen jeweils nach der Antwort der Versuchsperson gezeigt, um die von den Stimuli und den Responses ausgelösten ERPs besser zeitlich zuordnen und einzeln betrachten zu können.

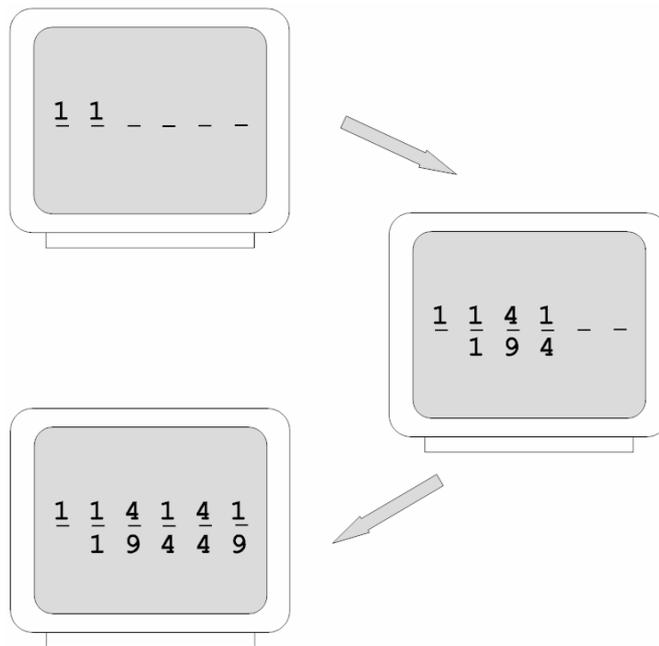


Abbildung 2.2 *Entstehen einer Zahlenreihe mit korrektem Endergebnis.*

horizontale EOG wurde jeweils eine Elektrode rechts und links lateral an den äußeren Rändern der Canthi platziert.

Die EEG- und EOG-Signale wurden durch Bandpassfilterung der Signale vor der Abtastung im Frequenzbereich von 0,03 Hz bis 35 Hz verstärkt und mit einer Abtastrate von 200 Hz abgetastet. Die digitalisierten Signale wurden auf der Festplatte des Aufzeichnungsrechners zusammen mit einem vom Stimulusrechner erzeugten digitalen Code kontinuierlich gespeichert. Dieser Code lieferte Informationen, die bei der Auswertung für die zeitliche Zuordnung der EEG-Daten benötigt wurden (über Blockanfänge, Darbietung der Zahlen, Eingabe der Antworten, Betätigung der Entertaste und Korrektheit der Lösung).

Zur späteren Analyse wurden drei verschiedene Bereiche aus dem kontinuierlich aufgenommenen EEG ausgewählt:

1. eine lange EEG-Epoche von 6 s, beginnend 100 ms vor Erscheinen der sechs weißen Striche. Diese soll dazu dienen, globale Prozesse, repräsentiert durch langsame Wellen, darzustellen.
2. kurze stimulus-bezogene EEG-Epochen von 800 ms, angefangen 100 ms vor Erscheinen der vom Computer generierten Zahl (Stimulus). Insgesamt entstanden fünf kurze stimulus-bezogene Epochen pro Aufgabe, eine für das erste Zahlenpaar und die übrigen vier für die weiteren Stimuli.
3. kurze response-bezogene EEG-Epochen von 800 ms, beginnend 400 ms vor jeder Eingabe. Entsprechend den stimulus-bezogenen Epochen wurden auch hier fünf kurze jetzt response-bezogene Epochen pro Aufgabe gebildet.

Die stimulus- und response-bezogenen Epochen konnten sich bei der Aufnahme überlappen. Als Baseline für die kurzen Epochen wurde die Strecke 100 ms vor dem Stimulus gewählt (im Falle der response-bezogenen Epochen: dem Stimulus, der der eingegebenen Antwort vorausging).

Die Bearbeitung der EEG-Daten erfolgte mit einer von der Arbeitsgruppe selbst entwickelten Software.

Aufgaben mit falschen Lösungen oder mit Nulllinien (Verstärkerblockierungen) sowie Aufgaben mit langsamen Drifts von mehr als 80 μV oder schnellen Shifts größer als 100 $\mu\text{V}/200$ ms wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Die Korrektur der Augenbewegungen fand mittels Subtraktion des

Übertragungskoeffizienten in den EEG Kanälen statt (Einfluss vertikaler Augenbewegungen: siehe Verleger et al., 1982, Einfluss horizontaler Augenbewegungen: siehe Anderer et al., 1992). Nach der Korrektur blieben zur Analyse der langen Epochen im ersten Block und letzten Block vor dem Abbruch zwischen 15 und 43 Aufgaben bei den Lösern (Durchschnitt: 36) und zwischen 30 und 53 bei den Nicht-Lösern (Durchschnitt: 44) übrig. Die Aufgabenanzahl zur Analyse der kurzen Epochen war etwas höher (da durch die kürzere Länge der Epoche das Risiko geringer war, einen Artefakt zu enthalten und deswegen ausgeschlossen zu werden) und lag zum Beispiel bei der stimulus-bezogenen Analyse für das erste Zahlenpaar bei den Lösern zwischen 36 und 51 Aufgaben (Durchschnitt: 44) und bei den Nicht-Lösern zwischen 33 und 53 (Durchschnitt: 49).

Im Anschluss an die Fehlerkorrektur und Ausschluss der nicht zu verwendenden Aufgaben wurden die oben beschriebenen verbliebenen EEG-Strecken über die Aufgaben gemittelt, um ereignisbezogene Potentiale zu erhalten.

2.4 Datenanalyse

Für die statistische Analyse wurden folgende Datensätze verwendet:

1. Daten des ersten Blocks
2. Daten des letzten Blocks vor dem Abbruch des Versuchs

Aufgrund der unterschiedlichen Gruppengröße (20 NL, 6L) wurde den verwendeten Daten eines Löser die entsprechende Datenmenge von drei oder vier zufällig gewählten Nicht-Lösern zugeordnet. Wenn zum Beispiel ein Löser im vierten Block seine Strategie ändert und die Tiefenregel anwendet, bedeutet das, dass zur Erstellung des zweiten Datensatzes sein dritter Block verwendet wird. Zum Vergleich mit diesen Lösern wird von drei oder vier zufällig ausgewählten Versuchspersonen der Nicht-Löser ebenfalls jeweils der dritte Block verwendet.

2.4.1 Reaktionszeiten

Nur korrekte Antworten wurden in die Analyse einbezogen. Die Mittelwerte der Reaktionszeiten wurden statistisch mit einer Varianzanalyse mit Messwiederholungen (ANOVA) analysiert. Die Faktoren Block (erster Block, letzter Block vor dem Abbruch) und Vorhersagbarkeit (2. vs. 5. und 3. vs. 4.) dienten als Messwiederholungen und der Faktor Gruppe (L vs. NL) als „between-subject“ Faktor. Die Analyse wurde getrennt für die Antworten 2 vs. 5 und 3 vs. 4 durchgeführt: Letzteres analysiert den Effekt der unmittelbaren Antwortwiederholung, ersteres prüft ein implizites Verständnis der Tiefenregel. Für eine gemeinsame Analyse aller 4 Antworten wurde zusätzlich noch der die Messwiederholung anzeigende Faktor „Eingabe“ definiert (2 und 5 vs. 3 und 4). Die oben erwähnten Datensätze wurden hierfür verwendet. Mit getrennter Analyse des ersten Blocks soll festgestellt werden, ob es bereits zu Beginn des Versuchs Gruppenunterschiede gab. Die getrennte Analyse des letzten Blocks vor Verhaltensabbruch dient zum Erkennen, ob kurz vor dem Erkennen der Tiefenregel Unterschiede in den Reaktionszeiten bestehen.

2.4.2 ERPs

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, wurden drei verschiedene EEG-Strecken analysiert, zwei kurze stimulus- bzw. response-bezogene Strecken über eine Zeit von jeweils 800 ms und eine lange Strecke mit einer Dauer von 6 s.

In der langen Epoche fiel eine langsame positive Welle (SPW) auf. Zur statistischen Analyse wurden hier fünf verschiedene aufeinander folgende Zeitfenster von 500 ms ausgewählt, angefangen bei 500 bis 3000 ms. Für jedes der fünf Zeitfenster wurde die durchschnittliche Amplitude bestimmt und jeweils eine separate ANOVA mit den Messwiederholungsfaktoren Elektroden (Fz, Cz, Pz), Block (erster Block, letzter Block vor dem Abbruch) und Gruppe (NL, L) durchgeführt.

In den kurzen EEG-Strecken wurden sowohl stimulus- als auch response-bezogene ERP-Komponenten betrachtet. Bei den stimulus-bezogenen ERP-Komponenten fielen unterschiedliche Komponenten auf:

1. eine negative Komponente im Bereich von 100-200 ms nach dem Stimulus im Bereich der zentralen Elektroden („anteriore N1“)
2. eine negative Komponente zwischen 170-280 ms nach dem Stimulus an P7 und P8 („posteriore N1“)
3. eine positive Komponente 200-500 ms nach dem Stimulus mit einem frühen positiven Gipfel bei 250 ms, klassifiziert als „P3a“, und einer tonischen positiven Komponente an den parietalen Elektroden, eingeordnet als „P3b“

Bei den response-bezogenen Komponenten fiel eine positive Welle 200 bis 400 ms nach der Eingabe auf, die wahrscheinlich einer somatosensorischen P3 Komponente entspricht. Diese wird hier als rb-P300 bezeichnet („rb“ bedeutet hierbei „response-bezogen“) und wurde wahrscheinlich durch die somatosensorische Reizung (Reafferenz der Fingerbewegung und Wahrnehmung der Taste) und die visuelle Reizung (Erscheinen der eingegebenen Zahl auf dem Bildschirm) ausgelöst.

Für die anteriore N1 wurde zur Analyse die Gipfelamplitude gemessen, während für die posteriore N1, die P3a, die P3b und die rb-P300 jeweils die Durchschnittsamplitude berechnet wurde.

Zur Analyse dieser ERP-Komponenten wurden ebenfalls die erwähnten Datensätze verwendet (s. o.). Im Vergleich zur bei den langen Epochen

angewendeten ANOVA wurden die ANOVAs für die kurzen Epochen um den Faktor Stimulus (bzw. Response für die rb-P300) mit den Stufen 1 bis 5 erweitert. Der stimulus-bezogene P3 Komplex für das erste Zahlenpaar wurde von der Analyse ausgeschlossen, da er im Prinzip identisch mit dem ersten Teil der SPW ist, der bereits in den langen Epochen analysiert wurde.

Um festzustellen, ob sich das implizite Wissen über die Tiefenregel in den ERPs und den Reaktionszeiten widerspiegelt, wurde zusätzlich statt aller 5 Stimuli oder Eingaben nur jeweils zwei analysiert (2. vs. 5. und 3. vs. 4.). Hierbei bezieht sich der Vergleich 2. vs. 5. Stimulus (bzw. Eingabe) auf die Auswirkungen der indirekten Wiederholung und der Vergleich 3. vs. 4. Stimulus (bzw. Eingabe) auf die der direkten Wiederholung. Damit können Unterschiede zwischen den Gruppen und zwischen den Wiederholungstypen untersucht werden.

Effekte von Messwiederholungs-Faktoren mit mehr als zwei Stufen (entspricht mehr als 1 Freiheitsgrad) wurden mit Hilfe von Greenhouse-Geisser's Epsilon (ϵ) korrigiert. Multiplikation der Freiheitsgrade mit ϵ (dessen Werte zwischen 0 und 1 liegen) bewirkt eine Korrektur der resultierenden p-Werte in konservative Richtung. Um signifikante Interaktionen zu analysieren, wurden kleinere Subsets von Elektroden ausgewählt oder die Daten der Gruppen einzeln analysiert.

3 Ergebnisse

3.1 Postexperimentelle Befragung

Sechs von 26 Versuchspersonen lernten die versteckte Regel der Aufgabe und wendeten sie bewusst an. Dies zeigte sich durch die konsequente Bestätigung der zweiten Eingabe als Endergebnis. Sie wurden als Löser klassifiziert. Einer der Löser beendete die Aufgabe bereits im vierten Block vorzeitig, zwei im sechsten, einer im siebten und zwei im achten Block. Die Versuchspersonen, die die Aufgabe nicht durch vorzeitige Eingaben beendeten, gaben bei der postexperimentellen Befragung ausnahmslos an, keine Regelmäßigkeit im Aufgabenmaterial bemerkt zu haben. Auch nach der Mitteilung, dass die Aufgaben eine Regel beinhalteten, konnte keine dieser Versuchspersonen die korrekte Regel formulieren. Daher wurden sie insgesamt der Gruppe der Nicht-Löser zugeordnet.

3.2 Reaktionszeiten

Die Reaktionszeiten der Löser und der Nicht-Löser für den ersten Block und den letzten Block vor der Erkenntnis sind in Abbildung 3.1 dargestellt.

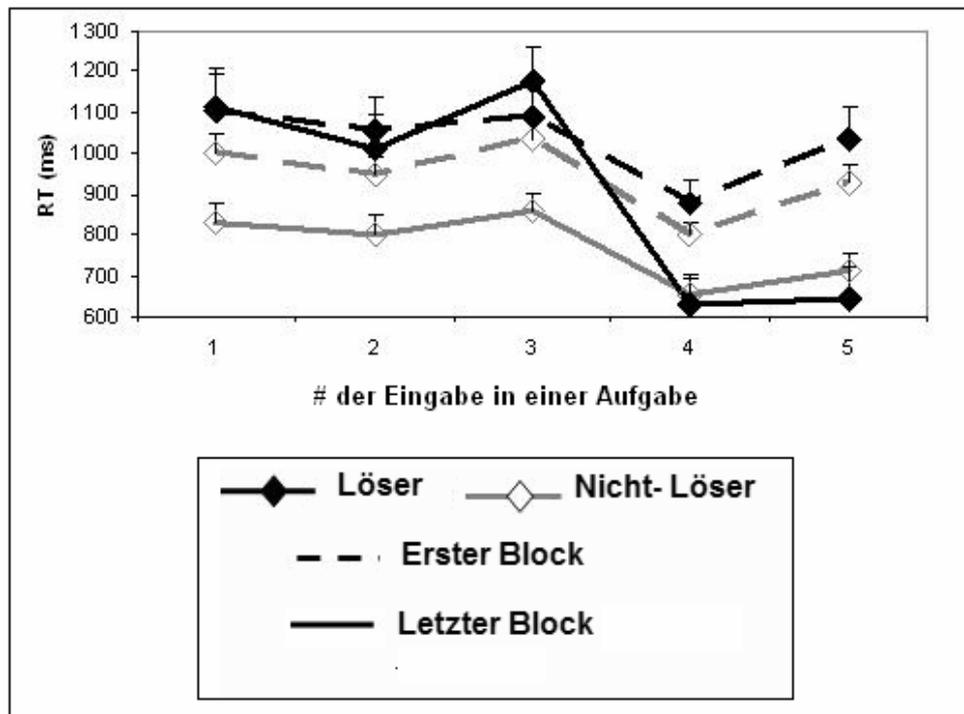


Abbildung 3.1 Mittelwerte und Standardfehler der Reaktionszeiten der Versuchspersonen beider Gruppen im ersten und im letzten Block vor der Erkenntnis.

