Development of a Multimodal, Universal Human-Machine-Interface for Hypovigilance-Management-Systems

A thesis approved by the School of Mechanical Engineering ("Fakultät Maschinenbau") of the University of Stuttgart, in partial fulfillment of the requirements for the academic degree Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Von der Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Submitted by:	Lorenz Hagenmeyer Dipl.-Ing., M.Sc.ME (Purdue Univ.)
From:	Stuttgart (Germany)

Main reviewer (Hauptberichter):	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dieter Spath
Co-reviewer (Mitberichter):	Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Day of submission:	April 10, 2007
Day of oral examination:	August 13, 2007

Institut for Human Factors and Technology Management (IAT), 2007
Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), 2007

Contents

Abbreviations **xxi**

0. Zusammenfassung **xxv**

1. Introduction **1**
1.1. Structure of the Work . . . 3

2. Sleep, Sleepiness, and Influencing Factors **5**
2.1. Definition of Sleepiness . . . 5
2.2. Basic Models of the Sleep-Wake-Regulation . . . 7
2.2.1. The Two-Process Model . . . 8
2.2.2. The Four-Process Model . . . 9
2.2.3. Model for the Regulation of Sleepiness . . . 9
2.3. Main Influencing Factors for Sleepiness . . . 9
2.3.1. Sleep Drive . . . 9
2.3.1.1. Shift Work . . . 10
2.3.1.2. Sleep Deprivation . . . 10
2.3.2. Countermeasures . . . 11
2.3.2.1. Sleep, Naps, and Breaks . . . 12
2.3.2.2. Drugs . . . 12
2.3.2.3. Environmental Stimulation . . . 12
2.3.2.4. Behavioral Countermeasures . . . 13
2.4. Measurement of Sleepiness . . . 13
2.4.1. Subjective Measures of Sleepiness . . . 13
2.4.2. Objective Measures of Sleepiness . . . 15
2.4.2.1. Behavioral Measures of Sleepiness . . . 15
2.4.2.2. (Electro-)Physiological Measures of Sleepiness . . . 16

3. State of the Art: Research, Technology, and Application **17**
3.1. Basic Elements of a Hypovigilance-Management-System . . . 17
3.1.1. Focus of this Work . . . 18
3.2. User Groups of Hypovigilance-Management-Systems . . . 19
3.2.1. Operators vs. Drivers . . . 19
3.2.2. Mobile vs. Immobile Users . . . 20
3.2.3. Professional vs. Private Users . . . 20
3.3. HMI Requirements of a Hypovigilance-Management-System . . . 20
3.3.1. Communication Strategy . . . 21
3.3.1.1. Normal Mode . . . 21
3.3.1.2. Warning Mode . . . 21
3.3.1.3. Vigilance maintenance Mode . . . 24

3.3.2. HMI-Element Design . . . 24
3.3.2.1. Status Indicators . . . 25
3.3.2.2. Warning Signals . . . 25
3.3.2.3. Screen Displays . . . 28
3.3.2.4. Speech Displays . . . 29
3.3.2.5. Manual Input Devices . . . 29
3.3.3. Usability . . . 30
3.3.4. Personalization of the Human-Machine-Communication . . . 30
3.3.4.1. Sensors and Algorithms . . . 30
3.3.4.2. Communication Strategy . . . 31
3.3.4.3. HMI-Elements . . . 31
3.3.5. Universality . . . 31
3.4. Existing Hypovigilance-Management-Systems . . . 31
3.4.1. Engine Driver Vigilance Telemetric Control System (EDVTCS) . . . 32
3.4.2. MicroNod Detection System (MINDS™) . . . 33
3.4.3. Eye Tracking Alertness Monitor . . . 34
3.4.4. ABM Drowsiness Monitoring Device (DMD) . . . 34
3.4.5. Vehicle Driver's Anti-Dozing Aid (VDADA) . . . 35
3.4.6. Driver Fatigue Monitor DD850 . . . 36
3.4.7. SafeTRAC . . . 36
3.4.8. Advisory System for Tired Drivers (ASTiD) . . . 37
3.4.9. SAM G-3™ . . . 38
3.4.10. TravAlert® . . . 38
3.4.11. ARRB Fatigue Monitoring Device . . . 39
3.4.12. Actiwatch Alert . . . 40
3.4.13. Doze Alert . . . 41
3.4.14. Stay Alert . . . 41
3.4.15. Nissan Safety Drive Advisor (SDA) . . . 42
3.4.16. Photo Driven Alert System . . . 43
3.4.17. Siemens Driver Attention System . . . 43
3.4.18. AWAKE Hypovigilance-Management-System . . . 44
3.5. Rating of Existing Systems . . . 46

