

Einleitung

Viele Fragen sind bis heute ungeklärt und werden es wohl auch weiterhin bleiben. Trotzdem scheint es, als gäbe es – vor allem bei der Erklärung unserer physikalischen Umgebung – schon einige befriedigende Antworten, die es uns nicht nur ermöglichen unser Leben gesund und sicher zu gestalten, sondern Großteils bereits unseren Hunger nach Verständnis decken. In einem Bereich jedoch, dem Bereich psychischer Prozesse, gibt es zwar bereits viele Einzelerkenntnisse, eine umfassende Theorie über die psychischen Funktionsweisen komplexerer Organismen steht jedoch aus. Vor allem das Zusammenspiel, also die Schnittstelle zwischen der Psyche und dem Körper, die Frage nach Determiniertheit und Selbstbestimmung, nach automatischer und willentlicher Verarbeitung sind bei weitem noch nicht ganzheitlich geklärt.

Dabei erfüllt das Verständnis darüber nicht nur den Zweck, Wissen über Lebewesen zu akkumulieren oder einige neugierige Personen zu befriedigen, vielmehr prägt die Erkenntnis über die Funktionsweise unsere Gesellschaft: Sie entscheidet u.a. über Gesetze, Konventionen und Kultur.

So sehr wir uns als Menschen auch immer wieder selbstverständlich einen freien Willen unterstellen und damit die Fähigkeit, durch den Geist gezielt und indeterminiert unsere Welt verändern zu können; ohne unwillkürlich automatisch ablaufende Verhaltensweisen wäre ein Leben auf der Erde wohl unmöglich. In vielen Situationen müssen innerhalb kürzester Zeit bestehende Reize erfasst, zukünftige Ereignisse simuliert und schließlich vorhergesagt werden.

Ein gutes Beispiel für die hohe Leistungsfähigkeit der automatisch ablaufenden Systeme des Menschen ist seine Sprache. Deutlich wird dies schon allein durch das Segmentationsproblem des Sprachverstehens. Mit physikalischen Mitteln aufgezeichnete Frequenzen von Schallwellen zeigen Muster, die bei visueller Betrachtung kaum

korrekt in Worte getrennt werden können. Eine Pause oder eine Frequenzschwankung sagt nur selten tatsächlich auch den Beginn eines neuen Wortes vorher. Zur Segmentation der Worte werden bei weitem nicht nur die physikalischen Signale, sondern zusätzlich viele verschiedene Hinweisreize benötigt (u.a. Brent & Cartwright, 1996; Saffran, Newport & Aslin, 1996). Wichtig sind vor allem Lautfolgen, die in verschiedenen Sprachen nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit oder sogar gar nicht vorkommen. Die Folge von 'x' und 's' würde in der Deutschen Sprache nicht erwartet werden und liefert dem auditiven System keine semantische Information. Das System wurde in diesem Fall eher von zwei Wörtern ausgehen. Eines, das auf 'x' endet, und eines, das mit 's' beginnt (z.B. 'Max sieht'). Dabei muss die Segmentation nicht nur anhand einer großen Menge an Informationen, sondern auch innerhalb kürzester Zeit erfolgen, die ohne eine automatisierte Verarbeitung wohl kaum möglich wäre.

Beim Sprechen wiederum ist unter anderem das so genannte Speech Monitoring (Levitt, 1983; Postma, 2000) von hoher Bedeutung. Das bezeichnet die Fähigkeit, die inhaltliche Qualität des Gesprochenen noch während des Sprechens reflektieren zu können. Das wiederum bedeutet, dass beim Sprechen mindestens zwei Prozesse gleichzeitig stattfinden. Das legt nahe, dass hier ein hoher Grad an automatischer Verarbeitung im Spiel ist. In einer Studie von Goldman-Eisler (1958) konnte gezeigt werden, dass u.a. immer dann größere Sprechpausen entstehen, wenn kommende Wörter schwerer vorhersagbar sind. Der automatische Verarbeitungsprozess der Vorhersage scheint also nicht unbegrenzt effizient zu sein, auch die automatischen Prozesse sind augenscheinlich abhängig von der Komplexität der Aufgabe.

Bezüglich der auditiven Komponente sei vor allem auch die Musik hervorgehoben. Gerade in der Musik spiegelt sich die Tendenz des Menschen zu erfolgreichen automatischen Vorhersagen wider. Drake und Bertrand (2001) prüften 5 universelle, d.h. nicht-kulturabhängige Paradigmen, wie sich Menschen zu Musik verhalten. In Para-

Paradigma 3 beschrieben sie, dass sich Menschen, die im Takt der Musik bleiben sollen, in mehr als 90% der Zeit erfolgreich mit Musik synchronisieren können. D.h. Vorhersagen können erfolgreich getroffen und Handlungen entsprechend erfolgreich an den Vorhersagen ausgerichtet werden. Ein Verhalten, das auch bei unmusikalischen Menschen auftritt und damit auch hier einen Hinweis für ein automatisches Verhalten liefert. Man könnte mutmaßen, dass genau in der Vorhersagbarkeit, die anscheinend mehr passiv mit dem Menschen geschieht, als dass diese aktiv hervorgerufen wird, der Reiz der Musik liegt und auch ein Harmonieempfinden damit zusammenhängt.

Die Bedeutung der Vorhersagbarkeit und vor allem der diesbezüglich wirkenden automatischen Verarbeitung lassen sich an den vorigen Beispielen recht gut erkennen. Im folgenden Experiment soll es um die Vorhersagbarkeit von komplexen Regeln in auditiven Stimuli gehen. Konkret soll untersucht werden, inwiefern komplexe Regeln von Tonabfolgen (wie sie etwa auch in der Sprache vorkommen) erkannt und insbesondere vorhergesagt bzw. Abweichungen erkannt werden können. Im Folgenden soll zunächst der Forschungsstand bezüglich der auditiven Regelerkennung und der Vorhersagefähigkeit erläutert werden. Anschließend wird eine kurze Einführung in Lerntheorien erfolgen, die speziell für dieses Experiment von Bedeutung sein wird. Und zuletzt soll in der Diskussion und der folgenden Post-Hoc-Analyse versucht werden, die genannten Beispiele einzuordnen.

Mismatch Negativity (MMN) und das Oddball Paradigma

Die Mismatch Negativity (MMN) ist ein ereigniskorreliertes Potential (EKP). Bei ereigniskorrelierten Potentialen handelt es sich um elektrische Potentiale des Gehirns, welche zu einem bestimmten Zeitpunkt (Ereignis) eintreten und mit diesem zusammenhängen und daher als ereigniskorreliert betrachtet werden können. Die Messung dieser Signale erfolgt per Elektroenzephalogramm (EEG), das elektrische Potentiale

des Gehirns erfassen kann. Um die Signale, die durch das Ereignis ausgelöst werden, letztlich vom Rauschen anderer Gehirnpotentiale trennen zu können, werden die Potentiale über mehrere Messungen gemittelt.

Erstmals wurde die MMN von Näätänen, Gaillard und Mäntysalo (1978) für auditive Stimuli beschrieben. Verwendet wurde das so genannte Oddball Paradigma, bei dem eine Reihe gleicher Stimuli gegeben wird, die dann von einem nicht-regelkonformen Stimulus unterbrochen wird. Die MMN trifft dann ca. 150 ms – 250 ms nach der Präsentation des Abweichers vor allem im fronto-zentralen Bereich auf. Sie zeigt damit an, dass eine Vorhersage (bzw. eine Extrapolation) des Gehirns fehlerhaft war. Im Umkehrschluss lässt sich bei einem Auftreten der MMN schließen, dass das Gehirn zuvor eine Regelmäßigkeit erkannt haben muss (Schröger, 2007). Auf dieser Logik basieren auch die Studien, die dem hier beschriebenen Experiment zugrunde liegen.

