

Akkommodation und Kognition: eine Frage der vegetativen Balance ?

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der
Philosophischen Fakultät
der
Westfälischen Wilhelms-Universität
zu Münster (Westf.)

vorgelegt von

Stephanie Jainta

aus Salzgitter

2006

Tag der mündlichen Prüfung: 05. Oktober 2006

Dekan: Prof. Dr. W. Woyke

Referent: Prof. Dr. W. Hell
Westfälische Wilhelms-Universität zu Münster

Korreferent: Prof. Dr. H. Heuer
Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität
Dortmund

Zusammenfassung

Obwohl der Ziliarmuskel des Auges und die Herzmuskulatur im menschlichen Organismus zwei vollkommen unterschiedliche, funktionelle Aufgaben erfüllen, werden beide Muskeln über den Sympathikus und Parasympathikus des vegetativen Nervensystems in ihrer Funktion gesteuert. Die Ausgangsidee der vorliegenden Arbeit stützte sich im wesentlichen auf zwei Befunde: in einer Arbeit aus dem Jahr 2000 zeigten Tyrrell, Pearson & Thayer, daß eine Steigerung der Herzrate (Herzschläge pro Minute) bei einer (relativ) leichten Leseaufgaben mit einer Verlagerung der Akkommodationsruhelage in die Nähe einherging, die bei einer (relativ) schweren Leseaufgabe ausblieb. In einer neueren Arbeit von Davies, Wolffsohn & Gilmartin (2005; vgl. BCOVS Abstracts 2003) wurde die Akkommodation während der Bearbeitung kognitiver Aufgaben mit unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad gemessen und die Autoren konnten zeigen, daß sich die Akkommodation von der Sehentfernung der Informationspräsentation mit Zunahme der kognitiven Anforderung in die Ferne verlagerte, während gleichzeitig die Herzperiode abnahm. Als Ursache der gefundenen Akkommodationsänderung wird – ebenso wie für die kardiovaskuläre Veränderung – im allgemeinen eine Verschiebung in der vegetativen Balance angeführt. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Verringerung der Akkommodation unter kognitiven Anforderungen differenziert für unterschiedliche Schwierigkeitsstufen zu zeigen und über begleitend gemessene kardiovaskuläre Maße die Veränderung der vegetativen Balance einem Teilsystem des vegetativen Nervensystems – dem Sympathikus oder dem Parasympathikus – zu zuordnen. Im Gegensatz zu den zitierten Arbeiten konnte allerdings keine signifikante Änderung der Akkommodation mit einer Veränderung der kognitiven Anforderung gefunden werden. Weder das „Lesen“ und „Addieren“ von Zeilen / Spalten in einer Zahlenmatrix (E1) oder von sukzessiv dargebotenen Zahlen (E2), noch ein „Lesen“, „Addieren“ und „Multiplizieren“ mehrstelliger Zahlen (E3) führte zu einer Reaktion in der Akkommodation; auch für eine Variation einer zentralen Fixieraufgabe (E4) und einer „n-back“-Aufgabe (E5) mit unterschiedlich starken Anforderungen konnte keine Akkommodationsänderung gefunden werden. Die Verhaltensdaten und begleitend gemessenen vegetativen Meßgrößen – Pupillengröße, Herzperiode und Pulswellenlaufzeit – zeigten allerdings, wie erwartet, eine Reaktion auf die kognitive Anforderung und eine damit einhergehende Verschiebung der vegetativen Balance. Die während der Variation der kognitiven Anforderung wiederholt gemessenen geringfügigen Änderungen in den Akkommodationsdaten wurden darüber hinaus nicht als kognitiv-induziert interpretiert; diese Änderungen konnten auf zwei Einflußfaktoren – eine Blickrichtungsänderung mit der kognitiven Anforderung (trotz ortsfester Reizdarbietung) und die Richtigkeit der Aufgabenbearbeitung – zurückgeführt werden und zeigten zudem keine Korrelation mit den Änderungen der vegetativen Parameter. Damit stehen die Ergebnisse bzgl. der Akkommodation eher im Einklang mit einzelnen Studien (vgl. Rosenfield & Ciuffreda, 1990; Wolffsohn, et al., 2003), die optische bzw. methodische Ursachen für die in der Literatur diskutierten Akkommodationsänderungen verantwortlich machen.

Danksagung

„Keine Schuld ist dringender, als die, Dank zu sagen.“

(Marcus Tullius Cicero).

In diesem Sinne danke ich allen, die durch ihren
– direkten oder indirekten –
Beitrag diese Arbeit ermöglicht und begleitet haben.

Münster, Mai 2006

Inhaltsverzeichnis

1	<u>DIE AUSGANGSIDE</u>	<u>1</u>
1.1	DAS VEGETATIVE NERVENSYSTEM UND DIE WIRKUNG KOGNITIVER ANFORDERUNGEN - EINE ALLGEMEINE EINLEITUNG _____	2
2	<u>DIE VERÄNDERUNG DER AUGENLINSENBRECHKRAFT (AKKOMMODATION)</u>	<u>3</u>
2.1	DER PHYSIOLOGISCHE HINTERGRUND _____	4
2.2	DIE ÄNDERUNG DER AKKOMMODATION UNTER KOGNITIVEN ANFORDERUNGEN _____	5
2.3	ERKLÄRUNGSANSÄTZE DER BEOBACHTETEN, KOGNITIV INDUZIERTEN AKKOMMODATIONSÄNDERUNG _____	9
3	<u>(PARA)SYMPATHISCHE BEGLEITERSCHEINUNGEN IM ORGANISMUS - EINE AUSWAHL</u>	<u>13</u>
3.1	ÄNDERUNGEN DER PUPILLENGRÖÖE _____	13
3.2	ÄNDERUNGEN IM HERZKREISLAUFSYSTEM _____	15
3.2.1	HERZPERIODE (HP) UND HERZPERIODENVARIABILITÄT (HPV) _____	16
3.2.2	PULSWELLENLAUFZEIT („PULSE TRANSIT TIME“, PTT) _____	18
4	<u>VON DER AUSGANGSIDE ZUR UMSETZUNG DER EXPERIMENTE</u>	<u>19</u>
4.1	DIE ALLGEMEINEN RAHMENBEDINGUNGEN _____	20
4.1.1	DIE AUSWAHL DER OPTISCHEN RAHMENBEDINGUNGEN _____	20
4.1.2	DIE GESTALTUNG DER ALLGEMEINEN AUFGABENBEARBEITUNG UND AUSWAHL DES INTERESSIERENDEN ZEITFENSTERS _____	21
4.1.3	DIE AUSWAHL DER VERSUCHSTEILNEHMER _____	21
4.2	DIE AUSWAHL DER KOGNITIVEN ANFORDERUNG UND DIE ABFOLGE DER EXPERIMENTE _____	22
5	<u>DIE METHODE</u>	<u>24</u>
5.1	DIE KONTINUIERLICHE ERFASSUNG DER AKKOMMODATION DES AUGES _____	24
5.1.1	EXZENTRISCHE PHOTOREFRAKTION: DER POWERREFRACTOR (MULTICHANNEL) & DER POWERREF II (PLUSOPTIX) _____	25
5.1.2	DAS SRW 5000 AUTOREFRAKTOMETER (SHIN-NIPPON) _____	26
5.1.3	EXKURS: AKKOMMODATIONSMESSUNGEN BEI VERSCHIEDENEN SEHABSTÄNDEN _____	27
5.2	DIE ERFASSUNG DES ELEKTROKARDIOGRAMMS (EKG) UND DER PULSWELLENLAUFZEIT (PTT) _____	28
5.3	DIE DATENAUFBEREITUNG DER OPTISCHEN MESSGRÖÖEN UND DIE ALLGEMEINE DATENZUSAMMENFASSUNG _____	29
5.4	DER ALLGEMEINE VERSUCHSAUFBAU _____	31
6	<u>DIE EXPERIMENTE (E): AKKOMMODATIONSMESSUNG...</u>	<u>32</u>

INHALTSVERZEICHNIS

6.1	... WÄHREND DER BEARBEITUNG ARITHMETISCHER AUFGABEN - EINE ANNÄHERUNG AN DIE BESTEHENDE LITERATUR	32
6.1.1	E1: LESEN UND ADDIEREN INNERHALB EINER ZAHLENMATRIX	33
6.1.2	EXKURS: AUSWIRKUNGEN DER BLICKBEWEGUNG AUF DIE AKKOMMODATIONSMESSUNG	38
6.1.3	E1: ERNEUTE ANALYSE DER AKKOMMODATIONS DATEN UNTER EINBEZUG DER BLICKBEWEGUNGSÄNDERUNG	40
6.1.4	EIN ERSTES FAZIT	40
6.1.5	E2: LESEN UND ADDIEREN SUKZESSIV DARGEBOTENER ZWEISTELLIGER ZAHLEN	41
6.1.6	FAZIT	46
6.2	... WÄHREND DER BEARBEITUNG ARITHMETISCHER AUFGABEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER BLICKRICHTUNG UND DER RICHTIGKEIT DER ANTWORTEN - EINE ERWEITERUNG	47
6.2.1	E3: LESEN, ADDIEREN UND MULTIPLIZIEREN DREISTELLIGER ZAHLEN	47
6.2.2	FAZIT	53
6.3	... WÄHREND DER BEARBEITUNG EINER ZENTRALEN FIXATIONS AUFGABE (E3) - EINE ANNÄHERUNG AN DIE BESTEHENDE LITERATUR	53
6.3.1	KONTROLLEXPERIMENT K1: EIN ERHÖHEN DER VERGLEICHBARKEIT DER FIXIEREN- UND FIXIEREN/ RÜCKWÄRTSZÄHLPHASE	57
6.3.2	FAZIT	59
6.4	... WÄHREND DER BEARBEITUNG EINER „N-BACK“ - AUFGABE UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER RICHTIGKEIT DER ANTWORTEN - EINE ERWEITERUNG	60
6.4.1	KONTROLLEXPERIMENT K2: VERGLEICH DER „N-BACK“ - AUFGABEN „N-1“ UND „N-4“	67
6.4.2	FAZIT	68
7	ZURÜCK ZUR AUSGANGSIDE E: EINE BETRACHTUNG MIT NEUEN DATEN	69
7.1	KEINE ÄNDERUNG DER AKKOMMODATION MIT VERÄNDERTER KOGNITIVER ANFORDERUNG	70
7.2	ERWARTUNGSGEMÄ ßE ÄNDERUNGEN DER BEGLEITEND GEMESSENEN VEGETATIVEN MEßGRÖ ßEN	73
7.3	WAS BLEIBT VON DER AUSGANGSIDE E ?	74
8	LITERATUR	76
9	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	84
10	TABELLENVERZEICHNIS	84
11	ANHANGSVERZEICHNIS	85

1 Die Ausgangsidee

Obwohl der Ziliarmuskel des Auges und die Herzmuskulatur im menschlichen Organismus zwei in ihrer Funktion vollkommen unterschiedliche physiologische Aufgaben erfüllen, so werden beide Muskeln über das vegetative Nervensystem gesteuert: der Ziliarmuskel paßt die Krümmung der Augenlinse so an wechselnde Sehabstände an, daß das betrachtete Objekt immer scharf auf der Retina abgebildet wird (Akkommodation) (vgl. Abs. 4); das Herz als Zentrum des Herzkreislaufsystems sorgt für den Bluttransport durch den Körper (vgl. Abs. 3.2). Das vegetative Nervensystem nutzt zur Leistungsanpassung des Organismus an innere und äußere Zustandswechsel zwei Teilsysteme – den Sympathikus (allg. Leistungssteigerung) und den Parasympathikus (allg. Erholungsprozesse) – deren jeweilige Dominanz an Kenngrößen abgelesen werden kann (vgl. Abs. 1.1). In ihrer Arbeit von 1995 konnten Tyrrell, Thayer, Friedman, Leibowitz & Francis aus intraindividuellen Variationen einzelner kardiovaskulärer Parameter die dazugehörigen Ruhelagen der Akkommodation vorhersagen. In einer weiteren Studie von 2000 replizierten Tyrrell, Pearson & Thayer diesen Befund und fanden zusätzlich, daß eine Steigerung der Herzrate (Herzschläge pro Minute) bei einer Leseaufgaben in der Nähe (6,67 D; 15 cm) mit einer Verlagerung der Dunkelruhelage in die Nähe einherging. Des weiteren zeigten die gleichen Autoren, daß sich eine Ruhelagenverschiebung nur bei einer leichten Leseaufgabe (leichte kognitive Anforderung) zeigen ließ und bei einer schweren Leseaufgabe (schwere kognitive Anforderung) ausblieb. Die Leseaufgabe wurde für 20 min absolviert und die Herzrate nahm erwartungsgemäß mit der Schwere der Aufgabe zu. In beiden erwähnten Arbeiten wurde die Akkommodation in ihrer Dunkelruhelage nach der Aufgabenbearbeitung betrachtet. In einer neueren Arbeit von Davies, Wolffsohn & Gilmartin (2005; vgl. BCOVS Abstracts 2003) wurde die Akkommodation während der Bearbeitung unterschiedlich schwerer Aufgaben gemessen und die Autoren konnten zeigen, daß sich die Akkommodation mit Zunahme der Aufgabenschwierigkeit von der Sehentfernung der Informationspräsentation in die Ferne verlagerte, während gleichzeitig die Herzrate zunahm. Beide Veränderungen wurden als Verschiebung innerhalb der vegetativen Dominanz interpretiert (vgl. Abs. 2.3). Trotz der Ergebnisse der erwähnten Studien ist die Frage, ob sich die Akkommodation in der Nahsehsituation unter kognitiven Anforderungen tatsächlich ändert, aus der derzeit vorliegenden Literatur nicht eindeutig zu beantworten (vgl. Abs. 2.2). Neben den erwähnten Studien gelangten andere Arbeiten zu widersprüchlichen Ergebnissen; eine Reihe optischer wie nicht-optischer Einflußfaktoren scheinen als Grund einer Veränderung der Akkommodation ebenfalls möglich. Um zusätzlich eine mögliche Differenzierbarkeit der Stärke der kognitiven Anforderungen in der Akkommodationsreaktion methodisch abzusichern, wurde in dieser Arbeit versucht, alle in der Literatur beschriebenen Hinweise auf eine möglichst fehlerquellenfreie Messung der Akkommodation umzusetzen. Darüber hinaus stellt sich die Frage, nach der Robustheit der vermuteten Verbindung zwischen kardiovaskulären Maßen und Brechwertänderungen der Linse unter kognitiven Anforderungen.

Es ist zudem aus der Literatur bekannt, daß sich die Akkommodation unter kognitiven Aufgaben für unterschiedliche Fehlsichtigkeiten (Emmetropie: Normalsichtigkeit;

Myopie: Kurzsichtigkeit; Hyperopie: Weitsichtigkeit/Übersichtigkeit) des Auges möglicherweise unterschiedlich ändert (Bullimore et al., 1992; Ciuffreda & Lee, 2002; Wolffsohn et al., 2003), so daß für die vorliegende Arbeit nur Befunde für normalsichtige Personenstichproben ausgewählt wurden und sich die Darstellung der Ergebnisse nur auf normalsichtige Personen bezieht.

Vor einer Schilderung der durchgeführten Experimente, sollen im Folgenden die allgemeine Funktionsweise der Änderung der Augenlinsebrechkraft und der Herzmuskulatur kurz beschrieben werden.

1.1 Das vegetative Nervensystem und die Wirkung kognitiver Anforderungen – eine allgemeine Einleitung

Das vegetative Nervensystem des Körpers (VNS; auch als autonomes Nervensystem bezeichnet) koordiniert die Organfunktionen im Organismus (glatte Muskulatur, Herzmuskulatur, endokrine Drüsen) und kann schnelle Umstellungen der Organaktivitäten auslösen, ohne das Bewußtsein hinzuzuziehen. Auf diesem Weg paßt das VNS – gemeinsam mit dem endokrinen System und ausgehend vom Hypothalamus und Hirnstamm – die Gesamtfunktion der Organismusversorgung an die augenblickliche Tätigkeit des Körpers an. Um eine ständige Anpassung zu gewährleisten, steht das zentrale VNS (Gehirn und Rückenmark) über das periphere VNS in ständigem Informationsaustausch mit den Zielorganen. Das periphere VNS besteht aus zwei Teilsystemen – dem Sympathikus (S) und dem Parasympathikus (PS) – die an den meisten Zielorganen gegensätzlich wirken und je nach Organ selbst exzitatorische (aktivierende; z. B. über beta-(β)-Rezeptoren im S) oder inhibitorische (hemmende; z. B. über alpha-(α)-Rezeptoren im S) Kontaktpotentiale an den Organzielzellen auslösen. Beide Teilsysteme wirken antagonistisch, um neben einer kurzfristigen Anpassung des Organismus an wechselnde Anforderungen fortlaufend die Homeostasis im Körper wiederherzustellen. D. h. daß kurzfristige Verschiebungen innerhalb des Gleichgewichts zwischen Sympathikus und Parasympathikus mittelfristig durch eine Aktivierung des jeweils anderen Teilsystems ausgeglichen werden. Der Sympathikus beeinflusst ein Zielorgan adrenerg – d. h. mit Adrenalin oder Noradrenalin als Transmittern an adrenergen Rezeptoren – und steht im wesentlichen im Dienste der Leistungssteigerung, während die Erregungsübertragung des Parasympathikus cholinerg – d. h. mit Acetylcholin als Transmitter an muskarinischen Rezeptoren – vermittelt wird und hauptsächlich Erholungs- und Aufbauprozessen dient. Beide Teilsysteme entfalten überdies ihre Wirkung in unterschiedlichen Zeitfenstern: während der Parasympathikus sehr organ-spezifisch und schnell wirken kann, zeigt sich eine sympathische Regulation eher organ-unspezifisch und eher spät (nach 30 - 40 s) (vgl. Benarroch, 1993 & 1997; Birbaumer & Schmidt, 1991; Deetjen et al., 2005; Golenhofen, 2000; Speckmann & Wittkowski, 1994).

In der Frage der kognitiven Anforderungen an den Menschen geht man gewöhnlich von folgenden Annahmen aus: a.) unterschiedliche Anforderungen führen zu Effizienzunterschieden in der kognitiven Leistung, b.) es gibt eine positive Beziehung zwischen Aufgaben- bzw. Anforderungskomplexität und der zur Aufgabenbewältigung benötigten

kognitiven Kapazität und c.) steigt die benötigte kognitive Kapazität, so wird sie von physiologischen Veränderungen im Organismus begleitet, die über Indikatoren gemessen werden können. Für die letzte Annahme gibt es jedoch oftmals keine klaren Angaben, wie genau eine Abstufung der benötigten kognitiven Kapazitäten in einer klar differenzierbaren Abstufung im Indikator mündet. Einige hypothetische Ansätze für eine Regulation der unterschiedlichen Indikatoren im Organismus sind z. B. bei Backs & Boucsein (2000), Gordon (2001) oder Mulder et al. (2000) zu finden. Zumeist wird grundlegend ein dreistufiger Ablauf der anforderungsbezogenen Regulation im VNS angenommen: eine sofortige kurze parasympathische Reaktion des Organismus auf den Reiz/die Anforderung hin, dann eine sympathische anforderungsbezogene und zeitlich auf die Anforderung angepaßte Reaktion mit gleichzeitiger parasympathischer Inhibierung und abschließend eine länger anhaltende parasympathische Ausgleichsreaktion, die den Ausgangszustand wiederherstellt („parasympathetic rebound“) (vgl. z. B. Backs & Boucsein, 2000; Gilmartin, 1998).

Für die Akkommodation der Augenlinse und die weiteren in dieser Arbeit betrachteten Indikatoren der Veränderungen im VNS sollen deren physiologischer Hintergrund und ihre erwartete Veränderung unter kognitiver Belastung im Folgenden dargestellt werden.

2 Die Veränderung der Augenlinsenbrechkraft (Akkommodation)

Das Auge ist im entspannten Zustand auf das Sehen in der Ferne eingestellt, ferne Gegenstände werden scharf auf der Retina abgebildet. Werden Gegenstände in der Nähe oder wechselnden Entfernungen betrachtet, so verändert das Auge seine Brechkraft dynamisch und sorgt so für eine immer scharfe Abbildung der betrachteten Gegenstände. Diese Veränderung der optischen Eigenschaft des Auges über die Anpassung der Augenlinsenkrümmung an wechselnde Sehentfernungen nennt man Akkommodation. Bei der Akkommodation auf z. B. die Nähe wird die Brechkraft der Linse verstärkt.

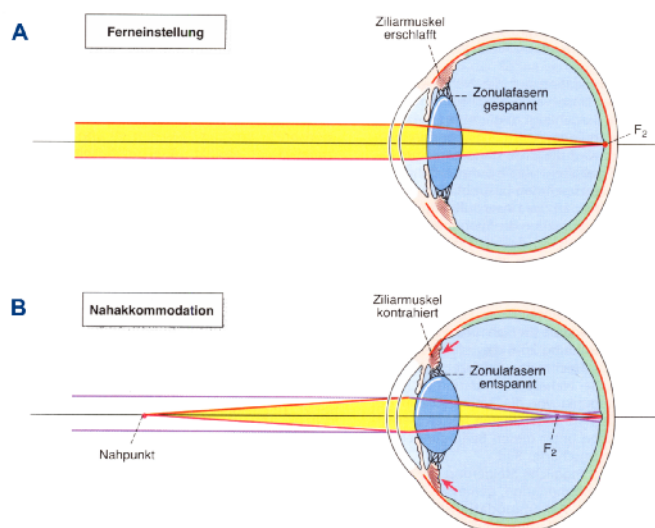


Abbildung 1: Veränderungen im Auge bei Akkommodation auf die Nähe. A: Einstellung auf die Ferne; der Brennpunkt liegt bei Normal-sichtigkeit auf der Retina. B: Akkommodation auf die Nähe; die Brechkraft der Linse ist erhöht, die Strahlen vom Nahpunkt werden auf der Retina vereinigt; der Brennpunkt für die Ferne liegt vor der Retina. [Abbildung entnommen aus: Golenhofen (2000), Physiologie heute, Seite 461]

Die refraktiven Eigenschaften der Linse entstehen allgemein aus der hohen Kristallinkonzentration in den gleichmäßig ausgerichteten Linsenfasern und der Krümmung der Linsenoberfläche. Durch die hohe Kristallinkonzentration erhält die Linse einen deutlich höheren refraktiven Brechwert als die umgebenden Augenflüssigkeiten. Die Linse als kugelförmiger Faserkomplex ist an Zonulafasern aufgehängt, die in der Nähe des Linsenäquators entspringen und die unter einer ständigen Spannung stehen. Dadurch wird die Linse fortlaufend in einer flacheren Form gehalten, als sie aufgrund ihrer Eigenelastizität – vermittelt durch die Eigenschaften der Linsenhülle – anzunehmen bestrebt ist. Die dynamische Anpassung der Linsenkrümmung im Rahmen der Akkommodation erfolgt über den Ziliarmuskel: er nutzt zur Kontraktion longitudinale, radiale und zirkuläre Muskelfasern und eine Kontraktion resultiert in einer vorwärts und nach innengerichteten Verlagerung der Ziliarmuskelmasse. Dadurch erzeugt er eine Entspannung der Linsenaufhängung (Zonulafasern), so daß sich bei seiner Kontraktion die Linse aufgrund ihrer Eigenelastizität krümmt und geringfügig aufgrund ihrer Masse absinkt (vgl. Abb. 1). Die Brechkraft der Linse wird in Dioptrien (D; 1/m) angegeben. Interessanterweise erfolgt die Akkommodation ganz überwiegend durch zunehmende Krümmung der Linsenvorderfläche; der Abstand zwischen Linse und Retina bleibt praktisch unverändert (vgl. Alpern, 1969; Golenhofen, 2000; Kaufman & Alm, 2003).

Zusätzlich ist zu bedenken, daß die Akkommodation nicht perfekt auf den Sehreiz eingestellt wird, wenn die Sehreize in die Nähe gebracht werden. Die Akkommodation verbleibt mit wachsender Nähe der Sehreize zunehmend hinter dem physikalisch erwarteten Wert zurück; es handelt sich hier um das bekannte „lag of accommodation“ (vgl. Abs. 5.1.3; Alpern, 1969; Deetjen et al., 2005; Golenhofen, 2000; Kaufman & Alm, 2003).

Typischerweise werden Akkommodationsänderungen monokular untersucht, da man bei monokularem Blick keinen Einfluß der binokularen Vergenz, d. h. der disjunkten Augenbewegungen, auf die Akkommodation ermöglicht.

2.1 Der physiologische Hintergrund

Die Akkommodation wird primär durch die parasympathische Innervierung des Ziliarmuskels über muskarinische Rezeptoren kontrolliert, die im wesentlichen für eine schnelle Kontraktion des glatten Muskels in Zeitfenstern von 1 - 2 s sorgen. Darüber hinaus wirken am Ziliarmuskel auch sympathische Einflüsse – und zwar hemmende über beta-(β)-Adrenozeptoren, die geringe (≤ 2 D) Veränderungen in Zeitfenstern von 20 - 40 s bewirken und von der aktuellen parasympathischen Hintergrundaktivierung abhängig sind (vgl. Gilmartin, 1998; Hurwitz et al., 1972; Winn et al., 2002). Die Abhängigkeit von der parasympathischen Grundaktivierung ist in zweierlei Weise zu verstehen: zum einen bedeutet eine stärkere parasympathische Aktiviertheit (d. h. eine stärkere Nahakkommodation) eine stärkere Inhibition durch den Sympathikus und zum anderen tritt diese Inhibition erst bedeutsam auf, wenn eine ausreichende Grundaktivität des Parasympathikus vorliegt (vgl. Winn et al., 1991). Zusätzlich gibt es Hinweise, daß auch alpha-(α)-adrenerge Rezeptoren den Ziliarmuskelnkörper im Volumen beeinflussen, aber auf die Akkommodationsänderung eher weniger Einfluß nehmen (Chen et al., 2003; Hurwitz et al., 1972; Ostrin & Glasser, 2004). Damit

vereint der Ziliarmuskel ebenfalls eine Art Sympathikus-Parasympathikus-Antagonismus in einem Muskel und erlaubt dadurch eine sehr fein abgestimmte Anpassung an unterschiedliche Akkommodationsanforderungen. Zusätzlich wird in der Literatur als funktionale Erklärung der hemmenden sympathischen Einflußnahme am Ziliarmuskel diskutiert, daß er der Verringerung der Akkommodation nach längeren Nahsehaufgaben diene; zum einem, um transiente Pseudomyopien zu reduzieren und zum anderen, um Adaptationsprozessen, die z. B. das Augenlängenwachstum regulieren, keine strukturelle Anpassung des Auges an die aktuelle Situation durchführen zu lassen (Gilmartin, 1998; Kaufman & Alm, 2003). In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, daß es in der Literatur Hinweise gibt, daß nur ca. 30 - 40 % aller Personen einen hemmenden sympathisch-vermittelten Einfluß auf die Akkommodation in Nahsehsituationen zeigen; nachgewiesen wird ein sympathetisch-vermittelter Einfluß am Ziliarmuskel im übrigen vielfach über die Schnelligkeit der Regression der Akkommodation auf ihr Ruhelagenniveau nach einer Nahsehaufgabe – wirkt der Sympathikus hemmend, so erreicht die Akkommodation schneller ihr Ruhelagenniveau (Chen et al., 2003; Gilmartin, 1998; Gilmartin et al., 2002; Mallen et al., 2005). Hinzu kommt, daß der sympathische Einfluß auf die Akkommodation unter Sehbedingungen im geschlossenen Akkommodationsregelkreis eher eine untergeordnete Rolle spielt und praktisch keinen meßbaren Einfluß auf die funktionellen, z. B. sehabstandsabhängigen, Akkommodationsanpassungen ausübt (Mallen, 2005). Der Ziliarmuskel ist zudem ein untypischer glatter Muskel, da er z. B. in Eigenschaften wie der Geschwindigkeit der Kontraktion oder der Zellstruktur eher der gestreiften Muskulatur nahekommt. Ebenso wie die Pupilleninnervierung entspringt die parasympathische Innervierung des Ziliarmuskels dem Erdinger-Westphal-Nukleus und ist für beide Augen gleich – die Ausführung der intraokularen Muskelreaktionen ist gekoppelt. Der wesentlichste Reiz, um eine Akkommodationsreaktion im geschlossenen Regelkreis auszulösen, ist die Bildunschärfe auf der Retina (Alpern, 1969; Kaufman & Alm, 2003).

2.2 Die Änderung der Akkommodation unter kognitiven Anforderungen

Allgemein werden die Reize und Bedingungen, die eine Änderung der Linsenbrechkraft bewirken, in optische (z. B. Kontrast oder Unschärfe) oder nicht-optische (z. B. Nähe oder kognitive Anforderungen) eingeteilt (Rosenfield & Ciuffreda, 1990). Betrachtet man neben den bereits dargestellten Arbeiten (vgl. Abs. 1) den Stand der Literatur zur Frage, ob sich die Akkommodation unter kognitiven Anforderungen in Nahsehsituationen verändert, so erhält man keine eindeutige Antwort.

Keine Änderung der Akkommodation...

... fanden Wolffsohn et al. (2003) für 6 normalsichtige Personen, wenn diese monokular in einem Sehabstand von 4,5 D (ca. 22 cm) Additionsaufgaben auf ihre Richtigkeit hin überprüften. Die Aufgaben wurden jeweils 5 min lang in der Nähe und direkt anschließend in der Ferne (0 D) bearbeitet. Die Akkommodation wurde mit einem modifizierten Shin-Nippon SRW 5000 Autorefraktometer gemessen (vgl. Abs. 5.1.2). Rosenfield & Ciuffreda (1990)

berichteten ebenfalls keinen Unterschied, wenn Personen entspannt Musik hörten oder in Siebenersritten rückwärts zählten, während sie einen monokularen Reiz in 3 D (ca. 33 cm) bzw. 0,17 D (6 m) Entfernung fixierten. Jede Aufgabe wurde 60 s lang bearbeitet und die Stichprobe enthielt emmetrope (normalsichtige), myope (kurzsichtige) wie auch hyperope (weitsichtige) Versuchsteilnehmer, deren Fehlsichtigkeiten gegebenenfalls mit Kontaktlinsen auf einen Visus von 1 (in dezimalen Einheiten) korrigiert wurden. Gemessen wurde die Akkommodation in dieser Studie mit dem Canon R1 Autorefraktometer (vgl. Abs. 5.1.2) und kontrolliert wurde das Ergebnis der Rückwärts-Zähl-Aufgabe am Ende der Bearbeitung durch eine simple Abfrage der erreichten Zahl.

Eine Zunahme der Akkommodation....

... berichteten dagegen Winn et al. (1991); die Akkommodation verstärkte sich um 0,17 D, wenn die zehn emmetropen Versuchsteilnehmer monokular auf einen Zielreiz in einer Buchstabenpräsentation reagieren sollten anstatt die Buchstaben nur zu lesen. Wurde die Buchstaben-Lese-Bedingung allerdings mit einer Bedingung verglichen, in der die Versuchsteilnehmer die Buchstaben zwar betrachteten, parallel aber in Siebenersritten rückwärts zählten, so konnte keine Veränderung in der Akkommodation festgestellt werden. Die Buchstabenreize wurden in einer Sehentfernung von 3,5 D (ca. 28 cm) für 3 min präsentiert und die Akkommodation wurde ebenfalls mit dem Canon R1 gemessen. Nur die Rückwärts-Zähl-Aufgabe wurde auf der Verhaltensebene ebenfalls summativ am Ende durch eine Abfrage des Ergebnisses kontrolliert. Der Vollständigkeit halber seien weitere Arbeiten erwähnt, die nicht unmittelbar klassische Nahsehbedingungen enthalten: in einer Studie von Edgar & Reeves (1997) wurde eine Verstärkung der Akkommodation um ca. 0,20 D beobachtet, wenn Personen binokular auf eine natürliche Bildszene mit einer überlagerten, visuellen Aufgabe blickten. Allerdings befand sich die Sehebene in dieser Arbeit nicht in der Nähe, sondern in ca. 0,5 D (2 m) Entfernung. Unter gleichfalls eher natürlichen, binokularen Sehbedingungen – bei einer Fahrsimulation – fanden Wolffsohn et al. (1998) ebenfalls eine Zunahme der Akkommodation von ca. 0,3 D unter höheren kognitiven Anforderungen, während die 24 Versuchsteilnehmer mit Sehreizen in ca. 1,8 D (55 cm) komplexe Aufgaben bearbeiteten und ihnen dazu Hinweisreize in 0,17 D (6 m) dargeboten wurden. In dieser Studie zeigte sich unter anderem, daß die Akkommodationszunahme über die Abstufungen der kognitiven Anforderungen hinweg mit dem Alter der Versuchsteilnehmer variierten; die Akkommodationszunahme war für die Gruppe der „jungen Fahrer“ (19 - 24 Jahre) am deutlichsten. Die Leistungsmaße für die Ausführung der komplexen Reaktionsaufgabe wurden kontrolliert und die Akkommodation mit einem modifizierten Canon R1 Autorefraktometer gemessen. Ebenfalls eine Zunahme der Akkommodation um ca. 0,15 D berichtete Iwasaki (1993), als er 20 weibliche Versuchsteilnehmer monokular die Richtigkeit von Additionsaufgaben in einem Sehabstand von 2 D (50 cm) unter erhöhtem Zeitdruck beurteilen ließ. Die Versuchsteilnehmerinnen waren normalsichtig und die Anzahl der richtigen Beurteilungen wurde aufgezeichnet. Es gab vier Aufgabenvarianten: zum einen wurden die Additionsaufgaben für 4 s oder 2 s präsentiert; zum anderen sollten die Versuchsteilnehmer entweder so schnell wie möglich auf den Wechsel der Präsentation reagieren (Kontrollbedingung) oder die dargestellte Rechnung auf Richtigkeit prüfen. Es ist

aus der Arbeit nicht zu entnehmen, ob die Reihenfolge der Aufgabenbearbeitung über die Personen hinweg randomisiert worden war; ebenfalls unklar bleibt, ob die Versuchsteilnehmerinnen alle Bedingungen absolviert hatten. Die Aufgaben wurden für jeweils 15 min bearbeitet und die Akkommodation alle 5 min für 20 s gemessen. Die Ergebnisse wurden als Mittelwerte über diese 20-s-Abschnitte berichtet und auch auf ihre Veränderung über die 15-min-Blöcke hinweg überprüft. Die Akkommodation wurde mit einem Nidek AR2000 Auto-refraktometer gemessen. Die berichtete Akkommodationszunahme ergab sich hier als Anstieg über die gesamte 15 minütige Bearbeitungsphase. Zuvor wurde auch in einer Arbeit von Kruger (1980) gezeigt, daß sich die Akkommodation um 0,28 D im Vergleich zu einer „Lese“-Bedingung verstärkte, wenn zweistellige Zahlen „addiert“ werden mußten. Die Aufgaben wurden für 30 s in einer Entfernung von 2,5 D (40 cm) bearbeitet und waren nur für ein Auge sichtbar. Die 40 Versuchsteilnehmer trugen ihre Brillen und es ist nicht ersichtlich, welche Fehlsichtigkeiten toleriert wurden. Zusätzlich wurden die Versuchsteilnehmer in eine Experimental- und eine Kontrollgruppe aufgeteilt. Ein Meßblock bestand für die Experimentalgruppe aus 30 s „Lesen“ zweistelliger Zahlen mit einer direkt anschließenden Phase von 30 s „Addieren“; für die Kontrollgruppe bestanden beide 30-s-Abschnitte aus der Lese-Aufgabe. Die zweistelligen Zahlen wurden für jeweils 1,5 s und mit Pausen von 1,5 s zeitlich aufeinanderfolgend präsentiert. In jeweils 10 Zahlen kamen 6 leichte (z. B. 05, 08) und 4 schwere (z. B. 46, 78) vor. Auch hier wurden die Versuchsteilnehmer, welche „addierten“, nach der Bearbeitung nach dem Schwierigkeitsgrad befragt; Verhaltensdaten liegen hier allerdings nicht vor. Die Akkommodation wurde in dieser Studie mit einem Infrarot-Retinoskop gemessen und die dargestellten Ergebnisse zeigten keinen Unterschied in der Akkommodation für die Kontrollgruppe.

Eine Abnahme der Akkommodation...

... berichteten etwa zur gleichen Zeit Malmstrom et al. (1980), wenn zusätzlich zu einer Fixieraufgabe in 3 D Sehentfernung (ca. 33 cm) eine Rückwärtszählaufgabe bearbeitet wurde. In dieser Studie wurden 5 normalsichtige Personen untersucht und ein zentrales Fixierkreuz in zwei Entfernungen – 0 D und 3 D – für nur ein Auge sichtbar präsentiert. Für 30 s sollten die Versuchsteilnehmer nur fixieren und anschließend, auf eine Anweisung hin, von einer Startzahl aus im Takt des Taktgebers (1-s-Takt) rückwärts zählen. Die Zahlen wurden auf einem Blatt unterhalb des rechten Armes notiert – und zwar in der folgenden Art und Weise: begann man mit 71, schrieb man direkt eine 7 (die Zehnerstelle) und eine 1 während der nächsten Sekunde. Nach dem nächsten Takt zog man dann eine Eins ab, erhielt 70 und schrieb wieder eine 7; nach einer weiteren Sekunde schrieb man eine 0 usw. Während der gesamten Bearbeitung sollte aber so genau wie möglich weiter fixiert werden und die reine Fixieraufgabe wurde immer vor der „Fixier & Zähl“-Aufgabe bearbeitet. Wurden die Akkommodationsdaten in 5-s-Blöcken zusammengefaßt, so nahm die Akkommodation nur in der 3 D Sehabstandsbedingung und auch in dieser Sehbedingung nur über den 30-s-Verlauf signifikant ab. Wichtig erschien den Autoren hier, daß die Akkommodation auch bereits abnahm, als den Versuchsteilnehmern in den ersten 5 s der „Fixier & Zähl“-Aufgabe die Instruktion und die Startzahl genannt wurden. Malmstrom et al. (1980) schlossen ein weiteres Experiment an, in dem sie wieder ein Fixationskreuz in 0 D und 3 D präsentierten

und diesmal zusätzlich zur „Fixier“-Instruktion die Versuchsteilnehmer aufforderten, sich das Fixierkreuz entweder so nah wie möglich oder so fern wie möglich vorzustellen. Die Autoren wollten so prüfen, ob sich die akkommodative Einstellung bzgl. des tatsächlichen Sehabstandes durch eine vorgestellte Entfernung veränderte und damit der „visual capture“-Effekt (Posner et al., 1976) für das präsentierte Fixierkreuz geschwächt werden konnte; diese Lockerung der Feineinstellungen auf das visuelle Objekt hin ließe dann den nötigen Spielraum für kognitiv-induzierte Effekte. Bis dahin war der ersten Studie nicht zu entnehmen, ob die Akkommodationsverringering in der 3 D Nahsehsituation vielleicht auch nur Folge der manuellen Schreibaufgabe, also der motorischen Beantwortung, der nicht mit der visuellen Information zusammenhängenden kognitiven Anforderung war. Allerdings konnte in den Akkommodationsdaten kein Unterschied zwischen den „Denk nah“- und „Denk fern“-Instruktionen gefunden werden. Malmstrom et al. (1980) berichten zusätzlich, daß es eine allgemeine Tendenz in den Daten gab: die Akkommodationseinstellung für die 3 D Nahsehsituation nahm im Laufe der 30 s Meßzeit stetig leicht ab, unabhängig von der gestellten Aufgabe (vgl. auch Kruger (1980) für eine ähnliche stetige Abnahme der Akkommodation in der Kontrollgruppe).

In Bezug auf die Richtung der Akkommodationsveränderung in der Nahsehsituation kamen Bullimore und Gilmartin (1988) zu ähnlichen Ergebnissen, als sie 12 Personen für 2 min Reihen und Spalten von Zahlen lesen oder addieren ließen. Interessanterweise berichteten diese Autoren, daß die Akkommodation zunahm, wenn die Zahlen bei einem Sehabstand von 1 D (1 m) gezeigt wurden und sich keine Veränderung zeigte, lasen und addierten die Personen die Zahlen in einer Entfernung von 3 D (ca. 33 cm) vom Auge. Wurde der Sehabstand allerdings auf 5 D (20 cm) verkürzt, so nahm die Nahakkommodation um 0,04 D ab (vgl. auch Bullimore et al., 1992, für ähnliche Ergebnisse für 14 emmetrope Personen). In dieser Arbeit wurden die Akkommodationsdaten mit einem modifizierten Canon R1 erhoben und die Versuchsteilnehmer waren normalsichtig. Die Zahlen wurden in einer 5 x 5 Zeichenmatrix präsentiert und die Datenerhebung fand zusätzlich unter zwei Bedingungen statt: der Gabe einer Salzlösung oder Timolol maleate; letzteres ist ein beta-(β)-Rezeptor-Antagonist (vgl. Abs. 2.1) und inhibiert damit die sympathische Einflußnahme am Ziliarmuskel. Die Akkommodationsmessungen wurden über eine „Lese“- bzw. „Addier“-Phase von 2 min aufgezeichnet (ca. 100 Werte) und die Abfolge des Fixiermusters der einzelnen Zahlen vorgegeben: jede Zahl sollte kurz fixiert werden und Zeilen von rechts nach links und Spalten von oben nach unten durchgearbeitet werden. „Lese“- und „Addier“-Aufgaben wurden in ihrer Reihenfolge zufällig gewählt und zwischen den 2-min-Blocks befand sich eine kurze Pause. Die Zahlenmatrix wurde binokular gesehen, die Akkommodation aber wiederum nur monokular erfaßt. Die kognitiv-induzierte Akkommodationsabnahme in der 5 D Nahsehsituation wurde in dieser Arbeit nur für die Salzlösungsbedingung gefunden; unter Timolol maleate kehrte sich die Richtung der Veränderung um.

Wie bereits eingangs erwähnt (vgl. Abs. 1), beschrieben Davies et al. (2005) für 8 normalsichtige Personen eine Abnahme der Akkommodation, wenn die Versuchsteilnehmer eine Zwei-Alternativen-Wahlaufgabe mit steigender Schwierigkeit in einer Sehentfernung von 0 D (Unendlich; > 5 m) und 3 D (33 cm) bearbeiteten. Es wurden Zahlen von 1 bis 100 zufällig monokular für 5 min präsentiert und die Versuchsteilnehmer mußten mit

einem Tastendruck reagieren, wenn die gezeigte Zahl zwischen 25 und 74 lag. Dabei wurden fünf Schwierigkeitsstufen individuell als die Präsentationsgeschwindigkeiten der Zahlen festgelegt, bei der die Versuchsteilnehmer 0 %, 12,5 %, 25 %, 37,5 % und 50 % Fehler machten. Die Akkommodation nahm für beide Sehentfernungen mit dem Anstieg der Schwierigkeit signifikant ab – um insgesamt ca. 0,16 D für die Zunahme der Schwierigkeit von 0 % Fehler auf 50 % Fehler für die Präsentation der Sehreize in der unendlichen Sehentfernung und um ca. 0,24 D für die gleiche Schwierigkeitssteigerung in der Nahsehsituation von 3 D. Die Herzperiode nahm im übrigen ebenfalls um ca. 60 ms zwischen den Bedingungen 0 % und 50 % ab; zusätzlich stieg die normierte LF-Dichte der Herzperiodenvariabilität (von den Autoren interpretiert als Indikator einer parasympathischen Inhibierung), während die HF-Dichte abnahm (als Indikator einer sympathischen Aktivierung; vgl. Davies et al. (2005); Abs. 3.2). Die fünf Schwierigkeitsstufen ergaben fünf mittlere Akkommodationseinstellungen (gerechnet über die 8 Personen), die zu $r = 0,95$ mit den mittleren Herzperioden korrelierten. Es konnte also aus der mittleren Akkommodation der Schwierigkeitsstufe, die mittlere Herzperiode für die Stichprobe mit einer Varianzaufklärung von 90 % vorhergesagt werden.

Betrachtet man den Stand der Literatur, so ergibt sich zusammenfassend kein einheitliches Bild. Im Folgenden werden alle diskutierten Erklärungsansätze zu den beobachteten Veränderungen dargestellt.

2.3 Erklärungsansätze der beobachteten, kognitiv induzierten Akkommodationsänderung

Da in der Literatur zu Akkommodationsänderungen unter kognitiven Anforderungen Effekte in beide Richtungen – also sowohl Akkommodationszunahmen als auch -abnahmen – beschrieben wurden, gibt es auch dementsprechend unterschiedliche Vorstellungen, wie es zu diesen Veränderungen kommt. Dabei ist zu bedenken, daß eine Veränderung der Akkommodation unter visuell präsentierter Information und in festgelegten Sehabständen immer aus einer Mischung aus optischen (z. B. ruhelagen- oder unschärfebezogenen) und nicht-optischen Ursachen bestehen kann. Zu letzteren gehört neben einer kognitiven Anforderung auch die wahrgenommene Nähe eines Sehreizes (Rosenfield & Ciuffreda, 1990). Gleichzeitig bedeutet eine visuelle Präsentation der zu bearbeitenden Aufgaben auch eine Begrenzung der Veränderungsmöglichkeiten der Akkommodation durch optische Regelungsreize (Winn et al., 1991). So kann z. B. die Ruhelage des Akkommodationssystems von den wahrgenommenen Umgebungsraumproportionen abhängen oder durch kognitive Aktivitäten verändert werden – und damit eine veränderte systeminterne Ausgangslage der Akkommodationsreaktion schaffen (vgl. z. B. Bullimore & Gilmartin, 1987; Mallen et al., 2005; Winn et al., 1991; Wolffsohn et al., 2003). Unter Berücksichtigung dieser und anderer Rahmenbedingungen haben sich mehrere Erklärungsansätze für eine Akkommodationszunahme unter kognitiver Anforderung herauskristallisiert und sich im wesentlichen eine dominierende Erklärung für den entgegengesetzten Effekt ergeben. Beide Sichtweisen werden im Folgenden kurz dargestellt.

