

5. Diskussion und Ausblick

In den vorangegangenen Kapiteln dieser Arbeit wurde die systematische Pupillenanalyse auf ihre Verwendbarkeit als Indikator mentaler Beanspruchung unter Echtzeitbedingungen untersucht. Das daraus resultierende Verfahren bietet nun die Möglichkeit, einen Indikator mentaler Beanspruchung zur Steuerung intelligenter User-Interfaces bereitzustellen, sofern das Setting nicht wesentlich verändert wird. Die Idee der adaptiven Prozesskontrolle liegt in der Justierung der Automation oder der Justierung der Struktur und Organisation des Interfaces selbst auf den Grad der mentalen Beanspruchung des Nutzers (Leuchter & Urbas, 2004) als eine von mehreren Steuergrößen. Die Erfassung von mentaler Beanspruchung ist im Bereich der Entscheidungsunterstützung (active decision support systems, DSSs) von großer Bedeutung. Nach Smith und Geldes (2003) ist dieser Bereich einer der wichtigsten Anwendungsbereiche für Computer überhaupt. Das reine Monitoring durch den Operator birgt das Risiko eines Aufmerksamkeitsabfalls, während zu klobige Automationen die mentale Beanspruchung des Nutzers übernotwendig vergrößert. Dazu kommt, dass zusätzliche Beanspruchung durch eine ineffiziente Navigation in zu komplexen Menüs zusätzliche Beanspruchung erzeugt (Wiener & Nagel, 1988).

Neben der Identifikation von kritischen Über-oder Unterforderungssituationen in komplexen Mensch-Maschine-Systemen, wie z.B. Flugzeugen, Eisenbahnen und Kernkraftwerküberwachungsanlagen, oder der Identifikation von günstigen Zeitpunkten für eine Prozessunterbrechung für die Konfrontation des Operators mit Zweitaufgaben ist insbesondere auch die Verwendung in E-Learning-Systemen von besonderem Interesse und wird deshalb hier besonders besprochen.

5.1 Steuerung Intelligenter-User-Interfaces

Die Ableitung der Ausprägung mentaler Beanspruchung des *Operators* in Mensch-Maschine-Systemen ist immer dann besonders schwierig, wenn wenig *Input* durch den *Operator* sichtbar ist, wie z.B. bei der Überwachung von komplexen Systemen. Informationen über den kognitiven Status des *Operators* sind aber hier besonders wichtig, um einen Wechsel zwischen verschiedenen vordefinierten Interfaces vornehmen zu können, welche im Grad der Automatisierung variieren. Hierbei soll das Interface ausgewählt werden, bei dem die Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler am geringsten ist (Leuchter et al., 2004). In Situationen hoher mentaler Beanspruchung sollte der Grad der Automatisierung auch hoch sein, um menschliche Fehler zu vermeiden. Hierbei kann die Pupillenanalyse wertvolle Informationen der Nutzerevaluation zur Verfügung stellen, die die bisher verwendeten Techniken zur Adaptionsteuerung wie z.B. die antizipative Modellierung des Benutzerverhaltens (Künzer, Ohmann & Schmidt, 2004) oder *knowledge structures* (Kanno, Nakata & Furuta, 2003) sinnvoll ergänzen können. Nach Leuchter et al. (2004) ist es angebracht, neben den Wissensstrukturen und Zielen des Operators auch den momentanen Beanspruchungszustand in die Berechnung der Adaptionparameter einzubeziehen.

Zum Ausführen des Wechsels zwischen verschiedenen Interfaces müssen vordefinierte Varianten im System vorliegen. Die Softwarearchitektur tauscht das gegenwärtige Interface gegen ein besser passendes aus. Hierzu lässt sich der weit verbreitete *Model-View-Controller (MVC)* (Reenskaug, 1979, 2003) ideal verwenden. Ziel des MVC-Modells ist die Dekomposition von interaktiven Applikationen in Teilsysteme mit abgegrenzter Funktionalität und hohem Grad der Wiederverwendung. Der MVC garantiert, dass Änderungen im Modell zu entsprechenden

Änderungen im dargestellten Interface führen. Eine einfache Zuordnung von Beanspruchung und dem dazu angemessenen Grad der Automatisierung ergibt die Zuordnungsfunktion. Hierbei ist es wichtig, eine Zuordnungsfunktion zu verwenden, die ein Springen zwischen zwei Varianten unterbindet, sofern die gemessenen Steuerungsparameter im Grenzbereich liegen. Zu diesem Zweck sollte eine Hysteresiskurve angewendet werden (Leuchter et al., 2004).

5.2 Steuerung adaptiver Lernsysteme

E-Learning ermöglicht einerseits das Identifizieren, die Analyse und das Monitoring relevanter Aspekte der Instruktion (Lerntempo, Lernpfade und Lernstrategien), andererseits können diese Parameter auch genutzt werden, um den Lernprozess an die individuellen Bedürfnisse eines Lerners anzupassen. Das Analysieren des Nutzerverhaltens und des Lernfortschritts durch ein E-Learning System ist zwar nicht neu (Crowell, 1967; Modesitt, 1974), jedoch ist der Erfolg solcher Systeme bis heute als gering anzusehen (Baumgartner, 2003; Conlan, Dagger & Wade, 2002). Nur wenige Anwendungen unter stark eingeschränkten Nutzungsbedingungen konnten bisher gute Ergebnisse liefern (Dietinger, 2003). Insofern ist es nicht überraschend, dass adaptive E-Learning Systeme bis heute kaum verbreitet sind.

