

Aus der Neurologischen Klinik und Poliklinik
der Ludwig – Maximilians – Universität München

Direktorin: Prof. Dr. med. Marianne Dieterich

**Der „Turm von Hanoi“ und „Turm von London“ auf
dem Tablet-PC: Untersuchung des
Problemlöseverhaltens von gesunden
Kontrollpersonen und von Patienten mit
umschriebenen Hirnläsionen**

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Humanbiologie
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig – Maximilians – Universität zu München

vorgelegt von

Dipl.-Psych. Fatma Sürer

aus

Tarsus (Türkei)

2009

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. med. Adrian Danek

Mitberichterstatter: Priv. Doz. Dr. Cornelis Stadtland
Prof. Dr. Ernst Pöppel

Dekan: Prof. Dr. med. Dr. h.c. M. Reiser, FACR, FRCR

Tag der mündlichen Prüfung: 28.09.2009

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| INHALTSVERZEICHNIS | 3 |
| 1. EINLEITUNG | 6 |
| 1.1. Funktionen des Frontalhirns | 6 |
| 1.2. Exekutive Funktionen und Hirnstrukturen | 6 |
| 1.3. Planen | 6 |
| 1.4. Problemlösen | 7 |
| 1.5. Transformationsaufgaben | 7 |
| 1.5.1. Turm von Hanoi | 7 |
| 1.5.2. Turm von London | 10 |
| 1.5.3. Untersuchungen mit dem Turm von Hanoi und London | 11 |
| 1.5.4. Varianten und Vergleich von Turm von Hanoi und London | 12 |
| 1.5.5. Messung des Lösungserfolgs | 15 |
| 1.5.6. Gemessene Leistungsparameter | 15 |
| 1.5.7. Anfangs- und Endkonfiguration | 17 |
| 1.5.8. Strategieranwendung | 18 |
| 1.5.9. Verarbeitungsgeschwindigkeit und Planen während der Lösung | 20 |
| 1.6. Ziel dieser Arbeit | 21 |
| 1.7. Fragestellung | 24 |
| 2. PROBANDEN UND METHODEN | 25 |
| 2.1. Kontrollstichprobe | 25 |
| 2.2. Patientenstichprobe | 26 |
| 2.3. Untersuchungsverfahren | 28 |
| 2.3.1. Das Programm ToHaL (Tower of Hanoi and London) | 28 |
| 2.3.2. Aufgabenauswahl | 30 |
| 2.3.3. Durchführung | 31 |
| 2.3.4. Gemessene Parameter | 32 |
| 2.3.5. Weitere verwendete Tests zur Untersuchung exekutiver Funktionen | 34 |
| 2.3.5.1. Zahlenspannen vorwärts und rückwärts | 34 |
| 2.3.5.2. Blockspanne vorwärts und rückwärts | 34 |
| 2.3.5.3. Matrizenstest | 35 |
| 2.3.5.4. Wortflüssigkeit | 35 |
| 2.3.5.5. Fünf-Punkte-Test | 35 |
| 2.3.5.6. Trail Making Test A und B | 36 |
| 2.3.5.7. Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenztest | 36 |
| 2.4. Datenanalyse | 37 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 2.4.1. | Quantitativ | 37 |
| 2.4.2. | Qualitativ | 37 |
| 3. | ERGEBNISSE | 39 |
| 3.1. | Gruppenvergleich: jüngere und ältere gesunde Probanden | 39 |
| 3.1.1. | Allgemeine Parameter | 39 |
| 3.1.2. | Turm-von-Hanoi-Parameter | 40 |
| 3.1.3. | Turm-von-London-Parameter | 42 |
| 3.2. | Analyse der Lösungswege | 46 |
| 3.2.1. | Analyse der „Hanoi-Graphen“ | 46 |
| 3.2.2. | Analyse der „London-Graphen“ | 50 |
| 3.3. | Einzelne Aufgaben im Vergleich | 54 |
| 3.3.1. | Turm von Hanoi | 54 |
| 3.3.2. | Turm von London | 56 |
| 3.4. | Turm von Hanoi und London im Vergleich | 58 |
| 3.5. | Korrelationen mit anderen Tests | 63 |
| 3.5.1. | Turm von Hanoi | 63 |
| 3.5.2. | Turm von London | 65 |
| 3.6. | Einzelfallanalyse der Patientendaten | 69 |
| 3.6.1. | Turm-von-Hanoi-Parameter | 69 |
| 3.6.2. | Turm-von-London-Parameter | 71 |
| 4. | DISKUSSION | 73 |
| 4.1. | Gruppenvergleich: jüngere und ältere gesunde Probanden | 73 |
| 4.2. | Analyse der Lösungswege der gesunden Kontrollpersonen | 76 |
| 4.2.1. | Analyse der „Hanoi-Graphen“ | 76 |
| 4.2.2. | Analyse der „London-Graphen“ | 77 |
| 4.3. | Aufgabenschwierigkeit | 78 |
| 4.4. | Turm von Hanoi und London im Vergleich | 81 |
| 4.5. | Korrelationen mit anderen Tests | 83 |
| 4.5.1. | Turm von Hanoi | 83 |
| 4.5.2. | Turm von London | 84 |
| 4.6. | Einzelfallanalyse der Patientendaten | 85 |
| 4.7. | Ausblick | 87 |
| 5. | ZUSAMMENFASSUNG | 89 |
| 6. | LITERATUR | 91 |

| | |
|---|------------|
| 7. ANHANG | 97 |
| 7.1. Abbildungsverzeichnis | 97 |
| 7.2. Tabellenverzeichnis | 99 |
| 7.3. Anhangsverzeichnis | 100 |
| 8. DANKSAGUNG | 124 |
| 9. LEBENSLAUF | 125 |

1. Einleitung

1.1. Funktionen des Frontalhirns

Das Frontalhirn steuert nach allgemeiner Ansicht die sogenannten „höheren“ kognitiven Funktionen, auch Exekutivfunktionen genannt, über deren Spezifizierung jedoch bisher wenig bekannt ist. Es gibt lediglich eine Aufzählung verschiedener kognitiver Leistungen, wie z. B. die Aufmerksamkeitskontrolle, das abstrakte Denkvermögen, die Fähigkeit zur Planung, Auslösung, Sequenzierung, Überwachung und zum Beenden von komplexem Verhalten, die Fähigkeit, unwichtige Informationen oder Reaktionen zu unterdrücken (Inhibition, Antwortunterdrückung), kognitive Flexibilität, die Fähigkeit, Informationen im Arbeitsgedächtnis zu behalten und zu verarbeiten sowie das problemlösende Denken (Miyake et al., 2000; Danek & Göhringer, 2005; Karnath, 2006).

1.2. Exekutive Funktionen und Hirnstrukturen

Das Frontalhirn ist durch neuronale Netzwerke mit anderen Hirnstrukturen verbunden und hat eine sehr hohe Dichte an bidirektionalen Faserverbindungen. Die unterschiedlichen Hirnstrukturen werden mit verschiedenen exekutiven Funktionen assoziiert (Karnath, 2006). Studien zeigen, dass Patienten mit frontalen Läsionen trotz erhaltener Gedächtnis- und Aufmerksamkeitsfunktionen Defizite beim Planen und bei der Sequenzierung von Handlungen haben (Carlin et al., 2000).

Beim Einsatz von Erfahrungen aus vorherigen Problemlösesituationen ist der ventromediale Präfrontalkortex, bei der Anpassung an neue Situationen sind dagegen Bereiche des dorsalen Kortex beteiligt (Waltz et al., 1999). Auch beim Unterdrücken von irrelevanten Reaktionen wird eine Beteiligung des präfrontalen Kortex angenommen (Miyake et al., 2000).

1.3. Planen

Planen wird als Prozess mit mehreren Schritten verstanden, der nur mental stattfindet und zur Lösung eines Problems dient. Folgende Teilleistungen sind beim Erstellen eines Planes

notwendig: das Festlegen von Handlungsabfolgen, das Beachten von Rahmenbedingungen und Zwischenzielen sowie das Erkennen von Alternativen. Um einen Plan erfolgreich durchführen zu können, müssen die geplanten Handlungen überwacht und gegebenenfalls umgestellt, Fehler erkannt und Pläne verworfen werden (von Cramon & Matthes-von Cramon, 1995).

1.4. Problemlösen

Logisch-analytisches, problemlösendes Denken erfordert Fähigkeiten wie Problemidentifikation, Problemanalyse, lösungsorientierte Hypothesenbildung, Strategiewahl, Strategiemodifikation und die Bewertung der gefundenen Lösung (Danek & Göhringer, 2005).

Nach Newell und Simon (1972) besteht jedes Problem aus einem Ausgangs- und Endzustand, wobei zahlreiche Zwischenzustände existieren. Somit ergibt sich ein Raum mit vielen möglichen Zuständen und Wegen. Ein Modell, das hilft, diese Komplexität zu beschreiben, ist der sog. „Problemraum“. Er beinhaltet alle möglichen Zustände eines Problems und wird graphisch dargestellt. Jeder Zustand kann durch eine Handlung in einen anderen überführt werden. Diese Theorie wurde auf verschiedene Problemstellungen in der kognitiven Psychologie angewandt. Ein wichtiger Aspekt bei der Lösung eines Problems ist somit die Suche im Problemraum nach einem geeigneten bzw. dem kürzesten Weg, der zum Ziel führt (Newell & Simon, 1972).

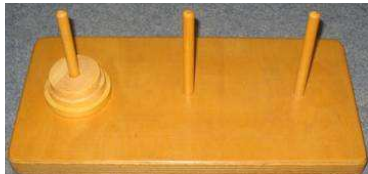
1.5. Transformationsaufgaben

1.5.1. Turm von Hanoi

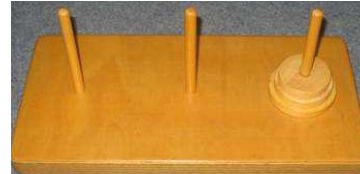
Zur Untersuchung des Planungs- und Problemlöseverhaltens werden häufig sogenannte Transformationsaufgaben eingesetzt. Bei diesen Aufgaben soll von einem vorgegebenen Ausgangszustand ein ebenso vorgegebener Endzustand erreicht werden.

Der „Turm von Hanoi“ (TvH), der 1883 vom französischen Mathematiker Édouard Lucas (1842-1891) als ein Solitaire-Spiel entwickelt wurde, stellt eine klassische Transformationsaufgabe dar (Simon, 1975).

Der TvH besteht aus drei vertikal aufgereihten Stangen und 3 oder mehr Scheiben, die der Größe nach in einer bestimmten Position aufeinander gelegt sind. Das Ziel ist es, die Scheiben von einer vorgegebenen Formation aus in eine andere vorgegebene Formation umzuschichten. Dabei darf immer nur eine Scheibe bewegt werden und es darf niemals eine größere Scheibe auf eine kleinere gelegt werden.



Startposition



Zielposition

Abbildung 1: Turm von Hanoi: klassische Aufstellung mit 3 Scheiben.

Bei der klassischen Aufstellung besteht der Problemraum aus drei Scheiben und drei Stangen (Abbildung 1). Zunächst sind alle drei Scheiben auf der linken Stange, der Startposition, aufgereiht und sollen alle auf die rechte Zielstange umgeschichtet werden. Die Zustände können durch einzelne Züge (Bewegung der Scheiben) verändert werden. Diese Zustände und Wege können graphisch in einem Zustandsgraphen, dem „Hanoi-Graphen“, abgebildet werden (Abbildung 2 a-c). Der TvH mit drei Scheiben und drei Stangen besteht aus 27 möglichen Zuständen. Jeder Punkt stellt einen Zustand dar und alle Zustände sind durch Linien miteinander verbunden. Die Linie zeigt an, dass von einem Zustand zum nächsten gewechselt wurde. Dieser Zustandsgraph hilft dabei, die verschiedenen Wege, die zur Lösung eines Problems möglich sind, zu visualisieren (Hinz et al., 2005, 2009).

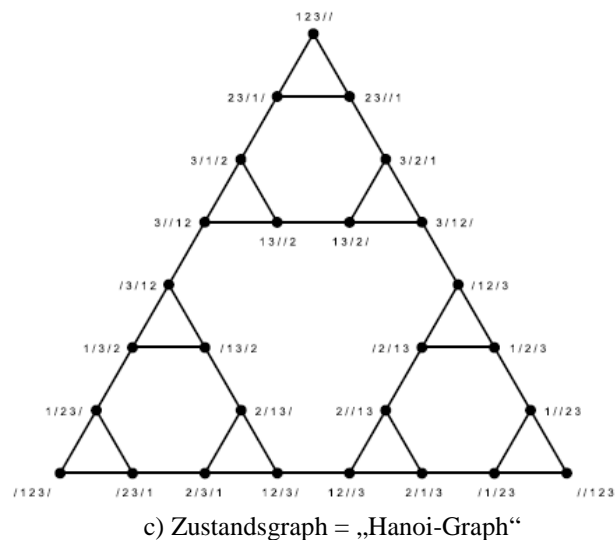
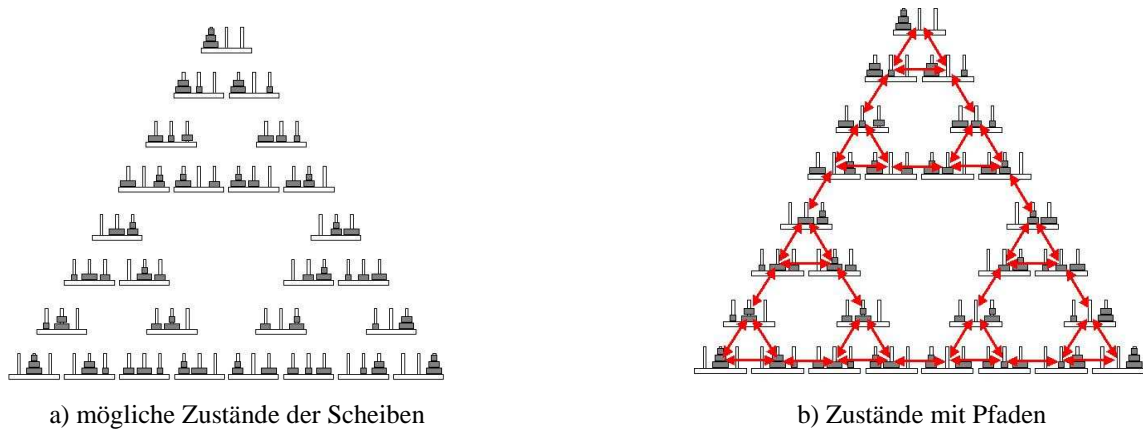
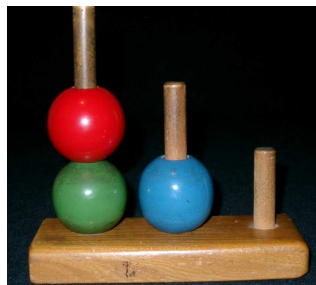


Abbildung 2 a, b und c: „Hanoi-Graph“ des Turm von Hanoi hier im Beispiel mit drei Scheiben. Abbildung 2a zeigt die einzelnen möglichen Zustände. Die Pfeile zeigen die Richtungen möglicher Züge an (Abbildung 2b). Die folgende Notation wird verwendet: die kleinste Scheibe wird mit „1“ bezeichnet, die mittlere Scheibe mit „2“ und die größte Scheibe mit „3“. Ein Schrägstrich trennt zwischen den Stangen (Abbildung 2c; detaillierte Beschreibung siehe im Kapitel Methoden).

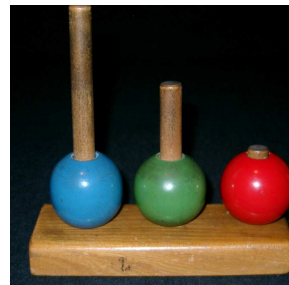
Der „Hanoi-Graph“ kann neben der Analyse des Problemlöseverhaltens auch bei der Auswahl von einzelnen Aufgaben sehr hilfreich sein. Beim TvH mit drei Scheiben und drei Stangen gibt es z. B. 702 mögliche Aufgaben. Zwischen den einzelnen Aufgaben gibt es sehr große Unterschiede, die ganz entscheidend von den einzelnen Aufgabenvariablen abhängen, wie z. B. der minimalen Anzahl an Zügen, den Anfangs- und Endkonfigurationen und der Anzahl an optimalen und nicht optimalen Lösungswegen.

1.5.2. Turm von London

Eine weitere Transformationsaufgabe, die häufig zur Untersuchung des Planungs- und Problemlöseverhaltens eingesetzt wird, ist der „Turm von London“ (TvL). Dieser Test wurde von Shallice (1982) entwickelt und besteht aus drei verschiedenfarbigen Kugeln, die auf drei unterschiedlich langen Stangen aufgereiht werden können. Es muss darauf geachtet werden, dass immer nur eine Kugel zur selben Zeit bewegt wird. Auf die kürzeste Stange passt nur eine Kugel, auf die mittlere zwei und auf die längste Stange passen drei Kugeln. Auch hier besteht die Aufgabe darin, aus einer Ausgangsposition heraus eine vorgegebene Zielposition zu erreichen (Abbildung 3).



Startposition

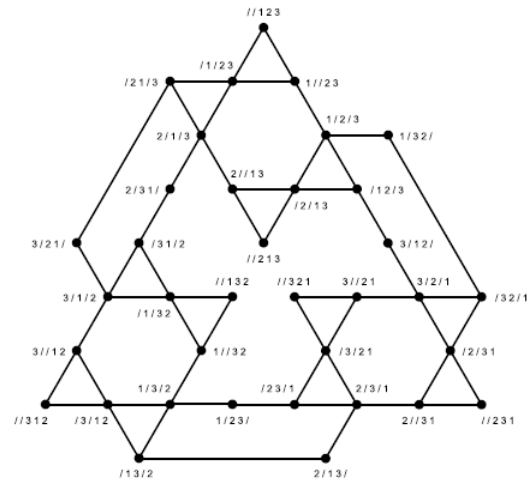
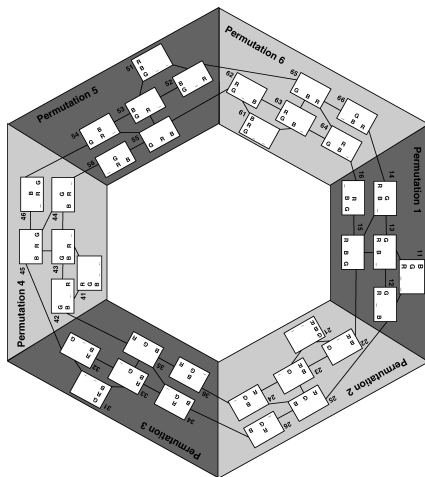


Zielposition

Abbildung 3: Abbildung des Original Turm von London (Shallice, 1982): Die Originalversion besteht aus einem Holzbrett mit drei unterschiedlich langen Stangen und drei verschiedenfarbigen Kugeln (rot, grün, blau). Auf die längste Stange passen 3 Kugeln, auf die mittlere Stange zwei und auf die kürzeste Stange passt nur eine Kugel. Die Aufgabe besteht darin, die Kugeln in möglichst wenigen Zügen von der vorgegebenen Startposition aus in die ebenfalls vorgegebene Zielposition zu versetzen.

Die Struktur des TvL kann ebenfalls in einem Zustandsgraphen abgebildet werden. Beim TvL gibt es 36 mögliche Zustände. Dieser Problemraum wurde von Berg und Byrd (2002) hexagonal dargestellt (Abbildung 4 a). Die 36 Zustände können in eine Matrix von 6 x 6 mit den entsprechenden Anordnungen der Kugeln und Permutationen der Kugelfarben aufgeteilt werden (Berg & Byrd, 2002).

Dieser Zustandsgraph wurde von Hinz (Hinz et al., 2009) in einer dreieckigen Form dargestellt. Der sogenannte „London-Graph“ ermöglicht einen leichteren Zugriff auf die Aufgaben und besseren Vergleich der verschiedenen Pfade. Die Notation ist ebenfalls leichter zu verstehen. Die blaue Kugel wird mit „1“ bezeichnet, die rote Kugel mit „2“ und die grüne Kugel mit „3“. Schrägstriche kennzeichnen den leeren Raum zwischen zwei Stangen (Abbildung 4 b).



a) Problemraum des TvL nach Berg & Byrd

b) „London-Graph“ nach Hinz

Abbildung 4 a und b: Der Problemraum des Turm von London. Abbildung 4 a zeigt die von Berg & Byrd (2002) vorgeschlagene Darstellung. Die Buchstaben B, R und G beziehen sich auf die Kugelfarben blau, rot und grün. Die Lösungsmuster der Aufgaben in jeder Matrix sind identisch, es sind nur die Kugelfarben vertauscht. Die Turmanordnungen in den Positionen 11, 21, 31 etc. sind z. B. in drei Matrizen (Permutation 2, 4 und 6) unten und in den anderen drei oben abgebildet (siehe Berg & Byrd, 2002, S. 590). Abbildung 4 b zeigt den von Hinz entwickelten „London-Graph“ (Hinz et al., 2009). Hier wird die folgende Notation verwendet: die blaue Kugel wird mit „1“ bezeichnet, die rote Kugel mit „2“ und die grüne Kugel mit „3“.

1.5.3. Untersuchungen mit dem Turm von Hanoi und London

Beide Tests wurden in verschiedenen experimentellen (z. B. Kotovsky, Hayes & Simon, 1985; Bishop et al., 2001; Welsh et al., 2001; Dagher et al., 1999; Kafer & Hunter, 1997) und klinischen (z. B. León-Carrion et al., 1991; Goel & Grafman, 1995; Ahonniska et al., 2000; Cockburn, 1995; Murji & Deluca, 1998) Studien zur Untersuchung des Problemlöse- und Planungsverhaltens eingesetzt.

Allerdings gibt es Hinweise darauf, dass der TvH nicht die Planungsfähigkeit misst. Goel und Grafman (1995) konnten zeigen, dass die Anzahl der gelösten Aufgaben beim TvH wenig mit Planen zu tun hat. In dieser Studie wurde die Leistung von gesunden Erwachsenen und Patienten mit Frontalhirnläsionen verglichen. Patienten konnten weniger Aufgaben perfekt lösen und hatten Schwierigkeiten bei der Bildung von Zwischenzielen. Daraus haben die Autoren geschlossen, dass der TvH nicht das Planungsverhalten, sondern eher Inhibitionsprozesse misst, also die Unterdrückung von unangebrachten Reaktionen (Goel & Grafman, 1995).

Beim TvL gibt es gegensätzliche Befunde, auch wenn die Ergebnisse von Shallice (1982) reproduziert werden konnten (Shallice & Burgess, 1991; Schnirman et al., 1998).

Cockburn (1995) berichtete beispielsweise, dass der TvL nicht zwischen Patienten mit und ohne frontaler Schädigung unterscheidet, was an der niedrigen Reliabilität des TvL liegen könnte (Cockburn, 1995). Kafer und Hunter (1997) behaupteten, dass der TvL ein unzuverlässiges und ungenaues Instrument zur Messung von Planen bei gesunden Kontrollen ist.

Obwohl der TvL sehr viele Informationen über kognitive Prozesse beim Planen liefert, zeigt die Übersicht über klinische und experimentelle Studien von Berg und Byrd (2002), dass es zwei Punkte zu beachten gibt: Zum einen werden nicht einheitlich die gleichen Messdaten bzw. Parameter untersucht und zum anderen werden die Problemlösestrategien der untersuchten Populationen nicht ausreichend erfasst und interpretiert.

1.5.4. Varianten und Vergleich von Turm von Hanoi und London

Die Durchsicht der Literatur zeigt, dass seit der Einführung des TvH (Simon, 1975) und der Entwicklung des TvL (Shallice, 1982) viele verschiedene Varianten entwickelt wurden. Die Aufgaben wurden erweitert, die Anzahl der Kugeln bzw. Scheiben erhöht, die Instruktionen, das Auswertungssystem und die Darbietung verändert. Es gibt neben Holzversionen auch Computerversionen, die eine gute Alternative zur Holzversion sind, wenn sie dasselbe Aussehen haben wie die Originalversion und die Bewegung der Kugeln bzw. Scheiben natürlich aussieht (Berg & Byrd, 2002).

In einer Variante wurde die Anzahl der Stangen und Kugeln des TvL auf 4 erhöht und „Vier-Scheiben-TvL“ genannt (Kafer & Hunter, 1997). Die Ergebnisse zeigten hier, dass die Lösung des „Vier-Scheiben-TvL“ einfacher war als die Lösung einer Aufgabe mit derselben Zugzahl beim originalen TvL. Eine Variante der beiden Aufgaben wurde mit 3 Stangen und 5 Scheiben entwickelt. In dieser Variante waren die Scheiben alle gleich groß und hatten unterschiedliche Farben. Die Stangen waren alle gleich hoch. Diese Variante wurde „Fünf-Scheiben-TvL“ genannt (Ward & Allport, 1997; Phillips et al., 1999; Abbildung 5 a). Diese Veränderungen ergeben auch eine Veränderung des Problemraumes und somit veränderte Anforderungen an die Aufgaben.

Ein weiteres Beispiel sind die „Stockings of Cambridge“ in der CANTAB (Cambridge Neuropsychological Test Automated Battery; Owen et al., 1990), eine sehr vereinfachte 2D Computerversion des TvL (Abbildung 5 b).

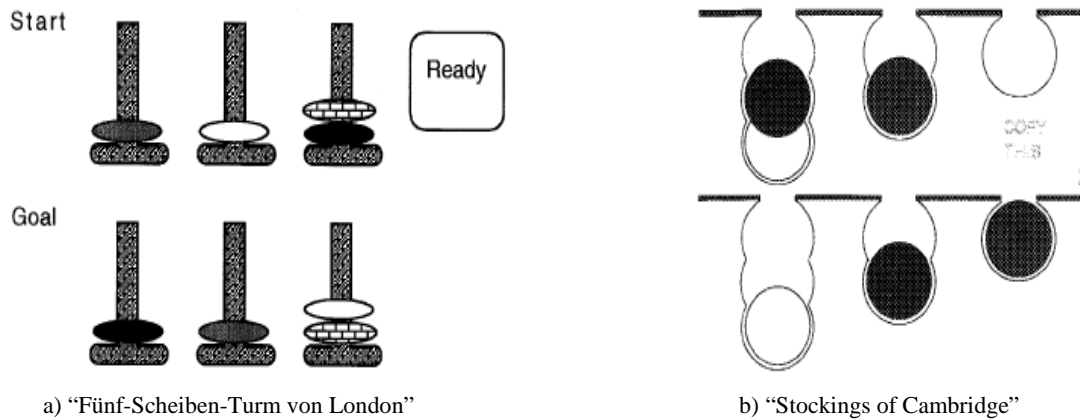


Abbildung 5 a und b: Varianten des Turm von London: Abbildung 5 a zeigt den „Fünf-Scheiben-Turm von London“ (Five-Disc-Tower of London) von Ward und Allport (1997, S. 51) und Abbildung 5 b die „Stockings of Cambridge“ aus der CANTAB (Cambridge Neuropsychological Test Automated Battery, Owen et al., 1990, S. 1026).

Diese genannten Veränderungen wurden bisher jedoch nicht ausreichend empirisch untersucht und standardisiert (z. B. Ward & Allport, 1997), weshalb es schwierig ist, diesbezüglich Studien und ihre Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Allein die Unterschiede in der Instruktion und Durchführung der beiden Tests führen zu verschiedenen Problemlösestrategien.

Die meisten Veränderungen gegenüber der Originalversion wurden bei der Auswahl der Aufgaben (Anfangs- und Endkonfigurationen) durchgeführt. Einige Autoren haben lediglich Aufgaben hinzugefügt (z. B. Humes et al., 1997) oder ganz neue Aufgabensets entwickelt (z. B. Schnirman et al., 1998). Andere haben für jede Start- und Zielposition eine neue Aufgabe verwendet (z. B. Ouellet et al., 2004). In einer Studie wurden drei verschiedene Startpositionen für 30 Aufgaben verwendet (Schnirman et al., 1998). In den meisten Studien, einschließlich Shallice's Version, gab es jedoch keine Erklärung für die Auswahl der Start- und Zielpositionen.

Neben der optischen und materiellen Veränderung des Turm von Hanoi und London gibt es auch viele verschiedene Instruktionsvarianten. Es gibt beispielsweise verschiedene zeitliche Vorgaben, was sich erheblich auf die Ergebnisse auswirken kann. Shallice hat für seine Studie mit dem TvL ein Set von 12 verschiedenen Zielzuständen entwickelt. Die Startposition war bei allen Aufgaben gleich. Es enthält 2-, 3-, 4- und 5-Zug-Aufgaben. Die Patienten mussten alle 12 Aufgaben durchführen und hatten für jede Aufgabe 60 Sekunden Zeit. Sie durften die Aufgaben jedoch so lange wiederholen, bis sie sie richtig lösen konnten. Dabei wurden die Aufgaben bewertet, die innerhalb von 60, 30 oder 15 Sekunden gelöst wurden (Shallice, 1982). Andere Autoren erlauben 90 bis 120 Sekunden oder geben

gar keine zeitlichen Begrenzungen vor (z. B. Culbertson & Zillmer, 1998; siehe auch Berg & Byrd, 2002).

Auch Regelbrüche und Fehler werden unterschiedlich bewertet. Einige Autoren erlauben ein bis zwei Versuche, bevor sie die Fehler zählen (z. B. Krikorian et al., 1994), andere bewerten Fehler gar nicht (z. B. Owen et al., 1990). Da Planen das Auseinandersetzen mit den Gegebenheiten eines Problems erfordert, erscheint es sinnvoll, Fehler und Regelbrüche nicht als Abbruchkriterium zu wählen, sondern sie als wertvollen Hinweis für bestimmte Verhaltensmuster zu betrachten. Leider gibt es bisher nur für wenige Aufgaben verlässliche Normen (Welsh et al., 1991).

Obwohl der TvH und der TvL beide zur Analyse der Problemlösefähigkeit herangezogen werden, unterscheiden sie sich deutlich voneinander. Beim TvH ist es beispielsweise technisch möglich, eine größere Scheibe auf eine kleinere zu legen, beim TvL ist es dagegen nicht möglich, eine zusätzliche Kugel auf die kürzeste Stange zu stecken. Beim TvH gibt es bei drei Stangen und drei Scheiben nur 27 mögliche Zustände, beim TvL dagegen 36. Durch die verschiedenen Instruktionen sind auch unterschiedliche Anforderungen an die Aufgaben gestellt. Beim TvL wird häufig die minimale Zugzahl genannt und damit die Planungsfähigkeit gemessen, wohingegen beim TvH die Problemlösefähigkeit bzw. Problemlösestrategie erfasst wird.

Humes und Kollegen (1997) haben den Zusammenhang zwischen dem TvH und TvL untersucht und nur eine moderate Korrelation ($r=0,37$) gefunden. Sie vermuten, dass diese niedrige Korrelation an der sehr geringen internen Konsistenz ($\alpha=0,25$) des TvL liegt. Dagegen war die interne Konsistenz ($\alpha=0,90$) beim TvH sehr robust (Humes et al., 1997).

Welsh und Kollegen (1999) haben auch den TvH und TvL miteinander verglichen und behaupten, dass beide Aufgaben isomorph sind und die gleichen kognitiven Prozesse wie Planen, Arbeitsgedächtnis und Inhibition messen (Welsh et al., 1999). Es gibt jedoch nur wenige empirische Untersuchungen, die diese Annahmen bestätigen.

Schnirmann und Kollegen (1998) haben den „30-item ToL-R“ entwickelt und hatten eine gute interne Konsistenz sowie eine moderate Korrelation ($r=0,61$) mit dem TvH. Hier wurde die Version mit 25 Aufgaben von Welsh und Kollegen (1999) verwendet. Die Reduzierung um 5 Aufgaben könnte die Reliabilität herabgesetzt und somit die Korrelation mit dem TvH verringert haben (Schnirmann et al., 1998).

Auch wenn eine gute interne Konsistenz erreicht wurde (Humes et al., 1997; Schnirman et al., 1998) ist immer noch unklar, warum die Korrelationen sich von Studie zu Studie unterscheiden. Es scheint eine geringe Überschneidung beider Aufgaben zu geben.

Welsh und Kollegen (1999) behaupten, dass Arbeitsgedächtnisfunktionen und Inhibitionsprozesse sehr stark vom TvL vorhergesagt, letztere jedoch nur sehr schwach in Zusammenhang mit dem TvH gebracht werden können (Welsh et al., 1999; Bull et al., 2004).

Diese Uneinheitlichkeit macht es schwer, einzelne Studien und Ergebnisse miteinander zu vergleichen und verwertbare Schlüsse über die zugrunde liegenden Mechanismen zu ziehen.

1.5.5. Messung des Lösungserfolgs

Es gibt zwei Möglichkeiten, den Lösungserfolg zu messen. Einmal kann er anhand der Anzahl optimal, d. h. mit der minimalen Zugzahl gelöster Aufgaben gemessen werden. In dieser Variante wird den Probanden die Mindestzugzahl vorgegeben, aber kein Zeitlimit gesetzt. Sie wird zuglimitierte Variante („performance-limit“) genannt. Der Vorteil dieser Variante ist, dass die Qualität des Planungsprozesses detailliert erfasst werden kann, weil ein gründliches Planen zwingend erforderlich ist.

In der sog. zeitlimitierten Variante („time-limit“) wird der Lösungserfolg durch den prozentualen Anteil an Aufgaben bestimmt, die innerhalb der vorgegebenen Zeit gelöst wurden, egal wie viele Züge gemacht werden. Hier wird ein Zeitlimit vorgegeben, dafür aber keine Mindestzugzahl genannt (Byrd & Berg, 2002, 2005; Culbertson & Zillmer, 1998). Es gibt unterschiedliche Vorgaben von erlaubten Versuchen bei der zuglimitierten Variante und der Zeiten bei der zeitlimitierten Variante. Diese Variationen können alle einen Effekt auf den Lösungserfolg haben.

1.5.6. Gemessene Leistungsparameter

Die Messung der folgenden Parameter ist bisher üblich: der Lösungserfolg, die Effizienz der Lösung, d.h. die Lösung mit der minimal möglichen Zugzahl, die Gesamtlösungszeit und das Lösungsverhalten (Berg et al., 2005).

Die Zeit, die zur Problemlösung benötigt wird, kann beim TvH in zwei Phasen eingeteilt werden. In der ersten Phase, der Explorationsphase, wird ausprobiert d.h. es werden wahllos Züge gemacht, die zum Ziel hin oder weiter davon wegführen. Die zweite Phase, auch „final path behaviour“ genannt, ist die zielorientierte Durchführungsphase bzw. Abschlussphase, in der die Probanden die Lösung „sehen“ und sich konkret dem Ziel nähern, d.h. sie führen diese letzte Sequenz gezielt durch, machen Züge, die sie direkt dem Ziel näher bringen.

Kotovskiy und Kollegen (1985) glauben, dass die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses einen Einfluss darauf hat, in wie weit man die Lösung im Voraus „sehen“ kann, wobei dies somit einen wichtigen limitierenden Faktor für die Länge der zweiten Phase darstellt (Kotovskiy et al., 1985).

Diese zwei Phasen (Explorationsphase und Durchführungsphase) können auf den TvL übertragen werden, wenn die zeitlimitierte Variante durchgeführt wird. Berg und Byrd (2002) nennen die erste Phase auch „pre-goal“-Phase (Planungsphase bzw. Initiationsphase). Diese beginnt mit dem ersten Zug der Planungsphase und endet mit dem ersten Zug der Durchführungsphase. Die nächste Phase nennen sie „goal“-Phase (Durchführungsphase bzw. Zielphase). Kotovskiy und Kollegen (1985) und Zhang (1997) behaupten, dass diese zwei Phasen des Problemlösens zwei verschiedene kognitive Prozesse widerspiegeln.

Bei klinischen Populationen zeigten sich unterschiedliche Längen in den zwei Phasen. Es wird vermutet, dass Läsionen im linken dorsolateralen präfrontalen Kortex und anderen Regionen, die für das Planen zuständig sind, zu längeren Planungsphasen oder aber zu kürzeren Durchführungsphasen führen können (Levin et al., 1996).

Die Länge der einzelnen Phasen, aber auch die Anzahl der gemachten Züge können Hinweise zur Effizienz der Lösung liefern. Längere Planungsphasen, d.h. die Zeit von der Präsentation der Aufgabe bis zum ersten Zug, würden beispielsweise längeres Planen bedeuten. Weil schwierigere Aufgaben ein gründlicheres Nachdenken erfordern, müssten die Planungsphasen bei diesen Aufgaben länger sein (Kafer & Hunter, 1997). Bei leichteren Aufgaben dagegen, die trotz langer Planungsphasen nicht in der Mindestzugzahl gelöst wurden, kann es aber auch bedeuten, dass ineffizienter geplant wurde. Die Effizienz der Lösung kann durch die Zahl der Züge definiert werden, die bis zur Lösung der

Aufgaben gemacht wurden. Je weniger Züge benötigt werden, desto effizienter ist die Lösung der Aufgabe gewesen (Levin et al., 1996).

Ward und Allport (1997) haben ein umgekehrtes Verhältnis zwischen der Planungszeit und den gemachten Fehlern entdeckt. Da es aber in der Zeit zwischen den Zügen auch Planungsphasen gibt, ist es schwer zu unterscheiden, wie viel Zeit für die sog. „online“-Planung und wie viel für die motorische Durchführung benötigt wird.

1.5.7. Anfangs- und Endkonfiguration

Studien haben gezeigt, dass neben der Anzahl der Scheiben und Züge auch die unterschiedlichen Anfangs- und Endkonfigurationen die Aufgabenschwierigkeit bestimmen und einen Einfluss auf den Lösungserfolg haben (Abbildung 6).

Klahr und Robinson (1981) haben das Planungsverhalten von Kindern in einer Studie detailliert beschrieben. Die Autoren haben die Leistung von 4-, 5- und 6-Jährigen verglichen und konnten zeigen, dass die jüngeren Kinder Aufgaben mit einer Turm-Zielkonfiguration am besten lösen konnten. Dagegen hatten sie bei Aufgaben mit einer flachen Zielkonfiguration kaum Lösungserfolge. Auch die Anzahl der Züge scheint ein wichtiger Faktor zu sein, der die Schwierigkeit einer Aufgabe bestimmt (Klahr & Robinson, 1981).

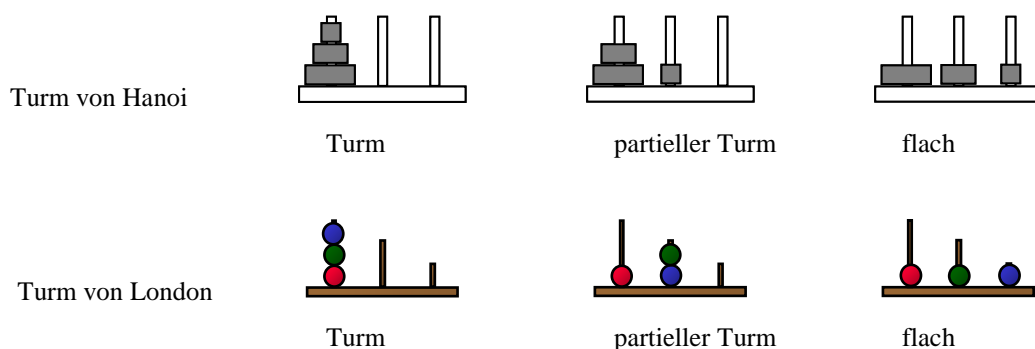


Abbildung 6: Drei mögliche Typen von Start- und Zielkonfigurationen beim TvH und TvL.

Berg und Kollegen (2005) haben gezeigt, dass die Startkonfiguration einen sehr großen Einfluss auf die Planungszeit und die Anzahl perfekt gelöster Aufgaben hat. Die Zielkonfiguration beeinflusst dagegen die Durchführungszeit und die Anzahl zusätzlich zur minimalen Zugzahl gemachter Züge. Deshalb erfordern Aufgaben, die zwar dieselbe minimale Zugzahl haben, aber eine unterschiedliche Struktur, unterschiedliche Fähigkeiten zum Planen (Kaller et al., 2004).

1.5.8. Strategieanwendung

Der Einsatz von Strategien kann beim Problemlösen dabei helfen, den sog. „cognitive load“ (Belastung der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses) zu reduzieren. Strategien können aber auch Informationen über das Planungsverhalten und die Effizienz liefern. Dabei gibt es verschiedene Strategien, die angewendet werden können.

Bisher wurde die Methode der Mittel-Ziel-Analyse zur Lösung von gut strukturierten Problemen untersucht. Bei dieser Teilzielbildungsmethode wird zuerst die Differenz zwischen dem aktuellen und dem Zielzustand festgestellt und anschließend ein Teilziel gebildet, das die Differenz reduziert (Newell & Simon, 1972).

Da die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses beschränkt ist, kann jeweils nur der nächste Schritt geplant und nur eine bestimmte Zahl von alternativen Schritten gespeichert werden. Daher sind Aufgaben, die durch die Mittel-Ziel-Analyse strukturiert werden, leichter zu lösen. Diese Strategie gibt beim Planen eine vorausschauende, vorwärts gerichtete zeitliche Richtung vor. Eine wichtige Regel ist dabei, keine rückwärts gerichteten Züge zu machen, d.h. nicht mehr in einen Zustand zurück zu kehren, den man bereits hinter sich hat. Diese Regel wird „anti-looping“-Heuristik genannt (Davies, 2000; Anzai & Simon, 1979). Bei dieser Strategie ist es jedoch wichtig, bereits gemachte Zugfolgen für die Planung der nächsten Schritte zu nutzen. Das Erinnern vorheriger Zustände hängt von der Aufgabenschwierigkeit und der Mindestzugzahl ab. Bei einfachen 3- bis 4-Zug-Aufgaben könnte man beispielsweise die einzelnen Schritte im Arbeitsgedächtnis behalten. Man könnte also so viele Züge wie möglich vorher planen und dann lösen. Für 5-Zug-Aufgaben wird das jedoch schwierig und hier stellt sich die Frage, welche die bessere Strategie wäre: vorher gut zu planen oder aber gar nicht zu planen, sondern während der Durchführung der Aufgabe immer nur den nächsten Schritt zu planen. Eine vorausschauende Planung würde

zu viele Ressourcen (Arbeitsgedächtnis) beanspruchen. Diese könnten effizienter dafür genutzt werden, immer nur den nächsten Schritt zu planen (Davies, 2000).