Eine Zunahme der Nahakkommodation wurde mit einer willkürlichen Verstärkung der Akkommodation unter der stärker fordernden Aufgabe erklärt, um z. B. die Sehreize schärfer auf der Retina abzubilden und somit eine bessere Reizdiskrimination zu gewährleisten; hierbei spiele die aktivere Betrachtung der stärker fordernden Aufgabe eine Vermittlerrolle – hin zur präziseren Ausrichtung der Akkommodation auf die Sehentfernung. Ebenso wird die Vorstellung diskutiert, daß eine allgemeine Aufmerksamkeitszuwendung mit einer genaueren Akkommodationseinstellung auf die entsprechende Sehentfernung einhergeht (Edgar & Reeves, 1997; Francis et al., 1995; Kruger, 1980; Lawson et al., 2005).¹ Neben der Aufmerksamkeitszuwendung sei auch die kurze Sehentfernung, d. h. die Nähe der Sehreize relativ zur Ruhelage, ein Faktor, der eine verstärkte Akkommodation auf die visuell präsentierte Information auslöse und der mit der Stärke der kognitiven Anforderung interagiere (Iwasaki, 1993; Winn et al., 1991; Wolfsohn et al., 1998). Eine ähnliche Erklärung schlugen zuvor Ciuffreda (1991) und Rosenfield & Ciuffreda (1990) vor, indem sie die Akkommodationsänderung als durch einen optischen Reiz verursacht ansahen; kognitive Anforderungen haben eine Pupillenvergrößerung zur Folge (vgl. Abs. 3.1), die zu einer Verringerung des Schärfentiefenbereichs und damit zu einer Unschärfe auf der Retina führe. Diese Unschärfe („blur“) stimuliere im direkten Regelmechanismus die Akkommodation und richte die Linsenbrechkraft somit genauer auf die geforderte Sehentfernung aus. Auch hier ist zu bedenken, daß bei kurzen Sehentfernungen durch eine relativ größere Abweichung der Akkommodation vom geforderten Sehabstand („lag of accommodation“ vgl. Abs. 5.1.3) die Akkommodation im geschlossenen Regelkreis eher durch eine Verringerung des Schärfentiefenbereichs in eine Neueinstellung verfällt als bei größeren Sehabständen.

Interessanterweise berichteten Stark & Atchison (1994) von einer Veränderung der Akkommodation, wenn die Instruktion geändert wurde. Wurden die Personen aufgefordert, „genau hinzusehen“ anstatt ein bestimmtes Wort nur „zu betrachten“ so verringerte sich die Abweichung der Akkommodation von der erwarteten Linsenkrümmung – die Akkommodation nahm also relativ zur Entfernung mit dem Instruktionswechsel zu. Auch hier handelte es sich um einen nicht-optischen Einflußfaktor, der neben der kognitiven Anforderung eine Akkommodationsänderung auslösen kann und potentiell fälschlicherweise als anforderungsbezogen interpretiert werden könnte.

Warum die Akkommodation des Auges in exponierten Nahsehsituationen durch eine höhere kognitive Anforderung abnehmen sollte, wurde von Gilmartin (vgl. Gilmartin, 1998) über eine Veränderung im VNS erklärt; demzufolge führe eine erhöhte kognitive Anforderung zu einer parasympathischen Hemmung und / oder einer sympathischen Aktivierung (vgl. Abs. 2), die am Zielorgan, dem Ziliarmuskel, zu einer Verringerung der Linsenkrümmung – also einer Verringerung der Nahakkommodation – führe (Birnbäum, 1984; Bullimore & Gilmartin, 1988; Davies et al., 2004; Davies et al., 2005; Malmstrom et al., 1980; Winn et al.,

¹ Anmerkung: Interessanterweise wird eine aufmerksambasierende Erklärung anderenorts ebenfalls für eine Akkommodationsabnahme herangezogen; durch die parallele Denkaufgabe müsse die Aufmerksamkeitskapazität auf zwei Aufgaben verteilt werden und so leide die Genauigkeit der okulomotorischen Ausrichtung; die Akkommodation wandere in Richtung ihrer Ruhelage aus (vgl. Malmstrom et al., 1980).

1991). Diese Verringerung sei gemäß physiologischer Studien nicht unabhängig vom aktuellen Nahakkommodation-Status und trete deutlich meßbar erst ab Akkommodationszuständen größer als 4 D (entsprechend Sehabständen von weniger als 25 cm) auf (Bullimore & Gilmartin, 1987; Gilmartin, 1998). Für einen Sympathikuseinfluß spreche zudem, daß die Gabe einer neutralen Salzlösung zu einer Verringerung der Akkommodation unter einer kognitiven Anforderung führe, die Gabe eines Beta-(β)-Antagonisten – Timolol Maleate – die Akkommodation unter einer kognitiven Anforderung jedoch verstärke, obwohl für beide Bedingungen die Sehentfernung bei 5 D (20 cm) lag (Bullimore & Gilmartin, 1988; Gilmartin, 1998). Wie schon unter Absatz 2.1 bemerkt, ist allerdings an dieser Stelle zu beachten, daß nur ca. 30 - 40 % aller Personen einen hemmenden sympathisch-vermittelten Einfluß auf die Akkommodation unter Nahsehaufgaben zeigen.

Bereits 1984 wurde in einer Arbeit von Birnbaum diskutiert, ob nicht die unterschiedliche Einflußnahme der erwähnten optischen Faktoren in den experimentellen Umsetzungen ein Grund der heterogenen Ergebnislage sein könnte (vgl. auch Gilmartin, 1998). Obwohl physiologische und pharmakologische Arbeiten optische Faktoren eher ausschlossen, setzte sich die Serie der uneinheitlichen Ergebnisse fort.

Um alle zitierten Arbeiten in einer Übersicht darzustellen, werden in der folgenden Tabelle alle optischen und experimentellen Faktoren für jedes Ergebnis zusammengetragen und aufgelistet. Diese Tabelle bildet damit die Ausgangsbasis der experimentellen Rahmenbedingungen und Aufbauten, die für die durchgeführten Experimente gewählt wurden (vgl. Abs. 4); vor der Darstellung der Experimente schließt sich des weiteren eine kurze Beschreibung der zusätzlich betrachteten vegetativen Meßgrößen an.

Tabelle 1: Zusammenfassende Darstellung der Literatur zu Veränderungen der Akkommodation unter kognitiven Anforderungen (Die Richtung der Veränderung ist parallel zur Zunahme der kognitiven Anforderung zu verstehen). Alle berichteten Ergebnisse beziehen sich nur auf emmetrope Stichproben und Präsentationen der Aufgabeninformation in der Nähe.

Autor(en)	Ergebnis (in D)	Sehabstand (in D)	N	Verhaltens- maße	Präsentation der Sehreize	Aufgabe
Wolffsohn et al. (2003)	—	4,5	6	%-korrekt	monokular	Kontrolle von Additionsaufgabe für 5 min
Rosenfield & Ciuffreda (1990)	—	3,0	6	Abfrage des Endergebnisses	monokular	In Siebenerschritten rückwärts zählen (für 60 s)
Winn et al. (1991)	+ 0,17	3,5	10	Abfrage des Endergebnisses	monokular	Buchstaben lesen und in Siebenerschritten rückwärts zählen für 3 min
Wolffsohn et al. (1998)	+ 0,30	1,8	24	Reaktionszeiten	binokular	Reaktionszeitaufgabe
Iwasaki (1993)	+ 0,15	2,0	20	%-korrekt	monokular	Kontrolle von Additionsaufgaben unter Zeitdruck für 15 min
Kruger (1980)	+ 0,28	2,5	20 20	—	monokular	Lesen und Addieren zweistelliger Zahlen für jeweils 30 s (Kontrollgruppendesign)
Malmstrom et al. (1980); 1. Teil	ca. - 0,25	3,0	5	Abfrage des Endergebnisses	monokular	Parallelaufgabe: Fixieren und Rückwärtszählen im Takt für 30 s
Malmstrom et al. (1980), 2. Teil	—	3,0	5	—	monokular	Fixieren und Sehreiz in der Nähe bzw. Ferne vorstellen (für 30 s)
Bullimore & Gilmartin (1988) (vgl. auch Bullimore et al. (1992) mit N = 14)	— / - 0,04	3,0 & 5,0	12	Abfrage des Endergebnisses	binokular	Addieren und Lesen von Zeilen und Spalten einer 5x5-Zahlenmatrix unter der Gabe einer Salzlösung (2 min)
Davies et al. (2005)	- 0,16	3,0	8	%-korrekt	monokular	Zwei-Alternativen-Wahlaufgabe unter 5 Zeitdruckstufen für jeweils 5 min

Anmerkung: N: Anzahl der untersuchten Personen

%-korrekt: prozentualer Anteil der korrekten Antworten pro Bedingung

3 (Para)sympathische Begleiterscheinungen im Organismus – eine Auswahl

Neben der Akkommodation wurden in der vorliegenden Arbeit sowohl Pupillengrößenveränderungen als auch kardiovaskuläre Maße herangezogen, um eine vegetative Veränderung im Organismus zu indizieren. Dabei handelt es sich um klassische Indikatoren, deren Reaktion auf kognitive Anforderungen weitgehend aus der Literatur bekannt ist und die – zusätzlich zu betrachteten Verhaltensmaßen – eine Absicherung der Wirksamkeit der experimentellen Umsetzung der kognitiven Anforderungen sowie eine Art innerorganismische Plausibilitätsprüfung der erwarteten Veränderungen im VNS (vgl. Abs. 1) gewährleisten. Sollten sich demnach Veränderungen in den klassischen VNS-Indikatoren zeigen, so wäre damit eine Änderung in der Akkommodation zu erwarten, wenn sie auf ähnlichen Zustandsänderungen im VNS aufgrund von kognitiven Anforderungen beruhe. Die physiologischen Grundlagen der betrachteten VNS-Indikatoren werden im Folgenden kurz beschrieben, ebenso wie ihre Veränderung aufgrund kognitiver Anforderungen.

3.1 Änderungen der Pupillengröße

Die Pupille des Auges ist im Grunde eine runde Öffnung, durch die Licht ins Innere des Auges fällt. Die Veränderung der Pupillengröße – oftmals bestimmt über den Pupillendurchmesser – dient im wesentlichen drei Hauptfunktionen: in wechselnden Lichtintensitäten sorgt eine Pupillengrößenregulation für eine optimale Beleuchtung der Retina, um eine konstante visuelle Wahrnehmung zu erleichtern; darüber hinaus wird durch die Pupillenweitenänderung die Abbildungsqualität auf der Retina verbessert, da durch eine Verringerung des Pupillendurchmessers Aberrationen vermindert werden können; eine kleine Pupille vergrößert zudem die Schärfentiefe des Auges und erlaubt dadurch beim Nahsehen ein besseres Fokussieren (vgl. Kaufman & Alm, 2003; Wilhelm, 1998).

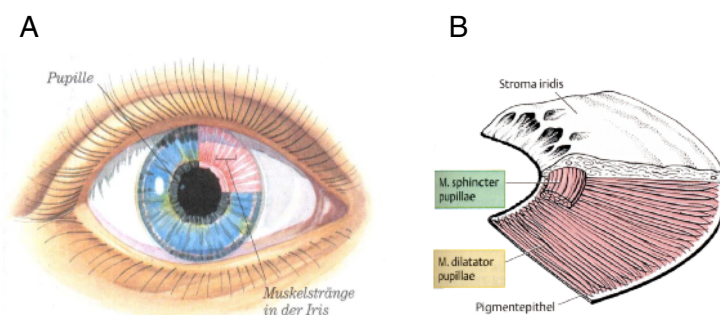


Abbildung 2: Die menschliche Pupille. A: vereinfachte Vorderansicht; B: vereinfachte Darstellung der Pupillenmuskeln; [Aus: Bähr & Frotscher (2003), Duus` Neurologisch-topische Diagnostik, Seite 159]

Die Größe der Pupille (1,5 - 9 mm) wird durch das Zusammenspiel zweier glatter Muskeln reguliert: dem parasympathisch innervierten Sphinkter und dem sympathisch innervierten Dilator. Beide zusammen ergeben die Iris; ihre Muskelfasern sind radiär und zirkulär angeordnet, so daß die Irisränder durch Kontraktionen zentral nach innen oder außen ge-

zogen werden können (vgl. Abb. 2). Die physiologische pupillomotorische Regulation beginnt im Erdinger-Westphal-Kern und unterliegt kortikalen wie subkortikalen Einflüssen – Freude, Angst, Streß oder Schmerz (vgl. z. B. Janisse, 1977; Masterman & Cummings, 1997). Im Grunde wird die Pupillenweitenregulierung über den Sphinkter vorgenommen und ist damit hauptsächlich parasymphischer Natur. Der Sympathikus erhöht über eine Dilatorkontraktion zwar die Geschwindigkeit der Pupillenerweiterung – und er trägt letztendlich zur maximal erreichten Erweiterung und auch zur Grundweite der Pupille bei – die lichtabhängige und nahinduzierte Anpassung verläuft aber ausschließlich über den parasymphischen Ast des VNS (vgl. z. B. Lowenstein & Loewenfeld, 1962; Loewenfeld, 1993; Wilhelm, 1998). Aufgrund ihrer physiologischen Eigenschaften wird die Pupillengröße, bzw. die Pupillenreaktion auf Lichtreize, unter anderem in der klinischen Diagnose gern dazu genutzt, den Wachheitszustand einer Person oder ihre Reaktion auf Medikamente / Drogen zu prüfen (vgl. Wilhelm, 1998).

Betrachtet man nun die Pupillenreaktion unter kognitiven Anforderungen, so erwartet man eine Pupillenerweiterung, die auf unterschiedlichen Mechanismen beruhen kann, z. B. einer Aktivierung des sympathischen Einflusses oder einer Hemmung am Erdinger-Westphal-Kern (Matthews et al., 1991) oder einer Mischung aus beidem (Goldwater, 1972; Lowenstein & Loewenfeld, 1962). Seit den klassischen Arbeiten von Bradshaw (1967), Hess & Polt (1964) oder Kahnemann & Beatty (1966, 1967) geht man davon aus, daß die Pupillenerweiterung nicht nur eine zunehmende kognitive Aktivität widerspiegelt, sondern auch direkt zum Grad der Komplexität oder Schwierigkeit in Beziehung gesetzt werden kann und den kognitiven Informationsverarbeitungsprozeß im Profil nachzeichnet (vgl. zusammenfassend Goldwater, 1972; Janisse, 1977). Dabei ist allerdings zu beachten, daß Veränderungen der Pupillengröße, die kleiner als 5 % sind, auch in der Literatur kontrovers diskutiert werden – auch wenn sie statistisch signifikant sind (Hess et al., 1975). Die Argumente, die in solchen Fällen gegen die Interpretation einer kognitiv-induzierten Veränderung der Pupillengröße sprechen, ergeben sich aus den allgemein zu beobachtenden Veränderungen in der Pupillenweite: sie schwankt im Durchmesser von Sekunde zu Sekunde um ca. 1 % und um ca. 10 - 20 % über Sekunden (vgl. z. B. Woodmansee, 1966). Darüber hinaus können auch Ermüdung und Lichtreflexe zu Veränderungen von 1 - 3 % der Pupillengröße führen (vgl. z. B. Hess et al., 1975; Woodmansee, 1966). Ein weiteres wesentliches Argument ist die Beobachtung, daß sowohl sensorische Reize, empfundene Emotionen oder spontane Gedanken die Pupille kurzzeitig erweitern können; hierbei spielt z. B. die Unerwartetheit oder Neuheit der Reize eine entscheidende Rolle, so daß eine kurzzeitige Pupillenerweiterung („pupillary reflex dilatation“) als Teil der Orientierungsreaktion (Goldwater, 1972)) eher eine unspezifische Veränderung oder die Unsicherheit einer Situation (O’Neill & Zimmermann, 2000) widerspiegelt – ohne zwingend eine mögliche Folge kognitiver Anforderung zu sein (vgl. z. B. Hess, 1965; Loewenfeld, 1958; Woodmansee, 1966). Trotz dieser Bedenken ist die Betrachtung der Pupillengröße als vegetativer Indikator attraktiv: sie wird sowohl vom Sympathikus als auch vom Parasympathikus bestimmt und ist nicht in lebenswichtige und lebenserhaltende Prozesse involviert – wie dies z. B. für einige Kenngrößen der Herzaktivität der Fall ist.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß es für eine konstante Sehentfernung keinen Grund gibt, anzunehmen, daß sich Akkommodation und Pupillengröße über einen weiten Bereich der Pupillengröße hinweg direkt gegenseitig beeinflussen; erst ab einer Pupillengröße kleiner 2 mm führt die sehr große Schärfentiefe dazu, daß sich die Akkommodation in ihre Ruhelage verschiebt (Hennessy et al., 1976; Hunter et al., 2000; Kasthurirangan & Glasser, 2005; Phillips et al., 1992; Stark & Atchison, 1997; Ward & Charman, 1985).

3.2 Änderungen im Herzkreislaufsystem

Das Herz als Zentrum des Herzkreislaufsystems ist ein vierkammeriges Hohlorgan (rechter Vorhof und rechte Herzkammer, sowie linker Vorhof und linke Herzkammer) und arbeitet in einem festen „Vier-Phasen-Takt“ mit einer Grundfrequenz von ca. 70 Herzschlägen/Minute: als erstes werden die Herzkammern durch das Blut aus den Vorhöfen gefüllt – gespeist rechts durch die Hohlvenen und links durch die Lungenvenen; die Herzklappen der Herzkammern (links zur Aorta und rechts zur Lungenarterie, auch als Taschenklappen bezeichnet) sind zu dieser Zeit geschlossen. Diese erste Phase endet mit der Kontraktion der Muskelfasern der Vorhofwände, um die Befüllung der Herzkammern zu verstärken. Unmittelbar danach beginnt die Kontraktion der Herzkammern und mit dem resultierenden Druckanstieg schließen sich die Vorhofklappen (die sogenannten Segelklappen). Übersteigt dann als nächstes der Kammerinnendruck den Druck in der Aorta / den Arterien, öffnen sich die Herzklappen und das Blut wird aus den Kammern hinausgetrieben. Als letztes erschlafft die Herzkammermuskulatur nach der Kontraktion, die Herzklappen schließen sich und neues Blut beginnt von den Vorhöfen her in die Herzkammern zu strömen.

Im Allgemeinen geschieht dieser rhythmische Wechsel zwischen Zusammenziehen (Systole) und Erschlaffen (Diastole) der Herzmuskulatur durch eine abgestimmte elektrische Aktivität, die im Sinusknoten entsteht. Der Sinusknoten befindet sich im rechten Vorhof des Herzens an der Einmündung der Vene und ist Ausgangspunkt der Erregung der beiden Vorhöfe. Nach einer gewissen Verzögerung durch den Atrioventrikularknoten (AV-Knoten; rechte Vorhofkammer) wird die Erregung auf beide Herzkammern übergeleitet und ein Erregungsleitsystem sorgt für eine schnelle, beidseitige Erregungsweiterleitung zum Herzmuskel. Bei diesem Prozeß der Erregungsbildung, -ausbreitung und -rückbildung entstehen Spannungsunterschiede zwischen erregten und unerregten Stellen der Herzmuskelfasern, die – in Summe mit Unterschieden von bis zu 1 mV – als elektrisches Feld an der Körperoberfläche über Elektroden meßbar sind. Elektronisch verstärkt ergibt dies das Elektrokardiogramm (EKG), das somit den Erregungsablauf am Herzen widerspiegelt – gemäß der Standard-Extremitätenableitungen wird die Erregung in Richtung zur Herzspitze, parallel zur anatomischen Herzachse abgeleitet. Die dabei zu erkennenden Potentialschwankungen markieren die Phasen der Erregungsausbreitung: die P-Welle zeigt die Erregung der Vorhöfe; es folgt eine Überleitungszeit der Erregungsausbreitung hin zu den Herzkammern (PQ-Intervall), gefolgt vom QRS-Komplex, der die Erregungsausbreitung in den Kammern

anzeigt. Desweiteren ist die ST-Strecke ein Spiegel der gleichmäßig erregten Herzkammern; abschließend beschreibt die T-Welle den Erregungsrückbildungsprozeß in den Herzkammern (vgl. Birbaumer & Schmidt, 1991; Deetjen et al., 2005; Golenhofen, 2000; Speckmann & Wittkowski, 1994; vgl. Abb. 3²).

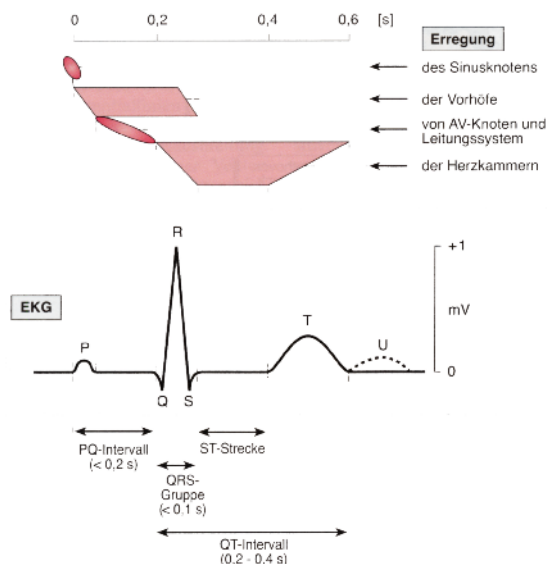


Abbildung 3: Das normale EKG: dargestellt sind die verschiedenen Wellen und Zacken, Strecken und Intervalle (Standardableitung II nach Einthoven). [Abbildung entnommen aus: Golenhofen (2000), Physiologie heute, Seite 192]

Der Einfluß des vegetativen Nervensystems auf die Herzfunktion erfolgt über beide Teilsysteme – Sympathikus und Parasympathikus –, die beide eng mit dem Sinusknoten verbunden sind. Durch eine Sympathikusaktivierung kommt es zu einer Erhöhung der Herzschlagfrequenz (Tachykardie) und der Kontraktionskraft

der Herzmuskeln, die über Beta-(β)-Rezeptoren an der Herzmuskulatur vermittelt werden. Es kommt zu einer deutlichen Verkürzung der Systolendauer, die durch den sympathisch-adrenergen Einfluß am Schrittmacher (Sinusknoten) des Herzens und am Herzmuskel direkt umgesetzt wird. Eine Parasympathikusaktivierung über den Vagusnerv hat eine Senkung der Herzschlagfrequenz (Bradykardie) zur Folge, da sie hemmend auf die Übertragung am AV-Knoten und damit auf die Erregungsweiterleitung hin zur Herzmuskulatur wirkt. Zusätzlich senkt der Parasympathikus die Kontraktionskraft der Vorhof-Muskulatur und mindert insgesamt die Erregbarkeit der Vorhöfe (vgl. Birbaumer & Schmidt, 1991; Deetjen et al., 2005; Golenhofen, 2000; Speckmann & Wittkowski, 1994).

3.2.1 Herzperiode (HP) und Herzperiodenvariabilität (HPV)

Mögliche Maße der sympathischen oder parasympathischen Einflußnahme auf die Herzaktivität lassen sich entsprechend aus den zeitlichen Intervallen zwischen den R-Zacken des EKG ermitteln und sind unter anderem beschrieben als Herzperiode (in ms) im Zeitbereich und deren Variabilität (Herz-Perioden-Variabilität) im Frequenzbereich. (Traditionell wurde das Maß der Herzperiode oft als Herzrate (Anzahl der RR-Intervall pro Minute) be-

² Anmerkung: Die schraffiert eingezeichnete U-Welle tritt nur manchmal auf und sie wird auf eine verzögerte Erregungsrückbildung in den Endverzweigungen des Erregungsleitungssystems zurückgeführt (vgl. Golenhofen, 2000). Im Übrigen ist der (apparativ-verstärkte) hörbare 1. Herzton am Beginn der Kammerystole auf die Anspannung der Herzkammermuskulatur zurückzuführen, die ein Schließen der Segelklappen bewirkt; der 2. Herzton am Übergang der Systole zur Diastole entsteht durch den Schluß der Taschenklappen (vgl. Speckmann & Wittkowski, 1994).

schrieben und damit deren Variabilität als Herzratenvariabilität (HRV); vgl. Berntson et al. (1995) zur Frage der statistischen Vorteile der Herzperiodenbetrachtung).

Da in der vorliegenden Arbeit im wesentlichen das Augenmerk auf mögliche Maße der sympathischen Aktiviertheit im Rahmen der Reaktion auf kognitive Anforderungen gelegt wurde, sollen diese mit stärkerer Gewichtung vorgestellt werden.

Wie bereits erwähnt, erhöht der sympathische Einfluß am Herzen dessen Schlagfrequenz. Ein klassischer Indikator ist daher die Herzperiodendauer (kurz: Herzperiode; HP), die sich entsprechend unter der Zunahme der Sympathikusaktivität im Organismus – mit einhergehender Abnahme der parasympathischen Aktivität – verkürzt. Eine allgemeine Verkürzung der HP mit zunehmender kognitiver Belastung ist in der Literatur mehrfach beschrieben worden, wenngleich eine abgestufte Differenzierung zwischen unterschiedlichen Stärken kognitiver Belastungen nicht einheitlich gefunden werden konnte (vgl. Andreassi, 2000; Bacs & Boucsein, 2000; Mulder, 1985; Mulder, 1992; Task Force Special Report, 1996). Es wird diskutiert, ob eine allgemeine HP-Veränderung wirklich ein Maß der kognitiven Anforderung sei oder ob sie nicht vielmehr einen aufgabenunspezifischen Aktivierungszustand (z. B. emotionale Belastung) widerspiegele (Nickel et al, 2002). Trotz dieser Einschränkung wurde in der vorliegenden Arbeit die HP – im klassischen Sinn – als allgemeines Kontrollmaß für eine Aktivierungsveränderung im Organismus verwandt.

Zusätzlich wurden auf Basis der RR-Intervalle Maße der Herzperioden-Variabilität (HPV) errechnet, die in der Literatur wie folgt als Indikatoren sympathischer bzw. parasympathischer Aktivierung beschrieben werden: Grundlage der HPV ist eine Analyse der spektralen Dichte (oft berechnet mit Hilfe der „Fast Fourier Transformation“), die aufschlüsselt, wie sich die Varianz der RR-Intervalle als Funktion ihrer zeitlichen Frequenz verteilt. Durch diese Analyse können bei Kurzaufzeichnungen des EKGs (ca. 2 - 5 min) in der Regel drei Komponenten identifiziert werden: eine sehr niederfrequente Komponente („Very low frequency“ (VLF)), eine niederfrequente Komponente („Low frequency“ (LF) integriert im Bereich von 0,04 - 0,14 Hz) und eine hochfrequente Komponente („High frequency“ (HF) integriert im Bereich von 0,14 - 0,4 Hz). Die physiologische Erklärung der VLF ist nach wie vor problematisch, so daß in der gängigen Literatur meist nur LF- und HF-Dichten diskutiert und in normierten Einheiten (LF bzw. HF als Anteil an der Gesamtdichte, multipliziert mit 100) betrachtet werden (vgl. Berntson et al., 1997; Task Force Special Report, 1996). Die physiologische Interpretation der HF-Komponente ist relativ eindeutig: man geht von einem parasympathischen Einfluß über den Vagusnerv aus. Für die LF-Komponente läßt sich laut Literatur keine eindeutige Zuordnung zu einem Ast des autonomen Nervensystems finden (vgl. z. B. Challapalli et al., 1999; Kim et al., 1997; Malliani et al., 1991; Sloan et al., 1996); strittig ist die Rolle des Parasympathikus. In der aktuellen Diskussion überwiegt die Vorstellung, daß die LF-Dichte (zu meist beschrieben in normierten Einheiten) eher einen Indikator der sympathischen Einflußnahme am Herzen widerspiegelt. Um zusätzlich ein Maß der aktuellen sympathischen-parasympathischen Balance zu finden, wird oft das Verhältnis LF / HF (normiert) berechnet (vgl. Berntson et al., 1997; Task Force Special Report, 1996).

Unter kognitiven Anforderungen sollte demnach die Dichte der HF-Komponente – folgt man der Ansicht einer sympathischen Aktivierung unter kognitiven Anforderungen –

eher abnehmen, da eine sympathische Aktivierung mit einer parasympathischen Hemmung einhergeht; die LF-Komponente hingegen sollte in ihrer Dichte zunehmen und damit das LF/HF-Verhältnis in seinem Betrag insgesamt ansteigen (vgl. Berntson et al, 1997). Obwohl die Interpretation der HPV-Komponenten im Allgemeinen sowie unter kognitiver Anforderung mehrfach angezweifelt wird (vgl. z. B. Malik & Camm, 1993; Nickel & Nachreiner, 2003; Sloan et al., 1996), wurde die LF- und HF-Komponenten-Betrachtung in die vorliegende Arbeit aufgenommen, um den Arbeiten von Tyrrell et al. (1995), Tyrrell et al. (2000) und Davies et al. (2005) im experimentellen und argumentativen Vorgehen zu folgen. Die genannten Autoren benutzen die HP bzw. die LF- und HF-Komponenten, um eine sympathische Aktivierung im Organismus zu belegen und damit eine Beziehung zur sympathischen Einflußnahme am Ziliarmuskel aufzuzeigen (vgl. Abs. 1).

3.2.2 Pulswellenlaufzeit („pulse transit time“, PTT)

Als weiterer Indikator einer Veränderung im Herz-Kreislaufsystem bietet sich auf Grund ihres ebenfalls nicht invasiven Charakters die Laufzeit der Pulswelle als Maß der Blutdruckaktivität an. Die Druckpulswelle, kurz Puls, als Folge des Druckanstieges während des Zusammenziehens des Herzmuskels (Systole) setzt sich über das Blutgefäßsystem mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 4 - 6 m/s fort (vgl. Bugram et al, 1994). Wie bereits erwähnt, wirkt der Sympathikus des vegetativen Nervensystems auf die Kontraktilität des Herzmuskels und verkürzt die Zeit der Systole und damit auch die Zeit zwischen dem Beginn der Erregungsausbreitung in der Herzkammer und dem ersten Öffnen der Herzklappe. Diese Vor-Auswurfsphase („pre-ejection period“ (PEP)) gilt als direktes Maß der beta-(β)-adrenergen Einflüsse im Herzkreislaufsystem (Berntson et al, 1997; vgl. Birbaumer & Schmidt, 1991; Deetjen et al., 2005; Golenhofen, 2000; Pollak & Obrist, 1983; Speckmann & Wittkowski, 1994; Weiß et al., 1980). Hinzu kommt, daß ca. 94 % der Varianz der PEP durch die Pulswellenlaufzeit – als Zeit zwischen R-Zacke des EKGs und dem Beginn der Pulskurve in der Körperperipherie – erklärt werden konnte (Newlin, 1981). Damit liefert die Pulswellenlaufzeit, die über ein EKG und eine Pulsregistrierung in der Peripherie (z. B. mit einem Plethysmographen am Zeigefinger oder Ohrläppchen) gemessen werden kann, einen vielversprechenden Indikator der sympathischen Aktivierung am Herzmuskel.

Liegen neben der Herzperiode (oder Herzrate)³ zudem auch die Pulswellenlaufzeiten vor, so gibt es des Weiteren die Möglichkeit, über eine Relation der Veränderung in beiden Parametern eine Zuschreibung der ursächlichen Aktivierung im VNS vorzunehmen: steigt z. B. die Herzrate an und die Pulswellenlaufzeit nimmt gleichzeitig ab – also entsprechend der Erwartungen unter kognitiven Anforderungen – so kann man über den Quotienten aus der Pulswellenlaufzeitänderung und der Herzratenänderung hypothetisch feststellen, ob es sich um eine erhöhte sympathische (beta-(β)-adrenerge) oder um eine reduzierte parasympathische Aktivierung handelt; ein Richtwert für die Aktivierungs-

³Anmerkung: Eine Zunahme der Herzrate entspricht einer Abnahme der Herzperiode (vgl. z. B. Task Force Special Report, 1996).

verschiebung von einem Teilsystem zum anderen liegt bei einem Quotienten von -0,9 (Weiss et al., 1980). Dieser Quotient erlaubt damit eine qualitative Beschreibung der Verschiebung der vegetativen Balance.

4 Von der Ausgangsidee zur Umsetzung der Experimente

Das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit richtete sich auf die Frage nach der Veränderung der Akkommodation unter (steigenden) kognitiven Anforderungen bei visueller Präsentation der zu bearbeitenden Information in relativer Nähe zum Auge; erst in zweiter Betrachtung stellte sich die Frage nach einem direkten Bezug der Akkommodationsveränderung zu kardiovaskulären Änderungen in der kognitiven Anforderungssituation (vgl. z. B. Davies, et al., 2005; Tyrrell et al, 1995). Ein Grund für die vorrangige Betrachtung der Akkommodation fand sich in der Unsicherheit der unter kognitiven Anforderungen zu erwartenden Änderungen. Aus der aktuellen Literatur war mit gewisser Gewichtung zu entnehmen, daß trotz der Widersprüchlichkeit der Ergebnisse eine Veränderung der Akkommodation in die Ferne, d. h. eine relative Abnahme der Nahakkommodation, am wahrscheinlichsten ist (vgl. z. B. Gilmartin, 1998). Folgte man dieser Vorstellung, so ließ sich die zu erwartende Akkommodationsabnahme als Auswirkung einer Sympathikusaktivierung interpretieren (vgl. Abs. 2.3). Um daher eine vorliegende sympathische Aktivierung bzw. parasympathische Inhibierung im Organismus unter kognitiven Anforderungen aufzuzeigen, sollten in den durchgeführten Experimenten klassische vegetative Parameter zusätzlich erfaßt werden – und zwar die Herzperiode, die LF- und HF- Komponenten der HPV und die Pulswellenlaufzeit als Indikatoren einer Änderung am Herzen (vgl. z. B. Davies et al., 2005). Direkt am Auge sollte zusätzlich die Pupillengröße gemessen werden, um auch hier mögliche kognitiv-induzierte Veränderungen am Sehorgan feststellen zu können. Damit ergab sich ein Vorgehen, das nicht im Kontext einer pharmakologischen Absicherung eines vegetativen Einflusses auf die Akkommodation stand; es wurde vielmehr versucht, über Messungen begleitender Parameter am Herz und am Auge einen Bezug zum VNS herzustellen. Sollten diese gemäß der Erwartung auf die kognitiven Anforderungen reagieren, wäre es von Interesse, die einzelnen Meßgrößen – vorrangig die Akkommodation mit der Herzperiode oder der Pulswellenlaufzeit – in einen direkten Vergleich miteinander zu setzen (vgl. z. B. Davies et al., 2005).

Da für die Gestaltung eines Experimentes, in dem u. a. die Akkommodation als abhängige Variable gemessen werden sollte, einige allgemeine Rahmenbedingungen zu beachten waren, werden diese vorab kurz erläutert.

4.1 Die allgemeinen Rahmenbedingungen

Die Erfassung der Akkommodation in einer Nahsehsituation sowie unter kognitiven Anforderungen bedurfte der Kontrolle einiger optischer Rahmenbedingungen (vgl. Abs. 4.1.1). Aus Tabelle 1 (vgl. S. 13) geht hervor, daß bisher keine einheitlichen experimentellen Randbedingungen zur Beschreibung eines eindeutig als kognitiv-induziert interpretierbaren Akkommodationseffektes eingeführt worden sind. Es gab allerdings einzelne, theoretisch begründete Hinweise zur Experimentgestaltung, die unter 4.1.1 aufgegriffen werden. Zudem ergab die zusätzliche Betrachtung der weiteren vegetativen Meßgrößen eine allgemeine Einschränkung der Experimentalbedingungen, die unter 4.1.2 aufgegriffen wird.

4.1.1 Die Auswahl der optischen Rahmenbedingungen

Ergebnisse der physiologischen Forschung legten nahe, daß ein hemmender sympathischer Einfluß am Ziliarmuskel bei starker Akkommodation, d. h. bei geringem Sehabstand zu beobachten sein wird (vgl. Gilmartin, 1998). Aus diesem Grund wurde die Sehentfernung für die Experimente auf 5 D (20 cm) festgesetzt. Die Sehreize wurden damit deutlich näher am Auge präsentiert als in einer Reihe vergleichbarer Studien (vgl. Tabelle 1).⁴

Die Sehreize wurden so klein dargestellt, wie es mit herkömmlicher TFT-Bildschirmtechnik möglich war; d. h. jede Zahl, bzw. jeder Buchstabe, wurde in einer Segmentdarstellung realisiert, die einem Feld von 4 x 5 Pixel (horizontal x vertikal) bzw. 0,29 °x0,37 ° entsprach. Bei so kleinen Sehreizen ist eine möglichst präzise Akkommodation auf den nahen Bildschirm erforderlich, um die Sehzeichen erkennen zu können. Dadurch sollte die Abweichung der Akkommodation von der Sehentfernung so gering wie möglich gehalten werden (vgl. „lag of accommodation“ Abs. 2.3).

Es bestand zudem Grund zur Annahme, daß andere Faktoren allein oder in Kombination mit kognitiven Anforderungen die Veränderung in der Akkommodation erzeugen oder als kognitiv-induziert erscheinen lassen (vgl. z. B. Birnbaum, 1984). Um in diesem Spannungsfeld einen potentiellen Einflußfaktor zu kontrollieren, wurde die Blickrichtung des Auges während der Bearbeitung der Aufgaben erfaßt. Eine konstante Fixation sollte ebenfalls durch die Aufgabendarbietung gewährleistet werden, indem eine gleiche Anzahl an Zahlen, bzw. Buchstaben, für alle Bedingungen gezeigt oder nur zentral präsentierte Einzelzeichen verwendet wurden.

Die Sehreize wurden zu dem monokular präsentiert, um Vergenzeinflüsse auf die Akkomodationsmessungen zu vermeiden. Die beidäugige Vergenzfunktion hätten die Akkommodation unterstützt bzw. stabilisiert und so den Bereich einer möglichen kognitiv-induzierten Änderung weiter eingeengt (vgl. z. B. Ciuffreda, 1991; Kaufman & Alm, 2003; vgl. Tabelle 1).

⁴Anmerkung: Zur Kontrolle des tatsächlichen absoluten Akkommodationsaufwandes wurde die Dunkelruhelage für jeden Versuchsteilnehmer im Vorfeld gemessen (vgl. Gilmartin, 1998).

Die beschriebenen Rahmenbedingungen wurden für alle Experimente beibehalten.⁵

4.1.2 Die Gestaltung der allgemeinen Aufgabenbearbeitung und Auswahl des interessierenden Zeitfensters

Aufgrund der Vorstellung, daß sich Akkommodationsänderungen unter kognitiven Anforderungen – ebenso wie die Änderungen in der Pupillengröße oder der kardiovaskulären Regulierung – als Konsequenz einer Aktivierungsverschiebung im vegetativen Nervensystem ergeben (vgl. Abs. 2.2), sollten die physiologischen Eigenschaften der vegetativen Aktivitätsänderungen berücksichtigt werden: gerade sympathische Veränderungen im Organismus benötigen mehrere Sekunden, bis sie am Effektivorgan meßbar werden (vgl. z. B. Golenhofen, 2000; Abs. 1.1). Unter Berücksichtigung dieser vegetativen Plausibilität, wurde für jede Aufgabenphase eine Bearbeitungszeit von 160 s vorgesehen. Damit wurde ein vergleichsweise längeres Bearbeitungsintervall gewählt (vgl. Tabelle 1), das neben einer initialen Anpassungsreaktion auch eine Bearbeitungszeit mit mehreren Aufgabenwiederholungen beinhaltete. Zudem ist allgemein eine Veränderung in vegetativen Indikatoren nur sinnvoll interpretierbar, wenn diese Veränderung relativ zu einer unmittelbar angrenzenden Kontrollbedingung besteht; die allgemeinen Schwankungen der vegetativen Homeostase sind beachtlich, so daß diese leicht – und fälschlicherweise – als Wirkung der experimentellen Bedingungen erscheinen könnten (vgl. z. B. Campbell, 1981; Lacey, 1956; Wilder, 1958).

Damit ergab sich insgesamt ein Meßintervall von 320 s, das aus jeweils 2 Bearbeitungsphasen bestand: aus 160 s einer relativ leichten (Kontroll-) Bedingung (z. B. „Lesen“) und aus 160 s einer relativ fordernden Bedingung (z. B. „Addieren“; vgl. Abs. 4.2); beide Phasen schlossen direkt mit einem Instruktionsübergang aneinander an und wurden innerhalb der Experimente entweder intraindividuell oder interindividuell in ihrer Bearbeitungsreihenfolge getauscht. Da in einer allgemeinen Analyse die Veränderung der Meßvariablen nicht nach einer kurzfristigen Anpassung interessierte und zudem, wie bereits erwähnt, sympathische Auswirkungen erst nach 30 - 40 s zu erwarten waren, wurden für erste Mittelwertsbetrachtungen die anfänglichen 32 s je Meßphase von den Berechnungen ausgeschlossen (vgl. Abs. 5.3).⁶

4.1.3 Die Auswahl der Versuchsteilnehmer

Da sich die Akkommodation unter kognitiven Aufgaben für unterschiedliche Fehlsichtigkeiten des Auges möglicherweise unterschiedlich verändert (Bullimore et al., 1992;

⁵Anmerkung: Für ein Kontrollexperiment (K2) wurde die Sehentfernung auf 1 D (1 m) vergrößert; die Sehreize wurde in diesem Fall größenangepaßt, so daß sie den gleichen Sehwinkel abdeckten.

⁶Anmerkung: Die verbleibenden 128 s stellten zudem ein Zeitminimum zur sinnvollen Spektralanalyse der EKG-Auswertung dar (vgl. z. B. Berntson et al., 1997).

Ciuffreda & Lee, 2002; Wolffsohn et al., 2003), wurden nur normalsichtige Personen ausgewählt. Es handelte sich um eine männliche Personenstichprobe⁷, deren Fernrefraktionen keine Sphären- und Astigmatismuswerte größer als 0,5 D aufwiesen; es wurde für jeden Versuchsteilnehmer mit sphärischen Linsen (-1, -0,5, 0,5 und 1) getestet, ob eine geringe Weit- oder Kurzsichtigkeit vorlag. Der minimale Visus für das rechte Auge mußte 1 (in dezimalen Einheiten) betragen und der monokulare Akkommodationsnahpunkt durfte nicht weiter als 10 D (10 cm) vom Auge entfernt liegen; d. h. für jeden Teilnehmer wurde bestimmt, bis zu welcher Nähe relativ zum Auge er ein Objekt scharf sehen konnte. Dieser gemessene Wert sollte mindestens doppelt so groß sein wie die Akkommodationsanforderung im Experiment (5 D; 20 cm), um eine genügend große Akkommodationsreserve zu gewährleisten.

Die mittlere Akkommodationsruhelage betrug 0,79 D ($\pm 0,47$; entspricht ca. 1,27 m) und der mittlere Augenabstand 63,17 mm ($\pm 3,10$). Darüber hinaus betrug das mittlere Alter 23 Jahre ($\pm 3,6$) und bekannte Auffälligkeiten im Herzkreislaufsystem sowie eine mögliche Medikamenteinnahme wurden im Vorfeld abgefragt. Ebenfalls wurden die Versuchsteilnehmer daraufhingewiesen, daß sie ausgeruht und nicht unter Nikotineinfluß zu den Messungen zu erscheinen hätten; nur Gelegenheitsraucher wurden für die Teilnahme zugelassen.

Aus dem beschriebenen Pool von 66 jungen Männern wurde für die durchgeführten Experimente jeweils eine Untergruppe einbestellt.

4.2 Die Auswahl der kognitiven Anforderung und die Abfolge der Experimente

Die Ausgangslage bzgl. der Verwendung unterschiedlicher Aufgaben zur Umsetzung der kognitiven Anforderung innerhalb der zitierten Akkommodationsliteratur war überschaubar: in einer Reihe von Studien wurden die kognitiven Anforderungen als arithmetische Aufgaben operationalisiert (vgl. Tabelle 1). Dabei wurden sowohl einstellige wie mehrstellige Zahlen verwendet und die Zahlen simultan oder sukzessiv visuell dargeboten (vgl. z. B. Bullimore & Gilmartin, 1988; Kruger, 1980). Eher selten wurden nur Fixationsreize dargeboten (vgl. z. B. Malmstrom et al., 1980) – oder die Personen sollten auf bestimmte, visuell-einfache Zielreize reagieren, die in unterschiedlicher Präsentationszeit dargeboten wurden (vgl. z. B. Davies et al., 2005). Letzteres Vorgehen stellte bzgl. der Aufgabengestaltung z. B. die Frage nach einem Geschwindigkeits-Genauigkeits-Ausgleich, der in der zitierten Arbeit keine Berücksichtigung fand. Allgemein sollten für die Umsetzung der kognitiven Anforderung eindeutige – detaillierte oder summative – Verhaltensmaße erfaßt werden, um die Bearbeitung der Aufgaben zu kontrollieren. Dies setzt eine Aufgabengestaltung voraus, die eine Ergebniserfassung z. B. ohne Kopfbewegungen ermöglichte. Kopfbe-

⁷Anmerkung: Für weibliche Versuchsteilnehmer wären zusätzliche Bestimmungen des Hormonspiegels zur eindeutigen Interpretation der LF- und HF- Komponenten der HPV nötig gewesen (vgl. z. B. Berntson et al., 1997).

wegungen, mündliche Äußerungen oder grobe motorische Bewegungen zögen eine Veränderung der Körper- und Kopfhaltung nach sich, die eine Akkommodationsmessung – und zu Teilen auch die EKG-Erfassung – erschwert, bzw. verfälscht hätten. Zusätzlich konnte über eine Ergebniskontrolle die Wirksamkeit der Steigerung der kognitiven Anforderung nachgehalten werden. In den einzelnen Experimenten sollten auf dieser Basis neben der Anzahl der richtigen Antworten teilweise auch Reaktionszeiten als weiteres Verhaltensmaß erfaßt werden.

Betrachtet man die Art der visuellen Gestaltung der zu bearbeitenden Information, so fand man, wie bereits gesagt, mehrstellige und mehrzeilige Rechenaufgaben oder relativ einfache Fixierreize (vgl. Tabelle 1). Für mehrstellige und mehrzeilige Aufgaben sollte – wie unter den optischen Rahmenbedingungen erwähnt – die Blickbewegung kontrolliert und/oder erfaßt werden, um eine mögliche Akkommodationsänderung eindeutig interpretieren zu können. Es erschien wichtig, Aufgaben, bzw. visuelle Reizdarstellungen, zu verwenden, die entweder eine bestimmte, konstante Blickbewegung erforderten oder durch ein zentral dargebotenes Zeichen den Blick fixierten und damit die Akkommodationsmeßbedingungen optimierten.