Obwohl ein Durchbruch adaptiver Lernsysteme aufgrund technischer Mängel bis heute nicht in Sicht ist, werden ihnen große Potenziale bei der Gestaltung von personalisierten Lernprozessen eingeräumt (Gütl, Barrios & Mödritscher, 2004). Insbesondere e-Learningansätze zum konstruktivistischen Lernen (Wilson & Lowry, 2000), zum *serial* oder *symetric Learning* (Jain, Howlett, Ischalkaranje & Tonfoni, 2002) und Ansätze zum *discovery* oder *managed Learning* (Lennon & Maurer, 2003) geben einen Ausblick auf die möglichen Potenziale neue-

rer Entwicklungen. Der Schlüssel zur Adaptionfähigkeit von Systemen ist in der effektiveren und effizienteren Nutzung von Interaktionen mit dem Nutzer zu sehen, was insbesondere auch eine erweiterte Nutzung von Kommunikationskanälen einschließt.

Die Abwicklung von Interaktionen zwischen Mensch und Computer erfolgt über mehrere verschiedene Ein- und Ausgabekanäle. Bei der Verbesserung multimodaler Computersysteme wird das Ziel angestrebt, die Bandbreite der Kommunikation zu erhöhen und sie natürlicher zu gestalten. Gleichzeitig muss indes auch angestrebt werden, die Kommunikation robuster zu machen und somit möglichst gut gegen Störungen abzusichern. Hierbei müssen verbale und nonverbale Möglichkeiten der Kommunikation genutzt werden. Eine bioanaloge Computersteuerung, wie sie hier über die Pupillenanalyse entwickelt wird, würde somit in den Bereich der nonverbalen Kommunikation fallen. Auch wenn der biopsychologische Kanal als Möglichkeit der Computersteuerung hier bisher eher isoliert betrachtet wurde, um die möglichen Potenziale dieser Kommunikationsform zu erforschen, ist er in der praktischen Anwendung lediglich als Bestandteil einer Gesamtkommunikation anzusehen. Das Gesamtsystem des multimodalen Computers stellt ein Werkzeug dar, welches das Verhalten des Nutzers erkennen und interpretieren soll, um ihn bei seinen Arbeits- und Lernprozessen zu unterstützen.

Menschen unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht voneinander. So sind sie in Bezug auf ihre Fähigkeiten und Fertigkeiten, ihr Vorwissen, ihre Erfahrungen, ihre individuellen Leistungsvoraussetzungen etc. sehr verschieden. Zum Ausgleich interindividueller Unterschiede der Computernutzer muss sich das System auf den Nutzer einstellen, seine individuellen Eigenschaften müssen erkannt und ausgewertet werden. Hierzu bedarf es eines adaptiven Systems, welches auf die nutzerspezifischen Eigenschaften reagieren kann. In Lernsituationen ergibt sich aus diesem Umstand die Notwendigkeit, individuell und differenziert auf den Lernenden einzugehen und ihm aufgrund seiner individuellen Rahmenbedingungen und Dispositionen

optimierte Lernangebote zu machen. Zahlreiche Erkenntnisse aus der Psychologie und der Pädagogik stützen diese Form der Didaktik (Edelmann, 2000). Nach Leutner (2002) wird entsprechend gängiger kognitionspsychologischer Auffassung unter Lernen der individuelle Prozess des Erwerbs und der Veränderung von Wissen, Fertigkeiten und Einstellungen verstanden. Der Prozess wird als individuell bezeichnet, da er im jeweils lernenden Individuum lokalisiert ist und sich nicht direkt beobachten lässt. In diesem Sinne ist die Kunst des Lehrens die optimale Passung zwischen dem internen Unterstützungsbedarf des Lernenden und dem externen Unterstützungsangebot in der Lernsituation (Skinner, 1954). Das Ziel besteht also letztlich darin, einen an den Lernenden angepassten (adaptierten) Lernweg realisieren zu können.

Hilfesysteme sind heutzutage bereits standardmäßig in Softwaresysteme integriert. Da sich Nutzer von Lernsystemen hinsichtlich ihres Bedarfs an Hilfestellungen stark voneinander unterscheiden, sind statische Hilfesysteme, wie sie derzeit Verwendung finden, unzureichend. Zum Abrufen dieser Hilfen ist eine Anforderung des Nutzers notwendig, d. h. es ist i. d. R. notwendig, dass der Nutzer seine Defizite korrekt erkennt und daraufhin die Hilfestellung abrufen und die notwendigen Maßnahmen trifft. Da dies in der Realität aber nicht selten zu Problemen führt, wurden adaptive Lernsysteme (als eine Form intelligenter User-Interfaces) entwickelt, die den Lernfortschritt selbstständig evaluieren und somit eine individuelle Steuerung des Programms aufgrund von Lernereigenschaften ermöglichen (vgl. Kerkau, 2002). Die Zielsetzung derartiger Systeme besteht somit darin, „[...] nicht nur die Benutzerfreundlichkeit (Usability), sondern darüber hinaus auch die Lernerfreundlichkeit (Learnability) durch angemessene Systemanpassungen (Adaptionen) auf einem möglichst hohen Niveau zu realisieren“ (Leutner, 2002, S. 117). Die Adaptivität multimedialer Lernumgebungen hängt also im Wesentlichen davon ab, „[...] inwieweit das System in der Lage ist, den Unterstützungsbedarf des Lernenden selbstständig zu diagnostizieren und das Ergebnis der Diagnose in geeignete angepasste Lehrtätigkeit umzusetzen“ (Leutner, 2002, S. 118). Lernsysteme werden heute meist