Eine weitere Eigenschaft der MMN ist, dass sie auch dann auftritt, wenn der auditive Stimulus nicht beachtet wird (Näätänen, Paavilainen, Rinne & Alho, 2007), zum Beispiel wenn Probanden während des Hörens der Töne einen Stummfilm schauen. Das Gehirn scheint also keine oder nur sehr wenige Aufmerksamkeitsressourcen für die Erkennung einer Regelmäßigkeit in einem auditiven Stimulus zu benötigen. Die Verarbeitung erfolgt somit offensichtlich automatisiert.

Komplexe Regelerkennung

In Folge der ersten Experimente, bei denen die MMN erfasst wurde, stellte sich schon bald die Frage, ob die MMN auch bei deutlich komplexeren Regeln auftritt. Dies würde implizieren, dass das Gehirn die Fähigkeit besitzt, auch komplexe Regeln zu extrahieren und vorhersagen zu können.

Bereits in früheren Studien wurden Paradigmen für komplexe Regeln entwickelt. Die-

se verwendeten zwar nicht das Konzept der MMN, konnten aber bereits nachweisen, dass die Probanden die Regeln nicht bewusst erkennen können. Im Sequence Learning Paradigm (Hoffmann & Koch, 1998) sollten die Probanden ein sich wiederholendes Muster erkennen, das in einer Ton-Sequenz versteckt war. Im Covariation Detection Paradigm (Stamov Roßnagel, 2001) wiederum lernten die Probanden nichtsaliente Verbindungen zwischen den einzelnen Stimulus-Elementen. Obwohl die Probanden die Regeln meist nicht bewusst erkannten, zeigten sich durch Übung Leistungssteigerungen in Form von zunehmend erhöhter Geschwindigkeit und erhöhter Genauigkeit, was zunächst auf implizites Lernen hinweist.

Paavilainen, Arajärvi und Takegata (2007) warfen daraufhin die Frage auf, in welchem Ausmaß der Erkennungsprozess Aufmerksamkeitsressourcen benötigt. Dabei sollte vor allem geklärt werden, ob die Erkennung komplexerer Regeln bereits präattentiv auf der Ebene des sensorischen Gedächtnisses stattfindet. Um dies zu untersuchen, wurden den Probanden Töne vorgespielt, die sich in ihrer Länge (50 ms oder 150 ms) und in ihrer Höhe (1000 Hz oder 1500 Hz) unterschieden. Allgemein wurden für die Tonfolgen zwei Regeln verwendet.

- Auf einen langen Ton folgt ein hoher Ton, auf einen kurzen Ton folgt ein tiefer Ton
- Auf einen langen Ton folgt ein tiefer Ton, auf einen kurzen Ton folgt ein hoher Ton

Von den zwei Merkmalen (Höhe und Länge) ist dem Prinzip nach jeweils die Länge der entscheidende Prädiktor für das Merkmal Höhe des nächsten Tons. Während des Versuchs bekam die eine Hälfte der Probanden die eine Regel, die anderen Hälfte die andere Regel präsentiert. Um die MMN auszulösen wurde die Regel an vereinzelten Stellen unterbrochen. Eine Beispielsequenz dieser Regel ist in Abbildung 1 gezeigt. Alle Probanden durchliefen in gegebener Reihenfolge außerdem folgende Bedingun-

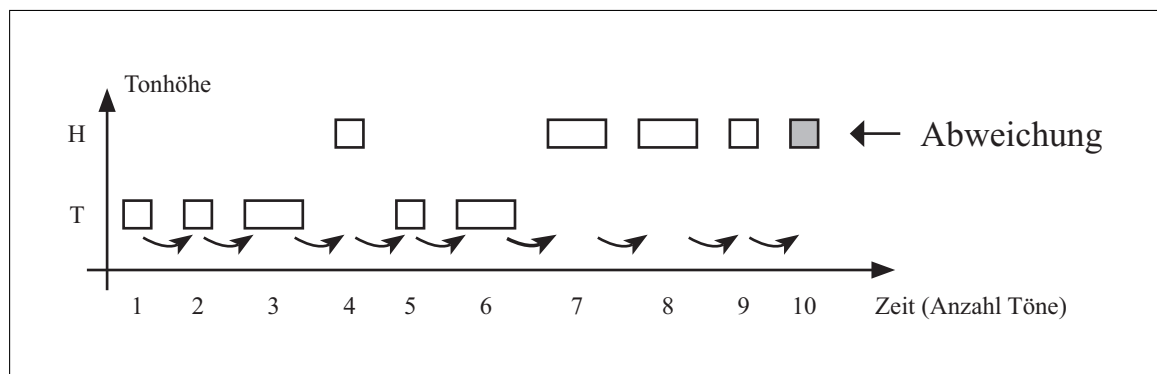


Abbildung 1. Beispiel für eine Tonsequenz. Die Länge des einen Tons sagt die Höhe des nächsten Tons vorher. In diesem Beispiel folgt auf einen kurzen Ton ein tiefer Ton (T) und auf einen langen Ton ein hoher Ton (H). Der letzte Ton ist im Beispiel von der Regel abweichend: Auf einen kurzen Ton (Ton 9) folgt kein tiefer Ton, wie die Regel es vorhersagen würde, sondern ein hoher Ton (Ton 10).

gen:

- **Ignore:** Die Probanden schauten einen Stummfilm mit Untertiteln und sollten weder auf die Töne achten, noch darauf reagieren.
- **Implicit detection:** Den Probanden wurde die Regel nicht erklärt, sie sollten jedoch eine Taste drücken wenn sie das Gefühl hätten, dass ein Ton nicht passt.
- **Explicit detection:** Den Probanden wurde die Regel erklärt (mit Hilfe eines Schaubildes), sie sollten eine Taste drücken, wenn sie der Meinung waren, dass einer der Töne nicht in die Regel passt.

Im Ergebnis zeigte sich, dass in allen drei Bedingungen ein signifikanter Ausschlag der MMN vorlag, sofern ein Abweicher vorkam. Es zeigte sich allerdings auch, dass sich der Ausschlag der MMN in den drei Bedingungen nicht signifikant voneinander unterschied. Es war also unerheblich, ob die Probanden die Töne ignorierten, intuitiv darauf reagierten oder aktiv und bewusst darauf achteten. Eine intuitive oder bewusste Übung konnte die Erkennungsleistung des Gehirns nicht steigern. Demzufolge waren implizite ebenso wie explizite Lernprozesse auf der Ebene neuronaler Signale

anscheinend nicht vorhanden. Für einen - zumindest kleinen - Lerneffekt spricht hingegen, dass die behavioralen Daten in den zwei detection-Bedingungen in Form der Erfolgsrate beim Drücken der Tasten signifikant vom Zufall abwichen, wenn auch nur sehr gering. Qualitativ wurde außerdem berichtet, dass die Probanden das Wissen über die Regel nur als wenig hilfreich einschätzten.

