

In Richtung einer objektiven Methode zur kontinuierlichen Erfassung mentaler Beanspruchung

Thea RADÜNTZ, Gabriele FREUDE

*Gr. 3.4 Mentale Gesundheit und kognitive Leistungsfähigkeit,
FB Arbeit und Gesundheit, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin,
Nöldnerstr. 40/42, D-10317 Berlin*

Kurzfassung: Der Beitrag beschreibt die Entwicklung einer Methode zur kontinuierlichen neuronalen Erfassung der mentalen Beanspruchung bei der Ausführung kognitiver Aufgaben im laborexperimentellen Setting. Die Untersuchungen wurden mit dem Ziel durchgeführt, ein System zu entwickeln, welches die mentale Beanspruchung permanent erfasst und kritische Zustände, z.B. Über- und Unterforderung erkennt. Während der Ausführung unterschiedlicher kognitiver Anforderungen wurden das Elektroenzephalogramm, herz-kreislauf-physiologische Parameter sowie Fragebögen erhoben. Erste Ergebnisse bzgl. der EEG-Frequenzbänder und der subjektiven Fragebögen, welche die Grundlage für die Indexierung der Beanspruchung bilden, werden vorgestellt. Die Validierung der Methode anhand kardiovaskulärer Parameter und Leistungsdaten runden den Beitrag ab.

Schlüsselwörter: mental Workload, Beanspruchung, kognitive Ergonomie, Neuroergonomie, Elektroenzephalographie (EEG), Signalverarbeitung

1. Motivation und Zielstellung

Hohe Anforderungen an die kognitive Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit von Arbeitnehmern werden vermehrt durch komplexe, hochautomatisierte Systeme moderner Informationstechnologie gestellt. Trotz der angestrebten Vereinfachung der Arbeit durch IuK-Technologie klagen Beschäftigte über hohe Beanspruchung und Stress. Die Automatisierung kann aber auch mit monotonen Arbeitstätigkeiten verbunden sein, die den Aktivierungszustand der Beschäftigten herabsetzen. Fehlbeanspruchung stellt damit ein Risiko für die Gesundheit von Beschäftigten in unserer modernen Gesellschaft dar.

Der Beitrag beschreibt die Entwicklung einer Methode zur kontinuierlichen neuronalen Erfassung der mentalen Beanspruchung bei der Ausführung kognitiver Aufgaben im laborexperimentellen Setting. Die Untersuchungen wurden mit dem Ziel durchgeführt, ein System zu entwickeln, welches die mentale Beanspruchung permanent erfasst und kritische Zustände, z.B. Über- und Unterforderung erkennt.

2. Experimentelle Methoden und Signalverarbeitung

Im Folgenden werden die Aufgaben der implementierten Testbatterie, die Stichprobe sowie die Versuchsdurchführung skizziert. Die Signalverarbeitung bestehend aus Modulen für die EEG-Vorverarbeitung, Segmentierung, Analyse, und

Merkmalsextraktion wird vorgestellt. Letztlich wird auf die Indexierung der Beanspruchung auf Basis des von Lei entwickelten “Logistic Function Model” (Lei 2011) sowie die individuelle Klassifikation in einem under load, optimal load und over load Bereich eingegangen.

2.1 Experimentelle Methoden

Die Untersuchungen fanden im abgeschirmten Labor der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin in Berlin statt. Das EEG, als mittelbares Signal der menschlichen Informationsverarbeitung, wurde gegen die Cz als Referenzelektrode von 25 Elektroden nach dem internationalem 10/20-System mit einer Abtastfrequenz von 500 Hz abgeleitet. Weitere workload relevante physiologische Daten (Herzrate, Blutdruck) sowie der NASA-TLX-Fragebogen (Hart & Staveland 1988) als subjektive Methode wurden ebenfalls erhoben, so dass im Nachhinein eine Kombination bzw. Validierung anhand von verschiedenen Verfahren erfolgen kann. Ferner wurden die Leistungsdaten der Probanden aus den Aufgaben gespeichert.

Die Untersuchung je Proband fand an einem Untersuchungstag statt. Sie bestand aus einer Trainingsphase und dem Hauptversuch. Während der Trainingsphase wurden die Probanden mit den kognitiven Aufgaben des Experiments vertraut gemacht. Diese waren identisch mit den Aufgaben des Hauptversuchs, jedoch zeitlich deutlich kürzer. Sie wurden so oft wiederholt, bis ein Genauigkeitsindex von mindestens 80% erreicht war. Durch die Trainingsphase sollten vergleichbare Ausgangsbedingungen in Bezug auf die Leistung geschaffen und somit die Belastungseffekte im Hauptversuch unabhängig von Lerneffekten ermittelt werden. Nach jeder Trainingsaufgabe erfolgte eine computerbasierte Bewertung der NASA-TLX-Dimensionen durch den Probanden.