über Nutzermodellierung adaptiert, wie z.B. bei adaptiven Hypermediasystemen (Chin, 2001), statischen Nutzermodellen (Hothi & Hall, 1998), personalisierten Servern im WWW (Fink & Kobsa, 2000 und 2003) und Bayesian Algorithmen (Millan & Perez, 2002). Gütl et al. (2004) geben jedoch zu bedenken, dass die Validität dieser Modelle sehr beschränkt ist und sich diese Modelle nicht zur Verwendung in verwandten Anwendungskontexten eignen. Insofern scheinen geeignete Adaptionparameter bis heute das Haupthemmnis zur Weiterentwicklung adaptiver Lernsysteme darzustellen. Hier kann die Pupillometrie - in Verbindung mit Modellen menschlicher Informationsverarbeitung und mentaler Beanspruchung - wertvolle Informationen liefern, die zur Diagnose der Beanspruchung des Lerners in der jeweiligen Lernsituation nötig sind. Die Adaption des Lernsystems kann in sehr kurzen zeitlichen Abständen überprüft und aktualisiert werden. Lernprozesse werden in Form eines geschlossenen Regelkreises (closed-loop-control) umgesetzt, wobei die unmittelbaren Ergebnisse der Lehrmaßnahme auf den Lerner evaluiert und zum Lehrsystem rückgekoppelt werden, wo sie zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung stehen. Nutzerprofile können neben dem Verhalten (z.B. dem Blickverhalten) über eine systematische Pupillenanalyse um die Beanspruchungsdimension erweitert werden.

Nach Totterdell und Rautenbach (1990) ist mit dem Begriff der Adaptivität gemeint, dass das genutzte System über generalisierbare Beschreibungsmodelle verfügt, die für verschiedene Nutzer unterschiedlichen Output bereithalten. Über eine Schnittstelle werden anhand festgelegter Kriterien nutzerseitige Bedürfnisse erfasst. Somit lässt sich das Nutzerbedürfnis klassifizieren und der entsprechende Output generieren.

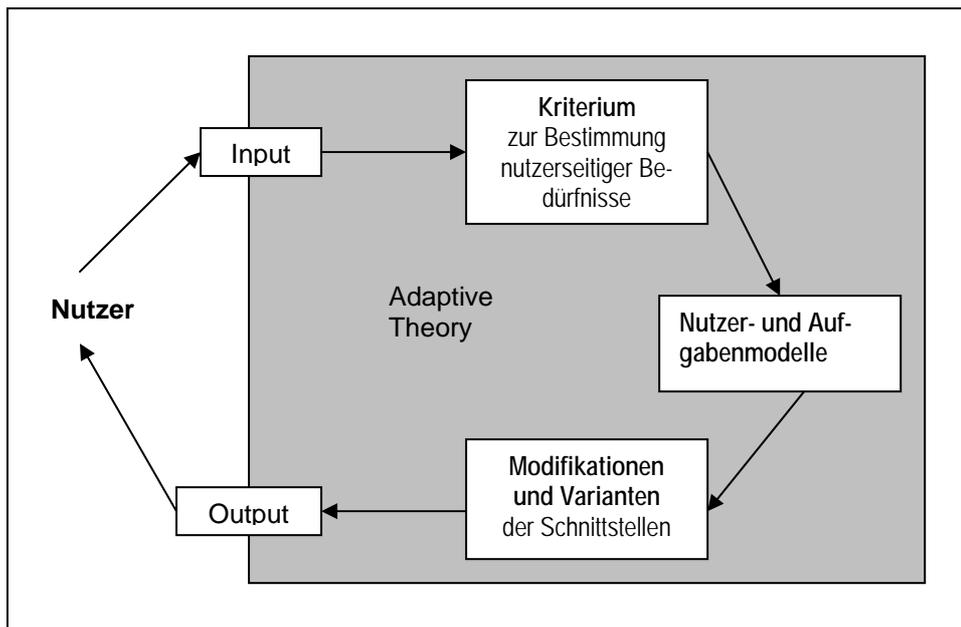


Abbildung 19: Theorie adaptiver Systeme nach Totterdell & Rautenbach (1990)

Die Abbildung 19 zeigt die Verbindungen und Interaktionen eines adaptiven Systems. Aus der Analyse der Interaktionen des Nutzers mit dem System werden gemäß der festgelegten Kriterien Nutzer- und Aufgabenmodelle zugewiesen. Aus dieser Zuweisung können Modifikationen oder Varianten des Inhalts über die Schnittstelle an den Nutzer übertragen werden. Dessen Reaktion wird nun wieder analysiert und der Vorgang der Anpassung wiederholt sich. Für die physiologische Prozesssteuerung kann das Modell nach Totterdell und Rautenbach (1990) modifiziert und wie folgt weiter ausdifferenziert werden.