Analysiert wurden die Reaktionszeiten des ersten Blocks und des letzten Blocks vor der Erkenntnis, zusätzlich wurden speziell die beiden in der Aufgabe enthaltenen Wiederholungstypen, d. h. die direkte Wiederholung (4. gegen 3. Eingabe) und die indirekte Wiederholung (5. gegen 2. Eingabe), wegen ihrer möglichen Relevanz zum Erkennen der versteckten Regel untersucht.

Bei der Analyse über alle Eingaben zeigte die ANOVA eine generelle Abnahme der Reaktionszeiten um durchschnittlich 140 ms vom ersten zum letzten Block (Block: $F(1,24) = 12,64$; $p = 0,002$). Diese spiegelt einen Lernerfolg durch Anpassung der Bearbeitungsstrategien wider.

Das Muster dieser Abnahme über die Eingaben unterschied sich allerdings zwischen den beiden Gruppen, angezeigt durch die Interaktion Block x Gruppe x Eingabe ($F(4,96) = 6,8$; $\eta^2 = 0,54$; $p = 0,002$, Abbildung 3.1). Während die Nicht-Löser über alle fünf Eingaben unabhängig von der Vorhersagbarkeit schneller wurden (Blockeffekt für vorhersagbare Eingaben 4 und 5: $F(1,19) = 17,6$; $p < 0,001$; Blockeffekt für nichtvorhersagbare Eingaben 1 bis 3: $F(1,19) = 13,6$; $p = 0,002$), kam es bei den Lösern nur zu einer Reaktionszeitabnahme für die vorhersagbaren Eingaben vier und fünf (Blockeffekt für vorhersagbare Eingaben 4 und 5: $F(1,5) = 8,7$; $p = 0,03$; Blockeffekt für nichtvorhersagbare Eingaben 1 bis 3: $F(1,5) = 0,5$; n. s.).

Dieser Unterschied führte auch zu Gruppenunterschieden in Hinsicht auf die beiden in der Aufgabe enthaltenen Wiederholungstypen, wie aus der getrennten folgenden Analyse ersichtlich wird.

Bei der direkten Wiederholung (4. gegen 3. Eingabe) wurde die vierte, vorhersagbare Eingabe von beiden Gruppen schneller eingegeben als die dritte, nicht vorhersagbare (Vorhersagbarkeit: $F(1,24) = 84,2$; $p < 0,001$). Dieser Effekt zeigte sich bereits im ersten Block ($F(1,24) = 42,9$; $p < 0,001$) und war in beiden Gruppen eindeutig vorhanden (Löser: $F(1,5) = 18,8$; $p = 0,007$, Nicht-Löser: $F(1,19) = 20,2$; $p < 0,001$). Es bestand kein signifikanter Gruppenunterschied in der Reaktionszeitabnahme für die vierte Eingabe im letzten Block vor der Erkenntnis (Block x Gruppe für die 4. Eingabe: $F(1,24) = 1,5$; n. s.). Bei der dritten Eingabe unterschieden sich jedoch die beiden Gruppen. Während die Reaktionszeit für die dritte Eingabe bei den Lösern im Versuchsverlauf stabil blieb (Blockeffekt für die 3. Eingabe: $F(1,5) = 0,74$; n. s.), wurden die Nicht-Löser im

Verlauf schneller ($F(1,19) = 19,6$; $p < 0,001$). Dies führte dazu, dass die Reaktionszeitdifferenz der vierten gegenüber der dritten Eingabe bei den Lösern im Versuchsverlauf stärker zunahm als bei den Nicht-Lösern (Vorhersagbarkeit x Gruppe: $F(1,24) = 6,1$; $p = 0,02$; Vorhersagbarkeit x Gruppe x Block: $F(1,24) = 11,3$; $p = 0,003$).

Bei der indirekten Wiederholung (5. gegen 2. Eingabe) zeigte sich ebenfalls ein Lerneffekt für beide Gruppen (Vorhersagbarkeit 5. gegen 2. Eingabe: $F(1,24) = 10,6$; $p = 0,003$). Sie wurde also von beiden Gruppen implizit erlernt. Im Gegensatz zur direkten Wiederholung entwickelte sich dieser Lerneffekt jedoch erst im Versuchsverlauf (Block x Vorhersagbarkeit: $F(1,24) = 17,64$; $p < 0,001$) und war im ersten Block noch nicht vorhanden (1. Block: $F(1,24) = 0,3$; n. s.; letzter Block: $F(1,24) = 19,9$; $p < 0,001$). Auch bei dieser Wiederholung nahm die Reaktionszeitdifferenz zwischen der zweiten und der fünften Eingabe bei den Lösern stärker zu als bei den Nichtlösern (Vorhersagbarkeit x Gruppe: $F(1,24) = 3,3$; $p = 0,08$; Vorhersagbarkeit x Block x Gruppe: $F(1,24) = 7,7$; $p = 0,01$), obwohl beide Gruppen die Wiederholung im letzten Block implizit erlernt hatten (Löser: $F(1,5) = 10,2$; $p = 0,024$; Nicht-Löser: $F(1,19) = 4,0$; $p = 0,06$). Wie bei der direkten Wiederholung liegt die Begründung für die größere Reaktionszeitdifferenz der Löser in der langsameren, von der Reaktionszeit stabil bleibenden Eingabe der nicht vorhersagbaren zweiten Eingabe (Block für die 2. Eingabe: $F(1,5) = 1,0$; n. s.), während die Reaktionszeit für die zweite Eingabe bei den Nicht-Lösern abnahm und damit zu einer geringeren Reaktionszeitdifferenz führte ($F(1,19) = 10,8$; $p = 0,004$). Die vorhersagbare fünfte Eingabe wurde dagegen, wie bei der direkten Wiederholung die vierte Eingabe, von beiden Gruppe in gleichem Ausmaß schneller eingegeben (Block x Gruppe für die 5. Eingabe: $F(1,24) = 2,2$; $p = 0,16$). Die Unterschiede für die wesentliche indirekte Wiederholung sind in Abbildung 3.2 dargestellt.

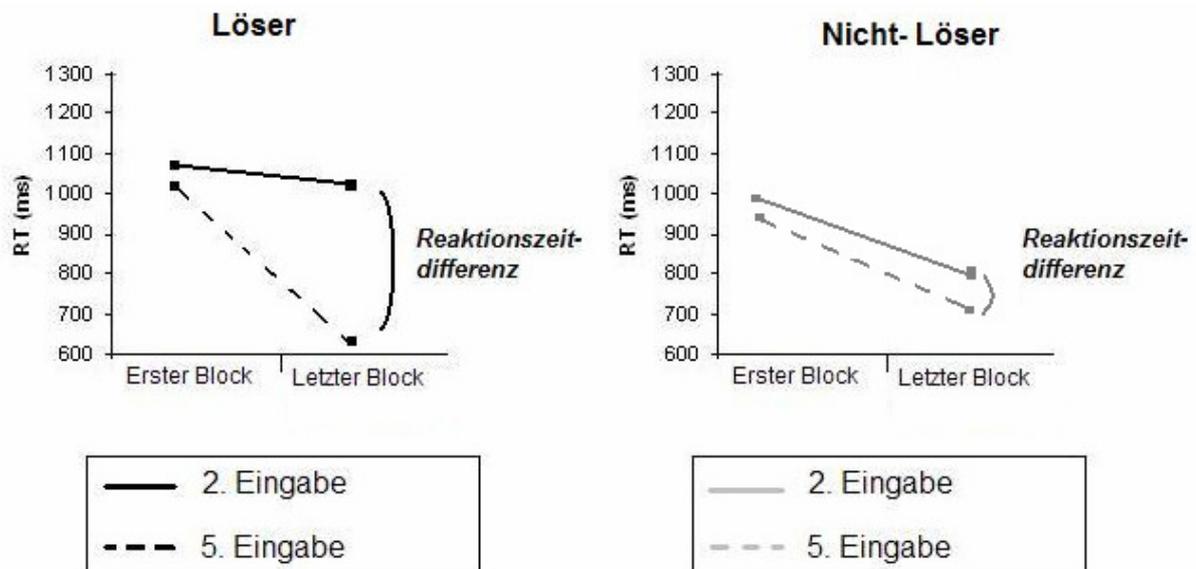


Abbildung 3.2 Durchschnittliche Reaktionszeiten für die indirekte Wiederholung (2. und 5. Eingabe), getrennt nach Lösern und Nicht-Lösern.

3.3 EEG

3.3.1 Lange Epochen

Aus dem EEG wurden lange Epochen von 6 s, beginnend bei Aufgabenbeginn, isoliert, um langsame Potentialverschiebungen zu untersuchen, die sich während der Aufgabe entwickeln. Die gemittelten ERP Wellenformen sind in Abbildung 3.3 für den ersten Block und Abbildung 3.4 für den letzten Block vor der Erkenntnis dargestellt.

Der Zeitpunkt Null ist hierbei durch das Erscheinen des ersten Zahlenpaars definiert. Die weiteren Stimuli und Antworteingaben folgten diesem in variierenden Abständen, so dass die gemittelte Wellenform der langen Epochen nicht zur Analyse der von diesen Ereignissen evozierten Potentiale herangezogen werden können. Sie werden daher getrennt in den kurzen Epochen untersucht (s. u.).

In Abbildung 3.3 und 3.4 tritt bereits etwa 500 ms vor dem Erscheinen des ersten Zahlenpaars, d. h. vor dem Zeitpunkt Null, ein visuelles Potential auf, das durch das Auftreten der Fixationslinie hervorgerufen wird. Es wird nicht zur weiteren Analyse herangezogen.

Die Präsentation des ersten Zahlenpaars rief daraufhin bestimmte Potentiale hervor, die durch folgende Charakteristika gekennzeichnet sind:

1. ein negativer Gipfel bei 120 ms, am ausgeprägtesten an Fz („N1“)
2. ein positiver Gipfel bei 250 ms, vor allem an Cz („P2“)
3. eine lang andauernde, langsame positive Welle, besonders hervorstechend an Pz („SPW“), in der weitere Komponenten enthalten sind (z. B. die N2, besonders ausgeprägt an Cz, oder die P3, besonders ausgeprägt an Pz).

Von besonderem Interesse für die weitere Analyse ist die an Pz am stärksten ausgeprägte SPW.

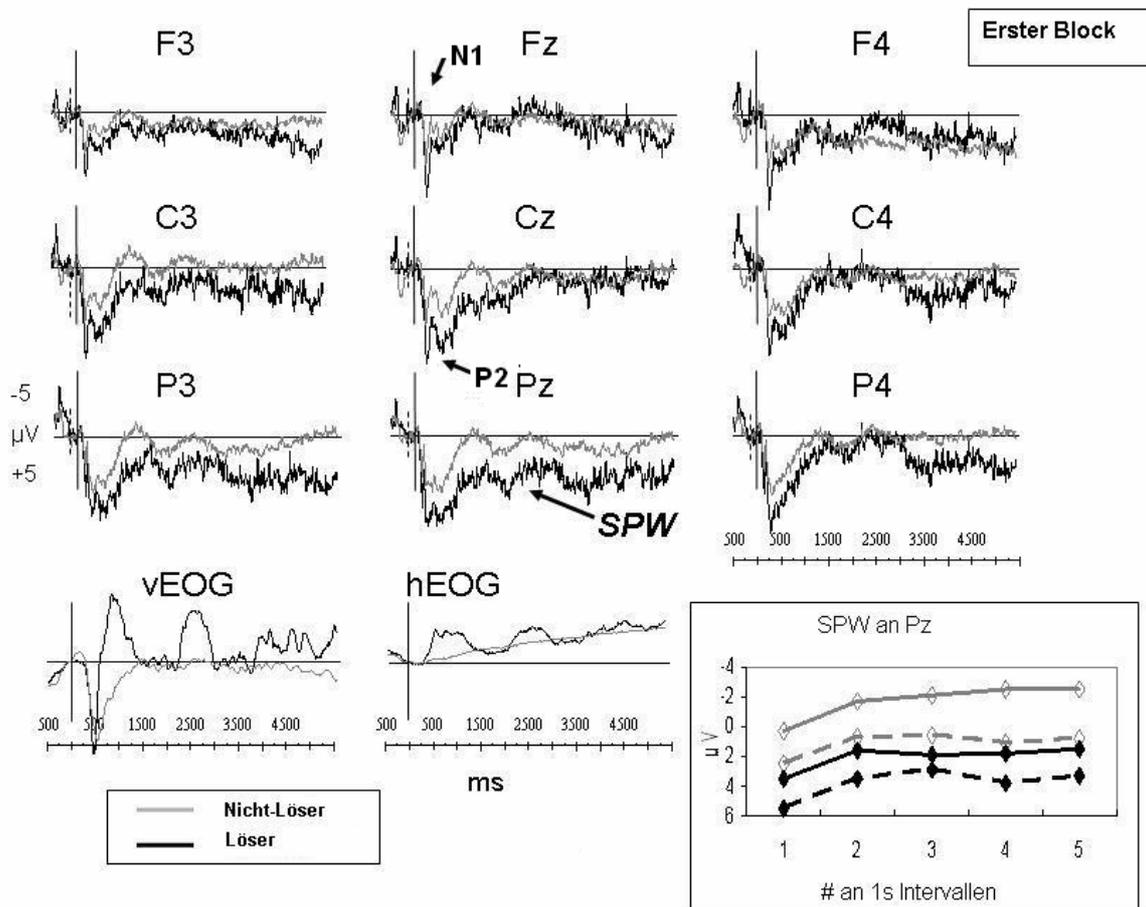


Abbildung 3.3 Analyse der langen Epochen des ersten Blocks getrennt für die Löser und Nicht-Löser.