Simon (1975) hat verschiedene Strategien beschrieben, die beim Lösen des TvH eingesetzt werden können: 1. die „Ziel-Rekursions-Strategie“ („goal-recursion-strategy“), 2. die „perzeptuelle Strategie“ („perceptual strategy“) 3. die „verfeinerte perzeptuelle Strategie“ („sophisticated perceptual strategy“) und 4. die „Bewegungsmuster-Strategie“ („move-pattern strategy“).

Die Ziel-Rekursions-Strategie beruht auf zyklischen und wiederholten Bewegungen einer Scheibe, die notwendig sind, um die vielen Zwischenziele auf dem Weg zum eigentlichen Ziel zu erreichen. Rekursion beruht auf Regeln und kann, wenn sie einmal gelernt wurde, auf alle Aufgaben angewendet werden, egal wie schwer die Aufgaben sind. Auch bei den beiden „perzeptuellen“ Strategien wird eine Aufgabe in kleinere Aufgabeneinheiten unterteilt. Das Ziel bei der „verfeinerten perzeptuellen Strategie“ (VPS) ist es, zuerst die größte Scheibe freizulegen und sie an ihr Ziel zu bringen. Dazu müssen die darüber liegenden Scheiben der Größe nach umgesteckt werden. Somit müssen mehrere Zugfolgen im Gedächtnis behalten werden, um nicht in eine endlose Schleife zu geraten (Simon, 1975). Diese Strategie ist sehr effizient und wird von den meisten Probanden und Patienten angewendet, obwohl sie nicht mit der Mindestzugzahl zum Ziel führt (Klahr & Robinson, 1981; Goel & Grafman; 1995). Die erstgenannten drei Strategien werden zur Methode der Mittel-Ziel-Analyse gezählt.

Bei der „move-pattern“ Strategie, die nur bei Aufgaben mit einer Turm-Start- und Turm-Ziel-Konfiguration angewendet werden kann, ist es nicht notwendig, die Aufgaben in kleinere Einheiten zu unterteilen. Hier werden die Scheiben in einer zyklischen Reihenfolge umgeschichtet. Dabei hängt die Reihenfolge der Bewegungen bzw. Zugfolgen davon ab, ob es eine Aufgabe mit einer ungeraden oder geraden Anzahl an Mindestzügen ist. Bei ungerader Zahl an Mindestzügen sollte die kleinste Scheibe zuerst bewegt werden und bei Aufgaben mit gerader Anzahl die Nächstkleinste, die frei zugänglich auf dem Startturm liegt. Diese Strategie stellt kaum Anforderungen an das Arbeitsgedächtnis und ist relativ einfach anzuwenden (Simon, 1975).

Eine Strategie die beim Lösen von TvL-Aufgaben eingesetzt werden kann ist die „obstacle-removal subgoal“-Strategie. Bei dieser Strategie müssen Zwischenziele gebildet werden, um Kugeln vorübergehend aus dem Weg zu räumen damit andere Kugeln an ihr

Ziel gebracht werden können. Alle Aufgaben ab vier Zügen erfordern diese Strategie mindestens einmal. Diese Aufgaben werden auch „obstacle problem“ genannt, also eine Aufgabe mit mindestens einem solchen Hindernis. Man muss einen Zug machen, der einen erst einmal vom Ziel wegführt und darf sich nicht auf das Ziel der einzelnen Züge festlegen, sondern muss sich auf das Endziel konzentrieren. Daraus folgt, dass diese Strategie vorausschauendes Denken mit mehreren Schritten erfordert und daher komplexer ist. Neben den oben genannten effektiven Strategien gibt es auch ineffiziente Strategien, zu denen Regelbrüche gehören. Die Nichtbeachtung von Regeln kann auch wertvolle Informationen liefern und beim Problemlösen auch eine Art von Strategie sein (Berg et al., 2005).

1.5.9. Verarbeitungsgeschwindigkeit und Planen während der Lösung

Auch die Verarbeitungsgeschwindigkeit spielt bei Planungsaufgaben eine Rolle. Sie liefert wichtige Informationen über die Planungsfähigkeit und wurde in Turm-von-London-Studien untersucht (Culbertson & Zillmer, 1998; Morris et al., 1993).

Wie bereits oben beschrieben, kann die Lösungszeit in die Planungszeit (die Zeit zur Initiierung einer Lösung) und die Durchführungszeit (die Zeit zur Erreichung der Lösung) aufgeteilt werden (Berg & Byrd, 2002). Die Lösungszeit kann zusätzlich in Pausenzeiten und in Zeiten, die zum Nachdenken über die nächsten Schritte benötigt werden, aufgeteilt werden.

Davies (2003) vermutet, dass Probanden beim Planen eine von zwei verschiedenen Strategien anwenden. Die Planungs- und Durchführungszeit sind nicht unabhängig voneinander, sondern hängen reziprok zusammen. Im ersten Fall plant man länger, bevor man das Problem löst und benötigt weniger Pausen um „online“, also während der Durchführungszeit, zu planen. Somit hat man längere Planungszeiten und kürzere Durchführungszeiten. Im zweiten Fall plant man dagegen kurz, beginnt früh mit der Durchführung und macht während der Durchführungszeit öfter Pausen, um „online“ zu planen bzw. die nächsten Schritte zu planen. Beide Strategien können erfolgreich sein. Es gibt allerdings wenige Daten darüber. Owen (1990) fand heraus, dass die Durchführungszeiten bei Patienten mit frontalen Läsionen länger sind und schloss daraus, dass diese Patienten ineffizient vorplanen und somit während der Durchführungsphase weiter planen müssen. Diese Patienten brauchten mehr Züge als andere Patientengruppen.

Die Genauigkeit des Plans wird anhand der benötigten Züge ermittelt (Owen et al. 1990; Shallice, 1982).

Ward und Allport (1997) haben den Zusammenhang zwischen der benötigten Zeit und dem Problemlöseverhalten mit ihrer „5-Scheiben-TvL“-Version untersucht, wobei sie kein Zeitlimit vorgaben. Sie fanden heraus, dass die Zeit monoton mit der Aufgabenschwierigkeit zunimmt.

Auch Phillips und Kollegen (2001) glauben, dass das Planen lediglich einen geringen Effekt auf die Lösung hat. Vielmehr nehmen sie an, dass der Lösungserfolg von der Aufgabenschwierigkeit abhängt. In dieser Studie wurde ebenfalls die „5-Scheiben-TvL“-Version von Ward & Allport eingesetzt (Phillips et al., 2001).

In der Studie von Ward und Allport (1997) durften die Probanden beim Lösen von „5-Scheiben-TvL“-Aufgaben die Züge während der Durchführung planen. Dadurch wollten die Autoren der Überlastung der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses entgegenwirken. Dies hatte jedoch keinen Einfluss auf die Planungszeit, woraus Ward und Allport schlossen, dass die Anforderungen an das Arbeitsgedächtnis die Ergebnisse der Aufgaben nicht beeinflussen. Die zusätzlich benötigte Zeit bei der Durchführung, in der auch die motorische Handlung enthalten ist, scheint sich durch die reduzierte Planungszeit auszugleichen. Die Autoren erwähnten jedoch nicht die Anzahl der zusätzlich gemachten Züge, die als Maß für die Effizienz eines Planes gelten.

Da jedoch in den Studien von Ward und Allport (1997) und Phillips und Kollegen (2001) die „5-Scheiben-TvL“-Version verwendet wurde, können diese Ergebnisse nicht direkt mit Ergebnissen von Originalversionen des TvH und TvL verglichen werden. Durch die Veränderung der Anzahl und Größe der Scheiben und der Länge der Stangen wurde der Problemraum des TvH bzw. TvL und somit auch die Anforderungen an die Aufgaben verändert. Deswegen können diese Ergebnisse nicht direkt auf den TvL oder TvH übertragen werden.

1.6. Ziel dieser Arbeit

Nach wie vor gibt es in der Literatur offene Fragen wie z.B. eine fehlende einheitliche Struktur bzw. einen Standard der verwendeten Turm-von-Hanoi- und Turm-von-London-Versionen und der Auswahl an Aufgaben. Außerdem werden keine Aussagen über die Auswirkungen der modifizierten Versionen und zur Interpretation der einzelnen

Ergebnisse, die vom TvH und TvL gewonnen werden, gemacht. Bisher gibt es auch kaum Untersuchungen zur Auswirkung der Aufgabenstruktur auf die Ergebnisse. Dabei ist die Kenntnis der unterschiedlichen Struktur beider Tests ein sehr wichtiger Indikator für die Auswahl der Aufgaben, die Durchführung und die Auswertung.

In dieser Studie sollen nun die strukturellen Eigenschaften des TvH und TvL und deren Einfluss auf den Lösungserfolg und die Aufgabenschwierigkeit untersucht und miteinander verglichen werden. Anhand der „Hanoi“- und „London“-Graphen sollen Lösungsmuster und Strategien analysiert werden.

Da Alterseffekte beim Lösen des TvH und TvL bisher nicht ausreichend untersucht wurden, soll auch in dieser Studie das Problemlöseverhalten von jüngeren und älteren Probanden verglichen werden. Wir vermuten, dass ältere Probanden für beide Aufgaben mehr Zeit zur Lösung brauchen und auch weniger perfekt gelöste Aufgaben haben werden. Hier wird jedoch vermutet, dass nicht, wie bisher diskutiert wurde (Groth & Schmidt, 2005; Faber & Kühnpast, 2006) die erhöhten Reaktionszeiten bei der Durchführung der Aufgaben allein auf eine motorische Verlangsamung zurückzuführen sind, sondern vielmehr auf eine generelle kognitive Verlangsamung. Die kognitive Verlangsamung ist für die Abnahme der kognitiven Fähigkeiten im Alter verantwortlich und wirkt sich dadurch auf die Fähigkeit aus, Handlungen aufgrund der zeitlichen Einschränkung effektiv auszuführen und Informationen, die zur Durchführung der Aufgabe notwendig sind, aufrechtzuerhalten (Arbeitsgedächtnis) (Bugg et al., 2006). Die Abnahme der kognitiven Leistungsfähigkeit wird auf eine Abnahme der Frontalhirnfunktionen zurückgeführt. Die Funktionen des Frontalhirns sind für Alterseffekte am anfälligsten, weil das Frontalhirn eine der ersten Regionen ist, die beim Altern beeinträchtigt werden (West, 1996).

Um auch diese Annahme zu untersuchen, werden als Kontrollvariablen die Leistungen in weiteren Tests zur Untersuchung exekutiver Funktionen, wie verbales und visuelles Kurzzeit- und Arbeitsgedächtnis (Zahlenspannen/Blockspanne vorwärts und rückwärts), psychomotorische Geschwindigkeit (TMT A), kognitive Flexibilität (TMT B), abstraktes Denken und fluide Intelligenz (Matrizentest) sowie das problemlösende Denken (Wort- und Zeichenflüssigkeit) untersucht (Details siehe Kapitel 1.4). Weiterhin sollen der TvH und TvL in einer Korrelationsanalyse mit den Ergebnissen dieser Tests verglichen werden, um die Anforderungen an kognitive Prozesse zu untersuchen, aber auch, um die kognitiven Anforderungen an beide Turm-Aufgaben zu vergleichen.

Mit Hilfe der Graphen sollen die Lösungswege, insbesondere von Aufgaben mit mehreren Lösungswegen, genau analysiert und nach dem Einsatz bestimmter Strategien untersucht werden.

Ferner sollen die strukturellen Eigenschaften der Aufgaben untersucht werden, um weitere Faktoren zu bestimmen, die die Aufgabenschwierigkeit beeinflussen. Bisher konnte gezeigt werden, dass die minimale Zugzahl und die Start- und Zielkonfiguration eine Rolle spielen. Mit Analysen der einzelnen Aufgaben soll gezeigt werden, dass die Anzahl möglicher kürzester Lösungswege, aber auch die Anzahl der Wege, die beim ersten Zug gegangen werden können, die Schwierigkeit einer Aufgabe ausmachen. Diese Eigenschaft hängt wiederum mit den drei möglichen Konfigurationen beim Start und Ziel zusammen. Bei Aufgaben mit einer flachen Startkonfiguration sind die Möglichkeiten, den ersten Zug zu machen, von vornherein limitiert.

Auf Geschlechtsunterschiede wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen, da in vorherigen Studien bereits gezeigt werden konnte, dass es hinsichtlich der Lösungszeiten und Anzahl perfekt gelöster Aufgaben beim Lösen des TvH/TvL keine signifikanten Unterschiede zwischen Frauen und Männern gibt (Groth & Schmidt, 2006; Faber & Kühnpast, 2006; Dießl, 2007).

Ferner soll in der vorliegenden Arbeit das Planungs- und Problemlöseverhalten von Patienten mit umschriebenen Hirnläsionen untersucht werden. Dazu sollen gesunde Kontrollpersonen unterschiedlichen Alters und Patienten mit umschriebenen Hirnläsionen nach einem epilepsiechirurgischen Eingriff, verschiedene TvH- und TvL-Aufgaben lösen. Hierfür wurden die 12 Turm-von-London-Aufgaben von Shallice (1982) um acht weitere Aufgaben mit zunehmender Zugzahl und unterschiedlichen Start- und Zielpositionen erweitert. Um beide Transformationsaufgaben miteinander vergleichen zu können, wurden beim Turm von Hanoi drei Scheiben und 20 Aufgaben mit derselben Anzahl an Zügen ausgewählt. Die ersten 12 Aufgaben haben alle die gleiche Startposition, die weiteren acht Aufgaben haben unterschiedliche Start- und Zielpositionen.

1.7. Fragestellung

Folgende Fragen sollen in dieser Arbeit beantwortet werden:

- Haben Alterseffekte einen Einfluss auf das Problemlöse- und Planungsverhalten?
- Gibt es bestimmte Lösungsmuster bzw. Strategien, die eingesetzt werden?
- Welche Parameter bestimmen die Aufgabenschwierigkeit?
- Welche Unterschiede gibt es zwischen dem Turm von Hanoi und dem Turm von London?
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen dem Turm von Hanoi/London und anderen Tests zur Erfassung exekutiver Funktionen?
- Wie sieht das Planungs- und Problemlöseverhalten von Patienten mit umschriebenen Hirnläsionen aus?

2. Probanden und Methoden

2.1. Kontrollstichprobe

Insgesamt nahmen 80 gesunde Kontrollpersonen im Alter zwischen 20 und 70 Jahren freiwillig an der Untersuchung teil. Davon konnten 10 Datensätze aufgrund technischer Probleme nicht ausgewertet werden. Die Probanden wurden aus dem Bekannten- und Kollegenkreis der Neurologischen Klinik der LMU München und der Studenten- und Belegschaft der Universität Salzburg rekrutiert. Alle haben eine Einverständniserklärung unterschrieben und konnten die Untersuchung jederzeit ohne Angabe von Gründen abbrechen (siehe Anhang N).

Die Probanden wurden in zwei Altersgruppen aufgeteilt. Die jüngeren Probanden waren 20-45 Jahre ($n=39$; Mittelwert (M)=28,9 Jahre, Standardabweichung (SD)=7) und die älteren 46-70 Jahre ($n=31$; $M=57,3$ Jahre, $SD=8$). Die Bildung wird in Jahren dargestellt und aus den Schuljahren (Anzahl der Jahre für den jeweiligen Schultyp) und den Jahren der ersten Berufsausbildung errechnet. Bei einer Zweitausbildung wird nur die höher qualifizierende Ausbildung berechnet. Die weiteren Daten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Epidemiologische Daten der Kontrollstichprobe ($n=70$)

| | | N | Alter | Bildung in Jahren |
|---------------------------------------|--------|----------|--------------|--------------------------|
| Gesamt | | 70 | 41,5 (16) | 13,4 (2,5) |
| Untergruppe der 20-45 jährigen | Frauen | 21 | 27,6 (6,6) | 14,6 (2,5) |
| | Männer | 18 | 30,3 (7,1) | 14,2 (2,3) |
| Untergruppe der 46-70 jährigen | Frauen | 25 | 58,0 (8,0) | 11,8 (1,9) |
| | Männer | 6 | 54,3 (7,5) | 13,8 (2,5) |

Aufteilung beider Altersgruppen nach Bildung und Geschlecht. Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern).

Die Verteilung von Alter und Bildung in Jahren nach Altersgruppe und Geschlecht wird in Abbildung 7 dargestellt.

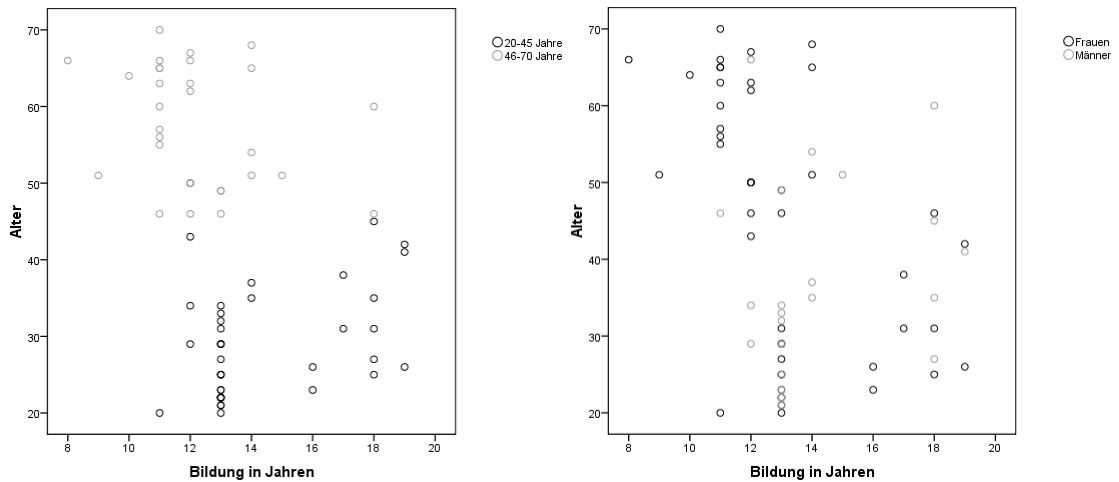


Abbildung 7: Verteilung von Alter und Bildung in Jahren jeweils für Altersgruppe und Geschlecht. Die Streudiagramme zeigen, dass es insgesamt mehr Frauen als Männer waren und diese im Vergleich zu den Männern in der Gruppe der Älteren etwas besser vertreten waren. Die jüngeren haben im Vergleich zu den älteren Probanden mehr Schuljahre, ältere Frauen im Vergleich zu den älteren Männern weniger Schuljahre.

2.2. Patientenstichprobe

Es wurden 22 Patienten mit umschriebenen Läsionen (rechts temporal n=5; links temporal n=9; rechts und links frontal jeweils n=4) nach einem epilepsiechirurgischem Eingriff aus der Epilepsieambulanz der Neurologischen Klinik, Klinikum Großhadern untersucht. Als Vergleichsgruppe wurde eine Stichprobe (n=22) nach Alter, Geschlecht und Schulbildung in Jahren aus der Gesamtstichprobe der gesunden Kontrollen (n=70) gematched (Tabelle 2).

Tabelle 2: Epidemiologische Daten der Patienten- und Kontrollstichprobe (n=22)

| | Kontrollen | Patienten |
|--------------------------|-------------------|------------------|
| Alter in Jahren | 43,73 (10,42) | 43,41 (10,16) |
| Frauen/Männer | 11/11 | 11/11 |
| Bildung in Jahren | 12,82 (1,65) | 12,05 (1,91) |
| N | 22 | 22 |

Es wurden 22 gesunde Kontrollen nach Alter, Bildung in Jahren und Geschlecht als Vergleichsgruppe zu den Patienten aus der Gesamtstichprobe der gesunden Kontrollen (n=70) ausgewählt. Standardabweichungen sind in Klammern dargestellt.

Die Verteilung von Alter und Bildung ist in Abbildung 8 dargestellt.

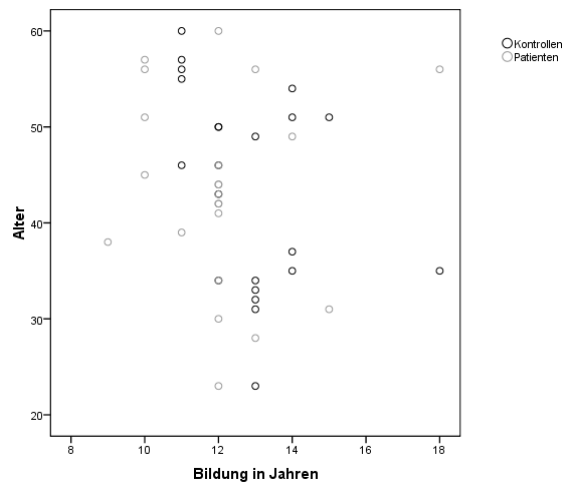


Abbildung 8: Verteilung von Alter und Bildung für Kontrollpersonen und Patienten.

Die Läsionen der Patienten wurden anhand von MRT- Bildern mit Hilfe des Programms MRICro (www.mricr.com) beschrieben. Die Läsionsprofile der Patienten sind im Anhang in Tabelle A abgebildet.

Aufgrund der sehr kleinen Gruppengrößen (rechts temporal $n=5$; links temporal $n=9$; rechts und links frontal jeweils $n=4$), wurden die Patientendaten alle einzeln analysiert. Im Folgenden werden nur die Patienten genauer beschrieben, deren Leistungen bei mehr als zwei Turm-von-Hanoi- und -London-Parametern zwei Standardabweichung unter dem Mittelwert der Kontrollstichprobe ($n=22$) lagen.

2.3. Untersuchungsverfahren

2.3.1. Das Programm ToHaL (Tower of Hanoi and London)

In Anlehnung an die Empfehlungen von Berg und Byrd (2002) und die Original TvL-Version von Shallice, haben wir in der Arbeitsgruppe Kognitive Neurologie der LMU München zusammen mit Prof. Hinz vom Mathematischen Institut eine Computerversion des Turm von Hanoi und London auf einem Tablet-PC entwickelt. Mit Hilfe einer graphischen Darstellung des jeweiligen Problemraums können die möglichen Aufgabenkombinationen, die dazugehörigen Lösungspfade bzw. möglichen Schritte und die Regeln abgeleitet, sowie die begangenen Fehler und falschen Pfade genau dargestellt werden. Diese Zustände können mit Hilfe des „Hanoi-Graphen“ (TvH) und des „London-Graphen“ (TvL) dargestellt werden. Zusätzlich werden die benötigte Zeit, die gemachten Züge, die Anzahl der Fehler, die genauen Positionen der Fehler und die gewählten Lösungswege aufgezeichnet (Hinz et al., 2009).

Die Untersuchung mit dem ToHaL-Programm wurde auf einem speziellen Notebook, einem sog. Tablet PC (Fijutsu Siemens Lifebook T3010), durchgeführt. Der Bildschirm dieses Laptops lässt sich um 180 Grad drehen und umklappen. Die Scheiben bzw. Kugeln können mit einem speziellen Stift auf dem Bildschirm berührt und versetzt werden (Abbildung 9).



Abbildung 9: Tablet PC von Fijutsu Siemens (Lifebook T3010). Der Bildschirm lässt sich um 180 Grad drehen und umklappen. Die Scheiben/Kugeln können mit dem speziellen Stift auf dem Bildschirm berührt und versetzt werden.

Die Daten wurden mit der Version 2.1 des ToHaL erhoben. Beim Starten des Programms können demographische Daten eingegeben und die Sprache (Deutsch oder Englisch) sowie die Geschwindigkeit der Kugeln/Scheiben (*schnell*, *mittel*, *langsam* oder aber *absolute Zahlen*) ausgewählt werden. Beim TvL kann zusätzlich die Kugelfarbe grün in gelb umgestellt werden. Ferner können folgende Werte auf dem Bildschirm angezeigt werden: die verstrichene Zeit, die verbleibende Zeit, die Gesamtzüge, die gemachten Fehler, die verbleibenden Züge, die erforderlichen Züge, d. h. die Züge, die bis zur Lösung der Aufgabe noch mindestens gemacht werden müssen, sowie die Bezeichnung der Scheiben (1, 2, 3 etc., der Größe nach) und der Stangen (links, Mitte, rechts; Abbildung 10). In dieser Studie wurde lediglich die verstrichene Zeit seit Beginn der Aufgabe angezeigt.

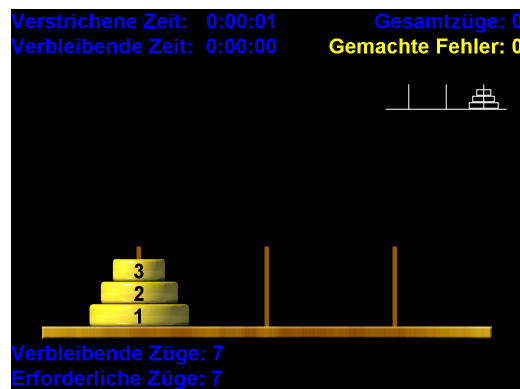


Abbildung 10: Das Programm ToHaL. Folgende Anzeigen können eingestellt werden: die verstrichene Zeit, die verbleibende Zeit, die Gesamtzüge, die gemachten Fehler, die verbleibenden Züge sowie die erforderlichen Züge (Hinz et al., 2009).

Zusätzlich können ein vorgesehene Zeitlimit, die zu speichernden Daten (Zeit, Züge, Fehler), ein Neustart für die einzelnen Aufgaben sowie ein automatisches Lösen der Aufgaben oder Pausen eingestellt werden. In dieser Studie waren Pausen und ein automatischer Neustart nicht erlaubt. Alle Daten wurden gespeichert.

Die Startposition ist in der Mitte des Bildschirms, die Zielposition am rechten oberen Rand des Bildschirms abgebildet. Die Aufgabe der Probanden ist es, die Scheiben/Kugeln mit Hilfe eines speziellen Stifts für den Tablet PC von einer Stange auf die andere zu versetzen. Sobald der Proband die jeweilige Scheibe/Kugel mit dem speziellen Stift auf dem Bildschirm berührt hat, wird diese Scheibe/Kugel mit einem roten Rahmen markiert. Danach muss die berührte Scheibe/Kugel versetzt werden. Hierzu wird mit dem Stift die

jeweilige Zielstange berührt und die Scheibe/Kugel wird automatisch versetzt. Falls gegen eine Regel verstoßen wird, ertönt ein lauter Brummtton.

Zur detaillierten Beschreibung der Zustandsgraphen des TvH und TvL und des Programms wird auf Hinz und Kollegen verwiesen (Hinz et al., 2009).

2.3.2. Aufgabenauswahl

Die Probanden mussten insgesamt 20 Aufgaben lösen. Die ersten 12 TvL-Aufgaben waren die Originalaufgaben von Shallice mit jeweils 2 Aufgaben mit 2 Zügen und 3 Zügen, sowie jeweils 4 Aufgaben mit 4 Zügen und 5 Zügen (die Aufgaben wurden in derselben Reihenfolge vorgegeben wie in der Originalstudie von Shallice, 1982). Um den Einfluss der Zugzahl auf die Aufgabenschwierigkeit und den Lösungserfolg zu untersuchen, wurden diese Aufgaben um jeweils 4 Aufgaben mit 6 Zügen und 7 Zügen erweitert. Es wurden Aufgaben mit unterschiedlichen Start- und Zielkonfigurationen ausgewählt.

Um beide Turm-Aufgaben besser miteinander vergleichen zu können, wurden beim TvH 3 Scheiben verwendet und die Aufgaben so ausgewählt, dass die Startpositionen der ersten 12 Aufgaben alle gleich sind und der TvL-Startposition in ihrer Konfiguration ähnlich sind (Abbildungen und Details zu den einzelnen Aufgaben siehe Tabelle B 1 und B 2 im Anhang).

Die kürzesten Wege auf den Graphen sehen den Wegen der einzelnen TvL-Aufgaben ähnlich, wenn man sie dreht oder spiegelt (Abbildung 11).

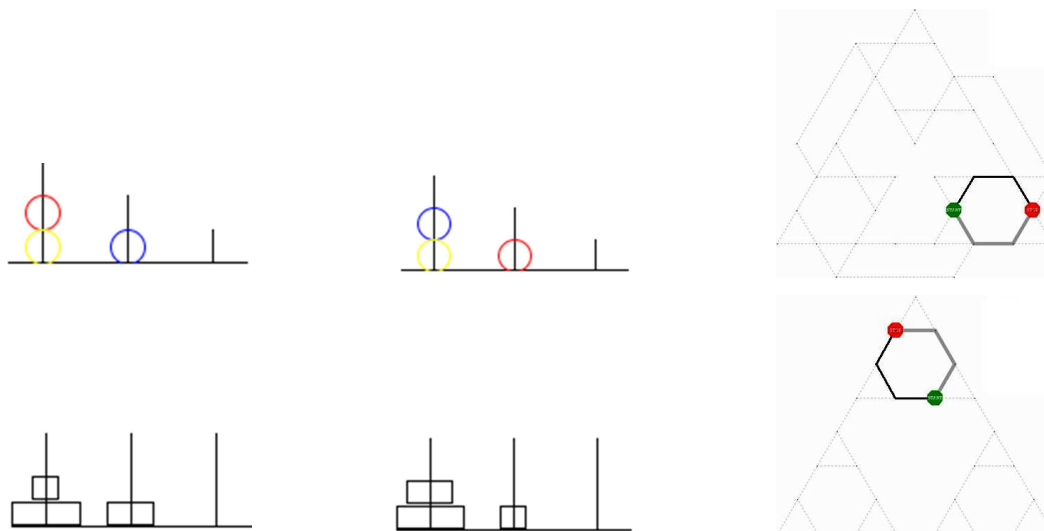


Abbildung 11: Aufgabe Nr. 3 des Turm von London und Hanoi im Vergleich. Anfangs- und Endkonfiguration sowie der Lösungsweg im jeweiligen Graphen sehen sich ähnlich.

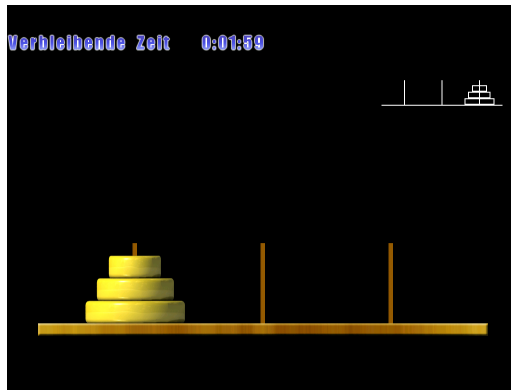
Die entsprechenden Aufgaben hatten dieselbe Zugzahl mit jeweils 2 Aufgaben mit 3 Zügen und 4 Zügen sowie jeweils 4 Aufgaben mit 5 Zügen, 6 Zügen und 7 Zügen. Bei den Aufgaben mit 6 und 7 Zügen wurden für den TvH und den TvL unterschiedliche Konfigurationen ausgewählt (flacher Start, flaches Ziel, Turm-Start, Turm-Ziel). Die Start- und Zielkonfiguration, sowie die minimale Zugzahl für jede einzelne Aufgabe ist in Tabelle B 1 und B 2 im Anhang nach der Notation von Hinz (Hinz et al., 2009) genau beschrieben.

2.3.3. Durchführung

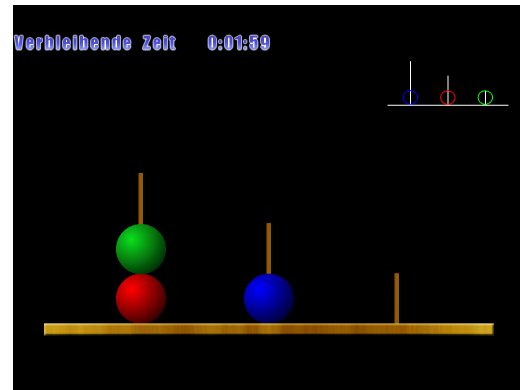
Um eine zeitliche Begrenzung zu setzen, hatten die Probanden für jede Aufgabe zwei Minuten Zeit. Die verbleibende Zeit wurde für jede Aufgabe bis zur Beendigung bzw. bis zum Ablauf der zwei Minuten auf dem Bildschirm angezeigt. Nach Ablauf der zwei Minuten wurde die jeweilige Aufgabe automatisch abgebrochen und es konnte zur nächsten Aufgabe übergegangen werden.

Die Instruktionen wurden schriftlich vorgelegt und anschließend anhand einer Beispielaufgabe mündlich demonstriert. Um die Probanden mit dem Tablet PC und mit der Bedienung mit dem Stift vertraut zu machen, wurde eine Übungsaufgabe durchgeführt. Die Probanden wurden instruiert, genau zu überlegen bevor sie den ersten Zug machen und zu versuchen, die Aufgaben mit möglichst wenigen Zügen zu lösen. Die minimale Zugzahl wurde ihnen nicht genannt (Instruktionen siehe Anhang L und M).

In zufälliger Reihenfolge wurde entweder mit dem TvL (Abbildung 12 a) oder dem TvH (Abbildung 12 b) begonnen. Am Ende der Testsitzung wurde dann die jeweils andere Aufgabe durchgeführt. Zwischen den beiden Aufgaben sollten die Probanden weitere Tests zur Untersuchung der Exekutivfunktionen durchführen (siehe Kapitel 2.3.5).



a) Turm von Hanoi



b) Turm von London

Abbildung 12 a und b: Turm von Hanoi und London auf dem Tablet PC: vorne auf dem Bildschirm ist das Spielfeld mit der Startposition der jeweiligen Aufgabe abgebildet. In dieser Studie hatten die Probanden zur Lösung einer Aufgabe zwei Minuten Zeit. Die verbleibende Zeit wurde links oben, die Zielposition rechts oben am Bildschirmrand angezeigt.

2.3.4. Gemessene Parameter

Folgende Parameter werden vom Programm automatisch gespeichert und können in Auswertungsprogramme (SPSS, Excel) exportiert werden:

- **Gesamte Lösungszeit:** die Lösungszeit ist die gesamte Zeit, die zur Lösung einer Aufgabe benötigt wird. Sie besteht aus zwei Phasen: der Planungsphase und der Durchführungsphase (nach Berg und Byrd, 2002; Abbildung 13).

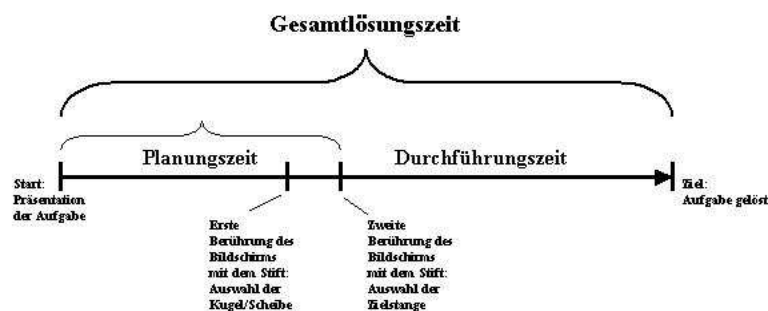


Abbildung 13: Aufteilung der gesamten Lösungszeit in die Planungs- und Durchführungszeit. Die Planungszeit beginnt mit der Präsentation der Aufgabe und endet mit dem zweiten Berühren des Stiftes auf dem Bildschirm, also dem Ablegen der ersten Scheibe/Kugel. Hier beginnt die Durchführungszeit, die mit der Lösung der Aufgabe endet.

- Planungszeit: Die Planungszeit ist die Zeit von der Präsentation einer Aufgabe bis zum ersten Zug. In dieser Studie endet die Planungsphase mit dem Berühren der Stange, auf der die erste Scheibe/Kugel abgelegt wird.
- Durchführungszeit: Die Durchführungszeit ist die Zeit, die bis zum letzten Zug einer Aufgabe benötigt wird. Sie beginnt mit dem Ende der Planungsphase und endet mit Beendigung einer Aufgabe.
- Züge: Anzahl der Züge, die zur Lösung einer Aufgabe benötigt werden.
- Fehler: Wenn beim TvH versucht wird, eine größere Scheibe auf eine kleinere Scheibe zu legen bzw. beim TvL, eine Kugel auf eine Stange zu legen, auf die keine mehr passt, wird das als Fehler registriert.
- Lösungserfolg: Es wird automatisch gespeichert, ob die Aufgabe in der minimalen Zugzahl, mit mehr Zügen als der minimalen Zugzahl oder gar nicht gelöst wurde.

Weiterhin wurden folgende Parameter sowohl für den TvH als auch den TvL berechnet und analysiert:

- Gesamtlösungszeit: die Zeit, die zur Lösung aller 20 Aufgaben benötigt wurde.
- Gesamtplanungszeit: die Summe der Planungszeit aller 20 Aufgaben.
- Gesamtdurchführungszeit: die Summe der Durchführungszeit aller 20 Aufgaben.
- Gesamtzüge: die Summe der Züge aller gelösten Aufgaben.
- Gesamtfehler: die Summe aller gemachten Fehler.
- Optimal gelöste Aufgaben: die Anzahl der Aufgaben, die in der minimalen Zugzahl und der vorgegebenen Zeit gelöst wurden.

2.3.5. Weitere verwendete Tests zur Untersuchung exekutiver Funktionen

Weitere Verfahren wurden zur Untersuchung verschiedener Exekutivfunktionen, wie dem verbalen und visuellen Kurzzeit- und Arbeitsgedächtnis, der verbalen und figuralen Flüssigkeit, der kognitiven Umstellungsfähigkeit und dem abstrakten Denkvermögen eingesetzt. Die prämorbid Intelligenz wurde mit einem Wortschatztest geschätzt.

2.3.5.1. Zahlenspannen vorwärts und rückwärts

Das verbale Kurzzeitgedächtnis wurde mit dem Untertest „Zahlenspannen vorwärts“ aus dem Wechsler Gedächtnis Test – Revidierte Fassung (WMS-R: revidierte deutsche Fassung, Wechsler, 2000) untersucht. Den Probanden wurde eine Reihe von Zahlen wachsender Länge (drei bis maximal acht) vorgelesen, die sie sofort nach deren Präsentation in derselben Reihenfolge wiederholen sollten. Das verbale Arbeitsgedächtnis wurde mit dem Untertest „Zahlenspannen rückwärts“ aus der WMS-R untersucht. Hier sollen die Probanden die vorgegebenen Zahlenreihen (zwei bis maximal sieben Zahlen lang) direkt nach ihrer Vorgabe in umgekehrter Reihenfolge wiedergeben. Für jede richtig wiederholte Reihe gab es einen Punkt. Wenn zwei Reihen hintereinander nicht richtig wiedergegeben werden konnten, wurde die Aufgabe abgebrochen. Die erreichten Punkte (je maximal 12 Punkte) für das Kurzzeit- und das Arbeitsgedächtnis wurden zur statistischen Analyse verwendet.

2.3.5.2. Blockspanne vorwärts und rückwärts

Das visuelle Kurzzeitgedächtnis wurde mit dem Untertest „Blockspanne vorwärts“ aus dem Wechsler Gedächtnis Test – Revidierte Fassung (WMS-R: revidierte deutsche Fassung, Wechsler, 2000) untersucht. Das Blockspannenbrett besteht aus 8 zufällig angeordneten kleinen Würfeln auf einem Brett, die vom Versuchsleiter angetippt werden. Die Probanden sollen die Würfel in derselben vorgegebenen Reihenfolge antippen. Die Länge der Folgen wachsen von zwei bis maximal acht an, es können maximal 14 Punkte erreicht werden. Das visuelle Arbeitsgedächtnis wurde mit dem Untertest „Blockspanne rückwärts“ aus der WMS-R überprüft. Hier sollen die Probanden eine bestimmte Reihenfolge der angetippten Würfel direkt nach ihrer Vorgabe in umgekehrter Reihenfolge

wiedergeben. Die Folgen wachsen von zwei bis maximal sieben an, es können maximal 12 Punkte erreicht werden. Wenn zwei Reihen hintereinander nicht richtig wiedergegeben wurden, wurde die Aufgabe abgebrochen. Auch hier wurden die jeweiligen erreichten Punkte zur weiteren Analyse verwendet.

2.3.5.3. Matrizenest

Die Untersuchung des abstrakten, schlussfolgernden Denkens und der fluiden Intelligenz wurde mit dem Matrizen-Test aus dem Wechsler Intelligenztest für Erwachsene (WIE; Aster, Neubauer & Horn, 2006; deutschsprachige Adaptation des WAIS-III von Wechsler, 1998) durchgeführt. Der Test umfasst 26 Aufgaben. Jedes Item besteht aus drei abstrakten geometrischen Mustern und einem freien Feld. Am unteren Rand der Vorlage werden fünf weitere Muster angeboten. Der Proband hat dasjenige auszuwählen, das die oberen Muster korrekt vervollständigt. Zur Analyse wurde die Anzahl der richtigen Lösungen verwendet.

2.3.5.4. Wortflüssigkeit

Zur Untersuchung der verbalen Flüssigkeit wurde der Regensburger Wortflüssigkeits-Test (RWT; Aschenbrenner, Tucha & Lange, 2000) durchgeführt. Die Probanden sollten jeweils innerhalb einer Minute Wörter mit dem Anfangsbuchstaben „S“ und der Kategorie „Tiere“ nennen. Zur weiteren Analyse wurde jeweils die Anzahl der richtig genannten Wörter verwendet.

2.3.5.5. Fünf-Punkte-Test

Zur Untersuchung der figuralen Flüssigkeit wurde der 5-Punkte-Test (Regard, Strauss, Knapp, 1982; Ruff, 1988) eingesetzt. Die Probanden sollten innerhalb einer Minute so viele Figuren wie möglich produzieren, indem sie zwei bis fünf in Kästchen vorgegebene Punkte durch Linien miteinander verbinden. Zur Analyse wurde die Anzahl der richtigen Figuren verwendet (Abbildung 14).

