

# Monitoring of Cognitive Load and Cognitive Performance using Wearable Sensing

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

BURCU CINAZ

Dipl. -Inf., University of Bremen, Germany

born April 27, 1981

citizen of Turkey

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Gerhard Tröster, examiner

Prof. Dr. Mike Martin, co-examiner

# Abstract

In recent years there is more and more evidence for a significant increase of work-related stress burden and disease in the Western civilization. If high level of work demands cumulate and recovery fails, serious mental health problems such as chronic stress or depression can occur. Monitoring of cognitive load would allow supporting the prevention of mental disorders and maintaining mental health. The first part of this thesis is directed towards paving the way for a continuous monitoring of cognitive load in daily life scenarios.

Cognitive tests allow measuring the cognitive performance of a person. Basic performance measures are capacity of remembering, reaction time and attention. Conducting cognitive assessment tests throughout daily life offers opportunities to early detect changes in cognitive performance. In most studies, cognitive performance is measured with computerized tests which are not well suited to measure cognitive performance in daily life. In the second part of this thesis, a wearable reaction time test is developed in order to allow obtaining continuous measurements of cognitive performance in daily life.

This thesis comprises six scientific publications that address five aims: (1) to investigate the applicability of heart rate variability (HRV) features to discriminate different levels of mental workload in a mobile setting, (2) to target individual differences in HRV responses by incorporating individual calibration measures, (3) to develop a wearable reaction time (RT) test which can be operated throughout everyday life in order to obtain a continuous measurement of speed of processing by means of RT, (4) to evaluate the feasibility of the wearable RT device with empirical studies, (5) to examine how common daily activities affect the reaction times of young and elderly subjects.

In the first part of this thesis, the applicability of HRV features was investigated in a controlled experiment designed to induce three levels of mental load. According to the subjective ratings of the participants, it was shown that all participants perceived the induced load levels as intended from the experiment design. The investigated HRV features obtained from a mobile ECG logger showed significant differences between the three load levels.

The knowledge gained from the controlled laboratory experiment was then transferred to an office-work setting. Since each individual's

physiological response to high mental load can vary depending on certain factors, a calibration procedure was introduced. It was examined whether the data collected in the calibration session were appropriate to discriminate low, medium and high mental load levels occurred during a daily life office-work scenario. The overall results showed that in 6 out of 7 participants the self-reported load levels perceived during office tasks could be modeled by incorporating individual calibration measures.

In the second part of this thesis, a wearable RT test was designed and implemented in order to allow a continuous operation throughout everyday life. The watch-like RT device combines the generation of a haptic stimulus and the recognition of subject's hand movement as response gesture. The feasibility of the wearable RT test was evaluated with two empirical studies. The first study showed that the wearable RT tests are suitable to measure factors that influence length and variability of reaction times. In the second study, a long-term monitoring in an unrestricted real working environment of a graphic designer was conducted. Reaction time data under different workload factors such as stress, sleep deprivation, night shift and moderate alcohol were continuously collected throughout 15 working days. The results showed that the wearable watch-like RT test can be operated without interrupting the working routine of a graphic designer. The investigated RT features showed significant correlations with the workload factors and with the self-reported ratings on mood and perceived workload.

Finally, the thesis investigated how common daily activities affect the reaction times of 14 young subjects (mean age 26 years) and 12 elderly subjects (mean age 70 years). The results showed that RT and RT variability were significantly affected by the type of activity. The increase in mean RT and RT variability from idle to cognitive load condition was significantly higher for the older participants compared to the younger ones. A context-aware wearable reaction time test which considers the type of activity achieved an accuracy of 87.5% when discriminating between idle and load conditions. It was concluded that a wearable RT test combined with an activity recognition system is feasible to detect changes in RT performance and variability during common daily life activities.

# Zusammenfassung

In den letzten Jahren konnte in vielen Studien gezeigt werden, dass arbeitsbedingte Stressbelastungen und Erkrankungen in der westlichen Welt signifikant zunehmen. Wenn bei sehr hohen Arbeitsbelastungen keine Erholung mehr möglich ist, können ernste mentale Gesundheitsprobleme wie chronischer Stress oder Depression entstehen. Die Beobachtung von kognitiver Belastung würde die Prävention von mentalen Erkrankungen unterstützen und die mentale Gesundheit erhalten helfen. Der erste Teil dieser Arbeit befasst sich mit der kontinuierlichen Überwachung von kognitiver Belastung im täglichen Arbeitsleben.

Kognitive Tests erlauben die Messung der kognitiven Leistung einer Person. Wichtige Leistungsmaße sind Erinnerungsvermögen, Reaktionszeit und Aufmerksamkeit. Die Durchführung kognitiver Tests im täglichen Leben eröffnet Möglichkeiten, um frühzeitig Veränderungen in der kognitiven Leistung zu erkennen. In den meisten bisherigen Studien wurde die kognitive Leistung mit computerbasierten Tests gemessen. Solche Tests erlauben in der Regel keine Messung in der natürlichen Umgebung der Menschen. Der zweite Teil dieser Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines tragbaren Reaktionszeit-Tests, der eine kontinuierliche Messung der kognitiven Leistung im täglichen Leben erlauben soll.