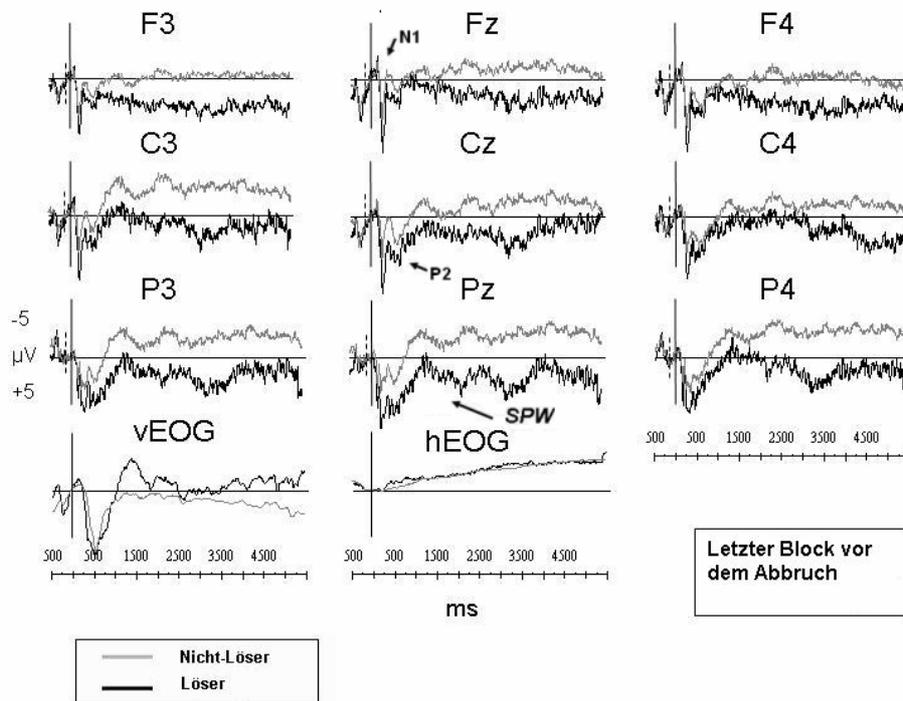


Abbildung 3.4 Analyse der langen Epochen des letzten Blocks vor der Erkenntnis getrennt für die Löser und Nicht-Löser.

Zur Analyse der langsamen positiven Welle wurde ein langes Zeitintervall von 0,2 s bis 5 s nach dem Erscheinen des ersten Zahlenpaars herangezogen. Außerdem wurden fünf aufeinander folgende Zeitfenster von 1 s, beginnend bei 0,2 s und endend bei 5,2 s, separat analysiert.

Im langen Zeitintervall von 0,2 s bis 5 s war die SPW bei den Lösern tendenziell größer als bei den Nicht-Lösern ($F(1,24) = 3,14$; $p = 0,09$). Diese Tendenz wurde signifikant, wenn man die Analyse auf die Elektrode Pz beschränkte ($F(1,24) = 5,6$; $p = 0,03$). Weiterhin wurde der Unterschied signifikant, wenn statt des gesamten Intervalls von fünf Sekunden nur die mittlere Amplitude der ersten Sekunde analysiert wurde (200-1200 ms: $F(1,24) = 5,1$; $p = 0,03$; $F(1,24) < 2,45$, $p > 0,12$ für die folgenden Zeitfenster). In beiden Gruppen nahm die Amplitude der SPW an Pz vom ersten zum letzten Block vor der Erkenntnis ab (Block x Elektrode: $F(2,48) = 4,5$; $\epsilon = 0,96$; $p = 0,02$; Blockeffekt an Pz: $F(1,24) = 8,8$; $p = 0,008$).

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der relevanten Parameter sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

			SPW: Pz	N1: Cz	P3a: Fz	P3b: Pz	rb-P300: Pz
Löser	Erster Block						
		1	5,5 (3,3)	-0,8 (1,1)	3,9 (1,8)	6,2 (3,3)	-3,9 (4,1)
		2	3,5 (3,8)	-2,8 (1,6)	4,0 (2,7)	2,9 (3,1)	-3,9 (4,1)
		3	2,9 (3,9)	-2,3 (1,6)	4,4 (2,3)	3,8 (2,5)	-2,1 (3,8)
		4	3,8 (4,3)	-2,5 (2,0)	3,5 (2,9)	2,4 (4,0)	-2,4 (3,3)
		5	3,3 (3,4)	-2,0 (2,5)	3,1 (1,2)	2,5 (2,1)	-0,8 (3,4)
	Letzter Block						
		1	3,5 (3,7)	-1,2 (1,2)	3,2 (2,1)	4,4 (3,2)	-2,2 (2,6)
		2	1,6 (4,4)	-3,5 (1,5)	3,2 (2,1)	4,4 (3,2)	-4,6 (2,6)
		3	1,9 (3,9)	-1,7 (1,6)	3,4 (2,5)	2,6 (2,3)	-2,6 (4,2)
		4	1,8 (3,7)	-1,6 (1,0)	3,0 (1,6)	1,4 (0,6)	-6,1 (3,4)
		5	1,5 (3,4)	-3,5 (2,4)	3,3 (1,5)	1,0 (1,8)	-1,8 (2,3)

			SPW: Pz	N1: Cz	P3a: Fz	P3b: Pz	rb-P300: Pz
Nicht-Löser	Erster Block						
		1	2,5 (2,7)	-1,7 (3,5)	1,5 (3,2)	3,9 (2,3)	-4,1 (3,8)
		2	0,7 (3,6)	-1,2 (1,9)	2,5 (1,5)	2,8 (2,7)	-4,1 (3,8)
		3	0,6 (3,1)	-1,0 (1,5)	2,0 (1,4)	3,2 (2,4)	-4,0 (3,0)
		4	1,1 (3,3)	-0,8 (2,2)	2,2 (1,4)	2,4 (3,0)	-4,4 (3,3)
		5	0,8 (2,8)	-1,1 (1,7)	2,1 (2,0)	2,7 (3,1)	-1,7 (2,2)
	Letzter Block						
		1	0,3 (2,5)	-2,1 (3,0)	1,1 (3,2)	1,9 (1,9)	-3,1 (3,7)
		2	-1,7 (3,9)	-1,7 (2,1)	2,4 (2,4)	1,8 (2,0)	-4,0 (3,2)
		3	-2,1 (4,5)	-1,8 (1,7)	2,1 (1,7)	1,5 (2,7)	-4,1 (2,8)
		4	-2,5 (5,1)	-1,3 (2,1)	2,8 (1,9)	2,1 (2,6)	-5,3 (4,8)
		5	-2,5 (4,3)	-1,8 (2,9)	1,8 (1,6)	1,9 (3,1)	-2,2 (2,2)

Tab. 3.1 Mittelwerte und Standardabweichungen von relevanten Parametern. Die Einheit ist Mikrovolt. „1 2 3 4 5“ (dritte Spalte) bezeichnet die Anzahl an 1 s Intervallen (beginnend bei 0,2 s) für die SPW, die Nummer des Stimulus für die Stimulus-bezogenen Komponenten N1, P3a, P3b und die Nummer der Eingabe für die reaktionsbezogene Komponente rb-P300.

3.3.2 Kurze Epochen

3.3.2.1 Stimulus-bezogene ERPs

Die nach jedem Stimulus aufgenommenen kurzen Epochen von 700 ms sind für die Daten der Mittellinienelektroden in Abbildung 3.5 und für die lateralen posterioren Elektroden in Abbildung 3.6 dargestellt.

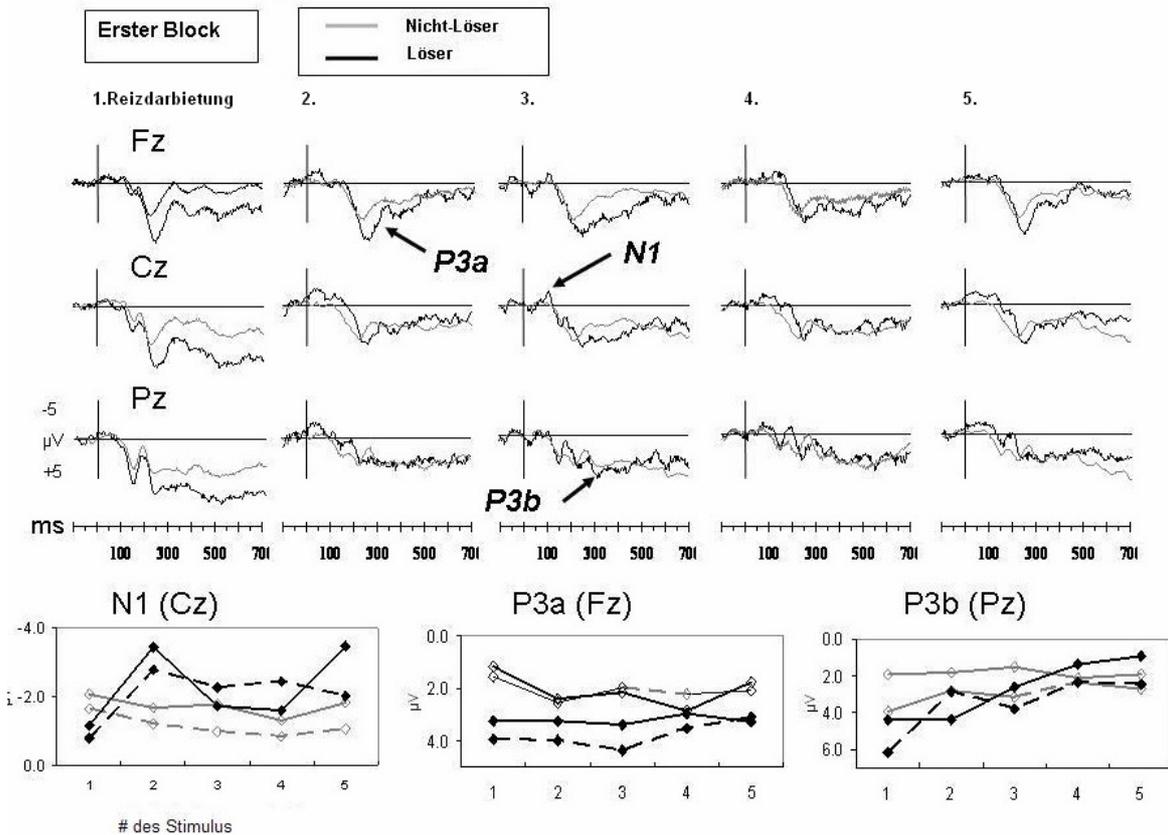


Abbildung 3.5 Gemittelte ERP Wellenformen für jede Reizdarbietung, gemittelt über die Aufgaben des ersten Blocks, getrennt für die Löser und Nicht-Löser. Der Nullpunkt zeigt den Beginn der Reizdarbietung an. Kleine Abbildungen: Mittelwerte der Amplituden der N1 (Cz), P3a (Fz) und P3b (Pz) für die Versuchspersonen. Die schwarzen Linien beziehen sich auf die Löser, die grauen auf die Nicht-Löser. Gestrichelte Linien zeigen die Werte des ersten Blocks, durchgezogene Linien die des letzten Blocks vor der Erkenntnis.

Zwei stimulus-bezogene Komponenten sind in den Abbildungen sichtbar und werden hier näher analysiert. In der Mittellinie erscheint zuerst die anteriore N100 als mehr oder weniger abgegrenzter negativer Gipfel um 120 ms sichtbar, die z. T. (z. B. für den zweiten und fünften Stimulus an Cz und Pz) auf eine langsamere

negative Welle aufgesetzt zu sein scheint. Ihr folgt ein später positiver Komplex, hier als P3 bezeichnet, der sich aus einem Gipfel an Fz und Cz („P3a“) und einer positiven Welle an den central-parietalen Elektroden („P3b“) zusammensetzt.

Die Amplitude der N1 für die einzelnen Stimuli war tendenziell unterschiedlich in den beiden Gruppen, wie die Interaktion Stimulus x Gruppe anzeigte ($F(4,96) = 2,65$; $p = 0,069$). Sie wurde daher für die beiden unterschiedlichen Vorhersagbarkeitstypen (zweiter vs. fünfter Stimulus und dritter vs. vierter Stimulus) separat analysiert. Die N1-Amplitude der entscheidenden Wiederholung, der indirekten Wiederholung (zweiter vs. fünfter Stimulus), war bei den Lösern signifikant größer als bei den Nicht-Lösern (Gruppeneffekt: $F(1,24) = 5,4$; $p = 0,03$). Im Gegensatz dazu unterschied sich die Amplitude der N1 bei der direkten Wiederholung (dritter vs. vierter Stimulus) bei den Gruppen nicht (Gruppe: $F(1,24) = 0,4$; n. s.; Gruppe x Vorhersagbarkeit: $F(1,24) = 0,8$; n. s.).

Die posteriore N1 an den Elektroden P7 und P8 zeigte dagegen keine Gruppenunterschiede (Gruppe: $F(1,24) = 0,2$; n. s.; Gruppe x Stimulus: $F(4,96) = 0,2$; n. s.) und wird von daher nicht weiter auf Unterschiede für die beiden Wiederholungstypen analysiert.