Aus den Ergebnissen haben Paavilainen et al. (2007) geschlossen, dass die Verarbeitung wohl überwiegend automatisiert und die Treffer in der explicit detection Bedingung eher auf Intuition, als auf explizites Wissen über die Regel zurückzuführen sind. Allerdings scheint sich die Leistungsfähigkeit geringfügig verbessern zu können. Dies schlägt sich zumindest in der knapp überzufälligen behavioralen Erfolgsrate nieder. Letztlich war ein weiteres EKP, die so genannte P3, nicht ausgeprägt. Diese Komponente schlägt üblicherweise aus, wenn Stimuli bewusst klassifiziert werden. Die These, dass die Stimuli automatisiert und unbewusst verarbeitet werden, konnte damit bestätigt werden.

Die Studie von Paavilainen et al. (2007) wurde 2 Jahre später von Bendixen, Prinz, Horváth, Trujillo-Barreto und Schröger (2008) repliziert und erweitert. Dabei wurden die gleichen Regeln verwendet, auch Tonhöhe und Frequenz entsprach den vorigen. Die Regeln wurden in unterschiedlich langen Sequenzen (4, 9, 14, 19 Töne) regelkonform präsentiert und anschließend durch irreguläre Sequenzen (4-8 Töne) unterbrochen. Diese Unterbrechung führt dazu, dass das Gehirn immer wieder von vorne beginnen muss, eine Regel zu erkennen. Zumal nach einer irregulären Sequenz auch die reguläre Sequenz variieren kann, da wie oben beschrieben, zwei solcher regulären Regeln existieren. Es wurde zwischen zwei Bedingungen unterschieden:

- **Passiv:** Kontinuierliche Stimuli-Präsentation, wobei die Probanden einen Stummfilm schauten und die Stimuli ignorieren sollten.
- **Aktiv:** Probanden hörten abgegrenzte Sequenzen unterschiedlicher Länge, wo-

bei der letzte Ton Standard oder Deviant sein konnte. Sie bekamen die Regeln erklärt und sollten per Tastendruck reagieren.

Die Probanden bekamen erst 8 Blöcke in der Passiv-Bedingung präsentiert und wurden gefragt, ob sie eine Regel erkannten. Anschließend bekamen sie 5 weitere Blöcke in der Aktiv-Bedingung präsentiert. In keinem Fall erkannten die Probanden die Regel nach der Passiv-Bedingung korrekt, sofern sie überhaupt eine erkannten. Der Sensitivitätsindex (d' -prime) lag noch signifikant über dem Zufallsniveau, sowohl für kurze (5 und 10 Töne), als auch für lange (15 und 20 Töne) Sequenzen. Die MMN zeigte jedoch nur für lange Sequenzen eine signifikante Ausprägung.

Die Ergebnisse von Paavilainen et al. (2007) konnten damit zum einen bestätigt werden, zum anderen konnte gezeigt werden, dass für die Regelerkennung zunächst einige Stimuli nötig sind, bis das Gehirn die entsprechende Regel abgeleitet hat. Allgemein liegt ein kontinuierlicher Zusammenhang vor: Je mehr regelkonforme Stimuli zuvor präsentiert werden, desto höher ist der Ausschlag der MMN bei einer Unterbrechung. Es scheint also eine Akkumulation abzulaufen, die Hinweise auf eine Regel ansammelt. Entscheidend ist jedoch, dass auch in dieser Studie das bewusste Erkennen einer Regelverletzung nicht möglich war. Auch hier zeigte sich die Abwesenheit der P3-Komponente und damit die Abwesenheit bewusster Klassifikationsprozesse.

Lernen prozeduralen Wissens

Zusammenfassend liegt also bezüglich der Erkennung komplexer Regeln eine automatisierte und unbewusste Verarbeitung vor. Während auf neuronaler Ebene Abweicher von der Regeln zuverlässig erkannt werden, ist es dem Mensch nicht möglich, diese Regeln bewusst anzuwenden bzw. Regelabweichungen erkennen zu können. Da Lernen - kurz gefasst - als eine relativ stabile Veränderung des Verhaltens, Denkens oder Fühlens definiert wird, kann davon ausgegangen werden, dass ein Lernprozess an

dieser Stelle nicht stattfindet. Eine Verhaltensbeobachtung konnte nicht oder nur in sehr geringem Maße beobachtet werden. Für eine weitere Untersuchung ist es demnach zunächst von Bedeutung zu betrachten, wie das implizite und explizite prozedurale Lernen funktioniert. Aus bestehenden Theorien über das Lernen kann abgeleitet werden, wie ein expliziter prozeduraler Lernprozess komplexer Regeln gestaltet werden könnte. Ziel ist es, einen solchen Lernprozess zu gestalten, um zu zeigen, dass ein explizites Lernen prinzipiell möglich ist. Sollte dieser Nachweis erfolgreich verlaufen, könnte dies ein Ansatz sein, um die Funktionsmechanismen hinter der Lücke zwischen der automatisierten unbewussten und der aktiven bewussten Verarbeitung zu verstehen.

Grundsätzlich lässt sich der Lernprozess als prozedurales Lernen (abgegrenzt von deklarativem Lernen) klassifizieren, sofern das Drücken der Taste passend zu den Abweichern gelernt wird. Das Lernen deklarativen Wissens würde voraussetzen, dass es für die Erkennung reichen würde, das Wissen über die Regel zu kennen. Wie sich bisher gezeigt hat, scheint das reine Wissen jedoch nicht ausreichend zu sein. Das erworbene Wissen muss bei der Erkennung von Abweichungen in einen Handlungsprozess umgewandelt werden. Das prozedurale Lernen bezieht sich dabei weniger auf das Ausführen sichtbarer Handlungen, sondern vielmehr auf das Lernen einer Abfolge unterschiedlicher Verarbeitungsschritte.

In den bisherigen Untersuchungen lag – wenn überhaupt – nur implizites Lernen vor. Interessant wäre also zu betrachten, wie explizites Lernen erreicht werden kann, das den Probanden bisher nicht möglich war. Es ist auf Grund der genannten Ergebnisse davon auszugehen, dass sich ein expliziter Lernprozess relativ schwierig gestalten könnte.

Die Klassifikation in prozedurale Prozesse macht nun deutlich, dass ein einfaches Zeigen der Regel (z.B. an einem Schaubild) kaum ausreichen kann, um die Regel

adäquat anzuwenden, zumal die Stimuli mit 50 ms bzw. 150 ms Länge und einem Inter-Stimulus-Intervall (ISI) von 300 ms präsentiert wurden. Diese hohe Geschwindigkeit erfordert wahrscheinlich ein langes Training, sofern ein expliziter Prozess verlangt wird. Fitts und Posner (1967) gingen davon aus, dass prozedurales Wissen über drei Schritte hintereinander gelernt werden kann:

1. **Kognitives Stadium:** In diesem Stadium handelt es sich noch um eine deklarative Repräsentation. Das deklarative Wissen kann in bestehendes Wissen integriert und mit diesem verknüpft werden. Eine Vermittlung sollte präzise und verständlich erfolgen. Angewendet werden kann z.B. ein Schaubild.
2. **Assoziatives Stadium:** Eine prozedurale Repräsentation wird aufgebaut. Es entwickeln sich Wenn-Dann-Regeln. Sofern ein bestimmtes Ereignis eintritt, wird automatisch eine spezifische Reaktion ausgeführt. Dieses Stadium kann vor allem durch regelmäßige Übung erreicht werden. Wichtig ist hier auch das Geben von Feedback.
3. **Autonomes Stadium:** Das prozedurale Wissen kann schnell und automatisiert abgerufen werden. Die einzelnen Repräsentationen sind stabil miteinander verbunden und führen zu einer fehlerfreien Ausführung. Der Ressourcenaufwand minimiert sich. Erreicht wird dies durch das Praktizieren über längere Zeiträume.