4. Approach and Innovation **51**
4.1. Hypotheses . . . 51
4.2. Method and Innovation . . . 52

5. Development of a Universal, Multimodal HMI for HVMSs **55**
5.1. Theory Driven Pre-Development of the HMI . . . 55
5.1.1. Warning Strategy . . . 55
5.1.2. HMI-Elements . . . 57
5.2. Application Requirements Survey . . . 58
5.2.1. Survey Method . . . 58
5.2.1.1. Selection of Application Scenarios . . . 58
5.2.1.2. Choice of Respondents . . . 59
5.2.1.3. Structure and Content of the Questionnaire . . . 59
5.2.1.4. Method for Data Analysis and Requirements Definition . 60

5.2.2. Requirements for the Warning Strategy 60
5.2.3. Requirements for the HMI Communication Pathways 62
5.2.3.1. Warning Signals to Catch Attention 62
5.2.3.2. Complex Information 64
5.2.3.3. User Input to the System 64
5.2.4. Requirements for the HMI-elements 65
5.2.4.1. Status Indicator 65
5.2.4.2. Device for Vibrotactile Warning Signals 65
5.2.4.3. Device for Acoustic Output 66
5.2.4.4. Input Device 66
5.3. Design of the HMI 66
5.3.1. Definition of Requirements 67
5.3.2. Conceptualization 67
5.3.3. Design and Composition of the Warning Strategy 68
5.3.4. Design and Composition of the HMI-Elements 71
5.3.4.1. Wrist Worn Device 71
5.3.4.2. Belt Unit 72
5.3.4.3. Shoulder Unit 77
5.4. Implementation of the HMI 78
5.4.1. Warning Strategy 78
5.4.2. HMI-elements 78

6. Evaluation of the HMI 81
6.1. Experimental Work Task 82
6.1.1. Resistance Welding of Rim Bands 83
6.1.1.1. Welding Procedure 83
6.1.1.2. Dual Task 85
6.1.1.3. Possible Errors 85
6.1.2. Selection of Tests for the Experiment 85
6.1.2.1. Psycho-motor Test 86
6.1.2.2. Divided Attention Test 89
6.1.2.3. Tests of Attentional Performance 92
6.2. Method 94
6.2.1. Participants 95
6.2.2. Laboratory Setting 96
6.2.2.1. Factory Setting 96
6.2.2.2. Rim Band Repositioning Corner 97
6.2.2.3. Control Room 97
6.2.3. Procedure 98
6.2.3.1. Preparation 98
6.2.3.2. Evening Test 100
6.2.3.3. Time Between the Evening Test and the Morning Test . 100
6.2.3.4. Morning Test 100
6.3. Results 101
6.3.1. Factory Test 101
6.3.1.1. Difference Between Evening and Morning Test 101
6.3.1.2. Differences Between Treatment Groups in the Evening Test 103

6.3.1.3. Differences Between Treatment Groups in the Morning Test 105
6.3.1.4. Characteristics of the Participants 108
6.3.2. Karolinska Sleepiness Scale (KSS) 109
6.3.2.1. Difference in Rating Between Evening and Morning Test 109
6.3.2.2. Differences Between Treatment Groups in Evening Test . 110
6.3.2.3. Differences Between Treatment Groups in Morning Test . 110
6.3.3. Tests of Attentional Performance (TAP) 112
6.3.3.1. Difference in Performance Between Evening and Morning Test 112
6.3.3.2. Differences Between Treatment Groups in Evening Test . 113
6.3.3.3. Differences Between Treatment Groups in the Morning Test 113
6.3.4. Additional Analysis 114
6.3.5. Results of the Usability and Acceptance Questionnaire 116
6.3.5.1. Usability 116
6.3.5.2. Acceptance 117
6.3.5.3. Motivation 117
6.4. Discussion 117
6.4.1. Discussion of the System Development 118
6.4.2. Discussion of the System Evaluation Experiments 118
6.4.2.1. Experimental Sample 118
6.4.2.2. Design of the Experiment 118
6.4.2.3. Evaluation of the HMI 119
6.4.2.4. General Observations 120
6.5. Conclusions 120
6.5.1. Outlook on Further Research 122

