

Fachbereich Erziehungswissenschaft und Psychologie  
der Freien Universität Berlin

---

Biosignale der Pupille zur Steuerung  
intelligenter User Interfaces

Untersuchung von Pupillenbewegungen zur  
Realisierung einer biopsychologischen Computerschnittstelle  
für die Mensch-Computer-Interaktion

Dissertationsschrift  
zur Erlangung des Akademischen Grades  
Doktor der Philosophie  
(Dr. phil.)

vorgelegt von  
Dipl. Päd.  
Florian Kerkau

**Gutachter:** Prof. Dr. Ludwig J. Issing  
Freie Universität Berlin  
Fachbereich Erziehungswissenschaft und Psychologie

Prof. Dr. Wolfgang Schönflug  
Freie Universität Berlin  
Fachbereich Erziehungswissenschaft und Psychologie

Termin der Disputation: 12.12.2005

Berlin 2005

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird versucht die Frage zu klären, inwiefern sich Bewegungsdaten der Pupille dazu verwenden lassen, Computerprozesse (insbesondere im Bereich computerunterstützten Lernens) automatisch zu steuern. Ziel eines solchen computergestützten Systems ist es, die vom Computer vorgegebene Anforderung mittels Pupillenanalyse dynamisch an die Leistungsfähigkeit des Nutzers anzupassen (Optimierung von Lernprozessen). Die Arbeit basiert auf den theoretischen Erkenntnissen zum computerbasierten Lernen und auf den psychologischen Modellen der mentalen Beanspruchung. Im empirischen Teil wurde untersucht, ob die Pupillenbewegung als zuverlässiger Indikator für mentale Beanspruchung in Lernsituationen am Computer angesehen werden kann. Dabei ließ sich experimentell zeigen, dass die individuelle mentale Beanspruchung hoch mit der Pupillenweite korreliert. Die mentale Beanspruchung einer Person lässt sich folglich anhand der Variable „Pupillenweite“ objektivieren. Des Weiteren konnte die lichtbedingte Pupillenbewegung von der mentalbedingten isoliert werden. Dadurch ist es möglich, den spezifisch kognitiven Anteil der Pupillenveränderung präzise zu bestimmen. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen über das Pupillenverhalten von Computernutzern wurde ein Verfahren zur Datenaufbereitung und zur Bereinigung von Lichteinflüssen auf die Pupille entwickelt. Im Ergebnisteil wird auf die Verwendbarkeit der Indikatorfunktion der Pupillenbewegung und somit auf die Realisierbarkeit einer bioanalogen Mensch-Computer-Schnittstelle zur Steuerung von automatisierten Lernprozessen geschlossen. Abschließend wird ein Programm zur Echtzeit-Pupillenanalyse vorgestellt.

## **Abstract**

This study attempts to clarify the question to what extent the movement data of the pupil can be used to automatically control computer processes. It is the objective of a computer-aided learning system to dynamically adapt the task set by the computer to the performance capability of the user (optimization of learning processes). This study is based on the theoretical findings on computer-based learning and the psychological models of the mental workload. The empirical part examined whether pupillary movement can be seen as a reliable indicator for the mental workload in learning situations at the computer. It was shown experimentally that the individual mental workload highly correlates with pupil size. Moreover, light-stimulated pupillary movement could be isolated from the mental-stimulated one. This makes it possible to accurately determine the specific cognitive content of pupil change. Building on the obtained findings on the pupillary behavior in computer users, a method was developed for data processing and correction of the influences of light on the pupil. In the result part, the applicability of the indicator function of the pupillary movement and thus the feasibility of a bio-analogous human-computer interface for the control of automated learning processes is inferred. In conclusion, a program for real-time pupil analysis is presented.