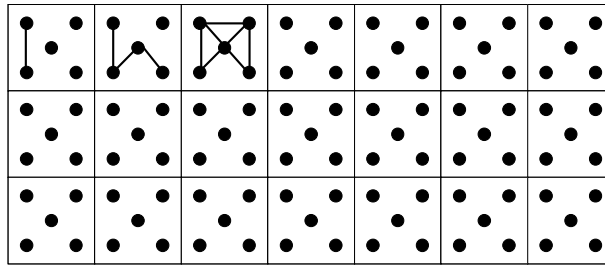


Abbildung 14: Fünf-Punkte-Test. Es sollen innerhalb einer Minute möglichst viele verschiedene Figuren produziert werden, indem zwei bis fünf Punkte mit Linien miteinander verbunden werden.

2.3.5.6. Trail Making Test A und B

Die psychomotorische Geschwindigkeit wurde mit dem TMT-A (Reitan, 1971) gemessen. Die Probanden sollen Zahlen von 1 bis 25 möglichst schnell der Reihe nach mit einem Bleistift verbinden. Dabei dürfen sie den Stift nicht absetzen. Die kognitive Flexibilität wurde mit dem TMT-B gemessen. Hier haben die Probanden die Aufgabe, 25 Kreise jeweils mit Zahlen und Buchstaben in alternierender Reihenfolge (1-A-2-B-3-C u.s.w.) mit einem Stift auch schnellstmöglich der Reihe nach aufsteigend zu verbinden. Zur Analyse wurde die benötigte Zeit in Sekunden verwendet (Abbildung 15).

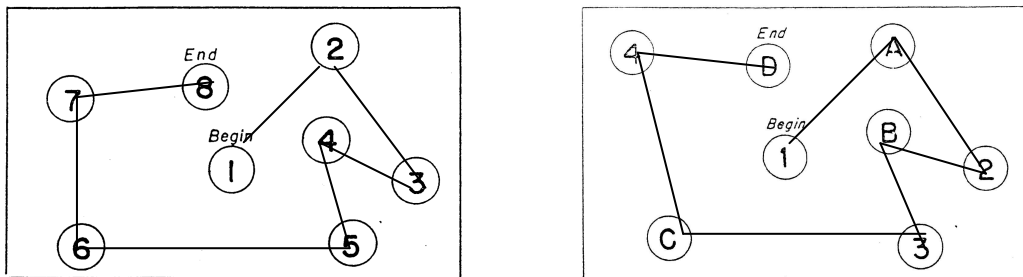


Abbildung 15: Trail-Making-Test A und B: Im Teil A sollen die Zahlen in aufsteigender Reihenfolge mit einem Stift so schnell wie möglich miteinander verbunden werden (hier im Beispiel von 1 bis 8). Im Teil B sollen Zahlen und Buchstaben in alternierender Reihenfolge, auch möglichst schnell, miteinander verbunden werden (hier im Beispiel 1-A-2-B-3-C-4-D).

2.3.5.7. Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenztest

Zur Schätzung des prämorbidem Intelligenzniveaus wurde der MWT-B (Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenztest; Lehrl, 1999) eingesetzt. Der Test besteht aus insgesamt 37 Zeilen mit jeweils 4 sinnfreien Neologismen, in die ein fünftes, reales Wort eingestreut ist. Aufgabe des Probanden ist es, jeweils das reale Wort zu markieren. Zur Analyse wurde die Anzahl der korrekt durchgestrichenen Wörter verwendet.

2.4. Datenanalyse

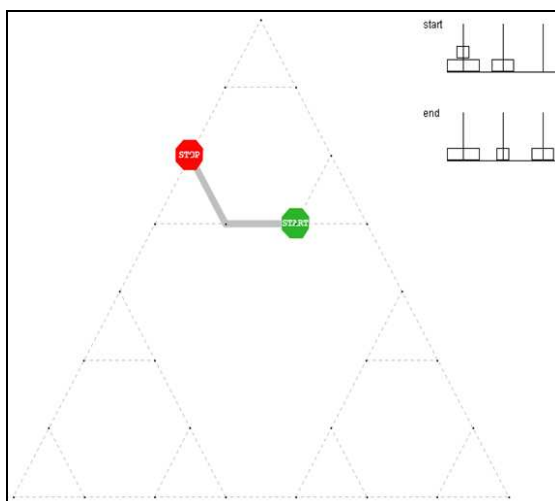
2.4.1. Quantitativ

Die statistische Datenanalyse wurde mit den Programmen SPSS für Windows (Version 15.0 und 16.0) und Microsoft Office Excel durchgeführt. Die Diagramme und Tabellen wurden ebenfalls mit diesen Programmen erstellt.

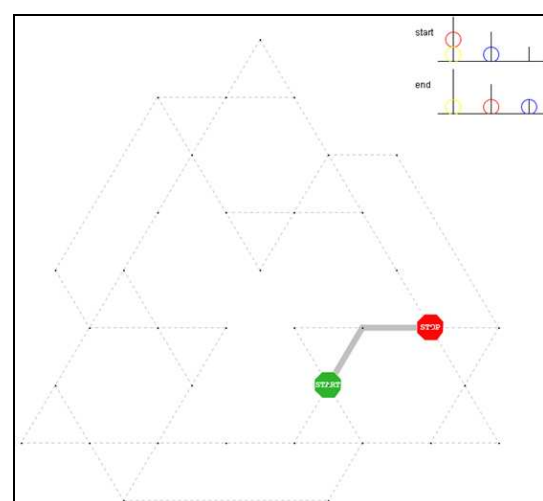
Zur Prüfung der Variablen auf Normalverteilung wurde der Kolmogorov-Smirnov-Test angewendet. Da die meisten Variablen nicht normalverteilt waren, wurde der Mann-Whitney-Test für nicht normalverteilte Variablen verwendet. Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0,05$ festgelegt.

2.4.2. Qualitativ

Mit der Viewer-Funktion des ToHaL-Programms können die optimalen Pfade, die von den Probanden gegangenen Wege und die gemachten Fehler in einzelnen „Hanoi-Graphen“ des Turms von Hanoi (Abbildung 16 a) und „London-Graphen“ des Turms von London (Abbildung 16 b) dargestellt werden. Der kürzeste Weg wird dabei hervorgehoben (Beschreibung siehe Kapitel 2.3).



a) „Hanoi-Graph“



b) „London-Graph“

Abbildung 16 a und b: „Hanoi-Graph“ (Turm von Hanoi) und „London-Graph“ (Turm von London). Rechts oben auf dem Bildschirm werden die Start- und Zielpositionen angezeigt. Der grüne Punkt zeigt die Startposition, der rote Punkt die Zielposition an. Der kürzeste Weg ist grau hinterlegt, die schwarzen Punkte sind die jeweiligen Zustände, die gestrichelten Linien zwischen den Punkten sind mögliche Wege, d.h. Züge die von einem zum anderen Zustand gemacht werden können.

Eine weitere Funktion, die „Multiviewer“-Funktion, ermöglicht es, einzelne Graphen übereinander zu lagern und die Wege aller Probanden in einem Graphen darzustellen. Der „Multi-Graph“ des Turm von Hanoi ist in Abbildung 17 als Beispiel dargestellt (Hinz et al., 2009).

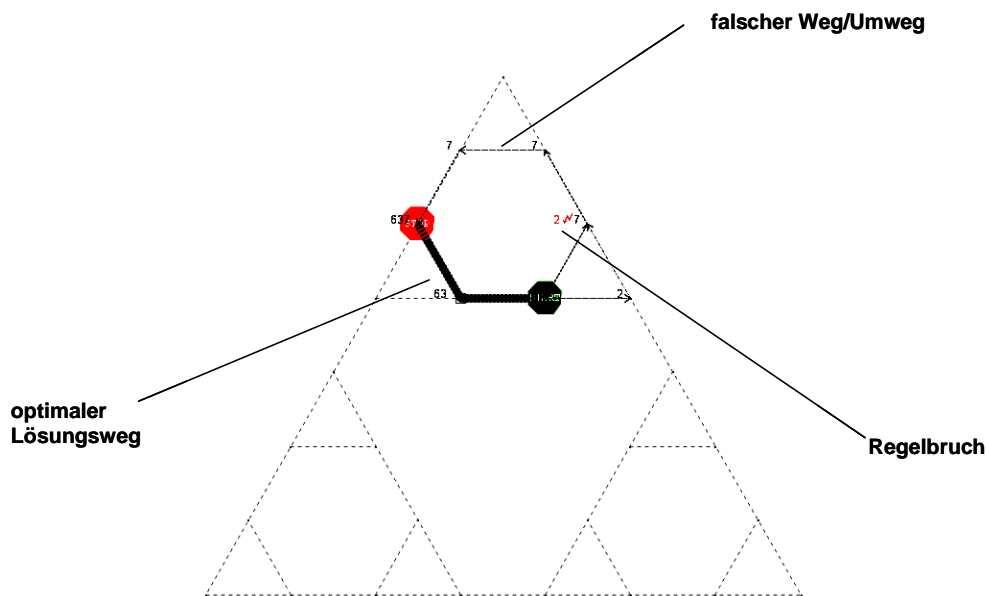


Abbildung 17: „Multi-Graph“ des Turm von Hanoi. Mit Hilfe der sog. „Multiviewer-Funktion“ können die Zustandsgraphen aller Probanden für jede einzelne Aufgabe übereinander gelagert werden (hier im Beispiel der „Hanoi-Graphen“). Die Zahlen geben an, wie viele Personen diesen Weg gegangen sind bzw. wie oft dieser Weg gegangen wurde. Der rote Blitz und die rote Zahl daneben zeigen an, wie oft hier ein Regelbruch (es wurde versucht, eine größere Scheibe auf eine kleinere zu legen) begangen wurde. Der optimale Weg ist grau hinterlegt und wurde in diesem Beispiel von 63 Probanden gegangen. Es wurde zweimal an derselben Stelle ein Regelbruch begangen, 7 sind einen Umweg gegangen und haben somit mehr Züge benötigt. Die Pfeile zeigen die Richtungen an, in die der nächste Zug gemacht wurde.

3. Ergebnisse

3.1. Gruppenvergleich: jüngere und ältere gesunde Probanden

3.1.1. Allgemeine Parameter

Jüngere und ältere Probanden hatten das gleiche prämorbid Ausgangsniveau, das mit dem MWT-B ($Z=-0,257$; $p=0,797$) geschätzt wurde. Es gab signifikante Unterschiede zwischen Jüngeren und Älteren bei den Zahlenspannen vorwärts ($Z=-2,405$; $p=0,016$) und rückwärts ($Z=-2,655$; $p=0,008$), der Blockspanne vorwärts ($Z=-2,095$; $p=0,036$) und rückwärts ($Z=-3,352$; $p=0,001$), dem TMT A ($Z=-4,621$; $p=0,000$) und TMT B ($Z=-4,612$; $p=0,000$), dem Matrizenstest ($Z=-3,463$; $p=0,001$) und dem Fünf-Punkte-Test ($Z=-4,362$; $p=0,000$). Bei der semantischen und phonologischen Wortflüssigkeit gab es keine signifikanten Unterschiede (Abbildung 18; einzelne Mittelwerte und Standardabweichungen beider Altersgruppen sind in Tabelle C im Anhang dargestellt).

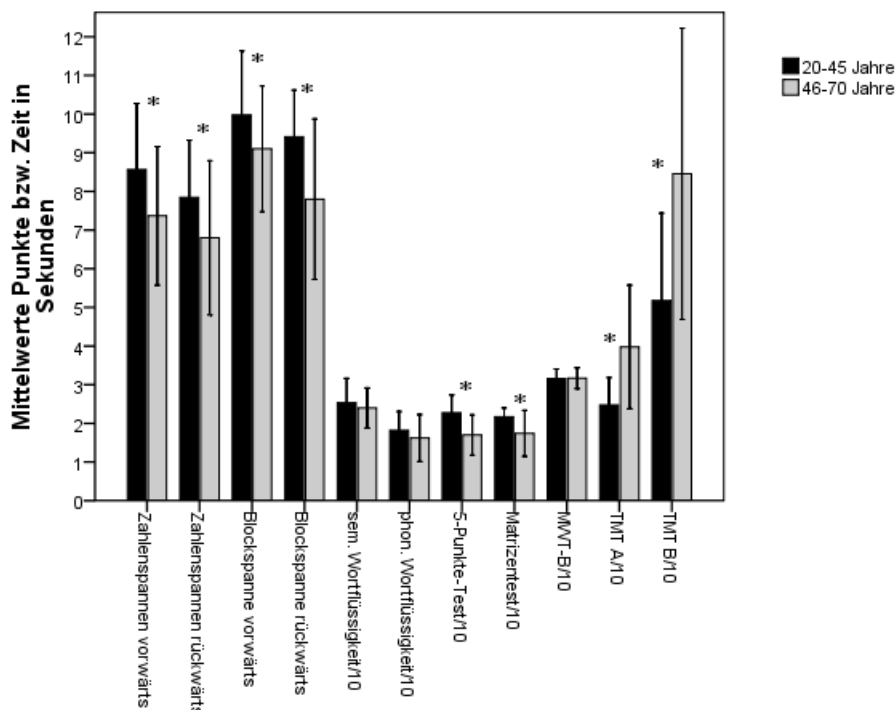


Abbildung 18: Ergebnisse der Tests zur Messung exekutiver Funktionen beider Altersgruppen im Vergleich. Zur besseren Übersicht der Balken wurden folgende Wert durch 10 geteilt: TMT A und B, Matrizenstest, Wortflüssigkeit (Tiere, S-Wörter) Fünf-Punkte-Test und MWT-B. Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern gekennzeichnet ($p<0,05$). Die Fehlerbalken zeigen ± 1 Standardabweichung an.

3.1.2. Turm-von-Hanoi-Parameter

Beim TvH gab es signifikante Unterschiede im Hinblick auf die Gesamtlösungszeit ($Z=-3,872$; $p=0,000$), die Gesamtdurchführungszeit ($Z=-4,794$; $p=0,000$), die Gesamtzüge ($Z=-2,303$; $p=0,021$) sowie die Anzahl optimal gelöster Aufgaben ($Z=-2,394$; $p=0,017$) und die Gesamtfehler ($Z=-4,195$, $p=0,000$; Abbildung 19; einzelne Mittelwerte und Standardabweichungen siehe Tabelle D 1 im Anhang).

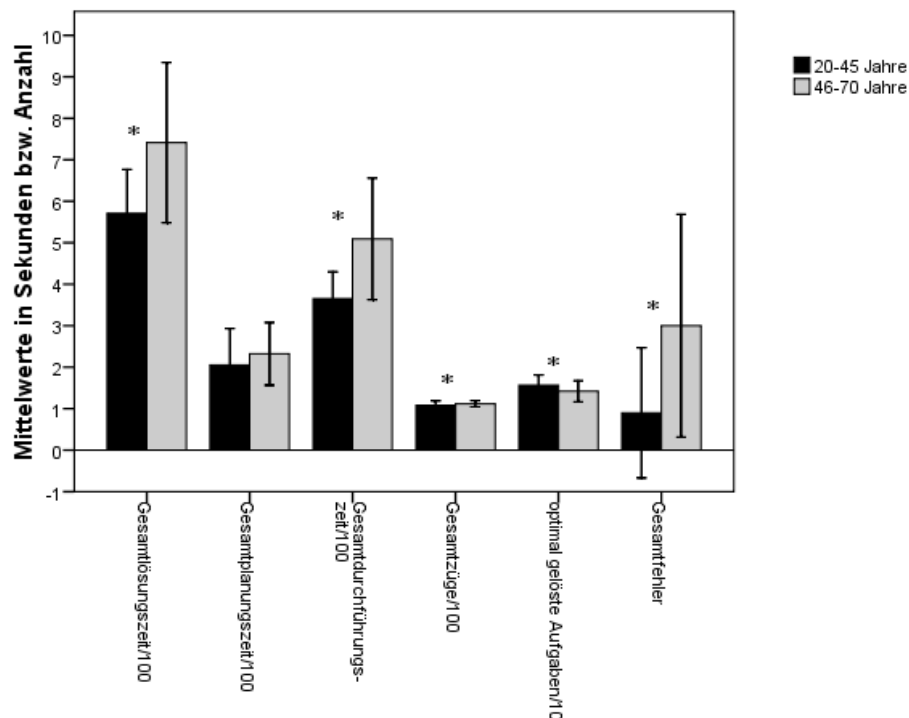


Abbildung 19: Turm-von-Hanoi-Parameter beider Altersgruppen im Vergleich. Ältere Probanden hatten eine längere Gesamtlösungszeit und Durchführungszeit sowie weniger optimal gelöste, d. h. mit der minimalen Zugzahl gelöste Aufgaben, machten mehr Züge und Fehler. Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern gekennzeichnet ($p < 0,05$). Zur besseren Übersicht der Balken wurden die Werte durch 100 bzw. 10 geteilt. Die Fehlerbalken zeigen ± 1 Standardabweichung an.

Um die Auswirkung der Mindestzugzahl auf die Lösungszeiten zu untersuchen, wurden die Mittelwerte von Aufgaben mit derselben Zugzahl gebildet und verglichen. Ältere Probanden planten demnach bei 2-Zug-Aufgaben ($Z=-2,814$; $p=0,005$), 3-Zug-Aufgaben ($Z=-2,548$; $p=0,011$), 4-Zug-Aufgaben ($Z=-2,513$; $p=0,012$) und 5-Zug-Aufgaben ($Z=-2,063$; $p=0,039$) signifikant länger als jüngere Probanden. Bei 6- und 7-Zug-Aufgaben gab es dagegen keine Unterschiede (Abbildung 20; einzelne Mittelwerte und Standardabweichungen siehe Tabelle D 2 im Anhang).

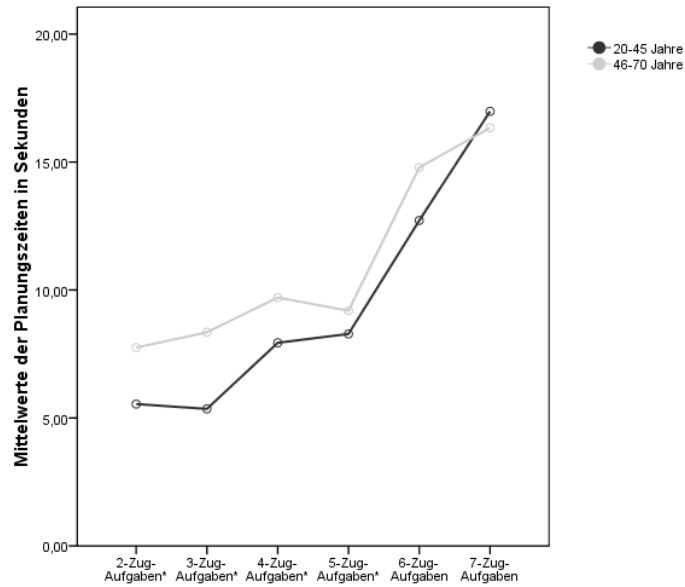


Abbildung 20: Planungszeiten von Turm-von-Hanoi-Aufgaben gleicher Zugzahl beider Altersgruppen im Vergleich. Ältere Probanden planten bei 2- bis 5-Zug-Aufgaben länger als die jüngeren Probanden. Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern gekennzeichnet ($p < 0,05$).

Die Durchführungszeiten der TvH-Aufgaben wurden ebenfalls verglichen. Die älteren Probanden benötigten für fast alle Aufgaben signifikant mehr Zeit beim Durchführen: für 3-Zug-Aufgaben ($Z = -2,891$; $p = 0,004$), 4-Zug-Aufgaben ($Z = -3,435$; $p = 0,001$), 5-Zug-Aufgaben ($Z = -3,210$; $p = 0,001$), 6-Zug-Aufgaben ($Z = 4,121$; $p = 0,000$) und für 7-Zug-Aufgaben ($Z = -3,766$; $p = 0,000$; Abbildung 21; einzelne Werte siehe Tabelle D 3 im Anhang).

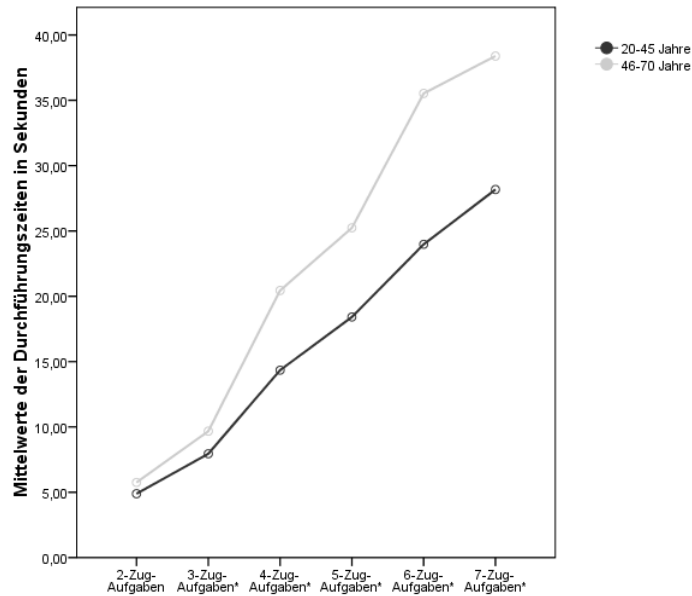


Abbildung 21: Durchführungszeiten von Turm-von-Hanoi-Aufgaben gleicher Zugzahl beider Altersgruppen im Vergleich. Ältere Probanden benötigten bis auf die 2-Zug-Aufgaben für alle Aufgaben mehr Zeit für die Durchführung. Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern gekennzeichnet ($p < 0,05$).

Hinsichtlich der gemachten Züge gab es keine signifikanten Unterschiede.

3.1.3. Turm-von-London-Parameter

Bei den folgenden TvL-Parametern gab es signifikante Unterschiede zwischen jüngeren und älteren Probanden: Gesamtlösungszeit ($Z = -3,636$; $p = 0,000$), Gesamtdurchführungszeit ($Z = -4,854$; $p = 0,000$), Gesamtfehler ($Z = -3,045$; $p = 0,002$) und optimal gelöste Aufgaben ($Z = -2,455$; $p = 0,014$). Bei der Gesamtplanungszeit gab es dagegen keine signifikanten Unterschiede zwischen jüngeren und älteren Probanden (Abbildung 22; einzelne Mittelwerte und Standardabweichungen werden in Tabelle E 1 im Anhang dargestellt).

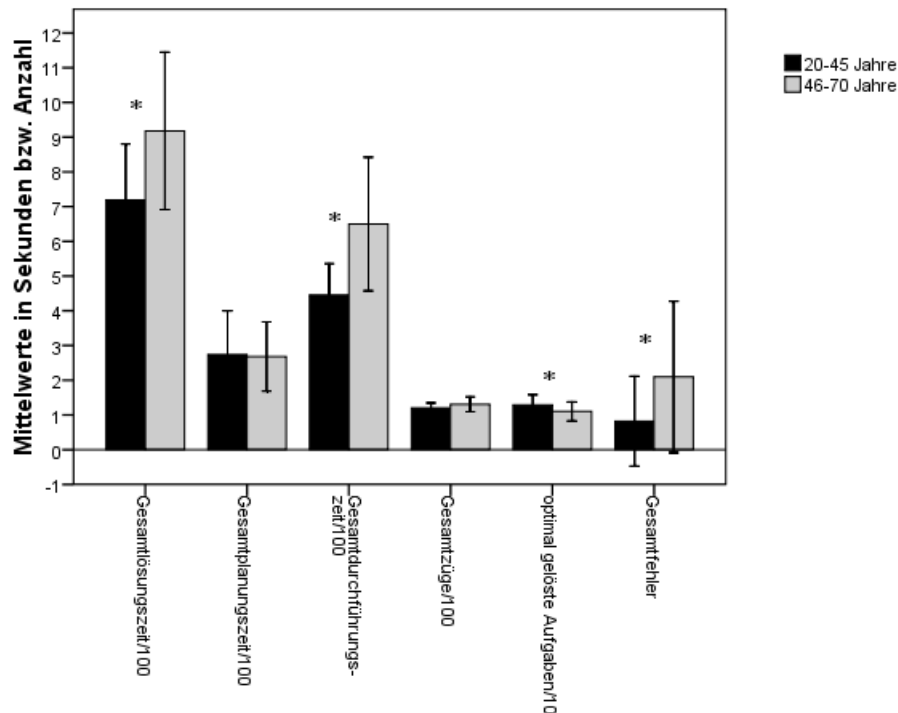


Abbildung 22: Turm-von-London-Parameter beider Altersgruppen im Vergleich. Ältere Probanden benötigten beim Turm von London signifikant mehr Zeit für die gesamte Lösungszeit und die Durchführungszeit, hatten weniger optimal gelöste, d. h. mit der Mindestzugzahl gelöste Aufgaben, und machten mehr Fehler. Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern gekennzeichnet ($p < 0,05$). Zur besseren Übersicht der Balken wurden die Werte durch 100 bzw. 10 geteilt. Die Fehlerbalken zeigen ± 1 Standardabweichung an.

Weiterhin wurde auch hier untersucht, ob es Unterschiede bei Aufgaben mit derselben Mindestzugzahl gibt. Hierzu wurden die gemachten Züge sowie die Planungs- und Durchführungszeiten von jüngeren und älteren Probanden verglichen.

Demnach plant ältere Probanden bei 2-Zug-Aufgaben ($Z = -3,600$; $p = 0,000$) und 3-Zug-Aufgaben ($Z = -2,170$; $p = 0,030$) länger. Bei 4-, 5-, 6- und 7-Zug-Aufgaben gab es keine Unterschiede in der Planungszeit (Abbildung 23; einzelne Werte siehe Tabelle E 2 im Anhang).

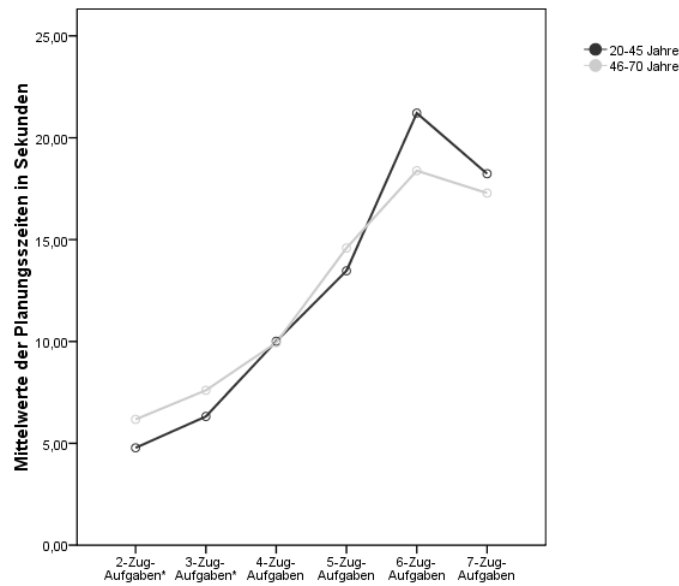


Abbildung 23: Planungszeiten von Turm-von-London-Aufgaben gleicher Zugzahl beider Altersgruppen im Vergleich. Ältere Probanden planten bei 2- und 3-Zug-Aufgaben länger als jüngere Probanden. Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern gekennzeichnet ($p < 0,05$).

Auch die Durchführungszeiten wurden miteinander verglichen. Ältere Probanden benötigten signifikant mehr Zeit für 3-Zug-Aufgaben ($Z = -2,719$; $p = 0,007$), 4-Zug-Aufgaben ($Z = -3,577$; $p = 0,000$), 5-Zug-Aufgaben ($Z = -4,097$; $p = 0,000$), 6-Zug-Aufgaben ($Z = -2,773$; $p = 0,006$) und 7-Zug-Aufgaben ($Z = -3,872$; $p = 0,000$; Abbildung 24; einzelne Werte siehe Tabelle E 3 im Anhang)

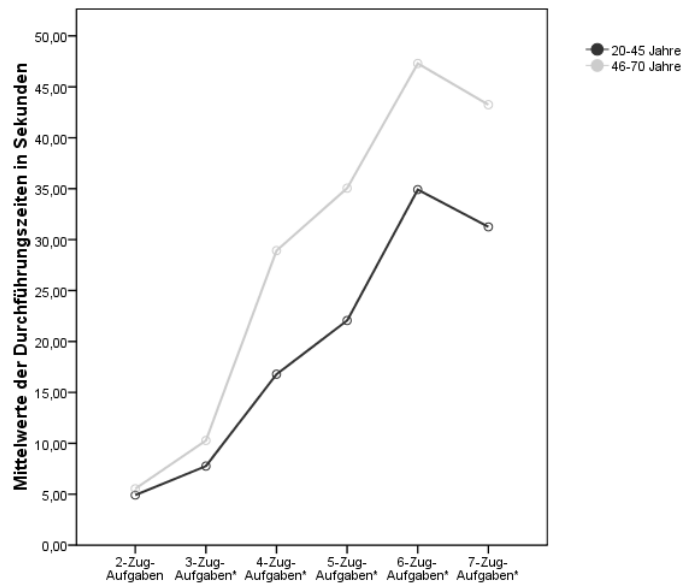


Abbildung 24: Durchführungszeiten von Turm-von-London-Aufgaben gleicher Zugzahl beider Altersgruppen im Vergleich. Ältere Probanden benötigten bei 3-, 4-, 5-, 6- und 7-Zug-Aufgaben mehr Zeit für die Durchführung. Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern gekennzeichnet ($p < 0,05$).

Hinsichtlich der gemachten Züge gab es nur einen signifikanten Unterschied bei 7-Zug-Aufgaben ($Z = -2,427$; $p = 0,015$). Ältere Probanden machten hier mehr Züge.

3.2. Analyse der Lösungswege

Mit Hilfe der Multi-Viewer Funktion des ToHaL Programms wurden die Lösungswege der einzelnen Turm-von-Hanoi- und -London-Aufgaben aller 70 Probanden übereinander gelagert und analysiert. Im Folgenden werden einige ausgewählte Aufgaben genauer beschrieben.

3.2.1. Analyse der „Hanoi-Graphen“

Die Aufgaben Nr. 13, 17 und Nr. 18 haben zwei kürzeste Lösungswege, die bei der Aufgabe Nr. 17 auf dem Graphen punktsymmetrisch sind. Die größte Scheibe sollte dazu nur ein- oder zweimal bewegt werden. Die meisten Probanden haben hier jeweils die sogenannte „verfeinerte perzeptuelle Strategie“ (VPS) („sophisticated perceptual strategy“, Simon, 1975) angewendet. Beide Möglichkeiten führen auf dem kürzesten Weg zum Ziel (Abbildung 25 a, b und c).

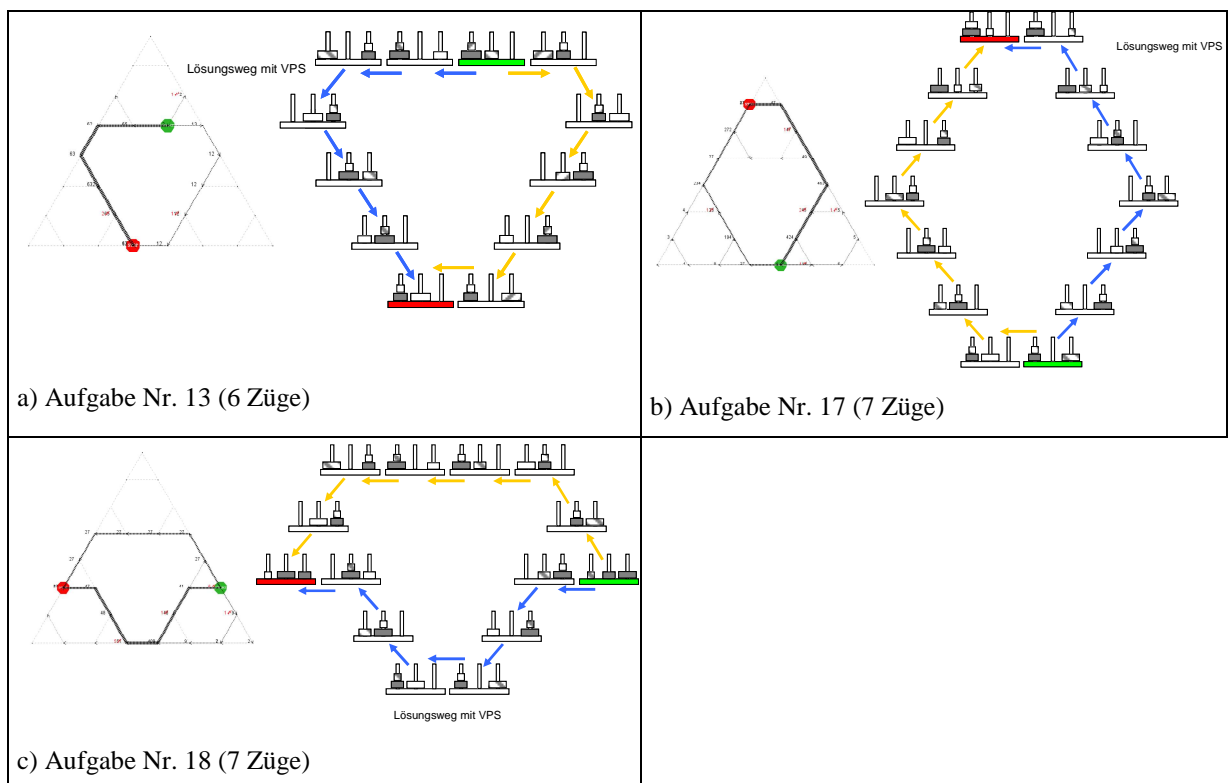


Abbildung 25 a, b und c: TvH-„Multigraphen“ der Aufgaben Nr. 13 (a) , Nr. 17 (b) und Nr. 18 (c). Diese Aufgaben haben jeweils zwei kürzeste Lösungswege (gelbe und blaue Pfeile). Bei einem der Lösungswege wurde die verfeinerte perzeptuelle Strategie (VPS) angewendet (blaue Pfeile). Die Wege die von den meisten Probanden gegangen wurden, sind dunkel hervorgehoben. Die einzelnen Zustände dieser beiden Lösungswege sind neben den jeweiligen „Hanoi-Graphen“ detailliert dargestellt. Eine schraffierte Scheibe bedeutet, dass diese Scheibe als nächstes bewegt wird, eine weiße Scheibe bedeutet, dass diese Scheibe gerade bewegt wurde.

Aufgabe Nr. 13 ist eine 6-Zug-Aufgabe mit zwei kürzesten Lösungswegen (Abbildung 25 a). Hier ist die Zielstange für die große Scheibe besetzt und muss frei gemacht werden. 80,5 % der Probanden wendeten die VPS an und bewegten die größte Scheibe nur einmal (blaue Pfeile), 15,6 % bewegten sie zweimal (gelbe Pfeile). Insgesamt konnten diese Aufgabe 89,6 % der Probanden perfekt lösen, 9,1 % benötigten mehr Züge als die Mindestzugzahl und 1,3 % konnten sie gar nicht lösen.

Aufgabe Nr. 17 ist eine 7-Zug-Aufgabe, ebenfalls mit zwei kürzesten Lösungswegen (Abbildung 25 b). Die größte Scheibe muss dabei von rechts nach links versetzt werden. 54,6 % der Probanden haben zuerst die Zielstange für die große Scheibe frei gemacht, um sie mit einem Zug an das Ziel zu bringen (blaue Pfeile, Einsatz der VPS). 24,7 % haben die größte Scheibe zweimal bewegt (gelbe Pfeile). 68,8 % konnten die Aufgabe perfekt lösen, 27,3 % haben mehr Züge als die Mindestzugzahl benötigt und 3,6 % haben sie gar nicht gelöst.

Aufgabe Nr. 18 ist ebenfalls eine 7-Zug-Aufgabe mit zwei kürzesten Lösungswegen (Abbildung 25 c). Sie hat eine flache Start- und Zielkonfiguration. Die größte Scheibe muss von rechts zur Mitte versetzt werden. 53,3 % der Probanden haben die VPS eingesetzt und zuerst die mittlere Stange für die größte Scheibe frei gemacht und diese nur einmal bewegt (blaue Pfeile). 35,1 % der Probanden haben die größte Scheibe zweimal bewegt und haben die Aufgabe auch mit 7 Zügen gelöst (gelbe Pfeile). Insgesamt konnten 70,1 % diese Aufgabe perfekt lösen, 26 % haben mehr Züge benötigt und 2,6 % konnten sie gar nicht lösen.

Die Aufgaben Nr. 15 und Nr. 19 haben nur einen kürzesten Lösungsweg. Hier gibt es jedoch einen zusätzlichen Weg, der fast spiegelbildlich zum kürzesten Lösungsweg aussieht, aber mit einem zusätzlichen Zug an das Ziel führt. Auch hier wurde jeweils die „verfeinerte perzeptuelle Strategie“ (VPS) („sophisticated perceptual strategy“, Simon, 1975) angewendet (Abbildung 26 a und b).

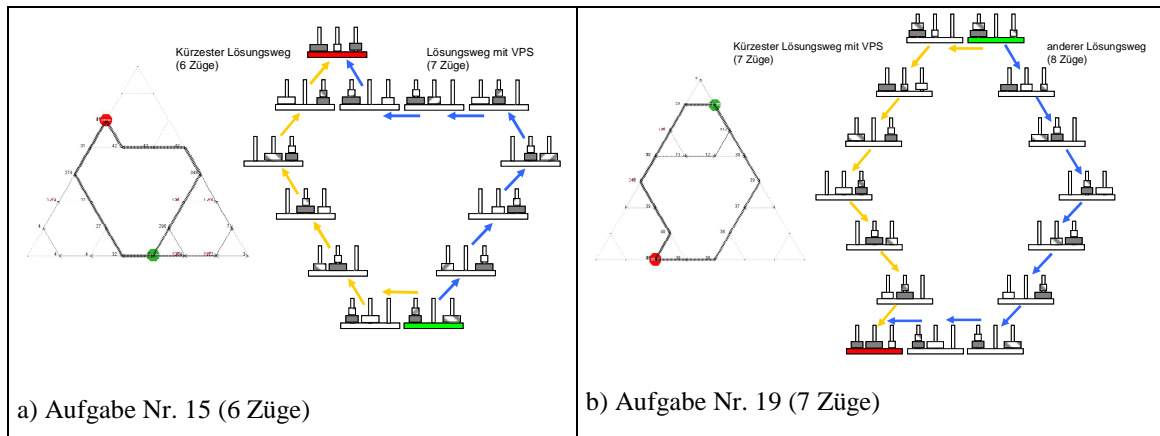


Abbildung 26 a und b: TvH-„Multigraphen“ der Aufgaben Nr. 15 (a) und Nr. 19 (b). Diese Aufgaben haben jeweils einen kürzesten Lösungsweg (gelbe Pfeile) und einen Weg mit einem zusätzlichen Zug (blaue Pfeile). Bei diesen Aufgaben wurde jeweils die verfeinerte perzeptuelle Strategie (VPS) angewendet. Die Anwendung der VPS bei der Aufgabe Nr. 19 führt mit dem kürzesten Lösungsweg an das Ziel (gelbe Pfeile), bei der Aufgabe Nr. 15 wird ein zusätzlicher Zug benötigt (blaue Pfeile). Die Wege die von den meisten Probanden gegangen wurden, sind in den Graphen dunkel hervorgehoben. Die einzelnen Zustände dieser beiden Wege sind neben den jeweiligen „Hanoi-Graphen“ detailliert dargestellt. Eine schraffierte Scheibe bedeutet, dass diese Scheibe als nächstes bewegt wird, eine weiße Scheibe bedeutet, dass diese Scheibe gerade bewegt wurde.

Die Aufgabe Nr. 15 hat eine flache Zielkonfiguration (Abbildung 26 a). Die größte Scheibe liegt frei und muss auf eine andere Stange gesteckt werden, die vorher frei gemacht werden muss. Nur wenn die große Scheibe zuerst gespielt wird und zweimal versetzt wird, kann die Aufgabe in sechs Zügen gelöst werden (blaue Pfeile, 35,1 % der Probanden). 37,7 % haben die VPS angewendet und die größte Scheibe nur einmal bewegt. Dabei benötigten sie einen zusätzlichen Zug zur Mindestzugzahl und benötigten 7 Züge (gelbe Pfeile). Diese Aufgabe wurde von 27,3 % der Probanden mit der Mindestzugzahl von sechs Zügen gelöst, 64,9 % benötigten mehr Züge als die Mindestzugzahl und 6,5 % konnten sie gar nicht lösen.

Aufgabe Nr. 19 hat eine Turm-Zielkonfiguration, d. h. alle Scheiben müssen auf eine Zielstange und kann mit mindestens sieben Zügen gelöst werden. 37,7 % der Probanden wendeten die VPS an und bewegten die größte Scheibe nur einmal (gelbe Pfeile;

Abbildung 26 b). Die meisten bewegten die größte Scheibe zweimal und benötigten mehr Züge (blaue Pfeile, 49,4 %). Die größte Scheibe ist nicht frei zugänglich und muss von links in die Mitte, wobei die mittlere Stange frei ist. Nur wenn die größte Scheibe nur einmal bewegt wird, kann die Aufgabe optimal gelöst werden (gelbe Pfeile). Insgesamt schafften es 32,5 % optimal, 55,8 % benötigten mehr Züge als die Mindestzugzahl und 9,1 % der Probanden konnten diese Aufgabe nicht lösen.

