

Messung von User Experience mit Methoden aus den Neurowissenschaften

Sandra Sproll
Fraunhofer IAO
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
Sandra.sproll@iao.fraunhofer.de

Matthias Peissner
Fraunhofer IAO
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
matthias.peissner@iao.fraunhofer.de

Abstract

Dieser Artikel gibt einen Überblick über neurowissenschaftliche Methoden, die einen Beitrag zur Messung von User Experience leisten können. Relevante Verfahren werden vorgestellt und bezüglich ihrer Potenziale und Probleme charakterisiert.

Insbesondere durch die Möglichkeit, wesentliche Momente des Erlebens einer Mensch-Technik Interaktion in Echtzeit zu erkennen und zu erfassen, können neurowissenschaftliche Methoden zu einem tieferen Verständnis von User Experience beitragen.

Keywords

User Experience, Neurowissenschaft, Psychophysiologische Verfahren, bildgebende Verfahren

1.0 Einleitung

Emotion, Nutzungserlebnis, Bedürfnisbefriedigung, Motive, empfundene Schönheit und Ästhetik, Flow-Erleben und Spaß bei der Nutzung sind Schlagworte, die immer wieder im Zusammenhang mit *User Experience* (UX) auftreten. Sie machen deutlich, dass UX sich auf ein subjektives, inneres Erlebnis bezieht.

Durch die starke Subjektivität von UX sind objektive Verfahren, wie sie bei der Usability-Messung angewandt werden, für die Erhebung von UX ungeeignet. Das subjektive, innere Empfinden eines Nutzers hat Priorität. Gegenwärtig wird UX daher vor allem durch Introspektion, d.h. mit Hilfe von Fragebögen oder Interviews erfasst.

Allerdings ist die Fähigkeit von Individuen zur Introspektion eingeschränkt. So beschäftigt sich die moderne Kognitionspsychologie mit der Erforschung impliziter Kognitionen – dem gewaltigen Teil des „kognitiven Eisberges“, der sich unterhalb des Bewussten befindet, aber das Verhalten maßgeblich beeinflusst (Bargh & Ferguson 2000).

Zudem ist der Einsatz von Fragebogenverfahren zur Introspektion mit einigen Einschränkungen verbunden: Fragebögen erlauben keine unmittelbare Messung des Erlebnisses, und sie werden häufig nach der Produktnutzung eingesetzt. Dadurch liegt zwischen Erlebnis und Messung ein kognitiver Bewertungsprozess, der zu Verzerrungen und Attributionsfehlern führen kann (Amelang & Schmidt-Atzert 2006). Des Weiteren können Veränderungen des Erlebens während der Produktnutzung nicht erfasst werden (Hirshfield et al. 2009). So sind Fragebögen zwar geeignet, um ein subjektives Gesamturteil zu erfassen, für das sicher auch Attributionsfehler und Bewertungsprozesse von praktischem Interesse sein können. Jedoch kann ein Fragebogen kaum einen Beitrag leisten, um im Sinne einer formativen Evaluation kritische Nutzungsergebnisse zu identifizieren, die für ein besonders gutes oder besonders schlechtes Messergebnis verantwortlich sind. Dafür werden Messmethoden benötigt, die kontinuierlich eine Interaktion begleiten.

Durch die Nähe von UX zu Konzepten der Emotion und Motivation stellt sich die Frage, inwieweit Erhebungsverfahren

zur Messung von Emotion und Motivation geeignet sind, um UX messbar zu machen. Möglicherweise spiegelt sich UX in psychophysiologischen Maßen als Korrelate innerer Prozesse wider. Zudem erlauben die vor allem für die Messung von Emotionen relevanten bildgebenden Verfahren einen direkteren Einblick in das Gehirn, um weiteren Aufschluss über das Nutzungserlebnis geben.

Methoden aus den Neurowissenschaften könnten demnach wertvolle zusätzliche Information über die subjektiven Prozesse der UX bringen, die über Introspektion des Nutzers hinausgehen.

Im Folgenden soll ein Überblick für den Bereich der Messung von UX relevanten biologischen Erhebungsverfahren gegeben werden. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Frage, inwiefern diese Verfahren sich für die Messung von UX eignen.