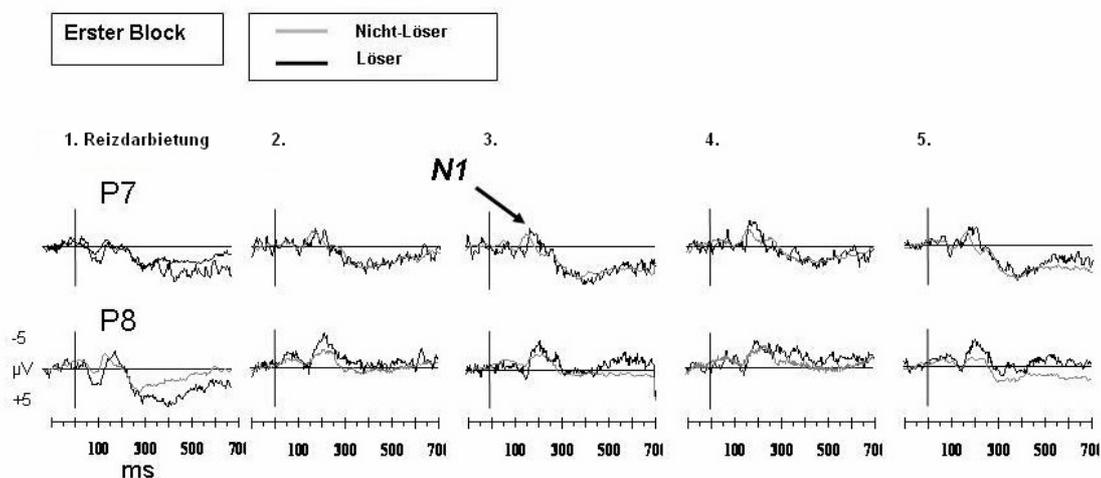


Abbildung 3.6 Gemittelte ERP Wellenformen an den Elektroden P7 und P8 für jede Reizdarbietung, gemittelt über die Aufgaben des ersten Blocks, getrennt für die Löser und Nicht-Löser. Der Nullpunkt zeigt den Beginn der Reizdarbietung an.

Der P3-Komplex wurde nur vom zweiten bis zum fünften Stimulus analysiert, um eine Replikation des SPW Effekts, der klar für das erste Stimuluspaar gesehen

wurde, zu vermeiden. Bei der Analyse zeigte sich ein signifikant größerer P3 Komplex für die Löser als für die Nicht-Löser an Fz ($F(1,24) = 5,1; p = 0,034$). Diese spiegelt die P3a Komponente wider. Aufgrund der Interaktion von Block x Elektrode x Stimulus x Gruppe ($F(6, 144) = 3,3; p = 0,02$) wurde die indirekte Wiederholung und die direkte Wiederholung separat untersucht. Die hier gefundenen Gruppenunterschiede sind in Abbildung 3.7 dargestellt. Es zeigte sich bei der Analyse für die indirekte Wiederholung ausschließlich bei den Lösern im letzten Block vor der Erkenntnis eine größere P3b an Pz für den zweiten Stimulus im Vergleich zum fünften Stimulus (Vorhersagbarkeitseffekt: $F(1,5) = 5,1; p = 0,07$ bei den Lösern; $F(1,19) = 0,0; n. s.$ bei den Nicht-Lösern; siehe Abbildung 3.7). Des Weiteren war der P3-Komplex ebenfalls nur bei den Lösern größer für den dritten als für den vierten Stimulus. Dieser Unterschied zeigt sich über alle Blöcke (Vorhersagbarkeitseffekt ($F(1,5) = 11,4; p = 0,02$ für die Löser; $F(1,19) = 2,3; p = 0,15$ für die Nicht-Löser). Der Effekt war am stärksten ausgeprägt an Pz ($F(1,5) = 25,4; p = 0,004$) und reflektiert damit am ehesten den P3b Anteil am P3-Komplex.

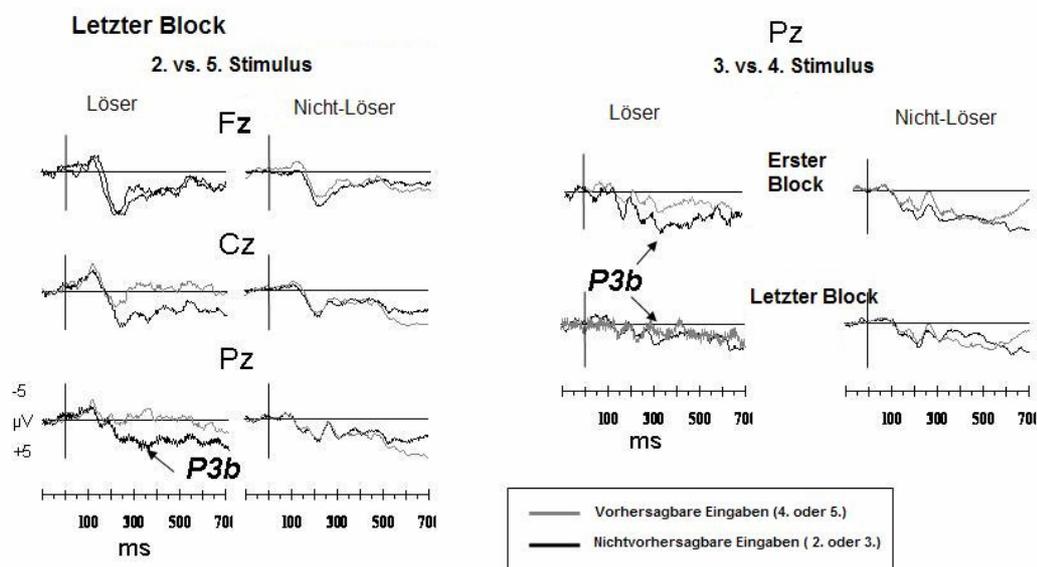


Abbildung 3.7 Gemittelte ERP-Wellen, hervorgerufen durch die Stimuli, die mit der direkten und indirekten Wiederholung verbunden sind.

Links: Gemittelte ERP-Wellen an den Mittellinien- Elektroden für die indirekten Wiederholung im letzten Block vor der Erkenntnis.

Rechts: Gemittelte ERP-Wellen, aufgenommen an Pz, für die direkte Wiederholung, separat für den ersten Block und den letzten Block vor der Erkenntnis.

3.3.2.2 Reaktionsbezogene ERPs

Die gemittelten reaktionsbezogenen ERPs des letzten Blocks vor der Erkenntnis sind in Abbildung 3.8 und in Tabelle 3.1 dargestellt. Besondere Aufmerksamkeit sollte der positiven Komponente, die der Eingabe folgt, geschenkt werden, da sie möglicherweise eine eigene Beurteilung der Eingabe von der Versuchsperson darstellt. Diese rb-P300 war am größten für die erste und die letzte Eingabe (Eingabe: $F(4,96) = 5,3$; $\epsilon = 0,61$; $p = 0,005$). Im letzten Block vor dem Abbruch (siehe Abbildung 3.8) rief jedoch nur noch die letzte Eingabe eine größere rb-P300 hervor als alle anderen Eingaben (Eingabe x Block: $F(4,96) = 3,6$; $\epsilon = 0,77$; $p = 0,02$). Es fanden sich jedoch keine Gruppenunterschiede.

Nur wenn trotzdem separate Vergleiche zwischen Lösern und Nicht-Lösern für jede Elektrode, jeden Block und jeden Vorhersagbarkeitstyp gemacht werden, um Beweise für die a-priori Hypothese des „unexpected events“ zu finden, fand sich eine Tendenz für einen Gruppeneffekt an Pz im letzten Block vor dem Abbruch für die direkte Wiederholung (dritte vs. vierte Eingabe: $F(1,24) = 3,3$; $p = 0,08$).

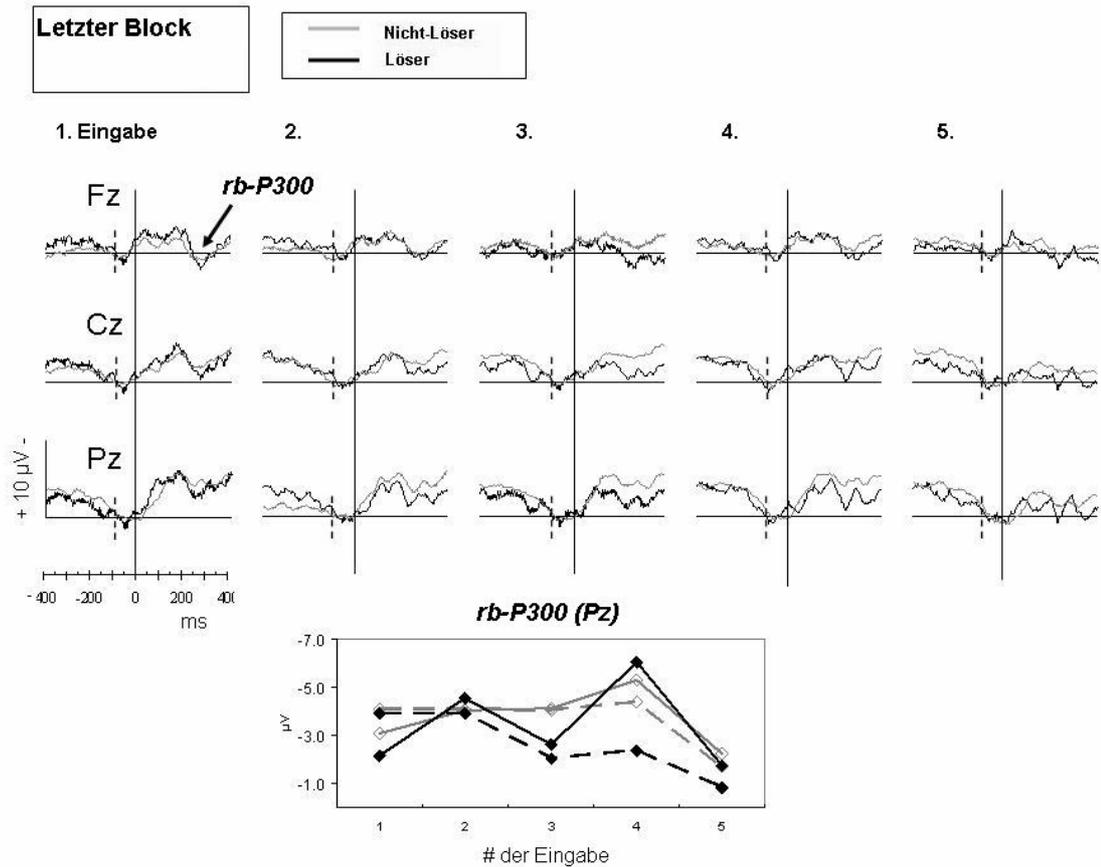


Abbildung 3.8 Durchschnittliche ERP Wellen der Löser und Nicht-Löser während des letzten Blocks vor der Erkenntnis, gemittelt auf die Eingabe. Der Nullpunkt zeigt den Zeitpunkt der Eingabe durch die Versuchspersonen an.

Kleine Abbildung: Mittelwerte der Amplituden der *rb-P300* (Pz) für die Versuchspersonen. Die schwarzen Linien beziehen sich auf die Löser, die grauen auf die Nicht-Löser. Gestrichelte Linien zeigen die Werte des ersten Blocks, durchgezogene Linien die des letzten Blocks vor der Erkenntnis.

4 Diskussion

4.1 Diskussion der Reaktionszeitergebnisse

Ziel dieser Studie war es, Vorboten für das explizite Lernen zu finden und Einblicke in die Mechanismen der Entstehung von explizitem Wissen zu gewinnen. Hierzu mussten die Versuchspersonen Aufgaben nach bestimmten Regeln bearbeiten, die ihnen zu Beginn des Versuchs unbekannt waren. Zusätzlich konnten sie, wie im Methodenteil ausführlich dargestellt, während des Versuchs eine in der Aufgabenstruktur enthaltene Tiefenregel erlernen, die eine Optimierung der Bearbeitungsstrategie ermöglichte.

Anhand ihres Verhaltens ließen sich die Versuchspersonen postexperimentell zwei Gruppen zuordnen:

1. den Lösern, die Einblick in die Tiefenregel erhielten und sie im Versuchsverlauf bewusst anwandten.
2. den Nicht-Lösern, die die Regel nicht bewusst erlernten und auch in der postexperimentellen Befragung angaben, keine Struktur in der Aufgabe wahrgenommen zu haben.

Die Einordnung der Versuchspersonen in die beiden Gruppen war eindeutig, da sich der Strategiewechsel durch eine Reduktion der manuellen Eingabenzahl zeigte. Falsche Zuordnungen von Versuchspersonen, die die Tiefenregel zwar erkannt, aber nicht angewendet haben, wurden durch die postexperimentelle Befragung ausgeschlossen. Durch den experimentellen Aufbau war es zusätzlich möglich, den Zeitpunkt des Strategiewechsels zu bestimmen. Dieser lag zwischen dem vierten und dem achten Block.

Wie in vorangegangenen Studien war die Gruppe der Löser in der Unterzahl. Sie lag bei 6 von 26 Versuchspersonen (23%). Dies entspricht in etwa dem Anteil der Löser in der Studie von Wagner et al. (2004), die ebenfalls eine Variante der NRT verwendete. Die erhöhte Schwierigkeit durch das sukzessive Erscheinen der Stimuli in den hier verwendeten Aufgaben im Vergleich zur simultanen Präsentation bei Wagner et al. (2004) konnte von daher wie erwartet durch die Reduktion der Aufgabenlänge von acht auf sechs Eingaben kompensiert werden (siehe Einleitung).

Im Versuchsverlauf zeigten alle Teilnehmer eine Abnahme der Bearbeitungszeit der einzelnen Aufgaben. Bei der detaillierten Analyse der Reaktionszeiten konnte sowohl für die Löser als auch für die Nicht-Löser eine stärkere Abnahme der Reaktionszeiten für die vorhersagbaren Eingaben im Vergleich mit den nicht vorhersagbaren Eingaben festgestellt werden. Dieses Ergebnis stimmt mit den Beobachtungen anderer NRT-Studien überein, in denen sich ebenfalls eine stärkere Abnahme der Reaktionszeiten für vorhersagbare Eingaben zeigte. Auch in diesen Studien war die Reaktionszeitabnahme unabhängig davon, ob die Versuchspersonen die Regel bewusst erlernten (Frensch et al., 2002; Rose et al., 2004, Rose et al., 2002, Wagner et al., 2004). Diese Reaktionszeitabnahme kann auf zwei verschiedene Arten interpretiert werden:

1. Sie kann die Folge von impliziten Lernvorgängen sein.
2. Sie kann durch die Position der vorhersagbaren Eingaben in der Aufgabe bedingt sein, da diese stets am Ende der Aufgabe stehen.

Auf die zweite Interpretation wurde bereits von Rose et al. (2004) näher eingegangen. In ihrem Versuch verwendeten die Autoren ebenfalls eine Variation der Number Reduction Task, in der, wie in der hier verwendeten Variation, die letzten Eingaben aufgrund der Aufgabenstruktur vorhersagbar waren. Um auszuschließen, dass die letzten Eingaben nur aufgrund ihrer Position innerhalb der Aufgabe schneller bearbeitet wurden, fügten Rose et al. (2004) in den letzten Block ihrer Studie Aufgaben ein, die nicht der versteckten Regelmäßigkeit folgten. Es zeigte sich ein signifikanter Anstieg der Reaktionszeiten für die Aufgaben ohne versteckte Regelmäßigkeit. Dies lässt darauf schließen, dass die Reaktionszeitdifferenzen tatsächlich auf implizites Wissen zurückzuführen sind. Daraus lässt sich analog annehmen, dass auch in diesem Experiment sowohl die Löser als auch die Nicht-Löser implizites Wissen über die versteckte Regelmäßigkeit erwarben.

