

5. Pupillometrie

5.1 Biopsychologische Grundlagen der Pupillometrie

Das menschliche Nervensystem untergliedert sich in das autonome (vegetative) Nervensystem (z. B. Sinneszellen) und das Zentralnervensystem (ZNS). Das ZNS besteht aus ca. 100 Milliarden einzelnen Nervenzellen (Neuronen), die durch Synapsen miteinander verknüpft sind. Die Nervenzellen sind Bausteine unseres Nervensystems. Die Integration und Verarbeitung der elektrischen Impulse erfolgt in zentralen Strukturen, die untereinander wieder in vielfältigen Verbindungen stehen (vgl. Edelman, 2000 S.3).

Das Gehirn dient als zentrale Schaltstelle des Nervensystems. Die verschiedenen Zentren im Gehirn weisen nach Edelman (2000) folgende Funktionen auf:

- **Großhirnrinde** (Kortex): Verarbeitung komplexer sensorischer Nachrichten, kognitive Leistungen (Sprechen, Denken, Gedächtnis, Lernen usw.);
- **Limbisches System** (Teil des Kortex): Entstehung und Steuerung von Emotionen und Motivation;
- **Zwischenhirn**: Der Thalamus fungiert als Schaltstation für alle Bahnen zwischen kortikalen und subkortikalen Strukturen, während der Hypothalamus das oberste Koordinationszentrum für das autonome Nervensystem darstellt und in Zusammenarbeit mit der Hypophyse die Hormonausschüttung steuert.
- **Mittelhirn**: Aufmerksamkeits- und Wachheitsgrad, Augen- und Gesichtsbewegungen;
- **Hinterhirn**: Unterstützung und Koordinierung der motorischen Zentren;

- **Nachhirn:** Atem- und Kreislaufzentrum;
- **Rückenmark:** Koordination einfacher reflektorischer Abläufe.

Die Hauptaufgabe des Zentralnervensystems (Gehirn und Rückenmark) ist neben der Regulation der biologischen Lebensbedingungen im Körperinneren die Steuerung der Organismus-Umwelt-Interaktion. Für diese Aufgaben sind insbesondere die Großhirnrinde und das limbische System verantwortlich. Als Teil der subkortikalen Strukturen spielt das limbische System eine besondere Rolle für das Lernen und das Gedächtnis (vgl. Edelman, 2000, S. 14).

Klinische und experimentelle Befunde haben gezeigt, dass Teile des limbischen Systems (insbesondere das temporoamygdaläre System) das neuronale Substrat wichtiger und für das Lernen und die Informationsverarbeitung wesentlicher Vorgänge darstellen. „In diesem System werden vermutlich die komplexen sensorischen Informationen mit entsprechenden Informationen (Gedächtnisinhalten), die in der Vergangenheit gespeichert worden sind, verglichen. Damit bekommen die sensorischen Informationen Bedeutung für den Organismus [...] und führen zur Aktivierung solcher affektiven Verhaltensmuster, die sich in der Vergangenheit als zweckmäßig herausgebildet haben“ (Jänig, 1985, S. 151).

5.2 Aufbau des autonomen Nervensystems (ANS)

Das autonome (vegetative) Nervensystem ist neben dem endokrinen System das zweite wichtige Kommunikationssystem des menschlichen Körpers. Es dient dem Informationsaustausch der einzelnen Organe und „[...] innerviert hauptsächlich die glatte Muskulatur aller Organe und Organsysteme“ (Birbaumer & Schmidt, 1991, S. 437). Im Ge-

gensatz zum somatischen (sensorischen) Nervensystem unterliegt es weitaus weniger einer direkten willkürlichen Kontrolle. „Seine Wirkungen laufen allerdings kaum je isoliert, sondern wenn wir z. B. an die Atmung oder an die Kreislaufregulation [...] denken, gleichzeitig mit denen des sensomotorischen Nervensystems ab“ (Birbaumer & Schmidt, 1991, S. 437). Die strukturelle Entsprechung findet sich im Hypothalamus, der beiden Systemen angehört.

Der Hypothalamus steuert mit „erheblicher Selbstständigkeit und Eigeninitiative“ (Birbaumer & Schmidt, 1991, S. 166) die vegetativen Körperfunktionen. Der Hypothalamus befindet sich am Übergang zwischen Großhirn und Hirnstamm und stellt das lebenswichtige Zentrum für die Steuerung und Koordination aller vegetativen Funktionen dar. Neben der Modulation des autonomen Nervensystems (ANS) ist der Hypothalamus über Kerne und Verbindungen mit dem limbischen System verbunden und somit „[...] an der Steuerung von Lernvorgängen und Emotionen [...] sowie Aufmerksamkeitsverhalten und kognitiven Funktionen beteiligt [...]“ (Birbaumer & Schmidt, 1991, S. 251).

Das autonome Nervensystem ist nach Birbaumer und Schmidt (1991, S. 437) in drei Teilsysteme untergliedert: Sympathicus oder sympathisches Nervensystem, Parasympathicus oder parasympathisches Nervensystem und dem Darmnervensystem. Eine zweizellige Neuronenkette bildet dabei jeweils die Endstrecke der Teilsysteme des sympathischen und parasympathischen Nervensystems.

Ein Neuron (präganglionäres Neuron) liegt innerhalb des zentralen Nervensystems (Hirnstamm, Rückenmark) und das zweite Neuron (postganglionäres Neuron) bildet mit anderen eine periphere Zellhäufung. „Ein Großteil der sympathischen Ganglien ist paarweise rechts und links der Wirbelsäule angeordnet und durch Nervenstränge mit-

einander verbunden. Man nennt diese Ganglienkette linker und rechter Grenzstrang“ (Birbaumer & Schmidt, 1991, S. 237). Effektoren oder Erfolgsorgane des Sympathicus sind Brust- oder Bauchorgane, sowie Augen und Drüsen im Kopfbereich. Diese Ganglien des Sympathicus, welche mit sehr langen Axonen ausgestattet sind, innervieren die glatten Muskelfasern der Organe, so auch die Pupille.

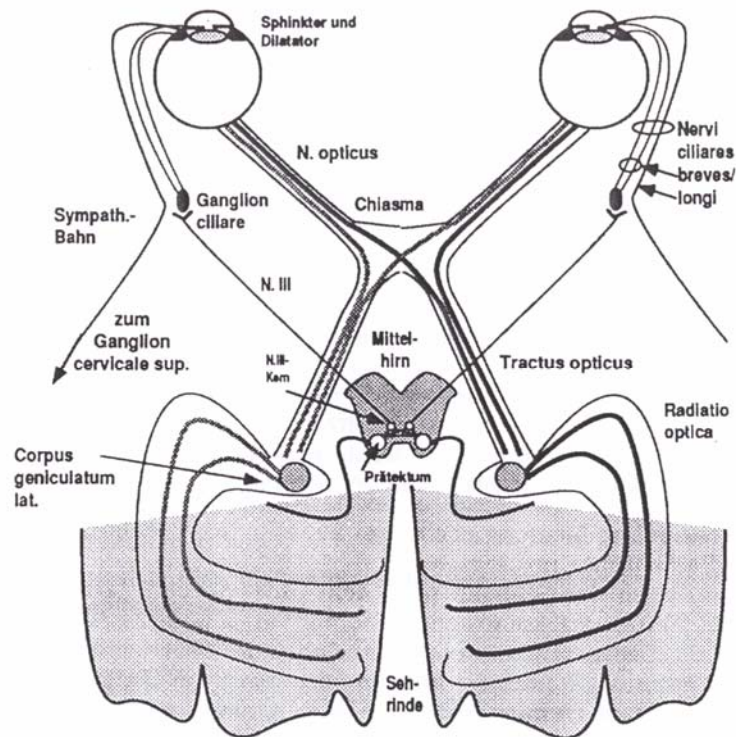


Abbildung 5: Innervation der Irismuskulatur nach Wilhelm (1991)

Als zweites Teilsystem des ANS konzentriert der Parasympathicus nach Birbaumer und Schmidt (1991) seine präganglionären Neurone im Kreuzmark und im Hirnstamm. Parasympathische präganglionäre Fasern treten über verschiedene Hirnnerven über den Hirnstamm aus und innervieren unter anderem die inneren Augenmuskeln.