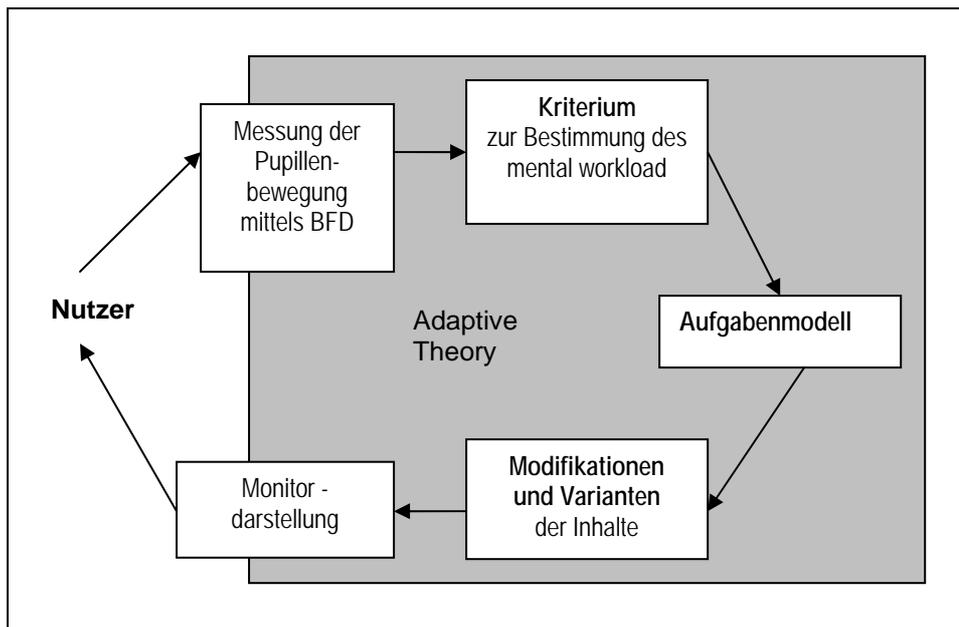


Abbildung 20: Modifiziertes Modell des adaptiven Modells von Totterdell & Rautenbach (1990)

Die Inhaltsdarbietung des Lehrmaterials führt zu einem Zustand erhöhter mentaler Beanspruchung beim Nutzer. Durch die Analyse der Pupillenbewegung mittels einer biopsychologischen Schnittstelle (Bio-Feedback-Device) lässt sich der Zustand der mentalen Beanspruchung erfassen und mit den vorher definierten Kriterien abgleichen. Als Resultat dieses Abgleichs können die Inhalte entsprechend modifiziert und an den Monitor als primäres Ausgabemedium übermittelt werden. Die Darstellung der Inhalte am Monitor ist nun dem Level der mentalen Beanspruchung des Nutzers angepasst und die Schleife wiederholt sich. Die Inhalte werden hierbei über eine Auswahl von Varianten angepasst. Es bestehen mehrere Versionen der gleichen Inhalte in verschiedenen Schwierigkeits-, Komplexitäts- und Darstellungsstufen.

Sicherlich ist die Gewinnung von verlässlichen Informationen zur Bestimmung der Ausprägung festgelegter Kriterien der schwierigste Teil bei der Entwicklung adaptiver Systeme.

Durch die Vermessung der Pupillenbewegung des Nutzers wird auf Regelsätze geschlossen,

aus denen der mentale Zustand des Nutzers abgeleitet werden kann. Hierbei entscheiden die Güte und die Verallgemeinerbarkeit dieser Regelsätze über eine adäquate Analyse des Benutzerzustandes. Wird eine Systemanpassung aufgrund einer falschen Annahme vorgenommen, so wird das Ergebnis dieser falschen Anpassung mit hoher Wahrscheinlichkeit kontraproduktiv für den Nutzer sein. Das Problem der Generierung verlässlicher Daten durch ein System und deren Interpretation in Bezug auf die mentale Beanspruchung des Nutzers ist besonders schwerwiegend. Aus diesem Grunde existieren bislang auch nur wenig adaptive Systeme und Teilsysteme in diesem Sektor.

In Anlehnung an die theoretischen Modelle des e-Learning haben sich im Wesentlichen vier Ansätze des e-Learning herausgebildet, der *macro-adaptive-approach*, der *aptitude-treatment-interaction-approach*, der *micro-adaptive-approach* und der *constructivistic-collaborative-approach* (Mödritscher, Garcia-Barrios & Gütl, 2002). Während in den ersten drei Ansätze der Fokus auf den *content* und die Lernprozesse gelegt wird, wird im letzten Ansatz auf neuere konstruktivistische Lerntheorien und adaptive Kollaboration Bezug genommen. Aus der Kritik an computerbasierten Lernsystemen mit ihrer geringen Adaptionfähigkeit im Vergleich zu den vielen Möglichkeiten eines menschlichen Lehrers gewannen adaptive kollaborative und konstruktivistische Systeme immer mehr an Bedeutung (Mödritscher et al. 2002). Akhras und Self (2000) sehen in intelligenten Systemen eine reichhaltige Hilfe für das konstruktivistische Lernen, sofern Mechanismen wie *knowledge representation*, *reasoning* und *decision making* berücksichtigt werden.

