Workshop zur Quantifizierung mentaler Beanspruchung aus Tätigkeit und Umgebungsfaktoren der Arbeit

Themenschwerpunkt: (Neuro-)physiologische Methoden zur Messung der Wirkung von Lärm auf kognitive Prozesse

Herausgeber: Jan Grenzebach

baua: Fokus

Im Dezember 2022 fand ein Workshop zur Messbarmachung von kognitiver Beanspruchung statt. Ziel war die Identifizierung objektiver Verfahren zur Untersuchung von mentalen Prozessen, die bei Lärm aktiv sind. Dafür waren Forschende eingeladen über Erkenntnisse in der Messung von Mechanismen zu berichten und deren Anwendbarkeit auf Fragen des Arbeitsschutzes zu diskutieren. Die Verfahren EEG, MEG, fNIRS, Pupillometrie, EDA, endokrinologische und Blickbewegungs-Analysen, sowie KI, standen im Mittelpunkt.

Inhalt

1	Einleitung	3	
2	Das Projekt "Wirkung von Hintergrundschall auf kognitive Leistungen bei der Arbeit.		
	Systematische Exploration objektiver Verfahren zur Untersuchung der Anstrengur	g	
	bei der Aufgabenbearbeitung" (F2439): Hintergrund, Motivation, Projektidee	5	
3	Wahrnehmungsbasierte Lärmdosimetrie im Alltag:		
	Gehirn, Geräusche und Gesundheit	11	
4	Geben Rhythmen im menschlichen Elektroenzephalogramm Aufschluss über		
	die erlebte Höranstrengung?	14	
5	Nutzbarkeit der Herzfrequenzvariabilität für Messungen bei lärmbezogenen		
	Beanspruchungen am Arbeitsplatz	17	
6	Die elektrodermale Aktivität als Parameter für die objektive		
	Beanspruchungsmessung unter Lärm	21	
7	Neuroergonomie am Arbeitsplatz: Mobiles EEG zur Messung kognitiver		
	Beanspruchung in naturalistischen Umgebungen	26	
8	Biologische (endokrinologische) Stressmarker zur Beanspruchungsmessung		
	bei Lärm am Arbeitsplatz	32	
9	Messung des lokalen Energieverbrauchs im Gehirn mit Hilfe der funktionellen		
	Nah-Infrarotspektroskopie (fNIRS)	37	
10	Ansatz zur multimodalen Datenverarbeitung physiologischer Vitalparameter		
	mittels maschinellen Lernens zur Abschätzung des subjektiven		
	Lärm- und Stressempfindens	43	
11	Die Abschätzung kognitiver Beanspruchung mittels Blickbewegungsmessung	47	
12	Funktionelle Magnetresonanztomographie – Kandidat für die		
	Lärmwirkungsforschung?	51	
13	Beanspruchung durch Lärm am Arbeitsplatz Gibt es Evidenzen für eine		
	Fehlregulation des endokrinen Stresssystems?	54	
14	Maschinelles Lernen in der Analyse des Elektroenzephalogramms zur		
	Diagnostik psychischer Beanspruchung		
15	Kognitive Anstrengung: kognitionspsychologische Grundlagen und Konzepte	62	
16	Diskussionspunkte und Aussicht auf die quantitative Lärmwirkungsforschung	68	



1 Einleitung

Erik Romanus

Gruppe 2.2 Physikalische Faktoren, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund

Akustische Fragestellungen in der Arbeitswelt betreffen Themen der Reduzierung von Geräuschemissionen, der akustischen Bewertung und Gestaltung von Produkten und Arbeitssystemen genauso wie Beanspruchungen von Beschäftigten durch aurale und extra-aurale Wirkungen von Lärm. Während die Reduzierung der Geräuschemission von Maschinen vor allem auf die Vermeidung von gehörschädigendem Lärm (aurale Wirkung) zielt, gewinnt der Schutz von Beschäftigten vor extra-auralen Lärmwirkungen im Kontext psychischer Belastungen zunehmend an Bedeutung. Von extra-auralen Lärmwirkungen geht eine Gefahr insofern aus, dass die Konsequenzen erst durch einen kumulativen Effekt, d. h. mittel und längerfristig, auftreten können. Angesichts des Wandels der Arbeit dominieren Tätigkeiten, die mentale Leistungen erfordern, zunehmend den europäischen Arbeitsmarkt. Die Bewältigung von mentalen Aufgaben am Arbeitsplatz wird in ruhigen oder selbst gestaltbaren Geräuschkulissen als weniger anspruchsvoll empfunden.