5.3 Wirkung des Sympathicus und des Parasympathicus auf die Pupillenbewegung

Anders als bei einigen Erfolgsorganen des Darmnervensystems sind die inneren Augenmuskeln völlig auf die autonome Innervation angewiesen. Alle Organe, die parasymphatisch innerviert werden, unterliegen auch einer sympathischen Innervation (Schandry, 2003). „Die Pupille dient primär der reflektorischen Regulierung der Intensität des Lichtes, das ins Auge einfällt“ (Sczesny, 1994, S. 55). Fällt nun Licht auf die Retina „(...) wird über parasymphatische Neuronen der Musculus sphincter pupillae [Sphinkter] innerviert, der eine Kontraktion der Pupille bewirkt, während bei Abnahme der Helligkeit sein Antagonist, der sympathisch innervierte Musculus dilatator pupillae [Dilatator], eine Erweiterung der Pupille hervorruft“ (Becker –Carus, 1979, S. 145). „Der Sphinkter ist ein ringförmig um den Pupillensaum verlaufendes Muskelband, das durch Kontraktion eine Pupillenverengung bewirkt. Der Dilatator setzt sich aus radial zur Pupille angeordneten Muskelfasern zusammen. Folglich führt dessen Kontraktion dazu, dass sich die Pupille erweitert (Sczesny, 1994, S. 56). Nach Galley (2001) haben typische Licht-an-Antworten der Pupille eine Latenzzeit von 250ms und Licht-aus-Antworten eine Latenzzeit von 450 ms. Im Zusammenhang mit mentaler Beanspruchung reagiert die Pupille deutlich schneller mit einer Reaktionszeit von nur 100-200 ms (Manzey, 1998). Die Steuerung der Pupillenweite erfolgt in einem geschlossenen Regelsystem, dabei kann sich der Durchmesser der Pupille von 2-8 mm (vgl. Becker–Carus, 1979, S. 145) oder 1,5-8mm (vgl. Galley, 2001, S. 288; Sczesny, 1994, S. 55) bewegen. Dies hängt aber sicherlich auch mit der Größe des Organs zusammen und unterstreicht die Notwendigkeit der Kalibrierung des Auges vor einer Messung der Pupillengröße.

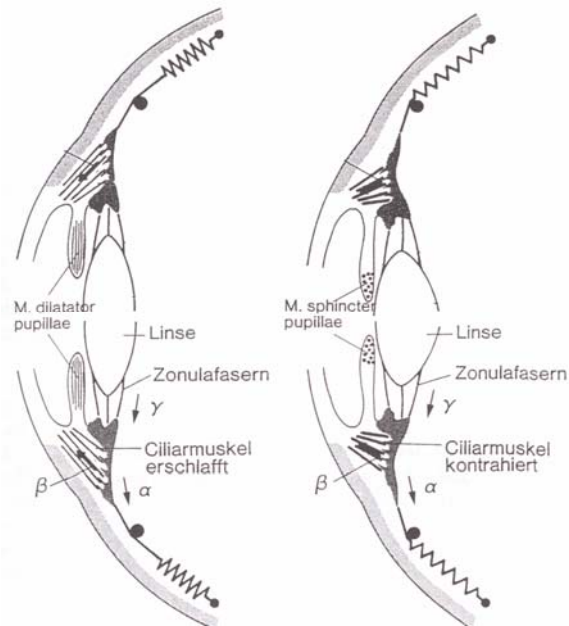


Abbildung 6: Aufbau des Auges mit der Pupillenmuskulatur nach Galley (2001)

Da die Innervation der Irismuskeln über den Hypothalamus gesteuert wird, ist von einer Beeinflussung der Pupillenweite durch psychische Ereignisse auszugehen (Beatty, 1982; Becker-Carus, 1979; Bösel, 1987; Galley, 2001; Hess, 1977 und 1972; Manzey, 1998; Schandry, 2003). Ebenso wie die Veränderung des Hautwiderstands ist die Pupillenreaktion Teil der vegetativen Bereitschaftsfunktion. „Aufgrund der vegetativen Innervation der Irismuskeln unterliegt die Pupillenweite psychischen Einflüssen, die z. B. durch mentale Beanspruchung hervorgerufen werden und sich in ihrem variierenden Durchmesser reflektieren“ (Sczesny, 1994, S. 56). Und Galley (2001, S. 288) führt aus: „Da Verengung in erster Linie durch parasympathische Aktivität, Erweiterung durch sympathische Erregung ausgelöst wird, ist die Pupillenweite und das Pupillenspiel auch ein exzellenter Indikator für den Zustand des vegetativen Nervensystems“. Zur Bedeutung sympathischer und parasympathischer Aktivität bei der Pupillenreaktion beschreibt Manzey (1998) einen Versuch, bei dem die adrenerge Kontrolle des Musculus dilatator pupillae mittels der Verabreichung von Thymoxaminhydrochlorid blockiert wurde. Daraufhin wurden unterschiedlich schwierige Aufgaben bearbeitet und die Pupillenre-

aktion sowohl bei dieser Gruppe als auch bei einer Kontrollgruppe (Placebo) registriert. Die Amplituden beider Gruppen unterschieden sich nicht. Daraus folgert Manzey, dass die Pupillenveränderung bei der Bearbeitung mental beanspruchender Aufgaben überwiegend durch eine Hemmung des vegetativen Okkulomotoriuskerns und der parasympathischen Efferenzen zum Musculus sphincter pupillae ausgelöst werden (Manzey, 1998).

Hess (1972) berichtet über Versuche, bei denen eine zustimmende emotionale Reaktion (Appetenz) mit einer Pupillenerweiterung und eine ablehnende Reaktion (Aversion) mit einer Pupillenverengung beantwortet würden: „Einfach ausgedrückt heißt das, dass die anfänglichen Ergebnisse dahingehend hinzudeuten schienen, dass beim Menschen die Pupillen größer werden, wenn er etwas sieht, das er mag, das ihn anspricht oder interessiert. Ist der Gegenstand der Betrachtung jedoch abstoßend oder negativ, werden die Pupillen kleiner“ (Hess, 1977, S. 35). So attraktiv diese bidirektionale Reaktion der Pupille auf appetente/aversive Reize auch sein mag, konnte diese These bei besserer Lichtkontrolle überwiegend keine Akzeptanz finden (vgl. Galley, 2001, S. 291). Der Experimentalaufbau von Hess (1972) hatte systematische Schwächen bei der Kontrolle der Lichtstärke sowie hinsichtlich der Stichprobengröße seiner Untersuchungen. So ist es auch folgerichtig, dass die These einer Pupillenerweiterung bei Appetenz und einer Pupillenverengung bei Aversion - als Reaktion auf einen Reiz - nicht aufrechterhalten werden konnte (Beatty, 1982; Galley, 2001; Manzey, 1998; Rößger 1997). Bei weiteren Untersuchungen wurde lediglich ein pupillenerweiternder Effekt als Reizantwort festgestellt.