Interessant war die Erkenntnis, dass die Reaktionszeitdifferenz zwischen den vorhersagbaren und den nicht vorhersagbaren Eingaben bei den Lösern ausgeprägter war als bei den Nicht-Lösern (siehe Abbildung 3.2). Dies traf sowohl auf die direkte als auch auf die indirekte Wiederholung zu. Eine mögliche Erklärung für dieses Ergebnis könnte darin liegen, dass beide Wiederholungen von den Lösern stärker implizit erlernt wurden und damit die vorhersagbaren

Eingaben von dieser Gruppe schneller eingegeben wurden. Die größere Reaktionszeitdifferenz war jedoch nicht auf eine konstant schnellere Eingabe der vorhersagbaren Eingabe zurückzuführen, sondern konnte nur durch eine konstant langsamere Eingabe der nichtvorhersagbaren Eingaben bei den Lösern erklärt werden.

Die Nicht-Löser gaben im Versuchsverlauf alle Eingaben, die vorhersagbaren wie auch die nicht vorhersagbaren, schneller ein, wobei jedoch die vorhersagbaren aufgrund des impliziten Lernens der versteckten Regelmäßigkeit eine stärkere Reaktionszeitabnahme aufwiesen als die nicht vorhersagbaren Eingaben. Dieses Ergebnis in der Gruppe der Nicht-Löser stimmt mit den Erwartungen überein, da die nicht vorhersagbaren Eingaben durch den allgemeinen Lernerfolg, der detailliert in der Einleitung beschrieben wurde, ebenfalls im Versuchsverlauf schneller werden sollten. Entgegen dieser Erwartung zeigten die Löser jedoch keine Reaktionszeitverkürzung für die nicht vorhersagbaren Eingaben im Versuchsverlauf, was als Ausbleiben des allgemeinen Lernerfolgs interpretiert werden kann.

Ein ähnlicher Unterschied wurde bereits von Wagner et al. (2004) beschrieben. Die Autoren untersuchten in ihrer Studie den Einfluss von Schlaf auf explizite Lernprozesse. Hierfür ließen sie ebenfalls Versuchspersonen eine Variation der Number Reduction Task mit einer enthaltenen Tiefenregel bearbeiten. Nach drei Blöcken beendeten sie jedoch das sogenannte initiale Training und ließen einen Teil der Versuchspersonen schlafen, während eine andere Versuchspersonengruppe wach bleiben musste. Im Anschluss wurden wiederum mehrere Aufgabenblöcke von den Versuchspersonen bearbeitet. Anhand ihrer Leistungen wurden die Teilnehmer postexperimentell in die Gruppe der Löser oder der Nicht-Löser eingeteilt. Neben einer signifikanten Zunahme des Anteils der Löser in der Gruppe, die nach dem initialen Training schlafen durfte, zeigte sich bei den späteren Lösern bereits im initialen Training eine langsamere Eingabe der ersten nicht determinierten Eingaben im Vergleich zur Eingabe durch die späteren Nicht-Löser. Noch auffälliger war das Ausbleiben der Reaktionszeitabnahme für die nicht determinierten Eingaben bei den späteren Lösern, die zwischenzeitlich schlafen durften.

Die Autoren schlugen als Erklärung für diesen Effekt vor, dass die langsamere Reaktionszeit der Löser für die nichtvorhersagbaren Eingaben auf Suchprozesse

und die Analyse der Aufgaben zurückzuführen sein könnte. Die langsamere Reaktionszeit soll durch eine beginnende Repräsentation der versteckten Regel bedingt sein, die andere Lernprozesse in den Hintergrund drängt. Eine ähnliche Beobachtung wie Wagner et al. (2004) machten Jimenez et al. (1996) beim Vergleich von Versuchspersonen, die aufgefordert wurden bei einer SRT nach einer der Aufgabe zu Grunde liegenden Regel zu suchen, mit Versuchspersonen, die keinerlei Information über die Existenz dieser Regel erhielten. Die Teilnehmer, die über die Regel informiert wurden und entsprechend nach ihr suchten, wiesen längere Reaktionszeiten bei der Eingabe der Responses auf. Die Autoren führten den Reaktionszeitunterschied ebenfalls auf Suchprozesse zurück.

Eine andere Erklärung für das Ausbleiben des allgemeinen Lernerfolgs bei den Lösern wäre eine Interaktion zwischen dem allgemeinen Lernerfolg und dem expliziten Lernen. Möglicherweise verhindert das allgemeine Lernen das Auftreten des expliziten Lernens dadurch, dass die Versuchspersonen beim allgemeinen Lernen mit zu vielen irrelevanten Details beschäftigt sind. Auf diese Weise könnten sie, d. h. die Gruppe der Nicht-Löser, „den Wald vor lauter Bäumen übersehen“. Unter Annahme von Logans „Instance Model of Automaticity“ könnte bei den Lösern auch der algorithmusbasierte Lösungsweg erhalten bleiben und nicht durch den im Verlauf schnelleren gedächtnisbasierten ersetzt werden, so dass nach einer weiteren Verbesserung der Algorithmen gesucht wird, was zum Beispiel zum expliziten Erkennen der Tiefenregel führen könnte.

Zu beachten ist allerdings, dass dieses Fehlen des allgemeinen Lernerfolgs nicht in allen Studien zum expliziten Lernen auftritt. In neuen Studien von Haider und Frensch konnte dieses Fehlen nicht nachgewiesen werden (Haider und Frensch, in Vorbereitung). Daher kann dieser Zusammenhang bis jetzt nicht eindeutig geklärt werden und könnte auf die spezielle Version der Aufgaben mit der sukzessiven Präsentation der Stimuli zurückzuführen sein.

In Hinblick auf die Fragestellung dieser Studie lässt sich anhand der diskutierten Reaktionszeitunterschiede der beiden Gruppen festhalten, dass sich diese Unterschiede nicht als Vorboten für die Entstehung von explizitem Wissen eignen. Dies liegt vor allem daran, dass sich die Unterschiede erst im Versuchsverlauf entwickeln.

Zur Klärung der weiteren Fragestellung über die möglichen Beziehungen zwischen implizitem und explizitem Lernen wurden in der Einleitung drei Hypothesen beschrieben:

- Hypothese 1: Die Zunahme des impliziten Wissens führt dazu, dass dieses in explizites Wissen umgewandelt wird (Transformationshypothese).
- Hypothese 2: Explizites und implizites Wissen werden durch zwei unterschiedliche Lernsysteme erlernt (Zwei-Systeme-Hypothese).
- Hypothese 3: Die Zunahme des impliziten Wissens induziert Suchprozesse, die zum bewussten Erkennen der Regel führen (Interaktions- oder „unexpected event“-Hypothese).

Die Ergebnisse der Reaktionszeitanalyse scheinen gegen die erste Hypothese zu sprechen, da nicht das implizite Lernen bei den Lösern ausgeprägter ist, sondern die Reaktionszeitdifferenzen auf das Ausbleiben des allgemeinen Lernerfolgs zurückzuführen sind. Dieses Ergebnis ist am ehesten mit der Hypothese 2 vereinbar, da das explizite Lernen anscheinend nicht vom Ausmaß des impliziten Wissens abhängig ist. Die fehlende Abhängigkeit wäre dadurch zu erklären, dass die beiden Lernformen auf unabhängigen Prozessen beruhen. Die langsameren Reaktionszeiten der nichtvorhersagbaren Eingaben könnten dann entweder auf eine Interaktion zwischen dem allgemeinen Lernen und dem explizitem Lernen oder durch Analyse und Suchprozesse bedingt sein. Allerdings lässt sich die dritte Hypothese nicht durch die Reaktionszeiten ausschließen, da die langsameren Reaktionszeiten auf explizite Suchprozesse basieren könnten. Diese könnten bereits durch ein aufgrund der Gruppengröße nicht registriertes „unexpected event“ ausgelöst worden sein.

4.2 Diskussion der ERP-Ergebnisse

Das Ziel dieser Arbeit ist es zu untersuchen, ob Vorböten im EEG vorhanden sind, mit deren Hilfe sich vorhersagen lässt, ob eine Versuchsperson die Tiefenregel explizit erlernen wird. Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der ermittelten ERPs (ereignisbezogene Potentiale) hinsichtlich ihrer Eignung als Vorläufer diskutiert.

Des Weiteren werden sie auf ihre Aussagen zu den zum expliziten Wissen führenden Mechanismen geprüft. Eine Übersicht über die Gruppenunterschiede zeigt Tabelle 4.1.

Unterschiede zwischen Lösern und Nicht-Lösern		
Bereits im ersten Block:	Im letzten Block vor dem Abbruch:	Über alle Blöcke:
Größere P3a Amplitude für alle Stimuli bei den Lösern.	Niedrigere P3b Amplitude für den 5. Stimulus bei den Lösern.	Tendenziell größere parietale SPW bei den Lösern.
Niedrigere P3b Amplitude für den 4. Stimulus bei den Lösern.		
Größere N1 Amplitude für den 2. und 5. Stimulus bei den Lösern.		

Tab. 4.1 Zusammenfassung der Unterschiede zwischen Lösern und Nicht-Lösern in den ERPs.

Als auffälliger Gruppenunterschied zeigte sich eine bei den Lösern größere, parietal betonte langsame positive Welle in den langen EEG-Epochen im gesamten Versuchsverlauf. Diese in Abbildung 3.3 und 3.4 dargestellte Welle umfasst ein relativ langes Zeitintervall, das die Präsentation der ersten drei Stimuli erfasst und wahrscheinlich noch länger anhält (Der Hochpassfilter von 0,03 Hz, der bei der Aufnahme der EEG-Signale verwendet wurde, schwächte diese langsame Welle im Zeitverlauf ab, da diese Verstärkereinstellung zu einer Reduzierung jedes konstanten Signals auf 1/3 des Ausgangswertes nach 5 s führt.).

Langsame Wellen stehen typischerweise mit Arbeitsgedächtnisprozessen in Verbindung (Ruchkin et al., 2003). Die Polarität und Topographie dieser

langsamen Wellen variieren dabei je nach Versuchsbedingung. Das führt zur Annahme, dass sie durch die Aktivierung verschiedener neuronaler Quellen entstehen, die mit spezifischen mentalen Tätigkeiten assoziiert sind. Gunter et al. (1995) und Ruchkin et al. (1990) zeigten, dass positive langsame Wellen vor allem mit der Speicherung von Objekten im Gedächtnis zusammenhängen. Weiterhin besteht ein Zusammenhang zwischen positiven langsamen Wellen und dem Speichern von Zahlen im Gedächtnis (Rösler und Heil, 1991).

Die Amplitude dieser Wellen ist dabei abhängig von der Belastung des Arbeitsgedächtnisses (detaillierte Darstellung siehe Einleitung). Diese Amplitudenunterschiede finden sich beim Vergleich zwischen gesunden Versuchspersonen und Patienten mit einer leicht ausgeprägten Verschlechterung des Arbeitsgedächtnisses (Ruchkin et al., 1994). Sie treten aber auch beim Vergleich zwischen gesunden Versuchspersonen mit unterschiedlich gutem Arbeitsgedächtnis auf (Gunter et al., 1995; Müller et al., 1997; Vos et al., 2001). Ruchkin et al. (1990) schlossen durch ihre Experimente den Verdacht aus, dass die Amplitude der SPW durch die visuelle Verarbeitung einer größeren Anzahl von Reizen erhöht wird. Das Wiedererkennen eines Reizes in einer Gruppe von Stimuli führte in ihren Experimenten lediglich zu einer Erhöhung der P3 Amplitude. Die Amplitude der SPW wurde dagegen nur durch die Speicherung einer größeren Anzahl von Stimuli im Gedächtnis, im Fall der Studie von Ruchkin et al. (1990) einer größeren Anzahl von unterschiedlichen Konsonanten, erhöht.

Die langsamen Wellen korrelieren aber nicht nur mit Prozessen des Kurzzeitgedächtnisses, sondern werden auch mit der Aktivierung von Informationen des Langzeitgedächtnisses und Speicherung von Informationen im Langzeitgedächtnis in Verbindung gebracht. Auch diese langsamen Wellen weisen je nach Versuchsbedingungen eine unterschiedliche Topographie und Polarität aus (Guo, Voss und Paller, 2005; Schott et al., 2002; Van Petten und Senkfor, 1996). Die Amplitude der langsamen Wellen unterscheiden sich je nachdem, wie gut bestimmte Gedächtnisinhalte erinnert werden können (bezeichnet als D_m : Neurophysiologische Unterschiede („differences“) für unterschiedliche Gedächtnisleistungen („memory performance“)). Die d_m -Effekte waren größer, wenn zur Überprüfung der Erinnerungsleistung eine freie Wiedergabe der Gedächtnisinhalte erfolgte, als wenn ein Wiedererkennungstest verwendet wurde, und waren kaum vorhanden, wenn ein impliziter Gedächtnistest

angewendet wurde (Paller, Kutas und Mayes, 1987). Mit Hilfe der langsamen Wellen lässt sich also nicht nur vorhersagen, wie gut bestimmte Inhalte im Gedächtnis verankert werden, sondern auch wie sie im Gedächtnis gespeichert werden. Weiterhin ist noch auf den in der Einleitung erwähnten Zusammenhang von Merkstrategien und einer Erhöhung der SPW Amplitude hinzuweisen (Donchin und Fabiani, 1991). Hier zeigte sich, dass die Anwendung von Merkstrategien die SPW Amplitude erhöht, während reines Auswendiglernen zu einer Erhöhung der P3 führt.

Aufgrund der höheren Amplitude der SPW bei den Lösern lässt sich vermuten, dass die Löser die Stimuli und Eingaben der Aufgaben besser und eventuell bewusster bzw. besser abrufbar im Gedächtnis verankern als die Nicht-Löser.