Für die vorliegende Arbeit sollte damit eine zweigeteilte Umsetzung der visuellen Informationsdarstellung und damit auch zwangsläufig der Aufgabengestaltung verfolgt werden: der erste Teil der experimentellen Umsetzung der kognitiven Anforderung begann in Anlehnung an die bestehende Literatur (vgl. Tabelle 1) mit der Auswahl arithmetischer Aufgaben. Es wurden zwei experimentelle Herangehensweisen aus der Literatur übernommen und computergestützt im Labor realisiert; d. h. in Experiment 1 (E1) wurde die Darbietung einstelliger Zahlen in einer Matrix gemäß Bullimore & Gilmartin (1988) und in Experiment 2 (E2) die zeitlich aufeinander folgende Darstellung zweistelliger Zahlen gemäß Kruger (1980) übernommen. Die Aufgabe lautete, die Zahlen jeweils zu lesen (i. S. einer Kontrollbedingung) oder zu addieren und jeweils ein angezeigtes Ergebnis mit richtig oder falsch zu quittieren. Dieser Ansatz wurde in einem weiteren Experiment (E3) fortgeführt, indem unter ähnlicher Aufgabendarstellung die Zahlen gelesen, addiert und multipliziert werden mußten. Hier sollte die Aufgabenschwierigkeit über die Rechenfunktion erhöht und – unter Kontrolle der Blickbewegung – eine evtl. abgestufte Akkommodationsänderung provoziert werden.

Der zweite Teil der experimentellen Umsetzung enthielt im Experiment 4 (E4) einen zentralen Fixationsreiz gemäß der Arbeit von Malmstrom et al. (1980): während des Fixierens wurde zu dem zusätzlich eine Rückwärtszählaufgabe durchgeführt. Anschließend folgte ein Experiment (E5), das einen „n-back task“ als Bearbeitungsaufgabe enthielt. Diese Aufgabe verlangte ein kontinuierliches Betrachten von sequenziell dargebotenen Reizen – in diesem Fall einzelner Buchstaben. Die Versuchsteilnehmer mußten bei jedem Buchstaben mit „Ja“ oder „Nein“ die Frage beantworten, ob der aktuelle Buchstabe dem Buchstaben in der Sequenz „n“-Positionen zuvor entspreche. In dieser Aufgabe werden sowohl Behaltens- wie auch Ausführungsprozesse des Kurzzeitgedächtnisses beansprucht (vgl. z. B. Braver et al., 1997; Cohen et al., 1997) und durch die Wahl des „n“ konnte eine Abstufung der kognitiven Anforderung umgesetzt werden.

Die Frage, ob sich die Akkommodation unter kognitiven Anforderungen – im Kontext der Veränderung anderer vegetativer Kenngrößen – verringert (vgl. Abs. 1 & 4) wurde so experimentell geprüft – unter der Verwendung

- arithmetischer Aufgaben mit mehrstelliger / mehrzeiliger Zahlenpräsentation oder
- einer Fixieraufgabe bzw. einer „n-back“-Aufgabe mit nur zentral präsentierter einfacher Information.⁸

Bevor die konkreten Experimente beschrieben werden, schließt sich ein kurzes Methodenkapitel mit der Darstellung der methodisch-technischen Details an.

5 Die Methode

Die Daten der in dieser Arbeit vorzustellenden Experimente wurden mit Hilfe komplexer, moderner Meßtechniken und in einem konstanten Versuchsaufbau erhoben. Im Folgenden sollen die jeweiligen Techniken kurz dargestellt werden – gefolgt von einer zusammenfassenden Darstellung der allgemeinen Vorgehensweise bei der Datenaufbereitung und -analyse.

5.1 Die kontinuierliche Erfassung der Akkommodation des Auges

Zur Messung der Akkommodation wurden zwei unterschiedliche Meßtechniken eingesetzt, die kurz in den Grundzügen ihres Meßprinzips und ihrer Meßeigenschaften beschrieben werden. Dabei ist zu beachten, daß jede Technik die Gesamtbrechkraft des Auges (Refraktion) errechnet, d. h. daß die eigentliche Akkommodation als Veränderung der Augenlinsenbrechkraft nur relativ – als Änderung der Refraktion – zu ermitteln ist. In den absolut bestimmten Werten sind konstante Fehlsichtigkeiten des Auges enthalten, die sich z. B. durch Augenlänge oder Hornhautkrümmungen ergeben; diese verändern sich allerdings nicht mit wechselnden Sehbedingungen. Zusätzlich sollten diese Fehlsichtigkeiten aufgrund der Auswahl der Versuchsteilnehmer eher gering sein (vgl. Abs. 4.4).

⁸Anmerkung: Für keine Aufgabenumsetzung sollte zudem eine Rückmeldung der Bearbeitungsleistung innerhalb der Bearbeitungsphasen gegeben werden, da ein Bonussystem an die Gesamtleistung (z. B. Anzahl der richtigen Antworten) zur Betonung der Bearbeitungsgüte gekoppelt wurde.

Im Anschluß wird ein Datensatz vorgestellt, der Messungen der Akkommodation in unterschiedlichen Sehentfernungen vergleichend für beide Meßtechniken enthält und in dem ein Vergleich der Daten mit der klassischen Refraktion mittels Linsen vorgenommen wurde.

5.1.1 Exzentrische Photorefraktion: der PowerRefractor (MultiChannel) & der PowerRef II (PlusoptiX)

Der PowerRefractor (MultiChannel) und sein Nachfolgegerät, der PowerRef II (PlusoptiX), vermessen im dynamischen, monokularen Modus die Refraktion eines Auges, die Pupillengröße und die jeweilige Blickrichtung mit einer Frequenz von 25 Hz. Das Meßgerät besteht aus einem Kamerakopf, an dessen Vorderseite – neben der Kameralinse – Infrarotlicht-Dioden kreisförmig angebracht sind. Zusätzlich ist die Kameralinse mit einer Blende halb abgedeckt. Die Kamera wird in einem Meßabstand von 1 m aufgestellt. Das Infrarotlicht, das von den Dioden ins Auge gelangt und vom Augenhintergrund reflektiert wird, erzeugt im aufgenommenen Pupillenbild ein lineares Helligkeitsprofil, das zur Refraktion des Auges proportional ist. Damit nutzt das Verfahren der exzentrischen Photorefraktion die Information der Vergenz der vom Auge zurückkehrenden Lichtstrahlen, um die Refraktion des Auges zu bestimmen. Diese kann so über eine Regression der Helligkeit über der Position innerhalb der Pupille für jede Aufnahme berechnet werden. Die Steigung dieser Regression ist im Bereich -7 D bis +5 D linear und die Refraktion wird durch die Software automatisiert bestimmt. Im beschriebenen Modus wird die Brechkraft des Auges nur im senkrechten Meridian bestimmt (zur Photorefraktion und zum PowerRefractor vgl. Allen et al., 2003; Choi et al., 2000; Hunt et al., 2003; Schaeffel et al., 1999, Seidemann & Schaeffel, 2002; Seidemann et al., 1999; Wolffsohn et al., 2002). In Vergleichsmessungen mit anderen Techniken konnten für den PowerRefractor (Allen et al., 2003; Choi et al., 2000) ebenso wie für den PowerRef II (Jainta et al., 2004) vergleichsweise gute Reliabilitäts- und Genauigkeitswerte für Refraktionsbestimmungen gezeigt werden; die Genauigkeit der Akkommodationsmessung wird mit 0,25 D angegeben (vgl. Schaeffel & Weiss, 2002). Die Kamera des Meßsystems ist für binokulare Messungen mittig zwischen beiden Augen, für monokulare Messungen direkt gegenüber dem interessierenden Auge zu positionieren – letzteres ist insbesondere wichtig, wenn monokulare Sehreize in kurzen Sehabständen zum Auge präsentiert werden (Seidemann & Schaeffel, 2003).⁹

Obwohl in der Literatur zur weiteren Verbesserung der absoluten individuellen Akkommodationsbestimmung mit dem PowerRefractor (bzw. dem PowerRef II) eine individuelle Eichung des Gerätes vorgeschlagen wird, können die voreingestellten, allgemeinen Parameter zur Transformation der Helligkeitsprofile in Refraktionswerte für Mittelwertsbetrachtungen aus Personenstichproben herangezogen werden (Schaeffel et al., 1999; Seidemann & Schaeffel, 2003; Seidemann et al., 1999; Schaeffel et al., 1993; Schaeffel &

⁹Anmerkung: Da der PowerRef II die Bildauswertung für ein zentral aufgezeichnetes Auge nicht eindeutig zuordnen konnte, wurde die Kamera im Versuchsaufbau (vgl. Abs. 6) nicht direkt in der Verlängerung der optischen Achse des rechten Auges positioniert, sondern leicht in Richtung der Mittenposition der Augen versetzt. Die Kamera des PowerRefractors wurde an gleicher Position aufgestellt.

Weiss, 2002). Da eine individuelle Eichung im Vorfeld jeder Messung sehr aufwendig ist (vgl. Schaeffel et al., 1999), wurde in den vorliegenden Studien auf eine solche Einzeleichung verzichtet, da es bei den vorliegenden Messungen um relative Veränderungen ging.

Neben der Refraktion werden auch, wie bereits erwähnt, Pupillendurchmesser und Blickrichtung während jeder Bildauswertung bestimmt. Zur Pupillenvermessung wird ein Kanten-Detektions-Algorithmus verwandt (Choi et al., 2000; Schaeffel, 2002); zulässige Pupillengrößen liegen im Bereich von 3 mm bis 11 mm. Die Blickrichtung ist als Abweichung von einer Achse durch die Pupillenmitte definiert, welche sich selbst wiederum als perfekte Überlagerung von Pupillenmittelpunkt und erstem Purkinjereflex ergibt (d. h. der ersten Reflexion eines ins Auge fallenden Lichtes an der Hornhaut). Für die Berechnungen der Blickrichtung wird ein Hirschberg-Verhältnis von ca. 12 verwendet, das angibt, um wieviel Grad sich das Auge dreht, wenn sich der Purkinjereflex in der Pupille um 1 mm vom Pupillenmittelpunkt entfernt. Zusätzlich wird berücksichtigt, daß die Pupillenachse um wenige Grad seitlich von der Fixationsachse abweicht – um den sogenannten Winkel „Kappa“ (Choi et al., 2000; Schaeffel, 2002; Seidemann & Schaeffel, 2002). Für die Blickrichtungsmessung wird eine Genauigkeit von $0,15^\circ$ für einen Bereich von $\pm 25^\circ$ angegeben (vgl. Schaeffel & Weiss, 2002).¹⁰

5.1.2 Das SRW 5000 Autorefraktometer (Shin-Nippon)

Autorefraktometer mit einem freien Blick auf Sehtestzeichen finden in der klinischen und wissenschaftlichen Optometrie eine breite Anwendung und ihre Meßeigenschaften sind vielfach beschrieben worden (vgl. z. B. Jainta et al., 2004; Mallen et al., 2001). Ein vielfach eingesetztes Autorefraktometer war das Canon R1 (Canon Inc., Tokyo, Japan), das in der hier zugrundeliegenden Literatur oftmals zur Messung der Akkommodation eingesetzt wurde und dessen Funktionsweise im Wesentlichen der des SRW 5000 entspricht. Das SRW 5000 Autorefraktometer ermittelt die Refraktion eines Auges in zwei Schritten: ein aus Infrarotlicht bestehender Lichtring wird ins Auge projiziert und von der Augentrückwand reflektiert. Das reflektierte Licht wird im Gerät abgebildet; bei der ersten Messung wird während dieser Abbildung eine Linse motorisch so im Lichtstrahlengang bewegt, daß die Lichtringabbildung optimal scharfgestellt wird. Dann erst wird die Abbildungsgröße digital analysiert und aus ihr die Refraktion, d. h. die Brechkraft des Auges, berechnet.

Das SRW 5000 vermißt im statischen Modus die monokulare Refraktion im Bereich ± 22 D – in Schritten von $0,12$ D – solange die Pupillengröße des zu vermessenden Auges nicht kleiner als $2,9$ mm ist. Pro Minute können ca. 45 Meßwerte mit einer angegebenen Genauigkeit von $0,12$ D berechnet werden. In methodischen Untersuchungen wird das SRW 5000 als akkurates und reliables Meßgerät beschrieben (Mallen et al., 2001; Wolffsohn et al., 2002; Wolffsohn et al., 2004). Zusätzlich wurden die Videobilder, die das Gerät vom vermessenen Auge aufzeichnet, in einen Rechner eingelesen und es wurde aus diesen parallel

¹⁰Anmerkung: Ein spezielles Interesse galt der horizontalen Blickrichtung, da sie durch die Wahl der Sehreize stärker beeinflusst werden konnte. Mit „Blickrichtung“ ist daher die horizontale Blickrichtung gemeint. Für beide Geräte (PowerRefractor / PowerRef II) sind für eine Blickrichtung „rechts“ vom Geradeausblick positive Werte und für „links“ vom Geradeausblick negative Werte angegeben.

zu jeder Akkommodationsmessung der Pupillendurchmesser mit Hilfe eines Pupillendetektions-Algorithmuses (vgl. Abs. 5.1.1) bestimmt.

5.1.3 Exkurs: Akkommodationsmessungen bei verschiedenen Sehabständen

Im Laufe der Durchführung der Hauptexperimente und dem vorgesehenen Wechsel zwischen den Meßgeräten zur Erfassung der Akkommodation wurde ein zusätzliches Experiment mit 6 Personen durchgeführt. In diesem Experiment wurde dem rechten Auge der Versuchsteilnehmer ein Fixationsobjekt in vier Sehabständen – 0 D, 1 D, 2 D und 3 D – präsentiert und die Refraktion des Auges und damit eine statische Abschätzung der Akkommodation auf die jeweilige Entfernung ermittelt. Zusätzlich wurde über ein Verfahren, das im Folgenden als klassische Refraktion bezeichnet werden soll, die Akkommodation mit Linsen bestimmt, die vor das Auge gesetzt werden. Bei diesem Vorgehen, wurde mit einer starken Pluslinse (konvexe Linse) ein unscharfes Bild erzeugt. Beim Blick auf das Fixationsobjekt wurden dann in 0,25 D Schritten so lange Minuslinsen (konkave Linsen) zusätzlich vor das „vernebelte“ Auge gegeben, bis das Fixierobjekt scharf gesehen wurde. Die Akkommodation ergibt sich mit dieser Methode als Differenz der Stärken von Plus- und Minuslinse. Das Fixationsobjekt war ein $1,5^\circ \times 1,5^\circ$ großes Karomuster, das eine Ortsfrequenz von 3 Perioden/Grad aufwies und mit einer Leuchtdichte von 30 cd/m^2 präsentiert wurde. Die Reihenfolge der Refraktionsmessungen wurde zufällig zwischen dem PowerRef II, dem SRW 5000 oder der klassischen Refraktion sowie den Sehabständen gewechselt. In Abbildung 4 sind die Ergebnisse dieser Messungen und die Regressionsgeraden der Akkommodationsdaten über den Sehabständen dargestellt.

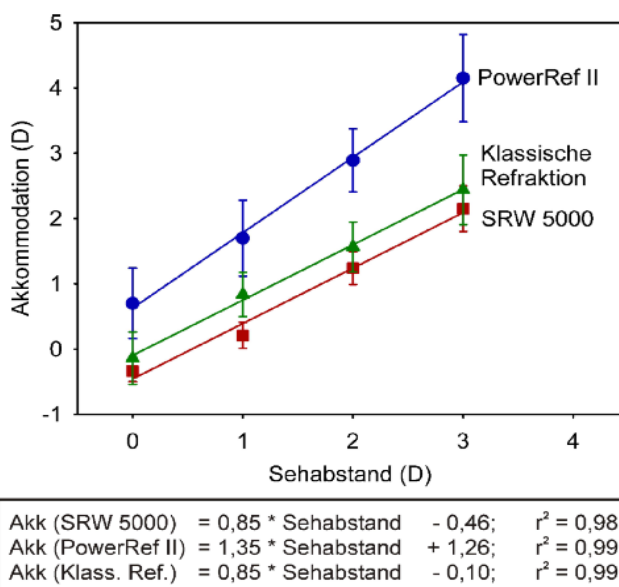


Abbildung 4: Akkommodationsmessungen mit dem Power-Ref II, dem SRW 5000 und der klassischen Refraktion als Funktion des Sehabstandes.

Wie zu erkennen ist, lagen beide Geräte um einen deutlichen Versatz im absoluten Meßwert auseinander und in der Bestimmung der absoluten Akkommodation erzielten das SRW 5000 und die klassische Refraktion eher vergleichbare

Werte. Darüber hinaus verlief die Regressionsgrade für die Daten des PowerRef II steiler über den Sehabstandsänderungen als die Gerade des SRW 5000 oder der klassischen Refraktion. Die Steigung der beiden letzteren war nahezu identisch. Der steilere Verlauf der Re-

gressionsgeraden des PowerRef II hatte insofern Implikationen für die Messungen in den Hauptexperimenten, da relative Veränderungen der Akkommodation unter verschiedenen kognitiven Anforderungen gemessen wurden und die Akkommodationsänderungen im Vergleich zu den anderen Techniken überschätzt wurden. Einen Unterschied in der Steigung der sehabstandabhängigen Akkommodationskurve zwischen PowerRef II und dem Autorefraktometer Canon R1 (Canon Inc., Tokyo, Japan; funktionsverwandt mit dem SRW 5000) haben wir bereits in einer früheren Studie beschrieben (Jainta et al., 2004). Daher ist eine leichte Überschätzung der Effekte auf Grund der PowerRefractor / PowerRef II Daten in den Diskussionen der Ergebnisse zu berücksichtigen.

5.2 Die Erfassung des Elektrokardiogramms (EKG) und der Pulswellenlaufzeit (PTT)

Das Elektrokardiogramm (EKG) als Beschreibung des Erregungsablaufes am Herzen zeigt verschiedene Potentialschwankungen, die die Erregungsausbreitung über die Vorhöfe (P-Zacke) zur gesamten Herzkammer (QRST-Komplex) widerspiegeln (vgl. 2.3.2). In der vorliegenden Arbeit wurde zur Bestimmung der Herzperiode (HP) – als Zeit zwischen den R-Zacken des EKG – und ihrer Variabilität (HPV) das EKG mittels der bipolaren Einthoven II Ableitung bestimmt. Die EKG-Signale wurden mit einem EKG-Verstärker vom Typ Siemens Mingograf 710 verstärkt und mit einer Zeitkonstanten von 3,2 s gefiltert. Als Antialiasingfilter diente ein acht-poliges Bessel-Tiefpassfilter mit einer Eckfrequenz von 220 Hz. Die Abtastrate je Kanal betrug 500 Hz. Gleichzeitig zur EKG-Erfassung wurde die Atmung mittels Atemfühler aufgezeichnet (vgl. Berntson et al., 1997).^{11,12}

Die Ermittlung der QRS-Komplexe im EKG-Signal erfolgte über einen Kreuzkorrelationsalgorithmus, in dem ein „Muster“ („template“) von drei bis vier ausgesuchten und gemittelten QRS-Komplexen verwendet wurde (Länge je 27 ms vor und nach der R-Zacke). Eine anschließende automatische Artefakterkennung von abnormen R-R-Intervallen entsprach einem modifizierten Algorithmus nach Berntson et al. (1997) und wurde durch eine visuelle Prüfung der Häufigkeitsverteilungen der R-R-Intervalle je Versuchsbedingung ergänzt. Die so korrigierten R-R-Intervalle dienten als Rohdatenbasis zur Bestimmung der mittleren Herzperioden pro Versuchsbedingung.

Die Rohdaten der R-R-Intervalle wurden desweiteren nach einer konstanten Interpolation zur Berechnung der spektralen Dichte mit einer Frequenz von 4 Hz abgetastet. Die spektrale Dichte wurde dann unter Verwendung eines Cosinus-Fensters (Tukey-Window) mit einer Fourier Transformation (BMDP 1T) berechnet. Um die Power der zwei klassischen Frequenzbänder der HPV zu beschreiben, wurde sie im Bereich von 0.047 - 0.141 Hz für die

¹¹Anmerkung: Für ein Experiment (E2) wurde ebenfalls der Blutdruck separat gemessen; da sich keine Veränderung mit der Variation der kognitiven Anforderung finden ließ, wurde im weiteren Vorgehen auf die Kontrolle des Blutdrucks verzichtet.

¹²Anmerkung: Während der Datenerhebung wurde kontinuierlich die Raumtemperatur kontrolliert; sie erwies sich als konstant.

niedrigen Frequenzen (LF) und im Bereich von 0.148 - 0.406 Hz für die höheren Frequenzen (HF) integriert (Berntson et al., 1997; Task Force, 1996). Die LF- und HF-Komponenten wurden in ihrer normierten Form – als Anteil an der Gesamtpower, multipliziert mit 100 – in die statistische Auswertung aufgenommen.

Die Pulswellenlaufzeit („pulse transit time“, PTT) entspricht der Zeit zwischen Beginn der Ventrikeldepolarisation bis zur ersten Öffnung der Aortenklappe („pre-ejection period“, PEP; vgl. Abs. 3.2.2). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Pulscurve in der Peripherie mittels eines speziell entwickelten Photoplethysmographen (Hoormann, 1984) am linken Zeigefinger oder am linken Ohrläppchen gemessen. Das Signal wurde mit einem 24 Hz Tiefpaß gefiltert. Als Maß der PTT wurde die Zeit zwischen der R-Zacke im EKG und dem Beginn der Pulscurve definiert. Letzterer wurde mittels eines Algorithmus festgelegt, der das Minimum der Pulscurve in einem Zeitfenster von 300 ms nach der R-Zacke (EKG) detektiert. Um Ausreißern vorzubeugen, wurden nur Werte im Bereich von 140 - 260 ms für den Beginn der Pulscurve zugelassen.

5.3 Die Datenaufbereitung der optischen Meßgrößen und die allgemeine Datenzusammenfassung

Aufbereitung der Daten vom PowerRefractor bzw. PowerRef II:

Wurden die Daten mit dem PowerRefractor oder dem PowerRef II erhoben, so lagen die einzelnen Meßintervalle in zwei 160-s-Phasen vor. Die Geräte erfaßten die Akkommodation, Pupillengröße und Blickrichtung mit 25 Hz, so daß theoretisch 4000 Datenpunkte für jede Meßphase vorlagen. In einem ersten Schritt wurden Datenlücken aufgrund von Lidschlüssen (Blinzeln) markiert und an ihren Rändern um jeweils 80 ms (entspricht zwei Meßwerten) erweitert; damit wurden Fehlmessungen durch Teilabdeckungen durch das Augenlid oder die Wimpern ausgeschlossen. Desweiteren wurden alle Daten um Fehlmessungen bereinigt, indem Werte, die außerhalb eines Bereiches von ± 3 Standardabweichungen um den Mittelwert lagen, ebenfalls von den anschließenden Berechnungen ausgeschlossen wurden. Ferner wurden in einem dritten Aufbereitungsschritt die Veränderungen der Akkommodation von einem Meßzeitpunkt zum nächsten betrachtet; veränderte sich die Akkommodation innerhalb von 40 ms um einen Wert größer als 1 D, so wurden beide Werte ausgeschlossen, da eine solche Veränderung physiologisch nicht plausibel erschien. Für jede markierte Akkommodationsfehlmessung wurden die entsprechenden Werte auch aus den Pupillen- und Blickrichtungsdaten entfernt.

Lag der Prozentsatz an fehlenden Meßwerten über 50 %, so wurde diese Meßphase von den weiteren individuellen Berechnungen ausgeschlossen und in der Gruppenbetrachtung linear interpoliert.

Aufbereitung der Daten vom SRW 5000:

Für das SRW 5000 lagen die einzelnen Meßintervalle ebenfalls in zwei 160-s-Phasen vor. Das Autorefraktometer erfaßte die Akkommodation mit ca. 100 Meßwerten pro Phase (160 s), die im Gegensatz zum PowerRefractor bzw. PowerRef II nicht mit einer festen

Abtastrate erfaßt wurden. Die Werte wurden aufgezeichnet, wenn eine genaue Einstellung der Geräteoptik auf das Auge vorlag. Die Pupillengrößenberechnung wurde nachträglich über eine Bildauswertung der Videobilder durchgeführt; für jede Akkommodationsmessung lag ein Videobild vor. Auch hier wurden alle Daten um Fehlmessungen bereinigt, indem Werte außerhalb eines Bereiches von ± 3 Standardabweichungen um den Mittelwert von den weiteren Berechnungen ausgeschlossen wurden. Lag der Prozentsatz der Fehlmessungen über 50 %, so wurde diese gesamte Meßphase von den weiteren individuellen Berechnungen ausgeschlossen und in der Gruppenbetrachtung linear interpoliert.

Allgemeine Zusammenfassung der Daten für alle erhobenen Variablen:

Über eine Triggerspur wurden alle erfaßten Daten mit dem Versuchsablauf synchronisiert. Die Daten konnten so eindeutig den einzelnen Meßintervallen, den Bearbeitungsphasen und den Einzelaufgaben zugeordnet werden.

Für eine erste Datenauswertung wurden die aufbereiteten 160-s-Meßphasen um die ersten 32 s gekürzt (vgl. 4.3) und über die verbleibenden 128 s Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) berechnet. Die Akkommodationsdaten wurden darüber hinaus in einzelnen Experimenten über die 160-s-Meßphasen in 20-s-Einzelabschnitte zusammengefaßt, um einen zeitlichen Verlauf der Akkommodationsänderung abtragen zu können. Für die vegetativen Kontrollvariablen wurde auf diese zweite Zusammenfassung verzichtet.

Anmerkung zur statistischen Auswertung:

Alle durchgeführten Experimente wurden statistisch über univariate oder multivariate Varianzanalysen mit kompletten Meßwiederholungsdesigns ausgewertet. Gemäß Tabachnik und Fidell (2000) wurde versucht, die Voraussetzungen für die Anwendung uni- oder multivariater Varianzanalysen z. B. über eine minimale Anzahl der Zellbesetzungen (N) oder durch eine Ausreißerbereinigung der Daten anzunähern. Die Verfahren sollten robust gegen geringfügige Verletzungen der Kernvoraussetzungen sein. Auf eine detaillierte Prüfung der Voraussetzungen wurde verzichtet.¹³

Wurden multivariate Varianzanalysen (MANOVA) gerechnet, so ist in der detaillierten Darstellung der Analyse ebenfalls Hotellings T^2 aufgeführt, um eine Bewertung der Variatenveränderung zueinander vornehmen zu können: veränderten sich die Variaten unterschiedlich mit den Abstufungen der interessierenden unabhängigen Variablen (z. B. der kognitiven Anforderung), so wurde Hotellings T^2 signifikant. Einzelne fehlende Werte wurden für

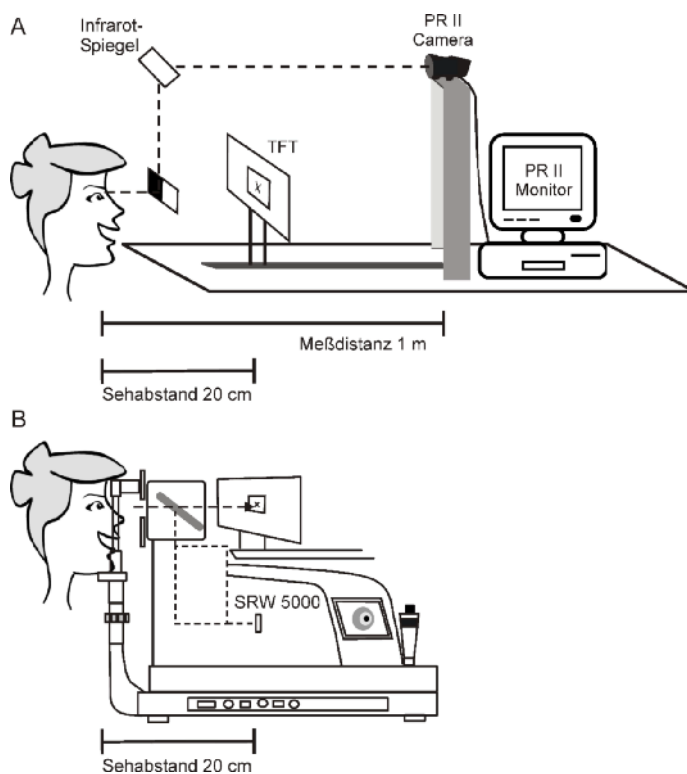
¹³Anmerkung: Zudem wurde für jede F-Wert-Bestimmung die Größe Epsilon nach Greenhouse & Geisser (1959) aufgrund der Stichproben-Varianz-Kovarianz-Matrix geschätzt (vgl. Statistik-Programm BMDP; Dixon, 1992). Wenn der Epsilon-Wert deutlich von 1 abwich, konnte nicht von einer Erfüllung der Zirkularitätsbedingung in der Populations-Varianz-Kovarianz-Matrix ausgegangen werden. Aus diesem Grund wurden in den vorliegenden Varianzanalysen die Freiheitsgrade der F-Verteilung gemäß der Adjustierung von Greenhouse & Geisser bestimmt und für die F-Wert Bewertung verwendet. Alle in den Auswertungen dargestellten F-Werte sind mit den unkorrigierten Freiheitsgraden aufgeführt, während die Irrtumswahrscheinlichkeit nach Greenhouse-Geisser-adjustiert wurde. Alle von 1 abweichenden Epsilon-Werte sind zusätzlich in den entsprechenden Tabellen mit aufgeführt.

die Stichprobenstatistik (d. h. ein fehlender Bedingungsblock in weniger als 10 % der jeweiligen Stichprobe) mittels Regression ersetzt; in einer schrittweisen Regression wurden über ein „F-to-enter“-Einschlußkriterium ($> 4,0$) – das sich wiederum über die Interkorrelation der Variablen bestimmen läßt – zwei begleitend gemessene Variablen ausgewählt und zur Schätzung der fehlenden Werte herangezogen.

Traten zudem in den berechneten Varianzanalysen bedeutsame Interaktionen zu Tage, wurden die Analysen um sogenannte „simple effect“-Analysen ergänzt (Dixon, 1992). Um die Varianz der Interaktion so in geplanten Einzelvergleichen aufzuklären, wurden in diesen Varianzanalysen die beteiligten Faktoren auf ihren Variationsstufen abwechselnd konstant gehalten; es wurden die gleichen Fehlerterme der kompletten Varianzanalysen verwendet, um die neuen F-Werte zu bestimmen und auf ihre Signifikanz zu prüfen.

5.4 Der allgemeine Versuchsaufbau

Alle Experimente wurden in einem konstanten Versuchsaufbau durchgeführt. Die Ausrichtung der Versuchsaufbauten (Meßgeräte, Bildschirm etc.) wurde für einen mittleren Augenabstand von 64 mm optimiert (vgl. Harvey 1982), d. h. die Darbietung der Sehreize wurde für diesen Augenabstand zentriert (vgl. Anhang A für die Verteilung des Augenabstandes in der Teilnehmerstichprobe). Die Sehreize – ein- oder mehrstellige Zeichen – wurden in einer Sehentfernung von 5 D (20 cm) auf Augenhöhe bei einer Leuchtdichte von 30 cd/m^2 präsentiert. Die Sehreize bestanden aus einer Segmentdarstellung, die auf 4×5 Pixel (horizontal x vertikal Auflösung: 1280×1024) beruhte; ein Pixel war auf dem verwendeten TFT-Bildschirm (ADI (A 715); 17 Zoll) 0,26 mm breit. Damit ergab sich eine horizontale Breite von $0,29^\circ$ pro Zeichen und eine entsprechende vertikale Höhe von $0,37^\circ$. Wurden mehrere Zeichen zur Darstellung, z. B. mehrstellige Zahlen, verwendet, so wurden zwischen den Zahlen 3 Pixel-Abstände eingeräumt. Damit ergaben sich horizontale Breiten von z. B. $0,81^\circ$ für zweistellige und $1,34^\circ$ für dreistellige Zahlen. Die Sehreize wurden mit positivem Kontrast – also als schwarze Zahlen auf weißem Grund – auf dem TFT-Bildschirm gezeigt. Das weiße Testfeld, auf dem die schwarzen Zahlen präsentiert wurden, war $12 \times 12 \text{ cm}$ groß. Die Hintergrund-/Raumbeleuchtung variierte zwischen den Versuchspersonen von 2 bis zu 15 lux. Sie wurde individuell gewählt, damit die Pupille jeder Person eine ähnliche, mittlere Größe aufwies, die im Meßbereich der verwendeten Geräte lag (vgl. Abs. 5.1). Fehlmessungen und ein Deckeneffekt der Pupillenveränderung unter kognitiven Anforderungen unter zu dunklen Sehbedingungen wurden so vermieden (vgl. Abs. 3.1). Wurden Daten mit dem PowerRefractor oder dem PowerRef II erhoben, so schaute die Versuchsperson durch einen Infrarotspiegel mit freiem Blick auf den TFT-Bildschirm. (vgl. Abb. 5).

**Abbildung 5:**

A: Skizze des Versuchsaufbaus für Messungen mit dem PowerRefractor oder dem PowerRef II. B: Skizze des Versuchsaufbaus für Messungen mit dem SRW 5000.

Die Reizdarbietung und die Ausrichtung des Meßgerätes wurden für das rechte Auge zentriert (vgl. Fußnote 1). Das linke Auge wurde mit einem schwarzen Filter verblendet, so daß die Sehreize nur monokular gesehen wurden. Wurden die Akkommodationsdaten mit dem SRW 5000 erhoben, so schaute der Versuchsteilnehmer nur mit dem rechten Auge durch eine Blende und durch den geräteeigenen Infrarotspiegel.

Zur Erfassung des EKGs wurden zu Beginn der Meßsitzung die Arm- und Bein-elektroden befestigt und der Plethysmograph zur Erfassung der Pulswellenlaufzeit am Ohr-läppchen oder kleinen Finger angebracht. Der Atemfühler wurde unterhalb der Nase mit einem Klebestreifen fixiert.

6 Die Experimente (E): Akkommodationsmessung...

Die vorliegende Arbeit umfaßt 5 Hauptexperimente, zu denen kleinere Exkurse oder Kontrollexperimente durchgeführt wurden. Die Darstellung erfolgt nicht chronologisch, sondern folgt der inhaltlichen Hauptargumentationslinie. Es wurde versucht, die Durchführungsbeschreibung der einzelnen Experimente ebenso wie die Ergebnisdarstellung auf die wesentlichen Aspekte zu beschränken; an einzelnen Stellen wird daher auf ergänzende Informationen im Methodenteil oder Anhang der Arbeit verwiesen.

6.1 ... während der Bearbeitung arithmetischer Aufgaben – eine Annäherung an die bestehende Literatur

In einem ersten Schritt wurden zwei Experimente (E1: Abs. 6.1.1 & E2: Abs. 6.1.5) aus der zitierten Literatur (vgl. Abs. 2.2) an die beschriebenen Rahmenbedingungen (vgl. Abs. 4) angepaßt und im Labor umgesetzt.

6.1.1 E1: Lesen und Addieren innerhalb einer Zahlenmatrix

In einer Arbeit von 1988 ließen Bullimore und Gilmartin 12 Versuchsteilnehmer Reihen und Spalten einer 5 x 5 Zahlenmatrix addieren bzw. lesen. Die Autoren berichteten eine Abnahme der Nahakkommodation um 0,04 D mit der Veränderung vom „Lesen“ zum „Addieren“ bei visuell präsentierten Zahlen. Die Zahlenmatrix wurde in einer Sehentfernung von 5 D (20 cm) binokular gezeigt. Es handelte sich um Bearbeitungsphasen von jeweils 2 min. Die Aufgabe wurde in ihrer Grundidee übernommen. Da gemäß der Idee, daß mit dem Ansteigen der kognitiven Anforderung – in diesem Fall dem Wechsel vom „Lesen“ zum „Addieren“ – eine sympathische Aktivierung im Organismus zunimmt, war entsprechend der Originalarbeit auch für dieses Experiment eine Abnahme der Akkommodation zu erwarten (vgl. Abs. 2). Die Veränderung in der kognitiven Anforderung wurde über die Fehlerrate (bzw. als %-korrekt) abgebildet und über eine vegetative Veränderung der begleitenden Variablen wie Pupillengröße, Herzperiode und Pulswellenlaufzeit sowie den LF- und HF-Komponenten der Herzperiodenvariabilität erfaßt. Zusätzlich wurde die Blickrichtung des Auges kontinuierlich erfaßt.

Method

Die Aufgabe der 40 männlichen Versuchspersonen bestand darin, Zeilen oder Spalten einer 5 x 5 Zahlenmatrix gemäß der Instruktion zu lesen oder zu addieren. Für die Bearbeitung dieser Aufgabe hatte der Versuchsteilnehmer beliebig Zeit – er arbeitete nach eigener Zeiteinteilung. Sobald er die Reihe oder Zeile gelesen bzw. addiert hatte, forderte er per Mausklick ein Ergebnis an. In der Lesephase wurden die Zahlen „11“ oder „22“ zufällig eingeblendet und die Versuchspersonen mußten mit vorher festgelegten Tastenantworten (z. B. „22“ = „links“; „11“ = „rechts“) reagieren. In der Addierphase wurde ein Ergebnis präsentiert, das richtig sein oder um einen Zähler abweichen konnte. Die Versuchsteilnehmer mußten das Ergebnis mit „richtig“ oder „falsch“ quittieren¹⁴. Die Anzahl der richtigen Antworten wurde als Anteil der richtigen an den gesamt bearbeiteten Antworten (%-korrekt) berechnet. Der zeitliche Ablauf der Aufgabenpräsentation ist in Abbildung 6 skizziert. Die Zahlenmatrix wurde in einer Sehentfernung von 5 D (20 cm) und – entgegen der Originalarbeit – monokular für zwei Meßintervalle (320 s) präsentiert. Jedes Meßintervall enthielt eine Lese- und eine Addierphase á 160 s. Die Reihenfolge der Phasen wurde intraindividuell getauscht.

¹⁴Anmerkung: Sollten die Versuchsteilnehmer mit Tastenantworten reagieren, so wurden die Tastenzuordnungen für 50 % der Versuchsteilnehmer mit „22“ = „rechts“ bzw. „richtig“ = „rechts“ und für die andere Hälfte der Personenstichprobe entsprechend entgegengesetzt mit „links“ belegt.

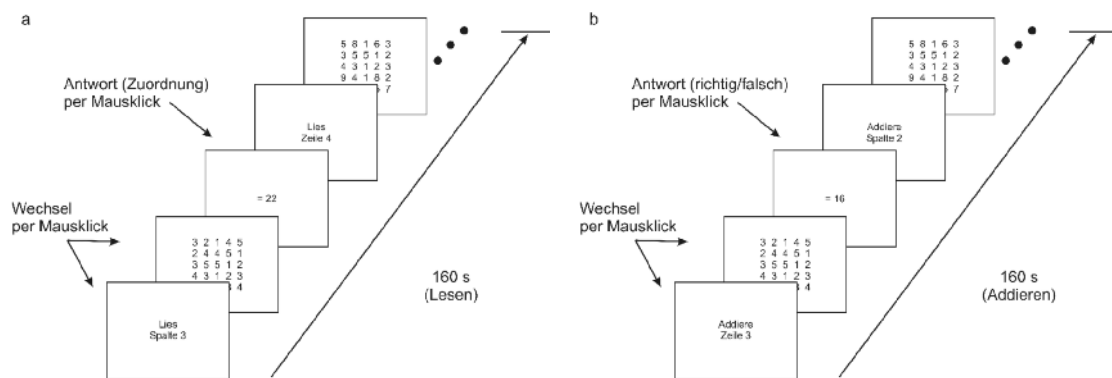


Abbildung 6: Skizze des zeitlichen Versuchsablaufs des Experimentes E1 (a: „Lesen“ und b: „Addieren“ innerhalb einer Zahlenmatrix für jeweils 160 s).

Die optometrischen Meßgrößen wurden in diesem Experiment für 20 Versuchsteilnehmer mit dem PowerRefractor und für 20 Versuchsteilnehmer mit dem PowerRef II vermessen. Da zwischen den Daten der beiden Geräte kein statistischer Unterschied festzustellen war (vgl. Anhang B), wurden die Daten zu einer Stichprobe zusammengefaßt. Ebenfalls im Anhang (C1) befindet sich die Betrachtung der Atemfrequenz, die aufgrund ihrer Konstanz keinen Einfluß auf die kardiovaskulären Meßgrößen hatte.

Folglich ergab sich mit dem Faktor „Aufgabe“ (Lesen vs. Addieren) und dem Faktor „Reihenfolge“ (Lesen-Addieren vs. Addieren-Lesen) ein 2 x 2 -Design für die Analyse. Die vegetativen Kontrollvariablen ebenso wie die Blickrichtung und der Anteil richtiger Antworten wurden in einem ersten Analyseschritt in ihrer mittleren Veränderung betrachtet, um die experimentelle Manipulation in ihrer Wirkung nachzuhalten. Dabei ist zu beachten, daß sich die Mittelwertsbetrachtung auf ein 128-s-Zeitfenster in jeder Meßphase bezieht (vgl. Abs. 4.3). Anschließend wurde die Akkommodation entsprechend bestimmt.

Ergebnisse

Wie in Abbildung 7a und 7b zu sehen ist, nahm die Anzahl der korrekten Antworten mit dem Wechsel zwischen „Lesen“ und „Addieren“ um im Mittel 4 % ab ($F_{1,39} = 7,70$; $p = 0,01$) und die Pupillengröße um 0,3 mm zu ($F_{1,39} = 36,76$; $p < 0,01$). Darüber hinaus nahm die Herzperiode mit der Veränderung der Aufgabe – wie es für einen kognitiv-induzierten Effekt zu erwarten war – um 12,73 ms ab ($F_{1,39} = 9,09$; $p < 0,01$; vgl. Abb. 7c) und auch die Pulswellenlaufzeit (PTT) verkürzte sich um 1,27 ms ($F_{1,39} = 7,31$; $p = 0,01$; vgl. Abb. 7d). Berechnete man zur Bestimmung der vegetativen Aktivierungsverschiebung das Verhältnis der Pulswellenlaufzeitveränderung zur umgerechneten Herzratenänderung, so ergab sich ein Quotient von -1,35. Für die normierte LF-Komponente ebenso wie für die normierte HF-Komponente der HPV ergab sich keine Veränderung (LF: $F_{1,39} = 1,85$; $p = 0,18$; HF: $F_{1,39} = 2,56$; $p = 0,12$; vgl. Abb. 7e & 7f).

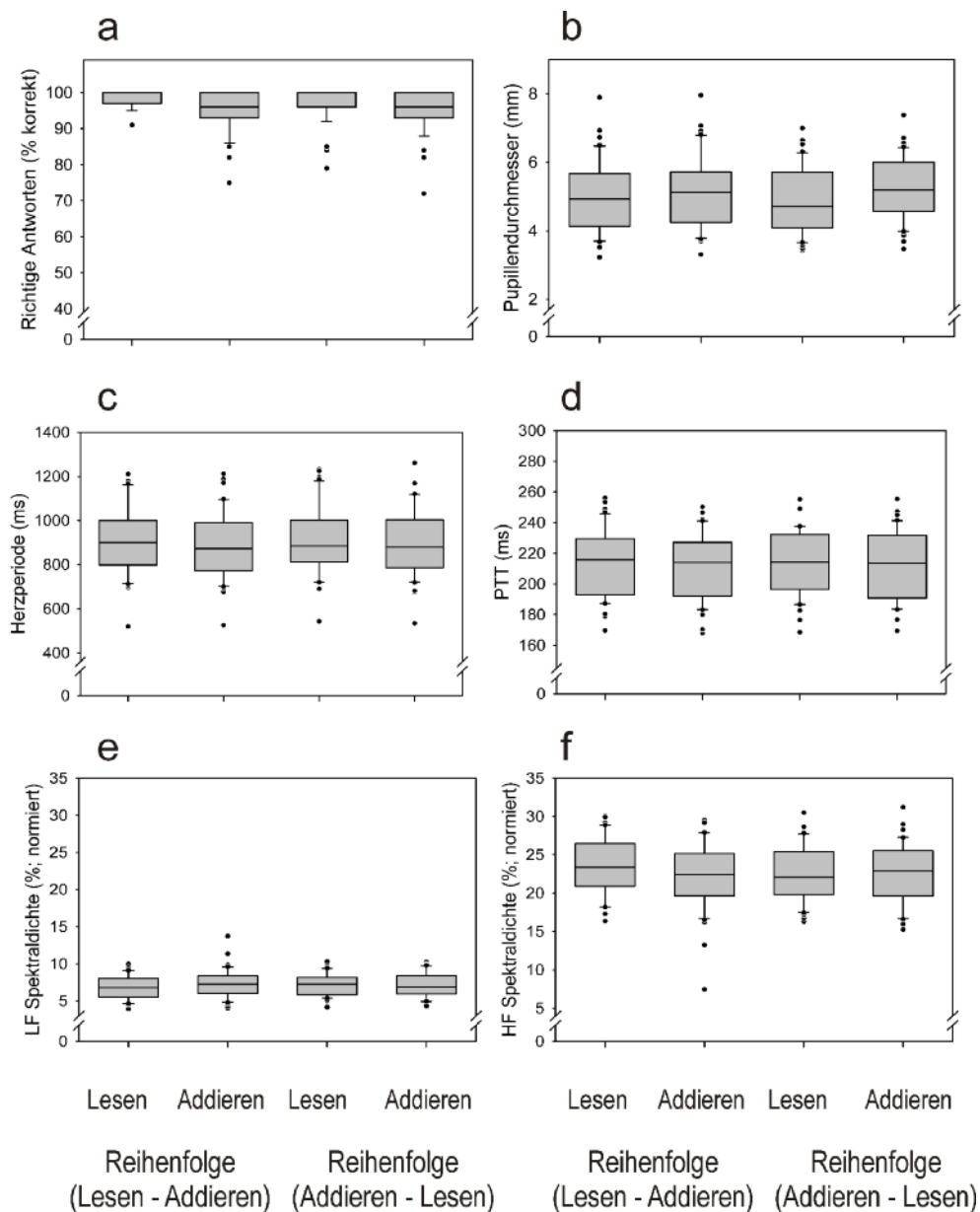


Abbildung 7: E1: Veränderungen der abhängigen Variablen a: Anzahl der korrekten Antworten, b: Pupillendurchmesser, c: Herzperiode, d: Pulswellenlaufzeit, e: normierte LF-Komponente der HPV und f: normierte HF-Komponente der HPV mit der Variation der „Aufgabe“ (Lesen vs. Addieren) und der „Reihenfolge“ (Lesen-Addieren vs. Addieren-Lesen).

