

4. Ergebnisse und Zusammenfassung

Im vorangegangenen empirischen Teil dieser Arbeit wurde die Hypothese geprüft, ob sich die Pupille als Indikator mentaler Beanspruchung gemäß der in Kap. 4.1 (Abschnitt I) aufgestellten Definition bei der Aufgabenbewältigung am Computer eignet und somit zur Steuerung von Mensch-Maschine-Systemen verwendet werden kann. Da diese globale Hypothese aufgrund ihrer Komplexität nicht statistisch bearbeitet werden kann, wurde sie in drei Unterthesen aufgliedert. Die erste Hypothese (Hypothese A) dient der Prüfung einer Möglichkeit zur Lichtbereinigung der Pupillendaten mittels einer mathematischen Funktion, ohne dabei die mental bedingte Pupillenvarianz zu beeinträchtigen. Die zweite Hypothese (Hypothese B) dient der Prüfung der Indikatorfunktion von Pupillenbewegungen für Beanspruchungssituationen von Computernutzern und die dritte Hypothese (Hypothese C) beschreibt die schlussfolgernde Aussage zur Steuerbarkeit von Datenverarbeitungsprozessen mittels Pupillendaten.

Zur Prüfung dieser Hypothesen wurden insgesamt fünf Hauptexperimente durchgeführt und statistisch analysiert. Das Experiment 1 galt der Identifizierung von Artefakten. Durch die gewonnenen Erkenntnisse konnte ein Algorithmus entwickelt werden, der der automatisierten Identifikation von Artefakten dient. Es zeigte sich, dass Werte mit mehr als zwei Standardabweichungen vom Mittelwert einer Messung als Artefakte zu betrachten sind und von der Auswertung ausgeschlossen werden müssen. Außerdem wurde die Bedeutung der Datenaufbereitung offenbar. Neben der Verwendung von Pupillenrohdaten auf der Grundlage von Pixelwerten ist die Harmonisierung und die Standardisierung der Daten von großer Bedeutung. Erst diese Form der Datenbereinigung schafft die Voraussetzungen für die Anwendung pupillometrischer Verfahren mittels videobasierter Infrarot-Eyetracking-Techniken. Im Gegensatz

zur Vorgehensweise bei anderen Studien wurde in dieser Studie immer auf die Verwertbarkeit der Ergebnisse unter Echtzeitbedingungen geachtet. Insofern sind die gängigen Verfahren der Datenaufbereitung (s. Kap.5.5, Abschnitt I), wie sie aus anderen Studien bekannt sind (z.B. Karatekin, 2004; Iqbal et al., 2004; Siegle et al. 2004; Steinhauer et al., 2004; Verney et al., 2004) nicht anwendbar. Außerdem scheinen Verfahren, die mit Peakanalysen arbeiten, den Verfahren aggregierter Mittelwerte unterlegen zu sein, da nach Beatty (1982) die Pupille auch über die Zeitachse an die mentale Arbeitslast gekoppelt ist. Peaks sind darüber hinaus sehr anfällig für Artefakt-Fehler. Auch das Löschen der Pupillendaten während der Sakkaden scheint unangemessen, da während der Sakkaden kognitive Prozesse ablaufen (Irwin, 1998).

Das Experiment 2 diente der Herleitung einer Exponentialfunktion, welche die durch monitorstrahlungsbedingte Pupillenbewegung beschreibt. Diese Modellierung ist notwendig, um die Varianz der gemessenen Pupillenbewegung um die Varianz der lichtbedingten Pupillenbewegung zu bereinigen. Die verbleibenden Nettowerte beinhalten somit lediglich die psychologisch bedingten Pupillenbewegungen und den entsprechenden Fehlerwert. In diesem Experiment wurden Versuchspersonen mit inhaltslosen Bildschirmvorlagen konfrontiert, die verschiedene Ausprägungen von Lichtabstrahlungsausprägungen hatten. Durch eine Kurvenanpassung konnte die jeweils beste Funktion für die drei verschiedenen Datenformate (Rohdatenbasis, harmonisierte Datenbasis und standardisierte Datenbasis) herausgearbeitet werden. Die Güte der Funktionen wurde an den Daten des Experiments 3 validiert, indem die lichtbedingte Varianz und die mental bedingte Varianz der Pupillendaten nach der Bildrezeption getrennt wurden. Da für eine Echtzeitverarbeitung der Daten lediglich das Datenformat der standardisierten Pupillendaten (vgl. Kapitel 2.3 Datenaufbereitung durch Standardisierung) in Frage kommt, ist eine quadratische Funktion zur Lichtbereinigung der standardisierten Pupillendaten zu verwenden. Es konnte gezeigt werden, dass die Lichtbereinigung mit Hilfe dieser Funktion zu deutlich besseren Ergebnissen führt als die Lichtbereinigung mit Hilfe einer line-

aren Funktion. Die ursprüngliche Korrelation von Licht und Pupillenbewegung von $r = -.783$, $p < .01$ verringerte sich nach der Lichtbereinigung auf $r = .036$, $p > .05$, ohne jedoch die psychologisch bedingte Varianz zu beeinträchtigen. Die Korrelation von Pupillenbewegung und mentalem Reiz war bei $r = .320$, $p < .01$ stabil. Dieses Verfahren ist somit der linearen Lichtbereinigung nach Rößger (1997) weit überlegen. Es konnte aber auch gezeigt werden, dass für andere Anwendungsbereiche der Pupillenanalyse, die nicht der Echtzeitbedingung unterliegen, die Lichtbereinigung mittels der in Kapitel 3.2.6.2 unter Punkt b) beschriebenen Exponentialfunktion oder der in Kapitel 3.2.6.2 unter Punkt a) beschriebenen Linearfunktion, vorzuziehen ist.