Ein weiterer Gruppenunterschied, der schon zu Beginn des Versuchs auffällig wurde, ist die ebenfalls bei den Lösern größere fronto-centrale P3a für alle Stimuli. In einer Studie von Lelekov et al. (2000) konnten bei der Bearbeitung von Material mit abstrakten Regeln frontale und parietale positive Komponenten um 500 ms, die als P3 bezeichnet wurden, nachgewiesen werden. Die Versuchsteilnehmer untersuchten in diesem Experiment die zu bearbeitenden Aufgaben daraufhin, ob diese entweder einer einfachen Oberflächenregel oder einer abstrakten Regel folgten. Es zeigten sich bei der Bearbeitung der Aufgaben mit der abstrakten Regel größere P3 Amplituden an allen Elektroden. Die fronto-zentrale P3-Komponente reflektierte dabei besser als die parietale Komponente den Unterschied zwischen regelhaften und falschen Sequenzen. Die Amplitude der P3 im Lernverlauf wurde in dieser Studie aber nicht untersucht. Nach der eigenen Studie hängt die fronto-zentrale Komponente auch im Lernverlauf mit dem Erkennen einer abstrakten Regel zusammen. Zur Kritik an der Studie von Lelekov et al. (2000) ist allerdings anzumerken, dass die abstrakten Aufgaben wesentlich komplexer waren als die Aufgaben, die der Oberflächenregel folgten. Die höhere Amplitude der P3a könnte also auch auf die unterschiedlichen Anforderungen zur Bearbeitung der Aufgabe, z. B. einer notwendigen höheren Aufmerksamkeit, zurückzuführen sein.

Aus der Literatur zur P3a geht hervor, dass die P3a auch ohne in der Aufgabe enthaltene abstrakte Regeln entsteht. Die Amplitude ist ebenfalls davon abhängig, wieviel Aufmerksamkeit den Stimuli geschenkt wird. So rufen akustische Signale,

die Warnsignale für einen nachfolgenden Stimulus sind, eine höhere Amplitude der P3a hervor als Signale, die keinen Zusammenhang mit einem zu beachtenden Stimulus haben (Escera et al., 1998). Weiterhin wird die Amplitude durch den durch jeden neuen Stimulus ausgelösten Überraschungseffekt erhöht (Verleger et al., 1994). Dagegen führen stets gleich bleibende, häufig auftretende Stimuli zur Abnahme der Amplitude vor allem des anterioren Anteils der P3 (Gaeta et al., 2003). Zusammengefasst deutet die größere P3a der Löser daraufhin, dass sie jedem Stimulus mehr Aufmerksamkeit schenken als die Nicht-Löser.

Zwei weitere Effekte in den ERPs der Löser traten ebenfalls bereits im ersten Block auf, sind aber für bestimmte Stimuluspositionen spezifisch. Der P3 Komplex nahm von der dritten zur vierten Stimuluspräsentation hin ab, wahrscheinlich weil die vierte Stimuluspräsentation die Eingabe der direkten Wiederholung auslöst und damit redundante Informationen enthält. Diese Interpretation stimmt mit den Erkenntnissen verschiedener Arbeiten überein, dass die P3 den Informationswert eines Stimulus und dessen Relevanz für nachfolgende Ereignisse widerspiegelt (Gratton, Bosco, Kramer, Coles, Wickens und Donchin, 1990; Johnson, 1986; Wascher, Verleger, Jaskowski und Wauschkuhn, 1996), näheres hierzu wurde bereits in der Einleitung beschrieben.

Der zweite Effekt bestand in einer fronto-central aufgenommenen N100 (anteriore N1), deren Amplitude auf die zweite und fünfte Stimuluspräsentation bei den Lösern größer war als bei den Nicht-Lösern. Sie war dabei möglicherweise auf einer langsamen negativen Verschiebung des EEG aufgesetzt. Die zweite und die fünfte Stimuluspräsentation lösen die Eingaben für die indirekte Wiederholung aus und sind damit von besonderer Bedeutung für das Erkennen der Tiefenregel.

Visuelle Reize wie die Stimuli in dieser Studie können nach He et al. (2004) zwei unterschiedliche Arten von Aufmerksamkeitsprozessen erregen, die sich in den frühen ERP Komponenten widerspiegeln:

1. durch den Reiz direkt ausgelöste Aufmerksamkeit („object-based attention“)
2. auf eine bestimmte Region bezogene Aufmerksamkeit („space-based attention“).

He et al. (2004) untersuchten die Mechanismen und Beziehungen dieser beiden Komponenten in ihrer Studie. Dabei verwendeten sie einen Hinweisreiz, der

Informationen enthielt, wo der etwas später auftretende Zielreiz am wahrscheinlichsten erscheint. Sie modulierten dabei die Validität ihres Hinweisreizes. Dabei gehen sie von der Annahme aus, dass automatische durch den Zielreiz direkt ausgelöste Aufmerksamkeitsprozesse durch die Validität nicht beeinflusst werden, während die Rolle von willentlich gesteuerten räumlichen Aufmerksamkeitsprozessen bei sinkender Validität des Hinweises sinkt. In ihrer Studie zeigte sich, dass die anteriore N1 die neurale Aktivität widerspiegelt, die hauptsächlich den willentlich gesteuerten räumlichen Aufmerksamkeitsprozessen zu Grunde liegt, während die posteriore N1 die automatischen durch den Zielreiz ausgelösten Aufmerksamkeitsprozesse darstellt. Diese Erkenntnisse stimmen mit denen aus verschiedenen anderen Studien überein (z. B. Clark und Hillyard, 1996). Ein Anstieg der Amplitude der anterioren N1 für die zweite und fünfte Stimuluspräsentation kann folglich durch erhöhte, willentlich gelenkte räumliche Aufmerksamkeitsprozesse ausgelöst werden.

Eine alternative Möglichkeit, die nicht notwendigerweise in Konflikt mit der höheren Amplitude der anterioren N1 bei den Lösern steht, ist, dass eine parallel zur anterioren N1 ablaufende langsame negative Verschiebung für diesen Gruppenunterschied verantwortlich ist (Vogel und Luck, 2000). Diese Verschiebung kann man als Typ einer „Contingent Negative Variation“ (CNV) bezeichnen. Hierbei handelt es sich um eine negative langsame EEG-Verschiebung, die durch die Vorbereitung einer Antwort ausgelöst wird (Walter et al., 1964). Das typische Paradigma zur Auslösung dieser EEG Komponente ist das S1-S2 Experiment, wobei S1 ein Warnsignal darstellt und zum Teil Hinweise auf die geforderte Antwort enthalten kann, während es sich bei S2 um einen imperativen Stimulus handelt, der zur Antworteingabe auffordert. Die „Contingent Negative Variation“ kann sich durch die Vorbereitung der nachfolgenden Antwort auf den Stimulus entwickeln (Brunia, 2003; Verleger, Wauschkuhn, van der Lubbe, Jaskowski und Trillenberg, 2000). Es wird angenommen, dass sie durch die Aktivität verschiedener kortikaler Generatoren entsteht. Diese Annahme beruht sowohl auf intrakranialen Ableitungen (Lamarche et al., 1995) als auch auf extrakranial abgeleiteten Potentialen (Böcker et al., 1994). Insbesondere der frontalen Komponente (aufgenommen an Fz) wird dabei eine Kontrolle der Aufgabenbearbeitung zugeordnet (Van Boxtel, 1994).

Die stärker ausgeprägte CNV der Löser könnte daher implizieren, dass sich die Löser intensiver auf die Antworten für die entscheidenden Stimuli vorbereiten und die Durchführung der Aufgabe stärker beachten.

Abschließend fiel ein weiterer Unterschied auf, der ausschließlich im letzten Block vor dem Abbruch festgestellt werden konnte. Der P3-Komplex nahm bei den Lösern von der zweiten zur fünften Stimuluspräsentation ab. Dieser Effekt kann analog zur oben erwähnten Abnahme des P3-Komplexes von der dritten zur vierten Stimuluspräsentation interpretiert werden. Im letzten Block vor dem Abbruch ordnen die Löser der zweiten Stimuluspräsentation eine größere Relevanz und einen höheren Informationsgehalt zu, weil sie zu realisieren beginnen, dass die zweite Stimuluspräsentation zur Lösung der Gesamtaufgabe führen kann. Daher enthalten die nachfolgenden Stimuli für die Löser irrelevante Informationen, was sich in der Abnahme der P3 widerspiegelt. Diese Abnahme des P3-Komplexes scheint daher weniger ein Vorbote für den Erwerb von explizitem Wissen zu sein, sondern eher ein Korrelat des Vorhandenseins von explizitem Wissen.

Zur Überprüfung der dritten Hypothese, der „unexpected event“-Hypothese, wurden die durch die Responses ausgelösten ERPs getrennt analysiert. Besondere Aufmerksamkeit wurde hierbei der positiven Welle, die durch die Eingabe der Response hervorgerufen wird („rb-P300“), geschenkt. Dies geschah aufgrund der Annahme, dass die Löser ihre Aufmerksamkeit verstärkt auf die schnellere Eingabe der Responses für die direkte und die indirekte Wiederholung lenken und diesen Eingaben mehr Bedeutung zuschreiben. Diese verstärkte Aufmerksamkeit sollte nach Annahme der dritten Hypothese die Suche nach der versteckten Regelmäßigkeit auslösen.

Die Ergebnisse zeigten jedoch nur schwache Indizien, die diese Hypothese unterstützen. Eine Tendenz ($p = 0,08$) für eine größere rb-P300 bei den Lösern wurde für die direkte Wiederholung im letzten Block vor dem Abbruch gefunden. Diese Tendenz trat jedoch nur für die weniger entscheidende direkte Wiederholung auf. Sie erschien erst in dem Block, in dem die entscheidende zweite Stimuluspräsentation eine höhere P300 bei den Lösern als bei den Nichtlösern hervorrief, die anzeigte, dass diese der zweiten Stimuluspräsentation

bereits eine wichtige Rolle zuordnen. Aus diesen Gründen kann die rb-P300 hier nicht direkt auf die entstehende Einsicht der Löser in die Tiefenregel zurückgeführt werden.

Allerdings muss in diesem Zusammenhang erwähnt werden, dass der Versuchsaufbau das Testen dieser Hypothese beeinträchtigt haben könnte. Die Versuchspersonen konnten ihre Eingaben nicht unbegrenzt beschleunigen, da die Stimuli im Unterschied zu anderen Studien (z. B. Rose et al., 2002) nacheinander und in einem festgelegten Intervall nach der Eingabe der Response (0,5 s) präsentiert wurden. Keine der Versuchspersonen konnte aufgrund dieser Versuchsbedingungen ihre Eingaben machen, bevor der auslösende Stimulus präsentiert wurde. Haider und Frensch (in Vorbereitung) fanden jedoch heraus, dass sich der Anteil der Löser unter vergleichbaren Bedingungen fast verdoppelt, wenn Eingaben ohne Limit beschleunigt werden können. Dies könnte darauf hindeuten, dass unter bestimmten Bedingungen implizites Lernen explizite Lernvorgänge aktivieren kann.

Zusammenfassend zeigt sich, dass sich einzelne ERP-Komponenten im Gegensatz zu den Reaktionszeiten bereits im ersten Block zwischen den Gruppen unterscheiden. Daher können sie als mögliche Vorboten für den Erwerb von explizitem Wissen in Betracht gezogen werden. Dies gilt insbesondere für die anteriore N1, deren Amplitude im ersten Block bei den Lösern höher war als bei den Nicht-Lösern. Diese höhere Amplitude wurde dabei von den für die indirekte Wiederholung relevanten Stimuli ausgelöst, während für die übrigen Stimuli kein signifikanter Gruppenunterschied ermittelt werden konnte. Als weiterer Prädiktor für explizites Lernen kann die P3a dienen, die ebenfalls bereits im ersten Block eine größere Amplitude bei den späteren Lösern aufwies. Dieser Amplitudenunterschied ließ sich für alle Stimuli nachweisen.

Im Versuchsverlauf zeigte sich weiterhin eine größere parietale SPW für die Löser, deren größere Amplitude jedoch erst bei einer Zusammenfassung der Blöcke signifikant wurde. Dies könnte jedoch auch an der kleinen Anzahl an Aufgaben pro Block liegen, so dass ihre Rolle als Vorbote in weiteren Experimenten untersucht werden muss.

Kurz vor dem Erwerb des expliziten Wissens ließ sich noch ein weiterer Gruppenunterschied nachweisen. Die P3 Amplitude für die nicht mehr relevanten Stimuli nahm ab. Die Abnahme könnte jedoch auch erst im Anschluss an den

Erwerb des expliziten Wissens erfolgen und kurz vor dem Strategiewechsel auftreten.

Für die Frage nach den Mechanismen, die zur Entstehung von explizitem Wissen führen, lassen sich folgende Schlussfolgerungen aus den Unterschieden bei den ERP-Komponenten der beiden Gruppen ziehen: Die Löser speicherten die Ereignisse stärker (angezeigt durch die langsame positive Welle), sie richteten ihre Aufmerksamkeit stärker auf die Stimuli (angezeigt durch die frontale P3a) und schienen die entscheidenden Stimuluspräsentationen zwei und fünf stärker zu beachten (angezeigt durch die anteriore N1). Diese Effekte treten bereits im ersten Block auf. Am erstaunlichsten war der frühe selektive Effekt der anterioren N1. Möglicherweise entsteht dieser Effekt nicht dadurch, dass die Löser die Stimuli als wichtiger bewerten, sondern weil die Stimuli die Aufmerksamkeit der Löser aufgrund von anderen Ursachen vermehrt erregen. Die erhöhte Aufmerksamkeit könnte z. B. auf die besondere Position der Stimuli zurückzuführen sein, da sie den Beginn und das Ende der Präsentation von einzelnen Stimuli darstellen (die erste Stimuluspräsentation besteht aus einem Zahlenpaar). Ob diese Selektion der Stimuli für den Erwerb von explizitem Wissen entscheidend war oder nur das aufmerksamere Verhalten der Löser widerspiegelt, lässt sich anhand dieses Experiments nicht abschließend sagen.

Das frühe Auftreten der ermittelten Unterschiede spricht am ehesten für von Beginn an unterschiedliche Mechanismen, die zum Erwerb von explizitem und implizitem Wissen führen, d. h. für die zweite Hypothese.

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit geht es um die Frage, wie neue Einsichten gewonnen werden. Was führte beispielsweise dazu, dass Newton, nachdem ihm ein Apfel auf den Kopf fiel, das Gravitationsgesetz entwickelte, während andere Menschen in der gleichen Situation vielleicht nur den Baum geschüttelt hätten?