Die technische Umsetzung dieser Anforderungen führte zur Entwicklung Intelligenter Tutorieller Systeme (ITS). Diese Systeme basieren auf den Technologien der künstlichen Intelligenz (Shute & Psotka, 1995), wobei der Versuch im Mittelpunkt steht, einen Lernprozess zu gestalten, der die Vorteile einer natürlichen Schüler-Lehrer Beziehung beinhalten soll. Das

ITS dient sowohl der Darbietung des Lerninhalts als auch der Bedienung individueller Lernstrategien und Mechanismen zur Erkennung, was der Lerner bereits weiß und was er noch nicht weiß. Nach Mödritscher et al. (2002) werden diese Anforderungen in folgenden Komponenten umgesetzt: Ein *expertise module* evaluiert die Performanz des Lerners und generiert den Lerninhalt, während ein *student-modeling module* den momentanen Status und die individuellen Lernstrategien einschätzt. Ein *tutoring module* wählt das Instruktionsmaterial aus und sorgt für die optimale Präsentation. Tennyson & Christensen (1988) schlagen ein Zweistufenmodell der adaptiven Instruktion vor, welches *micro-adaptive* und *aptitude variables* kombiniert. In diesem Modell werden die Bedingungen der Instruktion auf der Grundlage der individuellen Lernereigenschaften durch das *expertise module* evaluiert. Das *tutoring module* übernimmt den zeitnahen Abgleich der Instruktionsbedingungen in Form der Adaption der Menge und Dichte der dargebotenen Informationen, der Formate und der Instruktionssequenzen. Die *micro-level adaption* sorgt für die optimale Beanspruchung als Voraussetzung zur Leistungsoptimierung. Dieser Prozess ist *response sensitive* und somit beispielsweise durch die pupillometrische Evaluation des mentalen Beanspruchungsniveaus sehr gut umsetzbar.

Eine beispielhafte Umsetzung eines solchen adaptiven Lernsystems entwickelt derzeit die Technische Universität Graz in Kooperation mit dem FH Joanneum (Laufzeit 2003-2007) mit dem Projekt AdELE (Barrios et al. 2004). Im Folgenden wird anhand dieses Beispiels eine mögliche Anwendung pupillometrischer Prozesssteuerung entwickelt.

5.3 Implementation am Beispiel des Projekts AdELE (A Framework for Adaptive E-Learning through Eye Tracking)

Gemäß dem Standard der ADL (Advanced Distributed Learning Initiative, 2001) sollte eine Lernumgebung sowohl semantische Adaptivität als auch Adaptivität als Personalisierung leisten können. Damit diese beiden Vorgaben auch eingehalten werden können, wird in dem Projekt AdELE versucht, eine mehrschichtige Steuerung umzusetzen (Barrios et al. 2004). Ein wesentlicher Pfeiler dieser Steuerung wird durch Eye-Tracking realisiert. Mittels dieser Verhaltensdaten soll der Content an die Bedürfnisse des Users angepasst werden.

Die Grundlage dieses Projekts ist der Versuch, die Vorteile eines *real-time content tracking* mit der Ableitung von Echtzeit-Verhaltensdaten zu kombinieren. In Übereinstimmung mit Conlan et al. (2002) sind hierzu deutlich höher aufgelöste Daten notwendig, als diese z.B. beim Monitoring von *mouse movements* oder *click rates* zur Verfügung stehen. Hierfür propagieren die Autoren moderne Eye-Tracking Techniken, wie z.B. die Sakkaden- und Fixationsanalyse und nicht zuletzt auch die Lidschlussanalyse. Das Ziel dieser Analyse ist Überwachung des Lernerverhaltens, also die Identifizierung von *areas of focus*, von Fixationszeiten auf bestimmte Objekte, und von Sequenzen, mit denen ein Inhalt rezipiert wird (Preis & Müller, 2003). Hierdurch sollen Informationen über den Lerner abgeleitet werden, die Strategien der Nutzer bei der Arbeit mit einer e-Learning-Plattform sichtbar machen. An diesen *pattern* können z.B. Desorientierung und suboptimale Lernstrategien erkannt und verhindert werden. Die Autoren weisen aber auch darauf hin, dass neben den Verhaltensdaten ein *user feedback* in die Analyse eingehen soll, und dass schließlich der User die oberste Gewalt bei der Steuerung behalten soll. Das Hauptziel ist in der Assistenz des Systems zur Verbesserung des Lernverhaltens zu sehen.