Die empirischen Befunde zeigen, dass es technisch möglich ist, Pupillenrohwerte in Echtzeit von Artefakten zu befreien, indem der hierzu im Kapitel 3.1.3 entwickelte Algorithmus angewendet wird. Ferner konnte gezeigt werden, dass die Varianz der gemessenen Pupillenrohwerte um die lichtbedingte Varianz bereinigt werden kann, indem die in Kapitel 3.2.6.3 unter Punkt c) vorgestellte quadratische Bereinigungsfunktion eingesetzt wird. Diese Funktion wird für standardisierte Werte verwendet und kann somit auch in Echtzeit berechnet werden. Voraussetzung ist jedoch das Kalibrieren des Systems auf die extremsten Lichtausprägungen des Monitors (schwarz und weiß). Die Hypothese A kann somit als bestätigt angesehen werden.

In der Hypothese B wird der Pupillenbewegung eine Indikatorfunktion für mentale Beanspruchung zugeschrieben. Diese Indikatorfunktion ist bereits in unterschiedlichsten Settings bestätigt worden (z.B. Beatty & Lucero-Wagoner, 2000; Hess, 1972; Loewenfeld 1993; Verney et al., 2004). Der neue Aspekt, der im Rahmen dieser Arbeit behandelt wurde, ist jedoch die Echtzeitmessung und Analyse von Pupillendaten vor einem Computermonitor unter wechselnden Lichtabstrahlungsbedingungen. In den Experimenten 3, 4 und 5 wurden Situationen untersucht, die für die Arbeit am Computer als typisch angesehen werden können, um Er-

kenntnisse über Pupillenbewegungen in diesen Situationen zu erhalten. Die Versuchspersonen sollten während der Experimente Bilder betrachten, rechnen, logisch schlussfolgern und Texte lesen und wiedergeben. Hierbei wurden insbesondere die Auswirkungen der monitorlichtverursachten Pupillenreaktion untersucht.

Im Experiment 3 wurden den Probanden Bilder gezeigt, die sich im Reizgehalt und in der Lichtabstrahlung systematisch unterschieden. Anhand der Analyse der Pupillendaten konnte festgestellt werden, dass die Pupille sowohl bei sehr hellen als auch bei sehr dunklen Vorlagen auf die mentalen Reize analog zur Selbsteinschätzung reagiert. Der Effekt des mentalen Reizes betrug hierbei im Mittel $\eta^2 = .037$. Es muss aber auch festgehalten werden, dass die Effekte bei hellen Vorlagen in der Regel größer ausfallen. Über die Lichtabstrahlung des benutzten Monitors konnten Effektstärken bis zu $\eta^2 = .057$ des mentalen Reizes auf die Pupille bei hellen Vorlagen festgestellt werden. Die Effektstärke ist zwar als schwach zu bezeichnen, sie ist aber wegen der hohen Messgenauigkeit dennoch gut zu verwerten. Hierbei konnten die Ergebnisse von Steinhauer et al. (2004) repliziert werden, die einen zusätzlichen mental bedingten Pupillenreflex von $\eta^2 = .027$, $p = .01$ in heller Umgebung feststellten. Zur Korrektur dieser Verzerrung sollte zukünftig ein gesondertes Verfahren entwickelt werden.

Im Speziellen konnte gezeigt werden, dass Bildvorlagen mit höherem Reizgehalt zu einer Vergrößerung der Pupillen führten. Hierbei korreliert die subjektive Selbsteinschätzung mit der Pupillenbewegung zu $r = .608$, $p < .000$. Diese Erkenntnis korrespondiert auch mit der Korrelation von der Häufigkeit der Mediennutzung und der Pupillenweitung von $r = -.175$, $p < .01$. Ein Gewöhnungseffekt der Mediennutzung auf die vegetative Nervenaktivität konnte hier gezeigt werden.

Eine Korrelation der Pupillenbewegung mit der mentalen Beanspruchung bei der Lösung von Aufgaben aus dem Kognitiven Fähigkeitstest KFT (Heller & Perleth, 2000) konnte im Experiment 4 aufgezeigt werden. In diesem Experiment wurden verschiedene Indikatoren für die mentale Beanspruchung der Probanden mit der Pupillengröße korreliert. Neben der Einstufung der Aufgaben in Schulklassenstufen wurden die Bearbeitungszeit, die Fehlerhäufigkeit und die subjektive Selbsteinschätzung der Schwierigkeit anhand der SEA-Skala (Eilers, Nachreiner & Hänecke, 1986) erfasst. Hier korrelierte die SEA-Skala der mentalen Beanspruchung bei der Bearbeitung der Subskalen *Nonverbale Tests* und *Quantitative Tests (I und II)* zu $r=.829$ $p<.05$ mit der Pupillengröße, was einer gemeinsamen Varianz von 69 Prozent entspricht. Die Korrelation der Pupillenweite mit der Klassenstufe der bearbeiteten Aufgaben betrug sogar $r=.878$, $p<.05$. Die Pupille weitete sich über die Schwierigkeitsstufen der Subskalen von 2,03 Prozent bis zu 3,76 Prozent im Mittel. Die Helligkeit der Vorlagen hatte dabei keinen Einfluss auf die Bearbeitungsleistung. Außerdem ließ sich die monitorverursachte Pupillenbewegung durch die in Experiment 1 und 2 entwickelten Verfahren neutralisieren. Die Fehlerhäufigkeit bei der Aufgabenlösung korrelierte mit $r=.943$, $p<.01$ mit der Pupillenweite. Hierdurch konnte gezeigt werden, dass die Ergebnisse von Verney et al. (2004) zur *neural efficiency hypothesis* replizierbar sind. Zu einem wichtigen Verfahren bei der Bestimmung der individuellen mentalen Beanspruchung wird die Pupillometrie insbesondere durch das Bestehen individueller Unterschiede in der Kompetenz der Informationsverarbeitung.