Die BAuA geht deshalb im Rahmen eines FuE-Projekts der Frage nach, welche Verfahren zur Erfassung (neuro-)physiologischer Messgrößen und Parameter, über die Befragung von Betroffenen zu ihrer subjektiv erlebten Beanspruchung hinaus, geeignet erscheinen, um sie während der Bearbeitung kognitiver Aufgaben im Arbeitskontext anzuwenden. Damit soll auch die Frage verbunden sein, inwieweit solche Verfahren in Labor- oder auch in Feldstudien einsetzbar sind. Zur Einbindung externer Expertise in das Projekt unterstützt eine Forschungsbegleitgruppe beratend dieses Vorhaben. Dieser gehören folgende Expertinnen und Experten an:

- Prof. Dr. Silja Bellingrath, Institut für Psychologie, Universität Duisburg-Essen,
- Prof. Dr. Daniel Oberfeld-Twistel, Allgemeine Experimentelle Psychologie, Universität Mainz,
- PD Dr. Thea Radüntz, Fachbereich Arbeit und Gesundheit, BAuA Berlin,
- PD Dr. Stefan Uppenkamp, Medizinische Physik, Universität Oldenburg.

Die Diskussion mit Expertinnen und Experten im Rahmen eines wissenschaftlichen Workshops sollte die Auswahl derjenigen Messverfahren unterstützen, die sich im Hinblick auf Sensitivität, Reliabilität, Mobilität, Akzeptanz besonders dafür eignen, im Kontext des Arbeitsschutzes fortlaufend Korrelate der Beanspruchung zu erheben. Die im Workshop präsentierten Messverfahren wurden basierend auf einer systematischen Literaturanalyse (Grenzebach & Romanus, 2022) und durch anschließende praxisnahe Erkundungen bei in diesem Feld aktiven Forschungsgruppen ausgewählt.

Bei der Konzeption des Workshops wurden, auch mit Unterstützung der Forschungsbegleitgruppe, Leitfragen zur Orientierung der Beiträge entwickelt:

- Welches kognitive Ressourcen-Modell liegt Ihren Experimenten zu Grunde?
- Mit welchen Stimuli/Stressoren arbeiten Sie/arbeitet man in Ihrem Forschungsfeld?
- Welche Effekte kognitiver Beanspruchung ist das von Ihnen verwendete objektive Verfahren im Stande abzubilden?
- Lässt sich das von Ihnen verwendete Verfahren auch mobil am Arbeitsplatz anwenden?

Folgende Messverfahren wurden in fünf Workshop-Sessions (drei zu neurophysiologischen, zwei zu physiologischen Korrelaten) mit aktuellen Erkenntnissen und geplanten Forschungsarbeiten von den Referentinnen und Referenten präsentiert:

Messverfahren/Thema	Referent/in
Mobile Elektroenzephalographie (EEG)	Julian Reiser, IfADo Dortmund
Magnetoenzephalographie (MEG)	Omid Abbasi, Universität Münster
EEG beim Hören	Martin Bleichner, Universität Oldenburg
Funktionale Nahinfrarotspektroskopie (fNIRS)	Torsten Wüstenberg, Universität Heidelberg
Höranstrengung und EEG	Malte Wöstmann, Universität Lübeck
Mobile Pupillometrie (PD) und Ergonomie	Jan Ehlers, Universität Weimar
Psychoendokrinologie	Linda Becker, Universität Erlangen-Nürnberg
KI und multimodale, mobile Körper-Sensorik	Kevin Penner, Universität Bielefeld
Hautleitfähigkeit (EDA)	Michael Winter, Universität Würzburg
Beanspruchungsmessung im Flugzeugcockpit (Blickbewegung)	Simon David Schwerd, UniBW München