Ebenso wie in der Originalarbeit fand sich auch in der Akkommodation eine Abnahme: die Akkommodation verlagerte sich um 0,08 D in die Ferne ($F_{1,39} = 4,17$; $p = 0,04$; vgl. Abb. 8a). Interessanterweise drehte sich aber gleichzeitig die Blickrichtung um $0,14^\circ$ nach rechts ($F_{1,39} = 4,42$; $p = 0,04$; vgl. Abb. 8b), wenn anstatt gelesen addiert werden mußte. Keine der Meßgrößen zeigte eine Veränderung mit dem Reihenfolgenwechsel und nur für die Herzperiode und tendenziell für die LF-Komponente der HPV zeigte sich eine Interaktion zwischen der „Aufgabe“ und der „Reihenfolge“ (HP: $F_{1,39} = 8,39$; $p < 0,01$; LF: $F_{1,39} = 3,74$; $p = 0,06$); letztere Interaktionen sind auch in Abbildung 7c & 7f tendenziell zu erkennen: die Herzperiode nahm z. B. zwischen den Aufgaben „Lesen“ und „Addieren“

deutlich schwächer ab, wenn zu erst addiert werden mußte, während sich der Effekt in der LF-Komponenten-Dichte direkt umkehrte.¹⁵

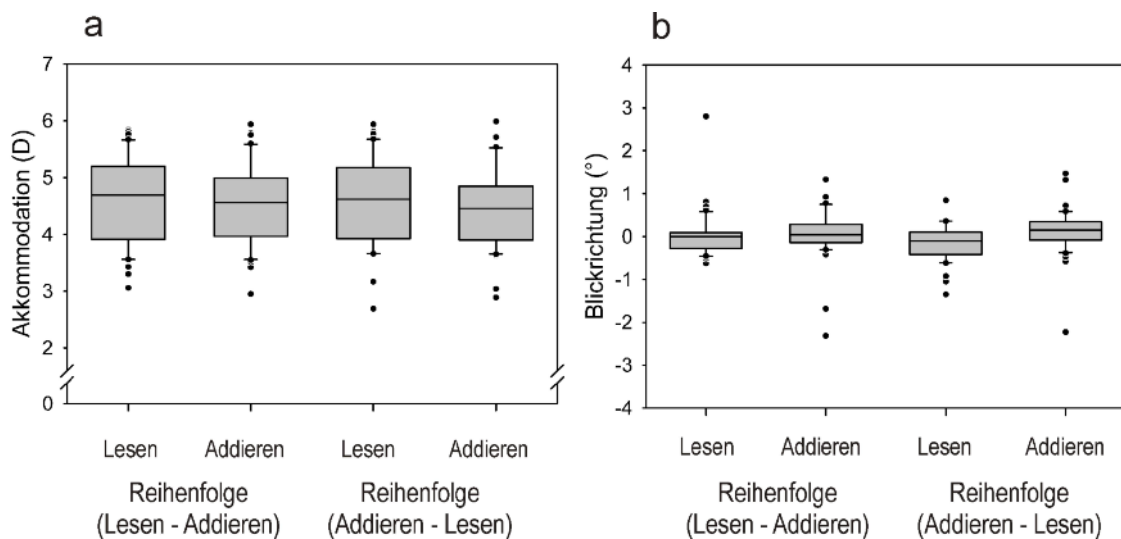


Abbildung 8: E1: Veränderungen der abhängigen Variablen a: Akkommodation und b: Blickrichtung mit der Variation der „Aufgabe“ (Lesen vs. Addieren) und der „Reihenfolge“ (Lesen-Addieren vs. Addieren-Lesen).

Im Sinne der Eingangs dargestellten Ausgangsidee sollte sich eine Korrelation zwischen Veränderungen der Akkommodation und den Veränderungen der kardiovaskulären Parameter zeigen. Zu diesem Zweck wurden die Daten über die Reihenfolgen hinweg gemittelt und die Differenzen zwischen „Addieren“ und „Lesen“ berechnet. Die Korrelation zwischen den Änderungen in der Akkommodation und denen in der Herzperiode betrug $r = -0,03$; ebenfalls gering blieb die Korrelation zwischen den Akkommodationsänderungen und den kognitiv-induzierten Änderungen in der Pulswellenlaufzeit (PTT) ($r = -0,11$), so daß keine Beziehung zwischen den Veränderungen der kardiovaskulären Parameter und den am Auge gemessenen Akkommodationsänderungen bestand.

Diskussion

Aufgrund der Abnahme der richtigen Antworten und der zu erwartenden Vergrößerung des Pupillendurchmessers, der Verkürzung der Herzperiode und der Pulswellenlaufzeit konnte davon ausgegangen werden, daß die Abstufung zwischen „Lesen“ und „Addieren“ den bezweckten Unterschied in der kognitiven Anforderung widerspiegelte. Die Veränderung in den LF- und HF-Komponenten der HPV erfolgte in die erwartete Richtung: die LF-Dichte nahm zu, während die HF-Dichte abnahm. Auch der errechnete Quotient aus Pulswellenlaufzeitänderung zu Herzperiodenänderung (vgl. Abs. 3.2.2; Weiss et al., 1980) trug dazu bei, daß die vegetativen Meßgrößen zusammenfassend eine sympathische Aktivierungszunahme vermuten ließen. Auch in der Akkommodation findet sich eine unter diesen Umständen gemäß der Literatur erwartete Abnahme (vgl. Bullimore & Gilmartin, 1988). Der

¹⁵Anmerkung: Die vollständige Varianzanalyse ist in Anhang D einzusehen.

Betrag der Veränderung war in der vorliegenden Untersuchung allerdings deutlich höher als in der Originalarbeit; in letzterer wurde die Zahlenmatrix binokular gesehen – und das dürfte zu einer Stabilisierung der Akkommodation durch die Vergenz geführt und damit den Bereich einer möglichen kognitiv-induzierten Änderung verkleinert haben (vgl. Ciuffreda, 1991). In der Betrachtung der Korrelation der Akkommodationsänderung mit der Veränderung der Herzperiode bzw. Pulswellenlaufzeit konnte keine Beziehung zwischen den gemessenen Größen entsprechend der Ausgangsidee (vgl. Abs. 1) gezeigt werden. Es ließ sich hier kein Hinweis einer gemeinsamen sympathischen Aktivierung finden. Das interessanteste Ergebnis des ersten Experimentes war allerdings die Veränderung der horizontalen Blickrichtung, obwohl die optischen Rahmenbedingungen für beide Aufgaben – „Lesen“ und „Addieren“ – konstant gehalten wurden. Möglicherweise drehte sich das Auge aufgrund der Veränderung der zu bearbeitenden Aufgabe systematisch zur rechten Seite; Augen- und Kopfdrehungen während kognitiver Bearbeitungsprozesse wurden an anderer Stelle als Indikatoren zerebraler Lateralisation verwendet – d. h. man geht davon aus, daß die Augenbewegungsrichtung die im Bearbeitungsprozeß aktive Gehirnhälfte indiziert, und zwar jeweils kontralateral (z. B. Ehrlichman & Weinberger, 1978; Kinsbourne, 1972). Die linke Gehirnhälfte wird allgemein mit einer Dominanz der verbalen Verarbeitung und Sprache in Verbindung gebracht (entspräche einer Augenbewegung nach rechts), während der rechten Gehirnhälfte eher die räumliche, analytische Verarbeitung dominant zugeordnet wird (entspräche einer Augenbewegung nach links). Desweiteren wurden Augenbewegungen als subtile Verhaltensweisen angenommen, die das kortikale Repräsentationssystem anzeigen (visuell, auditiv, kinesthätisch), welches eine Person zum Denken verwendet (z. B. Beck & Beck, 1984; Dooley & Farmer, 1988). Letztere Annahme beruht auf dem Augenbewegungsmodell des neurolinguistischen Programmierens (NLP: Bandler & Grinder, 1994), nach dem z. B. eine Augenbewegung nach rechts-oben ein Verhaltensmaß für „konstruiert visuell“ darstellt (links-oben entspräche z. B. „erinnert visuell“). Beide Vorstellungen – Augenbewegungen als Indikator zerebraler Lateralisation und das Augenbewegungsmodell des NLP – sind heftig kritisiert worden; insbesondere, da es an eindeutigen empirischen Belegen fehlt (vgl. Burke et al., 2003; Farmer et al., 1985, Keller & Revenstorff, 1996; Wertheim et al., 1986).

Rein meßmethodisch stellte sich allerdings die Frage nach dem Einfluß der Blickrichtungsänderung auf die Akkommodationsmessung. Es gibt Hinweise in der Literatur, daß sich durch die Drehung des Auges die Messung der Akkommodation ändert: die Augenlinse ist – wie jede Linse – über ihre Breite vom Mittelpunkt ausgehend betrachtet nicht gleich dick und die Linsenhinterfläche ist nicht über die gesamte Breite gleich stark gekrümmt (vgl. Abb. 1). Damit verändern sich die Einfallswinkel des ins Auge fallenden Infrarotlichtes, wenn das Auge von der Seite im Vergleich zu einer frontal positionierten Lichtquelle beleuchtet wird. Dadurch kann es zu einer Unterschätzung der Akkommodation kommen, wenn sich das Auge aus der Mittenposition wegdrehte (vgl. z. B. Lundstrom et al., 2005). Keines der MeßGeräte – weder der PowerRefractor/PowerRef II noch das SRW 5000 Autorefraktometer – stellen intern sicher, daß die Messung der Refraktion des Auges stets im gleichen

vertikalen Schnitt durch die Augenlinse vorgenommen wird.¹⁶ Dadurch könnte es zu einer drehungs-induzierten Veränderung in der Akkommodationsmessung gekommen sein. Um die Größe einer solchen drehungs-induzierten Veränderung in den Meßdaten abzuschätzen, wurde ein Zusatzexperiment durchgeführt, das im Folgenden kurz geschildert werden soll.

6.1.2 Exkurs: Auswirkungen der Blickbewegung auf die Akkommodationsmessung

Um die Blickbewegung kontrolliert auszulenken, wurden im beschriebenen Versuchsaufbau (vgl. Abs. 5.4) kleine Punkte (je 2 x 2 Pixel; 0,16 °) in zufälliger Reihenfolge an 9 horizontalen Blickpositionen in einer Sehentfernung von 5 D (20 cm) präsentiert. Die Positionen waren für das rechte Auge auf Augenhöhe zentriert und deckten in 0,5°-Abständen eine Blickrichtungsbreite von $\pm 2^\circ$ ab. Mit dem PowerRefractor wurde die Akkommodation bzw. Blickrichtung von 10 Personen – für den PowerRef II von 15 Personen – bei einem 2 s dauernden Blick auf jede Position gemessen. Zusätzlich zu den erwähnten Datenaufbereitungen (vgl. Abs. 5.3) wurden der Mittelwert für die Akkommodation bzw. Blickrichtung über die mittlere Sekunde des ruhenden Blicks berechnet, um die Übergangsphasen der Blickrichtungsänderung auszuschließen. Mit dem SRW 5000 wurden Akkommodationsdaten für 10 Personen gemessen, indem der Blick solange auf der Position fixiert wurde, bis 20 Meßwerte aufgezeichnet worden waren; erst dann sprang der Punkt zur nächsten Position. Auch hier wurden die ersten und die letzten 5 Meßwerte von der Mittelwertberechnung ausgeschlossen.

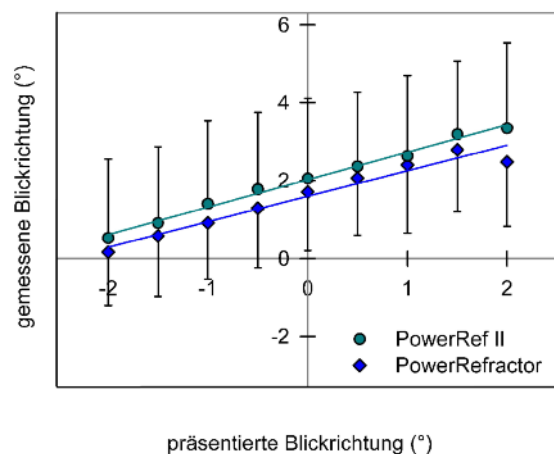
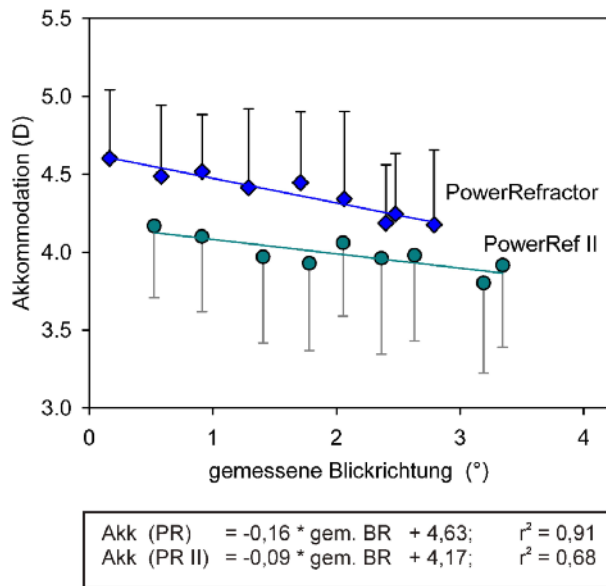


Abbildung 9: Regression der gemessenen Blickrichtung über die zufällig präsentierten Blickpositionen für die Meßgeräte PowerRefractor und PowerRef II.

gem. Blickr. (PR)	= 0,65 * präs. BR	+ 1,59;	$r^2 = 0,96$
gem. Blickr. (PR II)	= 0,71 * präs. BR	+ 2,02;	$r^2 = 0,99$

Wie in Abbildung 9 zu erkennen ist, konnten die präsentierten Blickpositionen für die Messungen mit dem PowerRefractor und dem PowerRef II mit einer hohen Varianzaufklärung aus den gemessenen Blickrichtungen vorhergesagt werden. Die absolute Verschiebung der gemessenen Blickrichtungswerte lag an der nicht vollständigen Zentrierung der Infrarotkamera¹; diese Absolutverschiebung war allerdings für die Betrachtung der Akkommodationsänderung unerheblich. Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, veränderte sich die Ak-

¹⁶Anmerkung: Eine theoretische, technische Möglichkeit wäre, die Akkommodation z. B. nur in der Augenposition zu vermessen, in der sich der Pupillenmittelpunkt mit dem ersten Purkinje-Reflex überlagert (vgl. Abs. 5.1).



kommodation um 0,16 D pro 1°-Blickrichtungsänderung für den PowerRefractor und um entsprechend 0,09 D pro 1°-Blickrichtungsänderung für den PowerRef II.

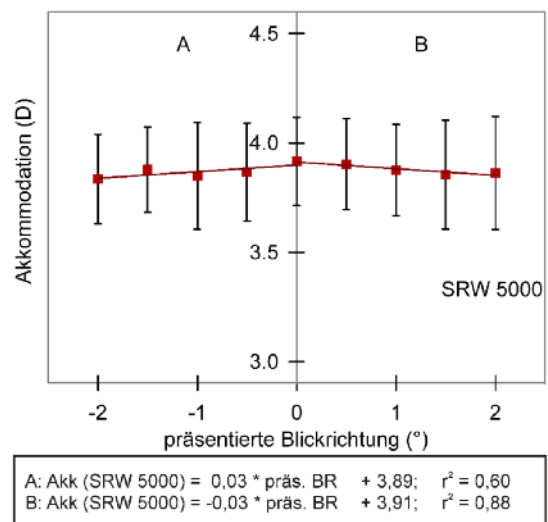
Abbildung 10: Regression der gemessenen Akkommodation über den gemessenen Blickrichtungswerten für die Meßgeräte PowerRefractor und PowerRef II.

Damit ließ sich für die Meßgeräte PowerRefractor und PowerRef II eine lineare Abhängigkeit der Akkommodationsmessung von der Blickrichtung des Auges zeigen. Bei Messungen mit dem SRW 5000 wurde für jede Aufnahme – im Rahmen der

bautechnischen Möglichkeiten, d. h. der zulässigen Pupillendistanzen – das Meßgerät relativ zum Auge zentriert. Eine Kontrolle der Augendrehung war hier weder geräteintern noch durch eine Messung der aktuellen Augenposition möglich. Für die Akkommodationsmessungen an unterschiedlichen Blickpositionen ergab sich ein ähnliches Bild.

Abbildung 11: Regression der gemessenen Akkommodation über den präsentierten Blickrichtungswerten für das SRW 5000.

Für die Darbietung der unterschiedlichen Blickpositionen ergab sich eine Abnahme der Akkommodation um 0,03 D, wenn sich das Auge um 1° nach links oder rechts aus der Mittenposition wegdrehte; diesen symmetrischen Abfall der Akkommodationsmessung mit der Drehung des Auges würde man physiologisch durch die Beschaffenheit der Augenlinse erwarten (vgl. Abb. 1).



Damit stehen die Ergebnisse – für den PowerRefractor ebenso wie für das SRW 5000 – in Einklang mit einigen Arbeiten der neueren Literatur, die bereits zeigten, daß sich die gemessene Akkommodation mit der Veränderung der Blickrichtung – geringfügig – ändere (vgl. z. B. Lundstrom et al., 2005, Seidemann & Schaeffel, 2002, oder Wolffsohn et al., 2004). Mit der Drehung verändere sich der „durchleuchtete“ Bereich der Augenlinse und es komme durch die Abflachung der Linse in Richtung der Peripherie zu einer Unterschätzung der Linsenkrümmung, d. h. der Akkommodation.

Für den PowerRefractor bzw. den PowerRef II bestand als Konsequenz aus diesen Daten die Möglichkeit, die kontinuierlich erfaßte Blickrichtung als Kovariate in die Akkommodationsbetrachtungen aufzunehmen. Da es für das SRW 5000 in den vorliegenden Experimenten keine Möglichkeit gab, die Blickrichtung bzw. deren Änderung während der Experimente zu erfassen, mußte durch die Aufgabenpräsentation sichergestellt werden, daß sich die Blickrichtung nicht änderte. Trotz dieser Vorkehrungen war für die Interpretation von Akkommodationsänderungen in der Größenordnung der drehungs-induzierten Veränderung Vorsicht geboten. Die hier beschriebene Alternativerklärung wurde für entsprechende Ergebnisse in die Diskussion aufgenommen.

6.1.3 E1: Erneute Analyse der Akkommodationsdaten unter Einbezug der Blickbewegungsänderung

Aufgrund der Veränderung der Blickrichtung war somit mit einer Änderung der gemessenen Akkommodation zu rechnen. Die Akkommodationsdaten des ersten Experimentes (E1) wurden daraufhin unter Einbezug der Kovariate „Blickrichtung“ erneut in einer Varianzanalyse ausgewertet. Der zuvor in Abbildung 8 zu sehende Unterschied der Akkommodation zwischen den Aufgaben „Lesen“ und „Addieren“ wurde in der neuen Analyse nicht signifikant ($F_{1,38} = 1,52$; $p = 0,23$); d. h. unter der beschriebenen Berücksichtigung der Blickrichtungsänderung konnte trotz einer Stichprobengröße von $N=40$ kein bedeutsamer Unterschied zwischen den Akkommodationswerten für „Lesen“ und „Addieren“ gefunden werden.¹⁷ Da der zuvor beschriebene Effekt daher weniger ein kognitiv-induzierter als ein blickdrehungs-induzierter Effekt war, erschien auch die fehlende Korrelation zwischen der Akkommodationsänderung und den Änderungen der kardiovaskulären Parameter im Nachhinein verständlich; für eine Änderung der Blickrichtung, die die Akkommodationsänderung bedingte, war keine vegetative Grundlage zu erwarten. Entsprechend korrelierten die Blickrichtungsänderungen nicht mit den Änderungen der Herzperiode bzw. PTT ($r = 0,03$, bzw. $r = -0,07$).

6.1.4 Ein erstes Fazit

Durch eine Änderung der Blickrichtung konnte eine Veränderung der Akkommodation hervorgerufen werden, die allem Anschein nach aufgrund der physiologischen Beschaffenheit der Augenlinse zustande kommt (vgl. z. B. Lundstrom et al., 2005). Dieser Befund führte dazu, daß für die weiteren experimentellen Umsetzungen entweder die Blickrichtung als Kovariate in die Berechnungen einging oder aber eine Blickrichtungsänderung durch die Präsentation der Sehreize ausgeschlossen werden sollte, um eine kognitiv-induzierte Akkommodationsänderung als eine solche abzusichern. Eine eingehendere Betrachtung der Beziehung zwischen der Akkommodation und den kardiovaskulären Para-

¹⁷Anmerkung: Die vollständige Varianzanalyse mit Kovariate „Blickrichtung“ ist in Anhang E einzusehen.

metern mußte nach diesem ersten Experiment bis auf weiteres zurückstehen, da keine kognitiv-induzierten Veränderungen in der Akkommodation zu berichten waren.

Das nächste Experiment stammte in seiner Grundidee wiederum aus der zitierten Literatur (vgl. Abs. 2.3) und wurde ausgewählt, da durch die Verwendung zweistelliger Zahlen Blickrichtungsänderungen nur in geringerem Maße zu erwarten waren.

6.1.5 E2: Lesen und Addieren sukzessiv dargebotener zweistelliger Zahlen

In einer Arbeit aus dem Jahr 1980 zeigte Kruger, daß sich die Akkommodation um 0,28 D verstärkte, wenn die Versuchsteilnehmer zeitlich aufeinander folgende zweistellige Zahlen addierten, anstatt sie zu lesen. Damit stand das Ergebnis dieser Arbeit im Gegensatz zu den Ergebnissen von Bullimore & Gilmartin (1988; vgl. E1); es ist allerdings zu beachten, daß die experimentellen Rahmenbedingungen dieser Originalarbeit deutlicher von den theoretisch für eine Akkommodationsminderung geforderten abwichen: Kruger präsentierte die Zahlen in 2,5 D (40 cm) Entfernung und auch die Fehlsichtigkeiten der Versuchsteilnehmer wurden nicht berücksichtigt (vgl. Abs. 2.2). Dennoch bot die in dieser Arbeit umgesetzte Aufgabe einen Anknüpfungspunkt für das weitere Vorgehen: es handelte sich gleichfalls um einen Vergleich zwischen „Lesen“ und „Addieren“ von Zahlen und die Induzierung möglicher Augenbewegungen durch die sparsameren Sehreize sollte vermindert sein. Somit wurde mit der Adaptation der aus der Originalarbeit bekannten Aufgabe und unter der Berücksichtigung der allgemeinen Rahmenbedingungen (vgl. Abs. 4) ein zweites Experiment durchgeführt, das im Vergleich zur Arbeit von Kruger (1980) eine Verringerung der Akkommodation erwarten ließ.

Method

Die Aufgabe der 40 männlichen Versuchspersonen bestand diesmal darin, die zweistelligen Zahlen gemäß der Instruktion zu lesen oder zu addieren. Die Zahlen wurden jeweils für 1,5 s und mit Pausen von 1,5 s nacheinander gezeigt. Nach jeweils 30 s wurden in der Lese- bzw. Addierphase die Zahlen „11“ oder „22“ zufällig eingeblendet und die Versuchspersonen mußten mit vorher festgelegten Tastenantworten (z. B. „22“ = „links“; „11“ = „rechts“) reagieren. In der Addierphase wurde ein Ergebnis präsentiert, das richtig sein oder um einen Zähler abweichen konnte. Der Versuchsteilnehmer mußte das Ergebnis mit „richtig“ oder „falsch“ quittieren.¹³ In jeweils 10 Zahlen kamen zudem 6 leichte (z. B. 05, 08) und 4 schwere (z. B. 46, 78) vor. Die Anzahl der richtigen Antworten wurde als Anteil der richtigen an den gegebenen Antworten (%-korrekt) berechnet. Der zeitliche Ablauf der Aufgabenpräsentation ist in Abbildung 12 skizziert.¹⁸ Die Zahlen wurden in einer Sehentfernung von 5 D (20 cm) monokular für zwei

¹⁸Anmerkung: Verblieb bis zum Ende der 160 s Bearbeitungsphase eine Restzeit (> 1 s) und es waren bereits 5 x 30-s-Aufgaben bearbeitet worden, so wurde eine neue 30-s-Aufgabe begonnen. D. h., die Versuchsteilnehmer konnten zwischen 5 und 6 Aufgaben pro Lese- bzw. Addierphase bearbeitet haben. Dieser Unterschied entstand, wenn z. B. auf ein Ergebnis verzögert reagiert wurde; da auf keine Antwort verzichtet werden sollte, wurde auf eine mögliche Antwort 3 s gewartet.

320-s-Meßintervalle präsentiert. Jedes Meßintervall enthielt eine Lese- und eine Addierphase á 160 s. Die Reihenfolge der Phasen wurde intraindividuell getauscht.

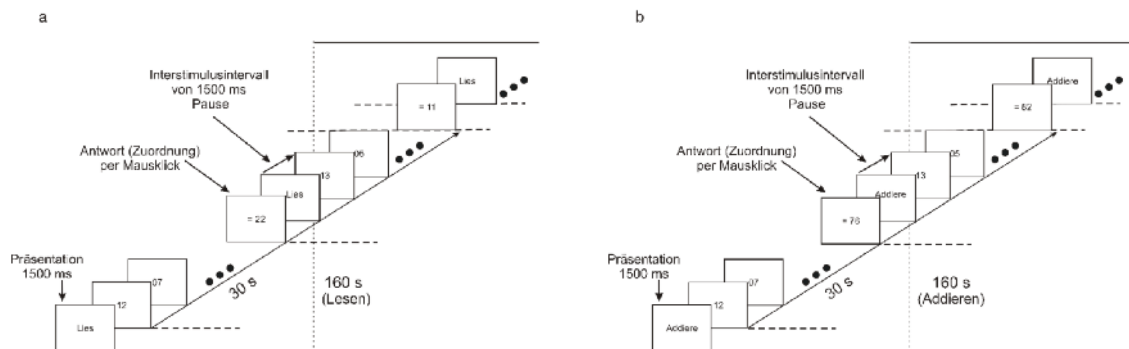


Abbildung 12: Skizze des zeitlichen Versuchsablaufs des Experimentes E2 (a: „Lesen“ und b: „Addieren“ sukzessiv dargebotener zweistelliger Zahlen für jeweils 160 s).

Die optometrischen Meßgrößen wurden in diesem Experiment erneut für 20 Versuchsteilnehmer mit dem PowerRefractor und für 20 Versuchsteilnehmer mit dem PowerRef II vermessen. Da zwischen den Daten der beiden Geräte kein statistischer Unterschied festzustellen war (vgl. Anhang F), wurden die Daten ebenfalls zu einer Stichprobe zusammengenommen. Im Anhang (C2) befindet sich die Betrachtung der Atemfrequenz, die aufgrund ihrer Konstanz keinen Einfluß auf die kardiovaskulären Meßgrößen hatte, obwohl ein leichter negativer Trend der Atemzüge pro Sekunde beim Addieren zu vermerken war.

Folglich ergab sich mit dem Faktor „Aufgabe“ (Lesen vs. Addieren) und dem Faktor „Reihenfolge“ (Lesen-Addieren vs. Addieren-Lesen) erneut ein 2 x 2 -Design für die Analyse. Die vegetativen Kontrollvariablen und der Anteil der richtigen Antworten wurden in ihrer mittleren Veränderung betrachtet, um die experimentelle Manipulation in ihrer Wirkung aufzuzeigen. Dabei ist zu beachten, daß sich die Mittelwertsbetrachtung auf ein 128-s-Zeitfenster in jeder Meßphase bezieht (vgl. Abs. 5.3). Zusätzlich ging die Blickrichtung als Kovariante in die anschließende varianzanalytische Betrachtung der mittleren Akkommodation ein.

Ergebnisse

Wie in Abbildung 13 zu sehen ist, nahm – wie bereits im ersten Experiment (vgl. Abs. 6.1.1; E1) – der prozentuale Anteil der richtigen Antworten beim „Addieren“ relativ zum „Lesen“ ab: im vorliegenden Experiment sogar deutlich um im Mittel 16 % ($F_{1,39} = 50,72$; $p < 0,01$; vgl. Abb. 13a). Auch die Pupille vergrößerte sich um 0,5 mm ($F_{1,39} = 38,92$; $p < 0,01$; vgl. Abb. 13b) und die Herzperiode nahm um 14 ms ab ($F_{1,39} = 6,51$; $p = 0,01$; vgl. Abb. 13c). Die Pulswellenlaufzeit als ein Indikator der sympathischen Aktivierung im kardiovaskulären System nahm um 2,8 ms ab ($F_{1,39} = 8,39$; $p < 0,01$; vgl. Abb. 13d) und erwies sich damit wiederholt als sensibler gegenüber der Aufgabenveränderung als die normierten Dichten der LF- und HF-Komponenten der HPV. In diesem Experiment nahm die mittlere normierte LF-Dichte leicht um ca. 0,5 % ab ($F_{1,39} = 4,06$; $p = 0,05$; vgl. Abb. 13e), während die normierte

HF-Dichte leicht um ca. 1 % zunahm ($F_{1,39} = 4,21$; $p = 0,05$; vgl. Abb. 13f). Berechnete man das Verhältnis Pulswellenlaufzeitänderung zu Herzratenänderung so ergab sich ein Quotient der vegetativen Aktivierungsverschiebung von -2,63 (vgl. Abs. 3.2.2). Zusätzlich veränderte sich die Pupillengröße mit der Veränderung der Reihenfolge der Aufgaben: wurde „Addieren-Lesen“ anstatt „Lesen-Addieren“ dargeboten, so war die Pupille im Mittel 0,15 mm größer ($F_{1,39} = 9,01$; $p < 0,01$). Interessanterweise war auch der prozentuale Anteil der richtigen Antworten um 6 % kleiner, wenn „Addieren-Lesen“ anstatt „Lesen-Addieren“ zu bearbeiten war ($F_{1,39} = 7,16$; $p = 0,01$). Für den prozentualen Anteil der richtigen Antworten zeigte sich überdies eine Interaktion Aufgabe x Reihenfolge ($F_{1,39} = 9,42$; $p < 0,01$), womit sich – wie in Abbildung 13a zu sehen ist – die richtigen Antworten mit der Veränderung der Aufgabe anders verteilten, wenn auch die Reihenfolge der Aufgabenbearbeitung getauscht wurde: wurde zuerst addiert, so wurden ca. 11 % mehr Fehler gemacht, als wenn zuerst gelesen wurde.¹⁹

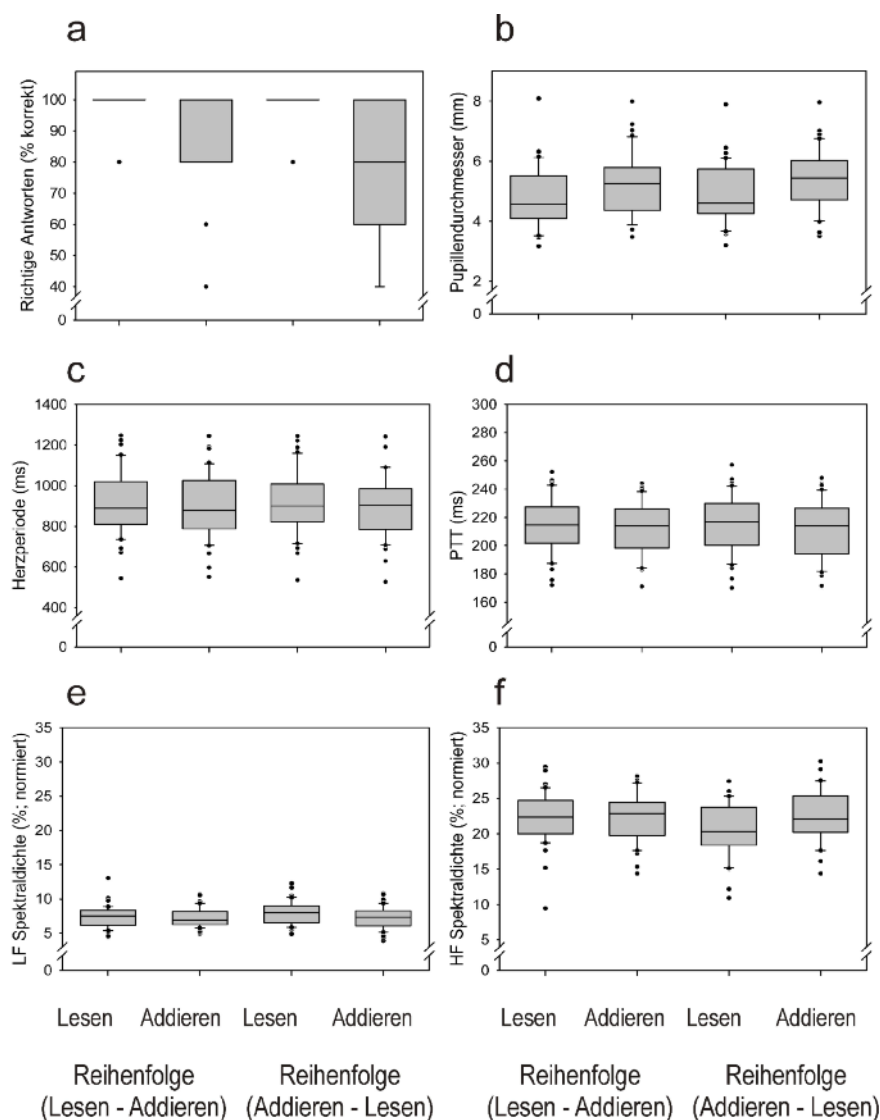


Abbildung 13: E2: Veränderungen der abhängigen Variablen a: Anzahl der korrekten Antworten, b: Pupillendurchmesser, c: Herzperiode, d: Pulswellenlaufzeit, e: normierte LF-Komponente der HPV und f: normierte HF-Komponente der HPV mit der Variation der „Aufgabe“ (Lesen vs. Addieren) und der „Reihenfolge“ (Lesen-Addieren vs. Addieren-Lesen).

¹⁹ Anmerkung: Die vollständige Varianzanalyse ist in Anhang G einzusehen.

In Abbildung 14 ist zu erkennen, daß sich die Blickrichtung ebenfalls um $0,31^\circ$ nach rechts drehte ($F_{1,39} = 13,76$; $p < 0,01$; vgl. Abb. 14b), obwohl nur zweistellige Zahlen präsentiert wurden. Entgegen der Originalarbeit nahm die Akkommodation im Mittel der gemessenen Daten um ca. $0,10$ D ab, wenn anstatt gelesen addiert werden mußte. Wurde eine (spekulative) Änderung der gemessenen Akkommodation aufgrund der bereits varianzanalytisch berücksichtigten Blickrichtungsdrehung ($0,31^\circ$ nach rechts; vgl. Abb. 6.1.2) verrechnet, so ergab sich eine kognitiv-induzierte (tendenzielle) Änderung der Akkommodation von ca. $0,05$ D ($F_{1,38} = 3,67$; $p = 0,06$; vgl. Abb. 14a). Des Weiteren unterschied sich die Akkommodation in ihrem mittleren Wert zwischen den Reihenfolgen „Lesen-Addieren“ und „Addieren-Lesen“ um ca. $0,11$ D ($F_{1,38} = 4,35$; $p = 0,05$) (vgl. Abb. 14).²⁰

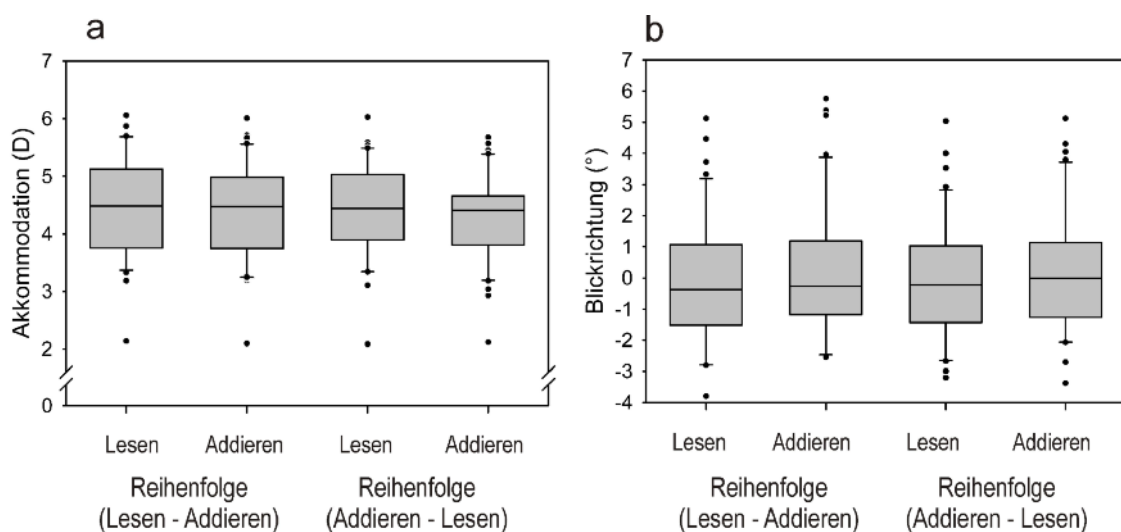


Abbildung 14: E2: Veränderungen der abhängigen Variablen a: Akkommodation und b: Blickrichtung mit der Variation der „Aufgabe“ (Lesen vs. Addieren) und der „Reihenfolge“ (Lesen-Addieren vs. Addieren-Lesen).

Die Veränderung in der gemessenen Akkommodation mit dem Wechsel von „Lesen“ zu „Addieren“ korrelierte zu $r = -0,06$ mit den Veränderungen in der Herzperiode; sie korrelierte ebenfalls nur sehr gering ($r = 0,12$) mit der Abnahme der Pulswellenlaufzeit.

Diskussion

Wie bereits im ersten Experiment deutete der Rückgang der richtigen Antworten nach der Veränderung der Aufgabe vom „Lesen“ zum „Addieren“ der präsentierten Zahlen auf eine gelungene Abstufung der kognitiven Anforderung hin. Der Einfluß der Reihenfolge der Bearbeitung der beiden Aufgaben auf den Anteil der richtigen Antworten war eher überraschend und mag durch die stärker fordernde Situation zustande gekommen sein, die entstand, wenn man mit einer schwierigeren Aufgabe beginnen mußte. Wie erwartet, verkürzten sich die Herzperiodendauer sowie die Pulswellenlaufzeit und der Pupillendurchmesser nahm zu, wenn „addiert“ im Vergleich zu „gelesen“ wurde. Der Quotient aus Pulswellenlaufzeit-

²⁰ Anmerkung: Die vollständige Varianzanalyse ist in Anhang H einzusehen.

änderung und berechneter Herzratenänderung verwies deutlich auf eine Verschiebung hin zur beta-(β)-adrenergen Aktivierung. Soweit sprachen auch die begleitend gemessenen Parameter für eine Veränderung im vegetativen Nervensystem in Richtung des Sympathikus (vgl. Abs. 2 & 3). Die tendenziellen Veränderungen der normierten Dichten der LF- und HF-Komponenten der HPV sprachen in ihren Richtungen zwar eher gegen diese vegetative Veränderung, sollten allerdings in ihrer Indikatorfunktion aufgrund der Kontroverse in der Literatur nicht überbewertet werden (vgl. Abs. 3.2.1). Interessanterweise veränderte sich auch in diesem Experiment die Blickrichtung deutlich nach rechts, wenn addiert wurde und das, obwohl in diesem experimentellen Vorgehen nur zweistellige Zahlen präsentiert wurden. Auch dieser Befund unterstrich die Notwendigkeit bei der Präsentation mehrstelliger Sehreize eine mögliche Blickrichtungsänderung als Kovariate aufzunehmen – auch dann, wenn die mehrstelligen Sehreize über beide Aufgabenbedingungen konstant gehalten wurden.

Entgegen der zitierten Arbeit (Kruger, 1980) fand sich in der Akkommodation eine leichte Abnahme, die im Sinne der Argumentation einer Akkommodationsreduktion aufgrund einer Sympathikusaktivierung (vgl. Abs. 2.3) zu erwarten war. In diesem Experiment blieb die tendenzielle Reduktion der Akkommodation bestehen, auch nachdem die Blickrichtungsänderung in der Analyse berücksichtigt worden war. Die geringe Änderung von abgeschätzten 0,05 D lag allerdings im Bereich der Überschätzung der gemessenen Akkommodationsänderungen durch das Meßgerät – den PowerRefractor bzw. PowerRef II (vgl. Exkurs Abs. 5.1.3). Die Veränderungen in der Akkommodation mit dem Aufgabenwechsel korrelierte zudem weder mit den Veränderungen in der Herzperiode noch mit den Änderungen des spezifischen und sensiblen Maßes der Sympathikusaktivierung, der Pulswellenlaufzeit. Eine fehlende Korrelation erschien als Hinweis, daß die gemessene Abnahme in der Akkommodation eher keine Ursache im vegetativen Nervensystem hatte.

Die mittlere absolute Lage der Akkommodation war für die Reihenfolge „Addieren-Lesen“ interessanterweise niedriger (um ca. 0,10 D) als für die Reihenfolge „Lesen-Addieren“. Die begleitende Vergrößerung des Pupillendurchmessers mag ein Hinweis auf eine tatsächliche Verstärkung der kognitiven Anforderung in der Reihenfolge „Addieren-Lesen“ im Vergleich zu „Lesen-Addieren“ gewesen sein – und wurde gestützt durch die Zunahme der Fehler in der zugehörigen Addierphase. Auffällig blieb der Akkommodations-effekt; die Blickrichtung änderte sich für diesen Vergleich nicht, so daß die Akkommodationsänderung im Gesamtbetrag der Reihenfolgenänderung zuzuschreiben war. Damit stellte sich die Frage nach der Ursache der Akkommodationsänderung. Zum einen war festzuhalten, daß auch hier die geringere Akkommodation in der Addier-Lesen-Reihenfolge nicht mit den Veränderungen in der Herzperiode ($r = 0,11$) oder der Pulswellenlaufzeit ($r = 0,09$) über die Reihenfolgenänderungen hinweg korrelierte. Damit schien auch hier – wie in Bezug auf die Aufgabenvariation – eine vegetative Ursache eher unwahrscheinlich. Betrachtete man zum anderen die Anteile der richtigen Antworten, so fiel, wie schon erwähnt, auf, daß die meisten Fehler in der Addierbedingung innerhalb der Addier-Lesen-Reihenfolge gemacht wurden. Für die Akkommodationsmessung ergab sich damit generell ein weiteres Problemfeld: bei vermehrten Fehlern konnte theoretisch aufgrund von Ermüdung oder Anstrengung falsch gerechnet worden sein. Es war aber genauso denkbar, daß die Akkommodation während der Aufgabenpräsentationen nicht in der sehr nahen (5 D) Sehentfernung konstant gehalten

wurde. Damit hätte die Zahleninformation durch eine nachlässige Fokussierung der Sehreize kurzzeitig nicht richtig gesehen werden können. Ein solcher „Drift“ der Akkommodation in die Ferne erschien plausibel (vgl. z. B. Malmstrom et al., 1980), da es einer gewissen Anstrengung bedurfte, die Akkommodation für die Bearbeitungszeit in der nahen Sehentfernung zu halten. Eine solche Anstrengung mag – spekulativ formuliert – unter stärker fordernden Aufgaben zu einer größeren „Nachlässigkeit“ in der Akkommodation geführt haben.²¹ Damit war für eine falsch beantwortete Aufgabe im Nachhinein nicht zu klären, welche Ursache für den Fehler verantwortlich gemacht werden konnte. Sollte es allerdings ein „Drift“ in der Akkommodation gewesen sein, so war die mittlere Abnahme der Akkommodation allein dadurch bedingt. D. h. würde man die falsch bearbeiteten Aufgaben von der Mittelwertsbildung pro Rechenphase ausschließen, so sollte sich keine Veränderung der Akkommodation mit der interessierenden Veränderung der kognitiven Anforderung oder der Reihenfolge der Aufgabenbearbeitung zeigen.²² Da im vorliegenden Experiment ein Rechenergebnis nur nach jeweils 10 präsentierten Zahlen (d. h. nach 30 s) abgefragt wurde, konnte eine Trennung der Akkommodationsdaten in richtige bzw. falsche Antworten nicht sinnvoll im Nachhinein vorgenommen werden. Die Idee der getrennten Betrachtung der gemessenen Akkommodation wurde in das nächste Experiment und dessen Aufgabengestaltung übernommen.

6.1.6 Fazit

Für das weitere Vorgehen sollte zusammenfassend neben der Änderungen der Blickrichtung als Kovariate auch die Richtigkeit der Bearbeitung der arithmetischen Aufgaben in die Auswertung der Akkommodationsmessungen aufgenommen werden. Es war zu erwarten, daß die Akkommodation während der Aufgabenbearbeitung nicht konstant auf die Sehentfernung ausgerichtet wurde, bzw. „in die Ferne driftete“, und daß diese Abweichung potentiell als Ursache hinter falsch beantworteten Aufgaben stehen konnte. Um einer solchen fehler-induzierten Abnahme der Akkommodation aus dem Weg zu gehen, sollten nur richtig bearbeitete Aufgaben für den interessierenden Vergleich der unterschiedlichen kognitiven Anforderungen in Betracht gezogen werden. Darüber hinaus war zu bedenken, daß durch die Komplexität der Aufgabe mehr oder weniger Fehler erzeugt werden konnten. Die Betrachtung der Akkommodation als Mittelwert über 128 s wirkte zudem zu allgemein; um den möglichen Verlauf einer Akkommodationsänderung nachzeichnen zu können und

²¹Anmerkung: Eine aufmerksamkeits-bezogene Erklärung einer solchen (phänomenologischen) „Nachlässigkeit“ in der sensorischen Informationsaufnahme findet sich z. B. bei Posner et al. (1976).

²²Anmerkung: Für die Pupillengrößenveränderung war kein Einfluß der falsch beantworteten Aufgaben zu erwarten, da die Pupillengröße nicht den gleichen äußeren, optischen Rahmenbedingungen unterliegt wie die Akkommodation; so wäre z. B. eine analoge Pupillengrößenveränderung nur unter veränderten Lichtbedingungen zu erwarten. Für die Pupillenerweiterung sollte tatsächlich die Veränderung der Anforderung und damit eine Veränderung der vegetativen Aktivierung verantwortlich gewesen sein (vgl. z. B. Goldwater, 1972).

ohne sehr kurzfristige Schwankungen über zu betonen, wurde für die nächsten Experimente geplant, die Akkommodationsdaten in 20-s-Intervallen zusammenzufassen, die eine sinnvolle zeitliche Differenzierung der 160 s langen Bearbeitungszeiträumen zuließen.

Für die Betrachtung der begleitenden vegetativen Meßgrößen ließ sich zusammenfassend nach den ersten beiden Experimenten feststellen, daß die Pupille deutlich auf die Variationen der kognitiven Anforderungen reagierte und sich auch die Pulswellenlaufzeit als kardiovaskulärer Sympathikusindikator sensitiv gegenüber den kognitiven Anforderungen erwies. Um das weitere Vorgehen auf die Akkommodation zu fokussieren, sollte nur noch die Pulswellenlaufzeit (PTT) als kardiovaskulärer Parameter ausgewertet und diskutiert werden. Die andern kardiovaskulären Parameter wurden zwar berechnet, sollten aber nur dann in die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse eingehen, wenn sinnvolle Bezüge zu einer vorhandenen Akkommodationsänderung herzustellen waren. Die bislang fehlende Korrelation zwischen den kardiovaskulären und den akkommodativen Änderungen legte diese Reduktion der abhängigen Variablen ebenfalls nahe. Des Weiteren veränderten sich zwar einzelne vegetative Meßgrößen mit der Änderung der Reihenfolge der Aufgabenbearbeitung – jedoch nicht die Akkommodation; aus diesem Grund wurde von einer weiteren intraindividuellen Variation der Aufgabenbearbeitungsreihenfolge abgesehen.