Der Hauptversuch fand gleich im Anschluss statt. Die Aufgaben wurden in der gleichen ausbalancierten Reihenfolge wie in der Trainingsphase präsentiert und nach jeder Aufgabe wurde der NASA-TLX computerbasiert erhoben. Die Steuerung des Experiments wurde über eine Sprechanlage, eine Remote-Desktop-Verbindung und ein Videoüberwachungssystem gewährleistet.

Die untersuchte Stichprobe besteht aus 54 Erwerbstätigen und lässt eine hohe Variabilität bzgl. der kognitiven Leistungsfähigkeit und Beanspruchung erwarten. Tabelle 1 beschreibt kurz die untersuchte Stichprobe.

Tabelle 1: Die untersuchte Stichprobe.

Alter	Frauen	Männer	Gesamt
30 - 39	7	6	13
40 – 49	12	11	23
50 – 59	9	2	11
60 – 62	3	4	7
Gesamt	31	23	54

Die Simulation verschiedener Arbeitsanforderungen erfolgte mittels einer in E-Prime implementierten Aufgabenbatterie. Sie besteht aus Aufgaben unterschiedlicher Komplexität und Aufgabenschwierigkeit, die unterschiedliche Beanspruchung induzieren sollen. Die implementierten Aufgaben sind in Tabelle 2 mit ihrer durchschnittlichen Ausführungsdauer dargestellt. Ferner wurden jeweils vor Beginn und nach Beendigung des Hauptexperiments Ruhemessungen von ca. 3 Minuten

durchgeführt.

Tabelle 2: Die Aufgabenbatterie.

Aufgabe	0nb	2nb	Sternberg	Serieller Sternberg	Stroop
Dauer [min]	5	5	10	10	5
Aufgabe	Switch GER	Switch NUM	Switch XXX	AOSPAN	
Dauer [min]	5	5	10	20	

In diesem Beitrag konzentrieren wir uns auf die Analyse und Auswertung dreier Aufgaben: 0-back als einfachste Aufgabe, 2-back als Arbeitsgedächtnisaufgabe mit moderaten Anforderungen und AOSPAN als Doppelaufgabe mit hoher Belastung.

2.2 Signalverarbeitung

Die Registrierung des EEGs, des Blutdrucks (BD) und der Herzrate (HR) fand ausschließlich während des Hauptversuchs statt. Die digitale Signalverarbeitung wurde in MATLAB realisiert. Das als MATLAB-Toolbox implementierte System zur Berechnung des Workloads anhand des EEGs ist modular aufgebaut.

Im Vorverarbeitungsmodul wird das EEG-Signal in MATLAB importiert und nach einer Hamming-Fensterung mit einem Bandpassfilter der Ordnung 100 zwischen den Grundfrequenzen 0.5 und 40 Hz gefiltert. Anschließend wird das Signal mittels Independent Component Analysis (ICA) in seinen unabhängigen Komponenten zerlegt, diese visuell begutachtet und in Artefakt- bzw. EEG-Komponenten klassifiziert. Für die weitere Verarbeitung werden die EEG-Komponenten rückprojiziert und das somit artefaktbereinigte Signal zur Weiterverarbeitung dem nächsten Modul übergeben. Hier erfolgt eine Rereferenzierung auf eine Durchschnittsreferenz (average reference), eine Segmentierung in 10 Sekunden-Epochen mit einer Überlappung von 50% und die Transformation des EEG-Signals aus dem Zeit- in den Frequenzbereich mittels Fast Fourier Transformation (FFT). Das Leistungsspektrum und die relativen Frequenzbänder (θ : 4 - 8 Hz, α : 8 - 12 Hz) werden berechnet.