2.0 Potentiale neurowissenschaftlicher Methoden bei der Messung von UX

Die Neurowissenschaften beschäftigen sich mit der Untersuchung von Gehirn und Nervensystem. In den vergangenen 20 Jahren vergrößerte sich unser

Verständnis von Gehirnfunktionen erheblich. So werden vielfältige kognitive Funktionen von der Wahrnehmung zur Entscheidung und Handlung aus der biologischen Perspektive untersucht. Die Fortschritte in den Neurowissenschaften werden sich in Zukunft vielfältig in der HCI Forschung niederschlagen. Die neurowissenschaftlichen Erkenntnisse führen zu genaueren Modellen kognitiver, emotionaler und motivationaler Prozesse, die Nutzerverhalten und -erleben genauer bewerten und vorhersagen können (Minnery & Fine 2009). Sie erlauben zudem eine unmittelbare Messung in Echtzeit und bieten darüber hinaus Visualisierungsmöglichkeiten von Aktivität und Erleben.

2.1 Psychophysiologische Verfahren

Die psychophysiologischen Verfahren messen körperliche Veränderungen, die als Begleiterscheinungen psychischer Ereignisse auftreten oder mit psychischen Merkmalen eines Menschen zusammenhängen (Grings & Dawson, 1978). Diese Verfahren beziehen sich zum einen auf das autonome Nervensystem (z.B. EKG, EMG, Messung elektrodermale Aktivität), das bei der Untersuchung des emotionalen Verhaltens eine besondere Rolle spielt. Zum anderen gehören auch Messungen der Aktivität im zentralen Nervensystem dazu (z.B. EEG).

2.1.1 Elektrokardiografie (EKG)

Im Zusammenhang mit Fragestellungen der UX scheint die Herzratenvariabilität (HRV) die interessanteste mit EKG erfassbare Messgröße zu sein. Das Verhältnis der niederfrequenten zu den hochfrequenten Anteilen der HRV ist dabei besonders aussagekräftig (LF/HF-Ratio). Zahlreiche Studien zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen negativem Affekt, mental Workload und psychischem Stress sowie einer erhöhten LF/HF-Ratio (z.B.

Sloan et al., 1994; Hjortskov et al., 2004). Umgekehrt kann ein entgegen gesetzter Wirkungszusammenhang mit positivem Affekt nachgewiesen werden (z.B. Bhattacharyya et al., 2008). Darüber hinaus wird angenommen, dass Flow-Erlebnisse mit HRV-Messungen identifiziert und quantifiziert werden können (vgl. Mück-Weymann, 2002).

Einschränkungen der Anwendbarkeit von HRV-Messungen betreffen vor allem große interindividuelle Unterschiede und den Einfluss von körperlicher Aktivität auf die Herzrate.

2.1.2 Elektromyografie (EMG)

Die der EMG zugrunde liegende elektrische Aktivität ist das Muskelaktionspotential. So misst die EMG die Muskelaktivität durch Ermittlung der Oberflächenspannung, die auftritt, wenn ein Muskel kontaktiert (Stern et al. 2001). Dabei fängt eine Elektrode an der Hautoberfläche gleichzeitig Muskelaktionspotentiale von sehr vielen Muskelzellen auf. Im isometrischen Zustand (ohne Bewegung) korreliert die registrierte Muskelaktivität hoch mit der tatsächlichen Muskelanspannung. In Zusammenhang mit emotionalem Erleben sind vor allem unwillkürliche Reaktionen im Gesicht relevant (Schandry 1998). Die EMG-Aktivität über der Augenbraue (Corrugator Supercilii; Muskel zum Stirnrunzeln) ist niedriger und die EMG-Aktivität über der Wange (Zygomaticus Major; Muskel zum Lächeln) höher, wenn die Emotionen leicht positiv im Gegensatz zu leicht negativ sind (Cacioppo et al. 2000).