Die Aufgabe Nr. 16 ist eine 6-Zug-Aufgabe mit einer flachen Startkonfiguration und hat auch nur einen kürzesten Lösungsweg (Abbildung 27). Diese Aufgabe kann allerdings auch mit neun Zügen gelöst werden. Dieser Lösungsweg sieht fast spiegelbildlich zur optimalen Lösung aus und wurde von 14,3 % der Probanden gegangen (blaue Pfeile). Nur wenn die größte Scheibe mit einem Zug von rechts nach links versetzt wird, ist die Lösung in sechs Zügen möglich (gelbe Pfeile). 37,7 % wählten diesen Weg und haben die VPS angewendet. Diese Aufgabe wurde von den meisten mit mehr Zügen als der Mindestzugzahl gelöst (66,2 %), 33,8 % schafften es in sechs Zügen.

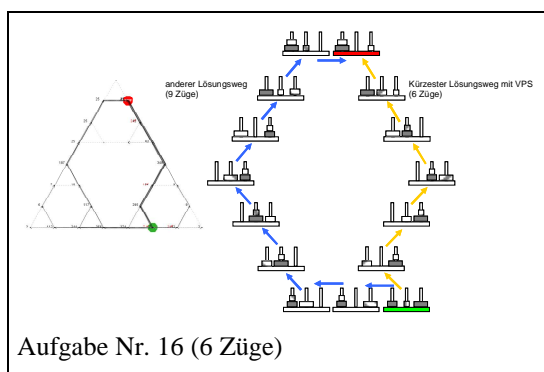


Abbildung 27: TvH-„Multigraph“ der Aufgaben Nr. 16. Diese Aufgabe hat nur einen kürzesten Lösungsweg, bei der die verfeinerte perzeptuelle Strategie (VPS) angewendet wurde (gelbe Pfeile). Der alternative Weg benötigt zwei zusätzliche Züge (blaue Pfeile). Die Wege die von den meisten Probanden gegangen wurden, sind dunkel hervorgehoben. Die einzelnen Zustände dieser beiden Wege sind neben dem „Hanoi-Graphen“ detailliert dargestellt. Eine schraffierte Scheibe bedeutet, dass diese Scheibe als nächstes bewegt wird, eine weiße Scheibe bedeutet, dass diese Scheibe gerade bewegt wurde.

3.2.2. Analyse der „London-Graphen“

Beim TvL gibt es bei den Aufgaben Nr. 5, 9, 14, 17 und Nr. 19 zwei kürzeste Lösungswege (Abbildung 28 a - e).

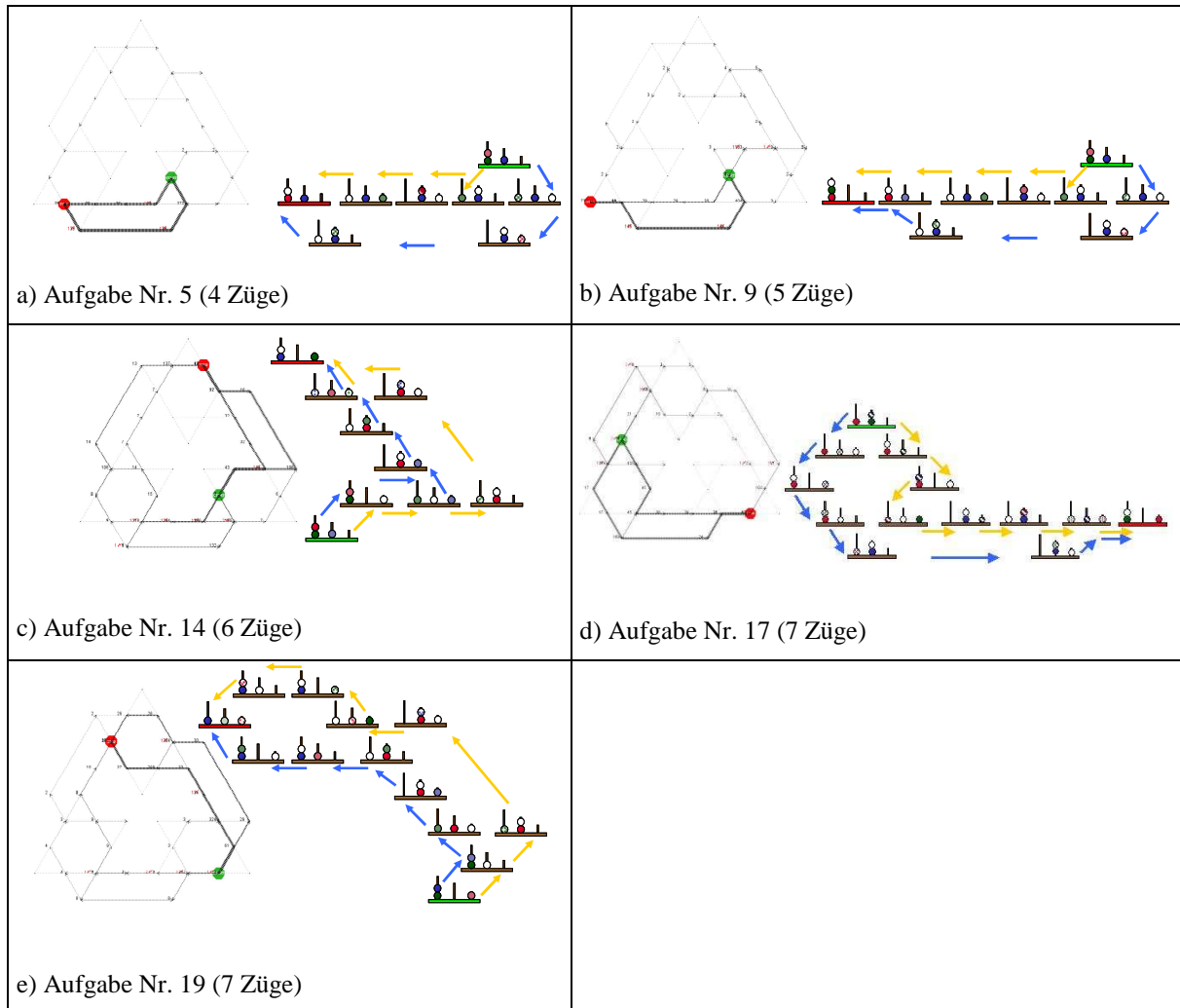


Abbildung 28 a-e: TvL-„Multigraphen“ der Aufgaben Nr. 5 (a), Nr. 9 (b), Nr. 14 (c), Nr. 17 (d) und Nr. 19 (e). Bei diesen Aufgaben gibt es zwei kürzeste Lösungswege (gelbe und blaue Pfeile), deren einzelne Züge neben den Graphen einzeln abgebildet sind. Die grüne Stange zeigt die Startposition an, die rote die Zielposition. Ein neuer Zustand wird durch eine weiße Kugel gekennzeichnet. Wenn die Kugeln aus verschiedenen Richtungen kommen, sind sie gepunktet.

Aufgabe Nr. 5 ist eine 4-Zug-Aufgabe mit zwei kürzesten Lösungswegen und wurde von 92,2 % perfekt gelöst, nur 7,8 % benötigten für diese Aufgabe mehr Züge als die Mindestzugzahl (Abbildung 28 a). Hier müssen zwei Kugeln auf derselben Stange vertauscht werden. 48,1 % der Probanden haben die obere Kugel direkt auf die leere Stange verschoben (blaue Pfeile), 50,7 % haben die oberste Kugel auf die andere Kugel gesteckt (gelbe Pfeile).

Aufgabe Nr. 9 kann auf zwei verschiedenen Wegen mit fünf Zügen gelöst werden (Abbildung 28 b). Die Zielposition ist eine Turm-Konfiguration. Bei den untersten zwei Kugeln muss zuerst die Farbe vertauscht werden, bevor die dritte Kugel aufgesteckt wird. 52 % der Probanden haben die oberste Kugel auf die andere Kugel gesteckt (gelbe Pfeile), 39 % haben die Kugel dagegen auf die leere Stange gesteckt (blaue Pfeile). Diese Aufgabe konnte von 75,3 % perfekt gelöst werden, 20,8 % benötigten mehr Züge als die Mindestzugzahl und 3,9 % konnten diese Aufgabe nicht lösen.

Aufgabe Nr. 14 ist eine 6-Zug-Aufgabe auch mit zwei kürzesten Lösungswegen und wurde von 40,3 % der Probanden perfekt gelöst, von 42,9 % mit mehr Zügen als der Mindestzugzahl und von 14,3 % nicht gelöst (Abbildung 28 c). 41,6 % der Probanden haben einen der beiden kürzesten Lösungswege gewählt (blaue Pfeile) und 13 % den anderen alternativen kürzesten Lösungsweg (gelbe Pfeile). Häufig wurde jedoch die dritte Möglichkeit gewählt und die grüne Kugel als erstes auf die freie Zielstange gesteckt. Somit haben sie mehr Züge als die Mindestzugzahl benötigt.

Aufgabe Nr. 17 ist eine 7-Zug-Aufgabe ebenfalls mit zwei optimalen Lösungswegen, die von 22,1 % (blaue Pfeile) und 49,4 % (gelbe Pfeile) der Probanden gegangen wurden (Abbildung 28 d). Über die Hälfte der Probanden konnte diese Aufgabe in 7 Zügen lösen (58,4 %), viele benötigten mehr Züge als die Mindestzugzahl (36,4 %) und 3,9 % konnten diese Aufgabe gar nicht lösen.

Aufgabe Nr. 19 hat eine flache Zielkonfiguration, d. h. die Kugeln sind auf allen drei Stangen verteilt (Abbildung 28 e). Es gibt zwei kürzeste Lösungswege, die jeweils von 41,6 % (blaue Pfeile) und 33,8 % der Probanden (gelbe Pfeile) gegangen wurden. Insgesamt konnte diese Aufgabe von 67,5 % der Probanden perfekt gelöst werden, 28,6 % benötigten mehr Züge als die Mindestzugzahl und 1,3 % konnte sie gar nicht lösen.

Bei den Aufgaben Nr. 10, 13, 16 und Nr. 18 gibt es nur einen kürzesten Lösungsweg, die anderen Wege, führen mit einem zusätzlichen Zug an das Ziel (Abbildung 29 a - d).

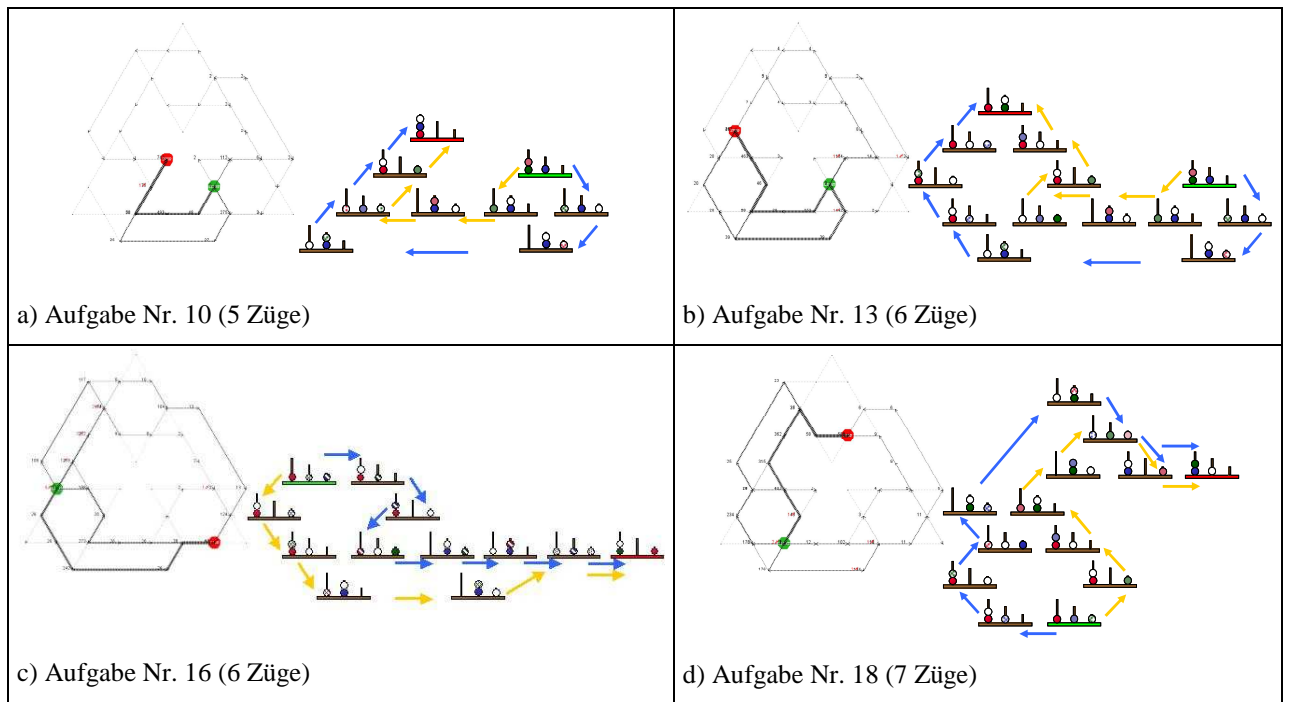


Abbildung 29 a-d: TvL-, „Multigraphen“ der Aufgaben Nr. 10 (a), Nr. 13 (b), Nr. 16 (c) und Nr. 18 (d). Bei diesen Aufgaben gibt es jeweils einen kürzesten Lösungsweg (gelbe Pfeile) und einen mit einem zusätzlichen Zug (blaue Pfeile). Neben den Graphen sind die einzelnen Züge beider Lösungswege einzeln abgebildet. Die grüne Stange zeigt die Startposition an, die rote die Zielposition. Ein neuer Zustand wird durch eine weiße Kugel gekennzeichnet. Wenn die Kugeln aus verschiedenen Richtungen kommen, sind sie gepunktet.

Die Aufgabe Nr. 10 ist eine 5-Zug-Aufgabe mit derselben Startkonfiguration wie Aufgabe Nr. 9 (Abbildung 28 b) und einem Turmende, d.h. alle Kugeln sind auf einer Stange (Abbildung 29 a). Hier gibt es nur einen kürzesten Lösungsweg, der von 62,3 % der Probanden gegangen wurde (gelbe Pfeile). Hier wurde die grüne Kugel, die von unten nach oben auf die längste Stange gesteckt werden muss, nur zweimal bewegt. 35,1 % benötigen dagegen einen zusätzlichen Zug (blaue Pfeile). Sie haben die grüne Kugel dreimal bewegt. Insgesamt konnte die Aufgabe von 57,1 % der Probanden perfekt gelöst werden. 40,3 % benötigten mehr Züge als die Mindestzugzahl und 2,6 % konnten sie gar nicht lösen.

Auch bei der Aufgabe Nr. 13 gibt es nur eine Möglichkeit, in sechs Zügen zu lösen. Dazu darf die grüne Kugel, die auf die längste Stange gesteckt werden soll, nur zweimal bewegt werden (gelbe Pfeile, 32,5 %; Abbildung 29 b). Diese Aufgabe wurde von etwa der Hälfte der Probanden in sieben Zügen gelöst, die die grüne Kugel dreimal bewegt hatten (blaue

Pfeile, 50,7 %). Dagegen konnte diese Aufgabe nur von 23,4 % der Probanden perfekt gelöst werden, 70,1 % benötigten mehr Züge und 6,5 % konnten sie gar nicht lösen.

Bei der Aufgabe Nr. 16 sind die Kugeln am Anfang auf alle Stangen verteilt (Abbildung 29 c). Es gibt drei Möglichkeiten, den ersten Zug zu machen, aber nur einen kürzesten Lösungsweg, den 31,2 % wählten. Hier wurde die rote Kugel, die von der längsten Stange auf die kürzeste gesteckt werden muss, nur einmal bewegt (gelbe Pfeile). 23,4 % der Probanden wählten die zweite Möglichkeit, die in sieben Zügen zum Ziel führt, bei der die rote Kugel zweimal bewegt wurde (blaue Pfeile). Der dritte Lösungsweg hat zwei Abzweigungen, die jedoch in die Irre führen. Nur wenn die rote Kugel mit einem Zug von links nach rechts verschoben wird, sind sechs Züge möglich. Diese Aufgabe konnte von 24,7 % der Probanden perfekt gelöst werden, 61 % benötigten mehr Züge als die Mindestzugzahl und 9,1 % konnten sie gar nicht lösen.

Bei der Aufgabe Nr. 18 sind die Kugeln am Anfang auf allen drei Stangen verteilt (Abbildung 29 d). Es gibt vier Lösungsmöglichkeiten, jedoch nur eine, die in sieben Zügen an das Ziel führt. Nur wenn die rote Kugel, die von der mittleren auf die längste Stange gesteckt werden soll, nur zweimal bewegt wird, ist die Lösung in sieben Zügen möglich (gelbe Pfeile, 40,3 %). 22,1 % der Probanden wählten den Weg mit acht Zügen (blaue Pfeile). Diese Aufgabe konnte von 32,5 % der Probanden perfekt gelöst werden, 59,7 % benötigten mehr Züge als die minimale Zugzahl und 6,5 % konnten sie nicht lösen.

Insgesamt haben die meisten Probanden vermutlich auch beim Lösen von Turm-von-London-Aufgaben eine Mittel-Ziel-Analyse durchgeführt und die „obstacle-removal subgoal“-Strategie eingesetzt, die mit der verfeinerten perzeptuellen Strategie (VPS) beim Turm von Hanoi vergleichbar ist. Ziel bei dieser Strategie ist es, bestimmte Kugeln mit möglichst wenigen Zügen zuerst an ihr Ziel zu bringen. Dazu müssen Zwischenziele gebildet und andere Kugeln zuerst aus dem Weg geräumt werden (Berg et al., 2005). Die Zielkugel bei den oben beschriebenen Aufgaben ist entweder diejenige, die auf die längste Stange unten oder auf die kürzeste Stange umgesteckt werden muss.

3.3. Einzelne Aufgaben im Vergleich

Um die Aufgabeneigenschaften zu untersuchen, wurden die Planungs- und Durchführungszeiten sowie die Anzahl der Züge sogenannter „nested problems“ miteinander verglichen. „Nested problems“ sind jeweils zwei verschiedene Aufgaben mit der gleichen Startkonfiguration und dem gleichen Lösungsweg. Sie unterscheiden sich lediglich in der Zielkonfiguration und der Mindestzugzahl. Zur statistischen Analyse wurde der Wilcoxon-Test für gepaarte Stichproben verwendet.

3.3.1. Turm von Hanoi

Beim TvH wurden die Planungs- und Durchführungszeiten sowie die Anzahl der gemachten Züge jeweils der Aufgaben Nr. 5 und Nr. 9 sowie der Aufgaben Nr. 12 und Nr. 14 miteinander verglichen. Aufgabe Nr. 5 ist eine 4-Zug-Aufgabe mit einer partiellen Turm-Zielkonfiguration, Aufgabe Nr. 9 ist eine 5-Zug-Aufgabe mit einer Turm-Zielkonfiguration. Beide Aufgaben haben dieselbe Startkonfiguration und nur einen kürzesten Lösungsweg (Abbildung 30).

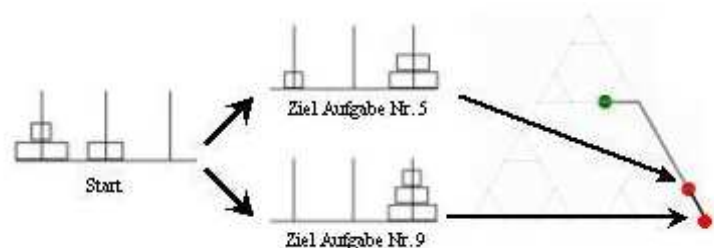


Abbildung 30: Start- und Zielkonfigurationen der Turm-von-Hanoi-Aufgaben Nr. 5 und Nr. 9. Der kürzeste Lösungsweg der Aufgabe Nr. 5 (4-Zug-Aufgabe; partielle Turm-Zielkonfiguration) ist im Graphen grau hinterlegt, der zusätzlich notwendige Zug zur Lösung der Aufgabe Nr. 9 (5-Zug-Aufgabe; Turm-Zielkonfiguration) ist schwarz hinterlegt. Das jeweilige Ziel ist mit einem roten Punkt markiert. Beide Aufgaben haben dieselbe Startkonfiguration (im Graphen mit einem grünen Punkt markiert).

Bei Aufgabe Nr. 5 planten die Probanden signifikant länger als bei Aufgabe Nr. 9 und benötigten zur Durchführung mehr Zeit als bei Aufgabe Nr. 9, obwohl hier zur Lösung ein Zug weniger notwendig ist als bei Aufgabe Nr. 9 (Abbildung 31; die einzelnen Werte sind in Tabelle F 1 im Anhang dargestellt). Aufgabe Nr. 5 wurde von 87 % der Probanden

perfekt gelöst, 10,4 % benötigten mehr Züge als die Mindestzugzahl und 2,6 % konnten sie gar nicht lösen. Die Aufgabe Nr. 9 wurde dagegen von 89,6 % perfekt und von 10,4 % mit mehr Zügen gelöst. Insgesamt konnte diese Aufgabe von allen Probanden gelöst werden.

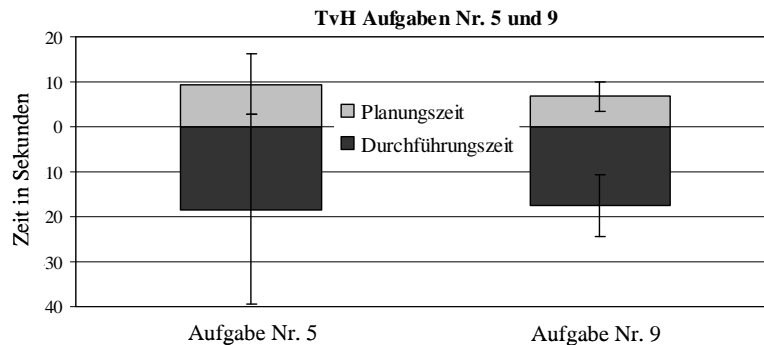


Abbildung 31: Planungs- und Durchführungszeiten der Turm-von-Hanoi-Aufgaben Nr. 5 und Nr. 9. Die Planungs- und Durchführungszeiten sind signifikant unterschiedlich ($p < 0,05$).

Die Aufgabe Nr. 12 ist eine 5-Zug-Aufgabe mit einer partiellen Turm-Zielkonfiguration, Aufgabe Nr. 14 ist eine 6-Zug-Aufgabe mit einer Turm-Zielkonfiguration. Beide Aufgaben haben dieselbe Startkonfiguration und nur einen kürzesten Lösungsweg (Abbildung 32).

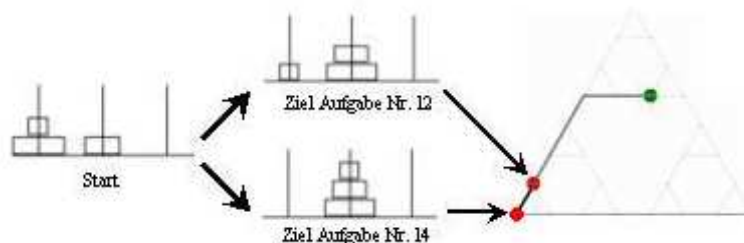


Abbildung 32: Start- und Zielkonfigurationen der Turm-von-Hanoi-Aufgaben Nr. 12 und Nr. 14. Der kürzeste Lösungsweg der Aufgabe Nr. 12 (5-Zug-Aufgabe; partielle Turm-Zielkonfiguration) ist grau hinterlegt, der zusätzlich notwendige Zug zur Lösung der Aufgabe Nr. 14 (6-Zug-Aufgabe; Turm-Zielkonfiguration) ist schwarz hinterlegt. Der Start ist grün, die jeweiligen Ziele sind mit einem roten Punkt markiert.

Zur Lösung der Aufgabe Nr. 12 benötigt man zwar einen Zug weniger als bei Aufgabe Nr. 14, aber trotzdem planten die Probanden hier signifikant länger. Hinsichtlich der gemachten Züge und der Durchführungszeiten gab es keine signifikanten Unterschiede. Das bedeutet, dass die Probanden bei der Aufgabe Nr. 12 im Schnitt genauso viele Züge machten und genauso viel Zeit für die Durchführung benötigten wie bei der Aufgabe

Nr. 14, für deren Lösung ein Zug mehr benötigt wird (Abbildung 33; die einzelnen Werte sind in Tabelle F 2 im Anhang dargestellt). Aufgabe Nr. 12 wurde von 71,4 % der Probanden perfekt gelöst, 22,1 % benötigten mehr Züge und 6,5 % konnten diese Aufgabe nicht lösen. Aufgabe Nr. 14 konnte dagegen von 81,8 % der Probanden perfekt gelöst werden, 15,6 % benötigten mehr Züge und 6,5 % konnten sie nicht lösen. Diese Aufgabe scheint daher leichter zu lösen zu sein als Aufgabe Nr. 12.

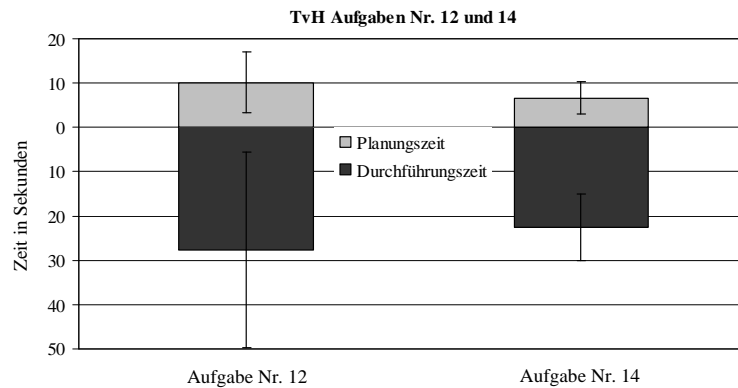


Abbildung 33: Planungs- und Durchführungszeiten der Turm-von-Hanoi-Aufgaben Nr. 12 und Nr. 14. Die Planungszeiten sind signifikant unterschiedlich ($p < 0,05$), hinsichtlich der Durchführungszeiten gibt es keine Unterschiede, d. h. bei der Aufgabe Nr. 12 benötigen die Probanden genauso viel Zeit wie bei der Aufgabe Nr. 14.

3.3.2. Turm von London

Die Aufgaben Nr. 12 und Nr. 14 wurden miteinander verglichen. Diese Aufgaben haben jeweils die gleiche Startposition und denselben Weg auf dem Zustandsgraphen. Zur Lösung der Aufgabe Nr. 14 wird jedoch ein zusätzlicher Zug benötigt, so dass sich die Zielposition um einen Zug verändert. Aufgabe Nr. 12 ist eine 5-Zug-Aufgabe mit einer flachen Zielkonfiguration, Aufgabe Nr. 14 ist eine 6-Zug-Aufgabe mit einer partiellen Turm-Zielkonfiguration. Die kürzesten Lösungswege sind im Graphen eingezeichnet (Abbildung 34).

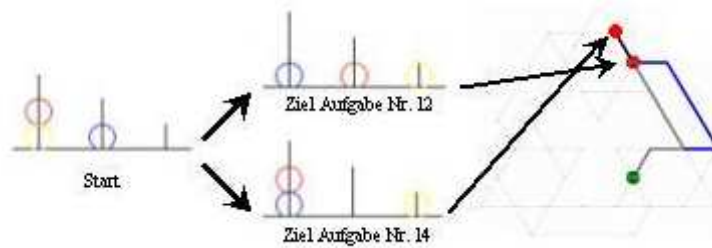


Abbildung 34: Start- und Zielkonfigurationen der Turm-von-London-Aufgaben Nr. 12 und Nr. 14. Beide Aufgaben haben die gleiche Startkonfiguration und zwei kürzeste Lösungswege. Aufgabe Nr. 12 ist eine 5-Zug-Aufgabe mit einer flachen Zielkonfiguration (Lösungsweg grau hinterlegt). Aufgabe Nr. 14 ist eine 6-Zug-Aufgabe mit einer partiellen Turm-Zielkonfiguration, bei der zur Lösung ein zusätzlicher Zug benötigt wird (Lösungsweg schwarz hinterlegt). Der zweite kürzeste Weg für beide Aufgaben ist blau hinterlegt. Das Ziel ist jeweils mit einem roten Punkt gekennzeichnet.

Obwohl Aufgabe Nr. 12 mit einem Zug weniger an das Ziel führt als Aufgabe Nr. 14, gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Lösungszeiten der beiden Aufgaben. Das bedeutet, dass die Probanden für die Aufgaben Nr.12 genauso lang planten und ebenso viel Zeit zur Durchführung benötigten, wie für die Aufgabe Nr. 14 (Abbildung 35; einzelne Werte siehe Tabelle F 3 im Anhang). Aufgabe Nr. 12 konnte von 54,6 % der Probanden perfekt gelöst werden, 39 % benötigten mehr Züge und 6,5 % der Probanden konnten diese Aufgabe gar nicht lösen. Aufgabe Nr. 14 konnte dagegen von 40,3 % der Probanden perfekt gelöst werden, 42,9 % benötigten mehr Züge und 14,3 % konnten sie gar nicht lösen.

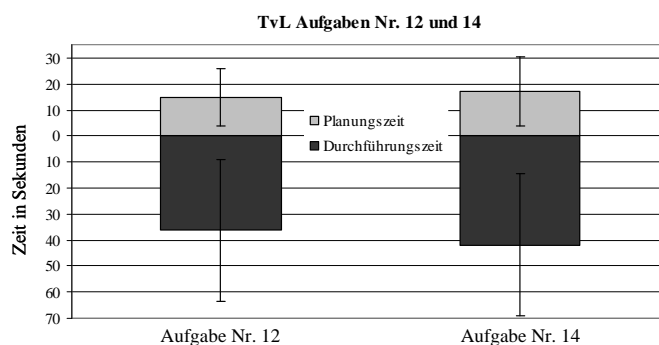


Abbildung 35: Planungs- und Durchführungszeiten der Turm-von-London-Aufgaben Nr. 12 und Nr. 14. Hinsichtlich der Planungs- und Durchführungszeiten gibt es keine signifikanten Unterschiede ($p < 0,05$).

3.4. Turm von Hanoi und London im Vergleich

Um den Turm von Hanoi und Turm von London miteinander zu vergleichen wurden die Planungs- und Durchführungszeiten der einzelnen Aufgaben genauer analysiert. Es wurden die Zeiten von optimal gelösten und mit mehr als der Mindestzugzahl gelösten Aufgaben miteinander verglichen. Hier zeigte sich, dass Aufgaben, bei denen länger geplant wurde, besser gelöst wurden als Aufgaben, bei denen nicht so lange geplant wurde. Es zeigte sich auch, dass Probanden bei den meisten TvL-Aufgaben länger planten als bei TvH-Aufgaben (Abbildung 36).

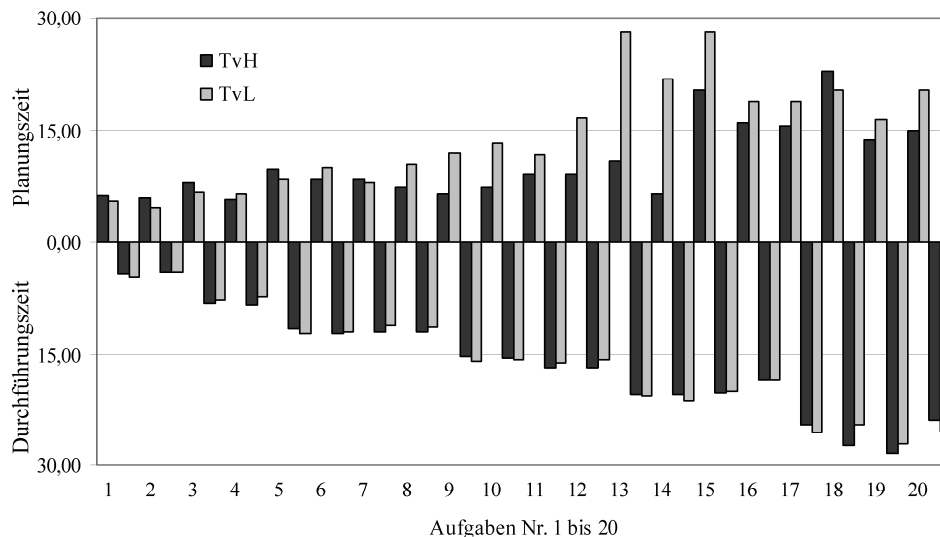


Abbildung 36: Planungs- und Durchführungszeiten von optimal gelösten Turm-von-Hanoi- und -London-Aufgaben im Vergleich. Die Aufgaben Nr. 1 und 2 sind 2-Zug-Aufgaben, Nr. 3 und 4 sind 3-Zug-Aufgaben, Nr. 5 bis Nr. 8 sind 4-Zug-Aufgaben, Nr. 9 bis Nr. 12 sind 5-Zug-Aufgaben, Nr. 13 bis Nr. 16 sind 6-Zug-Aufgaben und Nr. 17 bis Nr. 20 sind 7-Zug-Aufgaben.

Bei näherer Betrachtung der einzelnen Aufgaben erkennt man, dass die Probanden beim TvL bei der Aufgabe Nr. 13 und Nr. 14 wesentlich länger planten als beim TvH, aber für die Durchführung nicht mehr Zeit benötigten. Beide Aufgaben haben eine partielle Start- und Zielkonfiguration, allerdings gibt es beim TvH zwei kürzeste Lösungswege, beim TvL dagegen nur einen kürzesten Lösungsweg. Die TvH-Aufgabe Nr. 13 konnte von fast 90 % der Probanden perfekt gelöst werden, nur 1,3 % konnten sie gar nicht lösen. Die TvL-Aufgabe wurde dagegen nur von etwa 23 % der Probanden perfekt gelöst und von 6,5 % gar nicht gelöst.

Bei der Aufgabe Nr. 14 zeigte sich ein ähnliches Bild. Bei der TvL-Aufgabe planten die Probanden viel länger als bei der TvH-Aufgabe. Diese Aufgabe konnte von etwa 40 % der Probanden perfekt gelöst werden, 14 % konnten sie gar nicht lösen. Die TvH-Aufgabe konnte dagegen von fast 82 % der Probanden perfekt gelöst und nur von etwa 3 % nicht gelöst werden. Wenn man sich die Aufgabeneigenschaften anschaut, dann hat die TvH-Aufgabe einen partiellen Start und eine Turm-Zielkonfiguration und nur einen kürzesten Lösungsweg. Die TvL-Aufgabe hat dagegen eine partielle Start- und Zielkonfiguration und zwei kürzeste Lösungswege. Trotz der gleichen Mindestzugzahl scheinen beide Aufgaben unterschiedlich schwer zu sein.

Im Vergleich dazu wurden die Planungs- und Durchführungszeiten von Aufgaben verglichen, die in der vorgegebenen Zeit von zwei Minuten mit mehr als der Mindestzugzahl gelöst wurden. Hier zeigte sich, dass beim TvH als auch beim TvL die Planungszeiten viel kürzer waren als die Durchführungszeiten (Abbildung 37). Auch im Vergleich zu optimal gelösten Aufgaben waren hier die Planungszeiten kürzer und die Durchführungszeiten länger.

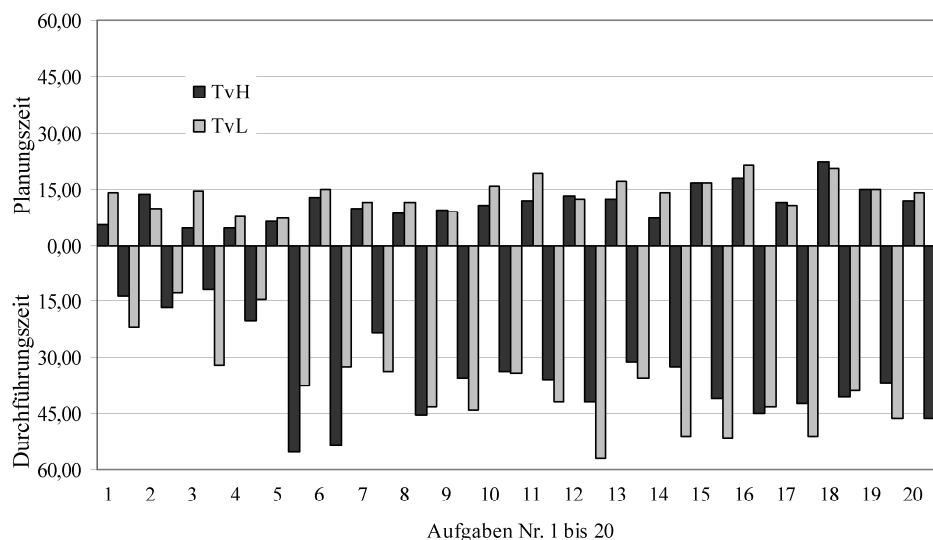


Abbildung 37: Planungs- und Durchführungszeiten von nicht optimal gelösten Turm-von-Hanoi- und -London-Aufgaben im Vergleich. Die Aufgaben Nr. 1 und 2 sind 2-Zug-Aufgaben, Nr. 3 und 4 sind 3-Zug-Aufgaben, Nr. 5 bis Nr. 8 sind 4-Zug-Aufgaben, Nr. 9 bis Nr. 12 sind 5-Zug-Aufgaben, Nr. 13 bis Nr. 16 sind 6-Zug-Aufgaben und Nr. 17 bis Nr. 20 sind 7-Zug-Aufgaben.

Hier kann man beispielsweise bei der Aufgabe Nr. 14 gut erkennen, dass beim TvL viel mehr Zeit für die Durchführung benötigt wurde und im Vergleich zum TvH auch etwas länger geplant wurde.

Abbildung 38 a und b zeigen jeweils den Anteil an perfekt gelösten, mit mehr Zügen als der Mindestzugzahl gelösten und gar nicht gelösten TvH- und TvL-Aufgaben in Prozent.

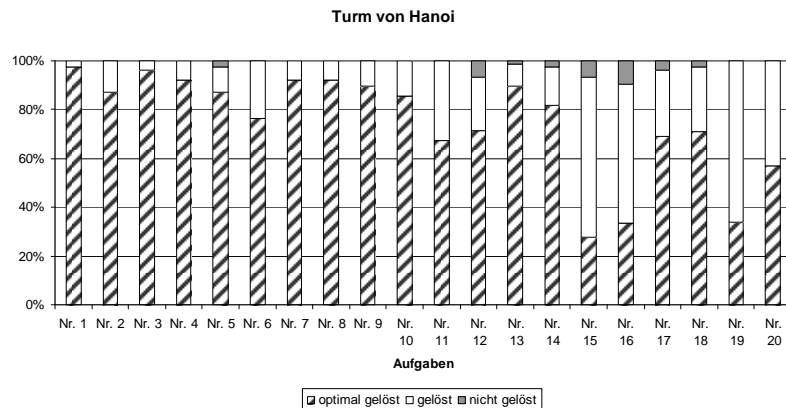


Abbildung 38 a: Anteil an optimal gelösten, mit mehr Zügen gelösten und nicht gelösten Turm-von-Hanoi-Aufgaben in Prozent.

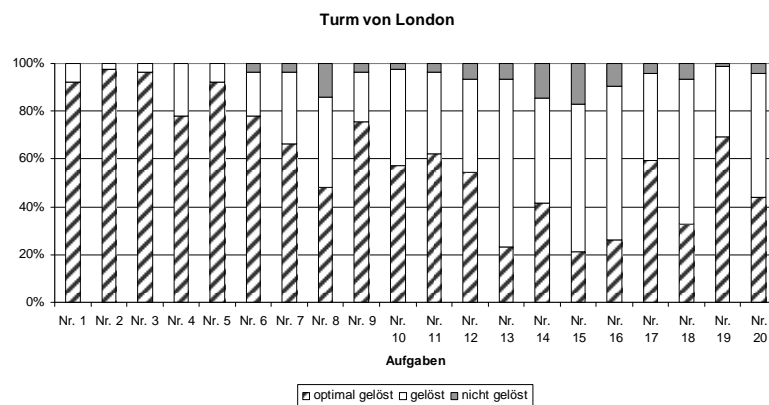


Abbildung 38 b: Anteil an optimal gelösten, mit mehr Zügen gelösten und nicht gelösten Turm-von-London-Aufgaben in Prozent.

Um den Einfluss der Mindestzugzahl auf den Lösungserfolg zu untersuchen, wurden Mittelwerte von Aufgaben mit derselben Mindestzugzahl gebildet und verglichen. Hierzu wurde die Differenz zwischen dem TvH und TvL mit dem Wilcoxon-Test für gepaarte Stichproben analysiert.

Beim TvL planten Probanden bei 2-Zug-Aufgaben ($Z=-3,447$; $p=0,001$), 5-Zug-Aufgaben ($Z=-5,656$; $p=0,000$) und 6-Zug-Aufgaben ($Z=-4,550$; $p=0,000$) länger als beim TvH (Abbildung 39). Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern gekennzeichnet. Die einzelnen Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) werden in Tabelle G 1 im Anhang dargestellt.

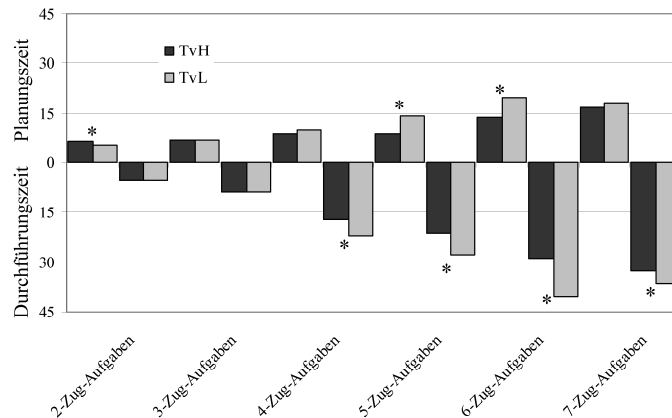


Abbildung 39: Planungs- und Durchführungszeiten von Turm-von-Hanoi- und -London-Aufgaben gleicher Zugzahl im Vergleich. Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern gekennzeichnet ($p < 0,05$). Demnach gab es signifikante Unterschiede zwischen den Planungszeiten der 2-, 5- und 6-Zug-Aufgaben sowie zwischen den Durchführungszeiten der 4-, 5-, 6- und 7-Zug-Aufgaben.