7. Summary **123**

A. Overview and Analysis of Existing Hypovigilance-Management-Systems **141**
A.1. Legend to table A.1 “Analysis of the existing Hypovigilance-Management-Systems” 143

B. Questionnaire for the Requirements Analysis for the HMI **145**

C. Requirements List for the Design of the HMI **155**

D. Morphological Boxes for the Design of the HMI **159**
D.1. Morphological Boxes for Informational Aspects of the HMI 159
D.2. Morphological Boxes for Hardware Aspects of the HMI 163

E. Value Benefit Analysis of the Design Variants **167**
E.1. Informational Aspects 167
E.2. Hardware Aspects 171

F. Summary of the Communication Strategy **175**
F.1. Thresholds of the State Transitions 175
F.2. Summary of System Actions 176

G. Usability Questionnaire of the Vibration Experiment **179**

H. Questionnaire for Demographic and Chronobiological Data **181**

I. Usability and Acceptance Questionnaire of the Evaluation Study **185**

0. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung und Evaluation einer multimodalen, universellen Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) für Hypovigilanz-Management-Systeme beschrieben. Die Grundfunktion solcher Systeme besteht darin, den Vigilanz-Zustand eines Nutzers zu messen und bei kritischen Vigilanz-Zuständen den Nutzer zunächst situationsspezifisch vor dem erhöhten Risiko zu warnen und ggf. zu versuchen, ihn kurzfristig wach zu halten, bis er seine gefährliche Tätigkeit unterbrechen kann.

Als Hintergrund sei dargestellt, dass Hypovigilanz oder Schläfrigkeit in Arbeitssituationen in den westlichen Nationen stetig zunimmt. Hierzu tragen verschiedene Faktoren bei. Ein entsprechendes Beispiel ist die aus der Globalisierung resultierende „24h-Gesellschaft“, die viele Menschen veranlasst, Schlaf zugunsten anderer Aktivitäten zu opfern. Ein weiteres Beispiel ist die Schichtarbeit. So erfordern dort konkurrenzfähige, hocheffiziente Produktionsprozesse durch ihren hohen und kapitalintensiven Automatisierungsgrad einen „rund um die Uhr“-Betrieb. Weiterhin ist der starke Anstieg von Schlafstörungen in der westlichen Gesellschaft zu nennen. Alle diese Faktoren erzeugen Schlafdefizite und damit Hypovigilanz.

Hypovigilanz ist u.a. von Einschränkungen der Aufmerksamkeit sowie der Konzentrationsfähigkeit begleitet. In der Folge sind die Fähigkeiten aufmerksamkeitsbasierte Tätigkeiten effektiv zu verrichten, die Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung sowie die Qualität von Entscheidungsprozessen beeinträchtigt. Damit führt Hypovigilanz zu einem stark erhöhten Unfallrisiko.

Hypovigilanz ist eine der Hauptunfallursachen in verschiedenen Arbeitsumfeldern, wie z.B. im Verkehr oder in Produktionsbetrieben mit Schichtarbeit. Angemessene Gegenmaßnahmen können das Unfallrisiko senken. Zunächst sollten primäre Maßnahmen ergriffen werden, die die Entstehung von Hypovigilanz grundsätzlich vermeiden. Hierzu gehören u.a. die Gestaltung von Schichtarbeitsplänen nach arbeitswissenschaftlichen bzw. chronobiologischen Gesichtspunkten und die Behandlung von Schlafstörungen. Trotz solcher primärer Maßnahmen kann die Entstehung von Hypovigilanz jedoch nicht immer ausgeschlossen werden. In diesen Fällen können Hypovigilanz-Management-Systeme maßgeblich zur Senkung des Unfallrisikos beitragen.