Einschränkend ist jedoch zu erwähnen, dass bei einem Versuch, der im Rahmen dieser Arbeit gemacht wurde (Kapitel 3.3 Experiment 3: *Pupillenreaktion auf bildliche Reize*,

Abschnitt II) eine Pupillenverengung bei positiv bewerteten Bildvorlagen festgehalten wurde. Bösel (1987) bemerkt hierzu, dass die Pupillenweitung Folge einer unspezifischen Erregung sei, wenn die Aufmerksamkeit und Konzentration beispielsweise auf ein bestimmtes Objekt gerichtet ist, welches erfahrungsgemäß mit Entspannung verbunden ist, so führt eine Sympathicushemmung zu einer Verengung der Pupillen.

Doch beschreiben etliche Autoren (Beatty, 1982; Bradshaw, 1968; Rößger 1997) auch eine Erweiterung der Pupille durch stetige Anstrengung der Versuchspersonen. Insgesamt bleiben die sympathischen Auslöser der Pupillenerweiterung aber vieldeutig. Das Spektrum reicht „von Angst über Anstrengung bis zu Appetenz oder Aversion. [...] man hat den Eindruck, dass die Pupille als ein interessantes ‚Fenster zur Seele‘ angesehen werden muss, dessen Aussagekraft von den Psychologen noch wenig genutzt wird“ (Galley, 2001, S. 292).

5.4. Pupillenstellung und mentale Beanspruchung

Da das Auge ein sehr komplexes Organ ist, sind für seine Steuerung hoch entwickelte Regelsysteme notwendig, die sowohl im Bereich willkürlicher Steuerung - wie etwa die Augenbewegung zur Fixation bestimmter Punkte oder dem beabsichtigten Lidschluss - aber auch im Bereich unwillkürlicher Steuerung -wie beispielsweise der Größenänderung der Pupille - zu finden sind. So ist es nahe liegend, dass sich das Auge hervorragend zur Ableitung verschiedener Indikatoren mentaler Beanspruchung verwenden lässt. Es ist üblich, die Pupillentätigkeit vom Phänomen her zu erklären (Bösel, 1987), da noch nicht alle Zusammenhänge der Pupillenreaktion aus biologischer Sicht nachvollzogen werden können. So sind einige Regelkreise offensichtlich untereinander di-

rekt verschaltet, damit sich gegensätzliche Anforderungen, die aus unterschiedlichen Regelkreisen zu den Erfolgsorganen gelangen, nicht behindern können. Es ist bisher jedoch nur im Ansatz untersucht, wie die Regulation der sympathischen und der parasympathischen Innervation der Irismuskulatur unter gegensätzlichen Anforderungen funktioniert. Steinhauer, Siegle, Condray und Pless (2004) untersuchten das Zusammenspiel von Sympathicus und Parasympathicus unter verschiedenen mentalen Beanspruchungsstufen und variierten diese über unterschiedliche Beleuchtungslevel. Die Versuchspersonen wurden in vier Vergleichsgruppen unterteilt. Den Versuchspersonen der ersten Gruppe wurde Tropicamid zur Blockierung des parasympathisch innervierten Sphinktermuskels verabreicht. Die zweite Gruppe bekam Dapiprazol zur Blockierung des sympathisch innervierten Dilatormuskels, die dritte Gruppe bekam ein Placebo und die vierte Gruppe bekam keine Medikamente verabreicht. Die Autoren fanden heraus, dass die mental bedingte sympathische Pupillenreaktion (Weitung) durch den *posterior hypothalamic nuclei* gesteuert wird und auf einer direkten Stimulierung des Dilatators beruht. Die Hemmung des parasympathischen Pfades wird dabei durch den Edinger-Westphal-Komplex des okulomotorischen Nukleus (n.III) im Zwischenhirn bedingt. In der Folge ergibt sich eine Entspannung des Sphinkter und somit eine Weitung der Pupille. Dieser mentale Pupilleneffekt wird bei größerem Lichteinfall stärker, da die Hemmung der parasympathischen Lichtreaktion durch zentralnervöse Aktivität eine zusätzliche Vergrößerung der Pupille mit sich bringt. Steinhauer et al. (2004) schließen daraus, dass der Edinger-Westphal-Komplex die sympathische und parasympathische Pupillenreaktion durch eine Hemmung der parasympathischen Sphinkterinnervation bei kognitiven Anforderungen des Frontalkortex abstimmt.

Die Pupillenweite reguliert nach Bösel (1987) drei Faktoren der visuellen Informationsaufnahme:

1. Die Beleuchtungsdichte im Auge,
2. die Abbildungsschärfe (Schärfentiefe) und
3. den Abbildungscontrast auf der Netzhaut.

Neben der Beleuchtungsdichte und der Abbildungsschärfe (Schärfentiefe) reguliert die Pupille auch den Abbildungscontrast. Die Verengung der Pupille führt dabei zu einer Abschirmung der Randstrahlen und dadurch zu einer Erhöhung des Abbildungscontrast. (Tischer, 1999) Jeder Lichtstrahl trägt jedoch potenziell Information, deren Verlust bei einer engen Pupille zugunsten eines größeren Kontrastes in Kauf genommen wird (Bösel, 1987). „Die Weite der Pupille ist somit, unabhängig von der Leuchtdichte-Regulation, ein Kennzeichen für die Art der Aufmerksamkeit, die einem Objekt zugewendet wird“ (Bösel, 1987, S. 146-147). Sie ist ein Teil der vegetativen Bereitschaftsfunktion.

Außer der Reaktion auf Lichtreize sind Spontanfunktionen durch psychische Einflüsse als Biosignale zu deuten (Galley, 2001). Die Pupille verengt sich durch die Wirkung des Ringmuskels *Musculus sphincter pupillae* und sie weitet sich durch den radial wirkenden *Musculus dilatator pupillae* (Galley, 2001). Die Lichtreaktion der Pupille (die sog. Miosis) erfolgt aufgrund des sog. konsensuellen Pupillenreflexes. Obwohl die maximale Pupilleweitung bei 8 mm liegt, werden bei normalen Beleuchtungsverhältnissen meist nur 6 mm erreicht (Galley, 2001). Den größten Teil der Lichtregulation übernehmen jedoch die Rezeptoren, während die Pupille lediglich die kurzzeitig auftretenden Lichtschwankungen reguliert.

Die lichtbedingte Pupillenreaktion erfolgt mit einer Verzögerung (Latenz) von etwa 250 ms (Galley, 2001). Danach verringert sich der Pupillendurchmesser sehr schnell, bis der

Spitzenwert erreicht wird (Kontraktion). Nach dem Durchschreiten der maximalen Kontraktion nähert sich der Pupillendurchmesser in der Phase der Dilatation dem Ausgangsniveau wieder an. Mentale Reize innervieren die Pupille deutlich schneller, die Latenzzeit beträgt hierbei lediglich 100-200 ms (Manzey, 1998).