Bei der Durchführung der Aufgaben benötigten die Probanden beim TvL für 4-Zug-Aufgaben ($Z=-3,473$; $p=0,001$), 5-Zug-Aufgaben ($Z=-4,351$; $p=0,000$); 6-Zug-Aufgaben ($Z=-5,879$; $p=0,000$) und 7-Zug-Aufgaben ($Z=-2,970$; $p=0,003$) mehr Zeit als beim TvH. Die Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) sind in Tabelle G 2 im Anhang dargestellt.

Für den TvL benötigten die Probanden im Vergleich zum TvH bis auf die 2-Zug-Aufgaben signifikant mehr Züge ($p < 0,01$). Abbildung 40 zeigt die zusätzlich zur Mindestzugzahl benötigten Züge. Probanden benötigten beim TvL für Aufgaben mit derselben Mindestzugzahl mehr zusätzliche Züge als beim TvH. Die einzelnen Mittelwerte und Standardabweichungen sind in Tabelle G 3 im Anhang abgebildet.

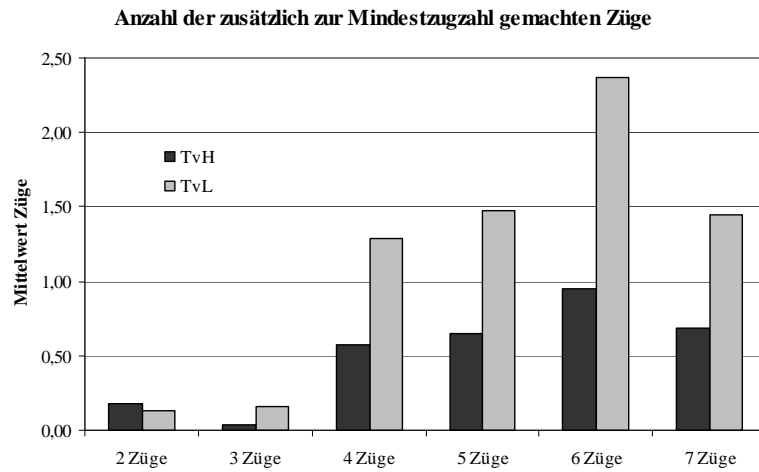


Abbildung 40: Anzahl der zur Mindestzugzahl zusätzlich gemachter Züge bei Turm-von-Hanoi- und -London-Aufgaben gleicher Zugzahl im Vergleich. Bei 4-, 5-, 6- und 7-Zug-Aufgaben benötigten die Probanden beim Lösen der TvL-Aufgaben mehr Züge als für TvH-Aufgaben gleicher optimaler Zugzahl.

3.5. Korrelationen mit anderen Tests

Um den Zusammenhang zwischen dem Turm von Hanoi und Turm von London mit anderen Tests zur Untersuchung der Exekutivfunktionen zu analysieren, wurden die einzelnen Parameter der beiden Turm-Aufgaben mit den Rohwerten der verschiedenen Testverfahren korreliert. Im Folgenden werden die einzelnen Ergebnisse für den TvH und den TvL getrennt dargestellt. Es wurden nichtparametrische Korrelationen nach Spearman-Rho durchgeführt. Der Wertebereich für die Korrelationskoeffizienten reicht von -1 (perfekter negativer Zusammenhang) bis $+1$ (perfekter positiver Zusammenhang). Der Wert 0 bedeutet, dass kein linearer Zusammenhang besteht. Werte $\leq 0,2$ bedeuten eine sehr geringe Korrelation, Werte zwischen $0,2$ und $0,5$ bedeuten eine geringe Korrelation, Werte zwischen $0,5$ und $0,7$ bedeuten eine mittlere Korrelation, Werte zwischen $0,7$ und $0,9$ bedeuten eine hohe Korrelation und Werte zwischen $0,9$ und 1 bedeuten eine sehr hohe Korrelation.

3.5.1. Turm von Hanoi

Die einzelnen Korrelationskoeffizienten r sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Korrelationen der Turm-von-Hanoi-Parameter mit anderen Exekutivtests

| Turm-von-Hanoi-Parameter | Gesamt-lösungszeit | Gesamt-planungszeit | Gesamt-durchführungszeit | Gesamt-züge | Gesamt-fehler | Anzahl optimal gelöster Aufgaben |
|-------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------------|-------------|---------------|----------------------------------|
| Zahlenspannen vorwärts | -0,223 | -0,093 | -0,255* | -0,323** | -0,227 | 0,426** |
| Zahlenspannen rückwärts | -0,464** | -0,310** | -0,433** | -0,226 | -0,340** | 0,358** |
| Blockspanne vorwärts | -0,415** | -0,227 | -0,395** | -0,318** | -0,504** | 0,448** |
| Blockspanne rückwärts | -0,357** | -0,167 | -0,360** | -0,125 | -0,363** | 0,287* |
| TMT A | 0,522** | 0,278* | 0,496** | 0,246* | 0,451** | -0,235 |
| TMT B | 0,661** | 0,440** | 0,559** | 0,336** | 0,527** | -0,406** |
| Matrizentest | -0,531** | -0,247* | -0,559** | -0,352** | -0,529** | 0,387** |
| MWT-B | -0,172 | 0,044 | -0,259* | -0,261* | -0,253* | 0,347** |
| Semantische Wortflüssigkeit | -0,184 | 0,011 | -0,232 | -0,045 | -0,025 | 0,060 |
| Phonologische Wortflüssigkeit | -0,408** | -0,248* | -0,374** | -0,226 | -0,294* | 0,315** |
| 5-Punkte-Test | -0,525** | -0,235 | -0,575** | -0,343** | -0,600** | 0,367** |

Signifikante Korrelationen nach Spearman-Rho auf dem Niveau von $0,01$ sind mit ** gekennzeichnet, auf dem Niveau von $0,05$ sind mit * gekennzeichnet. Negative Vorzeichen bedeuten, dass es einen umgekehrten Zusammenhang gibt. Farberklärungen: weiß: keine bis sehr geringe Korrelation ($0 < r \leq 0,2$), hellgrau: geringe Korrelation ($0,2 < r \leq 0,5$), dunkelgrau: mittlere Korrelation ($0,5 < r \leq 0,7$).

Die Korrelationsanalyse zeigt einen mittleren positiven Zusammenhang zwischen der Gesamtlösungszeit und dem TMT A ($r=0,522$) und TMT B ($r=0,661$) sowie einen negativen Zusammenhang mit dem Matrizen-Test ($r=-0,531$) und dem 5-Punkte-Test ($r=-0,525$). Die Durchführungszeit korrelierte ebenfalls positiv mit dem TMT B ($r=0,559$) sowie negativ mit dem Matrizen-Test ($r=-0,559$) und dem 5-Punkte-Test ($r=-0,575$). Zwischen den Gesamtfehlern und dem TMT B ($r=0,527$) gab es einen positiven Zusammenhang sowie mit der Blockspanne vorwärts ($r=-0,504$), dem Matrizen-Test ($r=-0,529$) und dem 5-Punkte-Test ($r=-0,600$) einen negativen Zusammenhang.

Das bedeutet, dass diejenigen, die weniger Zeit für den TMT A und TMT B benötigten, auch schneller bei der Lösung und Durchführung der TvH-Aufgaben waren, weniger Fehler machten und mehr Punkte beim Matrizen- und 5-Punkte-Test hatten. Die weiteren Tests korrelierten nur gering mit den TvH-Parametern.

Weiterhin wurden die Mittelwerte der Planungs- und Durchführungszeiten sowie der Züge und Fehler der 2-Zug-, 3-Zug-, 4-Zug-, 5-Zug-, 6-Zug- und 7-Zug-Aufgaben mit den Tests zur Untersuchung der Exekutivfunktionen korreliert. Die Korrelationstabellen mit den einzelnen Werten sind im Anhang in den Tabellen H 1- H 4 dargestellt. Im Folgenden wird nur auf signifikante mittlere Korrelationen (Werte zwischen 0,5 und 0,7) eingegangen.

Es gab eine negative mittlere Korrelation zwischen dem 5-Punkte-Test und den Durchführungszeiten von 5-Zug-Aufgaben ($r=-0,537$) und 7-Zug-Aufgaben ($r=-0,530$). Je mehr Zeit die Probanden für die Durchführung von 5- und 7-Zug-Aufgaben benötigten, desto weniger Punkte hatten sie beim 5-Punkte-Test (Abbildung 41 a und b).

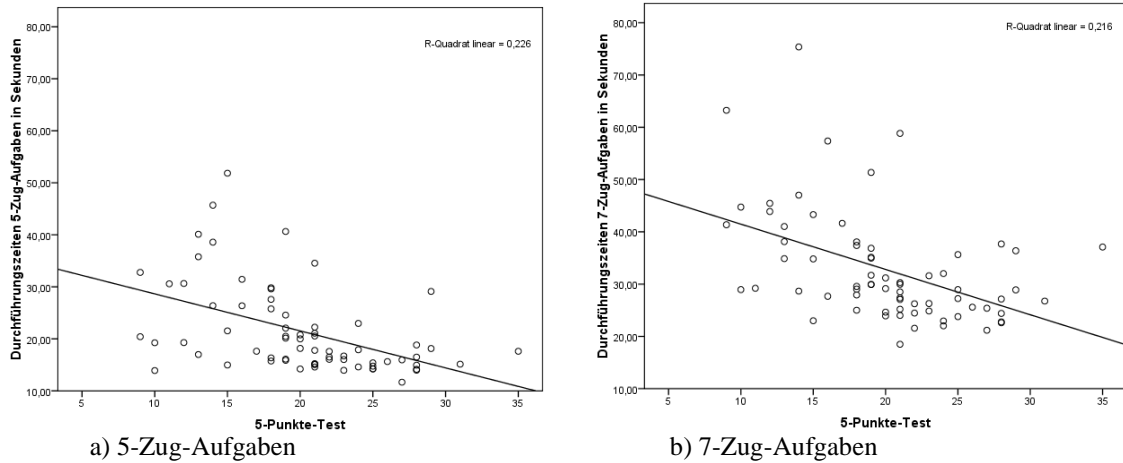


Abbildung 41 a und b: Korrelation der Durchführungszeiten von 5-Zug-Aufgaben (a) und 7-Zug-Aufgaben (b) mit dem 5-Punkte-Test.

3.5.2. Turm von London

Die Korrelationskoeffizienten r sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Korrelationen der Turm-von-London-Parameter mit anderen Exekutivtests

| Turm-von-London-Parameter | Gesamtlösungszeit | Gesamtplanungszeit | Gesamtdurchführungszeit | Gesamtzüge | Gesamtfehler | Anzahl optimal gelöster Aufgaben |
|-------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|------------|--------------|----------------------------------|
| Zahlenspannen vorwärts | -0,268* | 0,179 | -0,453** | -0,357** | -0,229 | 0,427** |
| Zahlenspannen rückwärts | -0,445** | -0,115 | -0,447** | -0,195 | -0,124 | 0,395** |
| Blockspanne vorwärts | -0,352** | 0,001 | -0,386** | -0,183 | -0,374** | 0,334** |
| Blockspanne rückwärts | -0,350** | -0,079 | -0,326** | -0,082 | -0,172 | 0,169 |
| TMT A | 0,434** | 0,081 | 0,503** | 0,111 | 0,289* | -0,212 |
| TMT B | 0,588** | 0,243* | 0,551** | 0,148 | 0,402** | -0,319** |
| Matrizentest | -0,508** | -0,091 | -0,539** | -0,139 | -0,327** | 0,293* |
| MWT-B | -0,135 | 0,074 | -0,169 | -0,217 | -0,050 | 0,202 |
| Semantische Wortflüssigkeit | -0,011 | 0,197 | -0,099 | -0,063 | -0,030 | 0,134 |
| phonologische Wortflüssigkeit | -0,361** | 0,038 | -0,485** | -0,365** | -0,419** | 0,487** |
| 5-Punkte-Test | -0,528** | -0,100 | -0,612** | -0,255* | -0,307** | 0,318** |

Signifikante Korrelationen nach Spearman-Rho auf dem Niveau von 0,01 sind mit ** gekennzeichnet, auf dem Niveau von 0,05 sind mit * gekennzeichnet. Negative Vorzeichen bedeuten, dass es einen umgekehrten Zusammenhang gibt. Farberklärungen: weiß: keine bis sehr geringe Korrelation ($0 < r \leq 0,2$), hellgrau: geringe Korrelation ($0,2 < r \leq 0,5$), dunkelgrau: mittlere Korrelation ($0,5 < r \leq 0,7$).

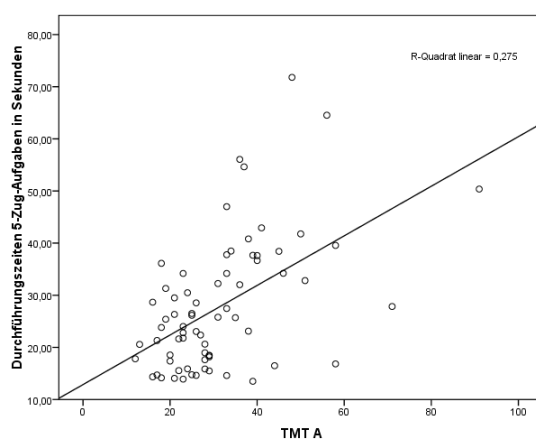
Hier korrelierte die Gesamtlösungszeit positiv mit dem TMT B ($r=0,588$). Die Gesamtdurchführungszeit korrelierte positiv mit dem TMT A ($r=0,503$) und TMT B ($r=0,551$) sowie negativ mit dem Matrizenstest ($r=-0,539$) und dem 5-Punkte-Test ($r=-0,612$). Die Gesamtlösungszeit korrelierte ebenfalls negativ mit dem Matrizenstest ($r=-0,508$) und dem 5-Punkte-Test ($r=-0,528$).

Auch hier wurden die Mittelwerte der Planungs- und Durchführungszeiten sowie der Züge und Fehler der 2-Zug-, 3-Zug-, 4-Zug-, 5-Zug-, 6-Zug- und 7-Zug-Aufgaben mit den Tests zur Untersuchung der Exekutivfunktionen korreliert. Die Korrelationstabellen mit den einzelnen Werten sind im Anhang in den Tabellen I 1 – I 4 dargestellt. Im Folgenden wird nur auf mittlere Korrelationen eingegangen.

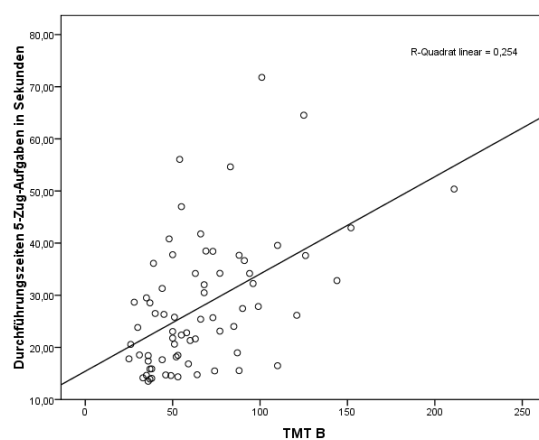
Es gab eine signifikante negative mittlere Korrelation zwischen dem 5-Punkte-Test und der Planungszeit von 2-Zug-Aufgaben ($r=-0,516$). Das bedeutet, je länger die Probanden bei 2-Zug-Aufgaben planten, desto weniger Punkte hatten sie beim 5-Punkte-Test.

Zwischen den Durchführungszeiten von 5-Zug-Aufgaben und dem TMT A ($r=0,503$) und TMT B ($r=0,501$) gab es eine positive mittlere Korrelation und dem 5-Punkte-Test ($r=-0,500$) eine negative Korrelation.

Wenn Probanden für die Durchführung von 5-Zug-Aufgaben wenig Zeit benötigten, dann benötigten sie auch beim TMT A (Abbildung 42 a) und TMT B (Abbildung 41 b) weniger Zeit und umgekehrt.



a) 5-Zug-Aufgaben und TMT A



b) 5-Zug-Aufgaben und TMT B

Abbildung 42 a und b: Korrelation der Durchführungszeiten von 5-Zug-Aufgaben mit dem TMT A (a) und TMT B (b).

Wenn sie dagegen weniger Punkte beim 5-Punkte-Test hatten, dann benötigten sie auch mehr Zeit für die Durchführung von 5-Zug-Aufgaben und umgekehrt (Abbildung 43).

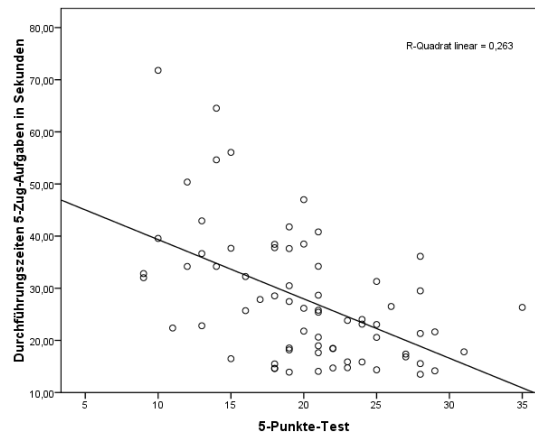
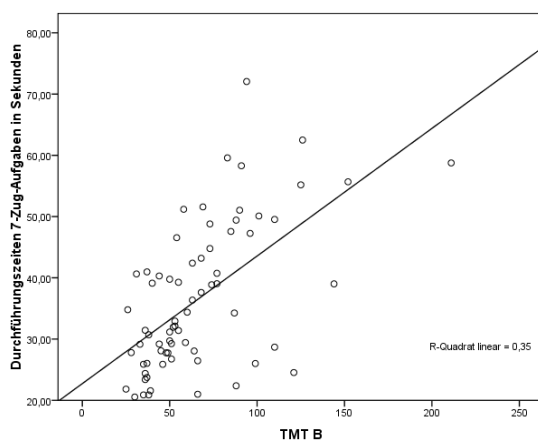


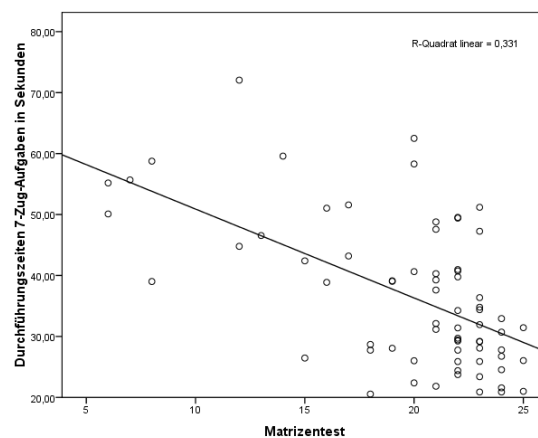
Abbildung 43: Korrelation der Durchführungszeiten von 5-Zug-Aufgaben mit dem 5-Punkte-Test.

Weiterhin gab es eine positive Korrelation zwischen den Durchführungszeiten von 7-Zug-Aufgaben und dem TMT B ($r=0,584$) und eine mittlere negative Korrelationen mit dem Matrizenest ($r=-0,518$), der phonologischen Wortflüssigkeit (S-Wörter; $r=-0,538$) und dem 5-Punkte-Test ($r=-0,594$).

Probanden, die viel Zeit für die Durchführung von 7-Zug-Aufgaben benötigten, benötigten auch mehr Zeit beim TMT B (Abbildung 44 a) und hatten weniger Punkte beim Matrizenest (Abbildung 44 b).



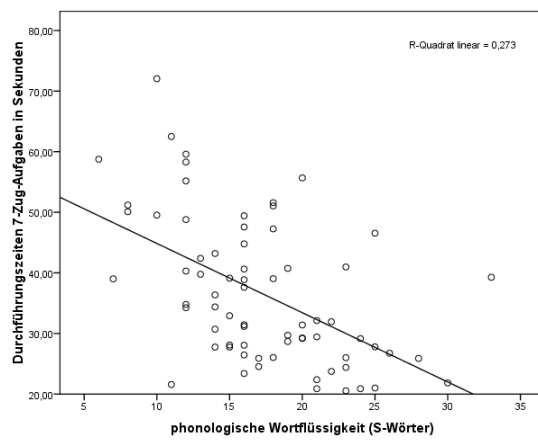
a) 7-Zug-Aufgaben und TMT B



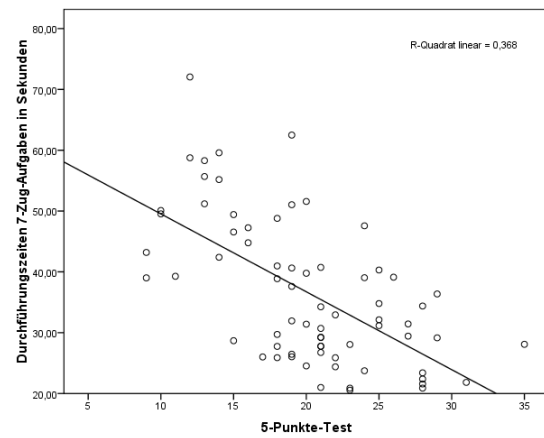
b) 7-Zug-Aufgaben und Matrizenest

Abbildung 44 a und b: Korrelation der Durchführungszeiten von 5-Zug-Aufgaben mit dem TMT B (a) und Matrizenest (b).

Die Probanden hatten auch weniger Punkte bei der phonologischen Wortflüssigkeit (S-Wörter; Abbildung 45 a) und dem 5-Punkte-Test (Abbildung 45 b).



a) 7-Zug-Aufgaben und S-Wörter



b) 7-Zug-Aufgaben und 5-Punkte-Test

Abbildung 45 a und b: Korrelation der Durchführungszeiten von 5-Zug-Aufgaben mit der phonologischen Wortflüssigkeit (a) und dem 5-Punkte-Test (b).

3.6. Einzelfallanalyse der Patientendaten

Zur Analyse des Planungs- und Problemlöseverhalten von Patienten mit umschriebenen Hirnläsionen wurden Cut-Off-Werte für die Turm-von-Hanoi- und Turm-von-London-Parameter gebildet. Dazu wurden dem jeweiligen Mittelwert der gesunden Kontrollstichprobe je nach Parameter, zwei Standardabweichungen addiert oder subtrahiert und gerundet. Patienten, deren Leistungen in mehr als zwei TvH- oder TvL-Parametern über bzw. unter diesem gerundeten Cut-Off-Wert lagen, werden im Folgenden genauer beschrieben. Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Kontrollstichprobe sind in Tabelle J im Anhang dargestellt.

3.6.1. Turm-von-Hanoi-Parameter

Tabelle 5 zeigt die einzelnen Cut-Off-Werte, die auf- oder abgerundet wurden. Von den 22 Patienten lagen folgende Patienten bei mehr als zwei Parametern über bzw. unter dem Cut-Off-Wert und werden im Folgenden genauer beschrieben: KH, KG, RA, SR und VJ. Die einzelnen Werte der Patienten sind in Tabelle K 1 im Anhang detailliert dargestellt.

Tabelle 5: Cut-Off-Werte der Turm-von-Hanoi-Parameter

| Turm-von-Hanoi-Parameter | Cut-Off-Werte | gerundete Cut-Off-Werte |
|----------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| Gesamtlösungszeit | 980,36 sek. | > 980 sek. |
| Gesamtplanungszeit | 431,69 sek. | > 432 sek. |
| Gesamtdurchführungszeit | 631,94 sek. | > 632 sek. |
| Gesamtzüge (Mindestzugzahl=98) | 121,94 | > 122 |
| Gesamtfehler | 5,65 | > 6 |
| Anzahl optimal gelöster Aufgaben | 10,81 | < 11 |

KH benötigte über 20 min. (=1246,06 sek.) um den TvH zu lösen. Dabei plante er zwar insgesamt nicht lange, benötigte jedoch viel Zeit für die Durchführung der Aufgaben (17,29 min.=1037,17 sek.). Er machte viele Züge (167) und Fehler (46) und hatte am Ende nur 8 optimal gelöste Aufgaben. Bei Aufgabe Nr. 13 und Nr. 17 wählte dieser Patient einen der beiden kürzesten Lösungswege. Die Aufgaben Nr. 12, 16 und Nr. 18 konnte er nicht lösen. KH hat eine links temporale Läsion.

KG benötigte insgesamt fast 17 min. zur Lösung des TvH (1014,77 sek.), machte viele Züge (140 Züge) und hatte wenig optimal gelöste Aufgaben (9). An den einzelnen Graphen wird deutlich, dass KG bei den meisten Aufgaben große Umwege ging, viele Züge benötigte und dadurch weniger optimal gelöste Aufgaben hatte. Bei der Aufgabe Nr. 16 baute er zuerst einen Turm, lief den Weg dann zurück und löste die Aufgabe schließlich richtig. Bei den Aufgaben Nr. 17 und Nr. 18 wählte KG einen der beiden kürzesten Lösungswege, benötigte jedoch noch einen zusätzlichen Zug. KG hat eine links temporale Läsion.

RA benötigte über 22 min. (1357,23 sek.) um den TvH zu lösen, hatte insgesamt lange Planungs- und Durchführungszeiten (588,73 sek. bzw. 768,50 sek.) und nur 10 optimal gelöste Aufgaben. Dieser Patient konnte viele Aufgaben nicht lösen (Nr. 9, 11, 14, 17, 18 und Nr. 20). Bei den Aufgaben Nr. 15 und Nr. 19 benötigte RA einen zusätzlichen Zug zur Mindestzugzahl. Auch RA hat eine links temporale Läsion.

SR machte insgesamt viele Züge (144) und Fehler (7) und hatte nur wenig optimal gelöste Aufgaben (7). Die Analyse der einzelnen Graphen ergab, dass dieser Patient bei den meisten Aufgaben einen Umweg ging und somit mehr Züge benötigte. Bei der Aufgabe Nr. 13 wählte er einen der kürzesten Lösungswege und benötigte bei Aufgaben Nr. 19 (+1 Zug) und Nr. 20 (+2 Züge) mehr Züge als die Mindestzugzahl. SR hat eine rechts frontale Läsion.

VJ benötigte insgesamt 27 min. (1621, 30 sek.) zur Lösung des TvH und benötigte auch insgesamt viel Zeit für die Planung (454, 91 sek.) und die Durchführung (1166,39 sek.). Bei genauerer Analyse der Graphen zeigte sich, dass er bei den einfacheren Aufgaben kleine Umwege ging und immer mehr Züge benötigte als die notwendige Zugzahl. Die Aufgaben Nr. 10 und Nr. 12 wurden gar nicht gelöst. Bei den Aufgaben Nr. 15, 16 und Nr. 20 benötigte VJ mehr Züge als die Mindestzugzahl und konnte die Aufgaben Nr. 17, 18 und Nr. 19 optimal lösen. Bei der Aufgabe Nr. 19 wendete er die VPS an. Insgesamt hatte dieser Patient nur 10 optimal gelöste Aufgaben. VJ hat eine links frontale Läsion.

3.6.2. Turm-von-London-Parameter

Hier hatte nur der Patient KH in mehr als zwei TvL-Parametern schlechtere Leistungen als die anderen Patienten. Im Vergleich zum Turm von Hanoi werden hier jedoch dieselben Patienten KH, KG, RA, SR und VJ beschrieben. Tabelle 6 zeigt die Cut-Off-Werte der Turm-von-London-Parameter. Die einzelnen Werte der Patienten sind in Tabelle K 2 im Anhang detailliert dargestellt.

Tabelle 6: Cut-Off-Werte der Turm-von-London-Parameter

| Turm-von-London-Parameter | Cut-Off-Werte | gerundete Cut-Off-Werte |
|----------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| Gesamtlösungszeit | 1293,14 sek. | > 1293 sek. |
| Gesamtplanungszeit | 569,37 sek. | > 569 sek. |
| Gesamtdurchführungszeit | 936,5 sek. | > 937 sek. |
| Gesamtzüge (Mindestzugzahl=98) | 150,64 | > 151 |
| Gesamtfehler | 4,65 | > 5 |
| Anzahl optimal gelöster Aufgaben | 6,13 | < 6 |

KH lag beim TvL in allen untersuchten Parametern zwei Standardabweichungen unter bzw. über dem Mittelwert der gesunden Kontrollstichprobe. Er benötigte insgesamt 22 min. (1326,31 sek.) zur Lösung des TvL und hatte insgesamt längere Durchführungszeiten (1154,36 sek.). Am auffälligsten waren hier die Zahl der gemachten Fehler (39) und Gesamtzüge (192). KH konnte einige Aufgaben nicht lösen (Nr. 6, 8 und Nr. 14) und ging bei den meisten Aufgaben große Umwege. Die Aufgabe Nr. 20 konnte KH jedoch perfekt lösen.

KG machte insgesamt sehr viele Züge (153). Bei genauer Analyse der Graphen zeigte sich, dass er bei den meisten Aufgaben zwar Umwege ging, aber alle Aufgaben lösen konnte. Im Vergleich zum TvH lagen die Lösungszeiten und die Anzahl optimal gelöster Aufgaben (10) hier im Durchschnittsbereich.

RA benötigte insgesamt lediglich sehr lang für die Lösung des TvL (1466,36 sek.=24,4 min.) und für die Durchführung der Aufgaben (1092,59 sek.). Dieser Patient konnte zwar viele Aufgaben nicht lösen (Nr. 8, 10, 12, 17, 18, 19 und Nr. 20), lag aber trotzdem mit 10 optimal gelösten Aufgaben im Normbereich. Dagegen hatte RA beim TvH weniger optimal gelöste Aufgaben und viel Zeit für die Lösung der Aufgaben benötigt.

SR machte insgesamt viele Züge (165) und hatte lediglich 5 optimal gelöste Aufgaben. Die Lösungszeiten lagen noch im Normbereich. SR ging bei vielen Aufgaben Umwege. Dieser Patient konnte die Aufgaben Nr. 8 und Nr. 14 nicht lösen. Auch beim TvH hatte SR viele Züge und wenig optimal gelöste Aufgaben.

VJ benötigte insgesamt über 23 min. für die Lösung des TvL (1410,61 sek.) und auch viel Zeit für die Durchführung der Aufgaben (1006,81 sek.). Dieser Patient konnte viele Aufgaben perfekt lösen, mit Ausnahme der Aufgaben Nr. 6, 14, und Nr. 15.

4. Diskussion

Ziel dieser Studie war es, das Problemlöseverhalten von gesunden Kontrollpersonen und Patienten mit umschriebenen Hirnläsionen mit dem Turm von Hanoi (TvH) und Turm von London (TvL) auf dem Tablet PC zu untersuchen und die Eigenschaften der beiden Tests zu analysieren. Im Folgenden werden die Ergebnisse diskutiert.

4.1. Gruppenvergleich: jüngere und ältere gesunde Probanden

Eine Frage, die in dieser Arbeit beantwortet werden sollte, war, ob es Alterseffekte auf das Problemlöseverhalten und die Exekutivfunktionen gibt. Wie erwartet, zeigten ältere Probanden im Vergleich zu jüngeren Probanden in fast allen Tests zur Untersuchung der Exekutivfunktionen schlechtere Leistungen. Es gab signifikante Unterschiede bei den Zahlen- und Blockspannen vorwärts und rückwärts, dem TMT A und B, dem Matrizentest und dem Fünf-Punkte-Test. Somit scheinen Alterseffekte einen Einfluss auf die Kapazität des verbalen und visuellen Arbeitsgedächtnisses, die kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit, die kognitive Flexibilität und das schlussfolgernd-logische Denken bzw. die fluide Intelligenz zu haben. Dagegen gab es keine Unterschiede in den Wortflüssigkeitsleistungen und der kristallinen Intelligenz (gemessen mit dem MWT-B). Diese Ergebnisse sind mit der Hypothese vereinbar, dass exekutive Funktionen, insbesondere die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses und die kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit, mit dem Alter abnehmen. Für die Abnahme der kognitiven Fähigkeiten wird die kognitive Verlangsamung verantwortlich gemacht, die wiederum auf pathologische Prozesse im Frontalhirn zurückgeführt wird. Diese kognitive Verlangsamung hat in zweierlei Hinsicht einen Effekt auf die höheren kognitiven Funktionen: Zum Einen auf die Fähigkeit, Handlungen aufgrund zeitlicher Einschränkungen effektiv auszuführen und zum Anderen auf die Fähigkeit, Informationen, die für die Durchführung der Aufgaben notwendig sind, aufrechtzuerhalten (Bugg et al., 1996; Salthouse, 2004). Auch nach West (1996) sind zielorientierte Funktionen für Alterseffekte am anfälligsten.

Die Analyse der TvH-Parameter ergab ebenfalls Alterseffekte in Bezug auf die Gesamtlösungszeit, Gesamtplanungs- und -Durchführungszeit sowie die Anzahl optimal, d.h. mit der Mindestzugzahl gelöster Aufgaben. Die älteren Probanden planten zwar länger, benötigten aber trotzdem mehr Zeit für die Durchführung der Aufgaben, weil sie auch mehr Züge als die minimal erforderliche Zugzahl machten. Das bedeutet, dass sie insgesamt langsamer waren, aber auch ineffektiver planten.

Bereits in einer früheren Pilotstudie mit dem TvH konnte gezeigt werden, dass ältere Personen mehr Zeit zur Lösung der Aufgaben benötigten und weniger perfekt gelöste Aufgaben hatten als jüngere Probanden. Es gab jedoch keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Planungszeit (Groth & Schmidt, 2005).

Die nähere Betrachtung der einzelnen TvH-Aufgaben zeigt, dass ältere Probanden bei 2- bis 5-Zug-Aufgaben viel länger planten als jüngere Probanden. Bei 6- und 7-Zug-Aufgaben gab es dagegen keine Unterschiede zwischen den Altersgruppen. Somit benötigten auch jüngere Probanden bei diffizileren Aufgaben mehr Zeit zum Planen. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit bisherigen Annahmen, dass die Anforderungen an das Arbeitsgedächtnis ab 5-Zug-Aufgaben steigen.

Bei der Durchführung benötigten ältere Probanden bis auf die 2-Zug-Aufgaben für alle Aufgaben mehr Zeit, machten aber nicht mehr Züge als die jüngeren Probanden. Ältere Probanden planten insgesamt länger und ineffektiver, weil die längeren Durchführungszeiten darauf hindeuten, dass hier noch während der Durchführung der Aufgaben weiter geplant und die Zeit nicht für zusätzliche Züge benötigt wurde. Es kann aber auch bedeuten, dass die einzelnen Schritte nicht im Voraus geplant und im Kopf behalten werden konnten und daher während der Durchführung immer wieder Pausen zum Planen der nächsten Schritte benötigt wurden.

Beim TvL benötigten ältere Probanden insgesamt mehr Zeit für die Lösung der Aufgaben, aber es gab keine signifikanten Unterschiede in der Planungs- oder Durchführungszeit. Auch hier hatten ältere Probanden weniger optimal gelöste Aufgaben, machten mehr Züge, aber auch signifikant mehr Fehler als die jüngeren Probanden.

Auch mit dem TvL wurde eine Pilotstudie durchgeführt. Der Vergleich zwischen jüngeren und älteren Probanden ergab, dass ältere Personen mehr Zeit zur Durchführung der Aufgaben benötigen und weniger effizient waren, also mehr Züge machten. Sie benötigten jedoch nicht mehr Zeit zum Planen, wobei hier geschlossen wurde, dass Ältere nur motorisch und nicht kognitiv verlangsamt waren (Faber & Kühnpast, 2006).

Bei näherer Betrachtung der einzelnen Aufgaben zeigt sich, dass ältere Probanden bei 2- und 3-Zug-Aufgaben länger planten als jüngere Probanden. Das könnte damit zusammenhängen, dass sie sich mit der neuen Situation zuerst vertraut machen müssen und daher länger brauchen um den ersten Zug zu machen. Bei 4- bis 7-Zug-Aufgaben gab es keine Unterschiede in der Planungszeit. Das heißt, dass jüngere Probanden genauso lang planten wie die älteren. In der Durchführung hingegen brauchten die Älteren wesentlich länger für 3- bis 7-Zug-Aufgaben, d. h. für fast alle Aufgaben.

Diese Ergebnisse können mit der Hypothese von Miyake und Kollegen (2000) erklärt werden. Diese haben die Exekutivfunktionen in drei Stufen eingeteilt, die bei der Durchführung von komplexen Aufgaben notwendig sind, nämlich „shifting“, „updating“ und „inhibition“. „Shifting“ ist die Fähigkeit, zwischen verschiedenen Aufgaben hin und her zu wechseln oder die Strategie zu ändern, wenn es notwendig ist. „Updating“ ist mit dem Arbeitsgedächtnis verbunden und kontrolliert die Repräsentation von Ideen und wird auch als die Fähigkeit definiert, wichtige Informationen im Arbeitsgedächtnis zu kodieren und zu überwachen (Morris und Jones, 1990). Inhibition ist die Fähigkeit, vorherrschende, automatische Reaktionen zu unterdrücken. Miyake und Kollegen (2000) haben in ihrer Studie gezeigt, dass diese drei exekutiven Funktionen, insbesondere die Inhibition, beim Lösen des TvH erforderlich sind.

Hasher und Zacks (1988, siehe Sorel und Pennequin, 2008) sehen die zentrale Rolle der Inhibition beim kognitiven Altern und vermuten, dass ältere Personen Schwierigkeiten haben, unwichtige Informationen im Arbeitsgedächtnis zu unterdrücken.

Brennan, Welsh und Fisher (1997, siehe Sorel und Pennequin, 2008) haben den TvH mit jungen (M= 19,9 Jahre), älteren (M=65 Jahre) und alten (M=75 Jahre) Erwachsenen durchgeführt. Bei einfachen Aufgaben mit 3 Scheiben hatten jüngere Erwachsene im Vergleich zu den älteren ähnliche Ergebnisse. Wenn die Aufgabenschwierigkeit jedoch mit vier Scheiben und mehr Zügen zunahm, zeigten die Jüngeren bessere Resultate als die Älteren. Die Autoren haben zwei Erklärungen für diese Ergebnisse. Zum Einen nehmen die exekutiven Fähigkeiten mit dem Alter ab und zum Anderen erfordern Aufgaben mit zunehmender Schwierigkeit und Komplexität vermehrt den Einsatz exekutiver Funktionen, insbesondere der Verarbeitungsgeschwindigkeit.

In einer aktuellen Studie wurde die Rolle der Verarbeitungsgeschwindigkeit und des Alters beim Planen mit dem TvH untersucht (Sorel und Pennequin, 2008). Auch hier konnte gezeigt werden, dass die Leistungen der Exekutivfunktionen mit dem Alter abnehmen und

somit eine wichtige Rolle beim Altern spielen. Ältere Probanden benötigten auch hier mehr Zeit und Züge zur Lösung von TvH-Aufgaben.

Die kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit spielt auch in der vorliegenden Arbeit eine wesentliche Rolle beim Planen und Problemlösen. Die hier präsentierten Ergebnisse deuten darauf hin, dass mit zunehmender Aufgabenschwierigkeit mehr Zeit für die kognitive Verarbeitung benötigt wird. Dieser Umstand könnte als Erklärung für die schlechtere Leistung der Älteren dienen.

4.2. Analyse der Lösungswege der gesunden Kontrollpersonen

4.2.1. Analyse der „Hanoi-Graphen“

Die Analyse der einzelnen Aufgaben mit Hilfe der Graphen ergab, dass die meisten Probanden beim Lösen des TvH perzeptuelle Strategien („perceptual strategy“), insbesondere die „verfeinerte perzeptuelle Strategie“ (VPS) („sophisticated perceptual strategy“; Simon, 1975) eingesetzt haben.

Beim TvH gibt es demnach bei den Aufgaben Nr. 13, 17 und Nr. 18 jeweils zwei kürzeste Lösungswege, die auf dem Graphen spiegelbildlich zueinander stehen. Nur wenn die größte Scheibe einmal oder höchstens zweimal bewegt wird, kann die Aufgabe mit der Mindestzugzahl gelöst werden. Die meisten Probanden (bei jeder Aufgabe über 50 %) haben bei diesen Aufgaben die VPS eingesetzt und den Lösungsweg gewählt, bei dem die größte Scheibe nur einmal bewegt wurde.

Bei den Aufgaben Nr. 15 und Nr. 19 gibt es jeweils nur einen kürzesten Lösungsweg und einen Lösungsweg mit einem zusätzlichen Zug. Bei der Aufgabe Nr. 15 haben etwa 35 % den kürzesten Weg gewählt und mussten dafür die größte Scheibe zweimal bewegen. Fast 38 % haben dagegen die VPS angewendet und die größte Scheibe nur einmal bewegt. Allerdings benötigten sie für diesen Lösungsweg einen zusätzlichen Zug zur Mindestzugzahl. Die Aufgabe Nr. 19 kann dagegen nur dann mit der Mindestzugzahl gelöst werden, wenn die VPS eingesetzt und die größte Scheibe nur einmal bewegt wird.

Bei der Aufgabe Nr. 16 ist die optimale Lösung in sechs Zügen nur dann möglich, wenn die größte Scheibe nur einmal bewegt wird. Fast 40 % der Probanden haben hier die VPS eingesetzt und die Aufgabe in der Mindestzugzahl gelöst. Etwa 14 % haben hier die größte Scheibe zweimal bewegt. Allerdings waren dann zwei zusätzliche Züge zur Lösung der Aufgabe erforderlich.

Bei der Anwendung der „verfeinerten perzeptuellen Strategie“ (VPS) wird eine Mittel-Ziel-Analyse durchgeführt und die jeweilige Aufgabe in einzelne Aufgabeneinheiten unterteilt. Das Ziel ist es bei dieser Strategie, die größte Scheibe freizulegen um sie mit nur einem Zug direkt an ihr Ziel zu bringen. Somit hängen die einzelnen Schritte zunächst von der Erreichung des Zwischenziels ab. Dazu müssen unter Umständen mehr Züge als die erforderlichen Mindestzüge gemacht werden. In der hier präsentierten Studie wurde die VPS offensichtlich von den meisten Probanden eingesetzt. Demnach spielt bei der Lösung von TvH-Aufgaben die größte Scheibe die wichtigste Rolle.