Die Schrift ist trotz der heutigen multimedialen Vielfalt noch immer das am weitesten verbreitete Symbolsystem zur Informationsvermittlung durch den Computer. Da einem Computernutzer also in vielen Situationen am Bildschirm und insbesondere beim Lernen Texte präsentiert werden, wurde im Experiment 5 das Pupillenverhalten bei der Textrezeption und –reproduktion untersucht. Auch in diesem Fall korrelierten objektive und subjektive Indikatoren mentaler Beanspruchung mit der gemessenen Pupillenweite sowohl bei der Textrezeption

($r=.603$, $p=.000$) als auch der Textreproduktion ($r=.694$, $p=.017$). Steinhauer et al. (2004) fanden ebenfalls größere Pupillendurchmesser und höhere Effektstärken bei der Verbalisierung von Aufgabenlösungen als bei der Aufgabenbearbeitung selbst. Auch über längere Messzeiträume stellt die Pupillenbewegung einen stabilen Indikator mentaler Beanspruchung dar. Die gegenteilige Meinung von Schultheis (2004) konnte somit nicht repliziert werden.

Eine Analyse von Überforderungssituationen erbrachte Hinweise darauf, dass in diesen Fällen von einer sprunghaften Verengung der Pupille ausgegangen werden kann. Diese Verengung ist jedoch nicht als parasympathisch innervierte Verengung zu betrachten, sondern wird eher durch eine Hemmung sympathischer Innervierung verursacht. Hier ist jedoch noch weiterer Forschungsbedarf vorhanden.

Die Hypothese B kann also insgesamt als bestätigt angesehen werden. In allen durchgeführten Experimenten erwies sich die Pupille als guter Indikator mentaler Beanspruchung der untersuchten Computernutzer. Hierbei wurden hohe Korrelationen von Pupillendaten und subjektiven Maßen (vgl. Kap. 4.3, Abschnitt I), Leistungsmessungen (vgl. Kap. 4.4, SAbschnitt I) sowie analytischen Maßen (vgl. Kap. 4.5, Abschnitt I) bestätigt. Voraussetzung ist jedoch die umfangreiche Bereinigung und Aufbereitung der Rohpupillendaten. Hierzu zählen insbesondere Artefaktbereinigungen des Lidschlusses und des Lichteffekts.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte nicht nur gezeigt werden, dass sich die Pupille sehr gut als Indikator mentaler Beanspruchung eines Computernutzers eignet, sondern es wurde auch deutlich, dass die Ableitung der Pupillenbewegung technisch in Echtzeit möglich ist, und dass die abgeleiteten Daten in Echtzeit ausreichend gründlich von Licht und Artefakten bereinigt werden können. Hieraus ergibt sich die Erkenntnis, dass eine Prozesssteuerung anhand von Pupillendaten als durchaus gangbarer Weg erscheint, eine bioanaloge Feedbackschleife zu

realisieren. Es ist jedoch wünschenswert, diesen Indikator durch die Verwendung weiterer Indikatoren gegen Störungen besser abzusichern. Hierbei sollten insbesondere die Lidschlagfrequenz und -latenz und das Sakkadenverhalten berücksichtigt werden, da diese Indikatoren auch non-invasiv und prinzipiell mit einem sehr ähnlichen technischen Aufbau erfasst werden könnten, sofern die Ableitungsfrequenz erhöht werden kann.

Zur Hypothesenprüfung wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit solche statistische Verfahren verwendet, die für das vorliegende Datenmaterial, insbesondere im Hinblick auf die Forschungsökonomie, angemessen erscheinen. Kernpunkt der Auswertung ist dabei die Tatsache, dass die Bildschirmpräsentationen als Belastung jeweils bekannt waren und als Variable in Form eines aufgabenanalytischen Maßes, nämlich als Belastung durch das System, genutzt werden konnten. Darüber hinaus war es notwendig, größere Stichproben zu aggregieren, um zu allgemeinen verlässlichen Daten zu kommen. Verfahren zur Analyse von individuellen Wirkungsverläufen, wie beispielsweise Zeitreihenanalysen (Schmitz, 1989) kamen aus diesem Grund nicht zur Anwendung.

Wie in fast allen universitären Studien, die über kein eigenes Budget verfügen, stellt sich auch bei den hier besprochenen Experimenten das Problem der Stichprobensammensetzung. In die Stichproben gingen überwiegend Universitätsmitarbeiter, Auszubildende und natürlich Studierende ein. Der Bevölkerungsdurchschnitt wird somit nicht gut repräsentiert. Gerade die Personengruppe der älteren Menschen müsste aber in weiteren Studien besonders berücksichtigt werden, da sich die Pupillenreaktion im Alter verändert (Galley, 2001). Zusätzlich traten Probleme auf, wenn die Augenregion durch Schminke stark verändert war, oder wenn anatomische Gegebenheiten (asiatische Augenform) eine Messung erschwerten. Es kann also nicht davon ausgegangen werden, dass sich alle Menschen gleichermaßen für die Anwendung von Pupillometrieverfahren eignen. Es ist jedoch zu beobachten, dass die Hersteller der hier ver-

wendeten Messtechnik bereits an Verbesserungen ihrer Systeme arbeiten. Während der letzten Jahre konnte eine deutliche Reduzierung der Messprobleme erreicht werden. Es ist davon auszugehen, dass diese Probleme weiterhin deutlich abnehmen werden. Zur weiteren Reduktion der Messfehler bei der Datenerhebung durch die Eye-Tracking-Kamera ist unbedingt eine Verbesserung der Nachfahrautomatik geboten. Die derzeit verfügbaren Systeme sind bei starken ruckartigen Kopfbewegungen für Fehlmessungen noch immer anfällig.

Um die Anlage weiter gegen Fehler abzusichern, scheint es auch sinnvoll, anstelle der Monitorabstrahlung eine Messung der Lichtmenge direkt an der Pupille vorzunehmen. Hierbei könnte das Verfahren der Spotmessung zur Anwendung kommen, welches bei modernen Fotoapparaten bereits zum Standard zählt. Die Lichtmessung erfolgt hierbei durch das Objektiv der Messkamera auf dem fokussierten Punkt - der Pupille. Darüber hinaus erscheint es auch erstrebenswert, den Abstand dieses fixierten Punktes durch das Auslesen des Autofokussystems der Kamera zu bestimmen. Anhand dieser Daten könnte die Kamera Entfernungsveränderungen des Kopfes eines Nutzers von der Messtechnik registrieren und in die Auswertung einbringen. Damit würde das System wesentlich stabiler auf (Kopf-) Bewegungen von Nutzern reagieren und diese ausgleichen.