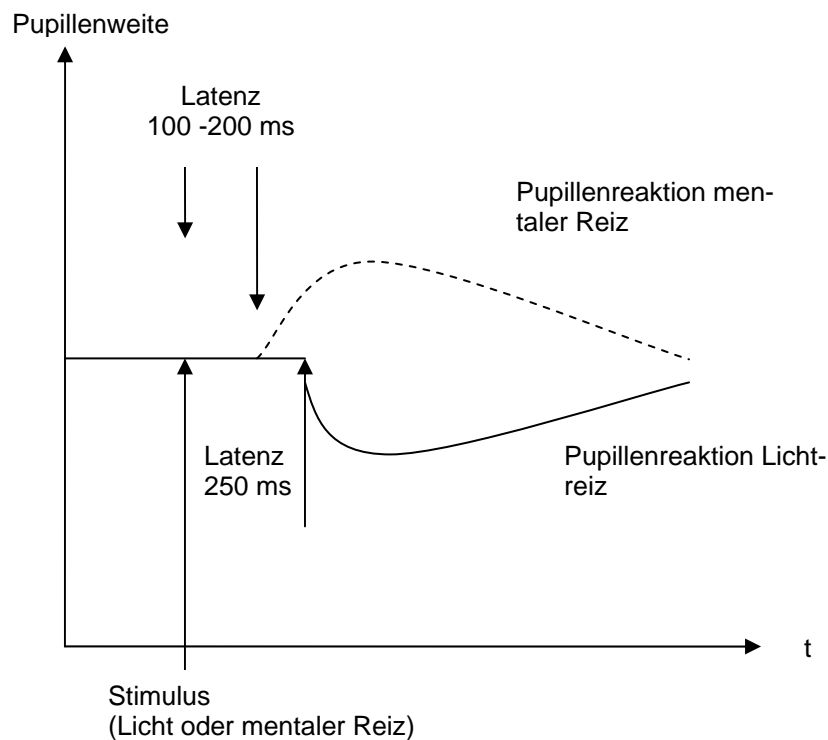


Abbildung 7: Pupillenreaktion auf einen Lichtblitz und einen mentalen Reiz

Den Arbeiten von Hess (1972, 1975) lag die Erkenntnis zugrunde, dass die Stellung der Pupillenweite in einem geschlossenen Regelkreis erfolgt. Zwar stellt der Lichteinfall auf die Retina hierbei die wichtigste Größe dar (Becker-Carus, 1979; Bösel, 1987; Schandry, 2003), lässt sich dieser Einfluss aber neutralisieren, so erhält man eine gute Datenbasis zur Analyse mentaler und emotionaler Vorgänge. Manzey (1998) bemerkt hierzu, dass die Kovariation verschiedener Kennwerte des zentralen sowie des auton-

men Nervensystems (insbesondere der Pupille) mit der mentalen Beanspruchung bei der Bewältigung unterschiedlich komplexer Aufgaben diesen Kennwerten eine Indikatorfunktion zukommen lässt. Insbesondere die Regelung des Abbildungscontrastes spielt hierbei die entscheidende Rolle. Da eine verengte Pupille Randstrahlen von der Linse abschirmt, wird die Abbildung, die auf die Rezeptoren trifft, kontrastreicher. Der Nachteil ist jedoch die Ausblendung des Informationsanteils aus diesen Randstrahlen. Ist die Pupille weit geöffnet, werden zwar mehr Lichtstrahlen aufgenommen, durch die einfallenden Randstrahlen wird der Kontrast jedoch herabgesetzt (Tischer, 1999). Die Pupillenstellung entscheidet also, ob viele Informationen mit schlechter Qualität oder wenige mit guter Qualität aufgenommen werden. Da die unspezifische Erregung im ANS zu einer Pupillenweitung führt, ist davon auszugehen, dass - bei größerer Aufmerksamkeit - die Informationsmenge Vorrang vor der Abbildungsqualität hat. Somit korreliert die Pupillengröße mit der Intensität von Informationsverarbeitungsprozessen (Beatty, 1982; Galley, 2001; Hess, 1972; Janisse, 1977; Kahnemann, 1973; Loewenfeld, 1993;). Nach Manzey (1998) weitet sich die Pupille kontinuierlich, bis sie nach 700-1200 ms ihre Gipfelamplitude erreicht und dann wieder auf das Ausgangsniveau zurückkehrt, sofern der Reiz nicht anhält. Die Amplitudenhöhe dieser phasischen Pupillenreaktion korreliert dabei mit der Schwierigkeit, bzw. der Komplexität der jeweiligen Aufgabe.

Eine Interpretation der aufgabenkorrelierten Pupillenreaktion in Bezug zur mentalen Beanspruchung setzt auf alle Fälle voraus, dass reflexhafte Pupillenveränderungen ausgeschlossen werden. Hierzu zählen in erster Linie Helligkeitsunterschiede, aber auch Akkommodationsprozesse beim Nahsehen (Beatty, 1986).

Das Licht stellt bei der Pupillometrie die bedeutendste Störvariable dar. Es können jedoch individuell auch noch weitere Störvariablen auftreten. Die wichtigsten Einflüsse sind:

- Alter,
- Einnahme von Medikamenten oder Alkohol,
- Krankheit,
- Körperliche Anstrengung,
- Pigmentverschiebung der Hell-Dunkeladaption,
- Nah-Akkommodation,
- Farbeinfluss,
- Lichtfrequenz des Lichteinfalls.

Mit steigendem Lebensalter verringert sich die absolute Pupillenweite. Dieses Phänomen wurde bereits in den 50er Jahren von Birren (1950) und Kumnik (1954) experimentell untersucht. Sämtliche Untersuchungsergebnisse bestätigen, dass sowohl bei Licht wie auch bei Dunkelheit Vergleichsgruppen mit höherem Alter signifikant geringere Pupillendurchmesser aufwiesen. Diese Störvariable kann jedoch dadurch ausgeschlossen werden, dass das Messgerät vor der Messung individuell auf die jeweilige Pupille kalibriert wird. Dazu benötigt man einen Zustand größter Dunkelheit und einen Zustand größter Helligkeit und definiert die lichtbedingte Variabilität der Pupillenbewegung zwischen diesen beiden Werten.

Die Pupillenbewegung unter dem Einfluss von Medikamenten, Drogen oder Alkohol wurde insbesondere im medizinischen Bereich untersucht. Bei Gambill, Dogle und Kearns (1967) finden sich Ergebnisse zu verschiedenen pharmakologischen Substanzen.

Deutlich wird hierbei der Zusammenhang der Hemmung sympathischer Nervenaktivität und der verminderten Reaktion der Pupille. Festzuhalten bleibt, dass Personen, die unter dem Einfluss bestimmter Medikamente stehen, zur Pupillenanalyse ungeeignet sind und nach Möglichkeit von Versuchen ausgeschlossen werden sollten.

Der Einfluss gesundheitsrelevanter Faktoren auf die Pupillenbewegung wurde im Rahmen von zahlreichen Untersuchungen insbesondere bei Diabetikern, bei Schizophreniepatienten und bei Menschen mit Migräneanfällen erforscht. Eine Zusammenstellung hierzu findet sich bei Rößger (1997, S. 30). Sämtliche Krankheitserscheinungen, die mit einer Minderung der Funktion der postganglionären sympathischen Fasern einhergehen, verzerren pupillometrische Messungen. Vor der Anwendung pupillometrischer Methoden sollte der gesundheitliche Zustand der Probanden abgefragt werden, um entsprechende Effekte berücksichtigen zu können.

Die körperliche Anstrengung kann zwar Auswirkungen auf das Pupillenspiel haben, stellt aber je nach Setting seltener eine Störvariable pupillometrischer Untersuchungen dar. Die Forschungsergebnisse in diesem Bereich zeigen, dass auch hier eine Korrelation zwischen der Schwierigkeit der körperlichen Tätigkeit und der Pupillenweite besteht (vgl. Ishigaki, 1991; Nunnally et al., 1967).