Um ein solches System zu gestalten wurden daher zunächst die der Hypovigilanz zugrunde liegenden Mechanismen untersucht. Es wurde dargestellt, dass in der aktuellen Literatur die entsprechenden Begrifflichkeiten inkonsistent verwendet werden. Daher wurden diese für die vorliegende Arbeit konsistent definiert und ein neuer, holistischer Vigilanzbegriff eingeführt, welcher für die Ausführung arbeitswissenschaftlich relevanter Aufgaben notwendige kognitive Sub-Konstrukte zusammenfasst. Auf der Basis des Schlafmodells von Borbély (1982) wurde ein einfaches Modell entwickelt, das den Hypovigilanz-Zustand einer Person als Funktion zweier vom circadianen Rhythmus moderierter, gegenläufiger Kräfte, dem *Schlafdruck* und dem *Wachdruck*, beschreibt. Die Haupteinflussfaktoren für Schlaf- und Wachdruck wurden beschrieben. Dabei wurde betont, dass die einzig langfristig effektive Gegenmaßnahme zu Hypovigilanz das Schlafen ist, woraus

geschlossen wurde, dass Hypovigilanz-Management-Systeme darauf abzielen müssen, den Nutzer zu einer Unterbrechung seiner risikoreichen Tätigkeit zu bewegen und zu schlafen oder zumindest einen sog. *Powernap* zu machen. Weiterhin wurde abgeleitet, dass einzelne, akut wirkende Gegenmaßnahmen evtl. zur kurzfristigen Unterstützung des Nutzers sinnvoll sein können.

Es wurde eine Analyse der Produktanforderungen von Hypovigilanz-Management-Systemen durchgeführt. Hierzu wurden zunächst die potentiellen Nutzer solcher Systeme nach ihrem Mobilitätsgrad und der Systemdynamik ihres Arbeitssystems kategorisiert und Charakteristika von Privatpersonen im Vergleich zu professionellen Nutzern aufgezeigt. Die Analyse ergab, dass ein universelles Hypovigilanz-Management-System mobil sein, prädiktive Warnfähigkeiten aufweisen und auf inhaltliche Überzeugung des Nutzers abzielen sollte. Die Grundstruktur der Systeminteraktion wurde erarbeitet: Um effektiv zu sein, muss eine Warnung zunächst Aufmerksamkeit erregen, dann Detailinformationen über den Grund der Warnung und Handlungsempfehlungen darstellen und schließlich eine Quittierung einfordern. Ein effektives Hypovigilanz-Management-System muss also grundsätzlich MMS-Elemente beinhalten, die diese Funktionen bereitstellen. Ebenso wurde aufgezeigt, dass eine kontinuierliche Anzeige des Vigilanz-Status sowie eine Funktion zur kurzfristigen Wacherhaltung des Nutzers integriert werden sollte. Grundsätzliche Gestaltungsrichtlinien für diese Funktionen wie auch für ihre physische Implementierung wurden aus der wahrnehmungspsychologischen und arbeitswissenschaftlichen Literatur abgeleitet. Ebenso wurden relevante Usability-Aspekte diskutiert und Vorteile eines universellen Systems dargestellt.

Auf der Basis der oben genannten Anforderungen an ein effektives Hypovigilanz-Management-System wurden bestehende Lösungen zum Hypovigilanz-Management untersucht. Es zeigte sich, dass keines der 18 besprochenen Systeme allen Anforderungen entspricht, woraus direkt weiterer Forschungsbedarf folgt. Es wurde daher im Sinne einer Forschungshypothese behauptet, dass es prinzipiell möglich ist, ein System zu generieren, dass allen genannten Anforderungen gerecht wird. Weiterhin wurde behauptet, dass ein solches System effektiv sei, gemessen an einer Reduktion von Fehlern und einer möglichen Steigerung der Produktivität von hypovigilanten Nutzern. Dabei ist zu betonen, dass sowohl die Entwicklung eines entsprechenden Systems als auch eine entsprechende Validierung bisher fehlen.