4.2.2. Analyse der „London-Graphen“

Bei der Analyse des TvL ist es im Vergleich mit dem TvH schwieriger, eine bestimmte Strategie zu erkennen. Beim TvH kann man anhand der Scheibengröße schon bestimmte Muster bei der Lösung der Aufgaben erkennen. Beim TvL können die Kugeln dagegen beliebig aufeinander gelegt werden. Hier wurde vermutlich die sogenannte „obstacle-removal subgoal“-Strategie angewendet (Berg et al., 2005). Bei dieser Methode werden Zwischenziele gebildet, um bestimmte Kugeln vorübergehend aus dem Weg zu räumen und damit andere Kugeln an ihr Ziel zu bringen. Diese Strategie ist sehr komplex, erfordert vorausschauendes Denken und kann ab 4-Zug-Aufgaben eingesetzt werden. Bei dieser Strategie darf man sich nicht auf das eigentliche Ziel konzentrieren, sondern muss Kugeln erst einmal vom Ziel wegführen. Diese Strategie gehört auch zur Mittel-Ziel-Analyse. Zuerst wird die Anfangs- und Endkonfiguration registriert und eine Kugel gesucht, die als erstes an das Ziel gebracht werden soll. Dann werden Zwischenziele gebildet und versucht, diese Kugel mit möglichst wenigen Zügen an ihr Ziel zu bringen.

Bei den Aufgaben Nr. 10, 13, 16 und Nr. 18 gibt es nur einen kürzesten Lösungsweg. Hier haben viele Probanden einen Lösungsweg mit einem zusätzlichen Zug gewählt. Bei den Aufgaben Nr. 5, 9, 14, 17 und Nr. 19 gibt es zwei kürzeste Lösungswege, die von den meisten Probanden gewählt wurden. Dabei haben die Probanden versucht, diejenige Kugel, die unten auf die längste Stange oder auf die kürzeste Stange gesteckt werden muss, mit möglichst wenigen Zügen an ihr Ziel zu bringen. Dabei waren mindestens zwei Züge notwendig. Diese Strategie ist mit der VPS beim TvH vergleichbar und wurde in dieser Studie vermutlich von den meisten Probanden eingesetzt. Ob die Probanden diese Strategie

jedoch bewusst oder intuitiv eingesetzt haben, kann im Rahmen dieser Analyse nicht festgestellt werden.

4.3. Aufgabenschwierigkeit

Eine weitere Frage, die in dieser Arbeit beantwortet werden sollte, war es, ob es noch weitere Parameter außer der Mindestzugzahl gibt, die die Schwierigkeit von TvH- und TvL-Aufgaben bestimmen. Hierzu wurden Aufgaben miteinander verglichen, die denselben Lösungsweg und die gleiche Anfangskonfiguration haben und sich nur um einen weiteren Zug und die Endkonfiguration unterscheiden. Beim TvH wurden die Aufgaben Nr. 5 und Nr. 9 miteinander verglichen. Obwohl bei der Aufgabe Nr. 9 ein Zug mehr benötigt wird als bei Aufgabe Nr. 5, planten die Probanden bei Aufgabe Nr. 5 signifikant länger und benötigten für die Durchführung im Schnitt genauso lange wie für die Aufgabe Nr. 9. Aufgabe Nr. 5 hat eine partielle Turm-Zielkonfiguration und konnte von 87 % der Probanden perfekt gelöst werden, 2,6 % konnten sie gar nicht lösen. Dagegen wurde die Aufgabe Nr. 9 von 89,6 % perfekt gelöst, alle konnten diese Aufgabe lösen. Somit scheint die Aufgabe Nr. 5 viel schwieriger zu sein als die Aufgabe Nr. 9, die eine Turm-Zielkonfiguration hat.

Auch der Vergleich der Aufgaben Nr. 12 und Nr. 14 zeigte ähnliche Ergebnisse. Die Probanden planten bei der Aufgabe Nr. 12 länger und benötigten für die Durchführung mehr Zeit als für die Aufgabe Nr. 14, für deren Lösung ein Zug mehr notwendig ist. Im Schnitt benötigten sie für die Lösung genauso viele Züge wie für die Aufgabe Nr. 14.

Aufgabe Nr. 12 hat eine partielle Turm-Zielkonfiguration und konnte von 71,4 % perfekt gelöst werden, 6,5 % konnten diese Aufgabe gar nicht lösen. Dagegen wurde die Aufgabe Nr. 14 von 81,8 % perfekt gelöst und nur 2,6 % konnten sie nicht lösen. Obwohl beide Aufgaben denselben Lösungsweg haben, scheint auch hier die Aufgabe mit der partiellen Turm-Zielkonfiguration schwieriger zu sein, als die Aufgabe mit der Turm-Zielkonfiguration und einem zusätzlichen Zug.

Beim Turm von London wurden die Aufgaben Nr. 12 und Nr. 14 verglichen, die auch dieselbe Startkonfiguration und denselben Lösungsweg haben, außer dass bei der Aufgabe Nr. 14 zur Lösung ein zusätzlicher Zug benötigt wird. Die Aufgabe Nr. 12 hat eine flache

Zielkonfiguration und konnte von 54,5 % der Probanden perfekt und von 6,5 % gar nicht gelöst werden. Aufgabe Nr. 14 ist dagegen eine 6-Zug-Aufgabe und hat eine partielle Turm-Zielkonfiguration, die nur von 40,3 % perfekt und von 14,3 % nicht gelöst werden konnte. Die Probanden benötigten für die Aufgabe Nr. 12 genauso lange wie für die Aufgabe Nr. 14, d. h. es gab keine signifikanten Unterschiede in den Planungs- und Durchführungszeiten, obwohl der Lösungsweg gleich ist. Auch hier scheint bei der Lösung der Aufgabe die Zielkonfiguration einen größeren Schwierigkeitsgrad darzustellen als die Mindestzugzahl.

Eine weitere Erklärung für diese Befunde könnte allerdings auch ein gewisser Lerneffekt sein, wie sie von Berg und Kollegen (2002) und Johns (2005) mit Hilfe sogenannter „isomorpher“ Aufgaben untersucht wurde. Diese Aufgaben haben dieselben Anfangs- und Endkonfiguration und dieselbe Zugzahl, die Farben der Kugeln sind jedoch vertauscht und die Lösungswege in den jeweiligen Graphen sind unterschiedlich (Berg et al., 2002; Johns, 2005).

In einer Pilotstudie wurden die psychometrischen Eigenschaften des TvL untersucht (Faber & Kühnpast, 2006). Die Analyse ergab, dass Probanden für Aufgaben mit mehr Zügen mehr Zeit zur Lösung benötigen und weniger perfekt gelöste Aufgaben hatten. Auch für Aufgaben mit einer flachen Zielkonfiguration wurden mehr Züge und Zeit benötigt. Daraus wurde gefolgert, dass nicht nur die Anzahl der Züge, sondern auch strukturelle Eigenschaften einer Aufgabe die Aufgabenschwierigkeiten deutlich beeinflussen.

In dieser Pilotstudie wurden den Probanden auch isomorphe Aufgaben vorgegeben. Die Leistung der Probanden wurde von Aufgabe zu Aufgabe besser. Diese Leistungsverbesserung zeigte sich jedoch nicht bei aufeinanderfolgenden Aufgaben mit derselben Zugzahl, die keine Iso-Aufgaben waren (Faber & Kühnpast, 2006, Faber et al., 2009). Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass die strukturellen Eigenschaften einer Aufgabe, auch wenn sie dieselbe minimale Zugzahl haben, einen großen Einfluss auf die Aufgabenschwierigkeit und somit an die kognitiven Anforderungen beim Planen und Lösen haben.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie sind im Einklang mit bisherigen Annahmen, dass Aufgaben mit einer flachen Zielkonfiguration schwieriger zu lösen sind als Aufgaben mit einem Turm-Ende oder einem partiellen Turm-Ende (Klahr & Robinson, 1981). Eine

Erklärung ist der Unterschied im Schwierigkeitsgrad zwischen Aufgaben mit einer flachen oder Turm-Zielkonfiguration. Letztere sind einfacher als flache Aufgaben, obwohl sie dieselbe Zugzahl haben. Dass Aufgaben mit einer Turm-Zielkonfiguration leichter sind, kann damit erklärt werden, dass die Durchführung der letzten Züge sehr einfach ist. Wenn die Scheiben/Kugeln schon zu Beginn in der richtigen Reihenfolge angeordnet werden, dann werden sie in den letzten Zügen nur noch auf die richtigen Stangen gesetzt, ohne viel nachzudenken. Beim TvH muss die größte Scheibe zuerst auf die Zielstange gesteckt werden, dann erst die zweitgrößte und dann die kleinste. Die Tatsache, dass Aufgaben mit einer flachen Zielkonfiguration schwieriger zu sein scheinen, kann durch den Umstand erklärt werden, dass man bei Aufgaben mit mehr Zügen die Strategie zwischenzeitlich ändern muss. Bei schwierigeren Aufgaben führen die ersten Züge nicht zum Ziel, erst nach 3 oder 4 Zügen kann die Mittel-Ziel-Analyse zum Ziel führen. Hier wäre eine Strategieänderung notwendig, die die meisten jedoch nicht vornehmen, sondern mit der gewohnten Strategie weitermachen, die sie jedoch nicht mehr effektiv weiterbringt. Bei flachen und partiellen Turm-Zielkonfigurationen sind Zwischenziele nicht immer sofort ersichtlich und erfordern womöglich längere Lösungszeiten. In diesem Fall vergleichen die Probanden die Start- und Zielposition und suchen sich die Scheibe/Kugel aus, die beim ersten Zwischenziel beteiligt sein könnte. Danach versuchen sie, die ausgewählte Scheibe/Kugel mit einem Zug an das Ziel zu bringen und bei Nichtgelingen nach einem neuen Zwischenziel zu suchen (Klahr & Robinson, 1981).

Auch Goel und Grafman (1995) betrachten die Zielkonfiguration (Turm, partieller Turm oder flaches Ziel) und die Art der Züge, die benötigt werden um an das Ziel zu gelangen (zum Ziel hin und vom Ziel weg), als die wichtigsten Faktoren der Aufgabenschwierigkeiten.

Nicht die Planungsphase bzw. die Länge der Planungszeit, sondern vielmehr die Aufgabenschwierigkeit scheint einen Effekt auf den Lösungserfolg zu haben. Die Planungszeiten sind dabei nur bei schwierigen Aufgaben länger, sonst wird eher während der Durchführung der Aufgaben geplant (Phillips et al., 2001; Davies, 2003).

In einer weiteren Studie konnte gezeigt werden, dass die Aufgabenstruktur, also die Anfangs- und Endkonfiguration und die Anzahl optimaler Lösungswege den Lösungserfolg und somit die Aufgabenschwierigkeit bestimmen (Newman & Pittman, 2007).

Auch in der vorliegenden Arbeit scheinen Aufgaben mit einer Turm-Zielkonfiguration leichter zu sein als solche mit einer partiellen Turm-Zielkonfiguration. Im Vergleich zu

Aufgaben mit nur einem kürzesten Lösungsweg konnten Aufgaben mit mehr kürzesten Lösungsmöglichkeiten von den meisten Probanden in der Mindestzugzahl gelöst werden, was darauf hindeutet, dass diese Aufgaben auch leichter zu lösen sind. Bei Aufgaben mit nur einem kürzesten Lösungsweg ist der erste Zug der entscheidende Zug, um die Aufgabe dann mit der Mindestzugzahl lösen zu können. Bei mehr Lösungsmöglichkeiten bestehen mehr Optionen bezüglich des ersten Zuges.

Somit konnte auch hier gezeigt werden, dass die Aufgabenschwierigkeit nicht von der Mindestzugzahl abhängt, sondern vielmehr von der Aufgabenstruktur und der Anzahl optimaler Lösungswege.

4.4. Turm von Hanoi und London im Vergleich

Der Vergleich der Planungs- und Durchführungszeiten der einzelnen Aufgaben zeigt, dass die Probanden bei optimal gelösten Aufgaben beim TvL viel länger planten als beim TvH und weniger Zeit für die Durchführung benötigten. Probanden planten bei 2-Zug-, 5-Zug- und 6-Zug-Aufgaben beim TvL viel länger als beim TvH und benötigten bei der Durchführung bei 4-Zug-, 5-Zug-, 6-Zug- und 7-Zug-Aufgaben mehr Zeit als beim TvH. Beim TvL machten Probanden bis auf die 2-Zug-Aufgaben bei allen Aufgaben mehr Züge als beim TvH.

Der Vergleich der Planungs- und Durchführungszeiten bei perfekt gelösten Aufgaben zeigt beispielsweise bei der Aufgabe Nr. 18, die beim TvH eine flache Anfangs- und Endkonfiguration hat und beim TvL eine flache Anfangskonfiguration und eine partielle Turm-Zielkonfiguration, dass beim TvH länger geplant und durchgeführt wurde als beim TvL. Die TvL-Aufgabe konnte jedoch nur von 33 % der Probanden perfekt gelöst werden, 6,5 % konnten diese Aufgabe gar nicht lösen. Dagegen konnte die TvH-Aufgabe von etwa 70 % perfekt und von 2,6 % nicht gelöst werden. Das bedeutet, dass die TvL-Aufgabe schwieriger zu sein scheint als die TvH-Aufgabe, obwohl beide die gleiche Mindestzugzahl haben. Die TvL-Aufgabe hat nur einen kürzesten Lösungsweg, die TvH-Aufgabe dagegen zwei kürzeste Lösungswege. Auch hier zeigt sich, dass die Aufgabenstruktur die Aufgabenschwierigkeit bestimmt.

Insgesamt wurde bei perfekt gelösten Aufgaben mit zunehmender Zugzahl beim TvL länger geplant als beim TvH, bei den Durchführungszeiten gab es jedoch kaum Unterschiede. Dies könnte auch ein Hinweis darauf sein, dass der TvL die

Planungsfähigkeit misst oder aber auch, dass der TvL schwieriger ist und die Probanden daher länger brauchen um den ersten Zug zu machen.

Bei Aufgaben, die mit mehr Zügen als der Mindestzugzahl gelöst wurden, waren die Planungszeiten deutlich kürzer und die Durchführungszeiten länger. Aber auch hier wurde mit zunehmender Zugzahl beim TvL länger geplant als beim TvH. Bei näherer Betrachtung der Aufgaben nach Zugzahlen, planten Probanden bei 5- und 6-Zug-Aufgaben beim TvL signifikant länger als beim TvH. Bei der Durchführung benötigten sie bei 4-, 5- und 6-Zug-Aufgaben auch signifikant mehr Zeit als beim TvH. Insgesamt wurden beim TvL im Vergleich zum TvH bei 3- bis 7-Zug-Aufgaben signifikant mehr Züge als die Mindestzugzahl gemacht. Dies könnte auch die längeren Durchführungszeiten erklären, aber auch bedeuten, dass hier während der Durchführung noch weiter geplant wurde.

Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass beim TvL mehr Zeit für die Planung benötigt wird und somit vermehrt Anforderungen an die Planungsfähigkeit gestellt werden.

Wenn man nun den prozentualen Anteil an perfekt gelösten, mit zusätzlichen Zügen gelösten und nicht gelösten Aufgaben anschaut, dann fällt auf, dass die Aufgabe Nr. 15 beim TvH von 27 % der Probanden perfekt gelöst und von 6,5 % gar nicht gelöst werden konnte, wohingegen die Aufgabe Nr. 15 beim TvL von etwa 21 % perfekt gelöst und von fast 17 % gar nicht gelöst werden konnte. Bei näherer Betrachtung der beiden Aufgaben sieht man, dass diese Aufgabe bei beiden Tests nur einen kürzesten Lösungsweg, und sowohl beim TvH als auch beim TvL, eine flache Endkonfiguration hat. Das gleiche kann bei der Aufgabe Nr. 16 beobachtet werden. Diese Aufgabe hat beim TvH und TvL eine flache Startkonfiguration und eine partielle Turm-Zielkonfiguration sowie nur einen kürzesten Lösungsweg. Die TvH-Aufgabe konnten etwa 32,5 % der Probanden perfekt lösen und 9 % nicht lösen, die TvL-Aufgaben konnten knapp 25 % perfekt lösen und auch 9 % nicht lösen. Diese Aufgabe scheint insgesamt eine schwere Aufgabe zu sein und obwohl beide Aufgaben die gleiche Struktur haben, scheint die TvL-Aufgabe schwieriger zu sein.

Die Probanden benötigen für den TvL insgesamt mehr Zeit als für den TvH und hatten insgesamt auch weniger optimal gelöste Aufgaben, was darauf hindeutet, dass der Turm von London insgesamt schwieriger zu sein scheint als der Turm von Hanoi.

4.5. Korrelationen mit anderen Tests

4.5.1. Turm von Hanoi

Die Korrelationsanalysen zeigen, dass es Zusammenhänge zwischen einzelnen Parametern des TvH und des TvL mit anderen Tests zur Messung der Exekutivfunktionen gibt.

Bei näherer Betrachtung der einzelnen Parameter gab es einen geringen Zusammenhang zwischen dem verbalen und visuellen Kurzzeit- und Arbeitsgedächtnis (Zahlenspannen vorwärts und rückwärts) und der Gesamtlösungszeit, der Gesamtplanungs- und Gesamtdurchführungszeit sowie der Gesamtzüge und Anzahl optimal gelöster Aufgaben. Auch mit der Wortflüssigkeit und der fluiden Intelligenz (MWT-B) gibt es nur einen geringen Zusammenhang. Dagegen gibt es einen mittleren Zusammenhang zwischen der Zeichenflüssigkeit (5-Punkte-Test) und der Gesamtlösungszeit, der Gesamtdurchführungszeit und den Gesamtfehlern. Mit der Anzahl optimal gelöster Aufgaben gibt es nur einen geringen Zusammenhang. Ferner gibt es einen mittleren Zusammenhang zwischen dem Matrizen- und der Gesamtlösungszeit, der Gesamtdurchführungszeit und der Gesamtfehler. Auch zwischen der kognitiven Flexibilität (TMT B) gibt es mit denselben Parametern mittlere Zusammenhänge.

Die Fähigkeit, unerwünschte oder unangebrachte Reaktionen unterdrücken zu können (Inhibition), wird beim TvH und TvL durch die Vorgabe von Regeln untersucht. Diese Fähigkeit der Fehlerkontrolle spielt beim gezielten Durchführen der Züge eine wichtige Rolle. Die Fehlerkontrolle, also das Beachten der vorgegebenen Regeln, kann teilweise anhand der durchgeführten Züge, aber auch der benötigten Zeit in der Durchführungsphase untersucht werden. Daher könnte der Zusammenhang mit dem Matrizen- und dem TMT B und dem 5-Punkte-Test bedeuten, dass das abstrakte Denkvermögen und die kognitive Flexibilität bei der Fehlerkontrolle und beim gezielten Durchführen der Züge eine wichtige Rolle spielen. Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit den bisherigen Befunden von Goel und Grafman (1995). Sie vermuten, dass der TvH die Inhibitionsfähigkeit misst. Sie führen weiter aus, dass nicht die Unfähigkeit zu planen, sondern das fehlende vorausschauende Denkvermögen und die Unfähigkeit Teilziele bilden zu können beim Lösen des TvH im Vordergrund stehen. Diese Eigenschaften erfordern eine gewisse kognitive Flexibilität und auch Abstraktionsvermögen.

4.5.2. Turm von London

Beim TvL gibt es lediglich geringe Korrelationen zwischen den einzelnen Parametern und den weiteren Tests. Einen mittleren Zusammenhang gibt es nur zwischen der Gesamtlösungszeit und der Gesamtdurchführungszeit und dem TMT B, dem Matrizen-Test und dem 5-Punkte-Test. Zwischen der Gesamtdurchführungszeit und dem TMT A gibt es noch zusätzlich einen mittleren Zusammenhang. Die übrigen Parameter weisen nur geringe oder gar keine Zusammenhänge auf.

Zook, Welsh und Ewing (2006) haben den Zusammenhang zwischen dem Turm von London und der nonverbalen Intelligenz bei Erwachsenen mit dem Matrizen-Test aus dem Wechsler Intelligenztest für Erwachsene untersucht. Die Leistung beim TvL konnte hier durch den Matrizen-Test, aber nicht durch das Alter vorausgesagt werden. Da das Frontalhirn als erste Region vom alterungsbedingten Abbau betroffen ist, nehmen die Leistungen der Exekutivfunktionen, insbesondere die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses und Inhibitionsprozesse, im Alter ab (z. B. West, 1996). Somit könnte der TvL ein potentiell geeigneter Test sein, Alterungsprozesse zu untersuchen. Dagegen gab es bisher keinen Zusammenhang zwischen Ergebnissen von Turmaufgaben und verbaler Intelligenz (Krikorian et al., 1994; Cockburn, 1995). Auch in der vorliegenden Studie gab es nur eine geringe Korrelation zwischen der verbalen Intelligenz (MWT-B) und TvL/TvH-Parametern.

Der TvL und der Matrizen-Test erfordern beide das Arbeitsgedächtnis, Inhibitionsprozesse, induktives Denken und strategisches Planen (z. B. Duncan et al., 1995).

In dieser Arbeit gab es nur eine geringe Korrelation zwischen der verbalen Intelligenz und TvH-Parametern. Die Durchführungszeit, Gesamtzüge, Gesamtfehler und die Anzahl optimal gelöster Aufgaben korrelierten nur gering mit dem MWT-B. Dagegen gab es beim TvL nur eine geringe Korrelation mit den Gesamtzügen und der Anzahl optimal gelöster Aufgaben. Hier könnten die längeren Durchführungszeiten mit den Fehlern und zusätzlich gemachten Zügen in Zusammenhang stehen und mit Inhibitionsprozessen erklärt werden. Auch Welsh und Kollegen (1999, 2000) haben in ihren Arbeiten eine Korrelation zwischen dem TvH und Inhibitionsprozessen vermutet. Dagegen gibt es beim TvL eher Hinweise darauf, dass hier die fluide Intelligenz eine größere Rolle spielt und Planen gemessen wird.

Numminen und Kollegen (2001) haben den Zusammenhang mit dem TvH und dem Arbeitsgedächtnis bei Erwachsenen mit einer geistigen Behinderung untersucht. Hier gab es einen signifikanten Zusammenhang zwischen der fluiden Intelligenz (Matrizentest) und dem visuellen Arbeitsgedächtnis (Blockspanne). Dagegen gab es keinen Zusammenhang mit dem verbalen Arbeitsgedächtnis (Zahlenspannen). Es gab auch einen Zusammenhang mit der Antwortunterdrückung (Regelbrüche, Fehler) und der Leistung beim Lösen der TvH-Aufgabe. Somit konnten sie zeigen, dass kristalline und fluide Intelligenz voneinander unabhängig sind. In einer anderen Studie (Duncan et al., 1996) gab es einen engen Zusammenhang zwischen der fluiden Intelligenz und Exekutivfunktionen. Insgesamt, so Numminen und Kollegen (2001), scheinen die fluide Intelligenz, die Inhibitionsfähigkeit und die kontrollierte Aufmerksamkeit beim Lösen des TvH notwendige Funktionen zu sein.

4.6. Einzelfallanalyse der Patientendaten

Die Analyse der einzelnen Aufgaben ergab, dass die meisten Patienten mit einer links temporalen Läsion längere Lösungszeiten hatten. Patient SR mit einer rechts frontalen Läsion benötigte insgesamt viele Züge und machte viele Fehler. Patient VJ mit einer links frontalen Läsion hatte lange Lösungszeiten und wenig optimal gelöste Aufgaben. Diese Ergebnisse legen die Vermutung nahe, dass linkshemisphärische Läsionen zu längeren Lösungszeiten führen.

Beim TvL gab es dagegen nur einen Patienten, der in mehr als zwei Parametern schlechtere Leistungen zeigte als die anderen Patienten. Er benötigte viel Zeit und machte mehr Züge und Fehler. Die anderen Patienten hatten insgesamt längere Lösungszeiten.

Die Inspektion der Graphen ergab, dass Patienten Züge machen, bevor sie überlegen. Bei schlecht gelösten Aufgaben steckten sie beispielsweise zuerst die oberste Scheibe entweder auf die nächste freie Stange oder direkt auf die Zielstange um, obwohl sie dieser erste Zug nicht mit der kürzesten Zugzahl zum Ziel bringen würde. Ob jedoch diese Defizite auf Störungen der Planungsfähigkeit oder auf Regelverstöße zurückgeführt werden können, ist nicht ganz klar. Die schlechteren Leistungen könnten an einer allgemeinen kognitiven Verlangsamung liegen und nicht unbedingt an einer Störung der Problemlösefähigkeit. Es könnte aber auch daran liegen, dass sie keine Strategien einsetzen können.

Goel und Grafman (1995) behaupten, dass Defizite bei Patienten mit linksfrontalen Läsionen nicht auf ein Planungsproblem, sondern auf eine Unfähigkeit beim Umgang bei der Bildung von Zielen und Zwischenzielen in neuen Situationen zurückzuführen sind.

Owen und Kollegen (1990) fanden heraus, dass Patienten mit uni- und bilateralen frontalen Läsionen mehr Zeit zum Planen und Durchführen und mehr Züge benötigen. Mit zunehmender Aufgabenschwierigkeit hatten die Patienten längere Planungszeiten und es zeigte sich eine Aktivierung im linken präfrontalen Lappen.

Auch in der vorliegenden Studie planten die Patienten kürzer als die Kontrollpersonen und benötigten dafür mehr Züge und mehr Zeit zur Durchführung der Aufgaben. Dies ist womöglich ein Hinweis auf impulsives Verhalten. Auch bei der Analyse der einzelnen Aufgaben kann man sehen, dass die ersten Züge unüberlegt sind. Patienten mit einer linksseitigen Läsion (KG, KH, RA und VJ) benötigten sehr viel Zeit, machten viele Züge und hatten wenig optimal gelöste Aufgaben. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Fähigkeit zu Planen links lateralisiert ist, wie auch schon die Daten in der Studie von Shallice (1982) vermuten ließen. In seiner Studie hatten Patienten mit links anterioren Läsionen beim Lösen des TvL Probleme beim Planen, jedoch nicht Patienten mit einer links posterioren oder rechts anterioren und posterioren Schädigung.

Morris und Kollegen (1997) erklären die Lateralität damit, dass Denken mit Planen zusammenhängt und durch die sog. internalisierte Sprache kontrolliert wird. Nachdem Sprache links lateralisiert ist, vermuten sie, dass auch das Planen links lateralisiert sein müsste (Morris et al., 1997). Patienten mit linkshemisphärischen Läsionen scheinen bei der Lösung von „Turmproblemen“ stärker beeinträchtigt zu sein als Patienten mit rechtshemisphärischen Läsionen. Diese Patienten hatten in der Studie von Morris und Kollegen (1997) hauptsächlich Schwierigkeiten bei Aufgaben, bei denen die Bildung von Zwischenzielen notwendig ist. Das linke Frontalhirn scheint demnach nach Morris für höhere Exekutivfunktionen zuständig zu sein. Ob jedoch die Lateralität oder die Läsionsgröße für diese Ergebnisse verantwortlich sind, ist nicht geklärt, da die Patientengruppe zu klein und zu heterogen war (Morris et al., 1997; Morris, 1993). Die schlechteren Leistungen der Patienten könnten auch dadurch erklärt werden, dass sie generell verlangsamt sind oder aber auch die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses reduziert ist und sie deswegen Regelbrüche begehen. Auch in der vorliegenden Arbeit waren die Patientengruppen zu klein und zu heterogen, um genauere Aussagen machen zu können.

4.7. Ausblick

Die Fragestellungen, die in der vorliegenden Arbeit bearbeitet wurden, waren, ob es Alterseffekte in Bezug auf das Problemlöse- und Planungsverhalten gibt, ob bei der Lösung von Turmaufgaben bestimmte Strategien eingesetzt werden und welche Parameter die Aufgabenschwierigkeit auszeichnen. Da es in der Literatur bisher sehr inkonsistente Befunde hinsichtlich der Unterschiede zwischen dem Turm von Hanoi und London gab, sollten sie miteinander verglichen und der Zusammenhang mit anderen Tests zur Untersuchung von Exekutivfunktionen untersucht werden. Weiterhin sollte eine Läsionsanalyse die Frage beantworten, ob beim Problemlösen und Planen dieselben neuroanatomischen Strukturen beteiligt sind.

Es konnte gezeigt werden, dass die Leistung exekutiver Funktionen, wie z. B. die kognitive Flexibilität und das abstrakte Denkvermögen, mit dem Alter abnimmt. Diese Abnahme der kognitiven Funktionen, insbesondere der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit, beeinflusst vermutlich die Problemlöseleistung.

Gesunde Probanden scheinen beim Lösen beider Aufgaben Strategien einzusetzen, die zur Mittel-Ziel-Analyse gehören. Die Analyse der einzelnen Aufgaben mit Hilfe der Graphen ergab, dass die Schwierigkeit einer Aufgabe nicht nur durch die Anzahl der Züge bestimmt wird, sondern vielmehr von den strukturellen Eigenschaften der Aufgabe abhängt. Aufgaben mit einer flachen Zielkonfiguration scheinen demnach schwieriger zu sein als Aufgaben mit einer partiellen und einer Turm-Zielkonfiguration. Die Anzahl der kürzesten Lösungswege, aber auch die Anzahl der möglichen Wege beim ersten Zug, scheinen den Schwierigkeitsgrad und den Lösungserfolg einer Aufgabe zu beeinflussen.

Der Vergleich beider Turmaufgaben deutet darauf hin, dass der TvL schwieriger zu lösen ist als der TvH. Beim TvH gibt es dagegen größere Unterschiede zwischen älteren und jüngeren Probanden sowie zwischen gesunden Kontrollen und Patienten hinsichtlich der Lösungszeiten, aber auch der Züge und Fehler. Es zeigte sich eine Tendenz dahingehend, dass Patienten mit einer linkshemisphärischen Läsion eher langsam sind und Patienten mit einer rechtshemisphärischen Läsion eher Schwierigkeiten beim Einhalten von Regeln und der Bildung von Zwischenzielen haben, da sie mehr Züge und Fehler machen. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass der TvH für eine Abnahme kognitiver Fähigkeiten sensitiver ist als der TvL.

Auch die Korrelationsanalyse ergab, dass hauptsächlich die kognitive Flexibilität und abstraktes Denkvermögen beim Lösen des TvH und TvL beteiligt sind.

Zusammenfassend konnte in dieser Studie gezeigt werden, dass die strukturellen Eigenschaften einer Aufgabe das Problemlöseverhalten von gesunden Kontrollpersonen und Patienten beeinflussen. Beide Turm-Aufgaben, insbesondere der Turm von Hanoi, sind für Alterseffekte und Hirnläsionen sensitiv und stellen unterschiedliche Anforderungen an kognitive Funktionen. Da jedoch immer noch unklar ist, welche Exekutivfunktionen genau gemessen werden, sollten diese Tests nicht als „Frontalhirntests“ oder „Planungsaufgaben“ bezeichnet und gleichwertig eingesetzt werden.

Im Hinblick auf die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit können auch die unterschiedlichen Ergebnisse und Korrelationen anderer Studien erklärt werden. Sie sollten allerdings auch kritisch betrachtet werden, da die Struktur der einzelnen Aufgaben möglicherweise eine größere Rolle spielt als bisher angenommen. Auch die Originalaufgaben von Shallice und andere Normierungsarbeiten bedürfen vor diesem Hintergrund einer kritischen Betrachtung, da die genauen Vorgänge beim Lösen der Turm-Aufgaben nur unzureichend bekannt sind.

Auf Basis dieser Befunde können der Turm von Hanoi und der Turm von London im Rahmen zukünftiger Forschungsarbeiten, aber auch in der neuropsychologischen Diagnostik gezielter eingesetzt bzw. interpretiert werden.

5. Zusammenfassung

Der Turm von Hanoi (TvH) und der Turm von London (TvL) sind Transformationsaufgaben zur Untersuchung des Problemlöse- und Planungsverhaltens, die in der neuropsychologischen Diagnostik und in den Neurowissenschaften eingesetzt werden. Die Durchsicht der Literatur zeigt allerdings, dass es bis jetzt für beide Turmaufgaben weder eine einheitliche Struktur, noch ein standardisiertes Auswertungssystem in Klinik und Forschung gibt. Daher existiert eine große Bandbreite bezüglich Aufgabenauswahl, unterschiedlichen Variablen und Testdurchführung (Instruktion, Holz- oder Computerversion). Dies könnte an der fehlenden Information über die Strukturen des TvL und TvH und an den zu messenden kognitiven Funktionen liegen. Diese Uneinheitlichkeit macht es schwer bis unmöglich, einzelne Studien und Ergebnisse miteinander zu vergleichen und Schlussfolgerungen zu ziehen.

In dieser Arbeit sollen die kognitiven Anforderungen an den TvL und den TvH untersucht werden. Wir haben in der Arbeitsgruppe Kognitive Neurologie der Neurologischen Universitätsklinik München zusammen mit dem Mathematischen Institut der LMU München eine Computerversion beider Aufgaben auf dem Tablet-PC entwickelt, mit denen es möglich ist, jeden einzelnen Schritt mit dem „Hanoi“-Graphen und dem „London“-Graphen zu dokumentieren. Zusätzlich werden die benötigte Zeit, die gemachten Züge, die Anzahl der Fehler, die genauen Positionen der Fehler und die gegangenen Pfade aufgezeichnet.

Ziel dieser Arbeit war es, mögliche Alterseffekte in Bezug auf das Problemlöseverhalten sowie Parameter zu bestimmen, die die Aufgabenschwierigkeit ausmachen. Mit Hilfe der Graphen wurde der Einsatz von Strategien untersucht. Ferner sollten Zusammenhänge mit anderen Tests zur Untersuchung der Exekutivfunktionen sowie zwischen dem TvH und dem TvL untersucht werden. Zur genaueren Bestimmung beteiligter neuroanatomischer Strukturen wurde das Problemlöseverhalten von Patienten mit umschriebenen Hirnläsionen analysiert.

Dazu wurden 70 gesunde Probanden im Alter von 20-70 Jahren und 22 Patienten mit umschriebenen Hirnläsionen untersucht. Die Probanden und Patienten führten jeweils 20 TvH- und TvL-Aufgaben durch. Die ersten 12 TvL-Aufgaben waren die Originalaufgaben aus der Studie von Shallice (1982) mit 2 bis 5 Zügen und wurden um je 4 Aufgaben mit 6 und 7 Zügen erweitert. Die TvH-Aufgaben waren in den Start- und Zielpositionen sowie in

der Anzahl der Züge ähnlich. Als Kontrollvariablen wurden das verbale und visuelle Kurzzeit- und Arbeitsgedächtnis (Zahlen- und Blockspannen), die Wort- und Zeichenflüssigkeit, die kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit und Flexibilität (Trail Making Test A und B) sowie das Intelligenzniveau (MWT-B, Matrizen test aus dem WIE) untersucht.

Die Ergebnisse zeigten, dass es Alterseffekte in Bezug auf das Problemlöseverhalten gibt. Ältere gesunde Probanden waren insgesamt langsamer und hatten weniger optimal gelöste Aufgaben.

Die Analyse der Graphen ergab, dass die meisten Probanden beim Lösen von TvH- und TvL-Aufgaben bestimmte Strategien einsetzen. Beim TvH wurde die verfeinerte perzeptuelle Strategie (VPS) und beim TvL vermutlich die „obstacle-removal subgoal“ Strategie eingesetzt.

Parameter, die die Aufgabenschwierigkeit ausmachen, sind neben der Zugzahl hauptsächlich die Anfangs- und Endkonfigurationen sowie die Anzahl der kürzesten Lösungswege. Dabei sind Aufgaben mit einer flachen Zielkonfiguration schwieriger zu lösen als Aufgaben mit einer partiellen Turm-Zielkonfiguration sowie Turm-Zielkonfiguration. Letztere erscheinen am leichtesten. Der Vergleich des TvH mit dem TvL ergab, dass gesunde Probanden zur Lösung des TvL zwar mehr Zeit benötigten, aber der Unterschied zwischen jüngeren und älteren gesunden Probanden sowie zwischen Gesunden und Patienten beim TvH größer war als beim TvL. Ältere und Patienten brauchten für den TvH mehr Zeit und Züge.

Korrelationsanalysen ergaben, dass beim Lösen des TvH und TvL abstraktes Denkvermögen (Matrizen test) sowie kognitive Flexibilität (Zeichenflüssigkeit, TMT B) beteiligt sind.

Die Läsionsanalysen weisen darauf hin, dass linkshemisphärische Läsionen zur Verlangsamung und rechtshemisphärische eher zu Schwierigkeiten beim Einhalten von Regeln führen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Turm von Hanoi und London auf dem Tablet PC eine bessere Alternative zu bisherigen Versionen ist sowie eine gezieltere Auswahl der Aufgaben, aber auch eine differenziertere Analyse des Problemlöseverhaltens von gesunden Kontrollpersonen und Patienten mit umschriebenen Läsionen ermöglicht.

6. Literatur

Ahonniska, J., Ahonen, T., Aro, T., Tolvanen, A. & Lyytinen, H. (2000). Repeated Assessment of the Tower of Hanoi Test: Reliability and Age Effects. *Assessment*, 7, 297-310.

Ahonniska, J., Ahonen, T., Aro, T., & Lyytinen, H. (2000). Suggestions for Revised Scoring of the Tower of Hanoi Test. *Assessment*, 7, 311-320.

Anzai, Y., & Simon, H. A. (1979). The Theory of Learning by Doing. *Psychological Review*, 86, 124-140.

Aschenbrenner, S., Tucha, O., & Lange, K. (2000). *Regensburger Wortflüssigkeitstest (RWT)*. Göttingen: Hogrefe Verlag.

Berg, W. K. & Byrd, D. (2002). The Tower of London Spatial Problem-solving Task: Enhancing Clinical and Research Implementation. *The Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 24, 586-604.

Berg, W. K., Byrd, D. L., McNamara, J. P. H., & MacDonald, C. A. (2005). New Indices of Planning Abilities Using the Tower of London Task. In: Poreh, Amir M. (Ed.), *The Quantified Process Approach to Neuropsychological Assessment* (225-248). New York: Taylor & Francis.

Bishop, D. V. M., Aamodt-Leeper, G., Creshwell, C., McGurk, R. & Skuse, D. H. (2001). Individual Differences in Cognitive Planning on the Tower of Hanoi Task: Neuropsychological Maturity or Measurement Error? *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 42, 551-556.

Bugg, J. M., Zook, N. A., DeLosh, E. L., Davalos, D. B. & Davis, H. P. (2006). Age Differences in Fluid Intelligence: Contributions of General Slowing and Frontal Decline. *Brain and Cognition*, 62, 9-16.

Bull, R., Espy, K. A., & Senn, T. E. (2004). A Comparison of Performance on the Towers of London and Hanoi in Young Children. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 45, 743-754.

Carlin, D., Bonerba, J., Phipps, M., Alexander, G., Shapiro, M., & Grafman, J. (2000). Planning Impairments in Frontal Lobe Dementia and Frontal Lobe Lesion Patients. *Neuropsychologia*, 38, 655-665.

Cockburn, J. (1995). Performance on the Tower of London Test After Severe Head Injury. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 1, 537-544.

Cramon, D. Y. von & Matthes-von Cramon, G. (1995). Problemlösendes Denken. In: Cramon, D. Y. von, Mai, N. & Ziegler, W. (Hrsg.). *Neuropsychologische Diagnostik* (123-152), 2. Auflage. Weinheim: Chapman & Hall.

- Culbertson, W. C. & Zillmer, E. A. (1998). The Tower of London^{DX}: A Standardized Approach to Assessing Executive Functioning in Children. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 13, 285-301.
- Dagher, A., Owen, A. M., Boecker, H. & Brooks, D. J. (1999). Mapping the network for planning: a correlational PET activation study with the Tower of London task. *Brain*, 122, 1973-1987.
- Danek, A. & Göhringer, T. (2005). Kognitive Neurologie und Neuropsychologie. In: Förstl, H. (Hrsg.), *Frontalhirn. Funktionen und Erkrankungen* (41-82), 2. Auflage. Berlin: Springer Verlag.
- Davis, S. P. (2000). Memory and Planning Processes in Solutions to Well-Structured Problems. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 53A, 896-927.
- Davis, S. P. (2003). Initial and Concurrent Planning in Solutions to Well-Structured Problems. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 53A, 1147-1164.
- Dießl, M. (2007). *Die Türme von Hanoi und London als Test am Gymnasium*. Unveröffentlichte Hausarbeit, Mathematisches Institut, LMU München.
- Duncan, J., Burgess, P. W., & Emslie, H. (1995). Fluid Intelligence After Frontal Lobe Lesion. *Neuropsychologia*, 33, 261-268.
- Duncan, J., Emslie, H., Williams, P., Johnson, R., & Freer, C. (1996). Intelligence and the Frontal Lobe: The Organization of Goal-directed Behavior. *Cognitive Psychology*, 30, 257-303.
- Faber, A., & Kühnpast, N. (2006). *Solving the Tower of London Puzzle on a Tablet PC: An Explorative Behavioural Analysis of Healthy Control Subjects*. Unveröffentlichte Semesterarbeit, Neuro-Cognitive Psychology, Departement Psychologie, LMU München.
- Faber, A., Kühnpast, N., Sürer, F., Hinz, A. M. & Danek, A. (2009). Is There Specific Learning of Tower of London Iso-Problems? *Thinking and Reasoning*, 15, 237-249.
- Goel, V., & Grafman, J. (1995). Are the Frontal Lobes Implicated in Planning Functions? Interpreting Data from the Tower of Hanoi. *Neuropsychologia*, 33, 623-642.
- Groth, K., & Schmidt, H. (2005). *A Comparison of Performance of Neurological Patients and Control Subjects on a Computerised Version of the Tower of Hanoi*. Unveröffentlichte Semesterarbeit, Neuro-Cognitive Psychology, Departement Psychologie, LMU München.
- Hinz, A. M., Klavzar, S., Milutinovic, U., Parisse, D. & Petr, C. (2005). Metric Properties of the Tower of Hanoi Graphs and Stern's Diatomic Sequence. *European Journal of Combinatorics*, 26, 693-708.
- Hinz, A. M., Kostov, A., Kneißl, F., Sürer, F., & Danek, A. (2009). A Mathematical Model and Computer Tool for the Tower of Hanoi and Tower of London Puzzles. *Information Sciences*, 179, 2934-2947 .