## Inhalt

<b>Abschnitt I.....</b>	<b>9</b>
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>9</b>
<b>2. Anwendungsrelevanz der Online-Erfassung von mentaler Beanspruchung.....</b>	<b>13</b>
<b>3. Leistungen der Informationsverarbeitung und Modelle mentaler Beanspruchung ....</b>	<b>15</b>
3.1 Leistungen der Informationsverarbeitung - Emotion, Kognition und Motivation.....	16
3.2 Theoretische Konzepte der mentalen Beanspruchung .....	23
3.2.1 Aktivierungstheoretisches Konzept	24
3.2.2 Aufmerksamkeitstheoretisches Konzept	26
3.2.3 Integratives Konzept	32
3.3 Belastung und Beanspruchung bei Arbeitstätigkeiten .....	35
3.4 Workload-Forschung.....	39
3.5 Vergleich von Workload-Konzepten und dem Belastungs-Beanspruchungskonzept ....	40
3.6 Methodische Aspekte z. Bestimmung von Belastung, Beanspruchung oder Workload.	42
<b>4. Bestimmung von mentaler Beanspruchung , Maße und .....</b>	<b>45</b>
<b>Gütekriterien .....</b>	<b>45</b>
4.1 Arbeitsdefinition von mentaler Beanspruchung .....	45
4.2 Gütekriterien.....	46
4.3 Subjektive Messungen .....	49
4.4 Verhaltens- und Leistungsmessung .....	51
4.5 Analytische Maße .....	53
4.6 Physiologische Maße .....	55
4.6.1 Physiologische Messverfahren	56
4.6.2 Gängige Verfahren, Vor- und Nachteile	57
<b>5. Pupillometrie.....</b>	<b>60</b>
5.1 Biopsychologische Grundlagen der Pupillometrie .....	60
5.2 Aufbau des autonomen Nervensystems (ANS) .....	61
5.3 Wirkung des Sympathicus und des Parasympathicus auf die Pupillenbewegung .....	64
5.4. Pupillenstellung und mentale Beanspruchung .....	67
5.5. Verfahren der Datenaufbereitung in bisherigen Studien .....	78
<b>6. Forschungsvorhaben und Hypothesen.....</b>	<b>87</b>

<b>Abschnitt II – Empirischer Teil .....</b>	<b>90</b>
<b>1. Allgemeines .....</b>	<b>90</b>
1.1 Messgerät SMI RED II zur Pupillenaufzeichnung .....	92
1.2 Verfahren zur Messung der Monitorbelichtung.....	94
<b>2. Datenaufbereitung.....</b>	<b>95</b>
2.1 Datenerfassung.....	95
2.2 Datenaufbereitung durch Harmonisierung.....	95
2.3 Datenaufbereitung durch Standardisierung.....	99
<b>3. Experimente.....</b>	<b>101</b>
3.1 Experiment 1: Versuch zur Identifizierung von Artefakten .....	101
3.1.1 Hypothesen	103
3.1.2 Versuchsdurchführung	104
3.1.3 Ergebnisse	105
3.1.4 Schlussfolgerungen aus dem Experiment 1	106
3.1.5 Verfahren der Datenbereinigung	108
3.1.6 Zusammenfassung des Experiments	110
3.2 Experiment 2: Herleitung der Funktion für die lichtbedingte Pupillenreaktion .....	112
3.2.1 Hypothese	113
3.2.2 Stichprobenbeschreibung	114
3.2.3 Versuchsdurchführung	114
3.2.4 Ergebnisse der Prüfung der Voraussetzungen	118
3.2.5 Operationalisierung der Variablen und Methodik der Auswertung	122
3.2.6 Vergleich von Lichtbereinigungsverfahren für Pupillendaten	124
3.2.6.1 Verfahren zur Lichtbereinigung von Pupillenrohdaten.....	127
3.2.6.2 Verfahren zur Lichtbereinigung von harmonisierten Pupillendaten.....	133
3.2.6.3 Verfahren zur Lichtbereinigung von standardisierten Pupillendaten....	136
3.2.7 Ergebnisse und Diskussion	143
3.3 Experiment 3: Pupillenreaktion auf bildliche Reize .....	147
3.3.1 Hypothesen	147
3.3.2 Operationalisierung und Methoden	148
3.3.3 Stichprobenbeschreibung	149
3.3.4 Versuchsdurchführung	150
3.3.5 Ergebnisse	151
3.3.6 Zusammenfassung	154
3.4. Experiment 4:Kognitiver Fähigkeitstest (KFT) .....	156