Für die Messung von UX ist die Möglichkeit zur Unterscheidung zwischen positiven, neutralen und negativer Valenz von Emotionen relevant (Partala et al. 2005). Damit ermöglichen Muskelaktionspotentiale eine direktere Auskunft über die Valenz eines Erleb-

nisses als Befragungsergebnisse und können Hinweise auf wesentliche Momente des emotionalen Erlebens geben.

Die Nachteile der Verwendung von Oberflächen Elektroden zur Messung von UX liegen in der Verwässerung des Signals durch andere Aktivität der Gesichtsmuskulatur wie Reden und Lachen. Dies könnte möglicherweise einer interaktiven Situation selbst oder anderen Methoden der Messung (z.B. „Think-Aloud“) entgegenstehen. Durch die Verwendung von Nadeln anstatt Elektroden kann die Interferenz jedoch verringert werden (Mandryk & Atkins 2006).

Die EMG kann also bei entsprechender Gestaltung der Nutzungssituation (z.B. „stille“ Nutzung eines Produkts) Hinweise auf die Valenz des emotionalen Erlebens geben, die dem Nutzer eventuell nicht unmittelbar bewusst ist.

2.1.3 Messung der elektrodermalen Aktivität

Ein weiteres Maß für die Aktivität des autonomen Nervensystems ist die elektrodermale Aktivität. Kognitive Aktivität und Emotionen erhöhen die Aktivität im sympathischen Nervensystem, wodurch wiederum die Aktivität der Schweißdrüsen ansteigt. Bei einem Anstieg der Aktivität der Schweißdrüsen nimmt der Hautwiderstand ab, auch wenn der Schweiß möglicherweise nicht die Hautoberfläche erreicht hat (Stern et al. 2001). Die Leitfähigkeit der Haut wird erhöht, und zwar linear zur Aktivierung zusätzlicher Schweißdrüsen (Darrow 1964). Die Leitfähigkeit wird mittels zweier Elektroden, an denen eine geringe Spannung einer externen Stromquelle angelegt wird, z.B. auf der Handinnenfläche gemessen. Während früher fast ausschließlich Hautwiderstandsveränderungen betrachtet wurden, spricht beispielsweise der lineare Zusammenhang mit der Aktivierung dafür, mit der Hautleitfähigkeit zu arbeiten (siehe dazu

Schandry 1998). Da die Schweißproduktion über das sympathische Nervensystem aktiviert wird, deutet sie auf eine sympathische autonome Erregung hin und wird daher oft als Maß für emotionale Erregung herangezogen (Davison & Neale 2001).

Die Grenzen dieses Verfahrens für die Messung von UX liegen in der Interpretierbarkeit der Messungen. So können für Veränderung der Hautleitfähigkeit sowohl kognitive Aktivität wie auch unterschiedliche Emotionen verantwortlich sein. Es kann lediglich die Aktivierung und damit die Intensität des Erlebens gemessen werden. In Kombination mit subjektiver Befragung kann die zusätzliche Messung elektrodermalen Aktivität jedoch wertvolle Informationen bieten, um das Nutzungserlebnis genauer und objektiver zu untersuchen. Mandryk und Inkpen (2004) und Mandryk et al. (2006b) fanden beispielsweise in interaktiven Spielumgebungen eine starke Korrelation von elektrodermalen Aktivität und Spaß, wobei die Aktivität höher war, wenn gegen einen Freund als gegen einen Computer gespielt wurde.

2.1.4 Elektroenzephalografie (EEG)

Im zentralen Nervensystem kann die Hirnaktivität mit Hilfe der EEG gemessen werden. In der Psychologie werden z.B. Aufmerksamkeitsprozesse oder Bewusstseinszustände untersucht und klassifiziert sowie Verarbeitungsmechanismen für externe und interne Reize erforscht (Schandry 1998). Das arbeitende Gehirn erzeugt elektrische Signale in aktiven Gehirnregionen. Diese Signale werden mittels meist 21 auf der Kopfhaut befestigten Elektroden erfasst. Zwischen jeweils zwei Elektroden werden in verschiedenen Kombinationen die elektrischen Spannungsunterschiede gemessen, mit einem speziellen Gerät verstärkt und schließlich als Hirnstromwellen aufgezeichnet. Die Elektroden wer-

den meist nach dem internationalen 10-20 System (Jasper, 1958) befestigt.