Das individuelle Training des Systems je Proband erfolgt, indem die Verteilungen der Bänder (θ und α) über alle Segmente der ersten Minute einer Aufgabe berechnet und ihre Mittelwerte gespeichert werden. Das geschieht für alle Aufgaben einzeln. Anschließend wird über alle für das Systemtraining ausgewählte Aufgaben und Segmente der Person die kumulative Verteilungsfunktion berechnet und anhand der vorher gespeicherten Mittelwerte die entsprechenden p-Werte aus der kumulativen Verteilungsfunktion jeder Person extrahiert. Die p-Werte werden je Aufgabe über alle Probanden gemittelt, wodurch ein aufgabenschwierigkeitsspezifischer allgemeiner p-Wert gewonnen wird. Der allgemeine p-Wert wird benutzt, um aus den individuellen kumulativen Verteilungsfunktionen je Aufgabe den entsprechenden q-Wert zu extrahieren. Letztlich werden die individuellen q-Werte zusammen mit den subjektiven NASA-Task-Load-Indizes für die individuelle Parametrisierung des Systems benötigt.

Nach dem Training des Systems und der Generierung der individuellen Parameter b_0 , b_1 und b_2 erhalten wir für jeden Proband ein personalisiertes Logistic Function Model (LFM): $W = 1 / (1 + e^{-(b_0 + b_1 \cdot \theta + b_2 \cdot \alpha)})$. Hier können dann die relativen Werte der Frequenzbänder eingesetzt und ein Workload-Index W je Segment berechnet

werden, der, wie man an den Eigenschaften der Funktion erkennen kann, im Wertebereich zwischen 0 und 1 liegt. Segmente mit einem Workload-Index $W \leq 0,2$ werden als low load klassifiziert, mit einem $0,2 < W < 0,8$ als optimal load und mit einem $W \geq 0,8$ als high load. Pro Aufgabe und Person erhalten wir folglich drei prozentuale Werte für den Anteil der Segmente in dem jeweiligen Bereich (LLS: Low Load Segmente, OLS: Optimal Load Segmente, HLS: High Load Segmente).

Die kardiovaskulären Parameter (BD und HR) wurden kontinuierlich erfasst. Der Blutdruck wurde in der Zeitdomäne analysiert. Die Herzratenvariabilität aus den Inter-Beat-Intervallen (IBI) wurde in der Frequenzdomäne ausgewertet. Das Low Frequency (LF: 0.04 - 0.15 Hz) und High Frequency (HF: 0.15 - 0.4 Hz) Band wurden mittels FFT berechnet und anschließend die Ratio LF/HF gebildet.

3. Ergebnisse

Die Ergebnisse werden hier beispielhaft für die drei Aufgaben 0-back, 2-back und AOSPAN vorgestellt. Sechs Varianzanalysen mit Messwertwiederholungen, einem Intra-Subjekt-Faktor (je LLS, HLS, systolischer BD, LF/HF, Genauigkeitsindex der Leistungsdaten, NASA-TLX) und drei Faktorstufen (die drei Aufgaben) wurden berechnet, und die paarweisen Mittelwertvergleiche zwischen den Aufgaben mittels Post-hoc-Test (Bonferroni) durchgeführt.

Abbildung 1 (links) stellt die Ergebnisse der Gewichtung der NASA-TLX Dimensionen über alle Aufgabe dar. Sie zeigen, dass die geistige Dimension bei der konzipierten Aufgabenbatterie überwiegt. Damit kann davon ausgegangen werden, dass die Beanspruchung durch Informationsverarbeitungsprozesse induziert wird, welche sich im EEG widerspiegeln müssten.

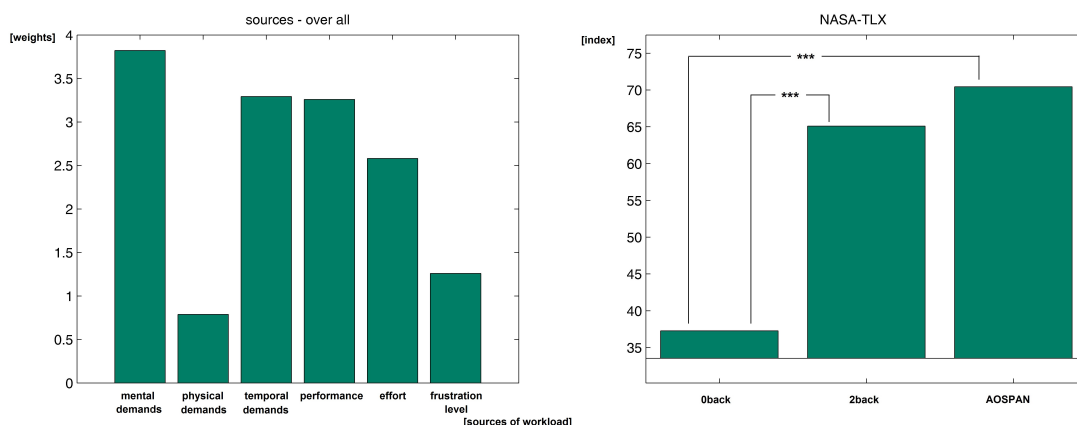


Abbildung 1: NASA-TLX: Gewichtung der Dimensionen über alle Aufgaben und 54 Probanden (links). Workload-Index für 0-back, 2-back und AOSPAN berechnet über 54 Probanden (rechts).