Im Rahmen dieser Arbeit ist besonders hervorzuheben, dass die mentale Beanspruchung des Nutzers gleichwohl in die Analyse eingeht, hierzu soll jedoch Sakkadengeschwindigkeit ausgemessen werden. Nach Galley (2001) kann diese zwar unter bestimmten Umständen zur Messung der mentalen Beanspruchung eingesetzt werden, doch ist die Ableitung nicht problemlos umzusetzen (vgl. Kap. 4.1.2, Abschnitt I). Die Sakkadengeschwindigkeit ist die höchste Geschwindigkeit, die im menschlichen Organismus überhaupt vorkommt. Sie beträgt zwischen 200 und 700 Grad in der Sekunde (Salvucci & Goldberg, 2000). Eine Ableitung kann also nicht ohne weiteres mit einem herkömmlichen noninvasiven Eye-Tracking-Device vorgenommen werden. In der Forschung werden Sakkadenanalysen in der Regel mit Haftglas-magnetspulen oder anderen invasiven Methoden (EOG) durchgeführt. Hinzu kommt noch, dass die Sakkaden auch durch den visuellen Stimulus beeinflusst werden, also mit der Vorlage interagieren. Nach Rayner (1978) ist die Sakkade sogar mit der Fixation assoziiert. Die Interpretation unter diesen Bedingungen dürfte somit sehr schwierig werden. Als weitaus robusterer Indikator bietet sich hier die Pupillenbewegung an, so wie sie im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde. Dabei wurde deutlich, dass anhand der Pupillenanalyse der mentale Beanspruchungszustand, welcher durch die Systemanforderung verursacht wird, anhand der artefaktbereinigten Pupillenweitung insbesondere unter Echtzeitbedingungen mittels eines videobasierten Eye-Tracking Geräts ableitbar ist. Das hierbei verwendete Stimulusmaterial findet seine Entsprechung in Lernumgebungen, da Text, Bild, und logische Symbolsysteme untersucht wurden. Die notwendige Schnittstellenumsetzung konnte anhand des beschriebenen Programms *Workload Analyzer* bereits softwaretechnisch gut umgesetzt werden. Eine Integration eines solchen Pupillometriemoduls bietet sich somit für eine komplexe Lernumgebung, wie sie im Projekt AdeLE Framework entwickelt wird, an. Eine Umsetzung erscheint sinnvoll und unproblematisch, um die *user profiling database* um einen Indikator zur mentalen Beanspruchung zu ergänzen, der der Sakkadenanalyse derzeit an empirischer Evidenz weit überlegen ist.

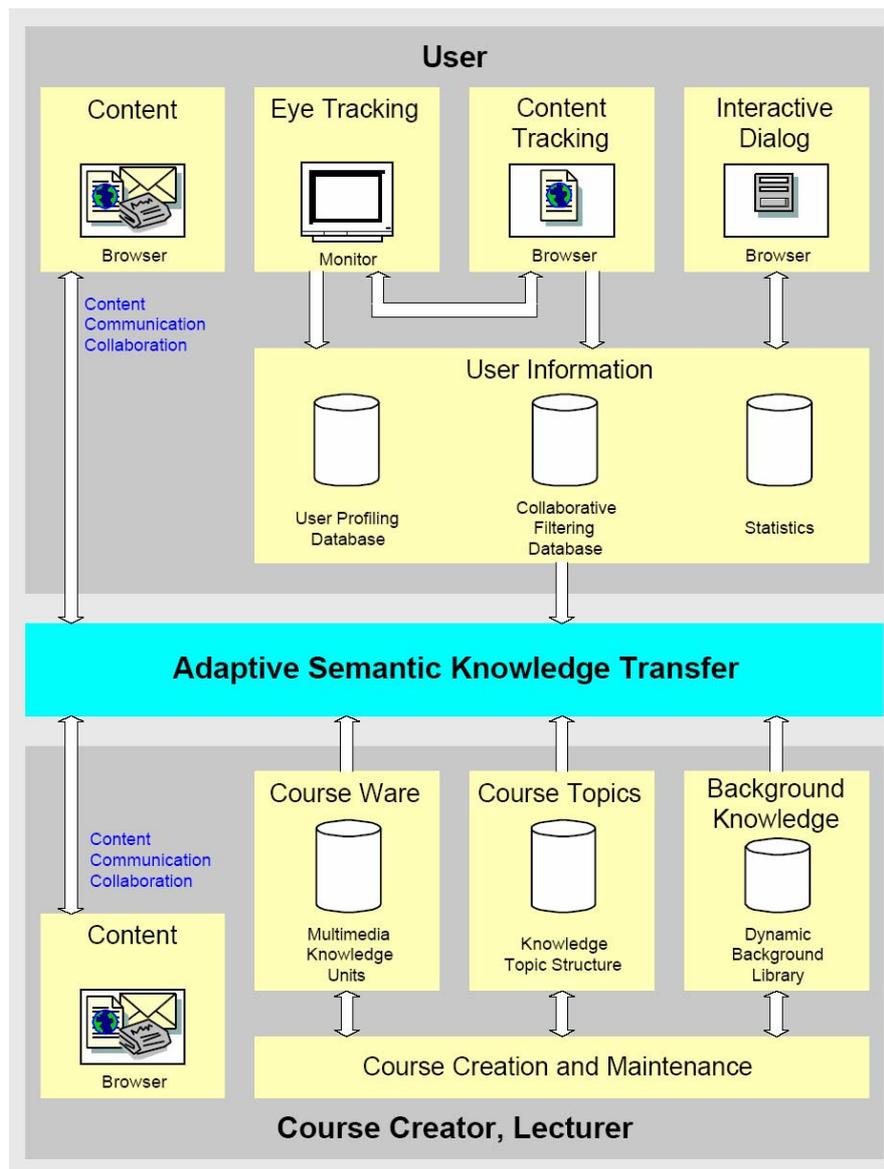


Abbildung 21: Die Architektur des AdeLE Framework nach Barrios et al. (2004)