4.1 Schlussfolgerungen für die Steuerung intelligenter User-Interfaces

Die aus dem Theorieteil abgeleitete Fragestellung nach der Verwertbarkeit der Pupillenbewegung als Korrelat vegetativer Aktivierung und der Ableitung eines Indikators für mentale Beanspruchung wurde im empirischen Teil dieser Arbeit untersucht. Es wurde deutlich, dass die Pupille einen exzellenten Indikator mentaler Beanspruchung bei der Arbeit am Computer dar-

stellt. Im Ergebnis der Untersuchungsanalysen wurden die Möglichkeiten und Grenzen einer Indikatorfunktion der Pupille aufgezeigt und eine Methode der Lichtbereinigung von Pupillendaten erläutert. Diese Lichtbereinigung bezieht sich auf Pupillendaten, welche bei der Computernutzung abgeleitet wurden und dient der Eliminierung der monitorverursachten Lichtvarianz. Im folgenden Abschnitt sollen aus den Ergebnissen der empirischen Untersuchungen praktische Schlussfolgerungen für die Realisierung einer bioanalogen Computerschnittstelle erörtert und anschließend die Konzeption und Umsetzung des Prototyps einer Software erläutert werden.

Bei der Datenanalyse wurde sehr schnell deutlich, dass die Verwendung der gemessenen Rohdaten zu keinen brauchbaren Ergebnissen führen würde. Es zeigte sich also, dass effektive Verfahren der Datenbereinigung als Schlüssel zu einer erfolgreichen Pupillenbewegungsanalyse anzusehen sind. Diese Verfahren umfassen insbesondere die Datenstandardisierung, die Artefakt-Kontrolle und die Lichtbereinigung der Rohdaten. Weiterhin konnte aufgezeigt werden, wie sich die Pupille unter verschiedenen Belastungssituationen verhält, die für den Bereich des computervermittelten Lernens von Bedeutung sind.

Für die Realisierung der bioanalogen Mensch-Maschine-Schnittstelle ergaben sich aus den Untersuchungen verschiedene Anforderungen für ein solches System. Neben der Voraussetzung, die Daten der Pupillenbewegung zu registrieren und digitalisiert verfügbar zu machen, muss auch die Monitorabstrahlung registriert werden. Erst durch die Erfassung der Lichtvarianz sind die Grundvoraussetzungen für die Bereinigung der Pupillendaten gegeben. Zu diesem Zweck ist eine Fotozelle erforderlich, die Daten der Umgebungsbeleuchtung aufnimmt, registriert und an das Analysesystem weitergibt. Der Prozess der Datenbereinigung muss online in Echtzeit umgesetzt werden können, da direkt auf die Analyse der Daten eine Reaktion des Computers im Sinne einer Feedbackschleife erfolgen soll. Zu diesem Zweck muss also

eine computergestützte Echtzeit-Auswertung erfolgen. Die gemessenen Pupillen- und Lichtdaten können über dieses System mit der in Kapitel 3.2.6.3 unter Punkt c) entwickelten Funktion verrechnet werden. Da eine Vergleichbarkeit zwischen den Datensätzen einzelner Versuchspersonen wünschenswert erscheint, ist darüber hinaus eine Standardisierung der Daten sinnvoll. Um der Echtzeitanforderung zu genügen, kommt hierfür lediglich das in Kapitel 2.3 beschriebene Standardisierungsverfahren in Betracht. Eine Voraussetzung für diese Art der Standardisierung besteht in der Kenntnis der Bandbreite lichtbedingter Pupillenbewegungen. Aus diesem Grund muss das Analysesystem vor dem Beginn einer Messung auf die Minimal- und Maximalwerte der Monitorabstrahlung kalibriert werden.

Aus diesen Erwägungen wird deutlich, dass die Analyseeinheit aus Hard- und Softwarekomponenten bestehen muss. Die Hardware besteht dabei aus einer Infrarotkamera und Eye-Tracking-Einheit, einem Luxmeter zur Lichterfassung und aus einer zentralen Prozesseinheit zur Berechnung der Daten. Diese Hardwarekomponente wird im Folgenden Bio-Feedback-Device genannt. Die Berechnungen müssen über eine Software gesteuert werden, welche im Weiteren Mental-Workload-Analyzer (MWA) genannt wird. Dieses Programm dient der Kontrolle und Berechnung der Parameter einer jeden Messung.

4.2 Systemaufbau des Bio-Feedback-Device (BFD)

Das Gesamtsystem des Prototyps, der im Laufe dieser Arbeit entstanden ist, besteht aus einer Software (für Windows) und aus derzeit 3 handelsüblichen PCs. Hierbei ist ein PC (Subjekt-PC) für den Nutzer vorgesehen. Das Auge des Nutzers wird dabei von einer SMI Eye-Tracking-Infrarotkamera gefilmt. Die derart gewonnenen Videodaten werden an einen zwei-

ten PC (Kontroll-PC) übergeben, welcher diese Daten mit einer speziell angefertigten Video-
karte auswertet und den aktuellen Pupillendurchmesser bestimmt.