6.2 ... während der Bearbeitung arithmetischer Aufgaben unter Berücksichtigung der Blickrichtung und der Richtigkeit der Antworten – eine Erweiterung

Es wurde ein weiteres Experiment durchgeführt, das neben dem „Lesen“ und „Addieren“ von mehrstelligen Zahlen auch das „Multiplizieren“ als Rechenaufgabe enthielt. Damit konnte der Komplexitätsgrad der Aufgabe erneut abgestuft werden. Zudem wurde die Aufgabengestaltung so angelegt, daß jede Einzelaufgabe separat in die Auswertung aufgenommen oder von ihr ausgeschlossen werden konnte – je nach Richtigkeit ihrer Bearbeitung. Das gesamte Experiment wird im Folgenden kurz dargestellt.

6.2.1 E3: Lesen, Addieren und Multiplizieren dreistelliger Zahlen

Der Anknüpfungspunkt für das weitere Vorgehen bestand darin, daß es sich gleichfalls um einen Vergleich zwischen „Lesen“ und „Addieren“ von mehrstelligen Zahlen handelte. Über die Hinzunahme der Rechenoption „Multiplizieren“ wurde eine Erhöhung der kognitiven Anforderung und damit eine mit ihr einhergehende vegetative Veränderung sowie eine Zunahme der Rechenfehler erwartet. Für die Veränderung der Akkommodation wurde – gemäß der theoretischen Überlegung (vgl. Davies et al., 2005; Gilmartin, 1998) – eine Abnahme mit steigender Komplexität – „Lesen“, „Addieren“, „Multiplizieren“ – erwartet. Zudem sollte sich evtl. keine Veränderung der Akkommodation ergeben, wenn man neben der Blickrichtung als Kovariate auch die Richtigkeit der Aufgabenbearbeitung in die Betrachtung der interessierenden Effekte aufnahm (vgl. Abs. 6.1.6). Die kontinuierliche Erfassung

der Akkommodations- sowie der Blickrichtungsdaten wurde effektiver genutzt, indem die Daten in kleineren Zeitfenstern zusammengefaßt wurden, um mögliche kurzfristige Änderungen der Akkommodation sichtbar zu machen. Für die beiden verbleibenden begleitend gemessenen vegetativen Meßgrößen sollte sich entsprechend der vorangegangenen Experimente und der Literatur eine Pupillenvergrößerung und eine Pulswellenlaufzeitverkürzung mit Anstieg der Komplexität der kognitiven Anforderung zeigen (vgl. Abs. 2 & 3).

Method

Die Aufgabe der 20 männlichen Versuchspersonen bestand diesmal darin, die dreistelligen Zahlen gemäß der Instruktion zu lesen, zu addieren oder zu multiplizieren. Die Aufgaben wurden jeweils für 2 s nacheinander gezeigt. In den Addier- oder Multiplizierphasen wurden Ergebnisse präsentiert, die richtig sein oder um ± 1 bzw. ± 10 abweichen konnten. Der Versuchsteilnehmer mußte das Ergebnis mit „richtig“ oder „falsch“ quittieren.¹² In der Lese- phase wurde anstelle des „+“ bzw. „*“– Zeichens ein „R“ bzw. „L“ gezeigt und der Versuchsteilnehmer sollte mit der entsprechenden Maustaste reagieren. Die Zahlenkombinationen der Rechenaufgaben wurden vorher gezielt ausgewählt, um zu schwere und zu leichte Aufgabenvarianten zu vermeiden; sie waren für alle drei Bedingungen gleich. Die Aufgabenpräsentation ist in Abbildung 15 skizziert. Die Anzahl richtiger Antworten wurde wiederum als Anteil der richtigen an den gegebenen Antworten (%-korrekt) berechnet. Zusätzlich wurden die Reaktionszeiten unter Verwendung einer direkten Zweitasten-Tastatur gemessen. Die Zahlen wurden in einer Sehentfernung von 5 D (20 cm) monokular für zwei 320-s-Meßintervalle präsentiert. Jedes Meßintervall enthielt eine Lese- und eine Addier- oder Multiplizierphase von 160 s. Damit fungierte die Lese- und eine Addier- bzw. Vergleichsphase zu den Rechenphasen (vgl. Abs. 4.2). Die Reihenfolge der Phasen wurde interindividuell getauscht.

a	b	c
$\begin{array}{r} 67 \\ \text{L}4 \\ \hline 071 \end{array}$	$\begin{array}{r} 67 \\ +4 \\ \hline 071 \end{array}$	$\begin{array}{r} 67 \\ *4 \\ \hline 071 \end{array}$

Abbildung 15

Skizze der Aufgabenpräsentation im Experiment E3 (a: „Lesen“, b: Addieren“ und c: „Multiplizieren“ der Zahlen für je 160 s).

Die optometrischen Meßgrößen wurden in diesem Experiment für 10 Versuchsteilnehmer mit dem PowerRefractor und für 10 Versuchsteilnehmer mit dem PowerRef II vermessen. Da in den vorangegangenen Experimenten kein statistischer Unterschied zwischen den Geräten festzustellen war, wurden die Daten auch in diesem Experiment zu einer Stichprobe ohne weitere Überprüfung zusammengefaßt.

Folglich ergab sich mit dem Faktor „Aufgabe“ (Addieren vs. Multiplizieren) und dem Faktor „Phase“ (Lesen vs. Rechnen) ein 2×2 -Design für die Analyse. Die vegetativen Kontrollvariablen, der Anteil richtiger Antworten und die Reaktionszeit wurden in ihrer mittleren Veränderung betrachtet (vgl. Abs. 4.3). Die kontinuierlich erfaßten Akkommo-

dationsdaten wurden in 20-s-Zeitfenstern für die Meßphasen zusammengefaßt und es wurde damit für diese Betrachtung im $2 \times 2 \times 8$ -Design ein weiterer Faktor „Zeitintervall“ in die Varianzanalyse aufgenommen. Zusätzlich ging die Blickrichtung – ebenfalls in 20-s-Zeitfenstern zusammengefaßt – als Kovariate in die varianzanalytische Betrachtung der Akkommodation ein.

Ergebnisse

Wie in Abbildung 16 zu sehen ist, veränderten sich in diesem Experiment der prozentuale Anteil der richtigen Antworten, die Reaktionszeit, die Pupillengröße und die Pulswellenlaufzeit nur im Vergleich zur Multiplikations-Rechenbedingung – also zwischen „Lesen“ und „Multiplizieren“ bzw. „Addieren“ und „Multiplizieren“. Zwischen der Lese- und Addierbedingung war auch deskriptiv kein Unterschied festzustellen – mit einer kleinen Ausnahme: die mittleren Reaktionszeiten waren für die Addierbedingungen leicht kürzer als für die Lesebedingungen (ca. 400 ms; $F_{1,19} = 3,79$; $p = 0,07$; vgl. Abb. 16c). Dieses Ergebnis war – gemäß mündlicher Auskunft der Versuchsteilnehmer – auf eine mangelnde Schnelligkeitsumsetzung in der Lesebedingung zurückzuführen und wurde daher von der weiteren Diskussion ausgenommen. Die mit dem Fehlen eines Unterschiedes zwischen „Lesen“ und „Addieren“ einhergehenden Interaktionen wurden für alle betrachteten Meßgrößen bedeutsam, so daß an dieser Stelle nur die Ergebnisse der „simple effect“-MANOVAs beschrieben werden. Für den Anteil der richtigen Antworten bestand der Unterschied von ca. 30 % gleichfalls zwischen „Lesen“ und „Multiplizieren“ ($F_{1,19} = 56,84$; $p < 0,01$) wie auch zwischen „Addieren“ und „Multiplizieren“ ($F_{1,19} = 53,79$; $p < 0,01$; vgl. Abb. 16a). Im gleichen Muster veränderte sich auch die Pupillengröße: sie nahm um ca. 0,7 mm zwischen „Lesen“ bzw. „Addieren“ und „Multiplizieren“ zu ($F_{1,19} = 19,91$; $p < 0,01$; $F_{1,19} = 14,08$; $p < 0,01$; vgl. Abb. 16b). Ein ähnliches Bild zeigte sich auch für die gemessenen Reaktionszeiten: zwischen „Lesen“ und „Multiplizieren“ bestand ein deutlicher Unterschied von 614 ms ($F_{1,19} = 7,45$; $p = 0,01$), ebenso wie zwischen „Addieren“ und „Multiplizieren“ ($\Delta 1084$ ms; $F_{1,19} = 26,69$; $p < 0,01$) (vgl. Abb. 16c). Die Pulswellenlaufzeit als ein Indikator der sympathischen Aktivierung im kardiovaskulären System nahm für den gleichen Vergleich um ca. 3 ms ab ($F_{1,19} = 13,74$; $p < 0,01$; $F_{1,19} = 4,30$; $p = 0,05$; vgl. Abb. 16d) und erwies sich damit wiederholt als sensitiv gegenüber der deutlicheren Aufgabenveränderung.^{23,24}

²³Anmerkung: Auch für dieses Experiment wurde der Quotient aus Pulswellenlaufzeitänderung und umgerechneter Herzratenänderung bestimmt (vgl. Abs. 3.2.2; Weiss et al., 1980); der Quotient deutete mit einem Wert von -1,40 auf eine Zunahme der sympathischen Aktivierung hin.

²⁴Anmerkung: Die vollständigen Varianzanalysen sind in Anhang I einzusehen.

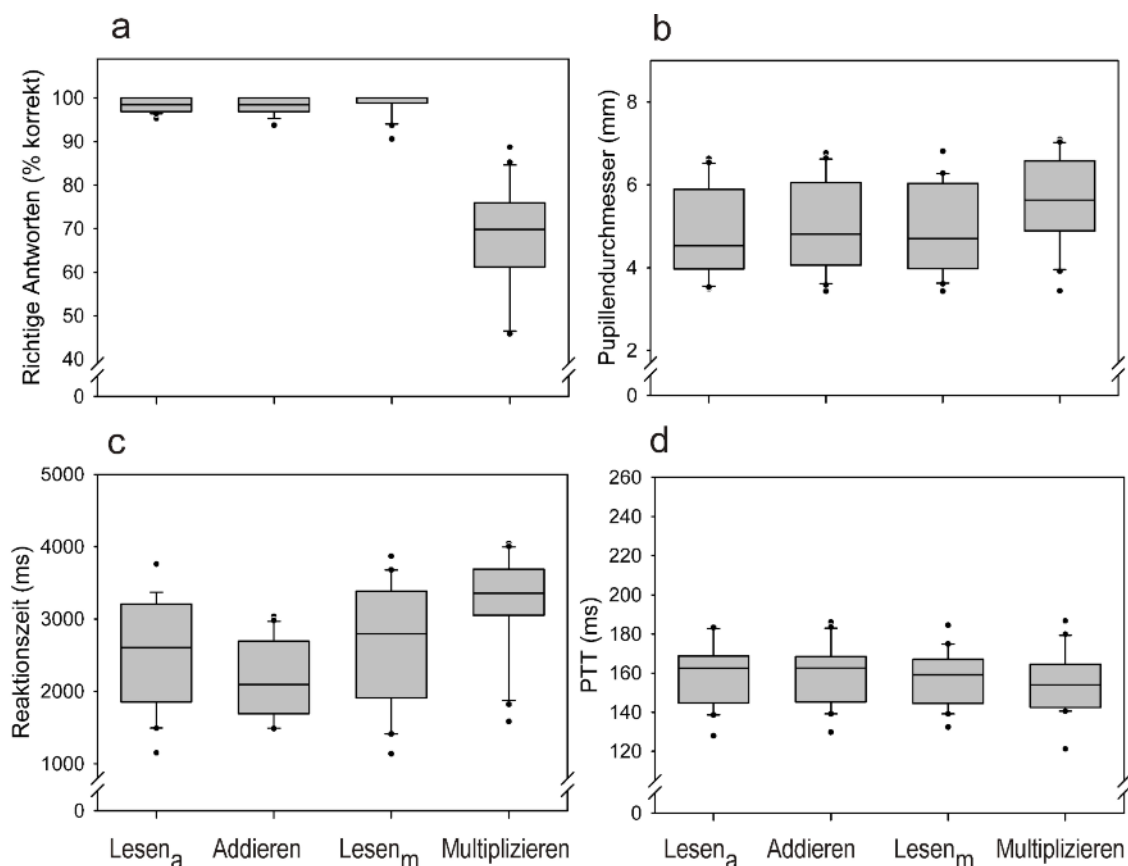


Abbildung 16: E3: Veränderungen der abhängigen Variablen a: Anzahl der korrekten Antworten, b: Pupillendurchmesser, c: Reaktionszeit und d: Pulswellenlaufzeit mit der Variation der „Phase“ (Lesen vs. Rechnen) und der „Aufgabe“ (Addieren vs. Multiplizieren). (Da es zu jeder „Aufgabe“ (Addieren vs. Multiplizieren) eine Lese-Phase gab, ist die jeweils zugehörige Lese-Phase mit einem Indize – „a“ für Addieren und „m“ für multiplizieren – gekennzeichnet.)

Die Akkommodation wurde für einen ersten Auswerteschritt für alle 20 Versuchsteilnehmer innerhalb der 20-s-Abschnitte gemittelt, ohne die Richtigkeit der Antworten zu berücksichtigen. Es zeigte sich, daß die Akkommodation über die Bearbeitungszeit von 160 s leicht um ca. 0,10 D zunahm ($F_{7,132} = 3,44$; $p < 0,01$; vgl. Abb. 17a); diese Zunahme war allerdings unabhängig von der Bearbeitungsphase (Lesen vs. Rechnen) und der „Aufgabe“ (Addieren vs. Multiplizieren). Zusätzlich zeigte sich eine deutliche Interaktion der „Phase“ mit der „Aufgabe“: wurde multipliziert, so nahm die Akkommodation im Mittel im Vergleich zum „Lesen“ oder „Addieren“ der Zahlen um ca. 0,25 D ab ($F_{1,18} = 6,72$; $p = 0,01$). Dieser Unterschied in der Akkommodation bestand sowohl zwischen „Lesen“ und „Multiplizieren“ ($F_{1,18} = 5,94$; $p = 0,02$), als auch zwischen „Addieren“ und „Multiplizieren“ ($F_{1,18} = 8,63$; $p < 0,01$).²⁵ Für den nächsten Schritt der Auswertung, wurden nur die Akkommodationsdaten (und Blickrichtungsdaten in der Kovariate) zugelassen, die während richtig bearbeiteter Aufgaben gemessen wurden. Zudem wurde ein Ausschlußkriterium für ganze Meßintervalle festgelegt: wurden in einer Bearbeitungsphase mehr als 40 % der

²⁵Anmerkung: Die vollständige Varianzanalyse ist in Anhang J einzusehen.

Aufgaben nicht richtig bearbeitet, so wurden die Daten der Person von der Analyse ausgeschlossen.²⁶ Nach dieser Selektion verblieben 16 Datensätze in der Analyse.

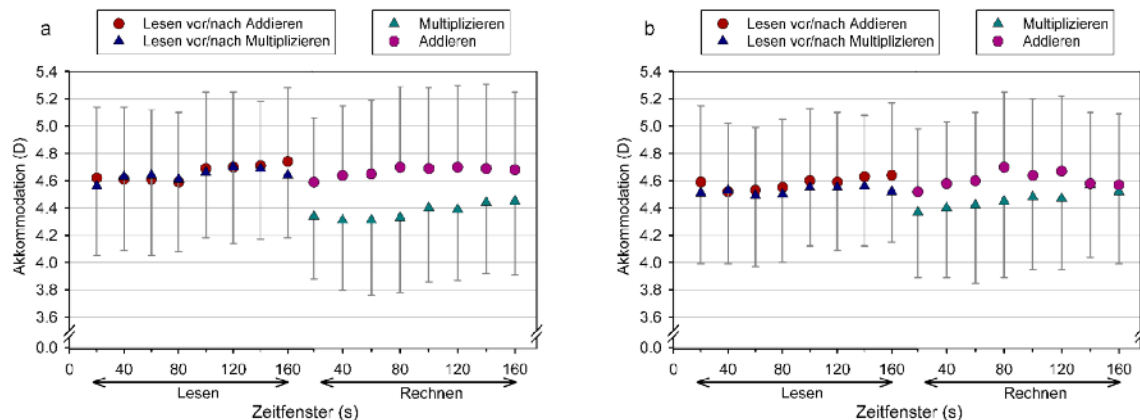


Abbildung 17: E3: Veränderungen der abhängigen Variablen a: Akkommodation für alle bearbeiteten Aufgaben und b: Akkommodation für nur richtig-bearbeitete Aufgaben mit der Variation der „Phase“ (Lesen vs. Rechnen) und der „Aufgabe“ (Addieren vs. Multiplizieren).

Betrachtete man die verbleibende Akkommodationsänderung, so zeigte sich weiterhin eine Zunahme der Akkommodation über die 160-s-Bearbeitungsphasen hinweg ($F_{7,104} = 2,64$; $p = 0,02$). Für die Interaktion zwischen „Phase“ und „Aufgabe“ – also den Unterschied zwischen „Lesen“ bzw. „Addieren“ und „Multiplizieren“ – veränderte sich allerdings das Ergebnis: die Akkommodationsabnahme beim Multiplizieren reduzierte sich im Mittel auf ca. 0,15 D und wurde in der Analyse nicht mehr bedeutsam ($F_{1,14} = 2,64$; $p = 0,13$; vgl. Abb. 17b).²⁷

Diskussion

Damit war festzuhalten, daß die Verhaltensdaten ebenso wie die Pupillenerweiterung und die Pulswellenlaufzeitverkürzung eine Veränderung zwischen den Aufgaben „Lesen“ bzw. „Addieren“ und „Multiplizieren“ zeigten, die man als Zunahme der kognitiven Anforderung interpretieren konnte. Darüber hinaus konnten die Veränderungen der vegetativen Meßgrößen wiederholt als Hinweis auf eine Aktivierungsverschiebung in Richtung des Sympathikus interpretiert werden. Interessanterweise machte es in der gewählten experimentellen Aufgabengestaltung keinen Unterschied, ob gelesen oder addiert werden mußte; vermutlich war die Abstufung der Anforderung zwischen „Lesen“ und „Addieren“ in der umgesetzten Anordnung zu gering. Dafür konnte durch die Hinzunahme der komplexeren Aufgabe des Multiplizierens eine deutliche Änderung hervorgerufen werden: so nahm z. B. die Reaktionszeit um 25 % und der Anteil der falschen Antworten um 30 % zu.

²⁶Anmerkung: Allgemein wird oft eine Fehleranzahl von bis zu 25 % zugelassen; dies gilt als allgemein akzeptabler „level of performance“ (vgl. z. B. Barch et al., 1997; Jaeggi et al., 2003), der aber je nach Aufgabenart angepasst wird und selten die 25 %-Marke nach oben überschreitet.

²⁷Anmerkung: Die vollständige Varianzanalyse ist in Anhang K einzusehen.

Die Akkommodation verlagerte sich darüber hinaus über die Bearbeitungszeit hinweg leicht in die Nähe. Diese Zunahme stand im Widerspruch zu einer von Malmstrom et al. (1980) berichteten stetigen Abnahme der Akkommodation über 30-s-Bearbeitungsphasen hinweg, in denen unterschiedliche Aufgaben in einem Sehabstand von 3 D bearbeitet wurden. Es war an dieser Stelle zu bedenken, daß der PowerRefractor ebenso wie der PowerRef II die gemessene Akkommodation – und auch die gemessene Akkommodationsänderung – leicht überschätzt (vgl. Abs. 5.1.3); der vom Betrag her eher geringe Effekt der gefundenen Veränderung über die Bearbeitungszeit konnte also auch nur aufgrund einer Überbetonung der Veränderung durch die gewählte Technik zustande gekommen sein.

Zusätzlich – und von größerer Bedeutung für die Frage nach einer Veränderung der Akkommodation unter kognitiven Anforderungen – konnte gezeigt werden, daß sich die Akkommodation mit dem Wechsel der Aufgaben vom „Lesen“ bzw. „Addieren“ zum „Multiplizieren“ nicht ändert, wenn man neben der Blickrichtungsänderung auch die Richtigkeit der Aufgabenbearbeitung berücksichtigt. D. h. betrachtete man nur die richtig bearbeiteten Aufgaben für die entsprechenden Bearbeitungsphasen – also diejenigen Meßdaten, die gemäß der Instruktion der kognitiven Anforderung am ehesten entsprachen – so konnte keine Verlagerung der Akkommodation in die Ferne gefunden werden. Die erwartete Verlagerung in die Ferne trat nur dann auf, wenn auch die nicht korrekt bearbeiteten Aufgaben in der Analyse berücksichtigt wurden. Wie bereits oben erwähnt, mag der Grund für diesen gefundenen Unterschied darin liegen, daß die Akkommodation aufgrund der starken Nahakkommodationseinstellung von der Präsentationsebene in Richtung ihrer Ruhelage (im Mittel in ca. 1 D (1 m)) auswanderte, um die anspannende Situation der Nahsehaufgabe zu entspannen (vgl. z. B. Gilmartin, 1998). Letzteres könnte durchaus dazu geführt haben, daß die Reizinformation nicht richtig bzw. unscharf gesehen worden war und damit nicht korrekt zur Weiterverarbeitung zur Verfügung stand, was wiederum zu Rechenfehlern geführt haben könnte; gerade bei Aufgaben mit höherem Schwierigkeitsgrad, könnte das Bestreben, gleichzeitig die Konzentration fürs Rechnen aufzubringen und die Nahakkommodation fürs Scharfsehen der Zahlen konstant zu halten, beeinträchtigt sein (vgl. z. B. Posner et al., 1976). Beim Blick in die Literatur war auffällig, daß – ebenso wie die Blickrichtung – die Richtigkeit der Aufgabenbearbeitung für die Auswertung der Akkommodationsdaten unberücksichtigt blieb (vgl. Abs. 2.2). In der neusten Arbeit von Davies et al. (2005) wurde die Schwierigkeit der Aufgaben über eine individuelle Abstufung der Präsentationsgeschwindigkeit der Sehreize variiert, die selbst wiederum durch die Anzahl der gemachten Fehler bestimmt wurde. D. h. es gab 5 Abstufungen: 0 %, 12,5 %, 25 %, 37,5 % und 50 % Fehleranteil. Der größte Effekt in der Akkommodation – eine Abnahme um ca. 0,25 D – wurde nur für den Vergleich zwischen den Bedingungen von 0 % und 50 % Fehleranteil gefunden; zwischen den Bedingungen 0 % und z. B. 25 % Fehleranteil lagen – gemäß der grafischen Darstellung geschätzt – ca. 0,05 D Veränderung der Akkommodation in die Ferne. Es war anzunehmen, daß auch hier eine Zunahme der Richtigkeit der Bearbeitung die Datenlage veränderte.

6.2.2 Fazit

Obwohl die erhobenen Verhaltensdaten (Reaktionszeit und Anteil der richtigen Antworten) ebenso wie Reaktion der vegetativen Meßgrößen (Pupillendurchmesser und Pulswellenlaufzeit) eine Zunahme der kognitiven Anforderung vom „Lesen“ bzw. „Addieren“ hin zu „Multiplizieren“ annehmen ließen, konnte keine signifikante Änderung der Akkommodation festgestellt werden. Die Verwendung einer Lese-Bedingung erschien zudem ungünstig, da es keine zum Rechnen adäquate Kontrollmöglichkeit der Bearbeitung über eine Ergebnisabfrage gab. Außerdem erschien es als schwierig, eine geeignete Abstufung der kognitiven Anforderungen über die Rechenoperationen umzusetzen – zumindest dann, wenn die Bearbeitungsintervalle und Ergebnisabfragen vergleichbar bleiben sollten. D. h. für das weitere Vorgehen wurde versucht, die kognitive Anforderung über eine andere Aufgabenart als durch arithmetische Aufgaben umzusetzen. Darüber hinaus konnte die Blickbewegung zwar erfaßt und berücksichtigt werden, es waren aber auch sehreiz-induzierte Interaktionen zwischen den kognitiven Anforderungen und Blickrichtungsänderungen denkbar; für eine eindeutige Betrachtung der Akkommodation unter kognitiven Anforderungen war es daher wünschenswert, zumindest keine Blickrichtungsänderungen mit der Reizpräsentation auszulösen. Zu diesem Zweck wurde im Folgenden die Reizpräsentation auf ein Zeichen eingeschränkt. Auch hier sollte zuerst eine Ausgangsidee aus der Literatur betrachtet und dann im Folgenden eine Erweiterung um die Betrachtung der Richtigkeit der Aufgabenbearbeitung ergänzt werden.

6.3 ... während der Bearbeitung einer zentralen Fixationsaufgabe (E3) – eine Annäherung an die bestehende Literatur

An dieser Stelle stand die Frage nach einer geeigneten experimentellen Aufgabe, d. h. der Umsetzung der kognitiven Anforderung, im Mittelpunkt der Überlegungen. Es mußte eine Aufgabe gefunden werden, die eine eindeutige Abstufung der kognitiven Anforderung erlaubte und zudem zur Informationspräsentation nur ein zentrales Sehzeichen benötigte, um für die Akkommodationsbetrachtung sehreiz-induzierte Blickrichtungsänderungen weitestgehend auszuschließen. Zu diesem Zweck wurde erneut ein Experiment aus der Literatur ausgewählt und unter den entsprechend neuen Rahmenbedingungen (vgl. Abs. 4) wiederholt: In der Originalarbeit von 1980 ließen Malmstrom et al. 5 Versuchsteilnehmer ein zentral präsentiertes Kreuz fixieren oder parallel zum „Fixieren“ eine Rückwärtszählaufgabe ausführen. Die Autoren berichteten über eine Abnahme der Akkommodation im Bereich von 0,25 D - 0,75 D, wenn zu der Fixieraufgabe die Rückwärtszählaufgabe hinzukam; zusätzlich nahm die Akkommodation leicht über die 30-s-Bearbeitungszeit hinweg ab, während das Fixierkreuz in einer Sehentfernung von 3 D (33 cm) monokular gezeigt wurde. Die Aufgabe wurde in ihrer Grundidee übernommen. Falls beim Ansteigen der kognitiven Anforderung - in diesem Fall beim Wechsel vom einfachen Fixieren des Kreuzes zum Fixieren mit gleich-

zeitiger Bearbeitung einer Rückwärtszählaufgabe – eine sympathische Aktivierung zunehmen sollte, konnte entsprechend der Originalarbeit mit einer Abnahme der Akkommodation gerechnet werden – vorausgesetzt, die Akkommodation sei durch das vegetative Nervensystem aufgabenangepaßt reguliert (vgl. z. B. Gilmartin, 1998; Abs. 2). Aufgrund der bisherigen Experimente (E1 & E2) war dies allerdings nicht zu erwarten; vielmehr sollte sich eine konstante Akkommodation zeigen, wenn die Blickrichtung stabil auf den zentralen Sehreiz ausgerichtet wurde. Die Blickrichtung wurde weiterhin erfaßt und ging – sollte sie sich aufgrund der kognitiven Anforderung ändern (vgl. z. B. Kinsbourne, 1972; Bandler & Grinder, 1994) – in die Betrachtung der Akkommodation mit ein. Die Veränderung in der kognitiven Anforderung wurde abermals über ein Verhaltensdatum (den Anteil der richtigen Antworten) abgebildet und eine vegetative Veränderung über begleitende Variablen wie Pupillengröße und Pulswellenlaufzeit erfaßt.

Method

Die Aufgabe der 15 männlichen Versuchspersonen bestand darin, in erster Linie den zentral präsentierten Sehreiz immer so gut wie möglich zu fokussieren. In der reinen Fixierphase wurde gemäß dem Originalexperiment nur ein Fixierkreuz für eine 30-s-Phase eingeblendet; nach Ende jedes 30-s-Fixierintervalls wurde die Instruktion „Fixiere“ wiederholt und ein neues Intervall begonnen, so daß am Ende 5 Fixierintervalle mit einer Gesamtlänge von 160 s innerhalb der Fixierphase bearbeitet wurden. In der „Fixieren/Merken“-Phase wurde ebenfalls zu Beginn jedes 30 s Intervalls eine Instruktion eingeblendet, gefolgt von einer zweistelligen Zahl, die sich der Versuchsteilnehmer merken sollte. Dann erschien das Fixierkreuz, das nach einer Pause von 500 ms durch eine einstellige Zahl ersetzt wurde. Der Versuchsteilnehmer mußte nun angeben, ob die gezeigte Zahl der Zehnerstelle der gemerkten Zahl entsprach. Die Zahl konnte richtig sein oder um einen Zähler abweichen. Der Versuchsteilnehmer mußte das Ergebnis mit „richtig“ oder „falsch“ quittieren.¹² Danach erschien wieder das Fixierkreuz und nach weiteren 500 ms erneut eine einstellige Zahl, die diesmal die Einerstelle der gemerkten Zahl sein sollte. Es mußte wieder per Mausklick geantwortet werden. Dann wurde das erneut gezeigte Fixierkreuz 500 ms später rot eingefärbt und der Versuchsteilnehmer mußte von der gemerkten Zahl einen Zähler abziehen und der gesamte Ablauf wurde mit der neu gemerkten Zahl wiederholt. Nach einer 30-s-Phase (also nach 20 Antworten und 10 Rückwärtszählschritten) wurde der gesamte Ablauf mit einer Wiederholung der Instruktion beginnend neu gestartet. Der zeitliche Ablauf der Aufgabenpräsentation ist in Abbildung 18 skizziert. Die Anzahl der richtigen Antworten wurde als Anteil der richtigen an den bearbeiteten Aufgaben (%-korrekt) berechnet. Die Sehzeichen wurden in einer Sehentfernung von 5 D (20 cm) und monokular für insgesamt zwei 320-s-Messintervalle präsentiert. Jedes Meßintervall enthielt damit eine „Fixieren“- und eine „Fixieren/Merken“-Phase von 160 s Länge. Die Reihenfolge der Phasen wurde intra-individuell getauscht.

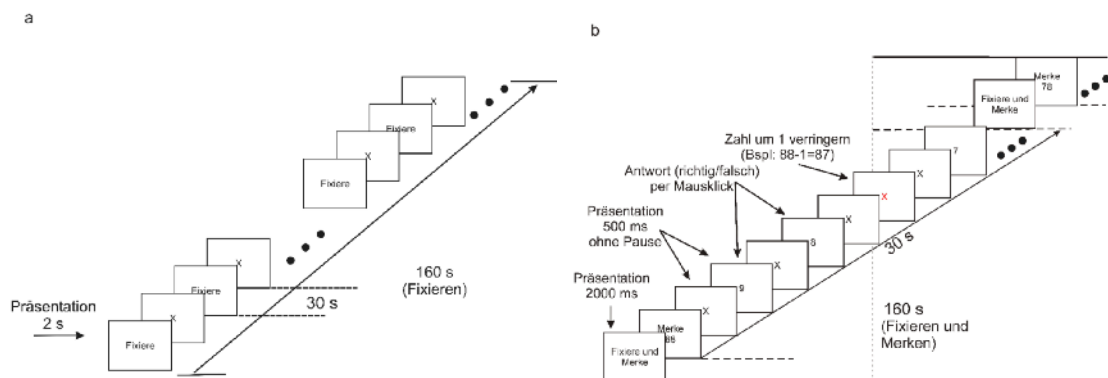


Abbildung 18: Skizze des zeitlichen Versuchsablaufs des Experimentes E4

(a: „Fixieren“ und b: „Fixieren / Merken“ bzw. Bearbeiten einer Rückwärtszählaufgabe für je 160 s).

Die optometrischen Meßgrößen wurden in diesem Experiment mit dem PowerRef II vermessen. Folglich ergab sich mit dem Faktor „Aufgabe“ (Fixieren vs. Fixieren/ Merken) und dem Faktor „Reihenfolge“ (Fixieren – Fixieren/ Merken vs. Fixieren/ Merken – Fixieren) ein 2 x 2 -Design für die Analyse. Die vegetativen Kontrollvariablen ebenso wie die Blickrichtung und der Anteil richtiger Antworten wurden in ihrer mittleren Veränderung betrachtet; die Akkommodation wurde entsprechend bestimmt.

Ergebnisse

Der Anteil der korrekten Antworten für die „Fixieren/ Merken“-Phase blieb mit dem Wechsel zwischen den Reihenfolgen (Fixieren – Fixieren/ Merken vs. Fixieren/ Merken – Fixieren) im Mittel gleich bei ca. 92% ($t_{14, 0,5} = 0,07$; $p = 0,94$). Wie in Abbildung 19 zu sehen ist, reduzierte sich die Pulswellenlaufzeit tendenziell in ähnlichem Ausmaß wie in den vorangegangenen Experimenten ($\Delta 2$ ms; $F_{1,14} = 3,57$; $p = 0,08$; vgl. Abb. 19a)²⁸ und die Pupillengröße nahm um 0,4 mm zu ($F_{1,14} = 16,93$; $p < 0,01$; vgl. Abb. 19b), wenn zum „Fixieren“ das „Merken/ Rückwärtszählen“ hinzukam.²⁹

²⁸Anmerkung: Auch für dieses Experiment wurde der Quotient aus Pulswellenlaufzeitänderung und umgerechneter Herzratenänderung bestimmt (vgl. Abs. 3.2.2; Weiss et al., 1980); der Quotient deutete mit einem Wert von -11,83 auf eine Zunahme der sympathischen Aktivierung hin.

²⁹Anmerkung: Die vollständige Varianzanalyse ist in Anhang L einzusehen.

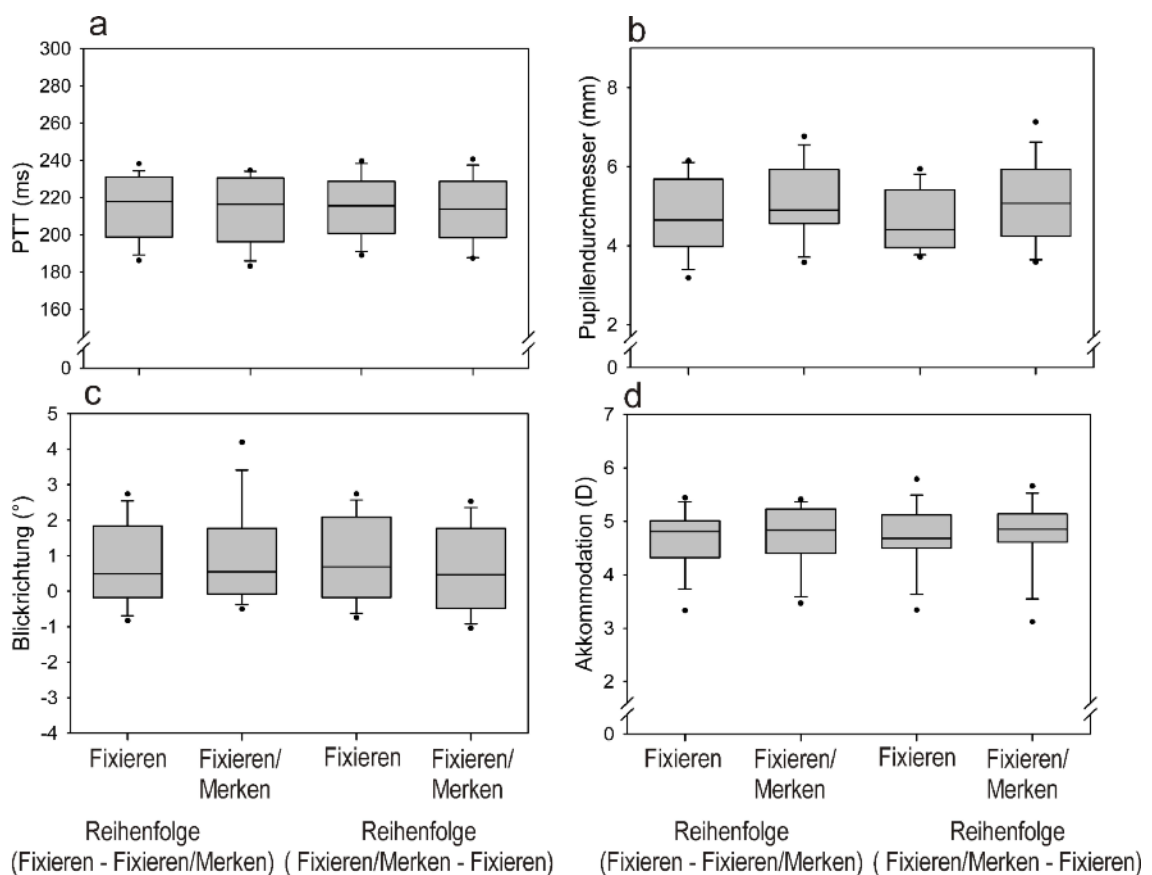


Abbildung 19: E4: Veränderungen der abhängigen Variablen a: Pulswellenlaufzeit, b: Pupillendurchmesser, c: Blickrichtung und d: Akkommodation mit der Variation der „Aufgabe“ (Fixieren vs. Fixieren / Merken) und der „Reihenfolge“ (Fixieren - Fixieren / Merken vs. Fixieren / Merken - Fixieren).

Entgegen der Originalarbeit – aber gemäß der eingangs erwähnten Vermutung – fand sich in der Akkommodation keine Veränderung ($F_{1,13} = < 1$, vgl. Abb. 19c; Blickrichtung als Kovariate). Interessanterweise verhielt sich die Blickrichtung mit dem Aufgabenwechsel für die beiden Bearbeitungsreihenfolgen unterschiedlich ($F_{1,14} = 6,77$; $p = 0,02$; vgl. Abb. 19d): wurde zuerst fixiert, drehte sich das Auge leicht nach rechts ($0,10^\circ$), wenn die „Merken/Rückwärtszählaufgabe“ hinzukam; wurde zuerst fixiert mit paralleler „Merken/Rückwärtszählaufgabe“, so drehte sich das Auge beim Aufgabenwechsel zur reinen Fixieraufgabe ebenfalls um $0,22^\circ$ nach rechts.³⁰

Diskussion

Aufgrund der Vergrößerung des Pupillendurchmessers und der Verkürzung der Pulswellenlaufzeit konnte – zumindest tendenziell – davon ausgegangen werden, daß die Abstufung zwischen reinem „Fixieren“ und „Fixieren / Merken“ die bezweckte Abstufung in der kognitiven Anforderung gemäß der Originalarbeit widerspiegelte und zu einer sympathischen Aktivierung geführt hatte (vgl. Malmstrom et al., 1980; Abs. 3.2.2). Allerdings zeigte sich

³⁰Anmerkung: Die vollständige Varianzanalyse ist in Anhang M einzusehen.

keine Veränderung der Akkommodation; dies mag daran gelegen haben, daß die vermessene Stichprobe von 15 Personen zu klein war, um eine mögliche, geringe Veränderung in der Akkommodation statistisch aufzudecken. Es konnte darüber hinaus ebenfalls keine konsistente Blickrichtungsänderung mit der Änderung der kognitiven Anforderung festgestellt werden; die Blickrichtung drehte sich immer aufgabenunabhängig nach rechts, wenn die Aufgabe gewechselt wurde. Es war spekulativ denkbar, daß diese Drehung eine allgemeine Anstrengungszunahme mit der anhaltenden Fixieraufgabe widerspiegelte, die in beiden Phasen umzusetzen war. Damit ließ sich auch keine kognitiv-induzierte Blickrichtungsänderung zeigen. Rückblickend betrachtet war eine reine Fixieraufgabe – ähnlich wie eine Lese-Bedingung – eine schlecht zu kontrollierende Vergleichsbedingung: es konnte weder kontrolliert werden, was die Versuchspersonen taten – da keine Verhaltensdaten vorlagen – noch entsprachen sich die Reizpräsentationen zwischen den beiden zu vergleichenden Bedingungen vollständig; für die reine Fixieraufgabe wurden z. B. keine Zahlen anstelle des Fixierkreuzes eingeblendet. Aufgrund dieser Bedenken und Abweichungen wurde in einem Kontrollexperiment die Reizdarstellung zwischen der Fixieren- und der Fixieren/Merken-Aufgabe weiter angeglichen. Damit unterschied sich zwar die Aufgabenumsetzung stärker vom Originalexperiment, die Bedingungen für einen direkten Akkommodationsvergleich wurden allerdings optimiert. So konnte durch einen weiteren Vergleich der „Fixieren“- und „Fixieren/Merken“-Aufgabe der Vollständigkeit halber sichergestellt werden, daß ein Ausbleiben der Akkommodationsänderung eher nicht aufgrund mangelnder Übereinstimmung der beiden Aufgabengestaltungen zu standekam; in der direkten Argumentationslinie der vorliegenden Arbeit war das im Folgenden kurz dargestellte Kontrollexperiment allerdings eher von geringerer Bedeutung.

6.3.1 Kontrollexperiment K1: Ein Erhöhen der Vergleichbarkeit der Fixieren- und Fixieren/Rückwärtszählphase

Für dieses Kontrollexperiment wurde die Fixieren/Merken-Phase entsprechend der Umsetzung in Experiment E4 übernommen (vgl. Abb. 18b). Um die Fixieraufgabe entsprechend gleich zu gestalten, wurden ebenfalls im identischen zeitlichen Ablauf zu Beginn eine „Merke 11“ oder „Merke 22“ zufällig eingeblendet und dann Einsen oder Zweien in die Fixieren-Phase eingespielt; der Versuchsteilnehmer mußte mit den Maustasten entsprechend antworten, ob die gesehene Zahl der Zehner- bzw. Einerstelle von 11 bzw. 22 entsprach. Auch das Rotfärben des Fixierkreuzes nach 3 s wurde in die Fixieraufgabe übernommen – ohne die Versuchspersonen allerdings zum Rückwärtszählen zu veranlassen.

Für das Kontrollexperiment wurde die Reihenfolge der Aufgabenbearbeitung (Fixieren – Fixieren/Merken vs. Fixieren/Merken – Fixieren) nur noch interindividuell für die 16 Versuchsteilnehmer getauscht. Eine Erfassung der Akkommodation und der Pupillengröße wurde diesmal mit dem SRW 5000 realisiert. Als vegetative Kontrollvariable für dieses Experiment hatte sich die Pupillengröße als sensitiv gegenüber der Aufgabenänderung erwiesen (vgl. Abs. 6.2.2) und die Betrachtung der Pulswellenlaufzeit versprach hier keinen weiteren Nutzen; außerdem zeigte die Blickrichtung im

vorangegangenen Experiment keine systematische Variation mit dem Wechsel der Aufgaben, so daß eine Messung der Akkommodation mit dem SRW 5000, das keine Erfassung der Blickrichtung erlaubt, gerechtfertigt erschien. Das SRW 5000 wird zudem als Gerät mit einer höheren Genauigkeit der Akkommodationsmessung im Vergleich zum PowerRefactor beschrieben und es erschien daher möglich, kleinere Akkommodationsänderungen – wenn sie ausgelöst worden sind – meßtechnisch zu erfassen (vgl. z. B. Mallen et al., 2001).³¹

Die Anzahl der korrekten Antworten lag für die Bewertung der Zehnerstellen bei 88 % und unterschied sich nicht zwischen „Fixieren“ oder „Fixieren / Merken“ ($t_{15, 0,5} = -0,35$; $p = 0,73$); auch für die Bewertung der Einerstellen konnte kein Unterschied festgestellt werden ($t_{14, 0,5} = 0,82$; $p = 0,43$), obwohl die Anzahl der richtigen Antworten beim „Fixieren / Merken“ leicht um 3 % abnahm.

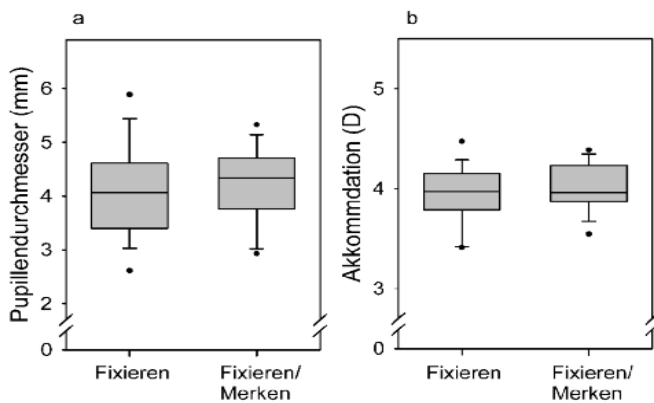
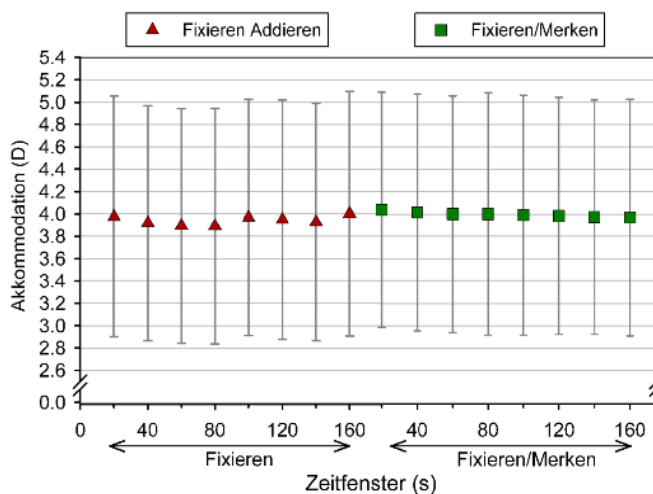


Abbildung 20: K1: Veränderungen der Variablen a: Pupillendurchmesser und b: Akkommodation mit der Variation der „Aufgabe“ (Fixieren vs. Fixieren / Merken).

Wie in Abbildung 20 zu sehen ist, nahm die Pupillengröße mit dem Hinzukommen der parallelen Merke- bzw. Rückwärtszählaufgabe nur leicht – allerdings nicht bedeutsam im Vergleich zum „Fixieren“ – um 0,12 mm zu ($t_{14, 0,5} = -0,92$; $p = 0,37$). Interessanterweise nahm auch die Akkommodation um ca. 0,05 D mit dem Hinzukommen der parallelen Merke – bzw. Rückwärtszählaufgabe tendenziell zu ($t_{14, 0,5} = 1,86$; $p = 0,08$). Betrachtete man die Veränderung der Akkommodation in kleineren Zeitintervallen, indem die Akkommodationsdaten in 20-s-Zeitfenstern für jede Phase zusammengefaßt wurden, so sah



man, daß für die reine Fixierbedingung die Akkommodationswerte etwas stärker über die Zeit schwankten (vgl. Abb. 21).