Die oben genannten Anforderungen wurden für eine detaillierte Konstruktion nicht als ausreichende Basis betrachtet, sie mussten daher durch praktische Anforderungen von den Anwendungsfeldern ergänzt werden. Das Problem, zu einem frühen Zeitpunkt detaillierte Systemanforderungen von den Anwendungsfeldern zu extrahieren, wurde diskutiert. Zur Lösung wurde ein hybrider Entwicklungsansatz dargestellt.

In diesem wurde zunächst auf der Basis der bekannten Anforderungen eine basale Interaktions- bzw. Warnstrategie entwickelt und von dieser wurden Grundanforderungen an die physischen MMS-Elemente abgeleitet. Auf der Basis der Ergebnisse dieser zunächst rein theoriegetriebenen Entwicklung konnte nun ein hinreichend detaillierter Fragebogen zur Anforderungsextraktion aus den Anwendungsfeldern entwickelt werden. Hierfür wurde eine repräsentative Gruppe an Anwendungsfeldern ausgewählt, in denen die spezifischen Anforderungen erhoben wurden. Die Daten wurden mit dem Ziel analysiert, Anforderungs-Cluster zu identifizieren und solchermaßen eine möglichst universelle HMI-Konfiguration zu entwickeln. Es konnte eine Konfiguration bestimmt werden, die in allen Anwendungsfeldern einsetzbar ist.

Auf der Grundlage dieser detaillierten Anforderungen wurden die endgültige Warnstrategie sowie die zugehörigen physischen MMS-Elemente methodisch konstruiert. Dazu wurden zunächst in einem interdisziplinären Brainstorming-Workshop Wirkprinzipien sowohl für die Warnstrategie als auch für die MMS-Elemente generiert. Diese wurden in morphologischen Kästen systematisiert dargestellt und Lösungsvarianten abgeleitet. Letztere wurden in Nutzwertanalysen verglichen, die jeweils beste Lösung wurde ausgewählt:

Für die Warn- und Kommunikationsstrategie beinhaltet diese eine kontinuierliche Vigilanz-Statusanzeige. Im Falle einer Warnung wird zunächst durch die Kombination eines vibrotaktilen und eines auditiven Signals die Aufmerksamkeit des Nutzers erregt. Für akute Warnungen werden diese durch erhöhte Vibrations-Pulsfrequenz und höhere Lautstärke sowie ein zusätzliches Blinklicht intensiviert. Anschließend werden durch eine Sprachmitteilung die Gefahr und mögliche Gegenmaßnahmen erläutert sowie eine Quittierung der Warnung durch Drücken eines Tasters eingefordert. Nach einer akuten Warnung wird das Vigilanz-Erhaltungssystem aktiviert, welches den Nutzer durch sog. *Landströmsounds* kurzfristig aktiviert. Daten für die Personalisierung des Systems werden dabei extern gespeichert.

Die beste Lösung für die MMS-Elemente definiert LEDs für die visuellen Anzeigen. Alle Einstellungen werden durch Taster vorgenommen. Zur Wiedergabe von auditiven Signalen wird ein Ohrhörer eingesetzt, eine Vibrationseinheit wird in die Kleidung integriert. Personenbezogene Informationen werden auf einer Smart-Card gespeichert.

Auf der Basis der solchermaßen detaillierten Anforderungen wurde die Warnstrategie konstruiert. Für die Warnstrategie wurden drei Warnmodi definiert: Der *Normmodus*, in welchem der aktuelle Vigilanzstatus angezeigt wird, der *Vorwarnmodus*, in welchem frühzeitig auf eine Vigilanzdegradation hingewiesen wird und der *Akutmodus*, in welchem der Nutzer intensiv über ein stark erhöhtes Unfallrisiko informiert wird und aufgefordert wird, sofort eine Pause zu machen. Weiterhin wird in diesem letzten Modus das Vigilanz-Erhaltungssystem aktiviert. Die Warnstrategie berücksichtigt dabei die Vigilanz-Historie des Nutzers; so reagiert das System z.B. sensibler, wenn der Nutzer bereits gewarnt worden ist. Die Warnstrategie wurde mittels des Softwaresystem *SwitchBoard* implementiert.