Nach Hornung (1967) kann die Pigmentverschiebung auf der Netzhaut bei der Hell-Dunkeladaption sekundär auch zu einer Veränderung der Pupillenstellung führen. Hierbei spielt die subjektiv wahrgenommene Lichtstärke eine größere Rolle als die objektiv vorhandene Lichtmenge. Die Pupillenreaktion ist in diesem Bereich aber eher zu vernachlässigen, so wie auch die Nah-Akkommodation bei der gleichbleibenden Monitorentfernung nicht weiter ins Gewicht fällt. Die akkomodationsbegleitende Pupillenreaktion

sorgt für eine gleichbleibende Abbildungsschärfe beim Fixieren in der Nähe und in der Ferne. Nach Bösel (1987) ist die Linse beim Nahsehen stärker gekrümmt und Lichtstrahlen, die am Rand der Linse in das Auge eintreten, können zu Abbildungsfehlern führen. Diese Gefahr wird durch die selbsttätige Verengung der Pupille behoben.

Der Effekt unterschiedlicher Farben auf die Pupillenbewegung ist zwar nachgewiesen, ließ sich aber bei den Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, gut kontrollieren. Eine klare Beziehung zwischen Pupillendurchmesser und Wellenlänge des Lichts beschreibt Bouma (1962). Ausschlaggebend für die Pupillenweitung ist nach Galley (2001) aber das subjektive Lichtempfinden. Hier schließt er von der unterschiedlichen Lichtempfindung auf die Unterschiede bei der Lichtempfindlichkeit der Retina unter Bestrahlung mit verschiedenen Farben. Dieser Effekt lässt sich dadurch kontrollieren, dass verschiedene Farben bei gleicher Leuchtdichte keine Pupillenveränderungen hervorrufen (Miyao et al., 1991). Da aber die Leuchtdichte durch die Ableitung über das Luxmeter ein Parameter zur Bereinigung der lichtbedingten Pupillenbewegungen ist, kann die Störvariable *Farbsehen* im vorhandenen Setting ausgeschlossen werden.

Ein bisher nur wenig beachtetes Störpotenzial liegt in der Frequenz des Lichts begründet, welches in die Pupille einfällt. Wiebelitz und Schmitz (1983) kamen in einer Untersuchung zu dem Ergebnis, dass die Fähigkeit zur Pupillenreaktion direkt von der Frequenz des einfallenden Lichts beeinflusst wird. Besonders groß ist dieser Einfluss bei Frequenzen zwischen 25 Hz und 150 Hz, was einer gängigen Monitorfrequenz entspricht. Einfluss hat aber auch die Außenbeleuchtung, sofern Kunstlicht (Neonröhre) verwendet wird.

Die Messung der Pupillenweite wird über eine Infrarotkamera realisiert, welche das Auge mit infrarotem Licht bestrahlt und die Pupillengröße über einen angeschlossenen PC ausliest. Eine besondere Herausforderung bei der Ableitung des Pupillendurchmessers am Monitor stellt die Eigenstrahlung des Monitors selbst da. Zur Interpretation der gewonnenen Daten muss also das Messergebnis um die Störvariable Monitorstrahlung (unter kontrollierten Raumlichtbedingungen) bereinigt werden.

Die Korrelation zwischen der Pupillenbewegung und der mentalen Beanspruchung ist schon oft bestätigt worden (z.B. Beatty, 1982; Hess, 1972; Janisse, 1977; Loewenfeld, 1993; Steinhauer et al. 2004). Dabei wurde deutlich, dass die mental bedingte Pupillenreaktion mit geringer Latenzzeit nach der Stimulusrezeption einsetzt und beim Nachlassen der mentalen Arbeitslast schnell auf das Ursprungsniveau zurückgeht. Wichtiger noch ist die Eigenschaft der Pupille, den momentanen Level mentaler Arbeitslast über die Zeit der Aufgabenbearbeitung wiederzugeben, was anhand der Amplitude eine Quantifizierung der mentalen Beanspruchung ermöglicht. In den letzten 30 Jahren wurde eine Vielzahl von Studien für die verschiedensten Dimensionen mentaler Beanspruchung durchgeführt. Einige Beispiele werden im Folgenden kurz erläutert.

Hyönä et al. (1995) untersuchten den Pupilleneffekt bei der Wortübersetzung. Hierbei wurden den Probanden Wörter in der finnischen Heimatsprache oder in Englisch präsentiert. Der Schwierigkeitsgrad der Wörter wurde zweifach gestuft. Die Aufgabe der Probanden bestand in der Bestätigung das Wort verstanden zu haben, in der Wiederholung des Wortes oder in der Übersetzung des Wortes. Die Autoren fanden ihre Hypothese bestätigt, dass sich die Pupille mit zunehmender Schwierigkeit der Aufgabe weitet. Insofern werteten sie die Pupille als sensitives Maß für strukturell identische und strukturell verschiedene Aufgaben.

Just und Carpenter (1993) präsentierten ihren Probanden ganze Sätze in zwei Schwierigkeitsstufen. Anschließend wurden die Probanden zum Inhalt der Sätze befragt. Als Ergebnis wurde auch hier eine Pupillenweitung beim Lesen und Verarbeiten komplexer Sätze festgestellt.

Schultheis (2004) ging in seinen Versuchen einen Schritt weiter und präsentierte den Probanden längere Texte (ca. 350 Wörter) in zwei Schwierigkeitsstufen. Als überraschendes Ergebnis konnte der Autor keine signifikanten Unterschiede in den Pupillengrößen der Probanden analog zu den Schwierigkeitsstufen nachweisen, obwohl eine EEG-Ableitung als Vergleich die höhere mentale Beanspruchung während der Rezeption der schwierigen Texte bestätigte. Schultheis kommt zu der Schlussfolgerung, dass ein stabiler Zusammenhang zwischen Pupillenstellung und mentaler Beanspruchung bei der Verarbeitung längerer Texte nicht vorliegt. Insofern würde sich die Pupillenstellung als Indikator für eine Online-Erfassung mentaler Beanspruchung in einem Mensch-Computer-System nicht eignen. Es bleibt also zu klären, ob die Untersuchung aufgrund methodischer Mängel keine Ergebnisse hervorbringen konnte, oder ob die Pupille mentale Beanspruchung im Bereich der Sprachverarbeitung lediglich über sehr kurze Zeiten widerspiegelt, so wie dies in den Studien von Beatty (1982), Hyönä et al. (1995) oder von Just und Carpenter (1993) nachgewiesen wurde.