Zu den Nachteilen der EEG zählt unter anderem die Anfälligkeit für biologische Artefakte, d.h. Biosignale, die nicht hirnelektrischer Natur sind und die bei der Messung von UX mit Sicherheit auftreten werden. Dazu gehören u.a. Muskelpotentiale und Lid- und Augenbewegungen. Zur Reduktion dieser Artefakte können direkte Instruktionen für den Probanden (z.B. sich zu entspannen bzw. zuvor zu blinzeln), methodische Anpassungen (z.B. Einsatz eines Tiefpassfilters bei störenden Muskelpotentialen) oder zusätzliche Messungen (z.B. Elektrokulogramm bei Augenbewegungen) eingesetzt werden (Schandry 1998). Zudem ist das EEG anfällig für elektrische Störungen, die bei der Messung von UX bei technischen Produkten nicht immer zu vermeiden sind.

Der bisherigen Kritik einer zu geringen räumlichen Auflösung zur genauen Lokalisierung stehen neuere technische Entwicklungen entgegen: Fortschritte in der Elektrodengestaltung sowie leistungsfähige Rechner, die Messungen von vielen Elektroden möglich machen, sorgen dafür, dass Gehirnaktivität zunehmend genauer lokalisiert werden kann (Hüsing et al. 2006).

So kann die EEG neben Messung von kognitiver Belastung, Vigilanz, Arousal und Ermüdung im HCI Kontext (Minnerly & Fine 2009) möglicherweise auch zur Lokalisierung von Hirnaktivität bei der Produktnutzung herangezogen werden. Trotz dieser Fortschritte sollte die EEG weniger anfällig gegenüber externen Quellen werden, um sinnvoll außerhalb des Labors zur Messung von UX eingesetzt zu werden.

2.2 Bildgebende Verfahren

Bildgebende Verfahren erlauben als „Fenster zum Gehirn“, die Struktur und auch funktionelle Veränderungen im Gehirn zu untersuchen. Das Prinzip aller bildgebenden Verfahren besteht darin, aus einer großen Menge an Daten, die aus der Messung physikalischer Größen gewonnen werden, ein Abbild zu erzeugen (Hüsing et al. 2006). Die abgeleitete Information wird orts aufgelöst und über Helligkeitswerte oder Farbkodierungen dargestellt. Ursprünglich wurden diese Verfahren im Bereich der klinischen Diagnostik eingesetzt, finden in letzten Jahren jedoch immer mehr Anwendung in der Forschung mit gesunden Gehirnen (Hüsing et al. 2006). Für die Messung von UX sind vor allem Verfahren interessant, die ein Bild des arbeitenden Gehirns erzeugen können, da das aktuelle Nutzungserlebnis mit den jeweiligen Emotionen im Mittelpunkt steht.

2.2.1 Funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT)

In den letzten Jahren wurde die fMRT zu einer der wichtigsten Methoden in den kognitiven Neurowissenschaften, da aktive Strukturen mit relativ hoher räumlicher Auflösung dargestellt werden können. Metabolische Veränderungen aufgrund von Aktivität können sichtbar gemacht werden (Davison & Neale 2001). Ein Schlüsselbestandteil des Blutes, Hämoglobin, transportiert Sauerstoff von den Lungen zu aktiven Zellen. Bei der Aktivierung von Kortexarealen kommt es zu einer Steigerung des Stoffwechsels in den aktiven Arealen. Dadurch erhöht sich das Verhältnis von oxygeniertem und desoxygeniertem Hämoglobin. Die fMRT macht sich die unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften von oxygeniertem und desoxygeniertem Hämoglobin zunutze und misst so die entsprechende Verteilung und damit die Aktivität (BOLD-Effekt).

Kritisch gesehen wird die indirekte Messung. So wird nicht die Aktivität direkt gemessen, sondern der Sauerstofffluss als Folge der Aktivität (Hüsing et al. 2006). In diesem Zusammenhang ist auch die relativ schlechte zeitliche Auflösung zu kritisieren.