Ebenso wurden die physischen MMS-Elemente konstruiert. Zentrum der MMS ist ein Gerät, das wie eine Armbanduhr getragen wird. Um das „Ziffernblatt“ herum sind die Status-LEDs angeordnet. Das gesamte „Ziffernblatt“ ist als Taster ausgebildet, welcher zur Quittierung von Warnmeldungen dient. In diesen ist mittig eine ultra-helle, weiße LED als Blinklicht integriert. Taster zur Lautstärkeeinstellung befinden sich auf der Oberseite, ein Taster für die Repetition von Sprachmitteilungen an der Seite des Geräts „bei zwei Uhr“. Weiterhin wurde eine Vibrationseinheit konstruiert. Eine Usability-Studie zeigte, dass dieses am besten auf dem Hüftknochen getragen wird. Daher wurde die Vibrationseinheit entsprechend an einem Gürtel installiert. Ein Standard-Ohrhörer, der hohen Tragekomfort mit sicherem Halt am Ohr verbindet, wurde zur Darstellung von Audiosignalen ausgewählt. Alle Elemente der MMS kommunizieren über ein Body und Local Area Network (BAN/LAN) mit der Implementierung der Warnstrategie.

Die Teile wurden prototypisch gefertigt. Sie sind in den Abbildungen 0.1a und 0.1b dargestellt.

Aufgrund der gewählten Konstruktionsweise erfüllt das konstruierte Hypovigilanz-Management-System inhärent die erste Forschungshypothese und zeigt, dass es möglich ist, ein Hypovigilanz-Management-System zu konstruieren, das allen definierten Anforderungen entspricht.

(a) „Armbanduhr“

(b) Vibrationseinheit

Abbildung 0.1.: Prototypen der MMS-Elemente

Eine Usability-Studie hat darüber hinaus gezeigt, dass das System auch aus Nutzersicht gut gestaltet wurde: Es war einfach anzuwenden, die Bedienung des Systems war einfach zu erlernen. Das System störte nicht bei der eigentlichen Arbeitsaufgabe der Nutzer, was als Voraussetzung für eine Anwendung in der Praxis anzusehen ist. Die Nutzer passten ihr Verhalten dem System an, was weiter oben als wichtiges Bewertungskriterium für Hypovigilanz-Management-Systeme hervorgehoben wurde.

Nach der gelungenen Entwicklung war der zweite Teil der Forschungshypothese zu überprüfen, die erwartete Steigerung der Sicherheit und ggf. der Arbeitsleistung von hypovigilanten Nutzern. Hierfür wurde die Arbeitsaufgabe eines Schichtarbeiters analysiert und auf eine standardisierte Laboraufgabe übertragen, welche die Kontrolle von äußeren Einflussfaktoren erlaubte. Diese bestand aus einer monotonen Positionierungsaufgabe, welche mit einem Test zur geteilten Aufmerksamkeit kombiniert wurde. Diese praxisnahe Arbeitsaufgabe wurde durch eine subjektive Schläfrigkeitsskala sowie ausgewählte Sub-Tests einer neuro-psychologischen Testbatterie ergänzt. Eine homogene Probandengruppe wurde angeworben und randomisiert auf die drei Versuchsgruppen aufgeteilt: Eine *Kontrollgruppe*, welche keine Intervention erfuhr, eine *Treatment-Gruppe*, welche das entwickelte System nutzte sowie eine *Positivkontrollgruppe*, welche ein System mit randomisierten Warnungen nutzte. Alle Gruppen wurden zunächst einem Training unterzogen, um Lerneffekte in den Messdaten zu vermeiden. Sie absolvierten dann eine Baseline-Messung am Abend und, nach einer Nacht kontrollierten Schlafentzugs, eine Messung am frühen Morgen.

Es konnte gezeigt werden, dass die abhängigen Variablen sensitiv für Vigilanzänderungen sind und damit sinnvoll gewählt wurden. Ebenso konnte gezeigt werden, dass der Versuchsaufbau als solcher anhand der abhängigen Variablen einen validen Vergleich der Versuchsgruppen erlaubte.