Diese Arbeit beinhaltet sechs wissenschaftliche Veröffentlichungen, die insgesamt fünf Ziele anstreben: (1) Unterscheidung von verschiedenen mentalen Belastungsstufen mittels Herzraten-Variabilitäts-Analyse in einem mobilen Szenario, (2) Einbeziehung individueller Kalibrationsmaße, um individuelle Unterschiede in der Herzraten-Variabilität zu kompensieren, (3) Entwicklung eines tragbaren Reaktionszeit-Tests, der eine kontinuierliche Messung im täglichen Leben erlaubt, (4) Evaluierung des tragbaren Reaktionszeit-Tests mit empirischen Studien, (5) Untersuchung, wie tägliche Aktivitäten die Reaktionszeiten von jungen und älteren Probanden beeinflussen.

Im ersten Teil dieser Arbeit wurden zunächst Charakteristiken der Herzraten-Variabilität bei drei mentalen Belastungsstufen in einem kontrollierten Experiment untersucht. Gemäss der subjektiven Beurteilung der Probanden konnte gezeigt werden, dass alle Probanden die induzierten mentalen Belastungsstufen wie vom Experiment beabsichtigt empfunden haben. Es konnte gezeigt werden, dass sich

die von einem mobilen EKG-Rekorder aufgezeichneten Charakteristiken der Herzraten-Variabilität signifikant zwischen den drei Belastungsstufen unterscheiden.

Die aus dem kontrollierten Experiment gewonnenen Erkenntnisse wurden anschliessend auf Büroarbeit übertragen. Da bekannt ist, dass individuelle Unterschiede die physiologische Reaktion auf kognitive Belastung beeinflussen, wurde eine Kalibrations-Prozedur entwickelt. Es wurde untersucht, inwieweit die erhobenen Kalibrationsdaten geeignet sind, um zwischen geringer, mittlerer und hoher kognitiver Belastung während der Büroarbeit zu diskriminieren. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass bei 6 von 7 Probanden die Selbsteinschätzung hinsichtlich kognitiver Belastung während der Büroarbeit durch Einbeziehung der individuellen Kalibrationsdaten modelliert werden konnte.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wurde ein tragbares Reaktionszeit-Testgerät entwickelt, um eine kontinuierliche Datenaufnahme im täglichen Leben zu ermöglichen. Das Reaktionszeit-Testgerät kann wie einer Uhr getragen werden. Es werden haptische Stimuli erzeugt und eine Handbewegung wird als Reaktion auf den Stimulus erkannt. Die Eignung des tragbaren Reaktionszeit-Testgeräts wurde in zwei empirischen Studien evaluiert. In der ersten Studie wurde gezeigt, dass das tragbare Reaktionszeit-Testgerät geeignet ist, um Veränderungen in der Dauer und Variabilität von Reaktionszeiten zu messen. In der zweiten Studie wurde eine Langzeitmessung in der Arbeitsumgebung einer Grafik-Designerin durchgeführt. Innerhalb von 15 Tagen wurden kontinuierlich Reaktionszeiten bei verschiedenen Arbeitsbelastungen wie Stress, Schlafentzug, Schichtarbeit und moderatem Alkoholeinfluss gemessen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass das tragbare Reaktionszeit-Testgerät verwendet werden kann, ohne dass die Arbeitsroutine unterbrochen werden muss. Die Analyse der Reaktionszeitdaten zeigte signifikante Korrelationen zwischen den untersuchten Arbeitsbelastungen und den subjektiven Einschätzungen zu Gemütslage und Arbeitsbelastung.

Im letzten Teil dieser Arbeit wurde untersucht, wie tägliche Aktivitäten die Reaktionszeit von 14 jungen Probanden (mittleres Alter 26 Jahre) und 12 älteren Probanden (mittleres Alter 70 Jahre) beeinflussen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass Reaktionszeit und Reaktionszeit-Variabilität signifikant von der Art der Aktivität beeinflusst wurden. Der Anstieg der Reaktionszeit und der Reaktionszeit-Variabilität zwischen normaler und kognitiver Belastung war bei den älteren Probanden signifikant stärker. Unter Berücksichtigung der Ak-

tivität konnte eine Genauigkeit von 87.5% bei der Diskriminierung zwischen normaler und kognitiver Belastung erreicht werden. Schlussfolgernd wurde aufgezeigt, dass ein tragbares Reaktionszeit-Testgerät die Aktivitäten einer Person berücksichtigen sollte, um Veränderungen in der Reaktionszeit und der Reaktionszeit-Variabilität hinsichtlich kognitiver Belastung messbar zu machen.