Eine gute Beschreibung des prozeduralen Lernens bietet auch der Learning Cycle von Whitmore (2009). Der Kreislauf teilt das Lernen in 4 aufeinanderfolgende Schritte ein:

1. **Unconscious incompetence:** Kein Verständnis vorhanden.
2. **Conscious incompetence:** Es liegt zwar nur eine geringe Performanz vor, Fehler und Schwächen werden jedoch bemerkt und können korrigiert werden.
3. **Conscious competence:** Die Leistung verbessert sich, zur Durchführung ist

jedoch ein hoher kognitiver Aufwand nötig.

4. **Unconscious competence:** Es liegt eine hohe Performanz vor, der kognitive Aufwand verringert sich deutlich zugunsten automatisierter Abläufe.

Warum ein explizites Lernen in den vorigen Studien (Bendixen et al., 2008; Paavilainen et al., 2007) wahrscheinlich nicht möglich war, kann nun auf Basis der beiden Modelle gut erklärt werden. Unter der Voraussetzung, dass prozedurales Wissen vorliegt und gelernt werden muss, wurde in beiden Studien vermutlich lediglich das kognitive Stadium erreicht (nach Fitts & Posner, 1967). Bei Bendixen et al. (2008) wurde kein langsamer Übungsblock vorgenommen. Die Wahrscheinlichkeit, dass stabile Wenn-Dann-Regeln aufgebaut werden konnten, ist in diesem Fall eher gering, da die Probanden vermutlich auf Grund der Überforderung keine Möglichkeit hatten, ihr Verhalten adäquat zu überdenken. In beiden Studien wurde kein Feedback angewendet und der Schwierigkeitsgrad stieg vermutlich ebenfalls bei beiden Studien zu abrupt an. Bei Paavilainen et al. (2007) wurde von einem ISI von 2000 ms in der Übung direkt auf 300 ms in der Anwendung erhöht, bei Bendixen et al. (2008) wurde direkt mit einem ISI von 300 ms begonnen. Nach der Annahme der Zone proximaler Entwicklung von Wygotski (Kozulin, 2003) sollte der nächste Lernschritt knapp über dem aktuellen Lernniveau sein, um ein optimales Lernen zu gewährleisten.

Nach dem Modell von Whitmore (2009) dürften die Probanden nicht über die zweite Stufe hinaus gekommen sein, bei Bendixen et al. (2008) vermutlich nicht über die Erste, da Fehler und Schwächen auf Grund des schnellen Einstiegs und des fehlenden Feedbacks nicht bemerkt werden können. Die Theorie liefert an dieser Stelle eine gute Erklärung für das schlechte Abschneiden der Probanden bei den expliziten Aufgaben in den vorangegangenen Experimenten.

Hypothese

An dieser Stelle soll zunächst noch einmal der aktuelle Stand aus den bisher genannten Informationen zusammengefasst werden:

- Der Mensch (und vermutlich auch andere höhere Organismen) besitzen die Fähigkeit, hochautomatisiert und daher mit hoher Geschwindigkeit und Präzision Regeln zu erkennen.
- Diese Fähigkeit funktioniert insbesondere auch für komplexe Regeln und ohne bewusste Aufmerksamkeit.
- Der bewusste Zugriff und das bewusste Lernen dieser Regeln ist sehr schwer.
- Die aktive bewusste und die automatisierte unbewusste Verarbeitung basiert vermutlich auf unterschiedlichen Verarbeitungsprozessen. Die automatisierte Verarbeitung wird bereits auf sensorischer Ebene vermutet.

Die bisherigen Ergebnisse werfen einige Fragen auf. Um den Unterschiede zwischen den Verarbeitungsmechanismen verstehen zu können ist es nötig, die bisherigen Erkenntnisse in einzelne Schritte zu segmentieren. Ein erster Schritt wurde in diesem Experiment getestet. Dabei wurde die Frage gestellt, ob, und wenn ja unter welchen Umständen explizites Lernen komplexer Regeln möglich ist. Dafür wurde folgende Hypothese formuliert:

Hypothese: Das Lernen der komplexen Regeln sollte unter Beachtung der Lerntheorien für prozedurales Wissen auch explizit möglich sein.

Während bisher die Regel einfach erklärt wurde, soll im folgenden ein theoretisch abgeleitetes Lernkonzept angewendet werden. Dabei wird der Schwerpunkt auf der 3-stufigen Theorie von Fitts und Posner (1967) liegen. Beachtet werden soll außerdem die Zone proximaler Entwicklung. Im folgenden Methoden-Abschnitt wird die Hypothese unter Beachtung der Experimentalbedingungen noch einmal präzisiert.

Methoden

Probanden

Insgesamt wurden für die Untersuchung 19 Probanden getestet. Die Daten einer Person mussten wegen technischer Probleme während des Versuchsdurchgangs aus der Analyse genommen werden. Von den verbleibenden 18 Probanden waren 3 männlich (16.7 %) und 15 weiblich (83.3 %). Das Durchschnittsalter betrug 27 Jahre ($SD = 8$), die Probanden variierten zwischen einem Alter von 18 und 53 Jahren. Von den 18 Probanden fühlten sich 11 gut ausgeschlafen und 13 gut konzentriert. Die übrigen hatten mindestens mäßig geschlafen und waren mindestens mäßig konzentriert, entsprechend hatte kein Proband schlecht geschlafen oder war schlecht konzentriert. Im Selbstbericht gab keiner der Probanden an, im Voraus Substanzen zu sich genommen zu haben, die das Nervensystem hätten beeinträchtigen können, und alle Probanden gaben an, gut hören und den Experimentalbedingungen entsprechend ausreichend sehen zu können. Eine Versuchsperson musste auf Englisch instruiert werden, die Aufgabe wurde jedoch ohne Schwierigkeiten verstanden.

Versuchsaufbau

In Abbildung 2 ist eine Skizze des Versuchsaufbaus gezeigt. Das Experiment musste unter nicht ganz optimalen Experimentalbedingungen durchgeführt werden, da sich die Labore der Professur für Kognitive einschließlich Biologische Psychologie zum Erhebungszeitpunkt gerade im Umbau befanden. Um trotzdem möglichst optimale Bedingungen zu erhalten wurde versucht, möglichst viele eventuell störende Faktoren konstant zu halten.