Dennoch konnte die Forschungshypothese nicht bestätigt werden. Anders als erwartet zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Versuchsgruppen in den Daten der morgendlichen Messung. Es konnten also keine kurzfristigen Effekte des Hypovigilanz-Management-Systems nachgewiesen werden. Verschiedene Einflussfaktoren, die zu diesem Ergebnis geführt haben könnten, wurden diskutiert. Es wurde gefolgert, dass Hypovigilanz-Management-Systeme mehr dem Risikomanagement als dem direkten Leistungs-Management zuzuordnen sind und sich damit ihre Effekte eher über lange

Zeiträume hinweg zeigen. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass das System u.a. zu einer Risikominimierung beitragen kann, indem es dem Nutzer ermöglicht, durch objektive Rückmeldung langfristig seinen eigenen Hypovigilanz-Zustand besser einzuschätzen und somit möglichst effiziente Pausen planen zu können.

Weiterer Forschungsbedarf wurde abgeleitet. Es wurde vorgeschlagen, das entwickelte Hypovigilanz-Management-System in einer Langzeitstudie im Feld zu evaluieren. Weiterhin wurde vorgeschlagen, andere Anwendungsfelder mit einzubeziehen und Effekte einer Anpassung der vom System empfohlenen Pausendauer an den tatsächlichen Erholungsverlauf des Nutzers zu untersuchen.

Schließlich wurde auf die ethische Implikation der Einführung von Hypovigilanz-Management-Systemen in der Praxis hingewiesen. Abschließend kann festgehalten werden, dass diese anzunehmenderweise einen entscheidenden Beitrag zur Risikominimierung leisten können, es jedoch möglich ist, sie auch zur personenspezifischen Überwachung einzusetzen.

1. Introduction

Human beings need to sleep. Sleep is not a matter of choice, it is essential and inevitable. The longer someone remains awake, the greater the need to sleep and the more difficult it is to resist falling asleep. Sleep will eventually overpower the strongest intentions and efforts to stay awake (NCSDR/NHTSA, 1998).

Today's "24 hour society" seems to pressure many individuals to sacrifice sleep in favor of other activities (Rajaratnam and Arendt, 2001). As an example, the process of industrialization was adjoint by important innovations. The introduction of electric light, the installation and improvements of ground and air transportation as well as digital collaboration by means of Internet have created a global work community which runs 24 hours on seven days in a track. Often, individuals fail to realize the negative effects the resulting sleepiness has on their health and their ability to perform a wide range of tasks.

Moreover, as much as 10% of the general population suffer to some degree from sleep disorders, such as hypersomnia, narcolepsy, and sleep apnea (Backhaus and Riemann, 1999). Sleep disorders lead to sleep deprivation which may cause extreme tiredness, loss of concentration, and a pronounced inability to function normally in one's daily routines.

It can be summarized that sleep deprivation, whether involuntary or voluntary, is one of the most common health problems of todays western societies and up to one third of the population is suffering from excessive sleepiness (Harma and Ilmarinen, 1999; Rogers and Grunstein, 2005; Bonnet, 2000).

Sleepiness is adjoint by reduced reaction time, vigilance, alertness, and concentration, so that the ability to perform attention-based activities is impaired. The speed at which information is processed and the quality of decision-making are also affected (Reissman, 1996; Hsiao and Simeonov, 2001). Hence, apart from diminishing the quality of live of the individuals suffering from it, sleepiness and the related phenomena of hypovigilance and stress are among the key causes for serious accidents.

This fact is well known for the personal transportation sector. A retrospective study of the Association of German Insurers (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, GDV) revealed that about a quarter of all deadly accidents on Bavarian highways were caused by drivers who had fallen asleep at the steering wheel. Moreover, if impairments of attention are considered, which are highly related to sleepiness, up to three quarters of these accidents can be related to sleepiness (Hell, 2004; Zulley et al., 1995).

Similar results were found in other countries: An English study related 16% of all vehicle accidents on major roads and 20% of all accidents on highways to sleepiness (Horne and Reyner, 1995). An American study on two roads with heavy traffic found that 50% of fatal accidents were related to sleepiness (Reissman, 1996), where another American study on heavy trucks attributed 30-40% of the accidents to sleepiness (Board, 1995). Moreover, a study by the Australien Road Safety Organisation concludes that 25-35% of accidents on the road are related to sleepiness (Fell, 1994). Apart from these examples, according results were found in many other studies (e.g., compare to Lindberg

et al., 2001; Melamed and Oksenberg, 2002; Masa et al., 2000; Garder, 1998; Connor et al., 2001).