Neben Untersuchungen zu Gehirnaktivität bei Sprache, visueller und akustischer Wahrnehmung, Bewegung und Gedächtnis wurde die fMRT bereits zur Messung der Gehirnaktivität bei verschiedenen Stimmungen eingesetzt (Hüsing et al. 2006). Zudem zeigen neue fMRT-Experimente die Aktivierung von Gehirnregionen bei unerwarteter Belohnung (D'Ardenne et al. 2008). Dies sehen Minnery und Fine (2009) als Hinweis auf Potentiale des Verfahrens zur Identifikation von Aspekten eines angenehmen Interaktionserlebnisses.

Problematisch für den Einsatz zur Messung von UX ist neben Kosten und Komplexität dieses Verfahrens die Tatsache, dass Personen während der längeren Messung bewegungslos im engen Scanner mit relativem hohem Geräuschpegel liegen müssen. Dadurch ist zum einen die Interaktion mit einem (technischen) Produkt erschwert. Zum anderen ist es fraglich, inwieweit ein realistisches Nutzungserlebnis überhaupt zustande kommt. Möglicherweise sind andere Produktpräsentationen als die direkte Interaktion unumgänglich (z.B. das Zeigen von Filmen, in denen die Produktnutzung dargestellt wird), die wiederum als Reize zu schwach für die erforderliche Aktivierung entsprechender Areale sein könnten.

2.2.2 Funktionelle Nah-Infrarot-Spektroskopie (fNIRS)

Eine weniger kapitalintensive Alternative zur fMRT stellt die in den fNIRS dar, um nicht invasiv in Echtzeit Gehirnfunktionen zu untersuchen. Wie die fMRT spiegelt die fNIRS die Dynamik

des cerebralen Blutflusses wider. Die fNIRS nutzt Lichtquellen mit Wellenlängen nahe dem infraroten Bereich (650-850 nm) und optische Detektoren, um Gehirnaktivität zu messen. Desoxygeniertes und oxygeniertes Hämoglobin absorbiert das nah-infrarote Licht bei hämodynamischen und metabolischen Veränderungen im Zusammenhang mit neuronaler Aktivität. Diese Veränderungen können durch Messung des diffus reflektierten Lichts entdeckt werden (Chance et al. 1988; Izzetoglu, K. et al. 2004). Allerdings durchdringt die fNIRS nur wenige Millimeter unter der Oberfläche des Gehirns und lässt daher nicht die Aktivität tieferer Gehirnstrukturen erkennen. Viele für den HCI Kontext relevanten kognitiven Funktionen der Verarbeitung wie das Arbeitsgedächtnis, die exekutive Kontrolle und die visuell-räumliche Verarbeitung sind in den äußeren Schichten des Gehirns – im cerebralen Kortex – lokalisiert und daher für die fNIRS zugänglich (Minnery & Fine 2009).

Allerdings ist es fraglich, ob die fNIRS speziell für die Messung von UX geeignet ist, da unter anderem das tiefer liegende limbische System für Emotionen relevant ist. So könnten einige für UX relevante Regionen für die fNIRS unzugänglich sein.

Insgesamt ist die fNIRS als Untersuchungsmethode aber besonders gut für den HCI Kontext geeignet, da dieses bildgebende Verfahren in realen Umgebungen einsetzbar ist: fNIRS ist sicher, transportabel, weniger invasiv als andere bildgebende Verfahren und kabellos möglich (Izzetoglu et al. 2004). Eventuell lässt sich die fNIRS aufgrund ihrer Flexibilität und Praktikabilität auch zur Messung von Aspekten einsetzen, die in Beziehung zur UX stehen (z.B. Aktivität in der rechten Hemisphäre, die bei Emotionen eine Rolle spielt (Davison and Neal 2001)).

3.0 Zusammenfassung und Ausblick

Physiologische Methoden können die Begleiterscheinungen innerer – u.a. auch emotionaler – Prozesse messen. Sie eignen sich für den Einsatz in der UX-Forschung, da sie eine direkte und das Nutzungserlebnis begleitende Messung ermöglichen. Da die Verfahren unterschiedliche Aspekte fokussieren (z.B. EMG die Emotionsvalenz; die elektrodermale Aktivität das Arousal), liegen die Chancen in einer Methodenkombination. In Kombination mit Befragungsmethoden können physiologische Messungen Marker im Nutzungserlebnis (z.B. plötzliche Erregung) setzen, die als Grundlage für spätere Befragungen genutzt werden können.