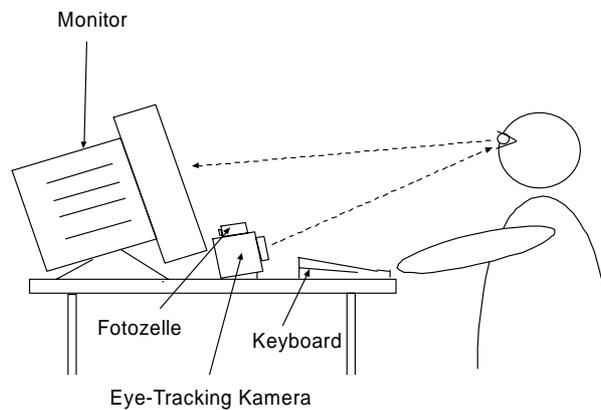


Abbildung 12: Nutzersituation am Subjekt PC

Diese Daten werden dann an einen dritten PC (Analyse-PC) übergeben, um dort weiterverarbeitet zu werden. Der Analyse-PC ist mit der selbstentwickelten Software (Mental-Workload-Analyzer) ausgestattet, die die Pupillendaten des Kontroll-PC aufnimmt und mittels der vorgestellten Verfahren von Fehlern und Artefakten bereinigt. Des Weiteren liefert ein Gerät zur Lichtmessung (Luxmeter) Daten über die Umgebungshelligkeit an den Analyse-PC. Diese Daten werden unter Verwendung der speziellen Funktion (vgl. Kapitel 3.2.6.3 Punkt c, Abschnitt II) zur Bereinigung der Pupillendaten von den Lichteffekten genutzt.

Die eingesetzte Software „*Mental-Workload-Analyzer*“ wird auf dem Analyse-PC zur Datenauswertung verwendet. Die Messdaten der Infrarotkamera werden über eine TCP/IP des Kontroll-PC ausgelesen, und die Beleuchtungswerte werden vom Analyse-PC online direkt aus

einem Luxmeter abgenommen. Beide Datensätze werden als Datastream eingelesen, in den Datenpuffer überführt und gegeneinander verrechnet (vgl. Abb. 13).

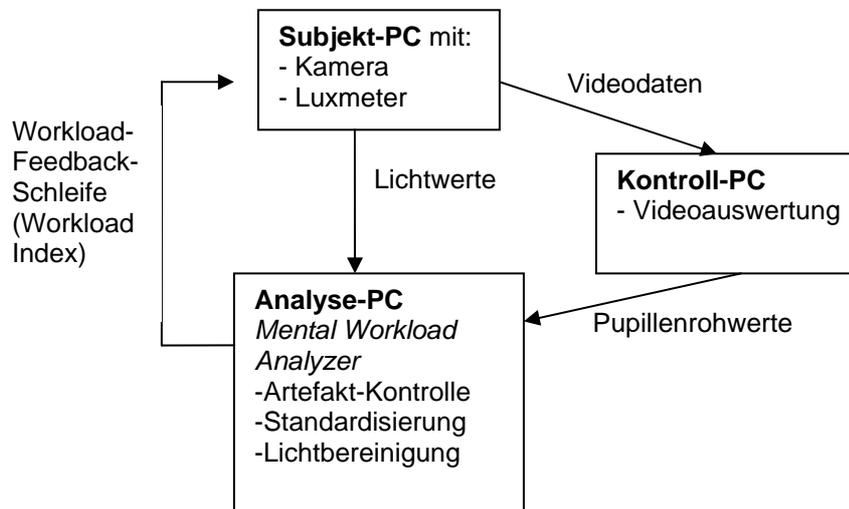


Abbildung 13: Aufbau des Gesamtsystems

Die Software wurde in Zusammenarbeit mit dem Fachbereich Informatik der Freien Universität, AB Künstliche Intelligenz (Prof. Rojas) entwickelt. Sie entstand in der C-Sharp-Entwicklungsumgebung im Microsoft .NET Framework.

Die Softwarearchitektur besteht aus verschiedenen Layern, welche unterschiedliche Containnerklassen beinhalten. Im Wesentlichen sind 4 Klassen realisiert. Eine Klasse dient der Anzeige des *General User Interface (GUI)*, also der Programmoberfläche und der grafischen Gestaltung. Eine weitere Klasse dient der Programmkontrolle. Hier sind die Bedienungsrountinen implementiert. Außerdem wird in dieser Klasse die Verbindung zu den Messgeräten Eye-Tracker und Luxmeter kontrolliert und der Datenstrom verwaltet. Die Daten werden entsprechend der in Kapitel 3.1 (Abschnitt II) dargestellten Anforderungen gefiltert und bereinigt.

Zur Bereinigung kann eine beliebige Funktion im Funktionseditor festgelegt werden. Als Standard dient hier jedoch die Funktion, wie sie im Kapitel 3.2.6.3 unter Punkt c) beschrieben ist. Erfolgt jedoch eine Messung unter Nicht-Echtzeit-Bedingungen, kann hier auch das Verfahren der Datenharmonisierung anstelle der Standardisierung verwendet werden. Die beiden letzten Klassen dienen der Akquise der Daten aus dem Luxmeter und aus der Messkamera.

Um die Datenstandardisierung gemäß dem in Kapitel 3.3 (Abschnitt I) geschilderten Verfahrens zu realisieren, ist jeder Messung eine Kalibrierungsroutine vorgeschaltet. Hierbei werden dem Computernutzer für je 5 Sekunden eine schwarze und eine weiße Folie präsentiert. Die Pupillendaten werden für jede Bedingung gemittelt und gehen dann in die Datenstandardisierung ein. Zur praktischen Umsetzung ist ein kleines Zusatzprogramm auf dem Subject-PC installiert, welches die Vorlagen mit dem Kontroll-PC synchronisiert.

Da das verwendete Luxmeter der Firma Testo (Modell 454) nur 7 Messwerte pro Sekunde abnehmen kann, ist eine Interpolation der Lichtdaten auf den 50 Hz Takt der Messkamera notwendig, um keine Verluste bei der Bestimmung der Pupillendurchmesser zu verursachen. Aus diesem Grund werden die Daten vor der Auswertung in einen Datenpuffer überführt und erst nach der Vervollständigung der fehlenden Werte berechnet. Dies führt zu einer leichten Latenz der ausgewerteten Daten zum Stimulus. Wünschenswert wäre hier ein höherfrequentes Messgerät zur Lichtbestimmung, das aber derzeit am Markt nicht verfügbar ist.