- Humes, G.E., Welsh, M.C., Retzlaff, P. & Cookson, N. (1997). Towers of Hanoi and London: Reliability and Validity of two Executive Function Tasks. *Assessment*, 4, 249-257.
- Johns, N. B. (2005). *The Role of Tower of London Iso-Problems on the Problem Solving Abilities of Adults*. Unveröffentlichte Honor's Thesis, Psychology, University of Florida.
- Kafer, K. L. & Hunter, M. (1997). On Testing the Face Validity of Planning/Problem-Solving Tasks in a Normal Population. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*, 3, 108-119.
- Kaller, C. P., Unterrainer, J. M., Rahm, B. & Halsband, U. (2004). The Impact of Problem Structure on Planning: Insights From the Tower of London Task. *Cognitive Brain Research*, 20, 462-472.
- Karnath, H.-O. & Thier, P. (2006). *Neuropsychologie*, 2. Auflage. Berlin: Springer Verlag.
- Klahr, D., & Robinson, M. (1981). Formal Assessment of Problem-Solving and Planning Processes in Preschool Children. *Cognitive Psychology*, 13, 113-148.
- Kotovsky, K., Hayes, J. R., & Simon, H. A. (1985). Why are Some Problems Hard? Evidence from Tower of Hanoi. *Cognitive Psychology*, 17, 248-294.
- Krikorian, R., Bartok, J. & Gay, N. (1994). Tower of London Procedure: A Standard Method and Developmental Data. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 16, 840-850.
- Lehrl, S. (1999). *Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenztest (MWT-B)*, 4. Auflg.). Erlangen: Straube.
- Leòn-Carriòn, J., Morales, M. Forastero, P., Del Rosario Mominguez-Morales, M., Murillo, F. Jimenez-Baco, R. & Gordon, P. (1991). The Computerized Tower of Hanoi: A new Form of Administration and Suggestions for Interpretation. *Perceptual and Motor Skills*, 73, 63-66.
- Levin, H. S., Fletcher, J. M., Kufera, J. A., Harward, H., Lilly, M. A., Mendelsohn, D., Bruce, D., & Eisenberg, H. M. (1996). Dimensions of Cognition Measured by the Tower of London and Other Cognitive Tasks in Head-Injured Children and Adolescents. *Developmental Neuropsychology*, 12, 17-34.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The Unity and Diversity of Executive Functions and their Contributions to Complex Frontal Lobe Tasks: A Latent Variable Analysis. *Cognitive Psychology*, 41, 49-100.
- Morris, R. G., Miotto, E. C., Feigenbaum, J. D., Bullock, P., & Polkey, C. E. (1997). The Effect of Goal-Subgoal Conflict on Planning Ability After Frontal- and Temporal-Lobe Lesions in Humans. *Neuropsychologia*, 35, 1147-1157.

- Morris, R. G., Ahmed, S., Syed, G. M. & Toone, B. K. (1993). Neural Correlates of Planning Ability: Frontal Lobe Activation During the Tower of London Test. *Neuropsychologia*, 31, 1367-1378.
- Morris, N. & Jones, D. M. (1990). Memory Updating in Working Memory: The Role of the Central Executive. *British Journal of Psychology*, 81, 111-121.
- Murji, Sh. & DeLuca, J. W. (1998). Preliminary Validity of the Cognitive Function Checklist: Prediction of Tower of London Performance. *The Clinical Neuropsychologist*, 12, 358-364.
- Newell, A. S. & Simon, H.A. (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall Inc.
- Newman, D. & Pittman, G. (2007). The Tower of London: A Study of the Effect of Problem Structure on Planning. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 29, 333-342.
- Numminen, H., Lehto, J. E. & Ruoppila, I. (2001). Tower of Hanoi and Working Memory in Adult Persons with Intellectual Disability. *Research in Developmental Disabilities*, 22, 373-387.
- Owen, A. M., Downes, J. J., Sahakian, B. J., Polkey, C. E. & Robbins, T. W. (1990). Planning and Spatial Working Memory Following Frontal Lobe Lesions in Man. *Neuropsychologia*, 28, 1021-1034.
- Phillips, L. H., Wynn, V. E., McPherson, S. & Gilhooly, K. J. (2001). Mental Planning and the Tower of London Task. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 54, 579-597.
- Phillips, L. H., Wynn, V., Gilhooly, K. J., Della Sala, S. & Logie, R. H. (1999). The Role of Memory in the Tower of London Task. *Memory*, 7, 209-231.
- Quellet, M.-C., Beauchamp, M. H., Owen, A. M. & Doyon, J. (2004). Acquiring a Cognitive Skill With a New Repeating Version of the Tower of London Task. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 58, 272-288.
- Regard, M., Strauss, E. & Knapp, P. (1982). Children's Production of Verbal and Nonverbal Fluency Tasks. *Perceptual and Motor Skills*, 55, 839-844.
- Reitan, R. M. (1971). The Relation of the Trail Making Test to organic brain damage. *Journal of Consulting Psychology*, 19, 393-394.
- Ruff, R. M. (1988). *Ruff Figural Fluency Test*. San Diego, CA: Neuropsychological Resources.
- Salthouse, T. A. (2004). What and When of Cognitive Aging. *Current Directions in Psychological Science*, 13, 140-144.

- Schnirman, G. M., Welsh, M. C. & Retzlaff, P. D. (1998). Development of the Tower of London-Revised. *Assessment*, 5, 355-360.
- Shallice, T. (1982). Specific Impairments of Planning. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, 298, 199-209.
- Shallice, T. & Burgess, P. W. (1991). Deficits in Strategy Application Following Frontal Lobe Damage in Man. *Brain*, 114, 727-741.
- Simon, H. A. (1975). The Functional Equivalence of Problem Solving Skills. *Cognitive Psychology*, 7, 268-288.
- Sorel, O. & Pennequin, V. (2008). Aging of the Planning Process: The Role of executive Functioning. *Brain and Cognition*, 66, 196-201.
- Tucha, O. & Lange, K. W. (2004). *Der Turm von London – Deutsche Version (TL-D)*. Göttingen: Hogrefe Verlag GmbH & C. KG.
- Waltz, J. A., Knowlton, B. J., Holyoak, K. J., Boone, K. B. Mishkin, F. S., de Menezes Santos, M., Thomas, C. R. & Miller, B. L. (1999). A System for Relational Reasoning in Human Prefrontal Cortex. *Psychological Science*, 10, 119-125.
- Ward, G. & Allport, A. (1997). Planning and Problem-solving Using the Five-disc Tower of London Task. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 50A, 49-78.
- Wechsler, D. (2000). *WMS-R: Wechsler Gedächtnistest, revidierte Fassung*. Bern: Verlag Hans Huber.
- Wechsler, D. (2006). *WAIS-III: Wechsler Intelligenztest für Erwachsene, Deutsche Adaptation* (Übersetzt von Aster, M. Neubauer, A.). Frankfurt/ M.: Harcourt Test Services.
- Welsh, M. (1991). Rule-Guided Behavior and Self-Monitoring on the Tower of Hanoi Disk- Transfer Task. *Cognitive Development*, 6, 59-76.
- Welsh, M. C., Satterlee Cartmell, T., & Stine, M. (1999). Towers of Hanoi and London: Contribution of Working Memory and Inhibition to Performance. *Brain and Cognition*, 41, 231-242.
- Welsh, M., Cicerello, A., Cuneo, K. & Brennan, M. (2001). Error and Temporal Patterns in Tower of Hanoi Performance: Cognitive Mechanisms and Individual Differences. *The Journal of General Psychology*, 122, 69-81.
- Welsh, M. C., Revilla, V. Strongin, D. & Kepler, M. (2000). Towers of Hanoi and London: Is the Nonshared Variance due to Differences in Task Administration? *Perceptual and Motor Skills*, 90, 562-572.
- West, R. L. (1996). An Application of Prefrontal Cortex Function Theory to Cognitive Aging. *Psychological Bulletin*, 120, 272-292.

Zhang, J. (1997). The Nature of External Representations in Problem Solving. *Cognitive Science*, 21, 179-217.

Zook, N., Welsh, M. C. & Ewing, V. (2006). Performance of Healthy, Older Adults on the Tower of London-Revised: Associations with Verbal and Nonverbal Abilities. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 13, 1-19.

7. Anhang

7.1. Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Turm von Hanoi | 8 |
| Abbildung 2 a, b und c: „Hanoi-Graph“ des Turm von Hanoi..... | 9 |
| Abbildung 3: Abbildung des Original Turm von London..... | 10 |
| Abbildung 4 a und b: Der Problemraum des Turm von London..... | 11 |
| Abbildung 5 a und b: Varianten des Turm von London..... | 13 |
| Abbildung 6: Typen von Start- und Zielkonfigurationen..... | 17 |
| Abbildung 9: Tablet PC von Fijutsu Siemens (Lifebook T3010) | 28 |
| Abbildung 10: Das Programm ToHaL. | 29 |
| Abbildung 11: Aufgabe Nr. 3 des Turm von London und Hanoi im Vergleich..... | 30 |
| Abbildung 12 a und b: Turm von Hanoi und London auf dem Tablet PC..... | 32 |
| Abbildung 13: Aufteilung der Gesamtlösungszeit | 32 |
| Abbildung 14: Fünf-Punkte-Test..... | 36 |
| Abbildung 15: Trail-Making-Test A und B..... | 36 |
| Abbildung 16 a und b: „Hanoi-Graph“ und „London-Graph“ | 37 |
| Abbildung 17: „Multi-Graph“ des Turm von Hanoi | 38 |
| Abbildung 18: Exekutivtests beider Altersgruppen im Vergleich..... | 39 |
| Abbildung 19: Turm-von-Hanoi-Parameter beider Altersgruppen im Vergleich | 40 |
| Abbildung 20: TvH-Planungszeiten beider Altersgruppen im Vergleich | 41 |
| Abbildung 21: TvH-Durchführungszeiten beider Altersgruppen im Vergleich..... | 42 |
| Abbildung 22: Turm-von-London-Parameter beider Altersgruppen im Vergleich..... | 43 |
| Abbildung 23: TvL-Planungszeiten beider Altersgruppen im Vergleich..... | 44 |
| Abbildung 24: TvL-Durchführungszeiten beider Altersgruppen im Vergleich | 45 |
| Abbildung 25 a, b und c: TvH-„Multigraphen“ der Aufgaben Nr. 13, 17 und 18 | 46 |
| Abbildung 26 a und b: TvH-„Multigraphen“ der Aufgaben Nr. 15 und 19..... | 48 |
| Abbildung 27: TvH-„Multigraph“ der Aufgaben Nr. 16..... | 49 |
| Abbildung 28 a-e: TvL-„Multigraphen“ der Aufgaben Nr. 5, 9, 14, 17 und 19. | 50 |
| Abbildung 29 a-d: TvL-„Multigraphen“ der Aufgaben Nr. 10, 13, 16 und 18..... | 52 |
| Abbildung 30: Start- und Zielkonfigurationen der TvH-Aufgaben Nr. 5 und 9 | 54 |
| Abbildung 31: Planungs- und Durchführungszeiten der TvH-Aufgaben Nr. 5 und 9. | 55 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 32: Start- und Zielkonfigurationen der TvH-Aufgaben Nr. 12 und 14. | 55 |
| Abbildung 33: Planungs- und Durchführungszeiten der TvH-Aufgaben Nr. 12 und 14. ... | 56 |
| Abbildung 34: Start- und Zielkonfigurationen der TvL-Aufgaben Nr. 12 und 14..... | 57 |
| Abbildung 35: Planungs- und Durchführungszeiten der TvL-Aufgaben Nr. 12 und 14..... | 57 |
| Abbildung 36: Planungs- und Durchführungszeiten von optimal gelösten TvH- und TvL- Aufgaben im Vergleich | 58 |
| Abbildung 37: Planungs- und Durchführungszeiten von nicht optimal gelösten TvH- und TvL-Aufgaben im Vergleich..... | 59 |
| Abbildung 38 a: TvH: Anteil des Lösungserfolgs in Prozent | 60 |
| Abbildung 38 b: TvL: Anteil des Lösungserfolgs in Prozent..... | 60 |
| Abbildung 39: Planungs- und Durchführungszeiten von TvH- und TvL-Aufgaben gleicher Zugzahl..... | 61 |
| Abbildung 40: TvH und TvL: Anzahl zusätzlich zur Mindestzugzahl gemachter Züge..... | 62 |
| Abbildung 41 a und b: Korrelation der TvH-Durchführungszeiten von 5- und 7-Zug- Aufgaben mit dem 5-Punkte-Test. | 65 |
| Abbildung 42 a und b: Korrelation der TvL-Durchführungszeiten von 5-Zug-Aufgaben mit dem TMT A und B. | 66 |
| Abbildung 43: Korrelation der TvL-Durchführungszeiten von 5-Zug-Aufgaben mit dem 5- Punkte-Test. | 67 |
| Abbildung 44 a und b: Korrelation der TvL-Durchführungszeiten von 5-Zug-Aufgaben mit dem TMT B und dem Matrizentest. | 67 |
| Abbildung 45 a und b: Korrelation der TvL-Durchführungszeiten von 5-Zug-Aufgaben mit der phonologischen Wortflüssigkeit und dem 5-Punkte-Test..... | 68 |

7.2. Tabellenverzeichnis

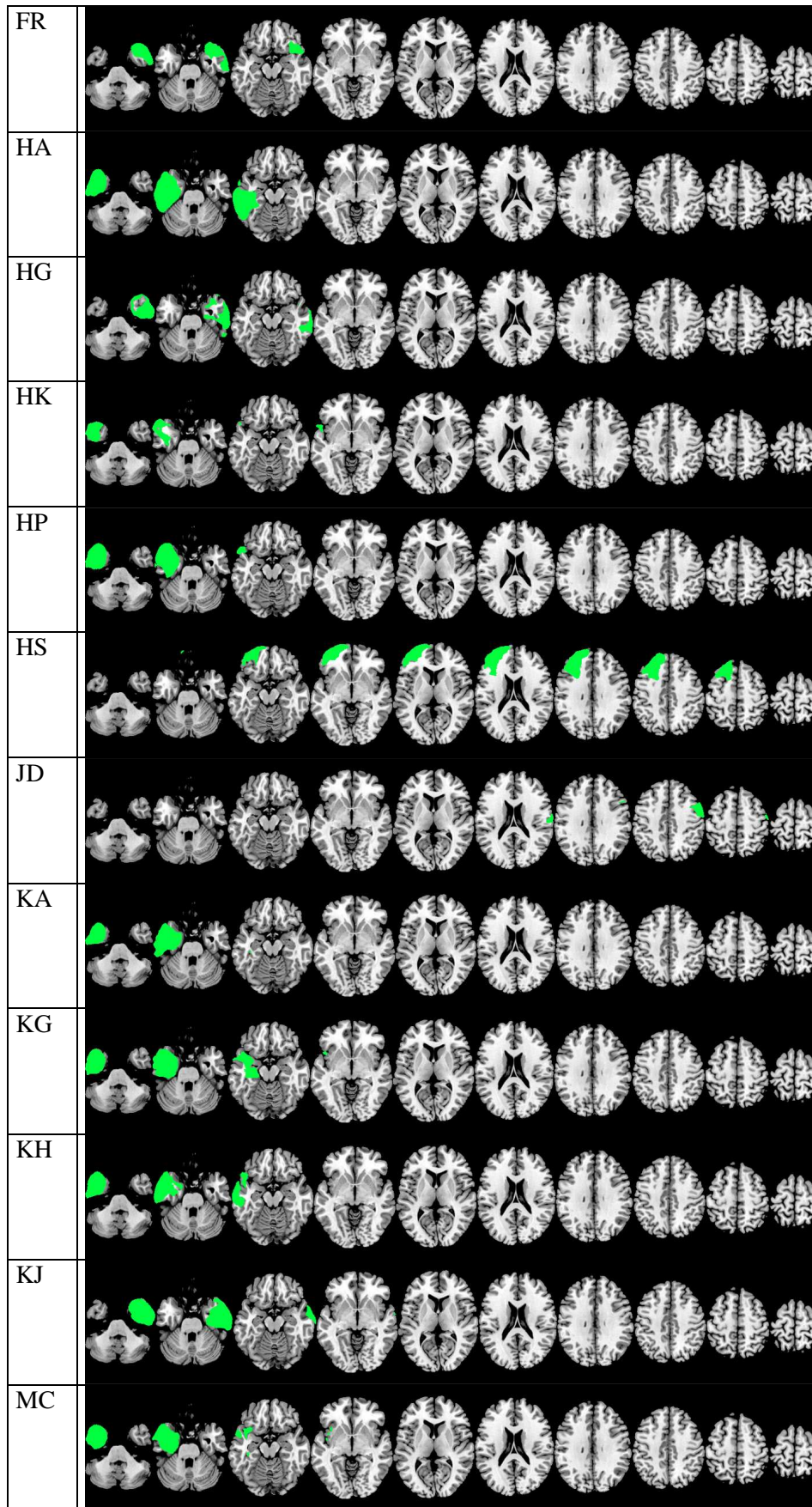
| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Epidemiologische Daten der Kontrollstichprobe (n=70) | 25 |
| Tabelle 2: Epidemiologische Daten der Patienten- und Kontrollstichprobe (n=22) | 26 |
| Tabelle 3: Korrelationen der Turm-von-Hanoi-Parameter mit anderen Exekutivtests | 63 |
| Tabelle 4: Korrelationen der Turm-von-London-Parameter mit anderen Exekutivtests..... | 65 |
| Tabelle 5: Cut-Off-Werte der Turm-von-Hanoi-Parameter | 69 |
| Tabelle 6: Cut-Off-Werte der Turm-von-London-Parameter..... | 71 |

7.3. Anhangsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Tabelle A : Läsionsprofile der Patienten (n = 22) | 102 |
| Tabelle B 1: Turm-von-London-Aufgabeneigenschaften | 104 |
| Tabelle B 2: Turm-von-Hanoi-Aufgabeneigenschaften | 107 |
| Tabelle C : Allgemeine Parameter beider Altersgruppen..... | 110 |
| Tabelle D 1: Turm-von-Hanoi-Parameter beider Altersgruppen | 111 |
| Tabelle D 2: Turm-von-Hanoi-Planungszeiten beider Altersgruppen nach Zugzahl..... | 111 |
| Tabelle D 3: Turm-von-Hanoi-Durchführungszeiten beider Altersgruppen nach Zugzahl | 111 |
| Tabelle E 1: Turm-von-London-Parameter beider Altersgruppen | 112 |
| Tabelle E 2: Turm-von-London-Planungszeiten beider Altersgruppen nach Zugzahl | 112 |
| Tabelle E 3: Turm-von-London-Durchführungszeiten beider Altersgruppen nach Zugzahl | 112 |
| Tabelle F 1: Turm-von-Hanoi-Parameter der Aufgaben Nr. 5 und 9 | 113 |
| Tabelle F 2: Turm-von-Hanoi-Parameter der Aufgaben Nr. 12 und 14..... | 113 |
| Tabelle F 3: Turm-von-London-Parameter der Aufgaben Nr. 12 und 14 | 113 |
| Tabelle G 1: Turm-von-Hanoi- und –London-Planungszeiten nach Zugzahl..... | 114 |
| Tabelle G 2: Turm-von-Hanoi- und –London-Durchführungszeiten nach Zugzahl | 114 |
| Tabelle G 3: Turm-von-Hanoi- und –London-Züge nach Zugzahl..... | 114 |
| Tabelle H 1: Korrelationen der Turm-von-Hanoi-Planungszeiten mit anderen Exekutivtests | 115 |
| Tabelle H 2: Korrelationen der Turm-von-Hanoi-Durchführungszeiten mit anderen Exekutivtests | 115 |
| Tabelle H 3: Korrelationen der Turm-von-Hanoi-Züge mit anderen Exekutivtests | 116 |
| Tabelle H 4: Korrelationen der Turm-von-Hanoi-Fehler mit anderen Exekutivtests | 116 |
| Tabelle I 1: Korrelationen der Turm-von-London-Planungszeiten mit anderen Exekutivtests | 117 |
| Tabelle I 2: Korrelationen der Turm-von-London-Durchführungszeiten mit anderen Exekutivtests | 117 |
| Tabelle I 3: Korrelationen der Turm-von-London-Züge mit anderen Exekutivtests | 118 |
| Tabelle I 4: Korrelationen der Turm-von-London-Fehler mit anderen Exekutivtests | 118 |

| | |
|--|-----|
| Tabelle J: Turm-von-Hanoi- und -London-Parameter der Kontrollstichprobe (n=22) | 119 |
| Tabelle K 1: Turm-von-Hanoi-Parameter der Patienten (n=22) | 120 |
| Tabelle K 2: Turm-von-London-Parameter der Patienten (n=22)..... | 120 |
| L Versuchsanweisung: Turm von Hanoi | 121 |
| M Versuchsanweisung: Turm von London | 122 |
| N Einverständniserklärung | 123 |

Tabelle A : Läsionsprofile der Patienten (n = 22)



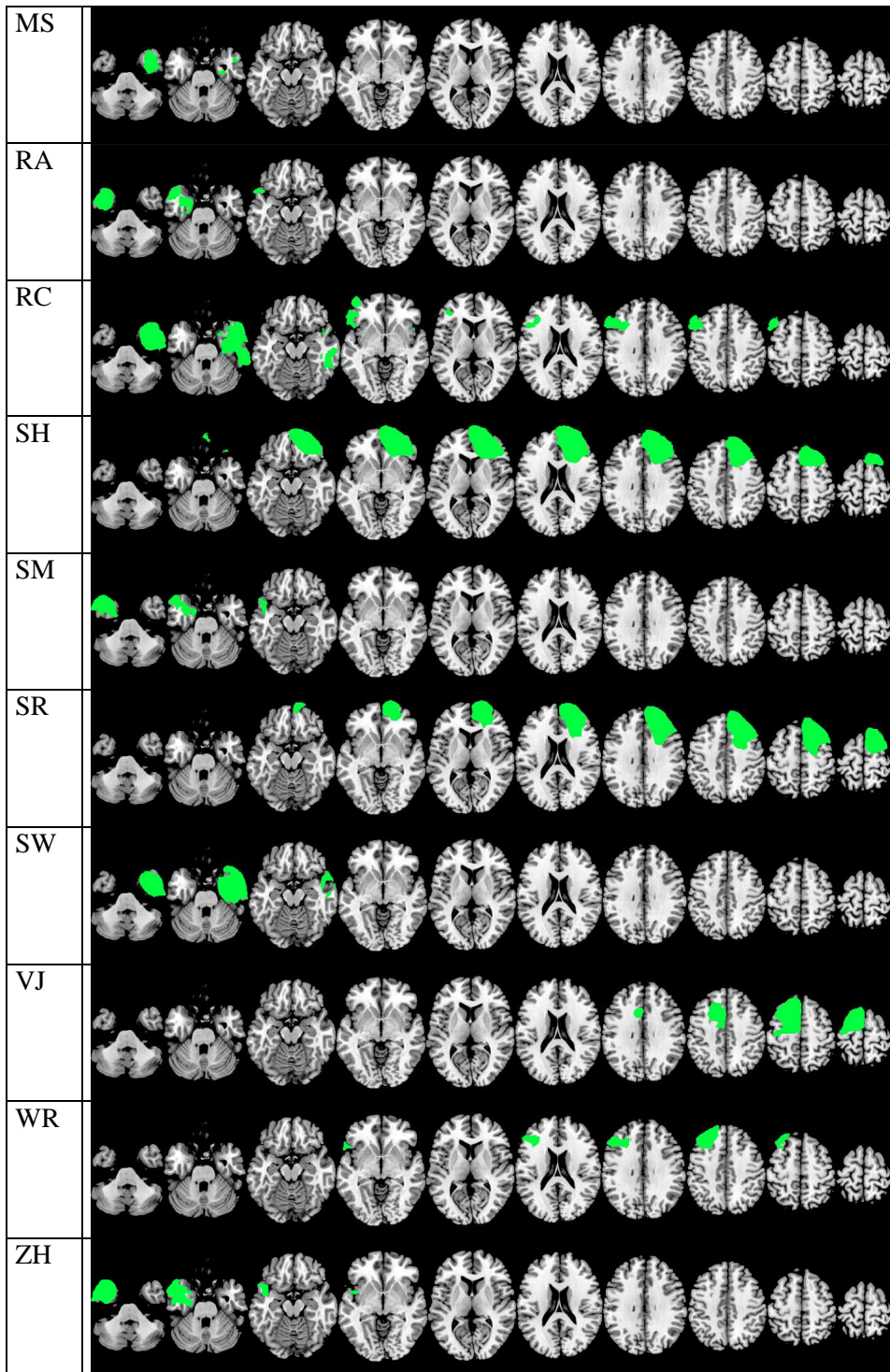


Tabelle B 1: Turm-von-London-Aufgabeneigenschaften

| Aufgabe | Startkonfiguration | | | Zielkonfiguration | | Graph | Min. Zugzahl | Zahl der kürzesten Lösungswege | Zahl der Lösungswege mit 1 Zug mehr | Zahl der Lösungswege mit 2 Zügen mehr | Zahl der Lösungswege mit 3 Zügen mehr | Bemerkung | |
|---------|--------------------|--|----|-------------------|--|-------|--------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------|-------------------------|
| Nr. 1 | RG/B/ | | PT | /GB/R | | PT | | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | Shallice Original Nr. 1 |
| Nr. 2 | RG/B/ | | PT | G/R/B | | F | | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | Shallice Original Nr. 2 |
| Nr. 3 | RG/B/ | | PT | BG/R/ | | PT | | 3 | 2 | 2 | 2 | 0 | Shallice Original Nr. 3 |
| Nr. 4 | RG/B/ | | PT | G/BR/ | | PT | | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | Shallice Original Nr. 4 |
| Nr. 5 | RG/B/ | | PT | GR/B/ | | PT | | 4 | 2 | 2 | 1 | 0 | Shallice Original Nr. 5 |
| Nr. 6 | RG/B/ | | PT | B/GR/ | | PT | | 4 | 1 | 1 | 2 | 2 | Shallice Original Nr. 6 |
| Nr. 7 | RG/B/ | | PT | BR/G | | PT | | 4 | 1 | 2 | 1 | 0 | Shallice Original Nr. 7 |
| Nr. 8 | RG/B/ | | PT | /BR/G | | PT | | 4 | 1 | 3 | 2 | 2 | Shallice Original Nr. 8 |

| <i>Aufgabe</i> | <i>Startkonfiguration</i> | | | <i>Zielkonfiguration</i> | | <i>Graph</i> | <i>Min. Zugzahl</i> | <i>Zahl der kürzesten Lösungswege</i> | <i>Zahl der Lösungswege mit 1 Zug mehr</i> | <i>Zahl der Lösungswege mit 2 Zügen mehr</i> | <i>Zahl der Lösungswege mit 3 Zügen mehr</i> | <i>Bemerkung</i> | |
|----------------|---------------------------|--|----|--------------------------|--|--------------|---------------------|---------------------------------------|--|--|--|------------------|-----------------------------|
| Nr. 9 | RG/B/ | | PT | BGR// | | T | | 5 | 2 | 4 | 0 | 0 | Shallice Original Nr. 9 |
| Nr. 10 | RG/B/ | | PT | GBR// | | T | | 5 | 1 | 2 | 2 | 1 | Shallice Original Nr. 10 |
| Nr. 11 | RG/B/ | | PT | GB/R/ | | PT | | 5 | 1 | 2 | 3 | 2 | Shallice Original Nr. 11 |
| Nr. 12 | RG/B/ | | PT | B/R/G | | F | | 5 | 2 | 4 | 3 | 1 | Shallice Original Nr. 12 |
| Nr. 13 | RG/B/ | | PT | R/BG/ | | PT | | 6 | 1 | 4 | 1 | 0 | Shallice Startkonfiguration |
| Nr. 14 | RG/B/ | | PT | RB//G | | PT | | 6 | 2 | 3 | 2 | 1 | Shallice Startkonfiguration |
| Nr. 15 | /BG/R | | PT | G/R/B | | F | | 6 | 1 | 5 | 3 | 1 | Neue Aufgabe |
| Nr. 16 | R/G/B | | F | BG//R | | PT | | 6 | 1 | 3 | 2 | 1 | Neue Aufgabe |
| Nr. 17 | R/BG/ | | PT | BG//R | | PT | | 7 | 2 | 4 | 2 | 1 | Neue Aufgabe |

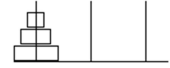
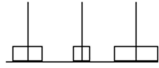
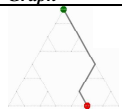
| <i>Aufgabe</i> | <i>Startkonfiguration</i> | | | <i>Zielkonfiguration</i> | | | <i>Graph</i> | <i>Min. Zugzahl</i> | <i>Zahl der kürzesten Lösungswege</i> | <i>Zahl der Lösungswege mit 1 Zug mehr</i> | <i>Zahl der Lösungswege mit 2 Zügen mehr</i> | <i>Zahl der Lösungswege mit 3 Zügen mehr</i> | <i>Bemerkung</i> |
|----------------|---------------------------|--|----|--------------------------|--|----|--------------|---------------------|---------------------------------------|--|--|--|------------------|
| Nr. 18 | R/B/G | | F | GB/R/ | | PT | | 7 | 1 | 3 | 3 | 3 | Neue Aufgabe |
| Nr. 19 | BG//R | | PT | B/G/R | | F | | 7 | 2 | 5 | 4 | 2 | Neue Aufgabe |
| Nr. 20 | RBG// | | T | R/G/B | | F | | 7 | 1 | 3 | 1 | 3 | Neue Aufgabe |

Die rote Kugel wird mit „R“, die blaue Kugel mit „B“ und die gelbe Kugel mit „G“ bezeichnet. Ein bestimmter Zustand, d. h. die Verteilung der Kugeln auf den Stangen, wird von links nach rechts und von oben nach unten beschrieben. Ein Schrägstrich kennzeichnet die jeweilige Stange. Z. B. bedeutet BG//R, dass die blaue Kugel auf der längsten Stange, die gelbe Kugel auf der blauen Kugel auf der längsten Stange liegt, die mittlere Stange frei ist und die rote Kugel auf der kürzesten Stange liegt. Ferner werden die Kugelkonfigurationen folgendermaßen gekennzeichnet: T=Turm, d.h. alle drei Kugeln liegen auf einer Stange, F=flach: die drei Kugeln sind auf alle drei Stangen verteilt und PT=partieller Turm: es liegen jeweils zwei Kugeln auf einer Stange, eine Kugel auf einer Stange und eine Stange ist frei. Die kürzesten Wege sind in den jeweiligen Graphen grau bzw. schwarz (bei 2 kürzesten Wegen) eingezeichnet.

Tabelle B 2: Turm-von-Hanoi-Aufgabeneigenschaften

| Aufgabe | Startkonfiguration | | | Zielkonfiguration | | Graph | Min. Zugzahl | Zahl der kürzesten Lösungswege | Zahl der Lösungswege mit 1 Zug mehr | Zahl der Lösungswege mit 2 Zügen mehr | Zahl der Lösungswege mit 3 Zügen mehr | Bemerkung | |
|---------|--------------------|--|----|-------------------|--|-------|--------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------|--|
| Nr. 1 | 13/2/ | | PT | 23//1 | | PT | | 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | |
| Nr. 2 | 13/2/ | | PT | 3/1/2 | | F | | 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | |
| Nr. 3 | 13/2/ | | PT | 23/1/ | | PT | | 3 | 2 | 2 | 1 | 0 | |
| Nr. 4 | 13/2/ | | PT | 123// | | T | | 3 | 1 | 3 | 1 | 0 | |
| Nr. 5 | 13/2/ | | PT | 1//23 | | PT | | 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | |
| Nr. 6 | 13/2/ | | PT | 1/3/2 | | F | | 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | |
| Nr. 7 | 13/2/ | | PT | 2//13 | | PT | | 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | |
| Nr. 8 | 13/2/ | | PT | //13/2 | | PT | | 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | |
| Nr. 9 | 13/2/ | | PT | //123 | | T | | 5 | 1 | 2 | 2 | 3 | |

| <i>Aufgabe</i> | <i>Startkonfiguration</i> | | | <i>Zielkonfiguration</i> | | <i>Graph</i> | <i>Min. Zugzahl</i> | <i>Zahl der kürzesten Lösungswege</i> | <i>Zahl der Lösungswege mit 1 Zug mehr</i> | <i>Zahl der Lösungswege mit 2 Zügen mehr</i> | <i>Zahl der Lösungswege mit 3 Zügen mehr</i> | <i>Bemerkung</i> | |
|----------------|---------------------------|--|----|--------------------------|--|--------------|---------------------|---------------------------------------|--|--|--|------------------|---------------------------|
| Nr. 10 | 13/2/ | | PT | 12//3 | | PT | | 5 | 1 | 2 | 3 | 3 | |
| Nr. 11 | 13/2/ | | PT | 2/13/ | | PT | | 5 | 1 | 2 | 2 | 3 | |
| Nr. 12 | 13/2/ | | PT | 1/23/ | | PT | | 5 | 1 | 2 | 1 | 2 | |
| Nr. 13 | 13/2/ | | PT | 12/3/ | | PT | | 6 | 2 | 4 | 2 | 3 | |
| Nr. 14 | 13/2/ | | PT | /123/ | | T | | 6 | 1 | 2 | 1 | 2 | |
| Nr. 15 | 12//3 | | PT | 3/1/2 | | F | | 6 | 1 | 2 | 3 | 3 | Neue Startkonfiguration |
| Nr. 16 | 2/1/3 | | F | 23//1 | | PT | | 6 | 1 | 3 | 3 | 1 | Neue Startkonfiguration |
| Nr. 17 | 12//3 | | PT | 23/1/ | | PT | | 7 | 2 | 3 | 3 | 3 | Gleicher Start wie Nr. 15 |
| Nr. 18 | 1/2/3 | | F | 1/3/2 | | F | | 7 | 2 | 2 | 3 | 3 | Neue Startkonfiguration |
| Nr. 19 | 23//1 | | PT | 2/3/1 | | F | | 7 | 1 | 5 | 2 | 1 | Neue Startkonfiguration |

| <i>Aufgabe</i> | <i>Startkonfiguration</i> | | | <i>Zielkonfiguration</i> | | | <i>Graph</i> | <i>Min. Zugzahl</i> | <i>Zahl der kürzesten Lösungswege</i> | <i>Zahl der Lösungswege mit 1 Zug mehr</i> | <i>Zahl der Lösungswege mit 2 Zügen mehr</i> | <i>Zahl der Lösungswege mit 3 Zügen mehr</i> | <i>Bemerkung</i> |
|----------------|---------------------------|---|---|--------------------------|--|---|---|---------------------|---------------------------------------|--|--|--|-------------------------|
| Nr. 20 | 123// |  | T | 2/1/3 |  | F |  | 7 | 1 | 2 | 4 | 1 | Neue Startkonfiguration |

Die kleinste Scheibe wird mit „1“, die mittlere Scheibe mit „2“ und die größte Scheibe „3“ gekennzeichnet. Ein bestimmter Zustand, d. h. die Verteilung der Scheiben auf den Stangen, wird von links nach rechts und von oben nach unten beschrieben. Ein Schrägstrich kennzeichnet die jeweilige Stange. Z. B. bedeutet 23/1, dass die größte Scheibe auf der linken Stange liegt, die mittlere Scheibe auf der großen Scheibe liegt, die mittlere Stange frei ist und die kleinste Scheibe auf der rechten Stange liegt. Ferner werden die Scheibenkonfigurationen folgendermaßen gekennzeichnet: T=Turm, d.h. alle drei Scheiben liegen auf einer Stange, F=flach: die drei Scheiben sind auf alle drei Stangen verteilt und PT=partieller Turm: es liegen zwei Scheiben auf einer Stange und die dritte Scheibe auf einer weiteren Stange, eine Stange ist frei. Die kürzesten Wege sind in den jeweiligen Graphen grau bzw. schwarz (bei 2 kürzesten Wegen) eingezeichnet.

Tabelle C : Allgemeine Parameter beider Altersgruppen

| | 20-45 Jahre | 46-70 Jahre |
|---|--------------------|--------------------|
| Zahlenspannen vorwärts* | 8,56 (1,71) | 7,45 (1,82) |
| Zahlenspannen rückwärts* | 7,85 (1,48) | 6,74 (1,98) |
| Blockspanne vorwärts* | 9,97 (1,66) | 9,10 (1,60) |
| Blockspanne rückwärts* | 9,41 (1,21) | 7,87 (2,08) |
| TMT A* (in Sekunden) | 24,77 (7,10) | 39,77 (15,73) |
| TMT B* (in Sekunden) | 51,77 (22,58) | 84,74 (37,05) |
| Matrizentest* | 21,69 (2,30) | 17,48 (5,85) |
| MWT-B | 31,56 (2,49) | 31,77 (2,67) |
| phonologische Wortflüssigkeit (S-Wörter) | 18,21 (4,82) | 16,06 (6,04) |
| semantische Wortflüssigkeit (Tiere) | 25,33 (6,29) | 23,97 (5,17) |
| Fünf-Punkte-Test* | 22,74 (4,60) | 16,84 (5,18) |

Leistungen von jüngeren und älteren Probanden in den verschiedenen Tests zur Messung exekutiver Funktionen im Vergleich. Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) der erreichten Punktzahl bzw. der benötigten Zeit in Sekunden beim TMT A und B. Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern gekennzeichnet ($p < 0,05$).

Tabelle D 1: Turm-von-Hanoi-Parameter beider Altersgruppen

| Turm-von-Hanoi-Parameter | Untergruppe der 20-45jährigen (n=39) | | Untergruppe der 46-70jährigen (n=31) | |
|--|--------------------------------------|--------|--------------------------------------|--------|
| | M | SD | M | SD |
| Gesamtlösungszeit * (in Sekunden) | 570,81 | 106,06 | 741,58 | 193,19 |
| Gesamtplanungszeit * (in Sekunden) | 205,48 | 87,89 | 232,30 | 75,58 |
| Gesamtdurchführungszeit * (in Sekunden) | 365,33 | 64,36 | 509,27 | 146,52 |
| Gesamtzüge | 108,26 | 10,55 | 111,87 | 7,69 |
| Gesamtfehler * | 0,90 | 1,57 | 3,00 | 2,68 |
| optimal gelöste Aufgaben * (mit der minimalen Zugzahl) | 15,64 | 2,47 | 14,19 | 2,54 |

Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) für die Anzahl bzw. Zeit in Sekunden. Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern gekennzeichnet ($p < 0,05$).

Tabelle D 2: Turm-von-Hanoi-Planungszeiten beider Altersgruppen nach Zugzahl

| Planungszeiten (in Sekunden) | Untergruppe der 20-45jährigen (n=39) | | Untergruppe der 46-70jährigen (n=31) | |
|------------------------------|--------------------------------------|------|--------------------------------------|------|
| | M | SD | M | SD |
| 2-Zug-Aufgabe * | 5,54 | 2,58 | 7,75 | 4,59 |
| 3-Zug-Aufgabe * | 5,36 | 2,16 | 8,35 | 7,33 |
| 4-Zug-Aufgabe * | 7,94 | 3,39 | 9,70 | 3,27 |
| 5-Zug-Aufgabe * | 8,28 | 4,28 | 9,19 | 2,50 |
| 6-Zug-Aufgabe | 12,72 | 7,58 | 14,79 | 8,21 |
| 7-Zug-Aufgabe | 16,98 | 9,76 | 16,34 | 6,94 |

Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der Zeit in Sekunden. Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern gekennzeichnet ($p < 0,05$).

Tabelle D 3: Turm-von-Hanoi-Durchführungszeiten beider Altersgruppen nach Zugzahl

| Durchführungszeiten (in Sekunden) | Untergruppe der 20-45jährigen (n=39) | | Untergruppe der 46-70jährigen (n=31) | |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------|--------------------------------------|-------|
| | M | SD | M | SD |
| 2-Zug-Aufgaben | 4,89 | 2,27 | 5,75 | 3,69 |
| 3-Zug-Aufgaben * | 7,95 | 1,92 | 9,68 | 2,92 |
| 4-Zug-Aufgaben * | 14,35 | 6,96 | 20,45 | 11,51 |
| 5-Zug-Aufgaben * | 18,41 | 5,05 | 25,24 | 10,29 |
| 6-Zug-Aufgaben * | 23,98 | 5,74 | 35,53 | 12,12 |
| 7-Zug-Aufgaben * | 28,17 | 5,01 | 38,39 | 12,80 |

Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der Zeit in Sekunden. Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern gekennzeichnet ($p < 0,05$).

Tabelle E 1: Turm-von-London-Parameter beider Altersgruppen

| Turm-von-London-Parameter | Untergruppe der 20-45jährigen (n=39) | | Untergruppe der 46-70jährigen (n=31) | |
|--|--------------------------------------|--------|--------------------------------------|--------|
| | M | SD | M | SD |
| Gesamtlösungszeit * (in Sekunden) | 719,25 | 161,24 | 918,01 | 226,77 |
| Gesamtplanungszeit (in Sekunden) | 273,89 | 125,86 | 268,34 | 99,66 |
| Gesamtdurchführungszeit * (in Sekunden) | 445,36 | 89,94 | 649,67 | 192,40 |
| Gesamtzüge | 120,28 | 14,60 | 130,77 | 21,20 |
| Gesamtfehler * | 0,82 | 1,30 | 2,10 | 2,18 |
| optimal gelöste Aufgaben * (mit der minimalen Zugzahl) | 12,90 | 2,95 | 11,03 | 2,75 |

Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) für die Anzahl bzw. Zeit in Sekunden. Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern gekennzeichnet ($p < 0,05$).