Die Potenziale bildgebender Verfahren liegen in der Lokalisierung und Charakterisierung von (emotionalen) Prozessen des Nutzungserlebnisses. So ist es interessant zu erfahren, was eine gute UX in unserem Gehirn eigentlich auslöst (vgl. Reaktion auf Belohnung) und wie unser Gehirn letztendlich beteiligt ist, wenn eine Produktbindung entsteht.

Die Nachteile der dargestellten Verfahren liegen vor allem in ihrer aufwändigen Durchführung, die teilweise das Nutzungserlebnis massiv beeinträchtigen kann. Außerdem in technischen Restriktionen und Beeinträchtigungen durch externe Störungen.

Die technische Weiterentwicklung der Verfahren lässt aber in Zukunft auf einen effizienteren Einsatz im UX Kontext hoffen – in Praxis und Forschung. So werden z.B. Erkenntnisse, wie das Gehirn Verarbeitungskapazität verteilt oder wie Emotionen bei der Produktnutzung entstehen, zunehmend relevant. Ein wachsendes HCI-Forschungsfeld sind „Brain computer interfaces“ (Krepki et al. 2007). In Form von EEG messen Elektroden an der Kopfhaut die hirnelektrischen Signale und wandeln diese in technische Steuersignale um (Birbaumer

et al. 2006). Im EU-Projekt TOBI (Tools for Brain-Computer Interaction) werden bereits Anwendungen entwickelt, die über rein funktionelle Aspekte hinaus auf das Nutzungserlebnis fokussieren (z.B. Musiknavigation, Soziale Netzwerke).

Neurowissenschaftliche Verfahren werden die klassischen Fragebogen- und Interviewtechniken zur Selbstauskunft über UX auch in der Zukunft nicht ersetzen. Gerade auch die nach der Interaktion ablaufenden Bewertungs- und Attributionsprozesse sind von hoher praktischer Bedeutung, da sie das subjektive Gesamturteil und damit relevante Einstellungen und Verhaltensweisen (Kauf, Nutzung, Weiterempfehlung, etc.) mitbestimmen. Eine große Herausforderung wird zukünftig darin bestehen, die neurowissenschaftlichen Methoden so einzusetzen, dass sie ein tieferes Verständnis und eine Analyse der Ursachen von UX ermöglichen.

4.0 Literaturverzeichnis

Amelang, M.; Schmidt-Atzert, L. (2006). Psychologische Diagnostik und Intervention. Heidelberg: Springer.

D'Ardenne, K.; McClure, S.M.; Nystrom, L.E.; Cohen, J.D. (2008). BOLD Responses Reflecting Dopaminergic Signals in the Human Ventral Tegmental Area. *Science*, Vol. 319, S.1264-1267.

Bargh, J.A.; Ferguson, M.L. (2000): Beyond Behaviourism: On the automaticity of higher mental processes. *Psychological Bulletin*, Vol. 126, Nr. 6, S. 925-945.

M. R. Bhattacharyya, D. L. Whitehead, R. Rakshit, and A. Steptoe (2008): Depressed Mood, Positive Affect, and Heart Rate Variability in Patients With Suspected Coronary Artery Disease. *Psychosom Med*, November 1, 2008; 70(9), S. 1020-1027.

Birbaumer, N., Weber, C., Neuper, C., Buch, E., Haagen, K., Cohen, L. (2006). Physiological regulation of thinking: brain-computer-interface (BCI) research. *Progress in Brain Research*, Vol. 159, S. 369-391.

Chance, B.; Anday, E.; Nioka, S.; Zhou, S.; Hong, L.; Worden, K.; Li, C.; Murray, T.; Ovetsky, Y.; Thomas, R. (1988). A novel method for fast imaging of brain function, non-invasively, with light. *Optics Express*, 10, 2, S. 411-423.