Abbildung 1 (rechts) stellt den subjektiven Workload Index bei den ausgewählten Aufgaben dar. Dabei sind signifikante Veränderungen zwischen den Aufgaben zu verzeichnen (Greenhouse-Geisser $F(5.96; 316.01) = 65.023$, $p < 0.001$). Die Post-hoc Analyse zeigte signifikante Unterschiede zwischen 0-back und den anderen beiden Aufgaben.

Die Analyse der Leistungsdaten wies ebenfalls signifikante Veränderungen zwischen den Aufgaben (Greenhouse-Geisser $F(3.71; 196.67) = 173.256$, $p < 0.001$).

Hierbei sind signifikante Unterschiede zwischen allen drei Aufgaben zu verzeichnen. Abbildung 2 stellt die Ergebnisse graphisch dar.

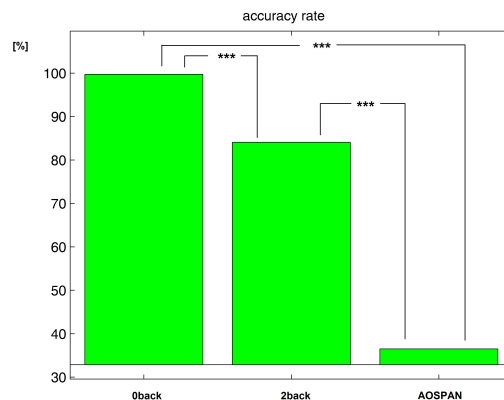


Abbildung 2: Genauigkeitsindex aus den Leistungsdaten der Aufgaben 0-back, 2-back und AOSPAN berechnet über 54 Probanden.

Signifikante Veränderungen wurden ebenfalls bei den Mittelwerten der prozentualen Anteile an LLS und HLS festgestellt (HLS: Greenhouse-Geisser $F(5.36; 289.16) = 23.239$, $p < 0.001$; LLS: Greenhouse-Geisser $F(6.47; 0.28) = 20.892$, $p < 0.001$). Der Post-hoc-Test zeigte einen signifikant größeren Anteil an HLS zwischen AOSPAN und den anderen beiden Aufgaben, wie auch eine signifikante Abnahme des Anteils an LLS ebenfalls zwischen AOSPAN und den anderen Aufgaben. Abbildung 3 verdeutlicht dieses Ergebnis in Form eines Balkendiagramms.

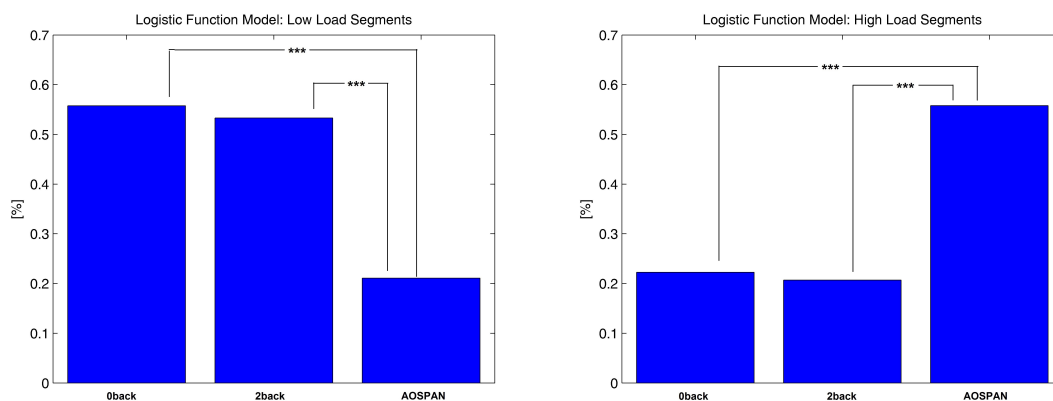


Abbildung 3: Logistic Function Modell: Anteil der LLS (links) und HLS (rechts) bei den Aufgaben 0-back, 2-back und AOSPAN gemittelt über 54 Probanden.