3.4.1 Der Intelligenztest KFT	156
3.4.2 Hypothesen	158
3.4.3 Versuchsdurchführung	159
3.4.4 Stichprobenbeschreibung	160
3.4.5 Statistische Auswertung	161
3.4.6 Ergebnisse	165
3.4.6.1 Hypothesenprüfung 1.1 bis 1.3	165
3.4.6.2 Hypothesenprüfung 2.1 bis 2.3	169
3.4.6.3 Hypothesenprüfung 3.1 bis 3.3	173
3.4.6.4 Hypothesenprüfung 4.1 bis 4.3	176
3.4.6.5 Hypothesenprüfung 5.1 bis 5.3	180
3.4.6.6 Subjektive Einschätzung	184
3.4.7 Zusammenfassung und Diskussion	186
3.5 Experiment 5: Textrezeption und -reproduktion	190
3.5.1 Text-Test Vorexperiment	192
3.5.1.1 Versuchsdesign und -durchführung des Vorexperiments	192
3.5.1.2 Stichprobe des Vorexperiments	193
3.5.1.3 Ergebnisse	194
3.5.1.4 Zusammenfassung und Diskussion	196
3.5.2 Text-Test Hauptexperiment	197
3.5.2.1 Hypothesen	197
3.5.2.2 Stichprobenbeschreibung	198
3.5.2.3 Versuchsdurchführung	199
3.5.2.4 Die SEA-Skala	200
3.5.2.5 Datenaufbereitung	201
3.5.2.6 Statistische Auswertung	204
3.5.2.7 Analyse von Überforderungsreaktionen	210
3.5.2.8 Ergebnisse	212
3.5.2.9 Zusammenfassung und Diskussion	215
<b>4. Ergebnisse und Zusammenfassung</b>	<b>217</b>
4.1 Schlussfolgerungen für die Steuerung intelligenter User-Interfaces	224
4.2 Systemaufbau des Bio-Feedback-Device (BFD)	226
4.3. Einsatzgebiete des BFD	234
<b>5. Diskussion und Ausblick</b>	<b>236</b>
5.1 Steuerung Intelligenter-User-Interfaces	237
5.2 Steuerung adaptiver Lernsysteme	238
5.3 Implementation am Beispiel des Projekts AdELE (A Framework for Adaptive E-Learning through Eye Tracking)	246
5.4 Weiterer Forschungsbedarf	251
<b>6. Literatur</b>	<b>254</b>

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich meinem Betreuer Prof. Dr. Ludwig J. Issing meinen Dank für seinen Rat und seine Hilfestellung aussprechen. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. Wolfgang Schönpflug für seine Betreuung und für den Zugang zu seiner Messtechnik.

Insbesondere möchte ich meinem Bruder Dr. Thomas Kerkau (†) für seine praktische Unterstützung bei der Planung dieser Arbeit danken. Durch seinen plötzlichen und tragischen Unfalltod hatte er leider keine Gelegenheit mehr, die Ergebnisse dieser Arbeit zu erfahren.

Dank gilt auch Oliver Richter für seine Unterstützung bei der Programmierung, Inka Kerkau für ihre Formulierungshilfen und natürlich den ca. 350 namenlosen Menschen, die sich freiwillig und überwiegend ohne Gegenleistung als Versuchspersonen zur Verfügung gestellt haben.

Nicht zuletzt gilt mein Dank Herrn Dowe und Herrn Lehmann von der Firma SMI für ihre schnelle und unkonventionelle Hilfe bei Problemen mit dem SMI-Eye-Tracker REDII (auch 10 Jahre nach Ablauf der Garantiezeit!) und Herrn Eschenbacher von der Firma Testo für die kostenlose Überlassung der Lichtmesstechnik.

## **Vorwort**

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein bioanaloges Schnittstellensystem entwickelt, welches aus einer Hardwarekomponente (Bio-Feedback-Device) und einer Softwarekomponente (Mental- Workload- Analyzer) besteht. Wesentliche Teile dieses Systems wurden 2004 und 2005 von dem Patent- und Lizenzservice der FU Berlin beim Deutschen Patent- und Markenamt in München (DE10355880A1) und bei dem Europäischen Patentamt (PCT/EP 2004/013548) zum Patent angemeldet.

Zur Weiterentwicklung dieser Komponenten hat die Gemeinsame Ständige Forschungskommission des Akademischen Senats und des Präsidiums der FU Berlin (II FK) unter dem Vizepräsidenten Prof. Dr. Helmut Keupp eine weiterführende Projektförderung bewilligt.

Nach eingehender Prüfung der Ergebnisse dieser Arbeit durch das Projektzentrum Jülich (Mitglied in der Helmholtz Gesellschaft) wurde dem BMBF eine Projektförderung im Rahmen des EXIST-SEED Programms in Kooperation mit der Europäische Union empfohlen, welche das BMBF daraufhin bewilligt hat.