Das Kernmodul des AdeLE Framework ist das *Semantic Knowledge Transfer Module* (ASKTM). Dieses Modul koordiniert alle angeschlossenen Module, alle Anfragen und alle Datenübermittlungen. Es erstellt Inhalte und Meta-Informationen. Autoren und Tutoren sind über separate Interfaces dem System zugeordnet. Nutzerzentrierte Module für das Profiling sind auf der Abbildung 21 im oberen rechten Bereich dargestellt. Das Kernmodul zur Datengewinnung ist hierbei das *Eye-Tracking Module (ETM)* und das *Content-Tracking Module (CTM)*. Beide Module stellen dem System Daten zum Nutzerverhalten zur Verfügung. Das

ETM bietet dem System Hinweise zur Konzentration und zur mentalen Beanspruchung des Nutzers, aus deren Kombination als Effizienz des Prozesses des Wissenstransfers abgeleitet wird. An dieser Stelle könnte eine Pupillometrie-Schnittstelle in das Verfahren integriert werden. Die Informationen zum Nutzerverhalten und der Nutzer-System-Interaktion werden im *User Information Module (UIM)* zusammengetragen. Das *Interactive Dialog Module (IDM)* erlaubt dem Nutzer Einstellungen für das System aktiv und selbstständig zu setzen und zu verändern. Das UIM umfasst drei verschiedene Datenbanken mit Nutzerinformationen unterschiedlicher Qualität, die *User Profiling Database (UPD)*, die *Collaborative Filtering Database (CFD)* und die *Statistic Database (SD)*. Die UPD hält hochaufgelöste Daten zum Nutzerverhalten vor (z.B. Sequenzen von rezipierten Objekten, Informationseinheiten etc. sowie Daten zur mentalen Auslastung), aber auch abstraktere Daten, wie beispielsweise das erreichte Expertiselevel für einzelne Inhaltsbereiche. Nutzerprofile und Verhaltenstypen werden im CFD gespeichert. Durch das *collaborative filtering* der Daten ist das System in der Lage, selbstständig spezielle Informationseinheiten aus den vorhandenen Medien zu generieren.

Die Autoren und Tutoren betreffenden Module sind im rechten unteren Bereich der Abbildung 21 angeordnet. Das Kursmanagement wird durch das *Course Creation and Maintenance Module (CCMM)* durchgeführt. Dieses Modul koordiniert und kontrolliert das *Coursware Module (CM)*, das *Course Topics Module (CTM)* und das *Background Knowledge Module (BKM)*. Das CM organisiert Informationseinheiten und die verschiedenen Medientypen und ein umfangreiches Set von Metadaten. Einerseits kann das CTM Kursinhalte als Definition von Subebenen aus Metadaten organisieren, andererseits erlaubt das CTM die Organisation der Kursstruktur mit den Beziehungen der einzelnen Subebenen zueinander. Das BKM liefert zusätzlich dynamische Informationen zum Lernprozess.

Aus der Sicht des Lernalers bietet das ADELE System eine adaptive Lernumgebung mit personalisierten Zugangswegen zum Inhalt. Der Inhalt wird angepasst auf das Vorwissen des Lernalers, den Lerntyp, den Lernfortschritt, bevorzugte Medientypen etc. Das Erfassen von Verhaltensvariablen dient dabei dem Aufdecken von Verständnisschwierigkeiten beim Nutzer und bietet somit die Möglichkeit, alternative Zugangswege und Medien zu den Inhalten anzubieten. Dabei überwacht das System das Interaktionstempo und passt sich dadurch den Nutzerbedürfnissen an.

Aus der Sicht des Instructors bietet das System zahlreiche hilfreiche Möglichkeiten, so ist die *courseware* vom *content* getrennt, so dass die Definition von Metabeschreibungen ausreicht, um die Beziehungen der Inhalte untereinander zu definieren. Der Inhalt folgt dann automatisch einem Styleguide. Die *dynamic background library* hilft dem Lerner Inhalte zu vertiefen und dem Instructor neue Entwicklungen in der Inhaltsdomäne zeitnah zu integrieren. Das Konzept der *dynamic background library* ist gut dokumentiert (Gütl, 2002) und ein Prototyp ist bereits einsatzfähig (Garcia-Barrios, 2001).