In dieser Arbeit wird eine Variante der Number Reduction Task mit einer versteckten Regelmäßigkeit verwendet, über deren Existenz die Versuchspersonen nicht informiert wurden. Die Versuchspersonen wurden im Anschluß an den Versuch in zwei verschiedene Gruppen eingeteilt, je nachdem ob sie die Gesetzmäßigkeit bewusst entdeckten (Löser) oder nur implizit erlernten (Nicht-Löser). Anhand der Aufgabe ließen sich der allgemeine Lerneffekt, das implizite Lernen und bei einem Teil der Versuchspersonen, den Lösern, auch das explizite Lernen untersuchen. Es wurde nach den Unterschieden zwischen den Versuchspersonengruppen sowohl im Hinblick auf die Reaktionszeiten als auch in den ERPs gesucht. Bei der EEG Analyse lag das Hauptaugenmerk auf möglichen Vorboten der Einsichtgewinnung. Hierzu wurden Gruppenunterschiede der ereignisbezogenen Potentiale untersucht. Anhand dieser Unterschiede sollten weiterhin Rückschlüsse über die Mechanismen der Einsichtgewinnung gezogen werden.

Die Gruppe der Löser unterschied sich sowohl in den Reaktionszeiten als auch in den ermittelten ERP-Komponenten von der Gruppe der Nicht-Löser. Von den Gruppenunterschieden bei den einzelnen ERP-Komponenten können dabei sowohl die höhere Amplitude der anterioren N1 für die zweite und fünfte Stimuluspräsentation als auch die höhere Amplitude der P3a für alle Stimuluspräsentationen als Vorboten für den Erwerb von explizitem Wissen angesehen werden. Die größere Amplitude der SPW bei den Lösern muss dagegen erst in weiteren Studien untersucht werden. Die Analyse der Reaktionszeiten lieferte keine frühen Hinweise auf die Entstehung von explizitem Wissen.

Über die Mechanismen, die zu explizitem Wissen führen, lassen sich aufgrund dieser Studie folgende Aussagen treffen. Die bereits im ersten Block auftretenden Unterschiede bei den ERP-Komponenten deuten auf zwei verschiedene Systeme

hin, eines zum Erwerb von implizitem Wissen, ein zweites für die Entstehung von explizitem Wissen.

Diese Hypothese wird auch durch die Ergebnisse der Reaktionszeitanalyse unterstützt. Das Ausbleiben des allgemeinen Lernerfolgs bei den Lösern könnte dafür sprechen, dass das explizite Lernen die Entstehung des allgemeinen Lernerfolgs verhindert. Bei den Nicht-Lösern laufen dagegen das implizite Lernen und das Entstehen des allgemeinen Lernerfolgs parallel ab. Dieses Ergebnis lässt sich mit der Theorie, dass beide Lernformen auf unterschiedlichen Mechanismen beruhen, am besten vereinbaren.

Die „unexpected event“ Hypothese lässt sich für die Entstehung von explizitem Wissen unter den hier gegebenen Versuchsbedingungen nicht bestätigen, jedoch auch nicht ausschließen.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Löser sich bereits zu Beginn des Versuchs den Aufgaben auf eine andere Art und Weise nähern als die Nicht-Löser. Sie scheinen andere Lernmechanismen zur Bearbeitung der Aufgabe zu aktivieren. Nicht jeder, dem ein Apfel auf den Kopf fällt, hätte das Gravitationsgesetz erkannt. Er hätte zumindest Interesse an Physik zeigen müssen.

6 Literaturverzeichnis

Anderer, P., Semlitsch, H. V., Saletu, B. & Barbanoj, M. J. (1992). *Artifact processing in topographic mapping of electroencephalographic activity in neuropsychopharmacology*. *Psychiatry Research* 45, 79-93.

Anderson, J.R. (1982). *Acquisition of cognitive skill*. *Psychological Review* 89, 369-406.

Baas, J.M.P., Kenemans, J.L., & Mangun, G.R. (2002). *Selective attention to spatial frequency: an ERP and source localization analysis*. *Clinical Neurophysiology* 113, 1840-1854.

Baddeley, A.D. (2001). *Is working memory still working?* *American Psychologist* 56, 851-864.

Baldwin, K., & Kutas, M. (1997). *An ERP analysis of implicit structured sequence learning*. *Psychophysiology* 34, 74-86.

Böcker, K.B.E., Brunia, C.H.M., & Cluitmans, P.J.M. (1994a). *A spatio-temporal dipole model of the readiness potential in humans. I Finger movement*. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 91, 275-285.

Brookhuis, K.A., Mulder, G., Mulder, L.J.M., & Gloerich, A.B.M. (1983). *The P3 complex as an index of information processing: the effects of response probability*. *Biological Psychology* 17, 277-296.

Brunia, C.H.M. (2003). *CNV and SPN: Indices of anticipatory behavior*. In M. Jahanshahi & M. Hallett (Eds.) *The Bereitschaftspotential*. New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers, pp.207-227.

Clark, V.P., & Hillyard, S.A. (1996). *Spatial selective attention affects early extrastriate, but not striate components of the visual evoked potential*. *Journal of Cognitive Neuroscience* 8, 387-402.

Cleeremans, A. (2002). *Handlung und Bewusstsein: Ein Rahmenkonzept für den Fertigkeitserwerb*. *Psychologie und Sport* 9, 2-19.

Cleeremans and Jimenez (2002). *Implicit learning and consciousness: An empirical, computational and philosophical consensus in the making*. Hove, UK: Psychology Press.

Cleeremans und McClelland (1991). *Learning the structure of event sequences*. *Journal of Exp. Psychology: General* 120, 235-253

Cowan, N. (1995). *Attention and memory: An integrated framework*. Oxford University Press. New York, Oxford Psychology Series, No. 26.

Curran, T., & Keele, S.W. (1993). *Attentional and nonattentional forms of sequence learning*. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* 19, 189-202.

Dehaene, S., & Akhavein, R. (1995). *Attention, automaticity, and levels of representation in number sequences*. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* 21, 314-326.

Dehaene, S., & Naccache, L. (2001). *Towards a cognitive neuroscience of consciousness: basic evidence and a workspace framework*. *Cognition* 79, 1-37.

Destrebecqz, A., Peigneux, P., Laureys, S., Degeuldre, C., Del Fiore, G., Aerts, J., Luxen, A., van der Linden, M., Cleeremans, A., & Maquet, P. (2003). *Cerebral correlates of explicit sequence learning*. *Cogn. Brain Research* 16, 391-398.

Dienes, Z., & Berry, D. (1997). *Implicit learning: below the subjective threshold*. *Psychonomic Bulletin and Review* 4, 3-23.

Di Russo, F., Martínez, A., Sereno, M. I., Pitzalis, S., & Hillyard, S. A. (2001). *Cortical sources of the early components of the visual evoked potentials*. *Human Brain Mapping* 2, 170-187.

Dominey, P.F., Lelekov, T., Ventre-Dominey, J., & Jeannerod, M. (1998). *Dissociable processes for learning the surface structure and abstract structure of sensorimotor sequences*. *Journal of Cognitive Neuroscience* 10, 734-751.

Donchin, E. & Coles, M. G. H. (1988). *Is the P300 component a manifestation of context updating?* *Behavioral and Brain Sciences* 11, 357-374.

Donchin, E., & Fabiani, M. (1991). *The use of event-related brain potentials in the study of memory: is P300 a measure of event distinctiveness?* In *Handbook of cognitive psychophysiology: central and autonomic system approaches* (eds. J.R. Jennings and M.G.H. Coles), pp. 471-498. Wiley, Chichester.

Duncan-Johnson, C.C., & Donchin, E. (1977). *On quantifying surprise: The variation of event-related potentials with subjective probability*. *Psychophysiology* 14, 456-467.

Eimer, M., Goschke, T., Schlaghecken, F., & Stürmer, B. (1996). *Explicit and implicit learning of event sequences: Evidence from event-related potentials*. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* 22, 970-987.

Eldridge, L.L., Knowlton, B.J., Furmanski, C.S., Bookheimer, S.Y., & Engel, S.A. (2000). *Remembering episodes: a selective role for the hippocampus during retrieval*. *Nat. Neurosci.* 3, 1149-1152.

Escera, C., Alho, K., Winkler, I., & Näätänen, R. (1998). *Neural mechanisms of involuntary attention to acoustic novelty and change*. *Journal of Cognitive Neuroscience* 10, 590-604.

- Fabiani, M., Karis, D., & Donchin, E. (1986). *P300 and recall in an incidental memory paradigm*. *Psychophysiology* 23, 298-308.
- Ford, J.R., Roth, W.T., Mohs, R.C., Hopkins, W.F., & Kopell, B.S. (1979). *Event-related potentials recorded from young and old adults during a memory retrieval task*. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 47, 450-459.
- Frensch, P.A., Haider, H., Runger, D., Neugebauer, U., Voigt, S., & Werg, J. (2002). *Verbal report of incidentally experienced environmental regularity: The route from implicit learning to verbal expression of what has been learned*. In: Jimenez, L. (Ed.), *Attention and implicit learning* (pp.335-366). New York, John Benjamins Publishers.
- Friedman, D., & Sutton, S. (1987). *Event-related potentials during continuous recognition memory*. In: R. Johnson, Jr., J.W. Rohrbaugh, & R. Parasuraman (Eds.), *Current trends in event-related potential research* (pp. 316-321). Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V. (Biomedical Division).
- Gaeta, H., Friedman, D., & Hunt, G. (2003). *Stimulus characteristics and task category dissociate the anterior and posterior aspects of novelty P3*. *Psychophysiology* 40,198-208
- Grafton, S. T., Hazeltine, E. & Ivry, R. (1995). *Funktional mapping of sequence learning in normal humans*. *Journal of Cognitive Neuroscience* 7, 497-510.
- Gratton, G., Bosco, C.M., Kramer, A.F., Coles, M.G.H., Wickens, C.D., & Donchin, E. (1990). *Event-related brain potentials as indices of information extraction and response priming*. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 75, 419-432.
- Gunter, T.C., Jackson, J.L., & Mulder, G. (1995). *Language, memory, and aging: An electrophysiological exploration of the N 400 during reading of memory demanding sentences*. *Psychophysiology* 32, 215-229
- Guo, C., Voss, J.L., & Paller, K.A. (2005). *Electrophysiological correlates of forming memories for faces, names, and face-name associations*. *Cognitive Brain Research* 22, 153-164.
- Haider, H., & Frensch, P. (1996). *The role of information reduction in skill acquisition*. *Cognitive Psychology* 30(3), 304-337.
- Haider, H., & Frensch, P. (1997). *Lernmechanismen des kognitiven Fertigkeitserwerbs*. *Zeitschrift fur Experimentelle Psychologie XLIV*, 521-560.
- Haider, H., & Frensch, P. (1999). *Eye movement during skill acquisition: more evidence for the information-reduction hypothesis*. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* 25, 172-190.
- He, X., Fan, S., Zhou, K., & Chen, L. (2004). *Cue validity and object-based attention*. *Journal of Cognitive Neuroscience* 16, 1085-1097.

- Hopf, J.-M., Vogel, E., Woodman, G., Heinze, H.-J., & Luck, S.J. (2002). *Localizing visual discrimination processes in time and space*. *Journal of Neurophysiology* 88, 2088-2095.
- Iwanami, A., Kamijima, K., & Yoshizawa, J. (1996). *P300 component of event-related potentials in passive tasks*. *International Journal of Neuroscience* 84, 121-126.
- Jacoby, L.L. (1991). *A process dissociation framework: separating automatic from intentional uses of memory*. *J. Mem. Lang.* 30, 513-541.
- Jiménez, L., Mendez, C., & Cleeremans, A. (1996). *Comparing direct and indirect measures of sequence learning*. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 22, 948-969.
- Johnson, R., Jr. (1986). *A triarchic model of P300 amplitude*. *Psychophysiology* 23, 367-384.
- Johnson, R., Jr. (1989). *Auditory and visual P300s in temporal lobectomy patients: evidence for more modality-dependant generators*. *Psychophysiology* 26, 633-650.
- Johnson, R., Jr., Miltner, W., & Braun, C. (1991). *Auditory and somatosensory event-related potentials. 1. Effects of inter-stimulus intervall*. *Journal of Psychophysiology* 5, 11-25.
- Karis, D., Fabiani, M., & Donchin, E. (1984). *"P300" and memory: individual differences in the von Restorff effect*. *Cognitive Psychology* 16, 177-216.
- Knight, R.T. (1991). *Evoked potential studies of attention capacity in human frontal lobe lesions*. In: *Frontal lobe function and dysfunction* (eds. H.S. Levin, H.M. Eisenberg, and A.L. Benton), pp.139-153. New York: Oxford University Press.
- Köhler, W. (1917). *Intelligenzprüfungen an Anthropoiden*. In: *Abhandlungen der Preussischen Akademie der Wissenschaften*. 3rd edition 1973: *Intelligenzprüfungen an Menschenaffen*. Springer: Heidelberg.
- Kutas, M., McCarthy, G., & Donchin, E. (1977). *Augmenting mental chronometry: the P300 as a measure of stimulus evaluation time*. *Science* 197,792-795.
- Lamarche, M, Louvel, J, Buser, P, & Rektor, I. (1995). *Intracerebral recordings of slow potentials in a contingent negative variation paradigm: an exploration in epileptic patients*. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 95, 268-276.
- Lamme, V.A.F. (2003). *Why visual attention and awareness are different*. *Trends in Cognitive Sciences* 7, 12-18.
- Lang, S., Kotchoubey, B., Lutz, A., & Birbaumer, N. (1997). *Was tut man, wenn man nichts tut? Kognitive EKP-Komponenten ohne kognitive Aufgaben*. *Zeitschrift für experimentelle Psychologie* 44, 138-162.

Lelekov, T., Dominey, P.F. & García-Larrea, L. (2000). *Dissociable ERP profiles for processing rules vs. instances in a cognitive sequencing task*. *NeuroReport* 11, 1129-1132.

Logan, G.D. (1988). *Toward an instance theory of automatization*. *Cognitive Psychology* 22, 1-35.

Logan, G.D. (1992). *Shapes of reaction-time distributions and shapes of learning curves: A test of instance theory of automatization*. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 18, 883-914.