Auf Laptop 1 (L1) wurde das Programm für den Versuch¹ ausgeführt, dieser wurde vom Versuchsleiter (VL) bedient. Für das Abspielen der Töne und das Speichern der Reaktionsdaten wurde Matlab verwendet. Der Laptop (L1) war an den Bildschirm (B) angeschlossen, welcher der Versuchsperson (VP) zur Verfügung stand. Auf

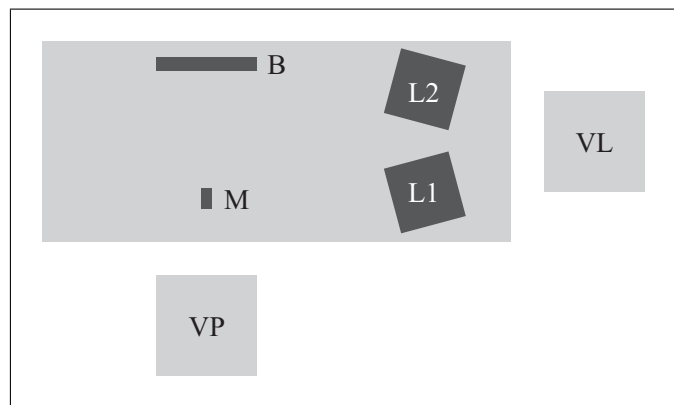


Abbildung 2. Aufbau des Experimentes. Laptop 1 (L1) mit Programm für Experiment und Laptop 2 (L2) für Versuchsleiter (VL). Bildschirm (B), Maus (M) und Kopfhörer (nicht eingezeichnet) für Versuchsperson (VP).

diesem Bildschirm wurde angezeigt, wenn die Versuchsperson reagieren sollte. Dafür stand der Versuchsperson eine Computer-Maus (M) mit 2 Tasten zur Verfügung. Während in den bisherigen Experimenten auch immer eine EEG-Messung durchgeführt wurde, beschränkte sich dieses Experiment auf Reaktionsdaten (d-prime und Reaktionszeit). Des Weiteren wurde ein zweiter Laptop (L2) verwendet, damit der Versuchsleiter (VL) die Versuchsperson während der Blöcke nicht stört. Unter Experimentalbedingungen im Labor sind Versuchsleiter und Versuchsperson räumlich getrennt. In diesem Fall war eine räumliche Trennung nicht möglich. Um etwaige Versuchsleitereffekte zu minimieren, sollte der Versuchsleiter nicht den Eindruck vermitteln, die Versuchsperson zu beobachten oder gar zu kontrollieren. Auch subtile Reaktionen des Versuchsleiters auf eventuelles gutes oder schlechtes Abschneiden der Versuchsperson sollten vermieden werden. Dafür wurde zusätzlich zu der Verwendung

¹Der Programmcode für den Versuch wurde in einer Vorversion von Prof. Dr. Alexandra Bendixen zur Verfügung gestellt.

von L2 der Bildschirm von L1 maximal abgedunkelt und nach Möglichkeit vom Versuchsleiter während der Stimulus-Präsentation nicht beachtet. Die Ablenkung an L2 erfolgte durch kognitiv anstrengende Aufgaben. Dabei wurde sichergestellt, dass der Versuchsleiter nach dem Ende eines Blockes unverzüglich wieder zur Versuchsperson umschaltete. Die Versuchsperson musste nach Beendigung eines Blockes sofort und direkt die volle Aufmerksamkeit bekommen, um die Motivation aufrecht zu erhalten.

Um Störungen zu verhindern und die Experimentalbedingungen möglichst optimal zu halten, wurde zum Beispiel, durch anbringen eines Schildes, darauf geachtet, dass während des Versuchs keine dritte Person in den Raum kam. Außerdem wurde das Fenster geschlossen. Die Kopfhörer wurden vorher auf eine normierte Lautstärke eingestellt. Der Bildschirm (B) war zunächst ausgeschaltet und wurde erst unmittelbar vor dem Start des Versuchs eingeschaltet.

Stimuli

Innerhalb der Blöcke bekam die Versuchsperson auditive Stimuli präsentiert. Diese bestanden aus Tonsequenzen à 11, 16 oder 21 Tönen. Der erste Ton wurde zufällig gewählt, alle folgenden wurden entsprechend der Regel gestaltet. Somit ergaben sich im Standard-Fall 10, 15 oder 20 regelkonforme Töne innerhalb einer Sequenz. Dabei waren die Töne und die Regel entsprechend denen bei Paavilainen et al. (2006). Die Töne unterschieden sich in Höhe (hoch/tief) und Länge (kurz/lang). Dabei wurden die Frequenzen für hohe (1500 Hz) und tiefe (1000 Hz) Töne wie zuvor verwendet. Auch die Länge der Töne blieb mit 50 ms für kurze und 150 ms für lange Töne identisch zu den vorigen Experimenten. Die Regel für die Töne lautete wie zuvor bereits in der Einleitung beschrieben:

- Auf einen langen Ton folgt ein hoher Ton, auf einen kurzen Ton folgt ein tiefer Ton

- Auf einen langen Ton folgt ein tiefer Ton, auf einen kurzen Ton folgt ein hoher Ton

Unterschiede zu den vorigen Experimenten gab es bei der Wahl des Inter-Stimulus-Intervalls (ISI), welches zwischen den Blöcken variierte. Angewendet wurden Intervalle von 300 ms, 600 ms und 900 ms. Der letzte Ton bildete in 50% der Fälle eine Ausnahme und wich von der gegebenen Regel ab. Dabei wurden die Sequenzen nicht kontinuierlich präsentiert. Die nächste Sequenz startete erst, sobald ein Tastendruck ausgeführt wurde, hierfür hatten die Probanden beliebig viel Zeit, wurden jedoch angehalten, relativ zügig zu reagieren. In Abbildung 1 in der Einleitung ist eine Beispielsequenz mit einer Abweichung am Ende skizziert.

Die jeweilige Versuchsperson sollte mit der Maus nun darauf reagieren und entscheiden, ob der letzte Ton passend oder abweichend ist. Dem zufolge liegt die Leistung der Versuchsperson darin, zunächst die Regel zu erkennen und nach Beendigung der Sequenz eine Entscheidung zu treffen. Auf dem Bildschirm war während der Sequenzen ein Fixationskreuz zu sehen, welches unmittelbar nach dem letzten Ton der Sequenz in ein Fragezeichen wechselte. Da die Sequenzen unterschiedlich lang waren, sollte dieses Hilfsmittel die Unsicherheitszeit zwischen den Sequenzen, die mindestens dem Inter-Stimulus-Intervall entspricht, möglichst gering halten. Eine systematische Reaktionszeit-Variation zwischen den Blöcken sollte damit vermieden werden.

Ablauf

Der Ablauf des Experimentes erfolgte nach einer standardisierten Checkliste. Damit konnte der Versuchsleiter überprüfen, ob nach jedem Schritt alle relevanten Punkte erläutert wurden. Die Liste war für die Versuchsperson nicht sichtbar. Folgender Ablauf wurde durchgeführt:

0. **Vorbereitung:** Präparation des Versuchssaumes (vor dem Eintreffen der VP)

1. **Einführung:** Erklärung des Experimentes
2. **Block 1 (schnell):** Durchgang mit ISI von 300 ms
3. **Arbeitsblatt:** Lernen der Regel mit Hilfe eines Arbeitsblattes
4. **Block 2 (langsam):** Durchgang mit ISI von 900 ms und Feedback
5. **Block 3 (mittel):** Durchgang mit ISI von 600 ms und Feedback
6. **Block 4 (schnell):** Durchgang mit ISI von 300 ms
7. **Nachbereitung:** Musikfragebogen, Datensicherung

Die Variation der ISI zwischen den Blöcken ist, ebenso wie das Arbeitsblatt, ein Lernprozess im Sinne der Lerntheorie von Fitts und Posner (1967). Dabei repräsentiert das Arbeitsblatt das kognitive Stadium mit einem Übergang in das assoziative Stadium. Block 2 und Block 3 bilden das assoziative Stadium und sollten im Idealfall in Block 4 in das autonome Stadium überführen.