Abbildung 21: K1: Veränderungen der Akkommodation mit der Variation der „Aufgabe“ („Fixieren vs. Fixieren/Merken“); die Akkommodationsdaten sind in 20-s-Zeitfenstern zusammengefaßt (\pm SD).

³¹Anmerkung: Für die Interpretation der Ergebnisse wurde allerdings die mögliche Änderung der gemessenen Akkommodation aufgrund der Blickrichtungsänderungen berücksichtigt.

Auch hier zeigte sich, daß während der Fixierphase keine wirkliche Kontrolle der Bearbeitung umgesetzt werden konnte. Für die allgemeine Gestaltung der Aufgabe war es hier nicht möglich, richtig-bearbeitete von falsch-bearbeiteten Aufgaben zu trennen, da die Aufgabenbearbeitung zeitlich nicht eindeutig einzugrenzen war; die Bearbeitung erstreckte sich über mehrere Zahlenpräsentationen und letztendlich hätten nur korrekt-bearbeitete 30-s-Intervalle summativ als vollständig korrekt-bearbeitet gelten können, was nur für einen verschwindend geringen Teil der Bearbeitungsintervalle zutraf.

Das Ergebnis, daß die Akkommodation mit dem Hinzukommen der Merke- bzw. Rückwärtszählaufgabe tendenziell leicht zunahm, wurde unter dem Vorbehalt betrachtet, daß dieser Effekt im Rahmen der möglichen Veränderungen aufgrund von Blickrichtungsänderungen beim SRW 5000 lag (vgl. Abs. 6.1.2). Hier eine kognitiv-induzierte Veränderung anzunehmen, widersprach dem Ausbleiben einer deutlichen Pupillenvergrößerung in diesem Kontrollexperiment. Zudem stünde eine Akkommodationszunahme im Gegensatz zum Originalexperiment und zur theoretischen Annahme einer sympathisch-vermittelten Akkommodationsminderung (vgl. Gilmartin, 1998; Malmstrom et al., 1980). Als wichtigste Beobachtung ließ sich für dieses Kontrollexperiment festhalten, daß die Erhöhung der Vergleichbarkeit der Fixieren- und Fixieren-/Merken-Phase keinen feststellbaren Einfluß auf die in der Akkommodation zu findenden Ergebnisse hatte.

6.3.2 Fazit

Zusammenfassend zeigte sich, daß weder für das an die Literatur angelehnte Experiment noch für das erweiterte Kontrollexperiment eine kognitiv-induzierte Veränderung in der Akkommodation zu finden war, obwohl die begleitend gemessenen vegetativen Kontrollparameter ebenso wie die Verhaltensdaten unterschiedliche kognitive Anforderungen vermuten ließen. Die Verwendung zentraler Sehreize, um Blickbewegungen zu vermeiden, stellte sich nach wie vor als erstrebenswert heraus – nur blieb erneut die Frage nach einer Aufgabengestaltung, die sowohl abgestufte kognitive Anforderungen ermöglichte und gleichzeitig zuließ, daß die Bearbeitung kontrolliert werden konnte. Reine Fixieraufgaben – ähnlich wie Lesebedingungen als Vergleich zu Rechenaufgaben – erwiesen sich als Vergleichsbedingungen als eher ungünstig. Aus diesem Grund wurde ein abschließendes Experiment durchgeführt, daß eine Variante einer „n-back“-Aufgabe enthielt. Bei einer derartigen Aufgabengestaltung konnte erneut eine Auswertung nach richtig- bzw. falsch-bearbeiteten Aufgaben gewährleistet werden. Das Experiment wird im Folgenden kurz dargestellt.

6.4 ... während der Bearbeitung einer „n-back“-Aufgabe unter Berücksichtigung der Richtigkeit der Antworten – eine Erweiterung

Es galt auf der Basis der bisherigen Überlegungen und Beobachtungen für die Variation der kognitiven Anforderung eine Aufgabe zu finden, für deren Bearbeitung nur ein zentrales Sehzeichen – Zahl oder Buchstabe – präsentiert werden mußte. Zudem war nach wie vor eine geeignete Abstufung der kognitiven Anforderung von Interesse und es erschien aufgrund der unterschiedlichen Umsetzungen in der Literatur ebenfalls interessant, an der zeitlichen Abfolge der Reizpräsentationen Abstufungen vorzunehmen. Letzteres ergab sich aus der Diskussion, daß einige Experimente in der Literatur keine zeitlichen Einschränkungen für die Aufgabenbearbeitungen vorgaben, d. h. mit selbstbestimmter Zeiteinteilung die Aufgaben bearbeiten ließen (vgl. z. B. Bullimore & Gilmartin, 1988), während in anderen Arbeiten strikte zeitliche Vorgaben gemacht wurden oder die zeitliche Abfolge der Reizpräsentationen genutzt wurde, um die Abstufung der kognitiven Anforderung zu gewährleisten (vgl. z. B. Davies et al., 2005). Es war denkbar, daß die zeitliche Gestaltung der Reizpräsentation die zu erwartende Akkommodationsänderung beeinflusste, sollte eine Änderung im vegetativen Nervensystem für die Akkommodationsänderung verantwortlich sein; z. B. ist für die Änderung der Herzperiodendauer bekannt, daß sie sich verkürzt, wenn Aufgaben unter erhöhtem Zeitdruck bearbeitet werden (vgl. z. B. Callister et al., 1992; Wahlström et al., 2002).

Als Aufgabe wurde eine Variation der „n-back“-Aufgabe nach Gevins und Cuttillo (1993) für die bestehenden Rahmenbedingungen umgesetzt; zur Bearbeitung dieser Aufgabe werden sowohl Behaltens- als auch Ausführungsprozesse des Kurzzeitgedächtnisses beansprucht (vgl. z. B. Braver et al., 1997; Cohen et al., 1997). Die Adaptation der „n-back“-Aufgabe für das vorliegende Experiment beinhaltete eine zentrale Präsentation eines einzelnen Reizes – in diesem Fall eines Buchstabens – und ermöglichte eine Abstufung der kognitiven Anforderung über die Variation der zu merkenden, zeitlich aufeinanderfolgenden Buchstabenpräsentationen; zusätzlich konnte über die Schnelligkeit, mit der die Buchstaben nacheinander präsentiert wurden, die zeitliche Gestaltung der Aufgabe systematisch variiert werden. Gemäß der theoretischen Überlegungen (vgl. Abs. 1.1) war anzunehmen, daß mit einer erhöhten Kurzzeitgedächtnisanforderung – also mit wachsender Anzahl der zu erinnernden Buchstaben – eine Sympathikusaktivierung im vegetativen Nervensystem einherging, die zu erweiterten Pupillen, einer verkürzten Pulswellenlaufzeit und einer Abnahme in der Nahakkommodation führen sollte. Für die Anzahl der korrekten Antworten war bekannt, daß sie mit der Erhöhung der Anzahl der zu erinnernden Buchstaben stetig abnehmen sollte, während sich die Reaktionszeit nur deutlich zwischen den „n-1“- und „n-2“-Variationen der Aufgabe verlängerte (vgl. z. B. Braver et al., 1997). Etwas unspezifischer waren die Erwartungen bzgl. der Veränderung der zeitlichen Gestaltung der Reizpräsentation; es war jedoch möglich, daß eine Beschleunigung der Reizpräsentationen einen verstärkenden Einfluß auf die vegetativen Veränderungen haben könnte und damit eine Änderung der Akkommodation aufgrund einer stärkeren Sympathikusaktivierung be-

wirkte. Letzteres war eine interessante Erweiterung in diesem Experiment, da eine Akkommodationsänderung unter allgemeinen kognitiven Anforderungen – im Gegensatz zu Literaturberichten – mittlerweile aufgrund der eigenen Befunde bezweifelt wurde.

Methoden

Den 20 Versuchsteilnehmern wurde zentral ein Buchstabe gezeigt, der ein A oder ein H sein konnte. Der zeitliche Ablauf der Aufgabenpräsentation ist in Abbildung 22 skizziert. Die Aufgabe war folgende: z. B. in der Bedingung „n-1“ mußte die Versuchsperson angeben, ob der gerade gezeigte Buchstabe mit dem vorher gezeigten Buchstaben übereinstimmte; für die Bedingung „n-2“ mußte der Vergleich des gerade gezeigten Buchstabens mit dem vorletzten Buchstaben in der bereits gezeigten Abfolge verglichen werden. Die ersten 3 Buchstaben in jeder präsentierten Folge waren grün eingefärbt und für diese mußte keine Antwort gegeben werden. Konnte ein Versuchsteilnehmer der Buchstabenreihenfolge nicht mehr folgen, so konnte er durch Nicht-beantworten des gezeigten Buchstabens erneut eine neue Buchstabenserie mit der Präsentation der 3 grünen Startbuchstaben auslösen. Der Versuchsteilnehmer mußte das Ergebnis mit „ja“ oder „nein“ quittieren.¹² Die kognitive Anforderung wurde durch die Anzahl der Rückwärtsschritte für den Buchstabenvergleich variiert, so daß die Aufgabe „n-1“ als leichte Vergleichsbedingung und die Aufgabe „n-2“ als höhere Anforderung umgesetzt wurde. Zusätzlich wurde die Zeit nach der gegebenen Antwort bis zur Präsentation des nächsten Buchstabens variiert: es wurde immer gewartet, bis eine Antwort gegeben wurde und dann entweder 600 ms (langsameres Präsentationstempo), 350 ms (mittleres Präsentationstempo) oder nur 100 ms (schnelles Präsentationstempo) mit der Präsentation des nächsten Buchstabens gewartet. Das langsame Präsentationstempo (600 ms Pause) wurde hier als Vergleichsbedingung übernommen. Damit wurde im Faktor „Phase“ die Vergleichsbedingung immer mit der Aufgabe „n-1“ und einem Interstimulusintervall von 600 ms gemessen. Die Anzahl der richtigen Antworten wurde als Anteil der richtigen an allen Antworten (%-korrekt) berechnet und es wurden erneut die Reaktionszeiten erfaßt. Die Sehzeichen wurden in einer Sehentfernung von 5 D (20 cm) und monokular für insgesamt 6 Meßintervalle von je 320 s präsentiert. Jedes Meßintervall enthielt damit eine „n-1“-Vergleichs- und eine „n-1“- , bzw. „n-2“-Bedingungsphase á 160 s. Die Reihenfolge der Phasen wurde interindividuell getauscht.

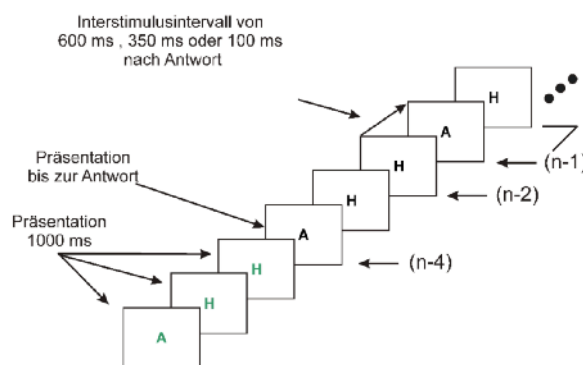


Abbildung 22: Zeitliche Versuchsablauf-Skizze des Experimentes E5 (Varianten der „n-back“-Aufgabe).

Die optometrischen Meßgrößen (Akkommodation und Pupillengröße) wurden in diesem Experiment mit dem SRW 5000 vermessen. Es ergab sich für dieses Experiment ein 2 x 2 x 3 -Design mit den Faktoren „Phase“ (Vergleichsphase vs. Be-

dingungsphase), „Aufgabe“ (n-1 vs. n-2) und „Tempo“ (600 ms vs. 350 ms vs. 100 ms) für die Datenanalyse. Die vegetativen Kontrollvariablen (Pupillengröße und Pulswellenlaufzeit) ebenso wie die Reaktionszeit und der Anteil richtiger Antworten wurden in einem ersten Analyseschritt in ihrer mittleren Veränderung betrachtet, um die neue experimentelle Manipulation in ihrer Wirkung nachzuhalten. Dabei ist zu beachten, daß sich die Mittelwertbetrachtung auf ein 128-s-Zeitfenster in jeder Meßphase bezieht (vgl. Abs. 4.3). Anschließend wurde die Akkommodation entsprechend als Mittelwert über 128 s bestimmt; es wurden nur Akkommodationswerte verrechnet, die während richtig beantworteter Buchstabenvergleiche gemessen wurden (vgl. Abs. 6.2.2). Um einen Hinweis auf die Blickbewegungen während der Bearbeitung der „n-back“-Aufgabe zu bekommen, wurde die Blickrichtung für ein Meßintervall während der Bearbeitung der Aufgaben „n-1“ (Vergleichsphase) und „n-2“ (Bedingungsphase; Tempo: 600 ms) für 10 Personen mit dem PowerRef II gemessen. Um diese Messung neben dem bestehenden Aufbau mit dem SRW 5000 zu plazieren, wurden die Sehzeichen (Buchstaben) in einer Sehentfernung von 1 D (1 m) größenangepaßt gezeigt. Die Blickrichtungsmessungen fanden separat statt und waren nötig, da das SRW 5000 – wie bereits im vorangegangenen Kontrollexperiment K1 und unter Absatz 5.1.1 erwähnt – keine Blickrichtungserfassung zuließ. Das SRW 5000 wurde trotz dieser Einschränkung für das vorliegende Experiment zur Vermessung der Akkommodation ausgewählt, da es eine geringere Empfindlichkeit bzgl. möglicherweise vorkommender Blickrichtungsänderungen zeigt (vgl. Abs. 5.1.2), eine im Vergleich zum PowerRefractor höhere Genauigkeit der Akkommodationsmessung besitzt (vgl. z. B. Mallen et al., 2001) und nicht zuletzt – als Nachfolger des Canon R1 – ein Gerät ist, daß für die Untersuchung der kognitiv-induzierten Akkommodationsänderung mehrfach eingesetzt wurde (vgl. z. B. Davies et al., 2005).

Ergebnisse

Zunächst war festzuhalten, daß sich die Blickrichtung zwischen der Bearbeitung der „n-1“- und „n-2“-Aufgabe für die 10 separat vermessenen Testpersonen nicht bedeutsam änderte ($M \pm SD$: $2,08^\circ \pm 1,73$ vs. $1,96^\circ \pm 1,66$; $t_{9;0,5} = 0,56$; $p = 0,59$). Zur Vereinfachung der Ergebnisdarstellung wurden die Vergleichs- und Bedingungsphasen mit Buchstaben versehen; Tabelle 2 zeigte die Zuordnung der Buchstaben zu den entsprechenden Faktorstufenkombinationen.

Tabelle 2: Übersicht der Faktorstufenkombinationen. Zu jeder Bedingungs-kombination wurde eine konstante Vergleichsphase (n-1; 600 ms) präsentiert. Ebenfalls dargestellt ist die Bedingung „n-4“, die im Kontrollexperiment K2 separat präsentiert wurde.

		Tempo (ms)		
		600	350	100
Aufgabe	n-1	A	B	C
	n-2	D	E	F
	Kontroll- experiment K2: n-4	G		

Für keine Meßgröße konnte eine Veränderung mit der Meßphase (Vergleichsphase vs. Bedingungsphase) festgestellt werden – ohne, daß gleichzeitig eine Interaktion des Faktors „Phase“ mit dem Faktor „Aufgabe“ oder „Tempo“ vorlag.³² Daher werden an dieser Stelle nur die Ergebnisse der „simple effect“-Analysen für den Vergleich der Bedingungsphasen untereinander aufgeführt; d. h. die Variation der Meßphasen wurde auf der Faktorstufe der Bedingungsphase konstant gehalten. Damit wurde auf den jeweiligen zusätzlichen Vergleich mit der Kontrollphase verzichtet, der die berichteten Ergebnisse – wie auch in den Abbildungen 23 zu sehen – gleichsam untermauerte.³³

Für die Verhaltensdaten zeigte sich ein erwartetes Bild: die Anzahl der korrekten Antworten nahm im Wesentlichen leicht mit der Erhöhung des Präsentationstempos ($\Delta 2\%$; $F_{2,18} = 3,18$; $p = 0,04$) und deutlich um ca. 10 % ab, wenn die Aufgabe nicht aus der Bearbeitung von „n-1“ sondern aus der Bearbeitung von „n-2“ bestand ($F_{1,19} = 41,18$; $p < 0,01$; vgl. Abb. 23b). In gleicher Weise zeigte sich eine Zunahme der Reaktionszeiten mit der aufgabenunabhängigen Erhöhung des Präsentationstempos ($\Delta 55$ ms; $F_{2,18} = 3,18$; $p = 0,04$) und gleichzeitig nahmen die Reaktionszeiten ebenfalls um ca. 350 ms innerhalb der Bedingungsphase für den Wechsel der Aufgabe von „n-1“ zu „n-2“ ($F_{1,19} = 128,84$; $p < 0,01$; vgl. Abb. 23d) zu. Die vegetativen Meßgrößen – Pupillendurchmesser und Pulswellenlaufzeit – reagierten allerdings sehr unterschiedlich: während die Pupillengröße – wie aufgrund der Verhaltensdaten zu erwarten war – in der Bedingungsphase mit der Veränderung der Aufgabe von „n-1“ auf „n-2“ deutlich um ca. 0,5 mm zunahm ($F_{1,19} = 50,38$; $p < 0,01$; vgl. Abb. 23f) und auch während der „n-1“-Aufgabe erst bei einer deutlicheren Beschleunigung der Buchstabenpräsentation mit einer Erweiterung reagierte ($F_{2,18} = 2,88$; $p = 0,04$), so zeigte die Pulswellenlaufzeit nur geringe, tendenziell erwartungskonforme Veränderungen mit den experimentellen Faktoren, die allerdings statistisch nicht bedeutsam wurden (vgl. Abb. 23h).

An dieser Stelle sollen zusätzliche Ergebnisse ergänzt werden, die nicht vorrangig im Zentrum der Betrachtung standen: da in der aktuellen Arbeit von Davies et al. (2005) die Akkommodation mit der Herzperiode verglichen wurde und in dem eben beschriebenen Experiment der gewählte kardiovaskuläre Parameter – die Pulswellenlaufzeit – nicht auf die Änderungen der experimentellen Faktoren reagierte, stellte sich natürlich die Frage, ob die Herzperiode in diesem Experiment eine Veränderung zeigte. Nachträglich wurden daher die Herzperiodendaten analysiert. Es zeigte sich ein klares, bereits bekanntes Bild (vgl. Abb. 24): die Interaktion Phase x Aufgabe wurde bedeutsam ($F_{1,19} = 18,25$; $p < 0,01$), da die Herzperiode in der Bedingungsphase deutlich um ca. 25 ms abnahm, wenn die Aufgabe nicht „n-1“, sondern „n-2“ war („simple effect“-ANOVA: $F_{1,19} = 18,25$; $p < 0,01$). Damit veränderte sich die Herzperiode deutlich mit dem Anstieg der kognitiven Anforderung; für den Faktor „Tempo“ ließen sich keine Änderungen finden.³⁴ Zusätzlich wurde erneut der Quotient aus der Pulswellenlaufzeitänderung und Herzperiodenänderung – umgerechnet in eine Herzratenänderung – berechnet, um einen qualitativen Hinweis bzgl. der Aktivierungs-

³²Anmerkung: Die Dreifach-Interaktion „Aufgabe“ x „Tempo“ x „Phase“ wurde für keine der Meßgrößen bedeutsam. Die gesamte MANOVA ist in Anhang N einzusehen.

³³Anmerkung: Die vollständigen Varianzanalysen sind in Anhang O einzusehen.

³⁴Anmerkung: Die vollständigen Varianzanalysen sind in Anhang P einzusehen.

verschiebung in der vegetativen Balance zu erhalten: der Quotient erreichte in diesem Experiment einen Wert von -0,24, der gemäß Weiss et al. (1980) auf einen Rückgang der parasympathischen Aktivierung hindeutete (vgl. Abs. 3.2.2).

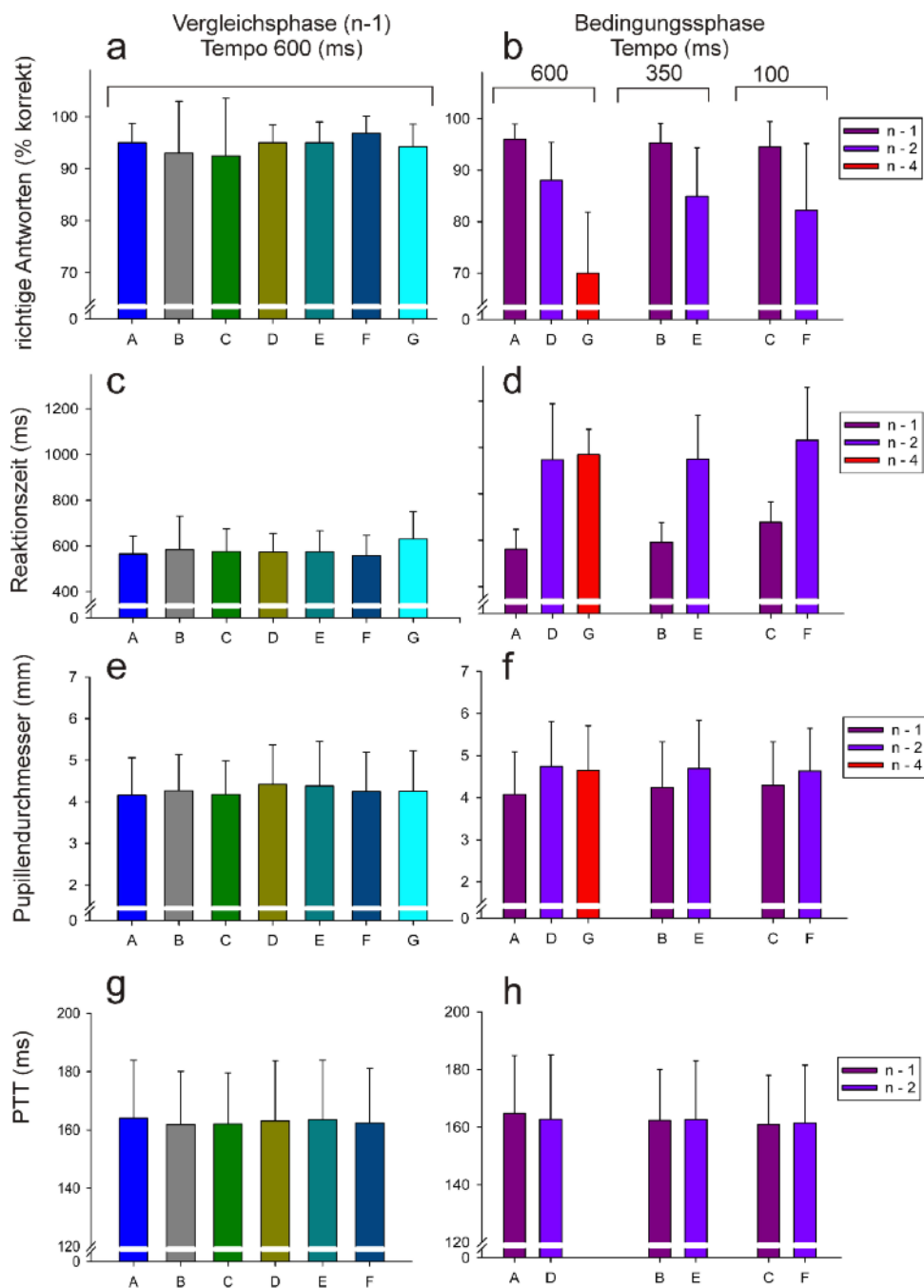


Abbildung 23: E5: Veränderungen der Variablen a & b: Anzahl der korrekten Antworten (%-korrekt), c & d. Reaktionszeit (ms), e & f. Pupillendurchmesser (mm) und g & h: Pulswellenlaufzeit mit der Variation der „Phase“ (Vergleichsphase (links dargestellt) vs. Bedingungsphase (rechts dargestellt)), „Aufgabe“ (n-1 vs. n-2) und des „Tempo“ (600 ms vs. 350 ms vs. 100 ms); die Ergebnisse des Kontrollexperimentes K2 sind zusätzlich als Bedingungen G eingezeichnet.

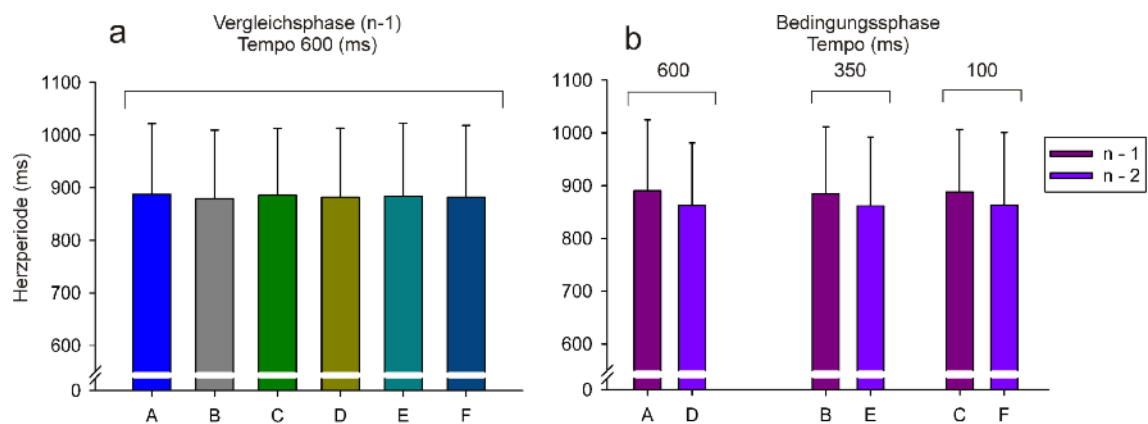


Abbildung 24: E5: Veränderungen der Herzperiode mit der Variation der „Phase“ (Vergleichsphase vs. Bedingungsphase), „Aufgabe“ (n-1 vs. n-2) und des „Tempo“ (600 ms vs. 350 ms vs. 100 ms).

Entgegen den theoretischen Annahmen – und gemäß den Erfahrungen der bisher vorgestellten Experimente – ließ sich keine signifikante Veränderung der Akkommodation mit den experimentellen Faktoren finden. Die Akkommodation variierte für die Faktorbedingungen zwischen 3,83 D und 3,91 D und zeigte innerhalb der 128-s-Meßphasen mittlere Standardabweichungen von 0,28 D (vgl. Abb. 25).

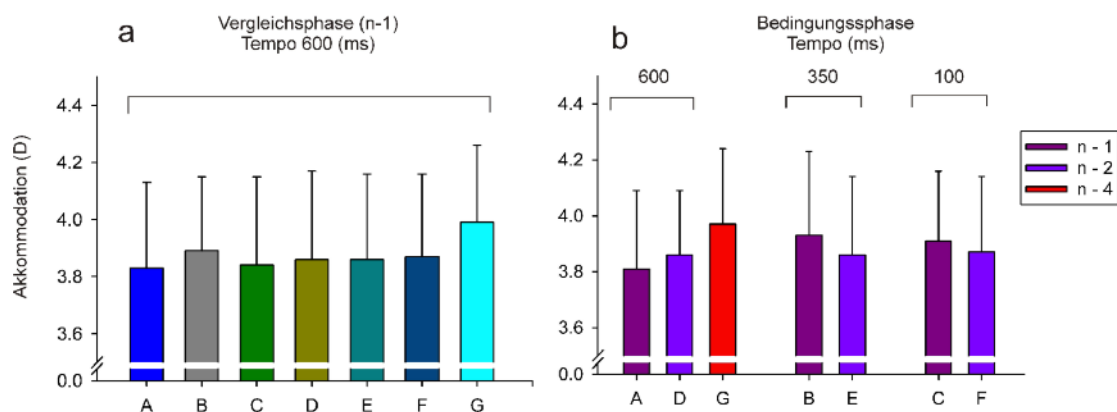


Abbildung 25: E5: Veränderungen der Akkommodation mit der Variation der „Phase“ (Vergleichsphase vs. Bedingungsphase), „Aufgabe“ (n-1 vs. n-2) und des „Tempo“ (600 ms vs. 350 ms vs. 100 ms).

Diskussion

Obwohl die Verhaltensdaten – Anzahl der richtigen Antworten und Reaktionszeit – Ergebnisse zeigten, die entsprechend der Literatur (vgl. z. B. Braver et al., 1997; Cohen et al., 1997) eine Interpretation als Zunahme der kognitiven Anforderung mit dem Wechsel der Aufgabe von „n-1“ zu „n-2“ zuließen, reagierten die vegetativen Meßgrößen sehr unterschiedlich: die Pupillenerweiterung stützte mit einer entsprechenden Veränderung im vegetativen Nervensystem die Interpretation der Verhaltensdaten (vgl. z. B. Goldwater, 1972), während die Pulswellenlaufzeit keine – oder zumindest nur eine sehr geringe – Veränderung in der vegetativen Balance vermuten ließ (vgl. Newlin, 1981). In einer zusätzlichen Analyse der bei der Erfassung der Pulswellenlaufzeit ebenfalls berechneten Herzperiode fand sich eine deutliche und erwartete Verkürzung der Herzperiode mit dem Wechsel der Aufgabe von „n-1“ zu „n-2“. Betrachtete man diese Herzperiodenänderung gemeinsam mit der geringen Änderung der Pulswellenlaufzeit in einem Veränderungsquotienten, so konnte man die Verschiebung der vegetativen Balance innerhalb dieses Experimentes eher als Reduzierung der parasymphathischen Aktivierung interpretieren (vgl. Weiss et al., 1980). Der beschriebene Rückgang in der Herzperiode um ca. 25 ms war zudem im Absolutbetrag geringer als derjenige, der z. B. in Davies et al. (2005) mit ca. 60 ms aus den Zeichnungen zu entnehmen war. Da in jener Studie aber keine Pulswellenlaufzeitdaten vorlagen, bleibt es offen, ob es sich tatsächlich um eine sympathische Aktivierung gehandelt hatte; die Autoren vermuteten in ihrer Diskussion interessanterweise ebenfalls eher einen parasymphathischen Rückgang in der Aktivierungsänderung, was sich daher mit den vorliegenden Ergebnissen deckte. Es bleibt Spekulation, ob ein geringer Rückgang der Herzperiode eine geringere kognitive Anforderung reflektierte (vgl. Task Force Special Report, 1996) und deshalb nur geringe Änderungen in den kardiovaskulären Parametern ausgelöst wurden. Zumindest reagierten zwei klassische vegetative Meßgrößen – Pupillengröße und Herzperiode – in ähnlicher Weise auf die Variation der Aufgabe und damit auf eine Änderung der kognitiven Anforderung.

Für die zusätzliche Beschleunigung der Buchstabenpräsentation ließ sich ein geringer Effekt sowohl für die Anzahl der richtigen Antworten als auch für die Reaktionszeit zeigen. Beide Verhaltensdaten deuteten daraufhin, daß mit einer Erhöhung des Präsentationstempos auch eine leichte Erhöhung der kognitiven Anforderung einherging. Letzteres ließ sich allerdings nicht in den vegetativen Meßgrößen wiederfinden, bzw. durch entsprechende Veränderungen bestärken.

Die Akkommodation, definiert als gemessene Akkommodation während korrekt bearbeiteter Aufgaben, veränderte sich weder mit der Änderung der Aufgabe von „n-1“ zu „n-2“, noch mit der Veränderung des Präsentationstempos der Buchstabendarbietung. Es war denkbar, daß die Abstufung der Aufgabe von „n-1“ auf „n-2“ zu gering war, um eine Erhöhung der kognitiven Anforderung zu realisieren, die sich in weniger sensitiven vegetativen bzw. theoretisch sympathisch beeinflussten Maßen niederschlagen konnte. Dafür sprach auch, daß außer der sehr sensitiven Meßgröße des Pupillendurchmessers (vgl. Abb. 23) die Pulswellenlaufzeit nicht auf diese Aufgabenabstufung reagierte. Um für die Akkommodationsbetrachtung die Möglichkeit einer zu geringen kognitiven Anforderung auszuschließen, wurde ein Kontrollexperiment durchgeführt, daß neben der „n-1“-Aufgabe auch

eine „n-4“-Aufgabe enthielt. Das Kontrollexperiment wird im Folgenden kurz beschrieben. Die Ergebnisse waren bereits in die Ergebnisgrafiken des Experimentes E5 aufgenommen worden, um einen direkten Vergleich zu erleichtern.

6.4.1 Kontrollexperiment K2: Vergleich der „n-back“-Aufgaben „n-1“ und „n-4“

Da als vegetative Meßgröße, die auf eine Veränderung der „n-Back“-Aufgabe reagierte, nur die Pupillengröße zu finden war, sollte auch in diesem Kontrollexperiment die Pupillengröße zusätzlich zu den Verhaltensmaßen erfaßt werden. Eine Veränderung der Pupillengröße mit dem Präsentationstempo lag im Ausgangsexperiment nicht vor, so daß nur das Tempo 600 ms für die nun realisierten zwei Aufgabenabstufungen „n-1“ und „n-4“ ausgewählt wurde (vgl. Abb. 23). Für die Anzahl der korrekten Antworten war eine erneute Zunahme der Fehler im Vergleich zum vorherigen Experiment zu erwarten, während die Reaktionszeit nicht deutlich weiter zunehmen sollte (vgl. z. B. Braver et al., 1997; Cohen et al., 1997). Für die Pupillengröße war eine erneute Erweiterung zu erwarten, die gemäß der Sensitivität der Pupillengröße gegenüber den Abstufungen kognitiver Anforderungen (vgl. Abs. 3.1) eventuell von ihrer absoluten Größe her noch etwas deutlicher sein konnte.

Zur Bearbeitung der „n-Back“-Aufgabe wurden nun zu Beginn jeder Meßphase 4 grüne Startbuchstaben gezeigt; konnte ein Versuchsteilnehmer der Buchstabenreihenfolge nicht mehr folgen, so konnte er durch Nichtbeantworten des gezeigten Buchstabens eine neue Buchstabenserie mit der Präsentation der 4 grünen Startbuchstaben auslösen. Die Reihenfolgen der Meßphasen wurden wieder interindividuell für die 19 Versuchspersonen getauscht. Der Versuchsaufbau wurde nicht verändert und es wurden die optometrischen Meßgrößen wieder mit dem SRW 5000 erfaßt.

Für die Darstellung der neuen Ergebnisse wurden die Grafiken des vorangegangenen Experimentes um die neu untersuchten Bedingungen ergänzt. Wie demzufolge in Abbildung 23 zu sehen ist, nahm die Anzahl der korrekten Antworten um ca. 25 % ab, wenn sich die Aufgabe von „n-1“ auf „n-4“ änderte ($t_{18, 0.05} = 9,79$; $p < 0,01$). Die Reaktionszeit nahm für die Zunahme der „n-back“-Schritte ebenfalls deutlich um ca. 340 ms zu ($t_{18, 0.05} = -11,65$; $p < 0,01$). Damit zeigten die Verhaltensdaten die erwarteten Veränderungen (siehe oben): mit der erneuten Steigerung der kognitiven Anforderung von „n-1“ auf „n-4“ – im Vergleich zu „n-2“ aus dem vorangegangenen Experiment – nahm die Anzahl der korrekten Antworten nochmals deutlich ab: um ca. weitere 15 %; im Gegensatz dazu erhöhte sich die Reaktionszeit für die „n-4“-Aufgabe in ähnlichem Maße wie für die „n-2“-Aufgabe, wenn man beide Aufgaben-Varianten mit der „n-1“-Aufgabe verglich. Die Reaktionszeit nahm damit nicht erneut zu. Gleiches galt für die Pupillengröße: mit der Änderung der Aufgabe von „n-1“ auf „n-4“ nahm sie um ca. 0,4 mm zu ($t_{18, 0.05} = -3,06$; $p < 0,01$) – wie ebenfalls in Abbildung 23 zu erkennen ist. Damit bewegte sich auch die Pupillenerweiterung für die „n-4“-Aufgabe im Rahmen dessen, was für die „n-2“-Aufgabe im Vergleich zur „n-1“-Aufgabe zu verzeichnen war; auch in z-standardisierten Einheiten blieb dieser Unterschied zwischen den

beiden Abstufungspaaren – „n-1“ vs. „n-2“ und „n-1“ vs. „n-4“ mit 0,38 mm – für beide Stichproben und unterschiedlichen Experimente gleich.

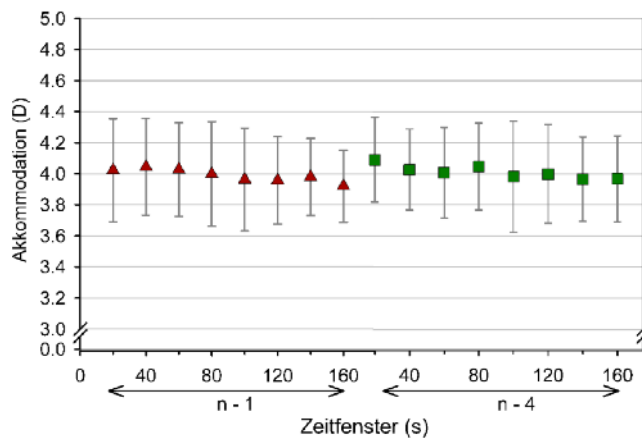


Abbildung 26: K2: Änderung der Akkommodation mit der Variation der „Aufgabe“ (n-1 (rote Dreiecke) vs. n-4 (grüne Quadrate)) über die 160-s-Meßphasen; die Akkommodationsdaten wurden in 20-s-Zeitfenstern zusammengefaßt.

Für die Akkommodation ergab sich ebenfalls ein vertrautes Bild: die Akkommodation, gemessen während richtig-bearbeiteter Aufgaben, veränderte sich nicht, wenn die Aufgabe von „n-1“ auf „n-4“ verändert wurde ($t_{18, 0,05} = 0,76$; $p = 0,45$) (vgl. Abb. 24). Sie lag im Mittel leicht höher als im vorangegangenen Experiment, streute aber in ähnlichem Umfang. Auch eine detailliertere Darstellung der Akkommodation in 20-s-Zeitfenstern der Aufgabenbearbeitung zeigte, daß die Akkommodation zwar leicht über die 160-s-Meßphasen abnahm – wie es auch Kruger (1980) und Malstrom et al. (1980) an andere Stelle bereits berichteten – daß aber auch keine kurzzeitige Reaktion auf die jeweils neue Aufgabe zu Beginn jeder Meßphase zu verzeichnen war (vgl. Abb. 26).

6.4.2 Fazit

Damit konnte auch für die Bearbeitung der „n-Back“-Aufgabe keine Veränderung der Akkommodation festgestellt werden, obwohl auch hier die Verhaltensdaten für einen Anstieg der kognitiven Anforderung mit der Erhöhung der zu merkenden Buchstabenanzahl sprach. Die Pupillengröße und die Herzperiode als vegetative Meßgrößen reagierten ebenfalls gemäß der Erwartung, während die sympathische Indikatorgröße, die Pulswellenlaufzeit, mit der „n-Back“-Aufgabe erstaunlicherweise nicht variierte. Überspitzt betrachtet, ließe sich hier das Argument anführen, daß während dieser Aufgabenbearbeitung – zumindest kardiovaskulär indiziert – keine sympathische Aktivierung im Organismus stattfand. Sei die Akkommodationsabnahme, wie theoretisch vermutet (vgl. Abs. 2.2), sympathisch vermittelt, so sollte sie damit in diesem Experiment folglich ausbleiben. Diese Sicht läßt aber offen, warum die Verhaltensmaße eine so deutliche Veränderung zwischen den Aufgaben „n-1“ und „n-2“ bzw. „n-4“ anzeigten und diese sich dann – im Gegensatz zu den Arbeiten in der Literatur – trotzdem nicht in einer sympathischen Aktivierung niederschlagen sollte; eine mögliche Erklärung wäre ein deutlicher, qualitativer Unterschied zwischen der Bearbeitung arithmetischer Aufgaben und der Bearbeitung eher arbeitsgedächtnisbezogener Aufgaben wie der „n-back“-Aufgabe. Hier bedürfte es weiterführender Überlegungen, wie sich dieser qualitative Unterschied auf die vegetative Balance im Organismus auswirken könnte. Es bleibt aber trotz allem zu bedenken, daß sich auch z. B. in Davies et al. (2005) Interpretationen der

vegetativen Reaktion finden lassen, die von einer nachlassenden parasympathischen Aktivierung ausgehen, aber trotzdem eine Akkommodationsabnahme in den Daten berichten; eine eindeutige vegetative Interpretation einer gefundenen Akkommodationsänderung erscheint dadurch insgesamt als spekulativ.

Für die Akkommodationsbetrachtungen ließ sich an dieser Stelle zumindest festhalten, daß es nicht gelang, eine Veränderung mit der Erhöhung der kognitiven Anforderung hervorzurufen, wenn durch die Auswahl der zentral präsentierten „n-back“-Aufgabe aus methodischer Sicht die Blickrichtung kontrolliert und zusätzlich aus Plausibilitätsüberlegungen die Richtigkeit der Bearbeitung einbezogen wurde.

7 Zurück zur Ausgangsidee: eine Betrachtung mit neuen Daten

Das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit richtete sich auf die Frage nach einer Akkommodationsänderung unter (steigenden) kognitiven Anforderungen. Für die visuelle Präsentation der zu bearbeitenden Information wurde eine deutliche Nähe (5 D)³⁵ zum Auge realisiert. Als Stichprobe wurden nur normalsichtige Personen ausgewählt, da in einer Nahsehsituation für Personen ohne Fehlsichtigkeiten eine relative Abnahme der Akkommodation für bestimmte kognitive Anforderungen erwartet werden konnte (vgl. z. B. Bullimore & Gilmartin, 1988; Gilmartin, 1998; Kruger, 1980; Malmstrom et al., 1980) – auch wenn die Ergebnislage der Literatur nicht einheitlich war (vgl. z. B. Edgar & Reeves, 1997; Rosenfield & Ciuffreda, 1990; Wolffsohn et al.; 2003). Erst in zweiter Betrachtung stellte sich die Frage nach einem direkten Vergleich der Akkommodationsänderung mit kardiovaskulären Veränderungen in der kognitiven Anforderungssituation, wie sie in der Ausgangsidee formuliert worden war (vgl. z. B. Davies, et al., 2005; Tyrrell et al.; 1995).

Zu meist wird eine (relative) Akkommodationsverminderung unter kognitiven Anforderungen als Wirkung einer Sympathikusaktivierung interpretiert (vgl. z. B. Birnbaum, 1984; Bullimore & Gilmartin, 1988; Davies, et al., 2005; Gilmartin, 1998). Um eine vorliegende sympathische Aktivierung im Organismus unter kognitiven Anforderungen aufzuzeigen, sollten in den durchgeführten Experimenten klassische vegetative Parameter zusätzlich erfaßt werden: die Herzperiode, die LF- und HF-Komponenten der HPV und die Pulswellenlaufzeit als Indikatoren einer vegetativen Veränderung am Herzen (vgl. z. B. Davies et al., 2005; Task Force Special Report, 1996). Für diese Meßgrößen ist bekannt, daß sie auf kognitive Anforderungen in charakteristischer Weise reagieren: die Herzperiodendauer ebenso wie die Pulswellenlaufzeit sollten abnehmen, während die Dichte der LF-Komponente relativ zur Gesamtpower zu- und die HF-Komponenten-Dichte wiederum abnehmen sollte (vgl. z. B. Berntson et al., 1997; Newlin, 1981; Task Force Special Report, 1996). Direkt am Auge wurde

³⁵Anmerkung: Die mittlere Akkommodationsruhelage – gemessen in völliger Dunkelheit – betrug für die Stichprobe 0,79 D ($\pm 0,47$); damit wurde den Versuchsteilnehmern bei einer Präsentation der Sehreize in 5 D ein mittlerer Akkommodationsaufwand von etwas mehr als 4 D abverlangt (vgl. Abs. 4).

zusätzlich die Pupillengrößenveränderung gemessen, um auch hier mögliche kognitiv-induzierte Veränderungen am Sehorgan feststellen zu können. Die Pupillenerweiterung wurde vielfach als Maß der kognitiven Informationsverarbeitung eingesetzt (vgl. z. B. Goldwater, 1972; Kahnemann et al., 1967). Es wurde somit versucht, über Messungen begleitender und in ihrer Ursache eindeutigen Veränderungen am Herz und Auge einen Bezug zum VNS herzustellen.

Neben dem inhaltlichen Aspekt der Veränderung der Akkommodation im Kontext einer vegetativen Reaktion auf kognitive Anforderungen wurden methodische Anhaltspunkte aufgegriffen: mögliche Einflüsse optischer Faktoren auf die Uneinheitlichkeit der Befundlage zur kognitiv-induzierten Akkommodationsänderungen (vgl. z. B. Birnbaum, 1984) wurden insoweit berücksichtigt, als daß z. B. die Blickrichtung des Auges kontrolliert oder miterfaßt und die visuelle Gestaltung der Aufgabe variiert wurde (vgl. Abs. 4); darüber hinaus wurden zeitnahe Kontrollbedingungen und solche Bearbeitungszeiten verwendet, die im Rahmen der Untersuchung vegetativer Parameter angezeigt waren und eine plausible Erfassung einer Sympathikusaktivierung erlaubten (vgl. z. B. Campbell, 1981; Lacey, 1956). Eine weitere Kontrolle der Aufgabebearbeitung auf der Verhaltensebene diente zwei Zielen: zum einen konnte die Abstufung der Anforderung auf Verhaltensebene nachvollzogen werden; zum anderen war es so möglich, die erhobenen Daten getrennt für nur richtige Antworten auszuwerten. Die Ergebnisse der durchgeführten Experimente werden im Folgenden zusammengefaßt und diskutiert.