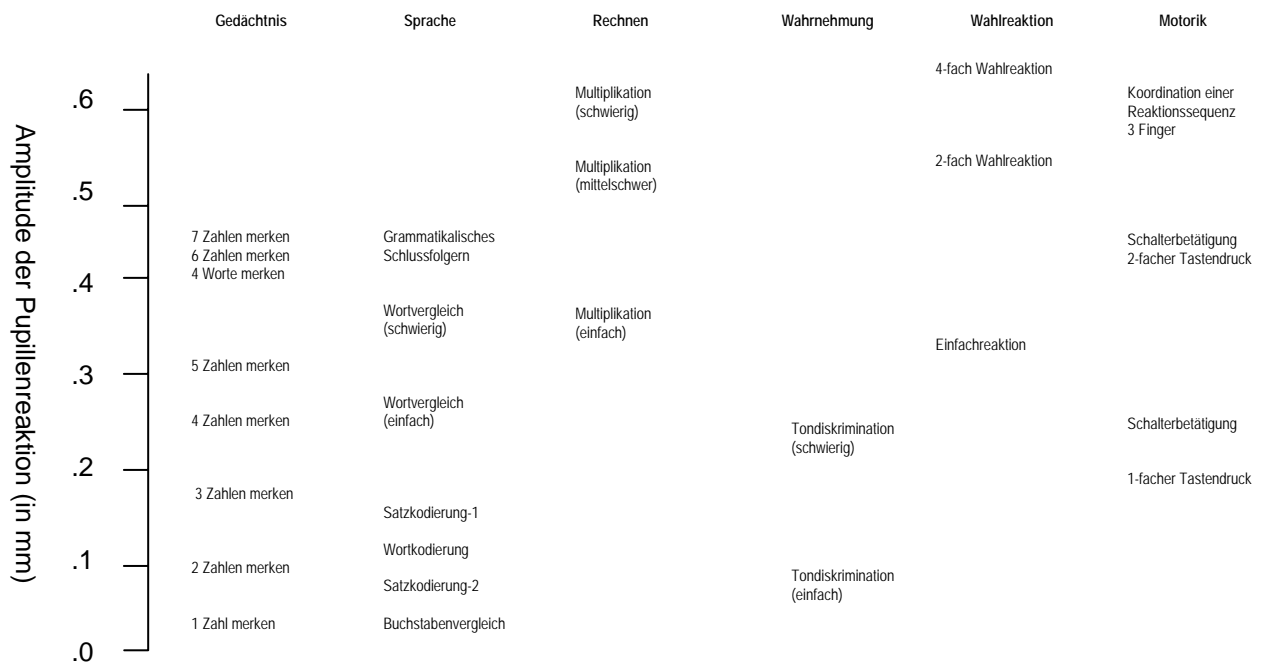
Ben-Nun (1986) führte eine Untersuchung zur Verarbeitungstiefe der Sprache durch. Durch die Bearbeitung eindeutiger und doppeldeutiger Wörter und Sätze fand er einen signifikantern Pupilleneffekt bei der Bearbeitung doppeldeutiger Wörter und zudem einen Effekt bei der Bearbeitung im Gegensatz zum ‚recall‘. Darüber hinaus fand er Beweise für eine bessere Leistung bei höherem ‚effort‘, welcher durch eine höhere men-

tale Beanspruchung mit der Auswirkung einer größeren Pupillenweite verursacht wurde.

Krüger et al. (2001) untersuchten die kognitive Beanspruchung während der Verarbeitung zeitbezogener Informationen im semantischen Gedächtnis. Die Ergebnisse zeigten Vorzugsrichtungen, die nicht nur in Ereignisfolgen, sondern auch in der mentalen Repräsentation einzelner Ergebnisse kodiert waren. Über eine Pupillenanalyse konnte dabei festgestellt werden, dass eine Bereitstellung chronologischer Ereignisse im semantischen Gedächtnis weniger kognitive Ressourcen in Anspruch nimmt, als die Bereitstellung zeitlich invers orientierter Ereignisse.

Die wohl umfangreichste Sammlung an pupillometrischen Untersuchungen fasst Beatty (1982) in einem Sammelartikel zusammen. In den verschiedenen Dimensionen mentaler Beanspruchung wie Wahrnehmung, Rechnen, Sprache, Gedächtnis, aber auch in der motorischen Reaktion belegt er einen Zusammenhang von mentaler Beanspruchung und Pupillengröße und zeigt darüber hinaus die hohe Sensitivität des Maßes auf (s. Tabelle 2). Wie bei fast allen kognitionspsychologischen Studien verwendete Beatty auch in seinen Studien nur sehr kurze Stimuli, was für eine realistische Anwendungssituation pupillometrischer Verfahren als nicht ausreichend erscheint.

Tabelle 2: Übersicht über die Ausprägung phasischer Pupillenreaktionen für qualitativ unterschiedlich mental beanspruchende Aufgaben (nach Beatty, 1982)



In der vorliegenden Arbeit wird sich die Indikatorfunktion mentaler Beanspruchung lediglich auf die Pupillenbewegung – im Sinne einer Größenänderung der Pupillenöffnung - beziehen. Andere Phänomene, wie beispielsweise die Sakkadenhäufigkeit oder der Lidschluss, konnten in bisherigen Studien an Computerarbeitsplätzen keine geeignete Indikatorfunktion übernehmen (Baumgarten, 2002).

5.5. Verfahren der Datenaufbereitung in bisherigen Studien

Sämtliche Forschungsrichtungen, in denen mit der Ableitung biopsychologischer Daten gearbeitet wird, ist das Problem der Verunreinigung der Messdaten durch Störvariablen

gemein. Die meisten Forscher, die auf dem Gebiet der Pupillometrie tätig sind, verwenden deshalb verschiedenste Verfahren zur Verbesserung der Rohdatenbasis. Auffällig ist bei einem Vergleich der verschiedenen Verfahren das Fehlen einheitlicher Standards zur Datenaufbereitung. Im folgenden Abschnitt werden exemplarisch die meist gebrauchten Verfahren vorgestellt und diskutiert.

Während zu Beginn der systematischen Pupillenanalyse die Pupillengröße auf Zelluloid abgebildet und per Einzelbild handvermessen wurden (Ben-Nun, 1986; Hess, 1972), brachten moderne videobasierte Verfahren eine deutlich höhere Messauflösung mit sich (Issing, 1986). Durch die automatische Ableitung in hoher Frequenz sind die Rohmesswerte jedoch auch stärker durch Artefakte- wie Lidschläge etc.- belastet.

In den meisten aktuellen Studien werden unterschiedliche Verfahren zum Einsatz gebracht, die Artefakte identifizieren und ausschließen sollen. Hierunter fallen im Wesentlichen Lidschläge, Akkomodationsartefakte und Blickrichtungsartefakte. Daraufhin werden oft Standardisierungsverfahren eingesetzt, um die Daten intraindividuell vergleichbar zu machen. Eine Kontrolle der Lichtvariablen findet äußerst selten statt, da in den meisten Studien davon ausgegangen wird, dass die Lichtabstrahlung der Vorlagen konstant ist. Es gehört zwar zum Standard neuerer Studien, Vorlagen über einen VGA-CRT Monitor zu präsentieren, eine exakte Kontrolle der konstanten Lichtvariable wie dies bei Karatekin (2004) oder Minassian, Perry, Granholm & Verney (2004) der Fall ist, wird kaum durchgeführt. Auch das Raumlicht wird selten als Variable abgebildet, wie dies z.B. von Granholm, Asarnow, Sarkin & Dykes (1996), Hyönä, Tommola & Alaja (1995), Minassian et al. (2004) sowie Siegle, Steinhauer & Thase (2004) zur Anwendung gebracht wurde.

Der Datenbereinigung und der Datenaufbereitung kommt bei der Pupillometrie ein besonders hoher Stellenwert zu. Im Gegensatz zu den Aufbereitungsverfahren von Karatekin (2004), die auf einer Peakanalyse beruhen, wobei Sakkaden im Vorfeld herausgefiltert wurden, ist die Verwendung von aggregierten Mittelwerten über kurze Zeitintervalle als das stabilere Verfahren zu bezeichnen. Zum einen kann aufgrund der gebräuchlichen Messtechnik nicht ausgeschlossen werden, dass es sich bei einem Peak um ein Artefakt handelt. Zum anderen zeigen Befunde auf, dass die kognitive Verarbeitung während der Sakkaden nicht ruht, wie bisher angenommen wurde (Irwin, 1998). Dies würde sich im Tagesverlauf auf eine „Denkpause“ von 60-90 Minuten summieren. Insofern ist es richtig, die Pupillenbewegung während einer Sakkade im Datensatz zu belassen.