Unklar bleibt in dem beschriebenen Projekt wie mit dem Problem der Gleichzeitigkeit von Informationen, die durch das System zu interpretieren sind, umgegangen wird. Sämtliche Daten aus den verschiedenen Input-Kanälen des Computers müssen durch das System aufbereitet und gegen die auftretenden Laufzeitunterschiede semantisch gruppiert und in eine Eindeutigkeit gebracht werden. Bereits innerhalb des Verarbeitungsprozesses muss hierbei entschieden werden, wie die interpretierten Daten aus den Input-Modalitäten auf einen vorhandenen Satz an Funktionen und Parametern übertragen werden. Das Problem der Synchronisation der eingehenden Daten kann als technisches Problem angesehen werden. Weitaus komplexer ist das Problem der Interpretation von Informationen aus den zusammengesetzten Daten der verschiedenen Input-Modalitäten. Zur validen Interpretation bedarf es zusätzlich der Metainfor-

mation, welche die Relation der einzelnen Daten zueinander bestimmt. Oviatt (1999) bemerkt hierzu, dass das Korrespondieren verschiedener Datenpakete nicht nur von der Nutzung der verschiedenen Eingabemodalitäten abhängt, sondern auch bezüglich der zeitlichen Gliederung individuell unterschiedlich ist. Noch schwerwiegender wird das Problem, wenn unterschiedliche Modalitäten widersprüchliche Informationen weitergeben. Hier muss nun entschieden werden, welcher Information in welcher Situation am ehesten Wahrheitswert zugestanden wird.

Zum jetzigen Zeitpunkt lassen sich diese Fragen noch nicht abschließend beantworten. An dieser Stelle muss noch weitere Forschung zeigen, wie diese Probleme zu lösen und schließlich technisch umzusetzen sind. Es lässt sich aber festhalten, dass die Pupillometrie eine hervorragende Ergänzung eines solchen Systems darstellt und dazu beitragen kann, eine derart komplexe Lernumgebung in ihrer Adaptionfähigkeit zu verbessern.

5.4 Weiterer Forschungsbedarf

Das Bio-Feedback-Device stellt einen ersten Schritt zur automatisierten Analyse von Biometriedaten in der Prozesssteuerung dar. In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, welches Potenzial solchen bioanalogen Schnittstellen zukünftig zukommen dürfte, sofern diese kontinuierlich weiterentwickelt werden. Da es sich hierbei um eine prototypische Entwicklung handelt, ist die Zuverlässigkeit naturgemäß auf die äußeren Bedingungen des Entstehungsrahmens reduziert. Um das System von diesen Bedingungen unabhängig zu machen sind weitere Forschungsanstrengungen zu unternehmen.

Neben den bereits unter Kapitel 4.3 (Abschnitt II) erwähnten technischen Verbesserungen in der Ableitung der Beleuchtungsvariablen ist es notwendig, im Zusammenhang mit einer Spotlichtmessung auch das Pupillenverhalten bei Verwendung weiterer Monitortypen zu untersuchen. Begleitend könnte hierbei auch eine umfassende Berücksichtigung von Einflüssen des Umgebungslichts Inhalt weiterer Forschungsaktivitäten sein.

Ein besonders wichtiger Punkt ist die Analyse von Überforderungsreaktionen. Hierzu konnten bereits einige interessante Ansätze im Kapitel 3.5.2. entwickelt werden. Zu einer systematischen Analyse von Überforderungen reichen diese Daten jedoch nicht aus. Aus den bisherigen Untersuchungen wurde auch deutlich, dass die Effektstärke mentaler Pupillenreaktion von der Umgebungshelligkeit beeinflusst wird. Im Experiment 3 konnten beispielsweise generell höhere Effektstärken im hellen Umfeld gemessen werden, da hier die parasymphatische Hemmung im Edinger-Westphal-Komplex zusätzlich pupillenerweiternd wirkt (Steinhauer et al., 2004). Somit scheint es äußerst sinnvoll zu sein, einen Korrekturfaktor für die Hemmung der parasymphatischen Aktivität zu ermitteln, welcher den gemessenen mentalen Effekt auf die Pupille von der lichtbedingten Ausgangsgröße der Pupille abhebt und somit über diese Bedingungen vergleichbar macht.

Da in dieser Arbeit das Hauptaugenmerk auf die Analyse mentaler Beanspruchungssituationen gerichtet war, konnte das Thema Emotionen lediglich marginal behandelt werden. Ohne Frage ist die Pupillenreaktion auf emotionale Reize ein interessantes Forschungsgebiet (Siegle et al., 2004) und sollte zukünftig mehr Beachtung finden. Interessante Korrelationen könnten sich zwischen der Pupillenweite und den Daten des International Affective Pictural System (IPAS) von Lang, Bradley und Cuthbert (1997) ergeben. Während sich die Amplitude emotionaler Reaktionen wahrscheinlich sehr gut im Pupillenspiel nachvollziehen lässt, ist die Valenz von Emotionen nicht zweifelsfrei an den Pupillen zu erkennen. Aufbauend auf den Ar-

beiten von Lang, Bradley und Cuthbert (1990), könnte eine Perspektive in der Analyse des Lidschlussverhaltens zu finden sein. Nach Birbaumer et al. (2000) ist davon auszugehen, dass sich die Latenzzeit des einsetzenden Lidschluss (*startle reflex*) je nach Polung der Emotion unterscheidet, wobei Lidschlüsse bei negativen Emotionen mit einer Latenz von 30 ms bis 50 ms auftreten. Bei positiven Emotionen bleibt dieser Lidschluss aus.