7.1 Keine Änderung der Akkommodation mit veränderter kognitiver Anforderung

Im Gegensatz zu den zitierten Arbeiten (vgl. z. B. Bullimore & Gilmartin, 1988; Gilmartin, 1998; Kruger, 1980; Malmstrom et al., 1980) konnte in keinem der 5 durchgeführten Experimente eine signifikante Veränderung der Akkommodation mit einer Veränderung der kognitiven Anforderung gezeigt werden. Für eine Aufgabengestaltung, die mehrstellige bzw. mehrzeilige visuelle Informationspräsentationen enthielten, führte weder der Unterschied zwischen „Lesen“ und „Addieren“ von Zeilen / Spalten in einer Zahlenmatrix (E1) oder von sukzessiv dargebotenen Zahlen (E2) noch ein Unterschied zwischen „Lesen“, „Addieren“ und „Multiplizieren“ mehrstelliger Zahlen (E3) zu einer Reaktion in der Akkommodation. Damit stehen die gefundenen Ergebnisse zwar im Einklang mit einzelnen Studien (vgl. Rosenfield & Ciuffreda, 1990; Wolffsohn, et al., 2003), aber zumindest für die beiden Experimente, die dicht an die Literatur angelehnt waren (E1 & E2) ergab sich eine Diskrepanz. Auch für eine Variation der experimentellen Aufgabe nach Malmstrom et al. (1980), die eine zentrale Fixieraufgabe beinhaltete (E4), konnte keine Akkommodationsänderung bei Hinzukommen einer parallelen Rückwärts-Zählaufgabe gefunden werden. Darüber hinaus führte eine „n-back“-Aufgabe mit unterschiedlich starken Anforderungen zu keinen bedeutsamen Reaktionen in der Akkommodation (E5). Für alle Experimente war in diesem Zusammenhang festzuhalten, daß die Verhaltensdaten als Anzahl der richtigen Antworten und / oder die Reaktionszeiten einen Unterschied in der kognitiven Anforderung

- zwischen „Lesen“, bzw. „Addieren“, und „Multiplizieren“ (vgl. Abs. 6.2)
 - und auch zwischen reinem „Fixieren“ vs. „Fixieren / Rückwärtszählen“ (vgl. Abs. 6.3)
 - und den „n-1“, „n-2“ und „n-4“ Abstufungen in der „n-back“-Aufgabe (vgl. Abs. 6.4)
- zeigten. Nimmt man die Reaktionen in den begleitend gemessenen vegetativen Meßgrößen hinzu – und schließt man Monotonie oder Ermüdung als weitere theoretisch denkbare Ursachen aus – so konnte man von einer wirksamen Umsetzung einer kognitiven Anforderung, bzw. ihrer Abstufung, ausgehen (vgl. Abs. 5). Wiederholt gemessene, geringfügige Änderungen in den Akkommodationsdaten wurden darüber hinaus nicht als kognitiv-induziert interpretiert, da diese auf zwei Einflußfaktoren – eine Blickrichtungsänderung mit der kognitiven Anforderung und die Richtigkeit der Aufgabenbearbeitung – zurückzuführen waren, die in die Auswertung der Akkommodationsmessungen aufgenommen wurden.

Die Rolle der Blickrichtungsänderung

Der PowerRefractor, bzw. der PowerRef II, als exzentrisches Photorefraktometer bietet die Möglichkeit, zusätzlich zur Messung der Akkommodation und Pupillengröße, die Blickrichtung des Auges aufzuzeichnen. Obwohl diese theoretisch durch die Gestaltung der Reizdarstellung in den kognitiven Anforderungsbedingungen konstant gehalten wurde, konnte die Blickrichtung dennoch kontinuierlich begleitend erfaßt werden. Aufgrund der Beobachtungen im ersten Experiment (E1; „Lesen“ und „Addieren“ innerhalb einer Zahlenmatrix), konnte festgehalten werden, daß sich trotz der ortsfesten Reizdarstellung die Blickrichtung des Auges zwischen „Lesen“ und „Addieren“ verändert. Möglicherweise drehte sich das Auge aufgrund der Veränderung der zu bearbeitenden Aufgabe systematisch zur Seite; Augendrehungen nach rechts wurden in ihrer Ursache z. B. im Verständnis der zerebralen Lateralisation einer links-hemisphärischen Verarbeitung (primär verbal, bzw. sprachlich orientiert) zugeschrieben (z. B. Ehrlichman & Weinberger, 1978; Kinsbourne, 1972). Im Rahmen des Augenbewegungsmodells des neurolinguistischen Programmierens (NLP: Bandler & Grinder, 1994; Beck & Beck, 1984; Dooley & Farmer, 1988) entspricht eine Augenbewegung nach rechts-oben einem Verhaltensmaß für die Sinnesmodalität „konstruiert visuell“, in der die beobachtete Person die zu bearbeitende Aufgabe intern repräsentiert (links-oben entspräche z. B. „erinnert visuell“). Beide Vorstellungen – Augenbewegungen als Indikator zerebraler Lateralisation und das Augenbewegungsmodell des NLP – sind allerdings heftig kritisiert worden (vgl. Burke et al., 2003; Farmer et al., 1985, Keller & Revenstorf, 1996; Wertheim et al., 1986).

Wie sich im anschließend durchgeführten Kontrollexperiment (K1) herausstellte, hatte diese Blickrichtungsänderung allerdings einen deutlichen Einfluß auf die Akkommodationsmessung: mit der Blickrichtungsänderung von 1 ° ging für die Geräte PowerRefractor und PowerRef II eine Änderung der gemessenen Akkommodation von ca. 0,10 D einher. Eine Erklärung für diese Veränderung der gemessenen Akkommodation findet sich in der Anatomie der Augenlinse bzw. der Linse allgemein: sie ist über ihre Breite unterschiedlich dick (vgl. Abb. 1); damit ist auch der Brechwert der Linse nicht über ihre gesamte Breite gleich hoch. D. h., fällt das Infrarotlicht zur Vermessung der refraktiven Eigenschaften zentral durch die Linse des Auges, so wird das Meßgerät eine starke Brechwirkung, sprich Akkommodation,

anzeigen, als wenn das Infrarotlicht in periphereren Bereichen der Linse gebrochen wird (Lundstrom et al., 2005; Seidemann & Schaeffel, 2002; Wolffsohn et al.; 2004). Da beim Einsatz des PowerRefractors, bzw. des PowerRef II, die Blickrichtungsdaten kontinuierlich vorlagen, konnten sie in den weiterführenden Auswertungen als Kovariate in der statistischen Auswertung berücksichtigt werden. Für das zweite verwendete Meßgerät, das SRW 5000 Autorefraktometer, zeigte sich im geräte-technischen Exkurs ebenfalls eine Veränderung der gemessenen Akkommodation mit Blickrichtungsänderungen des Auges; da die Blickrichtung mit diesem Gerät nicht erfaßt werden konnte, mußten in den Experimenten, in denen das Gerät zum Einsatz kam, zumindest Akkommodationsänderungen in der Größenordnung der blickdrehungs-induzierten Änderung mit Vorsicht betrachtet werden.

In keiner der zitierten Arbeiten aus der Literatur (vgl. Tabelle 1) wurde die Blickrichtung erfaßt oder in den Auswertungen berücksichtigt; es ist möglich, daß dieser Faktor einen Teil der uneinheitlichen Befundlage erklären könnte – je nachdem wie stark die visuelle Darstellung der zu bearbeitenden Informationen eine Blickrichtungsänderung direkt erforderte und/oder indirekt durch die Stärke der kognitiven Anforderungen auslöste.

Die Rolle der richtigen Antworten

Für die Betrachtung der Akkommodation in einer Nahsehsituation eröffnete sich ein weiteres Problemfeld: werden Sehreize in unmittelbarer Nähe zum Auge präsentiert, so wird dies oft als anstrengend empfunden und eine leichte Entspannung des Ziliarmuskels führte direkt zu einer Verringerung der Akkommodation. Zudem ist bekannt, daß während der Bearbeitung von Aufgaben, die analytische oder räumliche Bearbeitungsschritte enthalten, vermehrtes Stieren der Augen und „leere“ Blicke zu beobachten sind (z. B. Burke et al., 2003; Poffel & Cross, 1985). Es war auf Basis der gemessenen Daten nicht möglich zu differenzieren, ob eine kurzfristige Akkommodationsverringerung innerhalb der Aufgabenbearbeitung als ermüdungs-induziert (stier-induziert) und/oder kognitiv-induziert zu interpretieren war. Um hier eine eindeutige Ausgangsbasis zu schaffen, wurde ein Umweg gewählt: für die Betrachtungen der Akkommodation wurden nur Daten verwendet, die während korrekt bearbeiteter Aufgaben erhoben wurden. Für fehlerhafte Bearbeitungen ließen sich demnach – hypothetisch – zwei Fehlerquellen vermuten: 1. die Aufgabe wurde ignoriert oder fehlerhaft (kognitiv) bearbeitet oder 2. die Sehzeichen wurden unscharf gesehen und damit konnte die Aufgabe nicht korrekt bearbeitet werden. Eine Auswahl der richtigen Antworten entsprach damit der beabsichtigten experimentellen Situation am besten, da so ermüdungs- bzw. stier-induzierte Akkommodationsveränderungen, die ein unscharfes Sehen bedingt haben könnten, aus den Meßdaten ausgeschlossen werden konnten. In der zitierten Literatur (vgl. z. B. Davies et al., 2005; Gilmartin, 1998; Kruger, 1980; Malmstrom et al., 1980; Wolffsohn, et al., 2003) wurden die Akkommodationsdaten meist als Mittelwert über bestimmte Zeitintervalle betrachtet, ohne eine Unterscheidung zwischen richtig- und falsch-bearbeiteten Aufgaben vorzunehmen. An dieser Stelle ist von Interesse, daß mit zunehmender kognitiver Anforderung die Anzahl der richtig bearbeiteten Aufgaben erwartungsgemäß abnahm. Davies et al. (2005) hatten darüber hinaus die Schwierigkeit ihrer Zwei-Alternativen-Wahlaufgabe über die Anzahl der gemachten Fehler operationalisiert und berichteten tatsächlich die stärkste Akkommodationsabnahme, wenn die meisten Fehler (50 %) gemacht wurden. Für die vorliegenden

Daten – insbesondere im Experiment (E3), in dem gelesen, addiert und multipliziert werden mußte – war festzuhalten, daß eine geringe Akkommodationsabnahme nur dann bestand, wenn, wie in der Literatur üblich, über die gesamten Daten gemittelt wurde; wurden die Daten der fehlerhaften Aufgabenbearbeitungen aus der Analyse herausgelassen, so konnte keine Akkommodationsänderung nachgewiesen werden. Damit erschien auch die Auswahl der Aufgabenstichprobe, während der die Akkommodation gemessen wurde, ein Faktor zu sein, der einen Teil der uneinheitlichen Befundlage erklären könnte – zumindest in-soweit, als daß in den zitierten Studien keine Kontrolle der Fehleranteile in den Bedingungen vorgenommen wurde.

Eine kritische Bewertung der Meßtechniken

Zur Erfassung der Akkommodation wurden zwei Meßtechniken eingesetzt: der Power-Refractor – bzw. der PowerRef II – und das SRW 5000 Autorefraktometer. Beide Techniken werden vielfach eingesetzt und wurden in ihren meßtechnischen Eigenschaften untersucht (vgl. z. B. Allen et al., 2003; Mallen et al., 2001; Schaeffel et al., 1999). Es konnte gezeigt werden, daß beide Geräte eine veränderte Akkommodationsmessung mit sich verändernder Blickrichtung des Auges aufwiesen (vgl. Abs. 6.1.2). Darüber hinaus war festzuhalten, daß der PowerRefractor, bzw. der PowerRef II, in einer Kontrollmessung mit Sehreizen in unterschiedlichen Sehabständen die Akkommodation absolut und in der relativen Veränderung über die Sehentfernung leicht gegenüber dem SRW 5000 und einer klassischen Linsenrefraktion überschätzte. Es lag daher nahe, auch relative Akkommodationsänderungen, die mit dem PowerRefractor, bzw. dem PowerRef II, gemessen wurden, in ihren absoluten Werten mit Einschränkungen zu betrachten.

7.2 Erwartungsgemäße Änderungen der begleitend gemessenen vegetativen Meßgrößen

Betrachtet man die begleitend gemessenen vegetativen Meßgrößen – wie Pupillengröße, Herzperiode, LF- und HF-Komponenten der Herzperiodenvariabilität und Pulswellenlaufzeit – so ergab sich zusammenfassend ein recht geschlossenes Bild: die Pupillengröße nahm mit der Zunahme der kognitiven Anforderung in allen durchgeführten Experimenten erwartungsgemäß (vgl. z. B. Goldwater, 1972; Matthews et al., 1991) dann zu, wenn auch die Verhaltensdaten eine Änderung in der kognitiven Anforderung z. B. mit der Abnahme der korrekten Antworten zeigten. Interessanterweise gab es hier eine Ausnahme: in der Umsetzung der kognitiven Anforderung als „n-back“-Aufgabe (vgl. Abs. 6.4) nahmen, wie erwartet, die mittleren Reaktionszeiten im Kontrollexperiment (K2) nicht mehr zu, wenn die Bedingung „n-4“ zu bearbeiten war; gleichzeitig stieg aber der Fehleranteil (vgl. Abs. 6.4.1). In dieser Bedingung erweiterte sich die Pupille nicht nochmals deutlich im Vergleich zur Bedingung „n-2“. Es konnte damit für dieses Experiment (E5 & K2) – auch wenn es auf zwei Teilstichproben verteilt wurde – keine tendenzielle Abstufung der Pupillenreaktion gezeigt werden, wie sie in der Literatur berichtet wird (vgl. z. B. Goldwater, 1972; Kahnemann et al., 1967). Ansonsten zeigte sich die Pupillenreaktion insgesamt – über alle Experimente be-

trachtet – als deutlich sensibler Parameter in Bezug auf die allgemeine Änderung der kognitiven Anforderung. In ähnlicher Weise verhielt es sich im Rahmen der kardiovaskulären Maße mit der Pulswellenlaufzeit: sie nahm ebenfalls immer dann mit der Änderung der kognitiven Anforderung ab, wenn auch die Verhaltensdaten eine Änderung indizierten – bis auf die bereits bekannte Ausnahme: die Pulswellenlaufzeit reagierte bei der „n-back“-Aufgabe nicht auf Änderungen der Anzahl der zu merkenden Buchstaben im Experiment (E5). Es konnte an dieser Stelle spekuliert werden, daß die Art der „n-back“-Aufgabe, die Behaltens- und Ausführungsprozesse des Kurzzeitgedächtnisses beansprucht, eine andere Wirkung auf die kardiovaskuläre Regulation haben könnte als die Bearbeitung der arithmetischen Aufgaben. An dieser Stelle ist nur zu bedenken, daß die Herzperiode als weiterer kardiovaskulärer Indikator für die Abstufung in den Bedingungen „n-1“ versus „n-2“ vorlag und deutlich mit einer Verkürzung reagierte. Nichts desto weniger mag man argumentieren, daß zumindest nicht der sympathische Anteil der vegetativen Regulation reagierte, der eindeutig in einer Pulswellenlaufzeitänderung zu sehen gewesen wäre (vgl. Newlin, 1981; Newlin & Levenson, 1979); die Herzperiodenverkürzung vermag allein durch eine parasympathische Rücknahme bewirkt worden sein, die auch durch den Quotienten aus Herzperiodenänderung (bzw. Herzratenänderung) und Pulswellenlaufzeitänderung nahegelegt wurde (vgl. Weiss et al, 1980; z. B. Task Force Special Report, 1996). Insgesamt erwies sich die Pulswellenlaufzeit damit als zuverlässiger – sympathikus-indizierender – kardiovaskulärer Indikator einer Änderung der kognitiven Anforderung, was unterstützend zu einem Aussparen der Betrachtung der LF- und HF-Komponenten der HPV nach den ersten beiden Experimenten (E1 & E2) führte. Beide Meßgrößen zeigten keine Veränderungen mit der Änderung der kognitiven Anforderung zwischen dem „Lesen“ und „Addieren“ von Zahlen und waren daher wenig hilfreich in der weiteren Beschreibung des vegetativen Kontextes im Organismus. Zu guter Letzt wurde in allen Experimenten die Herzperiode als begleitendes allgemeines Maß der kardiovaskulären Änderungen bestimmt und ähnlich wie die Pupillengröße als sensibel gegenüber einer allgemeinen Änderung der kognitiven Anforderung vorgefunden (vgl. z. B. Task Force Special Report, 1996). Die berichteten Verkürzungen der Herzperiode waren im Betrag eher gering, aber für die Teilstichproben sehr homogen und damit in den Analysen bedeutsam.

Wollte man die Beobachtungen in den vegetativen Meßgrößen – Pupillengröße, Herzperiode, Pulswellenlaufzeit und auch LF- und HF-Komponenten-Dichte der HPV – zusammenfassen, so zeigte sich ein literaturkonformes Bild mit höchstens kleinen Schönheitsfehlern.

7.3 Was bleibt von der Ausgangsidee ?

Obwohl der Ziliarmuskel des Auges und die Herzmuskulatur im menschlichen Organismus zwei vollkommen unterschiedliche, funktionelle Aufgaben erfüllen, werden beide Muskeln über den Sympathikus und Parasympathikus des vegetativen Nervensystems in ihrer Funktion gesteuert. Die Ausgangsidee der vorliegenden Arbeit stützte sich im Wesentlichen auf zwei Befunde: in einer Arbeit aus dem Jahr 2000 zeigten Tyrrell, Pearson &

Thayer, daß eine Steigerung der Herzrate (Herzschläge pro Minute) bei einer (relativ) leichten Leseaufgabe in der Nähe (ca. 6 D; 15 cm) mit einer Verlagerung der Akkommodationsruhelage in die Nähe einherging, die bei einer (relativ) schweren Leseaufgabe ausblieb. In einer neueren Arbeit von Davies, Wolffsohn & Gilmartin (2005; vgl. BCOVS Abstracts 2003) wurde die Betrachtung der Akkommodation während der Bearbeitung unterschiedlich schwerer Aufgaben gemessen und die Autoren konnten zeigen, daß sich die Akkommodation von der Sehentfernung der Informationspräsentation mit Zunahme der Aufgabenschwierigkeit, d. h. der kognitiven Anforderung, in die Ferne verlagerte, während gleichzeitig die Herzperiode abnahm. Diese gefundene Verringerung der Akkommodation wird zu meist als durch eine Veränderung der vegetativen Balance verursacht interpretiert, wobei theoretisch eine Sympathikusaktivierung diskutiert wird (vgl. z. B. Gilmartin, 1998) – auch wenn die allgemeine Befundlage nicht eindeutig ist (vgl. Tabelle 1). In den vorliegenden Experimenten konnte allerdings keine Änderung der Akkommodation mit einer Änderung der kognitiven Anforderung bestätigt werden und es ließen sich damit auch keine Bezüge zu allgemeinen oder sympathikusspezifischen Veränderungen in kardiovaskulären Parametern herstellen. Es wurden keinerlei korrelative Anhaltspunkte gefunden, daß sich geringe Änderungen der Akkommodation in z. B. der Änderung der Herzperiode oder Pulswellenlaufzeit wiederfinden ließen – selbst dann nicht, wenn letztere eine Sympathikusaktivierung nahelegte. Darüber hinaus wurden gerinfügige Änderungen in den Akkommodationsdaten nicht als kognitiv-induziert interpretiert, da diese auf zwei Einflußfaktoren – eine Blickrichtungsänderung mit der kognitiven Anforderung und die Richtigkeit der Aufgabenbearbeitung – zurückgeführt werden konnten. Damit stehen die Ergebnisse bzgl. der Akkommodation eher im Einklang mit einzelnen Studien, die optische bzw. methodische Ursachen für die in der Literatur diskutierten Akkommodationsänderungen verantwortlich machen; eine vegetative Balanceverschiebung als Erklärung einer Akkommodationsänderung bei der Bearbeitung kognitiver Anforderungen in Nahsehsituationen konnte damit abschließend für die vorliegenden Daten nicht aufrechtgehalten werden.

8 Literatur

- Allen P.M., Radhakrishnan H. & O'Leary D.J. (2003). Repeatability and validity of the PowerRefractor and the Nidek AR600-A in an adult population with healthy eyes. *Optometry and Vision Science, 80*, 245-251.
- Alpern M. (1969). Accommodation. In H. Davson (Hrsg.), *The eye, Vol. 3: Muscular Mechanisms*. New York: Academic Press.
- Andreassi J.L. (2000). *Psychophysiology: Human Behavior and Physiological Response*. Hillsdale, NJ, USA: Lawrence Erlbaum Associates.
- Backs R.W. & Boucsein W. (2000). *Engineering Psychophysiology: Issues & Applications*. London: Lawrence Erlbaum Associates.
- Bähr M. & Frotscher M. (2003). *Duus' Neurologisch-topische Diagnostik, 8. Auflage*. Würzburg: Thieme.
- Bandler R. & Grinder J. (1994). *Neue Wege der Kurzzeit-Therapie. Neurolinguistische Programme*. Junfermann: Paderborn.
- Barch D.M., Braver T.S., Nystrom L.E., Forman S.D., Noll D.C. & Cohen J.D. (1997). Dissociating working memory from task difficulty in human prefrontal cortex. *Neuropsychologia, 35*, 1373-1380.
- Beck C.E. & Beck E.A. (1984). Test of the eye-movement hypothesis of neurolinguistic programming: a rebuttal of conclusions. *Perceptual and Motor Skills, 58*, 175-176.
- Benarroch E.E. (1993). The central autonomic network: functional organization, dysfunction, and perspective. *Mayo Clinic Proceedings, 68*, 988-1001.
- Benarroch E.E. (1997). Chapter 2 - The Central Autonomic Network. In P.A. Low (Hrsg.) *The Clinical Autonomic Disorders*. Philadelphia: Lippencott-Raven.
- Berntson G.G., Bigger J.T.Jr., Eckberg D.L., Grossman P., Kaufmann P.G., Malik M., Nagaraja H.N., Porges S.W., Saul J.P., Stone P.H. & Van der Molen M.W. (1997). Heart rate variability: Origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology, 34*, 623-648.
- Berntson G.G., Cacioppo J.T. & Quigley K.S. (1995). The metrics of cardiac chronotropism: Biometric perspectives. *Psychophysiology, 32*, 162-171.
- Birbaumer N. & Schmidt R.F. (1991). *Biologische Psychologie, 2. Auflage*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Birnbaum M.H. (1984). Nearpoint visual stress: A physiological model. *Journal of the American Optometry Association, 55*, 825-835.
- Bradshaw J.L. (1967). Pupil size as a measure of arousal during information processing. *Nature, 216*, 515-516.
- Braver T.S., Cohen J.D., Nystrom L.E., Jonides J., Smith, E.E. & Noll D.C. (1997). A parametric study of prefrontal cortex involvement in human working memory. *Neuroimage, 5*, 49-62.
- Bugram R., Akhlaghi-Farsi H., Maresch H. & Pfurtscheller G. (1994). Eine Methode zur Bestimmung der Pulswellenlaufzeit. *Biomedizinische Technik, 39*, 51-56.

- Bullimore M.A. & Gilmartin B. (1988). The accommodative response, refractive error and mental effort: 1. The sympathetic nervous system. *Documenta Ophthalmologica*, 69, 385-397.
- Bullimore M.A., Gilmartin B. & Royston J.M. (1992). Steady-state accommodation and ocular biometry in late-onset myopia. *Documenta Ophthalmologica*, 80, 143-155.
- Bullimore M.A. & Gilmartin B. (1987). Tonic Accommodation, cognitive demand and ciliary muscle innervation. *American Journal of Optometry & Physiological Optics*, 64, 45-50.
- Burke D.T., Meleger A. & Schneider J.C. (2003). Eye-movements and ongoing task processing. *Perceptual and Motor Skills*, 96, 1330-1338.
- Callister R., Suwarno N.O. & Seals D.R. (1992). Sympathetic activity is influenced by task difficulty and stress perception during mental challenge in humans. *Journal of Physiology*, 454, 373-387.
- Campbell M.E. (1981). Statistical procedures with the law of initial values. *Journal of Psychology*, 108, 85-101.
- Challapalli S., Kadish A.H. Horvath G. & Goldberger J.J. (1999). Differential effects of parasympathetic blockade and parasympathetic withdrawal on heart rate Variability. *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*, 10, 1192-1199.
- Chen J.C., Schmid K.L. & Brown B. (2003). The autonomic control of accommodation and implications for human myopia development: A review. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 23, 401-422.
- Choi M., Weiss S., Schaeffel F., Seidemann A., Howland H.C., Wilhelm B. & Wilhelm H. (2000). Laboratory, clinical, and Kindergarten test of a new eccentric infrared photorefractor (PowerRefractor). *Optometry and Vision Science*, 77, 537-548.
- Ciuffreda K.J. (1991). Accommodation and its Anomalies. In: W.N. Charman (Hrsg.) *Visual Optics and Instrumentation*. pp. 231-297. Manchester: MacMillan Press.
- Ciuffreda K.J. & Lee M. (2002). Differential refractive susceptibility to sustained nearwork. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 22, 372-379.
- Cohen J.D., Perlstein W.M., Braver T.S., Nystrom L.E., Noll D.C., Jonides J. & Smith E.E. (1997). Temporal dynamics of brain activation during a working memory task. *Nature*, 386, 604-608.
- Davies L.N., Wolffsohn J.S. & Gilmartin B. (2005). Cognition, ocular accommodation, and cardiovascular function in emmetropes and late-onset myopes. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 46, 1791-1796.
- Davies L.D., Wolffsohn J.S. & Gilmartin B. (2004). The influence of cognition on oculomotor and cardiovascular function. *BCOVS 2003 Abstracts*.
- Deetjen P., Speckmann E.J. & Hescheler J. (2005). *Physiologie*. Urban & Fischer: München, Jena.
- Dixon W.J. (1992). *BMDP Statistical Software Manual*. Berkeley, CA, USA: University of California Press.
- Dooley K.O. & Farmer A. (1988). Comparison for aphasic and control subjects of eye movements hypothesized in neurolinguistic programming. *Perceptual and Motor Skills*, 67, 233-234.

- Edgar G.K. & Reeves C.A. (1997). Visual accommodation and virtual images: Do attentional factors mediate the interacting effects of perceived distance, mental workload, and stimulus presentation modality? *Human Factors*, 39, 374-381.
- Ehrlichman H. & Weinberger A. (1978). Lateral eye movement and hemispheric asymmetry: A critical review. *Psychological Bulletin*, 85, 1080-1101.
- Farmer A., Rooney R. & Cunningham J.R. (1985). Hypothesized eye movements of neurolinguistic programming: A statistical artefact. *Perceptual and Motor Skills*, 61, 717-718.
- Francis E.L., Thompson T.C. & Owens D.A. (1995). Ocular accommodation varies with visual vs. auditory attention. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 36, 2110.
- Gevins A. & Cutillo B. (1993). Spatiotemporal dynamics of component processes in human working memory. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 87, 128-143.
- Gilmartin B. (1998). Autonomic correlates of near-vision in emmetropia and myopia. In: M. Rosenfield & B. Gilmartin (Hrsg.) *Myopia and Nearwork*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Gilmartin B., Mallen E.A. & Wolffsohn J.S. (2002). Sympathetic control of accommodation: Evidence for inter-subject variation. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 22, 366-371.
- Goldwater B.C. (1972). Psychological significance of pupillary movements. *Psychological Bulletin*, 77, 340-355.
- Golenhofen K. (2000). *Physiologie heute, 2. Auflage*. München, Jena: Urban & Fischer.
- Gordon E. (2001). Integrative psychophysiology. *International Journal of Psychophysiology*, 42, 95-108.
- Greenhouse S.W. & Geisser S. (1959). On methods in the analysis of profile data. *Psychometrika*, 58, 310-364.
- Harvey R.S. (1982). Some statistics of interpupillary distance. *The Optician*, 184, 4766.
- Hennessy R.T., Ida T., Shina K. & Leibowitz H.W. (1976). The effect of pupil size on accommodation. *Vision Research*, 16, 587-589.
- Hess E.H. & Polt J.M. (1964). Pupil size in relation to mental activity during simple problem solving. *Science*, 143, 1190-1192.
- Hess E.H. (1965). Attitude and pupil size. *Scientific American*, 212, 46-54.
- Hess E.H., Braver P.W. & Shrouf P.E. (1975). Brightness contrast effects in a pupillometric experiment. *Perception and Psychophysics*, 18, 125-127.
- Hoormann J. (1984). *Infrarot-Photoplethysmographie; Signalerfassung und -verarbeitung für die Biofeedbacktherapie*. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Allgemeine Elektrotechnik und Elektrooptik, Ruhr-Universität Bochum.
- Hunt O.A., Wolffsohn J.S. & Gilmartin B. (2003). Evaluation of the measurement of refractive error by the PowerRefractor: a remote, continuous and binocular measurement system of oculomotor function. *British Journal of Ophthalmology*, 87, 1504-1508.
- Hunter J.D., Milton J.G., Lüdtke H., Wilhelm B. & Wilhelm H. (2000). Spontaneous fluctuations in pupil size are not triggered by lens accommodation. *Vision Research*, 40, 567-573.

- Hurwitz B.S., Davidowitz J., Chin N.B. & Breinin G.B. (1972). The effects of the sympathetic nervous system on accommodation: I. Beta sympathetic nervous system. *Archives of Ophthalmology*, 87, 668-674.
- Iwasaki T. (1993). Effects of a visual task with cognitive demand on dynamic and steady-state accommodation. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 13, 285-290.
- Jaeggi S.M., Seewer R., Nirkko A.C., Eckstein D., Schroth G., Groner R. & Gutbrod K. (2003). Does excessive memory load attenuate activation in the prefrontal cortex? Load-dependent processing in single and dual tasks: Functional magnetic resonance imaging study. *NeuroImage*, 19, 210-225.
- Jainta S., Hoormann J. & Jaschinski W. (2004). Measurement of refractive error and accommodation with the photorefractor PowerRef II. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 24, 520-527.
- Janisse M.P. (1977). *Pupillometry, The Psychology of the Pupillary Response*. Washington: Hemisphere Publishing Corporation.
- Kahneman D. & Beatty J. (1966). Pupil diameter and load on memory. *Science*, 154, 1583-1585.
- Kahneman D. & Beatty J. (1967). Pupillary response in a pitch-discrimination task. *Perception & Psychophysics*, 2, 101-105.
- Kahneman D., Beatty J. & Pollak I. (1967). Perceptual deficit during a mental task. *Science*, 157, 218-219.
- Kasthurirangan S. & Glasser A. (2005). Characteristics of pupil responses during far-to-near and near-to-far accommodation. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 25, 328-339.
- Kaufman P.L. & Alm A. (2003). *Adler's Physiology of the Eye - Clinical Application*, 10. Auflage. St. Louis, London: Mosby.
- Keller D. & Revenstorf D. (1996). Das Augenbewegungsmodell des NLP. *Hypnose und Kognition*, 13, 225-250.
- Kim Y.H., Ahmed M.W., Kadish A.H. & Goldberger J.J. (1997). Characterization of the factors that determine the effect of sympathetic stimulation on heart rate variability. *Pacing clin. Electrophysiol.*, 20, 1936-1946.
- Kinsbourne M. (1972). Eye and head turning indicates cerebral lateralization. *Science*, 176, 539-541.
- Kruger P.B. (1980). The effect of cognitive demand on accommodation. *American Journal of Optometry & Physiological Optics*, 57, 440-445.
- Lacey J.I. (1956). The evaluation of autonomic responses: Toward a general solution. *Annals of the New York Academy of Science*, 67, 123-164.
- Lawson M.L., Crewther S.G., Junghans B.M., Crewther D.P. & Kiely P.M. (2005). Changes in ocular accommodation when shifting between global and local attention. *Clinical and Experimental Optometry*, 88, 28-32.
- Loewenfeld I.E. (1958). Mechanisms of reflex dilatation of the pupil. Historical review and experimental analysis. *Documenta Ophthalmologica*, 12, 185-448.
- Loewenfeld I.E. (1993). *The Pupil: Anatomy, Physiology and Clinical Applications*. Ames IA/Detroit, MI: Iowa State University Press/ Wayne State University Press.

- Lowenstein O. & Loewenfeld I.E. (1951). Types of central autonomic innervation and fatigue. *Archives of Neurology and Psychiatry*, 66, 580-599.
- Lowenstein O. & Loewenfeld I.E. (1962). The pupil. In H. Davson (Hrsg.), *The eye, Vol. 3.: Muscular Mechanisms*. New York: Academic Press.
- Lundstrom L., Gustafsson J., Svensson I. & Unsbo P. (2005). Assessment of objective and subjective eccentric refraction. *Optometry & Vision Science*, 82, 298-306.
- Malik M. & Camm A.L. (1993). Components of heart rate variability - what they really mean and what we really measure. *American Journal of Cardiology*, 72, 821-822.
- Mallen E.A., Gilmartin B. & Wolffsohn J.S. (2005). Sympathetic innervation of ciliary muscle and oculomotor function in emmetropic and myopic young adults. *Vision Research*, 45, 1641-1651.
- Mallen E.A.H., Wolffsohn J.S., Gilmartin B. & Tsujimura S. (2001). Clinical evaluation of the Shin-Nippon SRW-5000 autorefractor in adults. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 21, 101-107.
- Malliani A., Pagani M., Lombardi F. & Cerutti S. (1991). Cardiovascular neural regulation explored in the frequency domain. *Circulation*, 84, 482-492.
- Malmstrom F.V., Randle R.J., Bendix J.S. and Weber R.J. (1980). The visual accommodation response during concurrent mental activity. *Perception & Psychophysics*, 28, 440-448.
- Masterman D.L. & Cummings J.L. (1997). Frontal-subcortical circuits: The anatomic basis of executive, social and motivated behaviors. *Journal of Psychopharmacology*, 11, 107-114.
- Matthews G., Middelton W., Gilmartin B. & Bullimore M.A. (1991). Pupillary diameter and cognitive load. *Journal of Psychophysiology*, 5, 265-271.
- Mulder G. (1985). Attention, effort and sinus arrhythmia: How far are we? In J.F. Orlebeke, G. Mulder, & L.J.P. van Dornan (Hrsg.) *Psychophysiology of Cardiovascular Control*. New York: Plenum Press.
- Mulder L.J. (1992). Measurement and analysis methods of heart rate and respiration for use in applied environments. *Biological Psychology*, 34, 205-236.
- Mulder G., Mulder L.J.M., Meijman T.F., Veldman J.B.P. & Van Roon A.M. (2000). A psychophysiological approach to working conditions. In R. W. Backs & W. Boucsein (Eds.). *Engineering Psychophysiology: Issues and Applications*. (139-159). Mahwah, NJ : Erlbaum.
- Newlin D.B. (1981). Relationships of pulse transmission times to pre-ejection period and blood pressure. *Psychophysiology*, 18, 316-321.
- Newlin D.B. & Levenson R.W. (1979). Pre-ejection period: Measuring beta-adrenergic influences upon the heart. *Psychophysiology*, 16, 546-553.
- Nickel P. & Nachreiner F. (2003). Sensitivity and diagnosticity of the 0.1-Hz component of heart rate variability as an indicator of mental workload. *Human Factors*, 45, 575-590.
- Nickel P., Eilers K., Seehase L. & Nachreiner F. (2002). Zur Reliabilität, Validität, Sensitivität und Diagnostizität von Herzfrequenz- und Herzfrequenzvariabilitätsmaßen als

- Indikatoren psychischer Beanspruchung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaften*, 56, 22-36.
- O'Neill W.D. & Zimmermann S. (2000). Neurological interpretations and the information in the cognitive pupillary response. *Methods of Information in Medicine*, 39, 122-124.
- Ostrin L.A. & Glasser A. (2004). The effects of phenylephrine on pupil diameter and accommodation in rhesus monkeys. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 45, 215-221.
- Phillips N.J., Winn B. & Gilmartin B. (1992). Absence of pupil response to blur-driven accommodation. *Vision Research*, 32, 1775-1779.
- Poffel S.A. & Cross H.J. (1985). Neurolinguistic programming: A test of the eye-movement hypothesis. *Perceptual and Motor Skills*, 61, 1262.
- Pollak M.H. & Obrist P.A. (1983). Aortic-radial pulse transit time and ECG Q-wave to radial pulse wave interval as indices of beat-by-beat blood pressure change. *Psychophysiology*, 20, 21-28.
- Posner M., Nissen M. & Klein R. (1976). Visual dominance: An information-processing account of its origins and significance. *Psychological Review*, 83, 157-171.
- Rosenfield M. & Ciuffreda K.J. (1990). Proximal and cognitively- induced accommodation. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 10, 252-256.
- Schaeffel F. (2002). Kappa and Hirschberg ratio measured with an automated video gaze tracker. *Optometry & Vision Science*, 79, 329-334.
- Schaeffel F. & Weiss S. (2002). Automatische Infrarot-Photoskiaskopie : ein Verfahren zur Messung von Fehlsichtigkeit, Pupillengröße und Blickrichtung beider Augen aus einem Meter Entfernung und mit 25 Hz. *Interne Berichterstattung, Universität Tübingen, Sektion für Neurobiologie des Auges, Universitäts-Augenklinik : Tübingen.*
- Schaeffel F., Weiss S. & Seidel J. (1999). How good is the match between the plane of the text and the plane of focus during reading? *Ophthalmic and Physiological Optics*, 19, 180-192.
- Schaeffel F., Wilhelm H. & Zrenner E. (1993). Inter-individual variability in the dynamics of natural accommodation in humans: relation to age and refractive errors. *Journal of Physiology*, 461, 301-320.
- Seidemann A. & Schaeffel F. (2002). Effects of longitudinal chromatic aberration on accommodation and emmetropization. *Vision Research*, 42, 2409-2417.
- Seidemann A., Guirao A., Artal P. & Schaeffel F. (1999). Peripheral sphere and astigmatism measured by infrared photoretinoscopy and by double pass point spread. *Technical Digest , February 19-22*, 224-227.
- Seidemann A. & Schaeffel F. (2003). An evaluation of the lag of accommodation using photorefractometry. *Vision Research*, 43, 419-430.
- Sloan R.P., Shapiro P.A., Bagiella E., Bigger J.T.Jr., Lo E.S. & Gorman J.M. (1996). Relationships between circulating catecholamines and low frequency heart period variability as indices of cardiac sympathetic activity during mental stress. *Psychosomatic Medicine*, 58, 25-31.

- Speckmann E.J. & Wittkowsky W. (1994). *Bau und Funktion des menschlichen Körpers*, 18. Auflage. München, Wien, Baltimore: Urban & Schwarzenberg.
- Stark L.R. & Atchison D.A. (1994). Subject instructions and methods of target presentation in accommodation research. *Investigative Ophthalmology & Vision Science*, 35(2), 528-537.
- Stark L.R. & Atchison D.A. (1997). Pupil size, mean accommodation response and the fluctuations of accommodation. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 17, 316-323.
- Tabachnick B.G. & Fidell L.S. (2000). *Using Multivariate Statistics*. Allyn and Bacon: Boston, Singapore.
- Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology (1996). Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation*, 93, 1043-1065.
- Tyrrell R.A., Thayer J.F., Friedman B.H., Leibowitz H.W. & Francis E.L. (1995). A behavioral link between the oculomotor and cardiovascular systems. *Integrative Physiology and Behavior Science*, 30, 46-67.
- Tyrrell R.A., Pearson M.A. & Thayer J.F. (2000). Behavioral links between the oculomotor and cardiovascular systems. In O. Franzen, H. Richter H. & L. Stark (Hrsg.) *Accommodation and Vergence Mechanisms in the Visual System*, pp. 151-160. Basel/ Switzerland: Birkhäuser.
- Wahlström J., Hagberg M., Johnson P.W., Svensson J. & Rempel D. (2002). Influence of time pressure and verbal provocation on physiological and psychological reactions during work with a computer mouse. *European Journal of Applied Physiology*, 87, 257-263.
- Ward P.A. & Charman W.N. (1985). Effect of pupil size on steady state accommodation. *Vision Research*, 25, 1317-1326.
- Weiss T., Del Bo A., Reichel N. & Engelman K. (1980). Pulse transit time in the analysis of autonomic nervous system effects on the cardiovascular system. *Psychophysiology*, 17, 202-207.
- Wertheim E.H., Habib C. & Cumming G. (1986). Test of the neurolinguistic programming hypothesis that eye-movements relate to processing imagery. *Perceptual and Motor Skills*, 62, 523-529.
- Wilder J. (1958). Modern psychophysiology and the law of initial value. *American Journal of Psychotherapy*, 12, 199-221.
- Wilhelm H. (1998). Pupillomotorik - das autonome Nervensystem. In A. Huber & D.J. Kömpf (Hrsg.) *Neurophthalmologie*. Würzburg: Thieme.
- Winn B., Gilmartin B., Mortimer L.C. & Edwards N.R. (1991). The effect of mental effort on open- and closed-loop accommodation. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 11, 335-339.
- Winn B., Culhane H.M., Gilmartin B. & Strang N.C. (2002). Effect of a β -adrenoceptor antagonists on autonomic control of ciliary smooth muscle. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 22, 359-365.

-
- Wolffsohn J.S., Gilmartin B., Thomas R. & Mullen E.A.H. (2003). Refractive error, cognitive demand and nearwork-induced transient myopia. *Current Eye Research*, 27, 363-370.
- Wolffsohn J.S., Hunt O.A. & Gilmartin B. (2002). Continuous measurement of accommodation in human factor applications. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 22, 380-384.
- Wolffsohn J.S., Mc Brien A., Edgar G.K. & Stout T. (1998). The influence of cognition and age on accommodation, detection rate and response times when using a car head-up display (HUD). *Ophthalmic and Physiological Optics*, 18, 243-253.
- Wolffsohn J.S., O'Donnell C., Charman W.N. & Gilmartin B. (2004). Simultaneous continuous recording of accommodation and pupil size using the modified Shin-Nippon SRW-5000 Autorefractor. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 24, 142-147.
- Woodmansee J.J. (1966). Methodological problems in pupillographic experiments. *Proceedings of the 74th Annual Convention of the American Psychological Association*, 1, 133-134.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Veränderungen im Auge bei Akkommodation auf die Nähe. _____	3
Abbildung 2:	Die menschliche Pupille. _____	13
Abbildung 3:	Das normale EKG: dargestellt sind die verschiedenen Wellen und Zacken, Strecken und Intervalle (Standardableitung II nach Einthoven). _____	16
Abbildung 4:	Akkommodationsmessungen mit dem PowerRef II, dem SRW 5000 und der klassischen Refraktion als Funktion des Sehabstandes. _____	27
Abbildung 5:	A: Skizze des Versuchsaufbaus für Messungen mit dem PowerRefractor oder dem PowerRef II. B. Skizze des Versuchsaufbaus für Messungen mit dem SRW 5000. _	32
Abbildung 6:	Skizze des zeitlichen Versuchsablaufs des Experimentes E1. _____	34
Abbildung 7:	E1: Veränderungen der abhängigen Variablen. _____	35
Abbildung 8:	E1: Veränderungen der abhängigen Variablen a: Akkommodation und b: Blickrichtung. _____	36
Abbildung 9:	Regression der gemessenen Blickrichtung über die zufällig präsentierten Blickpositionen für die Meßgeräte PowerRefractor und PowerRef II. _____	38
Abbildung 10:	Regression der gemessenen Akkommodation über den gemessenen Blickrichtungswerten für die Meßgeräte PowerRefractor und PowerRef II. _____	39
Abbildung 11:	Regression der gemessenen Akkommodation über den präsentierten Blickrichtungswerten für das SRW 5000. _____	39
Abbildung 12:	Skizze des zeitlichen Versuchsablaufs des Experimentes E2. _____	42
Abbildung 13:	E2: Veränderungen der abhängigen Variablen. _____	43
Abbildung 14:	E2: Veränderungen der abhängigen Variablen a: Akkommodation und b: Blickrichtung. _____	44
Abbildung 15:	Skizze der Aufgabenpräsentation im Experiment E3. _____	48
Abbildung 16:	E3: Veränderungen der abhängigen Variablen. _____	50
Abbildung 17:	E3: Veränderungen der abhängigen Variablen a: Akkommodation für alle bearbeiteten Aufgaben und b: Akkommodation für nur richtig-bearbeitete Aufgaben. _____	51
Abbildung 18:	Skizze des zeitlichen Versuchsablaufs des Experimentes E4. _____	55
Abbildung 19:	E4: Veränderungen der abhängigen Variablen. _____	56
Abbildung 20:	K1: Veränderungen der Variablen a: Pupillendurchmesser und b: Akkommodation. _____	58
Abbildung 21:	K1: Veränderungen der Akkommodation mit der Variation der „Aufgabe“ („Fixieren vs. Fixieren/ Merken). _____	58
Abbildung 22:	Zeitliche Versuchsablauf-Skizze des Experimentes E5. _____	61
Abbildung 23:	E5: Veränderungen der Variablen. _____	64
Abbildung 24:	E5: Veränderungen der Herzperiode. _____	65
Abbildung 25:	E5: Veränderungen der Akkommodation. _____	65
Abbildung 26:	K2: Änderung der Akkommodation über die 160-s-Meßphasen. _____	68

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenfassende Darstellung der Literatur zu Veränderungen der Akkommodation unter kognitiven Anforderungen. _____	12
Tabelle 2:	Übersicht der Faktorstufenkombinationen (E5). _____	62

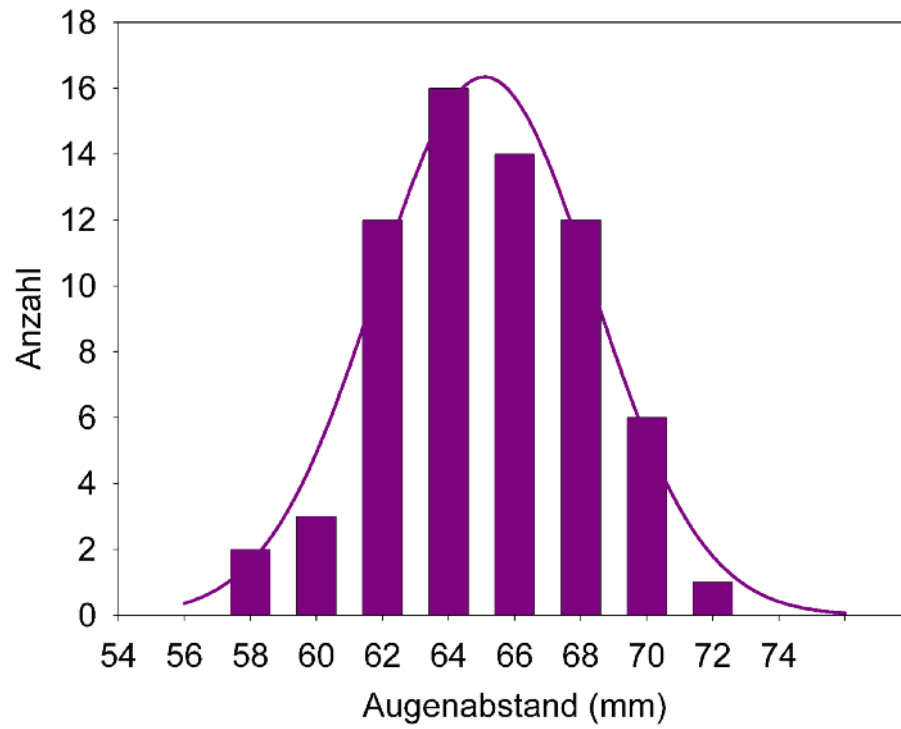
11 Anhangsverzeichnis

- Anhang A: Häufigkeitsverteilung des Pupillenabstandes (mm) der Teilnehmerstichprobe (N = 66).
- Anhang B: E1: Vergleich der Akkommodationsdaten für die Geräte PowerRefractor und PowerRef II (MANOVA mit Akkommodation, Pupillendurchmesser und horizontaler Blickrichtung und den Faktoren „Aufgabe“ (Lesen vs. Addieren) und „Reihenfolge“ (Lesen-Addieren vs. Addieren-Lesen); Gruppierungsfaktor ist „Gerät“).
- Anhang C1: E1: Betrachtung der Atemfrequenz (Atemzüge pro Sekunde; Mittelwert (M), Standartabweichung (SD)). Die Atemfrequenz wurde über die Reihenfolgen „Lesen-Addieren“ und „Addieren-Lesen“ für jeweils „Lesen“ und „Addieren“ gemittelt.
- Anhang C2: E2: Betrachtung der Atemfrequenz (Atemzüge pro Sekunde; Mittelwert (M), Standartabweichung (SD)). Die Atemfrequenz wurde über die Reihenfolgen „Lesen-Addieren“ und „Addieren-Lesen“ für jeweils „Lesen“ und „Addieren“ gemittelt.
- Anhang D: E1: MANOVA mit den Faktoren „Aufgabe“ und „Reihenfolge“ für die Variaten Akkommodation, Pupillendurchmesser, Blickrichtung. Anzahl der korrekten Antworten, Herzperiode, Pulswellenlaufzeit und LF- und HF-Komponenten (normiert).
- Anhang E: E1: Vergleich der Akkommodationsdaten unter Berücksichtigung der Kovariate „Blickrichtung“ (ANOVA mit den Faktoren „Aufgabe“ (Lesen vs. Addieren) und „Reihenfolge“ (Lesen-Addieren vs. Addieren-Lesen).
- Anhang F: E2: Vergleich der Akkommodationsdaten für die Geräte PowerRefractor und PowerRef II (MANOVA mit Akkommodation, Pupillendurchmesser und horizontale Blickrichtung und den Faktoren „Aufgabe“ (Lesen vs. Addieren) und „Reihenfolge“ (Lesen-Addieren vs. Addieren-Lesen); Gruppierungsfaktor ist „Gerät“).
- Anhang G: E2: MANOVA mit den Faktoren „Aufgabe“ und „Reihenfolge“ für die Variaten Pupillendurchmesser, Blickrichtung. Anzahl der richtigen Antworten, Herzperiode, Pulswellenlaufzeit und LF- und HF-Komponenten (normiert).
- Anhang H: E2: Vergleich der Akkommodationsdaten unter Berücksichtigung der Kovariate „Blickrichtung“ (ANOVA mit den Faktoren „Aufgabe“ (Lesen vs. Addieren) und „Reihenfolge“ (Lesen-Addieren vs. Addieren-Lesen).
- Anhang I - 1: E3: MANOVA mit den Faktoren „Phase“ (Lesen vs. Rechnen) und „Aufgabe“ (Addieren vs. Multiplizieren) für die Variaten Anzahl der korrekten Antworten, Reaktionszeit, Pupillendurchmesser und Pulswellenlaufzeit.
- Anhang I - 2: E3: „simple effect“-MANOVA Analysen (vgl. Anhang I - 1).
- Anhang J - 1: E3: Vergleich der Akkommodationsdaten unter Berücksichtigung der Kovariate „Blickrichtung“ für alle bearbeiteten Aufgaben (ANOVA mit den Faktoren „Phase“ (Lesen vs. Rechnen) und „Aufgabe“ (Addieren vs. Multiplizieren).
- Anhang J - 2: E3: „simple effect“-MANOVA Analysen (vgl. Anhang J - 1).
- Anhang K: E3: Vergleich der Akkommodationsdaten unter Berücksichtigung der Kovariate „Blickrichtung“ für die richtig bearbeiteten Aufgaben (ANOVA mit den Faktoren „Phase“ (Lesen vs. Rechnen) und „Aufgabe“ (Addieren vs. Multiplizieren).