Starke Verzerrungen in den Rohdaten werden durch Lidschlussartefakte verursacht, da bei geschlossenem Auge keine Pupille vermessen werden kann. Die abgenommenen Messwerte fallen somit auf einen sehr niedrigen Wert oder, je nach Messgerät auf einen extrem hohen Wert. Trotzdem werden noch immer Untersuchungen durchgeführt, in denen keine Artefaktbereinigung stattfindet (Bitsios, Szabadi & Bradshaw 2004; Iqbal, Zheng & Bailey, 2004; Pomplun & Sunkara, 2003). Zur Kontrolle von Lidschlägen in Untersuchungen mit geringer Dauer werden Versuchspersonen auch aufgefordert den Lidschlag zu vermeiden (Verney, Granholm & Marshall, 2004). Hierbei bleibt jedoch unklar, ob Interaktionseffekte zur mentalen Beanspruchung entstehen. Ein weiteres Verfahren zur Identifizierung von Lidschlussartefakten ist das Aufspüren von Nullwerten in den numerischen Datensätzen (Schultheis, 2004). Hierbei ergaben jedoch eigene Vergleichsstudien zwischen numerischen Messdaten und Videokontrolldaten am Arbeitsbereich Medienforschung der FU Berlin, dass mit diesem Verfahren kaum 30% der Lidschlüsse exakt identifiziert werden können (Targsdorf, 2005). Als Ergebnis dieser Stu-

die kann das Verfahren von Steinhauer, Siegle, Condray & Pless (2004) als zuverlässig beschrieben werden, da auch hier das aufgezeichnete Videomaterial zur Identifizierung von Lidschlägen genutzt wurde. Anhand der Videodaten wurden über den Timecode die numerischen Daten von Lidschlussartefakten befreit.

Ein sehr häufig eingesetztes Verfahren ist die Identifizierung von Artefakten mittels visueller Inspektion der Daten durch speziell geschultes Personal (Granholm et al. 1996; Granholm & Verney, 2004; Karatekin, 2004; Krüger, Nuthmann & Van der Meer, 2001; Minassian et al. 2004; Steinhauer, Condray & Kasperek, 2000). Über die Qualität dieser Verfahren kann kaum geurteilt werden, da die Unterschiede in der Bewertung der vorliegenden Daten nicht nachvollzogen werden können.

Ein anderer Ansatz ist die Identifizierung von Lidschlägen anhand der Geschwindigkeit, welche in den Messdaten abgebildet wird. Hierbei definiert Karatekin (2004) eine überschnelle Größenänderung der Pupille von mehr als 0,74 mm je 16,7 ms Messintervall als plötzliche Weitung (Artefakt) und Werte, bei denen die Blickbewegung mehr als 80 Grad pro Sekunde beträgt als Artefakt. Darüber hinaus schließt sie alle Werte aus, die jenseits der Pupillengröße 1,86mm und 5,96mm Pupillengröße liegen. Ein ähnliches, jedoch weniger genau beschriebenes Verfahren nutzten auch Siegle et al. (2004) zur Artefaktkontrolle. Welches Verfahren zur Identifizierung von Lidschlussartefakten auch angewendet wird, es besteht immerhin Einigkeit darüber, dass als Artefakte entfernte Messwerte entweder als fehlende Werte in die Datenanalyse eingehen oder aber durch lineare Interpolation ersetzt werden.

Da lediglich moderne Head Mounted Systeme in der Lage sind, die Pupillengröße relativ zuverlässig in Millimetern abzubilden, sind für Messdaten von Remote-Systemen

und Head Mounted-Systemen mit variablen Objektivstellungen konstruktionsbedingt weniger vergleichbar, sofern keine Standardisierung vorgenommen wird, wie dies bei Karatekin (2004), Pomplun & Sunkara (2003) und Steinhauer et al. (2000) der Fall ist. Standardisierungsverfahren sind notwendig, um Datensätze intraindividuell vergleichbar zu machen. In der Regel werden hierzu Durchschnittswerte der Pupillengröße vor dem Beginn der Stimuluspräsentation erfasst, die später als Baseline dienen. Dieser Baselinewert wird nach der Messung von den entsprechenden Messwerten, die während der Stimulusdarbietung abgenommen wurden, subtrahiert, um lediglich die relative Pupillenweitung als Ergebnis zu erhalten (Bitsios, et al., 2004; Granholm et al., 1996; Granholm & Verney, 2004; Iqbal et al., 2004; Krüger et al., 2001; Minassian et al. 2004; Schultheis, 2004; Sigle et al., 2004; Steinhauer et al., 2004; Verney, 2004).

Zur Kontrolle der lichtbedingten Pupillenreaktion werden in aller Regel Experimente unter konstanten Lichtbedingungen durchgeführt. Ausnahmen hierzu sind die Untersuchungen von Rößger (1997), der die Pupillometrie in der Fahrzeugtechnik einsetzte. Hierbei konnte der Lichteinfall nicht kontrolliert werden und musste als Variable in die Auswertung einfließen. Rößger geht in seiner Lichtbereinigung von einem linearen Zusammenhang von Licht und Pupillenweite aus und kommt so zu der Aussage, dass sich der lichtkorrigierte Pupillendurchmesser aus einem Korrekturfaktor (A), multipliziert mit der gemessenen Leuchtdichte (LD), zusammensetzt, von dem der Messwert der Pupillengröße (PD) abgezogen wird. Der Korrekturfaktor (A) ist somit die Steigung einer Geraden, welche für jede Person individuell bestimmt wird. Sie ergibt sich aus der Pupillengröße (PD_{dun}) während relativer Dunkelheit, von welcher die Pupillengröße während relativer Helligkeit (PD_{hel}) abgezogen wird, dividiert durch die Leuchtdichte, während PD_{dun} (LD_{dun}) von der die Leuchtdichte während PD_{hel} (LD_{hel}) abgezogen

wird. Eine Prüfung der Lichtbereinigung der Messwerte anhand von Gütekriterien findet nicht statt.

Auch Pomplun & Sunkara (2003) schlagen eine lineare Lichtbereinigung von Pupillennmesswerten vor, die sie aber im Einzelnen nicht näher erläutern. Zum Einsatz von Pupillometrieverfahren in der Mensch-Computer-Interaktion werden Experimente zur Interaktion von Lichteffekten und mentalen Effekten auf die Pupillenreaktion vorgestellt, welche anhand einer zweistufigen Lichtskala erzeugt wurden. Die Idee einer Lichtbereinigung bleibt hier eher theoretischer Natur und wird im Experiment nicht umgesetzt.