Although it is difficult to determine the true number of sleepiness related accidents, because of the lack of reliable methods to identify accidents related to sleepiness and separate these from other accident types, the above numbers indicate a severe safety problem caused by sleepiness. In consequence, an international group of leading researchers issued a consensus statement on this topic concluding that

> "sleepiness is the largest identifiable and preventable cause of accidents in transport operations (between 15 and 20% of all accidents), surpassing that of alcohol or drug related incidents in all modes of transportation" (Åkerstedt, 2000).

In the same way, sleepiness is a key cause for serious accidents in aviation. According to the NASA Aviation Safety Reporting System, approximately 21% of the aviation incidents are sleepiness related.

Moreover, major accidents were linked to sleepiness, such as the nuclear catatsrophes of Chernobyl and Three-mile Island, the poisonous gas leak from a pesticide factory in Bhopal (India) as well as the oil spill resulting from the crash of the super-tanker "Exxon Valdez" (Mitler et al., 1988; Folkard et al., 2005; Dinges, 1995).

The processes of automation and globalization negatively contribute to this situation. It requires organizations and arrangements in which constraints of time and place no longer limit human activity (Spath et al., 2006; Bauer and Rief, 2005). On the one hand, modern information technology (IT) enables job nomads to work "on the fly" wherever and whenever they want (Bauer and Stiefel, 2007), but at the same time force them to prolonged working times (Spath, 2006), eventually combined with jet lag. This is especially the case for workers of worldwide operating companies. Competing in turbulent global markets (Westkämper, 2004; Westkämper and Balve, 2003), these companies are forced to optimize the use of resources, e.g. by "global sourcing" (Westkämper, 2006), and, hence, never stop the production process as one part of the company is always in a daylight zone. On the other hand, products with high complexity, produced with high grades of automation, require production all around the clock (Spath et al., 2003), thus requiring shift work.

Shift work in general leads to an increased prevalence of sleep disturbances compared to non-shift workers (Harma et al., 1998; Åkerstedt, 1998a). Taken into account that human errors are most often found to be the root cause for serious incidents and occupational accidents, and that these errors are, among other reasons, strongly related to disturbed sleep (Dinges, 1995; Åkerstedt et al., 2002), it can be concluded that shift workers are in a high risk group for occupational accidents due to an increased prevalence of sleepiness within this group. Leger (1994) even suggests that 52.5% of all work related accidents and injuries are related to sleepiness.

It can be summarized that sleepiness is one of the main causes for severe accidents both in industrial applications and in the transportation sector, evoking economic damage and personal grief. Obviously, according measures should be taken in order to reduce sleepiness related incidents and accidents and support the sustainment of personal performance capabilities.

Although it is clearly desirable to prevent the development of sleepiness itself, the above numbers indicate that this approach by itself can not always be successful. Hence,

other complementing solutions need to be developed for cases in which sleepiness is already present. One according approach are technical measures, so called *Hypovigilance-Management-Systems* or *HVMS*.

The development and validation of such a system are the focus and the aim of this work. In order to reach this aim, several topics are addressed, which are described in the next section

1.1. Structure of the Work

First, basic concepts of sleep, sleepiness and according countermeasures are introduced as their understanding is necessary for the analysis and development of Hypovigilance-Management-Systems. Then, requirements for an ideal Hypovigilance-Management-System are developed and basic user groups are identified.

On this basis, current Hypovigilance-Management-Systems are analyzed in order to deduce possible drawbacks of these systems. The focus is laid on the Human-Machine-Interface (HMI) of such systems. It is shown that none of the existing systems meets the requirements and, hence, further research on this topic is needed.

Consequently, the potential of such further research is formulated in terms of research hypotheses. Moreover, the underlying innovations are emphasized and a methodological approach to this research is described.

Following this approach, the requirements of a new universal, multimodal HMI for Hypovigilance-Management-Systems are formulated and an according prototype is constructed methodologically.

This prototype is evaluated with respect to the above hypotheses in an experimental laboratory study and the results of the study are presented and discussed.

Finally, a summary of the work is presented and an outlook to further research is given.

An overview over the structure of the work is given in figure 1.1