(1) **Einführung.** Nach dem Unterschreiben der Formulare wurden die Rahmenbedingungen des Experimentes erklärt. Dabei wurde beim ersten Durchgang noch nicht die Regel erklärt. Der erste Durchgang diente als Kontrolldurchgang. Der Versuchsperson wurde folgendes erläutert:

- Eine Sequenz besteht aus 10-20 Tönen
- Ein Block besteht aus 24 Sequenzen
- Die Töne unterscheiden sich in Höhe (hoch/tief) und Länge (kurz/lang)
- Der letzte Ton einer Sequenz kann zu den vorigen passen oder nicht passen
- Eine Maustaste für "passt", eine für "passt nicht"
- Erster Durchgang wird intuitiv gelöst

Ergänzend erklärt wurde außerdem, dass der Versuchsleiter während der Blöcke keine Ergebnisse beobachtet und sich an Laptop 2 ablenken wird. Außerdem wurde der Versuchsperson verdeutlicht, dass Genauigkeit wichtig ist. Letztlich bekam die Versuchsperson noch die Empfehlung, den rechten und linken Zeigefinger jeder Hand

pro Taste zu verwenden, um rechts-links Schwierigkeiten zu vermeiden. Die Tastenbelegung der Maus variierte zwischen den Versuchspersonen gleichmäßig, um eventuelle Effekte von Händigkeit auszuschließen. Die Versuchsperson bekam die Tastenbelegung vor jedem Block auf einem Startbildschirm angezeigt.

(2) Block 1. In Block 1 wurde zunächst ein Inter-Stimulus-Intervall von 300 ms verwendet. Dies entspricht dem ISI von Paavilainen et al. (2007) und Bendixen et al. (2008). Nachdem der erste Block beendet war, wurde die Versuchsperson gefragt, ob sie eine Regel erkannt hatte. Sofern die Versuchsperson dies verneinte oder keine korrekte Regel nannte, wurde die Versuchsperson durch den Versuchsleiter ermutigt mit der Aussage, dass noch niemand jemals zu diesem Zeitpunkt eine Regel erkannt habe und das Nicht-Erkennen der Regel ein wichtiger Bestandteil des Experimentes sei.

(3) Arbeitsblatt. In diesem Schritt, unmittelbar nach Block 1, wurde der Versuchsperson ein Arbeitsblatt (siehe Anhang) gegeben. Dafür setzte sich der Versuchsleiter neben die Versuchsperson an die lange Kante des Tisches neben Position VP. Das Arbeitsblatt wurde in allen Fällen gemeinsam bearbeitet. Dabei wurde zunächst anschaulich die Regel erklärt. Anschließend war die Versuchsperson aufgefordert, für beide Regeln je eine eigene Sequenz zu erfinden und zu zeichnen. Bis zu diesem Punkt handelte es sich noch um die kognitive Stufe. Auf der letzten Seite des Arbeitsblattes wurde dann in die assoziative Stufe gewechselt. Dort waren Sequenzen vorgegeben, bei denen bestimmt werden musste, ob der letzte Ton regelkonform oder abweichend ist. Diese Übung entsprach in visuell/bildlicher Form der auditiven Übung und sollten der Festigung der verstandenen Regel dienen. Nach Beendigung des Arbeitsblattes wurde dieses für die Versuchsperson unzugänglich abgelegt, um gleiche Bedingungen für alle Versuchspersonen zu schaffen und eine Zuhilfenahme der Arbeitsblatt-Unterlagen generell auszuschließen. Im Anschluss wurde der Versuchsperson das weitere Vorgehen

erläutert. Dabei wurde die Versuchsperson explizit darauf vorbereitet, dass die Regelerkennung bzw. das Erkennen eines Abweichers im auditiven Experiment deutlich schwieriger ist, als auf dem Blatt, um eine Verringerung der Motivation möglichst zu vermeiden.

(4) Block 2. Block 2 erfolgte mit einem ISI von 900 ms. Block 2 ist damit der langsamste Block und sollte einen guten Übergang von der Arbeitsblatt-Übung zu der auditiven Übung ermöglichen. Zur Unterstützung des Lernens wurde nach jedem Tastendruck ein kurzes Feedback angezeigt, ob die Sequenz richtig oder falsch beurteilt wurde. Nach Block 2 wurde die Versuchsperson kurz offen befragt (z.B. "Wie war es?"). Relevante Antworten wurden notiert. Der Versuchsperson wurde eine kurze Pause angeboten.

(5) Block 3. Block 3 erfolgte analog zu Block 2, jedoch mit einem ISI von 600 ms. Block 3 sollte das Gelernte weiter festigen.

(6) Block 4. In Block 4 wurde das ISI wieder auf die ursprünglichen 300 ms gestellt. In diesem Block wurde der Versuchsperson kein Feedback mehr gegeben, da an diesem Punkt davon ausgegangen wird, dass die Versuchsperson bereits das autonome Stadium erreicht hat.

(7) Nachbereitung. Nach Block 4 wurde die Versuchsperson noch ein letztes Mal offen über den Versuch befragt. Es wurden letzte Formalien geklärt und ein Fragebogen zur Musikalität ausgefüllt. Nach der Verabschiedung der Versuchsperson wurden alle Daten gesichert.

Die Hypothese, die in der Einleitung formuliert worden war, lässt sich an dieser Stelle anhand des konkreten Experimentes präzisieren. Wenn ein expliziter Lernprozess prozeduralen Wissens nach der Lerntheorie möglich ist, dann sollte die Leistung in der Erkennung der von der Regel abweichenden Töne am Ende der Sequenzen in Block 4 signifikant von der in Block 1 bzw. vom Zufall abweichen.

Ergebnisse

Im Ergebnis hatten zwar ein paar Versuchspersonen nach dem ersten Block (Schritt 2) vermeintlich eine Regel erkannt, meist konnte diese aber nicht präzise konkretisiert werden. Die erkannten Muster entsprachen zudem in keinem Fall der tatsächlichen Regel.

Nach der Erläuterung der Regel (Schritt 4) hatten alle Versuchspersonen die Aufgabe verstanden und die letzten Übungen auf dem Arbeitsblatt immer selbstständig gelöst. Sehr oft wurde dann im Verlauf des Experimentes berichtet, dass das Arbeitsblatt zwar das Verständnis ermöglicht habe, das Lösen der auditiven Übung jedoch