Luck, S. J. (1995). *Multiple mechanisms of visual-spatial attention: Recent evidence from human electrophysiology*. *Behavioural Brain Research* 71, 113–123.

Mangun, G. R. (1995). *Neural mechanisms of visual selective attention*. *Psychophysiology* 32, 4-18.

Mangun, G. R., & Hillyard, S. A. (1991). *Modulations of sensory-evoked brain potentials indicate changes in perceptual processing during visuospatial priming*. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 17, 1057-1074.

Martinez, A., Di Russo, F., Anllo-Vento, L., Sereno, M. I., Buxton, R.B., & Hillyard, S. A. (2001). *Putting spatial attention on the map: Timing and localization of stimulus selection processes in striate and extrastriate visual areas*. *Vision research* 41, 1437-1457.

Martín-Loeches, M., Hinojosa, J.A., & Rubia, F.J. (1999). *Insights from event-related potentials into the temporal and hierarchical organization of the ventral and dorsal streams of the visual system in selective attention*. *Psychophysiology* 36, 721-736.

Mecklinger, A. & Pfeifer, E. (1996). *Event-related potentials reveal topographical and temporal distinct neuronal activation patterns for spatial and object working memory*. *Cognitive Brain Research* 4, 211-224.

Michie, P.T., Karayanidis, F., Smith, G.L., Barrett, N.A., Large, M.M., O'Sullivan, B.T., & Kavanagh, D.J. (1999). *An exploration of varieties of visual attention: ERP findings*. *Cognitive Brain Research* 7, 419-450.

Milner, D.A., & Goodale, M.A. (1995). *Visual pathways to perception and action*. In: T. P. Hicks, S. Molotchnikoff & Y. Ono (Eds.), *Progress in Brain Research*, vol. 95 (pp. 317-337). Elsevier Science Publishers.

Müller, H.M., King, J.W., & Kutas, M. (1997). *Event-related potentials elicited by spoken relative clauses*. *Cognitive Brain Research* 5, 193-203.

Naumann, E., Huber, C., Maier, S., Plihal, W., Wustmans, A., Diedrich, O., & Bartussek, D. (1992). *The scalp topography of P300 in the visual and auditory modalities: a comparison of three normalization methods and the control of statistical type II error*. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 83, 254-264.

- Nissen, M.J., & Bullemer, P. (1987). *Attentional requirements of learning: Evidence from performance measures*. *Cognitive Psychology* 19, 1-32.
- Nissen, M.J., Knopman, D.S., & Schacter, D.L. (1987). *Neurochemical dissociation of memory systems*. *Neurology* 37, 789-794.
- Norman, D.A. & Shallice, T. (1980). *Attention to action: Willed and automatic control of behaviour*. Center for Human Information Processing Technical Report No. 99. Reprinted in revised form in *Consciousness and self regulation* Vol.4, 1-18, New York: Plenum 1986.
- O'Brien, G., & Opie, J. (1999). *A connectionist theory of phenomenal experience*. *Behavioral and Brain Sciences* 22, 175-196.
- Paller, K.A., Kutas, M. & Mayes, A.R. (1987). *Neural correlates of encoding in an incidental learning paradigm*. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 67, 360-371
- Perruchet, P., & Amorin, M. A. (1992). *Conscious Knowledge and changes in performance in sequence learning: Evidence against dissociation*. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 18, 785-800
- Pivik, R.T., Broughton, R.J., Coppola, R., Davidson, R.J., Fox, N., & Nuwer, M.R. (1993). *Guidelines for the recording and quantitative analysis of electroencephalographic activity in research contexts*. *Psychophysiology* 30, 547-558
- Poldrack, R.A., Clark, J., Pare-Blagoev, E.J., Shohamy, D., Cresco Moyano, J., Myers, C., & Gluck, M.A. (2001). *Interactive memory systems in the human brain*. *Nature* 414, 546-550.
- Posner, M.I. (1994). *Attention: The mechanism of consciousness*. *PNAS* 91, 7398-7403
- Rauch, S.L., Savage, C.R., Brown, H.D., Curran, T., Alpert, N.M., Kendrick, A., Fischman, A.J., & Kosslyn, S.M. (1995). *A PET investigation of implicit and explicit sequence learning*. *Hum. Brain Mapping* 3, 271-286.
- Reber, A.S. (1967). *Implicit learning of artificial grammars*. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 6, 855-863.
- Reber, A.S. (1989). *Implicit learning and tacit knowledge*. *Journal of Experimental psychology: General* 118, 219-235.
- Reed, J., & Johnson, P. (1994). *Assessing implicit learning with indirect tests: Determining what is learned about sequences structure*. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 20, 585-594.
- Rheingold, E.M., & Toth, J.P. (1996). *Process dissociation versus task dissociation: A controversy in progress*. In: G. Underwood (Eds.), *Implicit cognition* (pp. 159-202). Oxford: Oxford University Press.

Rose, M., Haider, H., Weiller, C., & Büchel, C. (2002). *The role of medial temporal lobe structures in implicit learning: An event-related fMRI study*. *Neuron* 36, 1221-1231.

Rose, M., Haider, H., Weiller, C. & Büchel, C. (2004). *The relevance of the nature of learned associations for the differentiation of human memory systems*. *Learning & Memory* 11, 145-152.

Rösler, F., Bajric, J., Heil, M., Henninghausen, E., Niedeggen, M., Pechmann, T., Röder, B., Rüsseler, J., & Streb, J. (1997). *Gedächtnisspuren im EEG*. *Zeitschrift für exp. Psychologie*, Band XLIV, Heft 1, 4-37.

Rösler, F. & Heil, M. (1991). *Toward a functional categorization of slow waves: Taking into account past and future events*. *Psychophysiology* 28, 344-358.

Ruchkin, D.S., Grafman, J., Cameron, K. & Berndt, R.S. (2003). *Working memory retention systems: A state of activated long-term memory*. *Behavioral and Brain Sciences* 16, 1-39.

Ruchkin, D.S., Johnson, R. Jr., Grafman, J., Canoune, H., & Ritter, W. (1997). *Multiple visuo-spatial working memory buffers: Evidence from spatio-temporal patterns of brain activity*. *Neuropsychologia* 35, 195-209.

Ruchkin, D.S., Johnson, R. Jr., Canoune, H., & Ritter, W. (1990). *Short-term memory storage and retention: An event-related brain potential study*. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 76, 419-439.

Rüsseler, J., Hennighausen, E., Münte, T. F. & Rösler, F. (2003). *Differences in incidental and intentional learning of sensorimotor sequences as revealed by event-related brain potentials*. *Cognitive Brain Research* 15, 116-126.

Rüsseler, J., & Rösler, F. (2000). *Implicit and explicit learning of event sequences: evidence for distinct coding of perceptual and motor representations*. *Acta psychologica* 104, 45-67.

Schacter, D. L. (1987). *Implicit memory: History and current status*. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 13, 501-518.

Schlaghecken, F., Stürmer, B., & Eimer, M. (2000). *Chunking processes in the learning of event sequences: Electrophysiological indicators*. *Memory & Cognition* 28, 821-831.

Schott, B., Richardson-Klavehn, A., Heinze, H.-J., & Düzel, E. (2002). *Perceptual priming versus explicit memory: dissociable neural correlates at encoding*. *Journal of Cognitive Neuroscience* 14, 578-592.

Shanks, D. R., & St. John, M. F. (1994). *Characteristics of dissociable human learning systems*. *Behavioural and Brain Sciences* 17, 367-477.

Simons, D.J. (2000). *Current approaches to change blindness*. *Visual Cognition* 7, 1-15.

Van Boxtel, G. (1994). *Non-motor components of slow brain potentials*. Dissertation, Katholieke Universiteit Brabant, Tilburg, The Netherlands.

Van Petten, C., & Senkfor, A.J. (1996). *Memory for words and novel visual patterns: Repetition, recognition, and encoding effects in the event-related brain potential*. *Psychophysiology* 33, 491-506.

Vos, S.H., Gunter, T.C., Kolk, H.H.J., & Mulder, G. (2001). *Working memory constraints on syntactic processing: an electrophysiological investigation*. *Psychophysiology* 38, 41-63.

Walter, WG, Cooper, R, Aldridge, VJ, McCallum, WC, & Winter, AL (1964). *Contingent negative variation: an electric sign of sensorimotor association and expectancy in the human brain*. *Nature* 203, 380.

Smid, H.G.O.M., Mulder, G., Mulder, L.J.M., & Brands, G.J. (1992). *A psychophysiological study of the use of partial information in stimulus-response translation*. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 18, 1101-1119.

Squires, N.K., Squires, K.C., & Hillyard, S.A. (1975). *Two varieties of long-latency positive waves evoked by unpredictable auditory stimuli in man*. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 38, 387-401.

Squires, K.C., Wickens, C., Squires, N.K., & Donchin, E. (1976). *The effect of stimulus sequence on the waveform of the cortical event-related potential*. *Science* 193, 1142-1146.

Sutton, S., Braren, M., Zubin, J., & John, E.R. (1965). *Evoked potential correlates with stimulus uncertainty*. *Science* 150, 1187

Tzelgov, J. (1997). *Automatic but conscious: That is how we act most of the time*. In: R. S. Wyer (Ed.), *The automaticity of everyday life* (pp. 217-230). Mahwah, NJ: Erlbaum.

Ungerleider, L.G., & Mishkin, M. (1982). *Two cortical visual systems*. In: D.J. Ingle, M.A. Goodale, & R.J.W. Mansfield (Eds.), *Analysis of Visual Behavior* (pp. 549-586). Cambridge: The MIT Press.

Verleger, R. (2000). *Der P3-Komplex im ereignisbezogenen EEG-Potential*. Skript für die Fortbildung "Kognitive Neuropsychologie" auf dem Kongress der Deutschen Gesellschaft für klin. Neuropsychologie, Göttingen, Okt. 2000

Verleger, R. (1997). *On the utility of P3 latency as an index of mental chronometry*. *Psychophysiology* 34, 131-156.

Verleger, R. (1998). *Towards an integration of P3 research with cognitive neuroscience*. (Author's response on continuing commentary). *Behavioural and Brain Science* 21, 150-154.

Verleger, R., Gasser, T. & Möcks, J. (1982). *Correction of EOG artifacts in event-related potentials of the EEG: Aspects of reliability and validity*. *Psychophysiology* 19, 472-480.

Verleger, R., Jaskowski, P., & Wauschkuhn, B. (1994). *Suspense and surprise: On the relationship between expectancies and P3*. *Psychophysiology* 31, 359-369.

Verleger, R., Wauschkuhn, B., van der Lubbe, R.H.J., Jaskowski, P. & Trillenber, P. (2000). *Posterior and anterior contributions of hand-movement preparation to Late CNV*. *Journal of Psychophysiology* 14, 69-86.

Vogel, E.K., & Luck, S.J. (2000). *The visual N1 component as an index of a discrimination process*. *Psychophysiology* 37, 190-203.

Wagner, U., Gais, S., Haider, H., Verleger, R. & Born, J. (2004). *Sleep inspires insight*. *Nature* 427, 352-355.

Wascher, E., Verleger, R., Jaskowski, P., & Wauschkuhn, B. (1996). *Preparation for action: An ERP study about two tasks provoking variability in response speed*. *Psychophysiology* 33, 262-272.

Willingham, D.B., & Goedert-Eschmann, K. (1999). *The relationship between implicit and explicit learning: Evidence for parallel development*. *Psychological Science* 10, 531-534.

Willingham, D.B., Salidis, J., & Gabrieli, J.D.E. (2002). *Direct comparison of neural systems mediating conscious and unconscious skill learning*. *Journal of Neurophysiology* 88, 1451-1460.

Woltz, D.J., Bell, B.G., Kyllonen, P.C., & Gardner, M.K. (1996). *Memory for order of operations in the acquisition and transfer of sequential cognitive skills*. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 22, 438-457.

Wundt, W. (1896). *Grundriss der Psychologie*. Leipzig: Engelmann.

Yamaguchi, S., & Knight, R.T. (1991). *Anterior and posterior association cortex contributions to the somatosensory P300*. *The Journal of Neuroscience* 11, 2039-2054.

7 Danksagung

Die vorliegende Disseration wäre nicht zustande gekommen, wenn ich nicht Hilfe und Unterstützung von vielen Seiten bekommen hätte.

In erster Linie möchte ich Herrn Prof. Dr. Verleger für die Übernahme und Betreuung meiner thematischen Fragestellung sowie die rasche Bearbeitung bezüglich der Korrekturen danken. Weiterhin danke ich Frau Dr. Simone Lang, ehemalige wissenschaftliche Mitarbeiterin der Klinik für Neurologie des Universitätsklinikums Schleswig-Holstein, für die statistischen Bearbeitung und die Hilfe bei der Interpretation der Daten sowie für viele anregende und weiterbringende Diskussionen.

Meinen Eltern sowie meinem Lebensgefährten Guido Blech sei gedankt für Korrekturvorschläge in Bezug auf das optische Layout sowie die stetige Erinnerung an das Fortsetzen der Arbeit während meines Einstiegs in den Arztberuf.

Mein weiterer Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Unterstützung der Studie.

Ferner möchte ich allen denen meinen Dank aussprechen, die hier nicht namentlich erwähnt sind, aber zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

8 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Nadine Kanngieser

geboren am: 08.01.1980 in Hannover

Familienstand: ledig

Staatsangehörigkeit: deutsch

Studium

09/1999 - 04/2005

Studium der Humanmedizin

Universität zu Lübeck

08/2001

Physikum

Gesamtnote: gut

08/2002

1. Staatsexamen

Gesamtnote: gut

03/2005

2. Staatsexamen

Gesamtnote: sehr gut

seit 04/2005

Studium der Humanmedizin

Ludwig-Maximilians-Universität München

03/2006

3. Staatsexamen

Gesamtnote: sehr gut

seit 08/2002

Dissertation

„Precursors of insight in event-related brain potentials“

Neurologie, Universität zu Lübeck, Prof. Dr. Verleger

Veröffentlichung im Journal of Cognitive

2006

Neuroscience

seit 08/2006

Assistenzärztin für Neurologie

Zentralklinikum Augsburg

Schulbildung

08/1986 - 07/1990

Grundschule am Wöhrendamm, Großhansdorf

08/1990 - 07/1999

Allgemeine Hochschulreife

Emil-von-Behring-Gymnasium, Großhansdorf

Gesamtnote: sehr gut

München, 22. Februar 2008