Tabelle E 2: Turm-von-London-Planungszeiten beider Altersgruppen nach Zugzahl

| Planungszeiten (in Sekunden) | Untergruppe der 20-45jährigen (n=39) | | Untergruppe der 46-70jährigen (n=31) | |
|------------------------------|--------------------------------------|-------|--------------------------------------|------|
| | M | SD | M | SD |
| 2-Zug-Aufgaben * | 4,78 | 4,01 | 6,18 | 2,57 |
| 3-Zug-Aufgaben * | 6,32 | 2,61 | 7,60 | 3,15 |
| 4-Zug-Aufgaben | 10,01 | 5,28 | 9,94 | 5,12 |
| 5-Zug-Aufgaben | 13,47 | 7,53 | 14,59 | 8,49 |
| 6-Zug-Aufgaben | 21,21 | 13,68 | 18,38 | 9,60 |
| 7-Zug-Aufgaben | 18,23 | 10,06 | 17,29 | 8,77 |

Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der Zeit in Sekunden. Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern gekennzeichnet ($p < 0,05$).

Tabelle E 3: Turm-von-London-Durchführungszeiten beider Altersgruppen nach Zugzahl

| Durchführungszeiten (in Sekunden) | Untergruppe der 20-45jährigen (n=39) | | Untergruppe der 46-70jährigen (n=31) | |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------|--------------------------------------|-------|
| | M | SD | M | SD |
| 2-Zug-Aufgaben | 4,92 | 2,84 | 5,54 | 3,68 |
| 3-Zug-Aufgaben * | 7,76 | 1,63 | 10,28 | 5,51 |
| 4-Zug-Aufgaben * | 16,79 | 7,60 | 28,92 | 15,48 |
| 5-Zug-Aufgaben * | 22,06 | 7,01 | 35,05 | 14,26 |
| 6-Zug-Aufgaben * | 34,91 | 9,31 | 47,29 | 17,84 |
| 7-Zug-Aufgaben * | 31,25 | 7,40 | 43,24 | 13,26 |

Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der Zeit in Sekunden. Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern gekennzeichnet ($p < 0,05$).

Tabelle F 1: Turm-von-Hanoi-Parameter der Aufgaben Nr. 5 und 9

| TvH-Aufgaben | Planungszeit (in Sekunden) | Durchführungszeit (in Sekunden) | Anzahl der Züge | Anzahl der Fehler |
|--------------------------|---------------------------------------|--|----------------------------|------------------------------|
| Aufgabe Nr. 5 | 9,49 (6,77) | 18,39 (21,05) | 4,70 (2,53) | 0,16 (0,58) |
| Aufgabe Nr. 9 | 6,80 (3,32) | 17,40 (6,85) | 5,29 (1,18) | 0,06 (0,23) |
| Z | -3,426 | -4,053 | -5,389 | -1,218 |
| Sign. (p<0,05) | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,223 |

Wilcoxon-Test bei gepaarten Stichproben. Die Z-Werte basieren auf positiven oder negativen Rängen. Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) der TvH-Parameter der Aufgaben Nr. 5 (4-Zug-Aufgabe) und Nr. 9 (5-Zug-Aufgabe). Es gab einen signifikanten Unterschied in der Planungs- und Durchführungszeit, d. h. die Probanden brauchten zur Lösung der Aufgabe Nr. 5 mehr Zeit.

Tabelle F 2: Turm-von-Hanoi-Parameter der Aufgaben Nr. 12 und 14

| TvH-Aufgaben | Planungszeit (in Sekunden) | Durchführungszeit (in Sekunden) | Anzahl der Züge | Anzahl der Fehler |
|--------------------------|---------------------------------------|--|----------------------------|------------------------------|
| Aufgabe Nr. 12 | 10,07 (6,86) | 27,56 (22,06) | 6,14 (2,21) | 0,23 (0,64) |
| Aufgabe Nr. 14 | 6,60 (3,68) | 22,60 (7,61) | 6,34 (0,87) | 0,10 (0,30) |
| Z | -4,767 | -0,793 | -2,208 | -1,380 |
| Sign. (p<0,05) | 0,000 | 0,428 | 0,027 | 0,168 |

Wilcoxon-Test bei gepaarten Stichproben. Die Z-Werte basieren auf positiven oder negativen Rängen. Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) der TvH-Parameter der Aufgaben Nr. 12 (5-Zug-Aufgabe) und Nr. 14 (6-Zug-Aufgabe). Die Probanden planten bei der Aufgabe Nr. 12 länger als bei der Aufgabe Nr. 14.

Tabelle F 3: Turm-von-London-Parameter der Aufgaben Nr. 12 und 14

| TvL-Aufgaben | Planungszeit (in Sekunden) | Durchführungszeit (in Sekunden) | Anzahl der Züge | Anzahl der Fehler |
|--------------------------|---------------------------------------|--|----------------------------|------------------------------|
| Aufgabe Nr. 12 | 14,97 (10,93) | 36,27 (27,11) | 7,43 (3,42) | 0,12 (0,30) |
| Aufgabe Nr. 14 | 17,14 (13,45) | 41,97 (27,3) | 8,31 (3,24) | 0,00 (0,00) |
| Z | -0,910 | -1,560 | -1,956 | -2,646 |
| Sign. (p<0,05) | 0,363 | 0,119 | 0,050 | 0,008 |

Wilcoxon-Test bei gepaarten Stichproben. Die Z-Werte basieren auf positiven oder negativen Rängen. Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) der TvL-Parameter der Aufgaben Nr. 12 (5-Zug-Aufgabe) und Nr. 14 (6-Zug-Aufgabe). Es gab keine signifikanten Unterschiede für die Planungs- und Durchführungszeit, d.h. die Probanden brauchten für die Aufgabe Nr. 12 genauso lang wie für die Aufgabe Nr. 14. Bei Aufgabe Nr. 12 machen die Probanden jedoch Fehler.

Tabelle G 1: Turm-von-Hanoi- und -London-Planungszeiten nach Zugzahl

| Planungszeiten (in Sekunden) | TvH | | TvL | |
|---------------------------------|-------|------|-------|-------|
| | M | SD | M | SD |
| 2-Zug-Aufgaben * | 6,52 | 3,75 | 5,40 | 3,50 |
| 3-Zug-Aufgaben | 6,68 | 5,31 | 6,89 | 2,91 |
| 4-Zug-Aufgaben | 8,72 | 3,43 | 9,98 | 5,17 |
| 5-Zug-Aufgaben * | 8,69 | 3,61 | 13,96 | 7,93 |
| 6-Zug-Aufgaben * | 13,64 | 7,87 | 19,96 | 12,05 |
| 7-Zug-Aufgaben | 16,70 | 8,58 | 17,81 | 9,45 |

Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD). Es wurde jeweils für den TvH und den TvL der Mittelwert der Planungszeiten der jeweils 2 (2- und 3-Zug-Aufgaben) bzw. 4 (4-, 5-, 6- und 7-Zug-Aufgaben) Aufgaben mit gleicher Mindestzugzahl gebildet und miteinander verglichen. Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern gekennzeichnet ($p < 0,05$).

Tabelle G 2: Turm-von-Hanoi- und -London-Durchführungszeiten nach Zugzahl

| Durchführungszeiten (in Sekunden) | TvH | | TvL | |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | MW | SD | MW | SD |
| 2-Zug-Aufgaben | 5,27 | 2,99 | 5,19 | 3,23 |
| 3-Zug-Aufgaben | 8,71 | 2,55 | 8,88 | 4,03 |
| 4-Zug-Aufgaben * | 17,05 | 9,67 | 22,16 | 13,15 |
| 5-Zug-Aufgaben * | 21,44 | 8,47 | 27,81 | 12,56 |
| 6-Zug-Aufgaben * | 29,09 | 10,74 | 40,39 | 14,98 |
| 7-Zug-Aufgaben * | 32,70 | 10,54 | 36,56 | 11,94 |

Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD). Es wurde jeweils für den TvH und den TvL der Mittelwert der Durchführungszeiten der jeweils 2 (2- und 3-Zug-Aufgaben) bzw. 4 (4-, 5-, 6- und 7-Zug-Aufgaben) Aufgaben mit gleicher Mindestzugzahl gebildet und miteinander verglichen. Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern gekennzeichnet ($p < 0,05$).

Tabelle G 3: Turm-von-Hanoi- und -London-Züge nach Zugzahl

| Anzahl der Züge | TvH | | TvL | |
|-------------------------|------|------|------|------|
| | M | SD | M | SD |
| 2-Zug-Aufgaben | 2,18 | 0,45 | 2,14 | 0,40 |
| 3-Zug-Aufgaben * | 3,04 | 0,20 | 3,16 | 0,32 |
| 4-Zug-Aufgaben * | 4,57 | 1,09 | 5,29 | 1,65 |
| 5-Zug-Aufgaben * | 5,65 | 0,92 | 6,48 | 1,61 |
| 6-Zug-Aufgaben * | 6,95 | 0,91 | 8,37 | 1,57 |
| 7-Zug-Aufgaben * | 7,69 | 0,63 | 8,45 | 1,26 |

Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD). Es wurde jeweils für den TvH und den TvL der Mittelwert der gemachten Züge der jeweils 2 (2- und 3-Zug-Aufgaben) bzw. 4 (4-, 5-, 6- und 7-Zug-Aufgaben) Aufgaben mit gleicher Mindestzugzahl gebildet und miteinander verglichen. Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern gekennzeichnet ($p < 0,05$).

Tabelle H 1: Korrelationen der Turm-von-Hanoi-Planungszeiten mit anderen Exekutivtests

| Turm-von-Hanoi-Planungszeiten | 2-Zug-Aufgaben | 3-Zug-Aufgaben | 4-Zug-Aufgaben | 5-Zug-Aufgaben | 6-Zug-Aufgaben | 7-Zug-Aufgaben |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Zahlenspannen vorwärts | -0,175 | -0,138 | -0,068 | -0,162 | -0,112 | 0,004 |
| Zahlenspannen rückwärts | -0,363 | -0,494 | -0,301 | -0,309 | -0,201 | -0,172 |
| Blockspanne vorwärts | -0,248 | -0,067 | -0,058 | -0,069 | -0,161 | -0,246 |
| Blockspanne rückwärts | -0,262 | -0,125 | -0,130 | -0,098 | -0,031 | -0,158 |
| TMT A | 0,462 | 0,464 | 0,387 | 0,434 | 0,153 | 0,092 |
| TMT B | 0,440 | 0,221 | 0,398 | 0,465 | 0,313 | 0,340 |
| Matrizentest | -0,332 | -0,315 | -0,203 | -0,256 | -0,089 | -0,197 |
| MWT-B | -0,016 | -0,146 | 0,091 | -0,105 | 0,102 | 0,055 |
| semantische Wortflüssigkeit | -0,019 | -0,011 | 0,022 | 0,022 | 0,144 | 0,010 |
| phonologische Wortflüssigkeit | -0,247 | -0,078 | -0,153 | -0,138 | -0,147 | -0,182 |
| 5-Punkte-Test | -0,359 | -0,339 | -0,202 | -0,286 | -0,123 | -0,112 |

Negative Vorzeichen bedeuten, dass es einen umgekehrten Zusammenhang gibt. Farberklärungen: weiß: keine bis sehr geringe Korrelation ($0 < r \leq 0,2$), hellgrau: geringe Korrelation ($0,2 < r \leq 0,5$), dunkelgrau: mittlere Korrelation ($0,5 < r \leq 0,7$).

Tabelle H 2: Korrelationen der Turm-von-Hanoi-Durchführungszeiten mit anderen Exekutivtests

| Turm-von-Hanoi-Durchführungszeiten | 2-Zug-Aufgaben | 3-Zug-Aufgaben | 4-Zug-Aufgaben | 5-Zug-Aufgaben | 6-Zug-Aufgaben | 7-Zug-Aufgaben |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Zahlenspannen vorwärts | 0,004 | -0,048 | -0,188 | -0,144 | -0,283 | -0,176 |
| Zahlenspannen rückwärts | -0,146 | -0,313 | -0,325 | -0,282 | -0,432 | -0,369 |
| Blockspanne vorwärts | -0,031 | -0,046 | -0,251 | -0,365 | -0,214 | -0,319 |
| Blockspanne rückwärts | -0,121 | -0,211 | -0,154 | -0,291 | -0,227 | -0,414 |
| TMT A | 0,246 | 0,386 | 0,380 | 0,385 | 0,350 | 0,357 |
| TMT B | 0,136 | 0,247 | 0,470 | 0,457 | 0,344 | 0,420 |
| Matrizentest | -0,106 | -0,318 | -0,423 | -0,417 | -0,464 | -0,463 |
| MWT-B | 0,031 | -0,011 | -0,172 | -0,231 | -0,249 | -0,216 |
| semantische Wortflüssigkeit | -0,138 | -0,121 | -0,184 | -0,110 | -0,281 | -0,233 |
| phonologische Wortflüssigkeit | -0,236 | -0,071 | -0,282 | -0,120 | -0,319 | -0,375 |
| 5-Punkte-Test | -0,234 | -0,207 | -0,365 | -0,537 | -0,369 | -0,530 |

Negative Vorzeichen bedeuten, dass es einen umgekehrten Zusammenhang gibt. Farberklärungen: weiß: keine bis sehr geringe Korrelation ($0 < r \leq 0,2$), hellgrau: geringe Korrelation ($0,2 < r \leq 0,5$), dunkelgrau: mittlere Korrelation ($0,5 < r \leq 0,7$).

Tabelle H 3: Korrelationen der Turm-von-Hanoi-Züge mit anderen Exekutivtests

| Turm-von-Hanoi-Züge | 2-Zug-Aufgaben | 3-Zug-Aufgaben | 4-Zug-Aufgaben | 5-Zug-Aufgaben | 6-Zug-Aufgaben | 7-Zug-Aufgaben |
|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Zahlenspannen vorwärts | -0,117 | -0,194 | -0,258 | -0,180 | -0,191 | -0,236 |
| Zahlenspannen rückwärts | 0,008 | -0,168 | -0,166 | -0,095 | -0,222 | -0,189 |
| Blockspanne vorwärts | -0,110 | -0,193 | -0,275 | -0,302 | -0,010 | -0,334 |
| Blockspanne rückwärts | -0,104 | -0,207 | -0,096 | -0,128 | 0,040 | -0,215 |
| TMT A | -0,026 | 0,072 | 0,274 | 0,169 | 0,120 | 0,068 |
| TMT B | 0,069 | 0,082 | 0,339 | 0,292 | 0,100 | 0,234 |
| Matrizentest | -0,026 | -0,099 | -0,318 | -0,247 | -0,251 | -0,240 |
| MWT-B | 0,113 | -0,076 | -0,121 | -0,200 | -0,252 | -0,248 |
| semantische Wortflüssigkeit | -0,152 | 0,019 | -0,116 | 0,030 | -0,053 | 0,060 |
| phonologische Wortflüssigkeit | -0,065 | -0,107 | -0,200 | -0,010 | -0,116 | -0,234 |
| 5-Punkte-Test | -0,144 | -0,081 | -0,264 | -0,314 | -0,070 | -0,333 |

Negative Vorzeichen bedeuten, dass es einen umgekehrten Zusammenhang gibt. Farberklärungen: weiß: keine bis sehr geringe Korrelation ($0 < r \leq 0,2$), hellgrau: geringe Korrelation ($0,2 < r \leq 0,5$), dunkelgrau: mittlere Korrelation ($0,5 < r \leq 0,7$).

Tabelle H 4: Korrelationen der Turm-von-Hanoi-Fehler mit anderen Exekutivtests

| Turm-von-Hanoi-Fehler | 2-Zug-Aufgaben | 3-Zug-Aufgaben | 4-Zug-Aufgaben | 5-Zug-Aufgaben | 6-Zug-Aufgaben | 7-Zug-Aufgaben |
|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Zahlenspannen vorwärts | 0,053 | -0,170 | -0,341 | -0,079 | -0,172 | -0,130 |
| Zahlenspannen rückwärts | 0,001 | -0,162 | -0,356 | -0,127 | -0,285 | -0,136 |
| Blockspanne vorwärts | 0,049 | -0,193 | -0,370 | -0,326 | -0,306 | -0,281 |
| Blockspanne rückwärts | -0,046 | -0,277 | -0,342 | -0,173 | -0,228 | -0,288 |
| TMT A | -0,124 | 0,086 | 0,244 | 0,295 | 0,114 | 0,445 |
| TMT B | -0,069 | 0,031 | 0,312 | 0,369 | 0,220 | 0,468 |
| Matrizentest | 0,024 | -0,114 | -0,471 | -0,316 | -0,260 | -0,436 |
| MWT-B | 0,080 | -0,171 | -0,380 | -0,099 | -0,070 | -0,098 |
| semantische Wortflüssigkeit | -0,173 | 0,107 | -0,192 | 0,100 | -0,119 | 0,072 |
| phonologische Wortflüssigkeit | 0,066 | -0,133 | -0,315 | -0,037 | -0,254 | -0,228 |
| 5-Punkte-Test | 0,003 | 0,016 | -0,413 | -0,430 | -0,146 | -0,469 |

Negative Vorzeichen bedeuten, dass es einen umgekehrten Zusammenhang gibt. Farberklärungen: weiß: keine bis sehr geringe Korrelation ($0 < r \leq 0,2$), hellgrau: geringe Korrelation ($0,2 < r \leq 0,5$), dunkelgrau: mittlere Korrelation ($0,5 < r \leq 0,7$).

Tabelle I 1: Korrelationen der Turm-von-London-Planungszeiten mit anderen Exekutivtests

| Turm-von-London-Planungszeiten | 2-Zug-Aufgaben | 3-Zug-Aufgaben | 4-Zug-Aufgaben | 5-Zug-Aufgaben | 6-Zug-Aufgaben | 7-Zug-Aufgaben |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Zahlenspannen vorwärts | -0,193 | -0,118 | -0,043 | 0,085 | 0,236 | 0,150 |
| Zahlenspannen rückwärts | -0,287 | -0,278 | -0,154 | -0,203 | -0,013 | -0,038 |
| Blockspanne vorwärts | -0,151 | -0,086 | -0,122 | -0,104 | 0,068 | 0,116 |
| Blockspanne rückwärts | -0,316 | -0,112 | -0,021 | -0,211 | 0,046 | -0,055 |
| TMT A | 0,354 | 0,235 | 0,152 | 0,200 | -0,045 | 0,066 |
| TMT B | 0,402 | 0,367 | 0,325 | 0,233 | 0,177 | 0,106 |
| Matrizentest | -0,295 | -0,244 | -0,131 | -0,179 | -0,017 | -0,041 |
| MWT-B | 0,040 | -0,187 | -0,144 | 0,039 | 0,162 | 0,090 |
| semantische Wortflüssigkeit | -0,046 | 0,075 | 0,166 | 0,055 | 0,275 | 0,144 |
| phonologische Wortflüssigkeit | -0,225 | -0,195 | -0,107 | 0,028 | 0,145 | 0,097 |
| 5-Punkte-Test | -0,516 | -0,454 | -0,233 | -0,228 | 0,012 | 0,040 |

Negative Vorzeichen bedeuten, dass es einen umgekehrten Zusammenhang gibt. Farberklärungen: weiß: keine bis sehr geringe Korrelation ($0 < r \leq 0,2$), hellgrau: geringe Korrelation ($0,2 < r \leq 0,5$), dunkelgrau: mittlere Korrelation ($0,5 < r \leq 0,7$).

Tabelle I 2: Korrelationen der Turm-von-London-Durchführungszeiten mit anderen Exekutivtests

| Turm-von-London-Durchführungszeiten | 2-Zug-Aufgaben | 3-Zug-Aufgaben | 4-Zug-Aufgaben | 5-Zug-Aufgaben | 6-Zug-Aufgaben | 7-Zug-Aufgaben |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Zahlenspannen vorwärts | -0,141 | 0,040 | -0,337 | -0,416 | -0,253 | -0,385 |
| Zahlenspannen rückwärts | -0,105 | -0,136 | -0,469 | -0,338 | -0,393 | -0,331 |
| Blockspanne vorwärts | -0,073 | -0,040 | -0,187 | -0,384 | -0,270 | -0,397 |
| Blockspanne rückwärts | -0,163 | -0,177 | -0,155 | -0,365 | -0,173 | -0,348 |
| TMT A | 0,114 | 0,154 | 0,336 | 0,503 | 0,323 | 0,415 |
| TMT B | 0,285 | 0,390 | 0,295 | 0,501 | 0,331 | 0,584 |
| Matrizentest | -0,171 | -0,253 | -0,387 | -0,419 | -0,404 | -0,518 |
| MWT-B | 0,013 | 0,014 | -0,220 | -0,057 | -0,199 | -0,190 |
| semantische Wortflüssigkeit | 0,022 | 0,139 | -0,107 | -0,144 | 0,006 | -0,163 |
| phonologische Wortflüssigkeit | -0,152 | -0,073 | -0,154 | -0,347 | -0,438 | -0,538 |
| 5-Punkte-Test | -0,299 | -0,247 | -0,401 | -0,500 | -0,456 | -0,594 |

Negative Vorzeichen bedeuten, dass es einen umgekehrten Zusammenhang gibt. Farberklärungen: weiß: keine bis sehr geringe Korrelation ($0 < r \leq 0,2$), hellgrau: geringe Korrelation ($0,2 < r \leq 0,5$), dunkelgrau: mittlere Korrelation ($0,5 < r \leq 0,7$).

Tabelle I 3: Korrelationen der Turm-von-London-Züge mit anderen Exekutivtests

| Turm-von-London-Züge | 2-Zug-Aufgaben | 3-Zug-Aufgaben | 4-Zug-Aufgaben | 5-Zug-Aufgaben | 6-Zug-Aufgaben | 7-Zug-Aufgaben |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Zahlenspannen vorwärts | -0,046 | 0,092 | -0,240 | -0,340 | -0,214 | -0,396 |
| Zahlenspannen rückwärts | -0,005 | -0,003 | -0,354 | -0,069 | -0,144 | -0,235 |
| Blockspanne vorwärts | -0,032 | -0,002 | -0,055 | -0,240 | -0,134 | -0,343 |
| Blockspanne rückwärts | -0,093 | 0,027 | 0,007 | -0,193 | -0,049 | -0,141 |
| TMT A | -0,126 | -0,102 | 0,065 | 0,227 | 0,047 | 0,220 |
| TMT B | 0,029 | 0,092 | 0,007 | 0,237 | 0,052 | 0,348 |
| Matrizentest | -0,060 | -0,062 | -0,091 | -0,144 | -0,088 | -0,299 |
| MWT-B | 0,023 | 0,115 | -0,202 | -0,040 | -0,253 | -0,237 |
| semantische Wortflüssigkeit | -0,052 | 0,177 | -0,090 | -0,159 | 0,004 | -0,011 |
| phonologische Wortflüssigkeit | -0,182 | 0,095 | -0,017 | -0,300 | -0,348 | -0,455 |
| 5-Punkte-Test | 0,032 | 0,070 | -0,136 | -0,240 | -0,188 | -0,404 |

Negative Vorzeichen bedeuten, dass es einen umgekehrten Zusammenhang gibt. Farberklärungen: weiß: keine bis sehr geringe Korrelation ($0 < r \leq 0,2$), hellgrau: geringe Korrelation ($0,2 < r \leq 0,5$), dunkelgrau: mittlere Korrelation ($0,5 < r \leq 0,7$).

Tabelle I 4: Korrelationen der Turm-von-London-Fehler mit anderen Exekutivtests

| Turm-von-London-Fehler | 2-Zug-Aufgaben | 3-Zug-Aufgaben | 4-Zug-Aufgaben | 5-Zug-Aufgaben | 6-Zug-Aufgaben | 7-Zug-Aufgaben |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Zahlenspannen vorwärts | -0,206 | -0,280 | -0,269 | -0,136 | -0,106 | -0,206 |
| Zahlenspannen rückwärts | -0,121 | -0,048 | -0,238 | -0,103 | -0,019 | 0,030 |
| Blockspanne vorwärts | -0,188 | -0,125 | -0,107 | -0,301 | -0,263 | -0,332 |
| Blockspanne rückwärts | -0,209 | -0,095 | -0,037 | -0,295 | -0,097 | -0,081 |
| TMT A | 0,098 | 0,055 | 0,285 | 0,376 | 0,215 | 0,008 |
| TMT B | 0,098 | 0,212 | 0,283 | 0,321 | 0,249 | 0,158 |
| Matrizentest | -0,159 | -0,270 | -0,278 | -0,207 | -0,308 | -0,093 |
| MWT-B | -0,099 | -0,137 | -0,271 | 0,272 | -0,113 | 0,064 |
| semantische Wortflüssigkeit | 0,046 | -0,104 | -0,046 | 0,054 | 0,023 | 0,016 |
| phonologische Wortflüssigkeit | -0,140 | -0,264 | -0,056 | -0,247 | -0,255 | -0,481 |
| 5-Punkte-Test | -0,140 | -0,260 | -0,270 | -0,332 | -0,234 | -0,117 |

Negative Vorzeichen bedeuten, dass es einen umgekehrten Zusammenhang gibt. Farberklärungen: weiß: keine bis sehr geringe Korrelation ($0 < r \leq 0,2$), hellgrau: geringe Korrelation ($0,2 < r \leq 0,5$), dunkelgrau: mittlere Korrelation ($0,5 < r \leq 0,7$).

Tabelle J: Turm-von-Hanoi- und -London-Parameter der Kontrollstichprobe (n=22)

| | Gesamt- lösungszeit (in Sekunden) | Gesamt- planungszeit (in Sekunden) | Gesamt- durchführungszeit (in Sekunden) | Gesamtzüge | Gesamt- fehler | Anzahl optimal gelöster Aufgaben |
|--|--|---|--|-------------------|---------------------------|---|
| Turm-von- Hanoi- Parameter | 654,20 (163,10) | 235,40 (98,15) | 418,81 (106,56) | 107,68 (7,13) | 1,68 (2,0) | 15,45 (2,32) |
| Turm-von- London- Parameter | 846,63 (223,26) | 310,65 (129,36) | 535,98 (200,26) | 118,09 (16,27) | 1,45 (1,6) | 12,59 (3,23) |

Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) der gesunden Kontrollstichprobe (n=22) die nach Alter, Bildung in Jahren und Geschlecht aus der Gesamtstichprobe (=70) als Vergleichstichprobe für die Patientengruppe (n=22) ausgewählt wurde.

Tabelle K 1: Turm-von-Hanoi-Parameter der Patienten (n=22)

| Initialen | Gesamtlösungszeit (in Sekunden) | Gesamtplanungszeit (in Sekunden) | Gesamtdurchführungszeit (in Sekunden) | Gesamtzüge | Gesamt- fehler | Anzahl optimal gelöster Aufgaben |
|-----------|------------------------------------|-------------------------------------|--|------------|-------------------|-------------------------------------|
| FR | 830,70 | 200,53 | 630,17 | 119 | 6 | 12 |
| HA | 756,22 | 140,88 | 615,34 | 134 | 1 | 10 |
| HG | 800,86 | 193,95 | 606,91 | 116 | 4 | 12 |
| HK | 597,39 | 121,71 | 475,69 | 121 | 2 | 15 |
| HP | 535,17 | 175,19 | 359,98 | 106 | 2 | 15 |
| HS | 666,81 | 278,34 | 388,47 | 116 | 2 | 15 |
| JD | 500,19 | 183,56 | 316,63 | 104 | 0 | 18 |
| KA | 761,56 | 199,17 | 562,39 | 114 | 4 | 12 |
| KG | 1014,77 | 279,26 | 735,50 | 140 | 6 | 9 |
| KH | 1246,06 | 208,89 | 1037,17 | 167 | 46 | 8 |
| KJ | 849,45 | 382,60 | 466,86 | 104 | 1 | 16 |
| MC | 650,80 | 185,92 | 464,87 | 116 | 3 | 15 |
| MS | 1049,84 | 612,59 | 437,25 | 97 | 0 | 17 |
| RA | 1357,23 | 588,73 | 768,50 | 83 | 0 | 10 |
| RC | 828,47 | 248,98 | 579,49 | 110 | 1 | 15 |
| SH | 738,30 | 212,94 | 525,36 | 116 | 2 | 15 |
| SM | 514,98 | 107,12 | 407,86 | 116 | 1 | 14 |
| SR | 774,00 | 181,53 | 592,47 | 144 | 7 | 7 |
| SW | 573,86 | 181,58 | 392,28 | 109 | 0 | 16 |
| VJ | 1621,30 | 454,91 | 1166,39 | 121 | 1 | 10 |
| WR | 919,92 | 218,48 | 701,44 | 127 | 1 | 11 |
| ZH | 628,04 | 211,69 | 416,34 | 108 | 3 | 16 |

Tabelle K 2: Turm-von-London-Parameter der Patienten (n=22)

| Initialen | Gesamtlösungszeit (in Sekunden) | Gesamtplanungszeit (in Sekunden) | Gesamtdurchführungszeit (in Sekunden) | Gesamtzüge | Gesamt- fehler | Anzahl optimal gelöster Aufgaben |
|-----------|------------------------------------|-------------------------------------|--|------------|-------------------|-------------------------------------|
| FR | 1132,85 | 180,85 | 952,00 | 149 | 5 | 8 |
| HA | 800,42 | 116,58 | 683,84 | 163 | 1 | 9 |
| HG | 940,86 | 449,13 | 491,74 | 112 | 0 | 14 |
| HK | 570,23 | 126,95 | 443,28 | 119 | 0 | 13 |
| HP | 658,76 | 262,42 | 396,34 | 109 | 0 | 16 |
| HS | 940,86 | 449,13 | 491,74 | 112 | 0 | 14 |
| JD | 648,63 | 182,97 | 465,66 | 122 | 0 | 15 |
| KA | 748,84 | 235,34 | 513,50 | 118 | 0 | 10 |
| KG | 754,42 | 153,16 | 601,27 | 153 | 0 | 10 |
| KH | 1326,31 | 171,95 | 1154,36 | 192 | 39 | 7 |
| KJ | 926,31 | 305,19 | 621,13 | 135 | 0 | 11 |
| MC | 901,08 | 178,33 | 722,75 | 137 | 0 | 11 |
| MS | 865,62 | 371,67 | 493,95 | 114 | 0 | 14 |
| RA | 1466,36 | 373,77 | 1092,59 | 112 | 0 | 10 |
| RC | 746,53 | 170,08 | 576,45 | 117 | 0 | 15 |
| SH | 827,08 | 205,50 | 621,58 | 138 | 2 | 8 |
| SM | 843,73 | 137,84 | 705,89 | 137 | 0 | 10 |
| SR | 1023,85 | 136,08 | 887,78 | 165 | 3 | 5 |
| SW | 684,42 | 185,39 | 499,03 | 130 | 0 | 11 |
| VJ | 1410,61 | 403,80 | 1006,81 | 111 | 0 | 11 |
| WR | 804,31 | 194,83 | 609,48 | 148 | 0 | 11 |
| ZH | 600,97 | 231,91 | 369,06 | 112 | 0 | 13 |

L Versuchsanweisung: Turm von Hanoi

Der Turm von Hanoi ist ein Strategiespiel, welches aus drei Stäben und drei Scheiben mit unterschiedlicher Größe besteht.

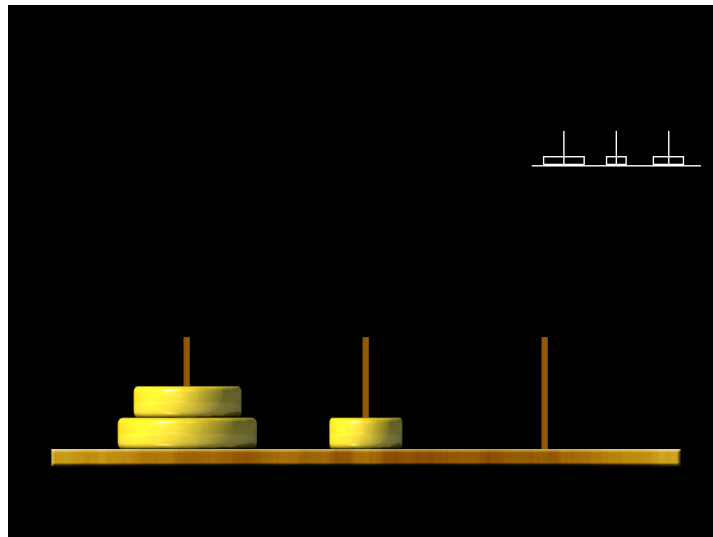
Am Anfang wird eine Startstellung vorgegeben, bei welcher die Scheiben entweder auf **einen oder mehrere Stäbe** verteilt sind.

Ziel ist es, die Scheiben so zu versetzen, dass eine vorgegebene Endposition erreicht wird, die auf dem Bildschirm rechts oben angezeigt wird.

Es gelten folgende Regeln:

1. Es darf jeweils nur eine kleinere auf eine größere Scheibe verschoben werden.
2. Pro Zug darf nur eine Scheibe bewegt werden.
3. Wenn Sie eine Scheibe mit dem Stift berührt haben, erscheint ein roter Rahmen um die Scheibe. Dabei gilt die Schachregel: „Berührt, geführt“: d.h. Sie müssen diese Scheibe dann bewegen (Sie können zwar die Scheibe auf denselben Stab zurücklegen, dies gilt aber als ein Zug).
4. Bitte versuchen Sie, die Aufgaben mit so wenigen Zügen wie möglich zu lösen.
5. Für jede Aufgabe haben Sie 2 Minuten Zeit, also überlegen Sie gut bevor Sie den ersten Zug machen.

→ **jeder Regelverstoß wird mit einem Brummtton signalisiert.**



Um Sie mit dem Versuch vertraut zu machen, gibt es zu Beginn eine kurze Übungsphase.

Bitte fragen Sie nach, falls Ihnen irgendetwas unklar ist!
Vielen Dank für Ihre Mithilfe!

M Versuchsanweisung: Turm von London

Der „Turm von London“ ist ein Strategiespiel mit drei verschieden farbigen Kugeln, die auf drei unterschiedlich langen Stäben stecken.

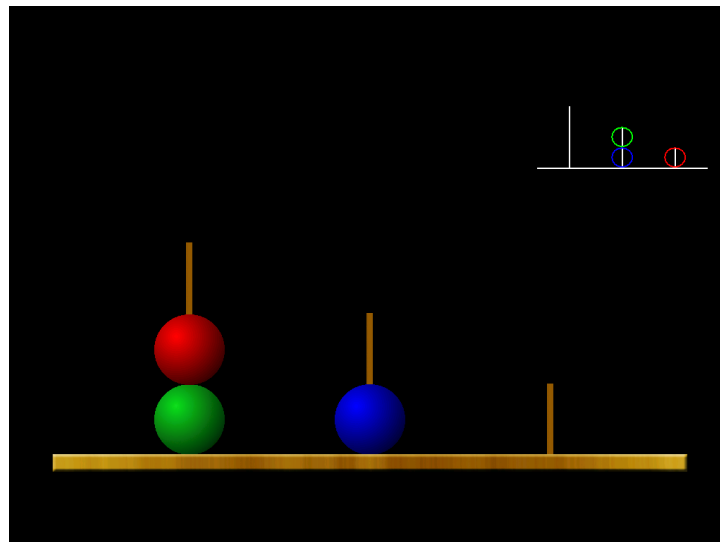
Am Anfang wird eine Startposition vorgegeben, bei welcher die Kugeln entweder auf **einen oder mehrere Stäbe** verteilt sind.

Ziel ist es, die Kugeln so zu versetzen, dass eine vorgegebene Endposition erreicht wird, die auf dem Bildschirm rechts oben angezeigt wird.

Es gelten folgende Regeln:

6. Auf den langen Stab passen bis zu drei Kugeln, auf den mittleren zwei, auf den kleinsten passt nur eine Kugel.
7. Pro Zug darf nur eine Kugel bewegt werden.
8. Wenn Sie eine Kugel mit dem Stift berührt haben, erscheint ein roter Rahmen um die Kugel. Dabei gilt die Schachregel: „Berührt, geführt“: d.h. Sie müssen diese Kugel dann bewegen (Sie können zwar die Kugel auf denselben Stab zurücklegen, dies gilt aber als ein Zug).
9. Bitte versuchen Sie, die Aufgaben mit so wenigen Zügen wie möglich zu lösen.
10. Für jede Aufgabe haben Sie 2 Minuten Zeit, also überlegen Sie gut bevor Sie den ersten Zug machen.

→ **jeder Regelverstoß wird mit einem Brummtton signalisiert.**



Um Sie mit dem Umgang mit dem Computer vertraut zu machen, gibt es zu Beginn eine kurze Übungsphase.

Bitte fragen Sie nach, falls Ihnen irgendetwas unklar ist!

Vielen Dank für Ihre Mithilfe!

Name: _____ Vorname: _____ Alter: _____

Kontrollperson

Patient

Diagnose:

N Einverständniserklärung

Testung von Problemlösungsstrategien mit Hilfe des „Turms von London und Hanoi“

Verantwortlicher Versuchsleiter: Prof. Dr. A. Danek, Oberarzt Neurologische Poliklinik,
7095-4821

Wir untersuchen das Problemlöseverhalten von gesunden Kontrollpersonen und neurologischen Patienten. Daher bitten wir Sie um Ihre Teilnahme an dieser wissenschaftlichen Untersuchung. Die Ergebnisse haben keinen unmittelbaren Nutzen für Sie selbst, sind aber notwendig für einen besseren Einblick in Denkprozesse des Gehirns und können zur Weiterentwicklung von Untersuchungs- und Behandlungsmethoden verhelfen.

Wir bitten Sie, den „Turm von London“ und den „Turm von Hanoi“ unseren Anweisungen entsprechend konzentriert und motiviert durchzuführen. Sie sollen auf einem Computerbildschirm, ähnlich einem Video-Spiel, mehrere einfache Denkaufgaben lösen. Diese Untersuchung dauert etwa eine Stunde und ist nicht invasiv, es ist also damit keine Blutabnahme oder ein anderer Eingriff in Ihren Körper verbunden.

Es ist vorgesehen, die Ergebnisse in der wissenschaftlichen Literatur zu veröffentlichen. Dabei unterliegen alle Personendaten der ärztlichen Schweigepflicht und Ihr Name oder die Tatsache Ihrer Teilnahme an den Untersuchungen werden nicht bekannt gegeben.

Die Teilnahme an dieser Untersuchung ist vollkommen freiwillig und kann von Ihnen jederzeit ohne Angabe von Gründen und ohne Nachteile abgebrochen werden.

Wir bitten um Ihre Unterschrift zum Zeichen, dass Sie mit der Durchführung dieser Untersuchung einverstanden sind.

Ich wurde heute über die oben genannten Untersuchungen mündlich und schriftlich informiert. Ich hatte ausreichend Gelegenheit, damit verbundene Fragen eingehend und zu meiner Zufriedenheit zu besprechen. Ich habe das Ziel der Studie, die Art der vorgesehenen Untersuchungen und mögliche Folgen verstanden.

Ich erkläre mich bereit, an der Untersuchung teilzunehmen.

Datum: _____ Unterschrift: _____ Zeuge: _____



8. Danksagung

Mein erster Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. med. Adrian Danek, der mir diese Arbeit ermöglicht und mich unterstützt hat. Danken möchte ich ihm auch für die zahlreichen Kontakte, die er mir ermöglicht hat.

Mein besonderer Dank gilt auch Sibylle Schuhwerk, die bei der Patientendatenerhebung maßgeblich beteiligt war und Stefanie Forkel für ihren unermüdlichen Einsatz bei der Probandenrekrutierung. Ganz besonders möchte ich Dr. Christina Knels danken.

Weiterhin möchte ich Dr. Anne Ebert, Dr. Joachim Hecht, Christoph Glasmacher und Dr. Silvia Kratzer danken.

Am allermeisten möchte ich meiner Freundin Inge Jobst danken, die immer für mich da war und mich in jeder Hinsicht unterstützt hat.

Ferner möchte ich all denen danken, die bei der Entwicklung und Optimierung des Programms ToHaL beteiligt waren, ganz besonders Prof. Andreas Hinz.

Zuletzt möchte ich den Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Kognitive Neurologie für die gute Zusammenarbeit sowie allen Probanden und Patienten danken.

9. Lebenslauf

Persönliche Daten

Vor und Nachname: Fatma Sürer
Geburtsdatum: 07.05.1971
Geburtsort: Tarsus/Türkei
Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulabschluss

1991 Abschluss der Allgemeinen Hochschulreife
Hildegardis Gymnasium, Kempten/Allgäu

Studium

SS 05 – SS 09 Promotionsstudium Humanbiologie, Arbeitsgruppe
Kognitive Neurologie, Prof. Danek, LMU München:
Der „Turm von Hanoi“ und „Turm von London“ auf
dem Tablet-PC: Untersuchung des Problemlöse-
verhaltens von gesunden Kontrollpersonen und von
Patienten mit umschriebenen Hirnläsionen

03/2005 Abschluss als Diplom-Psychologin
Diplomarbeit: „The effects of subthreshold
asynchrony on thresholds of perceived simultaneity“

WS 01/02 – WS 04/05 Psychologie-Studium, LMU München

WS 94/95 – WS 98/99 Studium der Humanmedizin, LMU München
(Vorklinik; abgebrochen)

Berufstätigkeit

Seit 02/2006 Neuropsychologin im BKH Augsburg (50 % Stelle)

11/2007 – 04/2008 Neuropsychologin beim Projekt PIKASSO (Zentrum
für seelische Gesundheit, integrierte Versorgung) des
BKH Augsburg (25 % Stelle)

Auslandserfahrung

07/2005 – 08/2005 Hospitation in der Neuropsychologie der
Neurologischen Klinik der Universität von Istanbul
(gefördert von der Robert-Bosch-Stiftung im Rahmen
des Internationalen Studien- und
Fortbildungsprogramms „Demenz“ aus Mitteln der
Otto und Edith-Mühlschlegel-Stiftung)