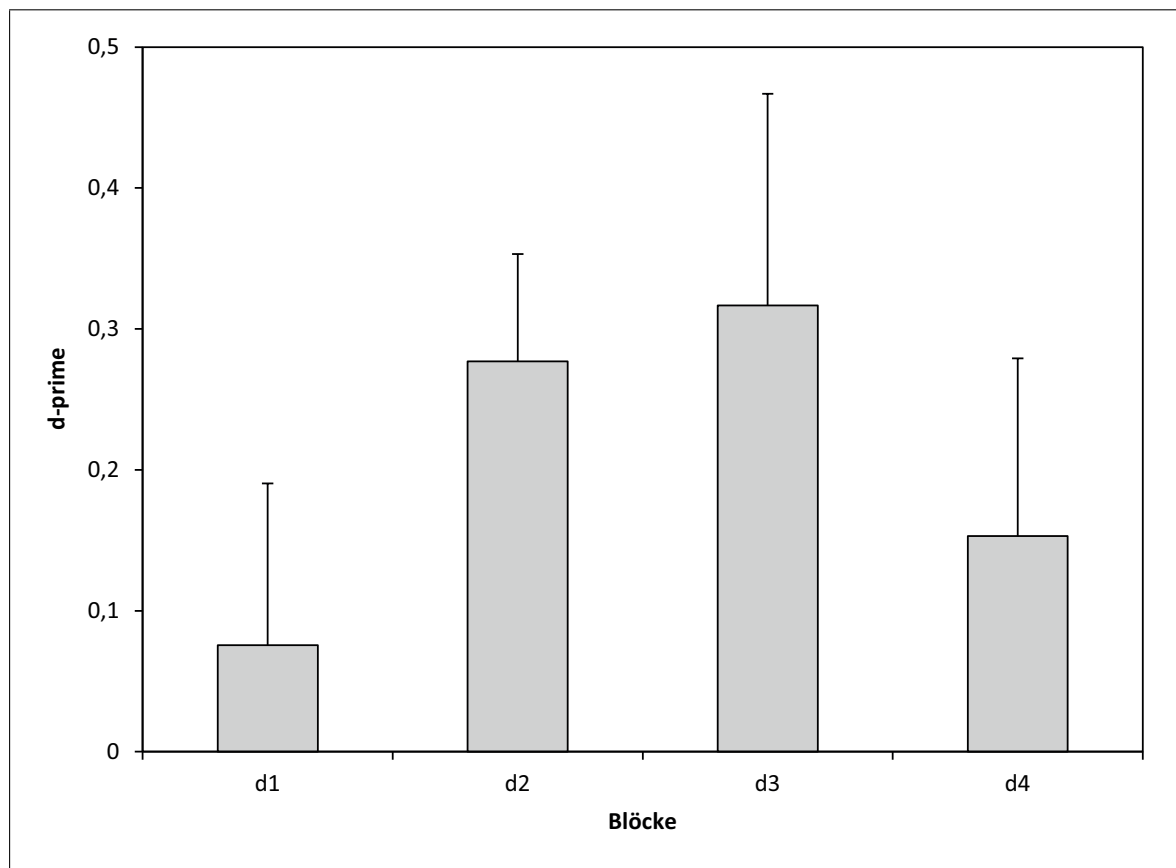


Abbildung 3. Mittelwerte der Sensitivitätsindizes über alle 18 Versuchspersonen in den Blöcken 1 - 4 mit Standardfehler

trotzdem sehr schwer gewesen sei.

Die Richtig-Positiv-Rate (hit rate) lag in Block 1 bei 40.74 %, die Falsch-Negativ-Rate (false alarm rate) bei 37.04 %. In Block 4 lag die Richtig-Positiv-Rate dann bei 41.67 %, die Falsch-Negativ-Rate bei 35.65 %. In Abbildung 3 ist der Sensitivitätsindex (d-prime) der 4 Blöcke abgebildet. Von Bedeutung ist an dieser Stelle der d-prime der Blöcke 1 und 4, Blöcke 2 und 3 dienten lediglich zur Übung. Blöcke 1 und 4 wurden beide mit einem ISI von 300 ms und ohne Feedback präsentiert. Der erste Block wurde ohne das Regelwissen durchgeführt, der vierte Block nach Vermittlung des Wissens über die Regel und nach Übung der Erkennung von Regelabweichungen. Der Sensitivitätsindex in Block 1 beträgt $d = 0.076$ ($SE = 0.115$), in Block 4 liegt er bei $d = 0.153$ ($SE = 0.126$). Beide Werte unterscheiden sich nicht signifikant, $t(17) = 0.56$, $p > 0.05$. Auch wenn Block 4 gegen Null getestet wird, liegt der Sensitivitätsindex von Block 4 nicht signifikant über dem Zufallsniveau, $t(17) = 1.22$, $p > 0.05$.

Diskussion

Da sich der Sensitivitätsindex in Block 1 und Block 4 nicht unterscheiden, sprechen die Ergebnisse gegen einen expliziten Lerneffekt. Die qualitative Auswertung der Berichte der Versuchspersonen passen gut zu den Ergebnissen, denn auch die Versuchspersonen berichteten - vor allem im letzten Durchgang - konsistent von großen Schwierigkeiten beim Detektieren von Passenden und Abweichen am Ende der Sequenzen. Sie gaben an, meist intuitiv entschieden zu haben und vor allem in den schnelleren Durchgängen oft nur geraten zu haben.

Dies lässt zwei mögliche Schlussfolgerungen zu. Zum einen könnte dieser Typ von Aufgabe zu komplex sein, um ihn explizit und bewusst verarbeiten zu können. Die menschlichen Fähigkeiten wären in diesem Fall an ihren Grenzen. Zum anderen könnte aber auch der Lernprozess noch nicht ausreichend gestaltet worden sein. Für diese

Annahme sprechen gleich mehrere Aspekte, die es lohnt zu betrachten. Möglich wäre, dass die Zone proximaler Entwicklung nicht optimal gestaltet wurde. Die Lernmethodik wäre also auf Grund der hohen Komplexität immer noch zu schnell. Eine andere Option wäre, dass die Lernmodelle nicht zur Aufgabe passen. Entweder sind die Modelle nicht für das Lernen hoch komplexer Regeln ausgelegt oder die Klassifikation des Lernprozesses in prozedurales Wissen war nicht zutreffend. Um diese Optionen evaluieren zu können werden im folgenden Kapitel 'Post-Hoc-Analysen' einige weitere statistische Analysen durchgeführt. Diese gehen über die eigentliche Hypothese hinaus, können eventuell jedoch Hinweise liefern, die bei der Gestaltung zukünftiger Experimente helfen können. Ziel der folgenden Betrachtung sollte es sein die vorliegenden Prozesse präziser zu klassifizieren und zum anderen eine Systematik zur weiteren Untersuchung zu entwickeln.

Sensorische Verarbeitung

Die Ergebnisse stützen die Annahme von Paavilainen et al. (2007) und Bendixen et al. (2008), dass der Erkennungsprozess, der die MMN auslöst, im auditiven sensorischen Gedächtnis präattentiv abläuft. Weder ein expliziter, noch ein impliziter Lernerfolg konnte in diesem Experiment festgestellt werden, womit das Wirken höherer kognitiver Bereiche an dieser Stelle nicht anzunehmen ist. Unter der Annahme, dass die MMN - auch wenn sie hier nicht erfasst wurde - vermutlich auch in diesem Experiment aufgetreten ist, kann geschlossen werden, dass nur sensorische Prozesse eine Erkennung derartig komplexer Aufgaben ermöglichen können.

Lernbedingungen und Lernmethodik

Offen bleibt an dieser Stelle, ob ein Lernprozess eventuell unter besseren Lernbedingungen und mit einer besseren Lernmethodik funktioniert hätte. Es gibt einige

mögliche Ansätze um erklären zu können, warum der Lernprozess nicht erfolgreich war. Entsprechend können an dieser Stelle einige Optimierungsansätze formuliert werden.