Cacioppo, J.T.; Berntson, G.G.; Larsen, J.T.; Poehlmann, K.M.; Ito, T.A. (2000). The psychophysiology of emotion. In: Haviland-Jones, J.M. (Hrsg.): *The Handbook of Emotions*. New York: The Guilford Press.

Darrow, C.W. (1964). The rationale for treating the change in galvanic skin response as a change in conductance. *Psychophysiology*, Vol. 1, S. 31-38.

Davison, G.C.; Neale, J.M. (2001). *Klinische Psychologie*. 6. Auflage. Weinheim: Beltz Verlag.

Grings, W.W.; Dawson, M.E. (1978). *Emotions and bodily responses: A psychophysiological approach*. New York: Academic Press.

Hirshfield, L.M.; Solovey, E.T.; Girouard, A.; Kebinger, J.; Jacob, R.J.K.; Sassaroli, A.; Fantini, S. (2009). Brain Measurement for Usability Testing and Adaptive Interfaces. An Example of Uncovering Syntactic Workload with Functional Near Infrared Spectroscopy. In: Greenberg, S.; Hudson, S.E.; Hinckley, K.; Morris, M.R.; Olsen, D.R. (Hrsg.): *Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems (CHI 09)*. Boston: ACM. (S. 2185-2194).

Hjortskov, N., Rissén, D., Blangsted, A. K., Fallentin, N., Lundberg, U., & Søgaard, K. (2004). The effect of mental stress on heart rate variability and blood pressure during computer work. *European Journal of Applied Physiology*, 92 (1-2), 84-89.

Hüsing, B.; Jäncke, L.; Tag, B. (2006). Einblick ins Gehirn – Hirnuntersuchungen mit bildgebenden Verfahren. TA-SWISS Studie. Bern: vdf Hochschulverlag AG.

Izzetoglu, K.; Bunce, S.; Onaral, B.; Pourrezaei, K.; Chance, B. (2004). Functional Optical Brain Imaging Using Near-Infrared During Cognitive Tasks. *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol. 17, Nr. 2, S. 211-231.

Jasper, H.H. (1958). The ten-twenty electrode system of the international federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, Vol. 10, S. 371-375.

Krepek, R.; Curio, G.; Blankertz, B.; Müller, K.-R. (2007). Berlin Brain-Computer Interface-The HCI communication channel for discovery. *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 65, Nr. 5. S. 460-477.

Mandryk, R.L.; Atkins, M.S. (2006). A fuzzy physiological approach for continuously modelling emotion during interaction with play technologies. *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 65, S.329-347.

Mandryk, R.L.; Inkpen, K. (2004). Physiological indicators for the evaluation of co-located collaborative play. In: *Proceedings of Computer Supported Cooperative Work (CSCW 2004)*, S. 102-111.

Mandryk, R.L.; Inkpen, K.; Calvert, T.W. (2006b). Using psychophysiological techniques to measure user experience with entertainment technologies. *Behaviour and Information Technology (Special Issue on User Experience)*. Vol. 25 Nr. 2. S. 141-158.

Minnery, B.S.; Fine, M.S. (2009). Neuroscience and the Future of Human-Computer Interaction. *Interactions*, Vol. 16, Nr. 2, S.70-75.

Mück-Weymann, M. (2002). www.hrv24.de

Schandry, R. (1998). *Lehrbuch Psychophysiologie – Körperliche Indikatoren psychischen Geschehens*. Weinheim: Beltz Verlag.

Sloan, R. P., Shapiro, P. A., Bagiella, E., Boni, S. M., Paik, M., Bigger, J. T. Jr., Steinman, R. C., & Gorman, J. M. (1994). Effect of mental stress throughout the day on cardiac autonomic control. *Biological Psychology*, 37(2), 89-99.

Stern, R.M.; Ray, W.J.; Quigley, K.S. (2001). *Psychophysical Recording*. 2. Auflage. New York: Oxford University Press.

TOBI: Tools for Brain-Computer Interaction. Projektwebseite: <http://www.tobi-project.org/applications>. 25.06.2009.