Die Analyse der Herz-Kreislauf-Parameter wies zwar keine signifikante Unterschiede zwischen den Aufgaben bei der LF/HF-Ratio auf, jedoch signifikante Veränderungen beim systolischem Blutdruck (Greenhouse-Geisser $F(4.45; 235.65) = 17.621$, $p < 0.001$). Dabei ist eine signifikante Erhöhung des Blutdrucks bei AOSPAN im Vergleich zu 0-back und zu 2-back verzeichnen. Die LF/HF-Ratio zeigt lediglich eine steigende Tendenz von 0-back zu 2-back zu AOSPAN. Abbildung 4 veranschaulicht diese Ergebnisse.

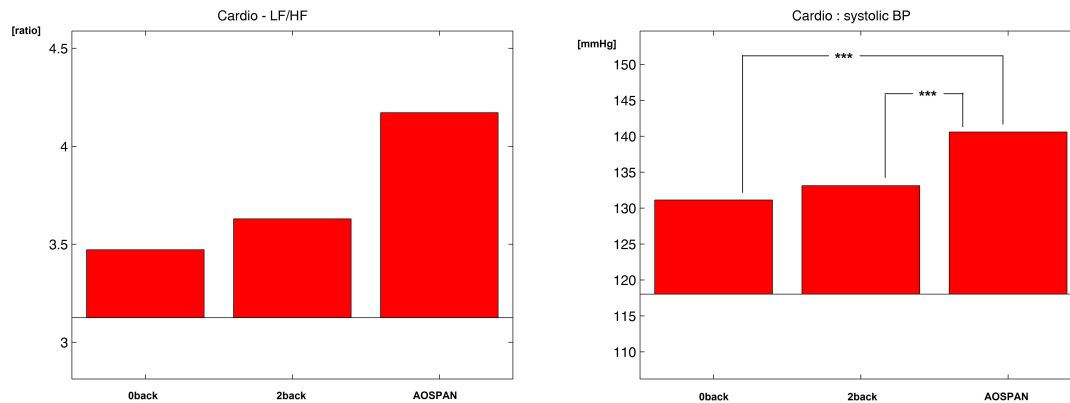


Abbildung 4: LF/HF-Ratio (links) und systolischer Blutdruck (rechts) gemittelt über 54 Probanden für die Aufgaben 0-back, 2-back und AOSPAN.

4. Diskussion

Die Erfassung der mentalen Beanspruchung anhand ausgewählter EEG-Parameter stellt die zentrale Zielstellung der Studie dar. Dazu wurde eine Aufgabenbatterie entwickelt, die aus Aufgaben unterschiedlicher Komplexität und Aufgabenschwierigkeit besteht und damit verschiedene Arbeitsanforderungen simuliert sowie unterschiedliche Beanspruchung induziert. Die Ergebnisse der subjektiven Bewertungen der Probanden aus dem NASA-TLX belegen die Richtigkeit dieser Annahmen und zeigen, dass die Beanspruchung überwiegend auf Informationsverarbeitungsprozesse zurückzuführen ist.

Das EEG als mittelbares Signal der menschlichen Informationsverarbeitung stellt, wie in zahlreichen Untersuchungen bereits beobachtet, ein hervorragendes Instrument zur objektiven Registrierung der mentalen Beanspruchung dar. Die Konsistenz der hier erzielten Ergebnisse in Abhängigkeit von der Schwierigkeitsstufe der jeweiligen Aufgabe, lassen die Richtigkeit der EEG-Methode vermuten. Ferner belegen auch die Ergebnisse aus den kardiovaskulären Parameter die Güte der Methode, da diese gleiche Resultate wie die neuronalen Parameter aufweisen.

5. Literatur

Hart SG, Staveland LE (1988) Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In Hancock PA & Meshkati N (Eds.), Human mental workload. Amsterdam: North-Holland, 139-183.

Lei, S. (2011) Driver mental states monitoring based on brain signals. Retrieved from http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2011/3185/pdf/lei_shengguang.pdf

Danksagung: Herzlich bedanken möchten wir uns an dieser Stelle an Herrn Dr. Sergei Schapkin für die Auswahl der kognitiven Aufgaben, sowie an Frau Xenija Weißbecker-Klaus, Herrn Robert Sonnenberg und Frau Marion Exner für die Versuchsdurchführung. Ein ganz besonderer Dank gilt auch Herrn Ludger Blanke, Herrn Dr. Patrick Gejewski und Herrn Prof. Falkenstein (Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der TU Dortmund - IfADo) für die konstruktive Zusammenarbeit bei der Erstellung der Aufgabenbatterie.