Lernbedingungen. Die Untersuchungsbedingungen verliefen in keinem schall-dichten, sondern unter eher provisorischen Bedingungen in einem für das Experiment präparierten Raum. Auch wenn Tür und Fenster immer geschlossen blieben, waren Geräusche von außen nicht gänzlich zu verhindern. Auch dass der Versuchsleiter im selben Raum anwesend war, könnte trotz der angewendeten Ablenkungsstrategie, einen negativen Effekt auf die Versuchspersonen gehabt haben. Allein eine kleine Bewegung - sei es nur eine Veränderung der Sitzposition - könnte durch die Nähe schon eine Ablenkung bedeuten, zumal die Konzentrationsanforderungen bei dem Experiment für die Versuchspersonen enorm hoch war. Unter optimalen Bedingungen sind Versuchsperson und Versuchsleiter während der Präsentation der Blöcke räumlich getrennt.

Lernmethodik. Ein anderer wichtiger Aspekt ist die Verbesserung der Lernmethodik. Der Lernaufwand wurde stark unterschätzt und der Lernprozess sollte deshalb noch deutlich umfassender gestaltet werden. Dazu könnten zum Beispiel weitere langsame Blöcke eingefügt, das Arbeitsblatt erweitert oder zusätzliche auditive Übungen durchgeführt werden.

Etwas ungünstig war ohnehin, dass es für den vierten Block keine Übung mit Feedback gab. Nach konsequenter Einhaltung der Lerntheorie hätte auch Block 4 noch einmal geübt werden müssen, bevor davon ausgegangen werden kann, dass dieser automatisiert ausgeführt werden kann. Genau genommen könnte davon ausgegangen werden, dass die Testdurchführung von Block 4 noch im assoziativen Stadium durchgeführt wurde und das autonome Stadium zuvor noch nicht erreicht wurde. Diese Vermutung geht direkt mit der bereits genannten Annahme einher, dass die Zone

proximaler Entwicklung nicht optimal angewendet wurde. Grundsätzlich ist jedoch - nicht zuletzt auch aufgrund der qualitativen Beurteilung - davon auszugehen, dass ein einfaches Einfügen eines weiteren schnellen Übungsblockes zu keiner nennenswerten Leistungssteigerung führen dürfte. Ein erfolgsversprechender Lernansatz müsste die Lernmethode deutlich erweitern. Nach jeder Geschwindigkeitsstufe müsste eine Erfolgssicherung stattfinden, analog des Verfahrens auf dem Arbeitsblatt. Dort wurde mit Hilfe der letzten Aufgabe sichergestellt, dass die Versuchsperson die Anwendung der Regel verstanden hat. Nach diesem Prinzip müssten auch im auditiven Experiment auf jeder Geschwindigkeitsstufe eine bestimmte Erfolgsrate gefordert sein, bevor die Versuchspersonen einen Block in der nächsthöheren Geschwindigkeitsstufe präsentiert bekommt.

Eventuell müssten für einen effektiveren Lernprozess auch Lerneffekte durch Pausen und Schlaf berücksichtigt werden, was den Lernprozess über mehrere Tage hinziehen könnte, bis eine Leistung mit deutlich erhöhter Sensitivität erreicht wird.

Ein weitere Aspekt ist die nötige Trennung des Lernprozesses in seine kognitiven Bestandteile. Die Bestandteile hängen letztlich zwar von der angewendeten Strategie ab, für den Spezialfall expliziten Lernens können jedoch zwei zentrale Leistungen benannt werden. Zum einen musste die Regel möglichst schnell erkannt werden (Erkennungsleistung), zum anderen mussten die letzten zwei Töne im Gedächtnis behalten werden (Gedächtnisleistung). Auf dem Arbeitsblatt war immer die gesamte Sequenz zu sehen (siehe Anhang). Daher wurde dort lediglich die Erkennungsleistung geübt. Eine Versuchsperson berichtete zum Beispiel, dass das Hauptproblem für sie darin bestanden habe, die letzten Töne differenziert im Gedächtnis zu behalten. Für das Gedächtnistraining könnte eine weitere auditive Aufgabe gestaltet werden, bei der spezifisch das Merken von Tönen geübt werden kann. Beide kognitiven Leistungsbestandteile müssten von vorne herein klar mit der Versuchsperson kommuniziert und

letztlich auch trainiert werden. Vorstellbar wäre, dass diese Übung in Kombination mit mehr Blöcken und Pausen zu passenden Zeitpunkten zu einer deutlichen Leistungssteigerung führen könnten.

Letztlich sollte auch nach jedem Block strukturiert erfragt werden, wie stark die Person subjektiv das Gefühl hatte, geraten, intuitiv vermutet oder tatsächlich kognitiv versucht hat, den letzten Ton zuzuordnen. Dies gäbe Aufschluss darüber, bei welcher Geschwindigkeitsstufe die Versuchspersonen anfangen intuitiv zu antworten oder sogar zu raten. Aus einem solchen Experiment resultierende Daten können helfen den Lernprozess zu verbessern, sie können aber auch direkt Informationen liefern, an welchen Punkten die Leistung des expliziten Lernens einbricht. Weitere Studien könnten dann an diesen Punkten ansetzen.

Die hohe Notwendigkeit zur Optimierung zeigt jedoch deutlich, dass die Lernmethodik beträchtlich verbessert werden muss und die Fähigkeiten für implizites, vor allem aber für explizites Lernen komplexer auditiver Regeln in der Vorbereitung dieses Experimentes noch erheblich unterschätzt wurden.

Literaturverzeichnis

- Bendixen, A., Prinz, W., Horváth, J., Trujillo-Barreto, N. J. & Schröger, E. (2008). Rapid extraction of auditory feature contingencies. *Neuroimage*, 41(3), 1111–1119.
- Brent, M. R. & Cartwright, T. A. (1996). Distributional regularity and phonotactic constraints are useful for segmentation. *Cognition*, 61(1), 93–125.
- Drake, C. & Bertrand, D. (2001). The quest for universals in temporal processing in music. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 930(1), 17–27.
- Fitts, P. M. & Posner, M. I. (1967). *Human performance*. Brooks/Cole.

- Goldman-Eisler, F. (1958). Speech production and the predictability of words in context. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 10(2), 96–106.
- Hoffmann, J. & Koch, I. (1998). *Implicit learning of loosely defined structures*. Sage Publications, Inc.
- Kozulin, A. (2003). *Vygotsky's educational theory in cultural context*. Cambridge University Press.
- Levelt, W. J. (1983). Monitoring and self-repair in speech. *Cognition*, 14(1), 41–104.
- Näätänen, R., Gaillard, A. W. & Mäntysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta psychologica*, 42(4), 313–329.
- Näätänen, R., Paavilainen, P., Rinne, T. & Alho, K. (2007). The mismatch negativity (mmn) in basic research of central auditory processing: a review. *Clinical Neurophysiology*, 118(12), 2544–2590.
- Paavilainen, P., Arajärvi, P. & Takegata, R. (2007). Preattentive detection of nonsalient contingencies between auditory features. *Neuroreport*, 18(2), 159–163.
- Postma, A. (2000). Detection of errors during speech production: a review of speech monitoring models. *Cognition*, 77(2), 97–132.
- Saffran, J. R., Newport, E. L. & Aslin, R. N. (1996). Word segmentation: the role of distributional cues. *Journal of memory and language*, 35(4), 606–621.
- Schröger, E. (2007). Mismatch negativity: a microphone into auditory memory. *Journal of Psychophysiology*, 21(3-4), 138.
- Stamov Roßnagel, C. (2001). Revealing hidden covariation detection: evidence for implicit abstraction at study. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 27(5), 1276.
- Whitmore, J. (2009). *Coaching for performance: growing human potential and purpose*. Nicholas Brealey Pub.