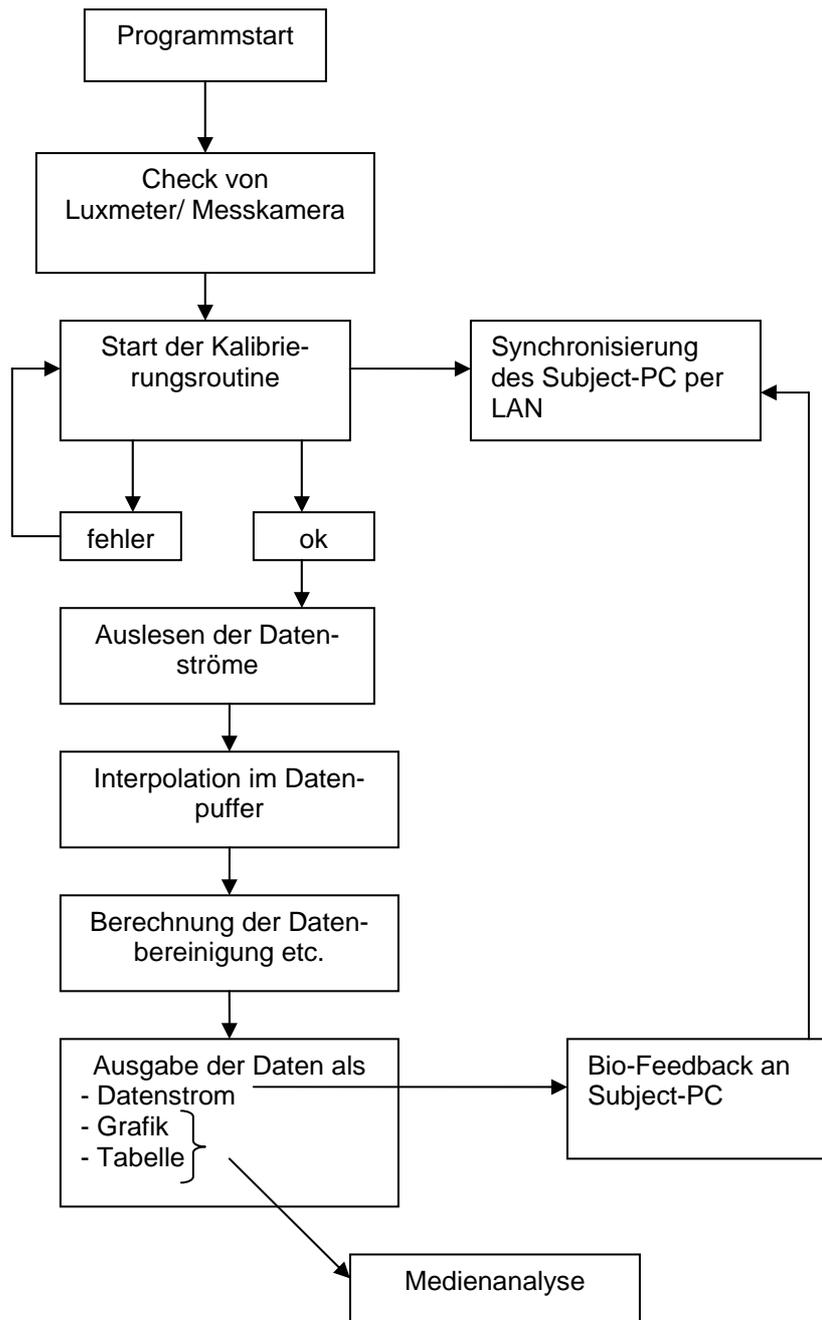
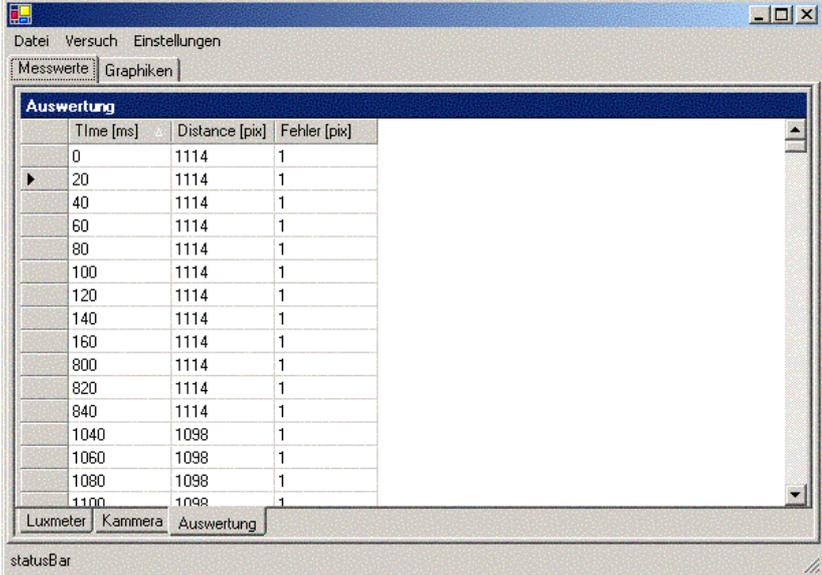


Abbildung 14: Flussdiagramm der Software MWA

Nach dem Start der Software wird die Verfügbarkeit der Messrezeptoren geprüft. Werden Luxmeter und Kamera einwandfrei erkannt und deren Datenstrom aktiviert, kommt es zur

Kalibrierungsroutine. Nach deren Abschluss beginnt die Messung mit der Stimuluspräsentation.