Tabelle 3: Übersicht über Artefaktbereinigungsverfahren verschiedener ausgewählter Studien

Studie	Gerät	Raumlichtkontrolle	Monitorabstrahlung	Artefaktbereinigung	Blickrichtungskorrektur	Standardisierung	Frequenzreduktion
Minassian, Perry, Granholm & Verney (2004)	Micro-Measurement 7000	konstant	konstant	Visuelle Inspektion	keine	Wert - Baseline	Keine 60Hz
Karatekin (2004)	ISCAN ETL-400 Remote	k.A.	konstant	1) Wertebereich 1,86mm–5,96mm 2) Ausschluss schneller Größenänderung >0,74mm in 16,2ms 3) visuelle Inspektion	keine	Wert - Baseline	Keine 60Hz
Schultheis (2004)	ASL 504	konstant	konstant	0-Werte im Datensatz	Lineare multiple Regression (Scheepers & Crocker, 2005)	keine	Keine 50Hz
Granholm & Verney (2004)	Micro-Measurement 1200	k.A.	konstant	Visuelle Inspektion	keine	Wert - Baseline	Keine 60Hz

Studie	Gerät	Raumlichtkontrolle	Monitorabstrahlung	Artefaktbereinigung	Blickrichtungskorrektur	Standardisierung	Frequenzreduktion
Steinhauer, Sigle, Conday & Pless (2004)	ISCAN RK-406	konstant in 2 Stufen	k.A.	Visuelle Inspektion	keine	Skalierung auf mm	9,2 Hz digital Filter
Sigle, Steinhauer & Thase (2004)	ISCAN RK-406	konstant	k.A.		keine	Wert - Baseline	10 Hz down-sample
Verney, Granholm & Marshall (2004)	ASL 4000 SU HMO Head Mounted	k.A.	k.A.	Messung ohne Lidschlag und visuelle Inspektion	keine	Wert - Baseline	Keine 60Hz
Bitsios, Szabadi & Bradshaw (2004)	ASL TVP 1015B	konstant	Stimulus Lichtblitz	keine	keine	Wert - Baseline	keine 60Hz
Iqbal, Zheng & Bailey (2004)	k.A.	k.A.	keine	keine	keine	in % pro Person	Keine
Pomplun & Sunkara (2003)	k.A.	k.A.	2 stufig	keine	neuronales Netzwerk Parametrized Self-Organizing Map	keine	Keine 60Hz
Steinhauer, Condray & Kasperek (2000)	ISCAN RK-406	konstant	Stimulus LED 4,80 cd/m ²	Visuelle Inspektion	keine	Skalierung in mm	9,2 Hz digital Filter
Krüger, Nuthmann & Van der Meer (2001)	Iview 3.0	konstant	konstant	Visuelle Inspektion	keine	Wert - Baseline und z-Transformation	Keine 50Hz
Rößger (1997)	RK-426 und Dornier	3 stufig	Audio	0-Werte im Datensatz	keine	z-Transformation	Keine 50Hz
Granholm, Asarnow, Sarkin & Dykes (1996)	Micro-Measurement 1200	konstant	k.A.	Visuelle Inspektion	keine	Wert - Baseline	Keine 60Hz
Just & Carpenter (1993)	ISCAN RK-426		konstant	Digitalfilter	keine	Skalierung aus mm	Keine 60 Hz
Ben-Nun (1986)	Bolex H-16 (16mm)	40 fc/m ²	audio	keine	keine	Wert - Baseline	Keine 2Hz Aufnahme

Wie an der Zusammenstellung dieser Studien aus der meist jüngeren Vergangenheit zu sehen ist, hat sich bis heute kein Verfahren zur Datenaufbereitung durchgesetzt. Welchen Einfluss dies auf die Qualität der Ergebnisse der einzelnen Studien hat, kann nur

erahnt werden. Es lässt sich jedoch festhalten, dass die alleinige Identifizierung von Lidschlussartefakten aufgrund von Nullwerten in den numerischen Daten unzureichende Ergebnisse liefert (Targsdorf, 2005). Eine Vermeidung der Lidschlussreaktion durch Instruktion ist außerhalb enger Grenzen der kognitionspsychologischen Grundlagenforschung ebenfalls unrealistisch. Ebenso unrealistisch ist die visuelle Inspektion aufgezeichneter Videobilddaten bei längeren Messungen. Bereits 30 Minuten Videomaterial ergeben 90.000 Einzelbilder mit einem entsprechenden zeitlichen Aufwand für das Aufspüren von Lidschlüssen. Unter Onlinebedingungen ist dies ohnehin nicht umsetzbar. Ebenso ist die visuelle Inspektion der numerischen Daten unter Onlinebedingungen nicht durchführbar, darüber hinaus ist auch fraglich, inwieweit eine Bewertungsübereinstimmung beim technischen Personal vorhanden ist. Daten liegen hierzu nicht vor.

Zur Umsetzung der Artefaktidentifikation durch zu schnelle Wechsel bestimmter Millimeterbeträge der Pupille innerhalb eines bestimmten Zeitraums ist eine Onlineskalierung auf eine Millimeterskala notwendig. Dies lässt sich aus technischen Gründen aber nur mit Head-Mounted-Systemem durchführen, da nur hier ein immer gleicher Abstand von der Pupille zur Kamera gegeben ist (Voraussetzung ist eine Skala zur Objektiveneinstellung oder ein Millimeterreferenzpunkt). Selbiges Problem gilt auch für den Ausschluss absoluter Höchst- oder Tiefstwerte. Head-Mounted-Systeme sind aufgrund der extremen Intrusion für das vorliegende Forschungsziel jedoch unbrauchbar.

Eine Frequenzreduktion auf 10 Hz wird in einigen Studien angewendet, da dies ungefähr der Reaktionsgeschwindigkeit der menschlichen Pupille entspricht. Diese Reduktion dient jedoch lediglich der besseren Weiterverarbeitung der Daten und hat keinen qualitativen Effekt. Sofern die 50 Hz der 60Hz abgeleiteten Daten keine verarbeitungstechnischen Probleme bereiten, ist eine Reduktion nicht notwendig. Auch die Blickrich-

tungskorrektur liefert nach Schultheis (2004) keine Verbesserung der Datenbasis. Durch die Verwendung des horizontalen Pupillendurchmessers ist zudem diese Art der Korrektur nicht notwendig.

Remotegeräte haben immer den Mangel, Messwerte lediglich intraindividuell auf einem metrischen Skalenniveau abbilden zu können. Für interindividuelle Vergleiche müssen also Standardisierungsverfahren zur Anwendung gebracht werden. Fast alle Studien bedienen sich der Baselinekorrektur, um vergleichbare Daten zu erhalten. Hierzu wird eine Baseline vor der Messung erhoben und später von den Messwerten abgezogen. Dieses Verfahren ist zwar auch unter Echtzeitbedingungen gut einsetzbar, jedoch besteht bezüglich des Ausgangswertgesetzes (Buld, 2000) ein systematischer Fehler in den Daten. Des Weiteren verzerren Objektiveinstellungen und die Entfernung des Probanden zur Messtechnik die abgeleiteten Daten.

In Bezug auf die Lichtbereinigung von Pupillendaten gibt es bisher kaum Erkenntnisse. Lediglich die Arbeiten von Rößger (1997) legen einen linearen Effekt des Lichtes auf die Pupillengröße zugrunde, der bereits aus biologischen Gründen abzulehnen ist. Des Weiteren ist das von Rößger vorgeschlagene Verfahren für eine Echtzeitanalyse nicht verwendbar.

Aus den hier beschriebenen Verfahren lässt sich kein Verfahren für eine Echtzeitanalyse von Pupillendaten vor einem Monitor einsetzen, sofern die Monitorvorlagen in der Lichtabstrahlung variieren. Außerdem ist kein Verfahren in der Lage, eine Artefaktbereinigung der Messwerte in Echtzeit zu leisten. Da diese Bedingungen für eine Onlineanalyse der mentalen Beanspruchung eines Computernutzers mittels Pupillenanalyse aber unbedingt notwendig sind, sind entsprechende Verfahren zu entwickeln.