- Anhang M: E4: Vergleich der Akkommodationsdaten unter Berücksichtigung der Kovariate „Blickrichtung“ (ANOVA mit den Faktoren „Aufgabe“ (Fixieren vs. Fixieren / Merken) und „Reihenfolge“ (Fixieren - Fixieren / Merken vs. Fixieren / Merken - Fixieren)).
- Anhang N - 1: E5: MANOVA mit den Faktoren „Phase“ (Vergleichsphase vs. Bedingungsphase), „Aufgabe“ (n-1 vs. n-2) und „Tempo“ (600 ms vs. 350 ms vs. 100 ms).
- Anhang N - 2: E5: „simple effect“ - MANOVA Analysen für die Interaktion Phase x Aufgabe (vgl. Anhang N - 1).
- Anhang O - 1: E5: Vergleich der Herzperiodendauer (ANOVA mit den Faktoren „Phase“ (Vergleichsphase vs. Bedingungsphase), „Aufgabe“ (n-1 vs. n-2) und „Tempo“ (600 ms vs. 350 ms vs. 100 ms).
- Anhang O - 2: E5: „simple effect“-ANOVA für die Interaktion Phase x Aufgabe (Vgl. Anhang O-1).

Anhang A:

Häufigkeitsverteilung des Pupillenabstandes (mm) der Teilnehmerstichprobe (N = 66).



Anhang B:

E1: Vergleich der Akkommodationsdaten für die Geräte PowerRefractor und PowerRef II (MANOVA mit Akkommodation, Pupillendurchmesser und horizontaler Blickrichtung und den Faktoren „Aufgabe“ (Lesen vs. Addieren) und „Reihenfolge“ (Lesen-Addieren vs. Addieren-Lesen); Gruppierungsfaktor ist „Gerät“).

Variate	T ²	F	df	p
Gruppenmittelwert	20856,50	4802,49	4, 35	< 0,01
Akkommodation		1562,97	1, 38	< 0,01
Pupillendurchmesser		1106,94	1, 38	< 0,01
Blickrichtung		28,02	1, 38	< 0,01
Gerät (G)	3,34	< 1	4, 35	0,55
Akkommodation		1,34	1, 38	0,25
Pupillendurchmesser		< 1	1, 38	0,94
Blickrichtung		1,31	1, 38	0,26
Aufgabe (A)	47,76	11,00	4, 35	< 0,01
Akkommodation		4,07	1, 38	0,05
Pupillendurchmesser		36,91	1, 38	< 0,01
Blickrichtung		4,36	1, 38	0,04
A x G	6,03	1,39	4, 35	0,26
Akkommodation		< 1	1, 38	0,90
Pupillendurchmesser		1,16	1, 38	0,28
Blickrichtung		< 1	1, 38	0,48
Reihenfolge (R)	4,43	1,02	4, 35	0,41
Akkommodation		< 1	1, 38	0,57
Pupillendurchmesser		< 1	1, 38	0,39
Blickrichtung		< 1	1, 38	0,71
R x G	5,03	1,16	4, 35	0,35
Akkommodation		< 1	1, 38	0,82
Pupillendurchmesser		< 1	1, 38	0,47
Blickrichtung		< 1	1, 38	0,48
A x R	5,19	1,20	4, 35	0,33
Akkommodation		1,07	1, 38	0,31
Pupillendurchmesser		2,65	1, 38	0,12
Blickrichtung		3,01	1, 38	0,09
AR x G	9,33	2,61	4, 35	0,05
Akkommodation		2,61	1, 38	0,11
Pupillendurchmesser		2,92	1, 38	0,10
Blickrichtung		2,65	1, 38	0,11

Anhang C1:

E1: Betrachtung der Atemfrequenz (Atemzüge pro Sekunde; Mittelwert (M), Standardabweichung (SD)). Die Atemfrequenz wurde über die Reihenfolgen „Lesen-Addieren“ und „Addieren-Lesen“ für jeweils „Lesen“ und „Addieren“ gemittelt.

	Atemfrequenz			
	M	SD	t	p
Lesen	0,28	0,07	0,35	0,73
Addieren	0,27	0,07		

Anhang C2:

E2: Betrachtung der Atemfrequenz (Atemzüge pro Sekunde; Mittelwert (M), Standardabweichung (SD)). Die Atemfrequenz wurde über die Reihenfolgen „Lesen-Addieren“ und „Addieren-Lesen“ für jeweils „Lesen“ und „Addieren“ gemittelt.

	Atemfrequenz			
	M	SD	t	p
Lesen	0,26	0,07	-1,85	0,07
Addieren	0,27	0,07		

Anhang D:

E1: MANOVA mit den Faktoren „Aufgabe“ und „Reihenfolge“ für die Variaten Akkommodation, Pupillendurchmesser, Blickrichtung, Anzahl der korrekten Antworten, Herzperiode, Pulswellenlaufzeit und LF- und HF-Komponenten (normiert).

Variate	T ²	F	df	p
Gruppenmittelwert	407379,00	41782,42	8, 32	< 0,01
Akkommodation		1549,60	1, 39	< 0,01
Pupillendurchmesser		1135,90	1, 39	< 0,01
Blickrichtung		27,79	1, 39	< 0,01
%-korrekte Antworten		15331,34	1, 39	< 0,01
Herzperiode		1414,12	1, 39	< 0,01
Pulswellenlaufzeit		3969,77	1, 39	< 0,01
LFn		1534,44	1, 39	< 0,01
HFn		2917,46	1, 39	< 0,01
Aufgabe (A)	71,67	7,35	8, 32	< 0,01
Akkommodation		4,17	1, 39	0,05
Pupillendurchmesser		36,76	1, 39	< 0,01
Blickrichtung		4,42	1, 39	0,04
%-korrekte Antworten		7,70	1, 39	< 0,01
Herzperiode		9,09	1, 39	< 0,01
Pulswellenlaufzeit		7,31	1, 39	0,01
LFn		1,85	1, 39	0,18
HFn		2,56	1, 39	0,12
Reihenfolge (R)	6,89	< 1	8, 32	0,68
Akkommodation		< 1	1, 39	0,57
Pupillendurchmesser		< 1	1, 39	0,39
Blickrichtung		< 1	1, 39	0,72
%-korrekte Antworten		1,79	1, 39	0,18
Herzperiode		< 1	1, 39	0,41
Pulswellenlaufzeit		< 1	1, 39	0,74
LFn		< 1	1, 39	0,82
HFn		< 1	1, 39	0,66
A x R	19,56	2,01	8, 32	0,08
Akkommodation		< 1	1, 39	0,35
Pupillendurchmesser		2,51	1, 39	0,12
Blickrichtung		2,87	1, 39	0,10
%-korrekte Antworten		< 1	1, 39	0,43
Herzperiode		8,39	1, 39	< 0,01
Pulswellenlaufzeit		2,88	1, 39	0,10
LFn		3,74	1, 39	0,06
HFn		2,49	1, 39	0,12

Anhang E:

E1: Vergleich der Akkommodationsdaten unter Berücksichtigung der Kovariaten „Blickrichtung“ (ANOVA mit den Faktoren „Aufgabe“ (Lesen vs. Addieren) und „Reihenfolge“ (Lesen-Addieren vs. Addieren-Lesen).

Variate	T²	F	df	p
Kovariate Akkommodation		< 1	1, 38	0,41
Gruppenmittelwert Akkommodation		928,96	1, 38	0,25
Kovariate Akkommodation		7,12	1, 38	0,01
Aufgabe (A) Akkommodation		1,52	1, 38	0,23
Kovariate Akkommodation		< 1	1, 38	0,54
Reihenfolge (R) Akkommodation		< 1	1, 38	0,55
Kovariate Akkommodation		10,13	1, 38	< 0,01
A x R Akkommodation		< 1	1, 38	0,86

Anhang F:

E2: Vergleich der Akkommodationsdaten für die Geräte PowerRefractor und PowerRef II (MANOVA mit Akkommodation, Pupillendurchmesser und horizontaler Blickrichtung und den Faktoren „Aufgabe“ (Lesen vs. Addieren) und „Reihenfolge“ (Lesen-Addieren vs. Addieren-Lesen); Gruppierungsfaktor ist „Gerät“).

Variate	T ²	F	df	p
Gruppenmittelwert	11048,60	2544,09	4, 35	< 0,01
Akkommodation		1156,48	1, 38	< 0,01
Pupillendurchmesser		1110,28	1, 38	< 0,01
Blickrichtung		21,29	1, 38	< 0,01
Gerät (G)	1,47	< 1	4, 35	0,85
Akkommodation		< 1	1, 38	0,92
Pupillendurchmesser		< 1	1, 38	0,32
Blickrichtung		1,09	1, 38	0,30
Aufgabe (A)	88,80	20,45	4, 35	< 0,01
Akkommodation		3,87	1, 38	0,06
Pupillendurchmesser		37,93	1, 38	< 0,01
Blickrichtung		13,56	1, 38	< 0,01
A x G	2,94	< 1	4, 35	0,61
Akkommodation		1,62	1, 38	0,21
Pupillendurchmesser		< 1	1, 38	0,92
Blickrichtung		< 1	1, 38	0,52
Reihenfolge (R)	34,93	8,04	4, 35	< 0,01
Akkommodation		4,66	1, 38	0,03
Pupillendurchmesser		9,15	1, 38	< 0,01
Blickrichtung		< 1	1, 38	0,56
R x G	4,18	< 1	4, 35	0,44
Akkommodation		< 1	1, 38	0,41
Pupillendurchmesser		1,63	1, 38	0,21
Blickrichtung		< 1	1, 38	0,34
A x R	12,08	2,78	4, 35	0,04
Akkommodation		< 1	1, 38	0,87
Pupillendurchmesser		1,49	1, 38	0,23
Blickrichtung		< 1	1, 38	0,78
AR x G	14,36	3,31	4, 35	0,02
Akkommodation		2,43	1, 38	0,13
Pupillendurchmesser		11,24	1, 38	0,01
Blickrichtung		< 1	1, 38	0,95

Anhang G:

E2: MANOVA mit den Faktoren „Aufgabe“ und „Reihenfolge“ für die Variaten Pupillendurchmesser, Blickrichtung, Anzahl der richtigen Antworten, Herzperiode, Pulswellenlaufzeit und LF- und HF-Komponenten (normiert).

Variate	T ²	F	df	p
Gruppenmittelwert	156848,00	16086,98	7, 33	< 0,01
Pupillendurchmesser		1110,47	1, 39	< 0,01
Blickrichtung		21,24	1, 39	< 0,01
%-korrekte Antworten		7021,89	1, 39	< 0,01
Herzperiode		1389,96	1, 39	< 0,01
Pulswellenlaufzeit		4710,68	1, 39	< 0,01
LFn		1507,03	1, 39	< 0,01
HFn		2706,47	1, 39	< 0,01
Aufgabe (A)	128,23	13,15	7, 33	< 0,01
Pupillendurchmesser		38,92	1, 39	< 0,01
Blickrichtung		13,76	1, 39	< 0,01
%-korrekte Antworten		50,72	1, 39	< 0,01
Herzperiode		6,51	1, 39	0,01
Pulswellenlaufzeit		42,58	1, 39	< 0,01
LFn		4,06	1, 39	0,05
HFn		4,21	1, 39	0,05
Reihenfolge (R)	48,09	4,93	7, 33	< 0,01
Pupillendurchmesser		9,01	1, 39	< 0,01
Blickrichtung		< 1	1, 39	0,56
%-korrekte Antworten		7,16	1, 39	< 0,01
Herzperiode		< 1	1, 39	0,72
Pulswellenlaufzeit		1,00	1, 39	0,32
LFn		1,53	1, 39	0,22
HFn		2,13	1, 39	0,15
A x R	19,62	2,01	7, 33	0,08
Pupillendurchmesser		1,18	1, 39	0,28
Blickrichtung		< 1	1, 39	0,78
%-korrekte Antworten		9,42	1, 39	< 0,01
Herzperiode		< 1	1, 39	0,86
Pulswellenlaufzeit		< 1	1, 39	0,84
LFn		2,18	1, 39	0,15
HFn		2,91	1, 39	0,10

Anhang H:

E2: Vergleich der Akkommodationsdaten unter Berücksichtigung der Kovariaten „Blickrichtung“ (ANOVA mit den Faktoren „Aufgabe“ (Lesen vs. Addieren) und „Reihenfolge“ (Lesen-Addieren vs. Addieren-Lesen).

Variate	T²	F	df	p
Kovariate Akkommodation		1,31	1, 38	0,26
Gruppenmittelwert Akkommodation		812,63	1, 38	< 0,01
Kovariate Akkommodation		< 1	1, 38	0,62
Aufgabe (A) Akkommodation		3,67	1, 38	0,06
Kovariate Akkommodation		< 1	1, 38	0,56
Reihenfolge (R) Akkommodation		4,35	1, 38	0,04
Kovariate Akkommodation		< 1	1, 38	0,81
A x R Akkommodation		< 1	1, 38	0,88

Anhang I - 1:

E3: MANOVA mit den Faktoren „Phase“ (Lesen vs. Rechnen) und „Aufgabe“ (Addieren vs. Multiplizieren) für die Variaten: Anzahl der korrekten Antworten, Reaktionszeit, Pupillendurchmesser und Pulswellenlaufzeit.

Variate	T ²	F	df	p
Gruppenmittelwert	9891,12	2082,34	4, 16	< 0,01
%-korrekte Antworten		2183,83	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit		490,79	1, 19	< 0,01
Pupillendurchmesser		539,64	1, 19	< 0,01
Pulswellenlaufzeit		2149,79	1, 19	< 0,01
Aufgabe (A)	140,12	29,50	4, 16	< 0,01
%-korrekte Antworten		9,41	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit		38,32	1, 19	< 0,01
Pupillendurchmesser		14,36	1, 19	< 0,01
Pulswellenlaufzeit		11,64	1, 19	< 0,01
Phase (P)	38,32	8,07	4, 16	< 0,01
%-korrekte Antworten		28,83	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit		0,68	1, 19	0,42
Pupillendurchmesser		19,22	1, 19	< 0,01
Pulswellenlaufzeit		3,37	1, 19	0,08
A x P	67,56	14,22	4, 16	< 0,01
%-korrekte Antworten		33,78	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit		13,00	1, 19	< 0,01
Pupillendurchmesser		6,99	1, 19	0,01
Pulswellenlaufzeit		4,82	1, 19	0,04

Anhang I - 2: E3: „simple effect“-MANOVA Analysen (vgl. Anhang I - 1).

a. Konstant gehaltener Faktor: Phase (Lesen vs. Rechnen)

Variate	T ²	F	df	p
Gruppenmittelwert für Lesen	6934,42	1459,88	4, 16	< 0,01
%-korrekte Antworten		1452,62	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit		209,55	1, 19	< 0,01
Pupillendurchmesser		459,08	1, 19	< 0,01
Pulswellenlaufzeit		2319,15	1, 19	< 0,01
Aufgabe (A) für Lesen	3,50	< 1	4, 16	0,58
%-korrekte Antworten		< 1	1, 19	0,42
Reaktionszeit		1,15	1, 19	0,29
Pupillendurchmesser		< 1	1, 19	0,44
Pulswellenlaufzeit		1,16	1, 19	0,29

(Fortsetzung: Anhang I - 2: E3: „simple effect“-MANOVA Analysen (vgl. Anhang I - 1).)

b. Konstant gehaltener Faktor: Phase (Lesen vs. Rechnen)

Variate	T ²	F	df	p
Gruppenmittelwert für Rechnen	10985,80	2312,80	4, 16	< 0,01
%-korrekte Antworten		1567,70	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit		804,68	1, 19	< 0,01
Pupillendurchmesser		564,15	1, 19	< 0,01
Pulswellenlaufzeit		1952,55	1, 19	< 0,01
Aufgabe (A) für Rechnen	144,713	30,47	4, 16	< 0,01
%-korrekte Antworten		53,79	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit		26,69	1, 19	< 0,01
Pupillendurchmesser		14,08	1, 19	< 0,01
Pulswellenlaufzeit		13,74	1, 19	< 0,01

c. Konstant gehaltener Faktor: Aufgabe (Addieren vs. Multiplizieren)

Variate	T ²	F	df	p
Gruppenmittelwert für Addieren	5166,59	1087,70	4, 16	< 0,01
%-korrekte Antworten		8,22,31	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit		362,17	1, 19	< 0,01
Pupillendurchmesser		455,22	1, 19	< 0,01
Pulswellenlaufzeit		2038,78	1, 19	< 0,01
Phase (P) für Addieren	7,38	1,55	4, 16	0,23
%-korrekte Antworten		< 1	1, 19	0,72
Reaktionszeit		3,79	1, 19	0,07
Pupillendurchmesser		1,84	1, 19	0,19
Pulswellenlaufzeit		< 1	1, 19	0,69

d. Konstant gehaltener Faktor: Aufgabe (Addieren vs. Multiplizieren)

Variate	T ²	F	df	p
Gruppenmittelwert für Multiplizieren	8442,83	1777,44	4, 16	< 0,01
%-korrekte Antworten		2494,18	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit		478,06	1, 19	< 0,01
Pupillendurchmesser		580,24	1, 19	< 0,01
Pulswellenlaufzeit		2216,76	1, 19	< 0,01
Phase (P) für Multiplizieren	78,92	16,61	4, 16	< 0,01
%-korrekte Antworten		56,84	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit		7,45	1, 19	0,01
Pupillendurchmesser		19,91	1, 19	< 0,01
Pulswellenlaufzeit		4,30	1, 19	0,05

Anhang J - 1:

E3: Vergleich der Akkommodationsdaten unter Berücksichtigung der Kovariaten „Blickrichtung“ für alle bearbeiteten Aufgaben (ANOVA mit den Faktoren „Phase“ (Lesen vs. Rechnen) und „Aufgabe“ (Addieren vs. Multiplizieren).

Variate	T²	F	df	p
Kovariate Akkommodation		1,43	1, 18	0,24
Gruppenmittelwert Akkommodation		2009,32	1, 18	< 0,01
Kovariate Akkommodation		< 1	1, 18	0,93
Aufgabe (A) Akkommodation		3,54	1, 18	0,08
Kovariate Akkommodation		1,44	1, 18	0,25
Phase (P) Akkommodation		1,77	1, 18	0,20
Kovariate Akkommodation		4,94	1, 132	0,03
Zeitintervall (Z) Akkommodation		3,44	7, 132	< 0,01
Kovariate Akkommodation		1,05	1, 18	0,32
A x P Akkommodation		6,72	1, 18	0,02
Kovariate Akkommodation		< 1	1, 132	0,80
A x Z Akkommodation		< 1	7, 132	0,99
Kovariate Akkommodation		7,74	1, 132	< 0,01
P x Z Akkommodation		< 1	7, 132	0,93
Kovariate Akkommodation		< 1	1, 132	0,47
A x P x Z Akkommodation		1,24	7, 132	0,29

Anhang J - 2:

E3: „simple effect“-MANOVA Analysen (vgl. Anhang J - 1).

a. Konstant gehaltener Faktor: Phase (Lesen vs. Rechnen)

Variate	T ²	F	df	p
Kovariate				
Akkommodation		2,54	1, 18	0,13
Gruppenmittelwert für Lesen				
Akkommodation		2285,18	1, 18	< 0,01
Kovariate				
Akkommodation		2,49	1, 18	0,13
Aufgabe (A) für Lesen				
Akkommodation		< 1	1, 18	0,56
Kovariate				
Akkommodation		6,36	1, 132	0,01
Zeitintervall (Z) für Lesen				
Akkommodation		1,32	7, 132	0,25
Kovariate				
Akkommodation		< 1	1, 132	0,56
A x Z für Lesen				
Akkommodation		< 1	7, 132	0,73

b. Konstant gehaltener Faktor: Phase (Lesen vs. Rechnen)

Variate	T ²	F	df	p
Kovariate				
Akkommodation		< 1	1, 18	0,44
Gruppenmittelwert für Rechnen				
Akkommodation		1498,36	1, 18	< 0,01
Kovariate				
Akkommodation		6,37	1, 18	0,02
Aufgabe (A) für Rechnen				
Akkommodation		8,63	1, 18	< 0,01
Kovariate				
Akkommodation		6,67	1, 132	0,01
Zeitintervall (Z) für Rechnen				
Akkommodation		2,44	7, 132	0,02
Kovariate				
Akkommodation		< 1	1, 132	0,92
A x Z für Rechnen				
Akkommodation		< 1	7, 132	0,47

(Fortsetzung: Anhang J - 2: E3: „simple effect“-MANOVA Analysen (vgl. Anhang J - 1).)

c. Konstant gehaltener Faktor: Aufgabe (Addieren vs. Multiplizieren)

Variate	T ²	F	df	p
Kovariate				
Akkommodation		2,77	1, 18	0,11
Gruppenmittelwert für Addieren				
Akkommodation		1741,94	1, 18	< 0,01
Kovariate				
Akkommodation		< 1	1, 18	0,89
Phase (P) für Addieren				
Akkommodation		< 1	1, 18	0,87
Kovariate				
Akkommodation		< 1	1, 132	0,60
Zeitintervall (Z) für Addieren				
Akkommodation		1,75	7, 132	0,10
Kovariate				
Akkommodation		< 1	1, 132	0,75
P x Z für Addieren				
Akkommodation		< 1	7, 132	0,50

d. Konstant gehaltener Faktor: Aufgabe (Addieren vs. Multiplizieren)

Variate	T ²	F	df	p
Kovariate				
Akkommodation		< 1	1, 18	0,54
Gruppenmittelwert für Multiplizieren				
Akkommodation		1765,24	1, 18	< 0,01
Kovariate				
Akkommodation		< 1	1, 18	0,75
Phase (P) für Multiplizieren				
Akkommodation		5,94	1, 18	0,02
Kovariate				
Akkommodation		4,33	1, 132	0,04
Zeitintervall (Z) für Multiplizieren				
Akkommodation		2,89	7, 132	< 0,01
Kovariate				
Akkommodation		9,12	1, 132	< 0,01
P x Z für Multiplizieren				
Akkommodation		< 1	7, 132	0,67

Anhang K:

E3: Vergleich der Akkommodationsdaten unter Berücksichtigung der Kovariaten „Blickrichtung“ für die richtig bearbeiteten Aufgaben (ANOVA mit den Faktoren „Phase“ (Lesen vs. Rechnen) und „Aufgabe“ (Addieren vs. Multiplizieren)).

Variate	T²	F	df	p
Kovariate Akkommodation		1,43	1, 14	0,25
Gruppenmittelwert Akkommodation		1677,32	1, 14	< 0,01
Kovariate Akkommodation		< 1	1, 14	0,88
Aufgabe (A) Akkommodation		1,61	1, 14	0,23
Kovariate Akkommodation		< 1	1, 14	0,83
Phase (P) Akkommodation		< 1	1, 14	0,51
Kovariate Akkommodation		< 1	1, 104	0,56
Zeitintervall (Z) Akkommodation		2,64	7, 104	0,02
Kovariate Akkommodation		< 1	1, 14	0,37
A x P Akkommodation		2,64	1, 14	0,13
Kovariate Akkommodation		10,01	1, 104	< 0,01
A x Z Akkommodation		< 1	7, 104	0,83
Kovariate Akkommodation		2,59	1, 104	0,11
P x Z Akkommodation		1,04	7, 104	0,41
Kovariate Akkommodation		< 1	1, 104	0,65
A x P x Z Akkommodation		1,09	7, 104	0,37

Anhang L:

E4: MANOVA mit den Faktoren „Aufgabe“ (Fixieren vs. Fixieren / Merken) und „Reihenfolge“ (Fixieren - Fixieren / Merken vs. Fixieren / Merken - Fixieren) für die Variaten Pupillendurchmesser, Pulswellenlaufzeit und Blickrichtung.

Variate	T²	F	df	p
Gruppenmittelwert	3640,50	1040,14	3, 12	< 0,01
Pupillendurchmesser		489,73	1, 14	< 0,01
Pulswellenlaufzeit		2452,92	1, 14	< 0,01
Blickrichtung		9,33	1, 14	< 0,01
Aufgabe (A)	20,33	5,81	3, 12	0,01
Pupillendurchmesser		16,93	1, 14	< 0,01
Pulswellenlaufzeit		3,57	1, 14	0,08
Blickrichtung		< 1	1, 14	0,45
Reihenfolge (R)	2,28	< 1	3, 12	0,59
Pupillendurchmesser		< 1	1, 14	0,90
Pulswellenlaufzeit		2,07	1, 14	0,17
Blickrichtung		< 1	1, 14	0,82
A x R	19,51	5,57	3, 12	0,01
Pupillendurchmesser		< 1	1, 14	0,50
Pulswellenlaufzeit		< 1	1, 14	0,49
Blickrichtung		6,77	1, 14	0,02

Anhang M:

E4: Vergleich der Akkommodationsdaten unter Berücksichtigung der Kovariaten „Blickrichtung“ (ANOVA mit den Faktoren „Aufgabe“ (Fixieren vs. Fixieren / Merken) und „Reihenfolge“ (Fixieren - Fixieren / Merken vs. Fixieren / Merken - Fixieren)).

Variate	T ²	F	df	p
Kovariate Akkommodation		< 1	1, 13	0,45
Gruppenmittelwert Akkommodation		597,77	1, 13	< 0,01
Kovariate Akkommodation		< 1	1, 13	0,84
Aufgabe (A) Akkommodation		< 1	1, 13	0,44
Kovariate Akkommodation		< 1	1, 13	0,73
Reihenfolge (R) Akkommodation		< 1	1, 13	0,35
Kovariate Akkommodation		2,39	1, 13	0,15
A x R Akkommodation		< 1	1, 13	0,48

Anhang N - 1:

E5: MANOVA mit den Faktoren „Phase“ (Vergleichsphase vs. Bedingungsphase), „Aufgabe“ (n-1 vs. n-2) und „Tempo“ (600 ms vs. 350 ms vs. 100 ms).

Variate	T ²	ε	F	df	p
Gruppenmittelwert	30231,50		4,773,39	5, 15	< 0,01
%-korrekte Antworten			8929,43	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit			948,41	1, 19	< 0,01
Pupillendurchmesser			460,41	1, 19	< 0,01
Pulswellenlaufzeit			1477,67	1, 19	< 0,01
Akkommodation			4841,09	1, 19	< 0,01
Phase (P)	200,19		31,61	5, 15	< 0,01
%-korrekte Antworten			16,88	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit			168,83	1, 19	< 0,01
Pupillendurchmesser			1,74	1, 19	0,20
Pulswellenlaufzeit			< 1	1, 19	0,55
Akkommodation			2,31	1, 19	0,14
Aufgabe (A)	134,32		21,21	5, 15	< 0,01
%-korrekte Antworten			21,99	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit			95,86	1, 19	< 0,01
Pupillendurchmesser			36,89	1, 19	< 0,01
Pulswellenlaufzeit			< 1	1, 19	0,98
Akkommodation			< 1	1, 19	0,67
Tempo (T)	78,12		4,11	10, 10	0,02
%-korrekte Antworten		0,89	3,18	2, 18	0,04
Reaktionszeit		0,99	5,11	2, 18	0,01
Pupillendurchmesser		0,89	< 1	2, 18	0,54
Pulswellenlaufzeit		0,96	1,20	2, 18	0,29
Akkommodation		0,87	1,52	2, 18	0,27
P x A	162,09		25,59	5, 15	< 0,01
%-korrekte Antworten			20,34	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit			124,82	1, 19	< 0,01
Pupillendurchmesser			10,55	1, 19	< 0,01
Pulswellenlaufzeit			2,38	1, 19	0,13
Akkommodation			< 1	1, 19	0,93
P x Z	52,90		2,78	10, 10	0,06
%-korrekte Antworten		0,93	< 1	2, 18	0,97
Reaktionszeit		0,72	9,93	2, 18	< 0,01
Pupillendurchmesser		0,93	1,82	2, 18	0,17
Pulswellenlaufzeit		0,88	3,42	2, 18	0,11
Akkommodation		0,95	2,01	2, 18	0,13
A x Z	26,42		1,39	10, 10	0,63
%-korrekte Antworten		0,97	2,58	2, 18	0,10
Reaktionszeit		0,95	< 1	2, 18	0,48
Pupillendurchmesser		0,88	2,88	2, 18	0,05
Pulswellenlaufzeit		0,86	1,13	2, 18	0,24
Akkommodation		0,92	1,44	2, 18	0,34
P x A x T	35,48		1,87	10, 10	0,71
%-korrekte Antworten		0,61	1,45	2, 18	0,11
Reaktionszeit		0,85	< 1	2, 18	0,97
Pupillendurchmesser		0,84	< 1	2, 18	0,63
Pulswellenlaufzeit		0,95	1,33	2, 18	0,29
Akkommodation		0,85	1,62	2, 18	0,22

Anhang N - 2:

E5: „simple effect“-MANOVA Analysen für die Interaktion Phase x Aufgabe (vgl. Anhang N- 1).

a. Konstant gehaltener Faktor: Phase (Vergleichsphase vs. Bedingungsphase)

Variate	T ²	ε	F	df	p
Gruppenmittelwert für Vergleichsphase	25287,50		3992,76	5, 15	< 0,01
%-korrekte Antworten			8888,96	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit			882,72	1, 19	< 0,01
Pupillendurchmesser			476,26	1, 19	< 0,01
Pulswellenlaufzeit			1509,13	1, 19	< 0,01
Akkommodation			4116,68	1, 19	< 0,01
Aufgabe (A) für Vergleichsphase	6,99		1,10	5, 15	0,39
%-korrekte Antworten			1,03	1, 19	0,32
Reaktionszeit			< 1	1, 19	0,66
Pupillendurchmesser			3,43	1, 19	0,08
Pulswellenlaufzeit			< 1	1, 19	0,98
Akkommodation			< 1	1, 19	0,67
Tempo (T) für Vergleichsphase	25,95		1,37	10, 10	0,32
%-korrekte Antworten		0,77	1,91	2, 18	0,08
Reaktionszeit		0,77	< 1	2, 18	0,48
Pupillendurchmesser		0,96	1,28	2, 18	0,24
Pulswellenlaufzeit		0,98	< 1	2, 18	0,56
Akkommodation		0,85	< 1	2, 18	0,66
A x Z für Vergleichsphase	36,47		1,92	10, 10	0,48
%-korrekte Antworten		0,57	< 1	2, 18	0,78
Reaktionszeit		0,65	2,45	2, 18	0,41
Pupillendurchmesser		0,79	< 1	2, 18	0,34
Pulswellenlaufzeit		0,85	1,13	2, 18	0,24
Akkommodation		0,93	< 1	2, 18	0,52

(Fortsetzung: Anhang N - 2: E5: „simple effect“-MANOVA Analysen für die Interaktion Phase x Aufgabe (vgl. Anhang N - 1).)

b. Konstant gehaltener Faktor: Phase (Vergleichsphase vs. Bedingungsphase)

Variate	T ²	ε	F	df	p
Gruppenmittelwert für Bedingungsphase	22084,10		3486,96	5, 15	< 0,01
%-korrekte Antworten			5866,50	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit			831,13	1, 19	< 0,01
Pupillendurchmesser			374,55	1, 19	< 0,01
Pulswellenlaufzeit			1437,74	1, 19	< 0,01
Akkommodation			5417,40	1, 19	< 0,01
Aufgabe (A) für Bedingungsphase	184,76		29,17	5, 15	< 0,01
%-korrekte Antworten			41,18	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit			128,84	1, 19	< 0,01
Pupillendurchmesser			50,38	1, 19	< 0,01
Pulswellenlaufzeit			< 1	1, 19	0,72
Akkommodation			< 1	1, 19	0,73
Tempo (T) für Bedingungsphase	120,83		6,36	10, 10	0,02
%-korrekte Antworten		0,74	3,04	2, 18	0,09
Reaktionszeit		0,90	6,44	2, 18	< 0,01
Pupillendurchmesser		0,83	< 1	2, 18	0,59
Pulswellenlaufzeit		0,92	2,13	2, 18	0,13
Akkommodation		0,93	2,50	2, 18	0,09
A x Z für Bedingungsphase	47,34		2,49	10, 10	0,23
%-korrekte Antworten		0,81	3,40	2, 18	0,02
Reaktionszeit		0,98	< 1	2, 18	0,74
Pupillendurchmesser		0,72	11,15	2, 18	0,01
Pulswellenlaufzeit		0,93	2,20	2, 18	0,11
Akkommodation		0,91	2,49	2, 18	0,17

(Fortsetzung: Anhang N - 2: E5: „simple effect“-MANOVA Analysen für die Interaktion Phase x Aufgabe (vgl. Anhang N - 1).)

c. Konstant gehaltener Faktor: Aufgabe (n-1 vs. n-2)

Variate	T ²	ε	F	df	p
Gruppenmittelwert für n-1	22430,90		3541,73	5, 15	< 0,01
%-korrekte Antworten			8596,16	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit			992,19	1, 19	< 0,01
Pupillendurchmesser			473,82	1, 19	< 0,01
Pulswellenlaufzeit			1624,99	1, 19	< 0,01
Akkommodation			4557,57	1, 19	< 0,01
Phase (P) für n-1	67,56		10,67	5, 15	< 0,01
%-korrekte Antworten			1,84	1, 19	0,19
Reaktionszeit			8,47	1, 19	< 0,01
Pupillendurchmesser			< 1	1, 19	0,97
Pulswellenlaufzeit			< 1	1, 19	0,89
Akkommodation			1,96	1, 19	0,18
Tempo (T) für n-1	89,25		4,70	10, 10	0,01
%-korrekte Antworten		0,69	< 1	2, 18	0,45
Reaktionszeit		0,84	15,86	2, 18	< 0,01
Pupillendurchmesser		0,97	1,94	2, 18	0,17
Pulswellenlaufzeit		0,89	2,37	2, 18	0,09
Akkommodation		0,79	4,14	2, 18	0,14
P x Z für n-1	146,81		7,73	10, 10	< 0,01
%-korrekte Antworten		0,81	4,31	2, 18	0,16
Reaktionszeit		0,98	20,60	2, 18	< 0,01
Pupillendurchmesser		0,72	1,79	2, 18	0,18
Pulswellenlaufzeit		0,93	3,51	2, 18	0,03
Akkommodation		0,91	3,05	2, 18	0,05

(Fortsetzung: Anhang N - 2: E5: „simple effect“-MANOVA Analysen für die Interaktion Phase x Aufgabe (vgl. Anhang N).)

d. Konstant gehaltener Faktor: Aufgabe (n-1 vs. n-2)

Variate	T ²	ε	F	df	p
Gruppenmittelwert für n-2	29857,80		4714,38	5, 15	< 0,01
%-korrekte Antworten			6063,74	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit			748,86	1, 19	< 0,01
Pupillendurchmesser			437,73	1, 19	< 0,01
Pulswellenlaufzeit			1324,32	1, 19	< 0,01
Akkommodation			4710,81	1, 19	< 0,01
Phase (P) für n-2	190,18		30,03	5, 15	< 0,01
%-korrekte Antworten			34,47	1, 19	< 0,01
Reaktionszeit			168,50	1, 19	< 0,01
Pupillendurchmesser			6,79	1, 19	0,01
Pulswellenlaufzeit			1,43	1, 19	0,25
Akkommodation			1,24	1, 19	0,28
Tempo (T) für n-2	44,86		2,36	10, 10	0,10
%-korrekte Antworten		0,82	4,20	2, 18	0,02
Reaktionszeit		0,98	1,02	2, 18	0,31
Pupillendurchmesser		0,97	1,87	2, 18	0,14
Pulswellenlaufzeit		0,97	< 1	2, 18	0,72
Akkommodation		0,82	< 1	2, 18	0,78
P x Z für n-2	44,26		2,33	10, 10	0,10
%-korrekte Antworten		0,75	1,38	2, 18	0,20
Reaktionszeit		0,89	2,50	2, 18	0,04
Pupillendurchmesser		0,83	< 1	2, 18	0,70
Pulswellenlaufzeit		0,76	< 1	2, 18	0,77
Akkommodation		0,93	< 1	2, 18	0,82

Anhang O - 1:

E5: Vergleich der Herzperiodendauer (ANOVA mit den Faktoren „Phase“ (Vergleichsphase vs. Bedingungsphase), „Aufgabe“ (n-1 vs. n-2) und „Tempo“ (600 ms vs. 350 ms vs. 100 ms).

Variate	T ²	ε	F	df	p
Gruppenmittelwert Herzperiode			966,15	1, 19	< 0,01
Phase (P) Herzperiode			5,17	1, 19	0,03
Aufgabe (A) Herzperiode			3,41	1, 19	0,08
Tempo (T) Herzperiode		0,92	< 1	2, 18	0,85
P x A Herzperiode			18,25	1, 19	< 0,01
P x Z Herzperiode		0,99	< 1	2, 18	0,99
A x Z Herzperiode		0,98	< 1	2, 18	0,85
P x A x T Herzperiode		0,92	< 1	2, 18	0,85

Anhang O - 2:

E5: „simple effect“-ANOVA für die Interaktion Phase x Aufgabe (Vgl. Anhang O - 1).

a. Konstant gehaltener Faktor: Phase (Vergleichsphase vs. Bedingungsphase)

Variate	T ²	ε	F	df	p
Gruppenmittelwert für Vergleichsphase Herzperiode			926,90	1, 19	< 0,01
Aufgabe (A) für Vergleichsphase Herzperiode			< 1	1, 19	0,85
Tempo (T) für Vergleichsphase Herzperiode		0,95	< 1	2, 18	0,86
A x Z für Vergleichsphase Herzperiode		0,85	< 1	2, 18	0,67

b. Konstant gehaltener Faktor: Phase (Vergleichsphase vs. Bedingungsphase)

Variate	T ²	ε	F	df	p
Gruppenmittelwert für Bedingungsphase Herzperiode			1001,44	1, 19	< 0,01
Aufgabe (A) für Bedingungsphase Herzperiode			10,73	1, 19	< 0,01
Tempo (T) für Bedingungsphase Herzperiode		0,95	< 1	2, 18	0,89
A x Z für Bedingungsphase Herzperiode		0,94	< 1	2, 18	0,94

(Fortsetzung: Anhang O - 2: E5: „simple effect“-ANOVA für die Interaktion Phase x Aufgabe (Vgl. Anhang O - 1).)

c. Konstant gehaltener Faktor: Aufgabe (n-1 vs. n-2)

Variate	T ²	ε	F	df	p
Gruppenmittelwert für n-1 Herzperiode			998,25	1, 19	< 0,01
Phase (P) für n-1 Herzperiode			< 1	1, 19	0,34
Tempo (T) für n-1 Herzperiode		0,97	< 1	2, 18	0,73
P x Z für n-1 Herzperiode		0,71	< 1	2, 18	0,88

d. Konstant gehaltener Faktor: Aufgabe (n-1 vs. n-2)

Variate	T ²	ε	F	df	p
Gruppenmittelwert für n-2 Herzperiode			905,52	1, 19	< 0,01
Phase (P) für n-2 Herzperiode			15,74	1, 19	< 0,01
Tempo (T) für n-2 Herzperiode		0,89	< 1	2, 18	0,99
P x Z für n-2 Herzperiode		0,88	< 1	2, 18	0,92

Lebenslauf

PERSÖNLICHE INFORMATION

Familienstand: ledig
Staatsangehörigkeit: deutsch
Geburtsdatum: 01.02.1975
Geburtsort: Salzgitter / Niedersachsen

Eltern: Ursula Jainta, geb. Buchta
Hausfrau
Wolfgang Jainta
Beamter

Geschwister: Tobias Jainta

AUSBILDUNG

Schulische Ausbildung

1981 - 1985 Grund- und Hauptschule Am Bodenbacher Ring,
Salzgitter/ Niedersachsen

1985 - 1987 Orientierungsstufe Am Sonnenberg, Salzgitter/ Niedersachsen

1987 - 1994 Kranich-Gymnasium, Salzgitter/ Niedersachsen

Abschluß

Juni 1994 Allgemeine Hochschulreife

Studium

1995 - 2002 Westfälische Wilhelms-Universität zu Münster,
Fachbereich Psychologie & Sportwissenschaft

Abschluß

Mai 2002 Diplom-Psychologin

TÄTIGKEITEN NEBEN DEM STUDIUM

2000 - 2002 Studentische Hilfskraft am Institut für Arbeitsphysiologie an der
Universität Dortmund, Projekt 6 „Visuelle Beanspruchung,
Wahrnehmung und Handlung“

LEBENS LAUF

ARBEITSTÄTIGKEIT

06. -12.2002 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund, Projekt 6 „Individuelle Sehleistungen“
- 2001 - 2002 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund, DFG-Projekt „Individuelle Reaktionen des autonomen Nervensystems (Akkommodation, Pupillengröße, Herzrate) auf visuelle und mentale Belastungen bei Computertätigkeiten“ im Projekt 6 „Individuelle Sehleistungen“
- ab 01.2003 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund, DFG-Projekt „Fixationsdisparität“ im Projekt 6 „Individuelle Sehleistungen“

PRAKTIKA

Praktika während des Studiums

07. - 10.2000 Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund, Projekt 6 „Visuelle Beanspruchung, Wahrnehmung und Handlung“
05. - 06.2001 RAG Aktiengesellschaft, Fachbereich Arbeits-, Betriebs- und Organisationspsychologie

FREIWILLIGES SOZIALES JAHR

- 1994 - 1995 Kinder- und Jugenddorf St. Ansgar, Hildesheim/ Niedersachsen

PUBLIKATIONEN

- Jainta S. & Jaschinski W. (2002). Fixation Disparity: Binocular Vergence Accuracy for a Visual Display at Different Positions Relative to the Eyes. *Human Factors*, 44, 443-450.
- Jainta S., Jaschinski W. & Baccino T. (2004). No evidence for prolonged latency of saccadic eye movements due to intermittent light of a CRT computer screen. *Ergonomics*, 47, 105-114.
- Jainta S., Jaschinski W. & Hoormann J. (2004). Measurement of refractive error and accommodation with the photorefractor PowerRef II. *Ophthal. Physiol. Opt.*, 24, 520-527.
- Jaschinski W., Kloke WB., Jainta S. & Buchholz J. (2005). Horizontal fixation disparity lines. *Optom. Vis. Sci.*, 82, 988-999.
- Jaschinski W., Jainta, S. & Schürer, M. (im Druck). Capture of visual direction in dynamic vergence is reduced with flashed monocular lines. *Vision Research*.