Time [ms]	Distance [pix]	Fehler [pix]
0	1114	1
20	1114	1
40	1114	1
60	1114	1
80	1114	1
100	1114	1
120	1114	1
140	1114	1
160	1114	1
800	1114	1
820	1114	1
840	1114	1
1040	1098	1
1060	1098	1
1080	1098	1
1100	1098	1

Abbildung 15: Tabellarische Darstellung der Messwerte

Die Auswertung der Daten erfolgt entweder nach Abschluss der Messung in Tabellenform oder als Grafik (s. Abbildung 15 und Abbildung 16). Mit diesem Verfahren ist es möglich, Aussagen über das Rezipientenverhalten während eines Medienstimulus zu machen.

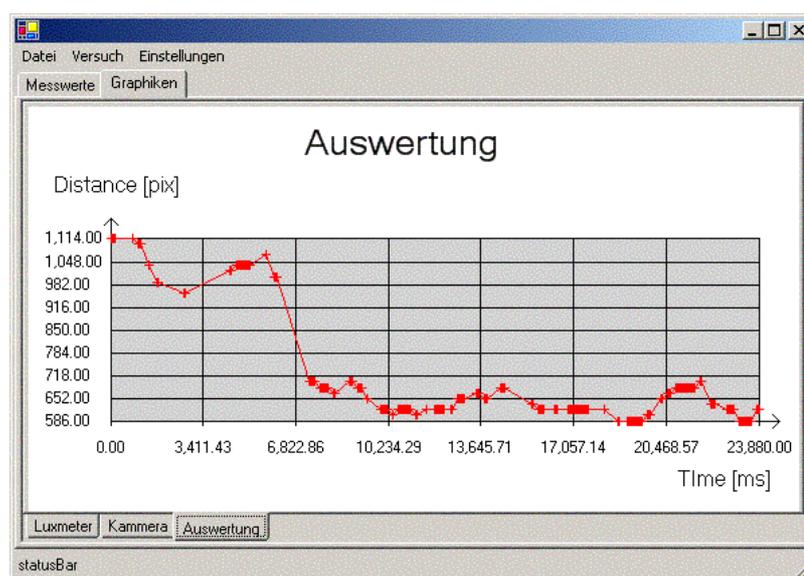


Abbildung 16: Pupillometrische Auswertung einer Medienrezeption

Mit der direkten Onlineverarbeitung der Daten kann aber auch der vegetative Zustand des Nutzers in Echtzeit erfasst werden. Abbildung 17 zeigt das Online Data Display, welches den aktuellen Beanspruchungswert als Workload-Index ausgibt. Dieser ergibt sich aus der Berechnung der Lichtverhältnisse (Balken 1) und des Pupillendurchmessers (Balken 2) und wird im Balken 4 dargestellt. Weitere Bereinerungsroutinen laufen unsichtbar im Hintergrund ab. Diese Datenbasis kann zur Steuerung adaptiver Computersysteme genutzt werden, indem diese Daten dem Subjekt-PC in einer Feedbackschleife übermittelt werden. So kann zukünftig beispielsweise eine Lernumgebung genau auf die Leistungsfähigkeit des Nutzers eingepegelt werden, um einen optimalen Lernprozess zu gewährleisten. Durch die gezielte Abstimmung von Nutzerfähigkeit und Systemanforderung erfährt der Lernprozess somit eine deutliche Effizienzsteigerung.

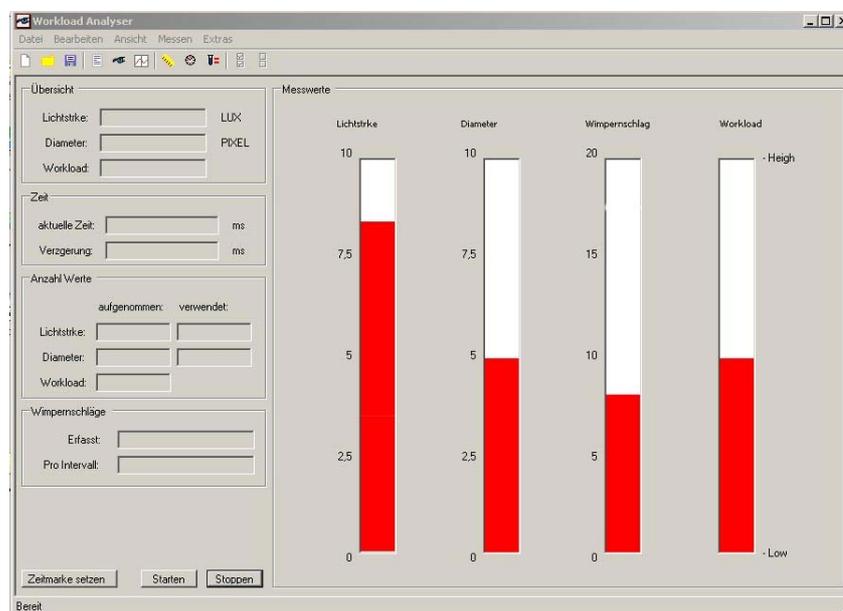


Abbildung 17: Online Data Display

Die Pupille soll hierzu als Pforte zu den internen Prozessen menschlicher Informationsverarbeitung nutzbar gemacht werden. Zukünftig soll ein System, welches die Prozesssteuerung

durch Veränderungen im vegetativen Nervensystem ermöglicht, realisiert werden. Der vorhandene Prototyp ist noch weit entfernt von einem fehlerfreien System in Serienreife, es geht bei dieser Entwicklung aber vorerst darum, das grundlegende Prinzip zu entwickeln und nutzbar zu machen. Die Perfektionierung dieses Systems bis zu einer konkreten Anwendung ist die Aufgabe weiterer Forschung.

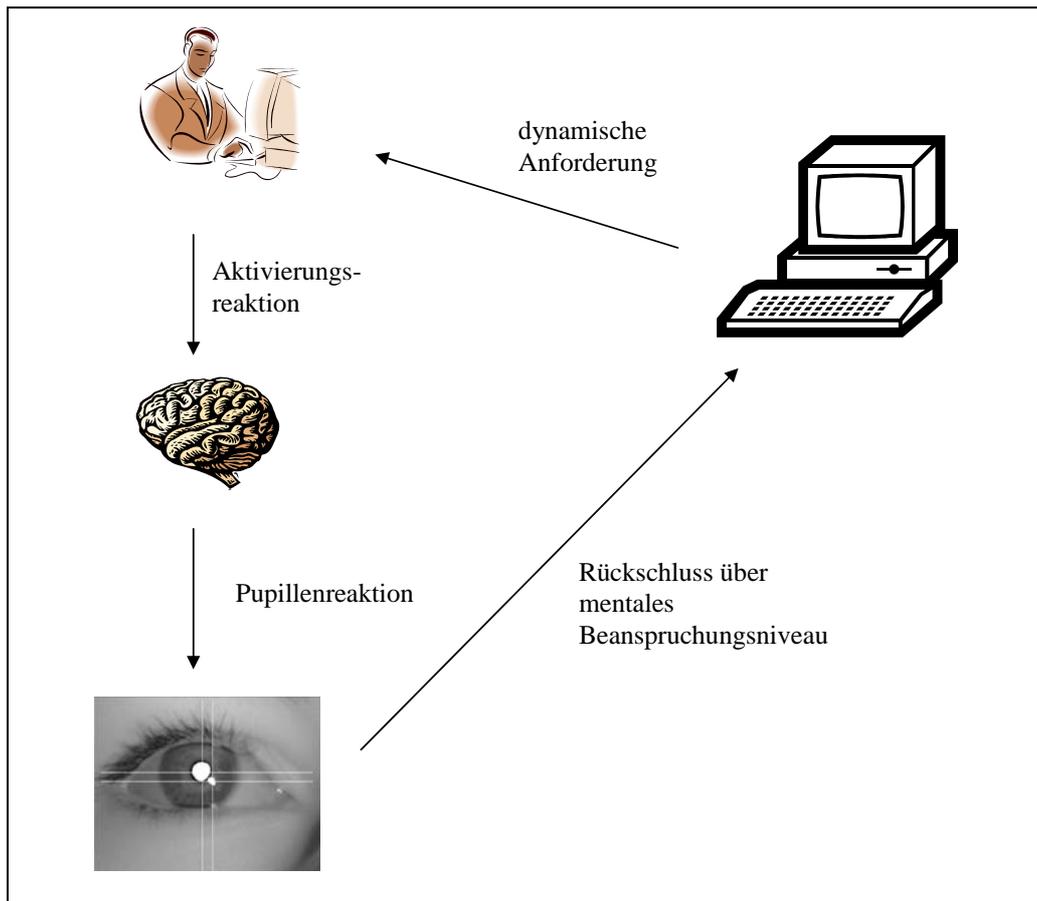


Abbildung 18: Schematische Systemübersicht

4.3. Einsatzgebiete des BFD

In der vorliegenden Arbeit wurde das Bio-Feedback-Device entwickelt, um mit dieser bioanalogen Schnittstelle die Prozesssteuerung eines Mensch-Maschine-Systems zu verbessern und natürlicher zu gestalten. Neben diesem Einsatzgebiet sind aber weitere Einsatzbereiche möglich. Folgende Einsatzgebiete sind aus heutiger Sicht relevant:

- Evaluation der mentalen Beanspruchung in Mensch-Maschine-Systemen,
- Prozesssteuerung von Lernsystemen,
- Steuerung von Computerspielen,
- Medienforschung und
- Werbeforschung.

Die Innovationsbereitschaft bei Herstellern exklusiver Computerspiele ist sehr hoch, so dass in diesem Bereich viele Impulse für die Weiterentwicklung von Mensch-Maschine-Systemen entstehen. Das Spiel „The Journey to Wild Divine“ (der Firma: The Wild Divine Project) wird beispielsweise durch den Puls und die Atmung gesteuert, die über Messsonden am Körper abgeleitet werden. Prinzipiell ist die Ergänzung klassischer Steuerungsmöglichkeiten durch eine bioanaloge Komponente bei einer Vielzahl von Spieltypen denkbar. Insbesondere Action- und Lernspiele könnten in ihrer Dramaturgie über die Pupillenbewegung als Korrelat vegetativer Nervenaktivität an den Spieler angepasst werden.

In der Medienforschung, bei der oftmals individuelle Wirkungsverläufe von Medienerlebnissen untersucht werden, könnte das BFD das bisher gängige Verfahren der EDA-Messung ablösen. Die Pupillenanalyse ist hierbei ein schnellerer und genauerer Indikator interner Infor-

mationsverarbeitungsprozesse und bietet darüber hinaus den Vorteil, ohne störende Verkabelung des Probanden auszukommen. Anfragen von Firmen aus dem Medienbereich unterstreichen den offensichtlichen Bedarf an Verfahren aus diesem Bereich.

Ähnlich wie die klassische Medienforschung ist auch die Werbeforschung ein nahe liegendes Einsatzgebiet. Durch die Verwendung des BFD ist es möglich, Aufmerksamkeitsverläufe aufzuzeichnen und Aussagen über die Elaborationstiefe von Informationen zu machen. In Kombination mit herkömmlichen Eye-Tracking-Verfahren ist es möglich, das wahrgenommene Objekt und den Grad der Aufmerksamkeit gemäß dem Elaboration-Likelihood-Model (Petty & Cacioppo, 1983) zu bestimmen. Hieraus lassen sich Aussagen zur Werbewirkung formulieren.

Aber insbesondere das Bedienen von Maschinen – sei es im Flugzeugcockpit oder an einer Werkzeugmaschine – fordert den Nutzer unterschiedlich stark, in Abhängigkeit der aktuellen Anforderungen und der individuellen Leistungsfähigkeit. Auf diesem Gebiet könnte das BFD dazu genutzt werden, Überlastungen zu vermeiden und entsprechende Hilfesysteme zu aktivieren. Weitere Einsatzgebiete sind aus heutiger Sicht zwar entfernt vorstellbar, eine intensive Evaluation dieser Technik sollte aber zuerst in einem der benannten Bereiche in nächster Zukunft umgesetzt werden.