Allen Vortragenden sei an dieser Stelle noch einmal gedankt für ihre Bereitschaft, die Forschungsmethoden und Paradigmen transparent und anschaulich darzustellen, allen Session Chairs für die Moderation der regen Diskussionen, allen Teilnehmenden für ihr Interesse an den Messverfahren. Dank gilt ebenso den Mitgliedern der Forschungsbegleitgruppe für ihre Beteiligung mit Fachbeiträgen an diesem Baua: Fokus. Alle Beiträge spiegeln die Auffassung der jeweiligen Autorinnen und Autoren wider. Die Vorträge wurden durch ein Graphic Recording von Janna Schipper begleitet, das hier gemeinsam mit den Beiträgen gezeigt wird.

Besonderer Dank gilt Jan Grenzebach für die Konzeption, Organisation und die Gesamtleitung des Workshops sowie die Koordination der hier vorliegenden Publikation.

Literatur

Grenzebach, J. & Romanus, E. (2022). Quantifying the Effect of Noise on Cognitive Processes: A Review of Psychophysiological Correlates of Workload. Noise and Health, 24(115), 199.

Das Projekt "Wirkung von Hintergrundschall auf kognitive Leistungen bei der Arbeit. Systematische Exploration objektiver Verfahren zur Untersuchung der Anstrengung bei der Aufgabenbearbeitung" (F2439): Hintergrund, Motivation, Projektidee

Helga Sukowski

Gruppe 2.2 Physikalische Faktoren, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund

Hintergrund

Unerwünschte Geräusche in der Arbeitsumgebung können nachteilige Auswirkungen auf Beschäftigte haben. Dies gilt sowohl für Geräusche mit hohen Schalldruckpegeln, als auch für Geräusche mit Schalldruckpegeln, die unterhalb der gesetzlich festgelegten Auslösewerte zur Vermeidung von Gehörgefährdungen liegen (siehe Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung, 2021). Wirkungen von Lärm, die nicht das Gehör betreffen, werden als extra-aurale Wirkungen bezeichnet. Sie umfassen Wirkungen u.a. auf das Wohlbefinden, das Herz-Kreislauf-System und die Arbeitsleistung (weitere Informationen siehe Sukowski, 2023; Begriffsbestimmung in den Technischen Regel für Arbeitsstätten - Lärm (ASR A3.7), 2021). Verschiedene Wirkungen können selbstverständlich auch gemeinsam auftreten.

Im Arbeitskontext sind zusätzlich zu den Auswirkungen auf die Gesundheit auch die Wirkungen auf kognitive Leistungen von Bedeutung. Ob eine bestimmte akustische Arbeitsumgebung eine nachteilige Wirkung auf die kognitive Leistung hat, kann grundsätzlich mit unterschiedlichen Methoden erfasst werden. Naheliegend ist, anhand geeigneter Arbeitsaufgaben und Operationalisierungen die kognitive Leistung direkt zu erfassen, oder die Betroffenen zu fragen, inwieweit sie sich bei entsprechenden Tätigkeiten durch die akustische Umgebung an ihrem Arbeitsplatz beeinträchtigt fühlen. Beide Ansätze werden in Studien realisiert.

Einige Zusammenhänge zwischen Geräuschen/Geräuscheigenschaften und den Effekten auf die kognitiven Leistungen werden seit Langem untersucht, und die Wirkungsrichtung ist gut bekannt. Dies trifft beispielsweise für die nachteilige Wirkung von irrelevantem sprachlichen Hintergrundschall auf Gedächtnisleistungen zu (siehe z. B. Schlittmeier et al., 2008). Es gibt aber auch Zusammenhänge, zu denen die Erkenntnislage nicht so klar ist bzw. zu denen die Ergebnisse nicht so gut replizierbar sind, und es gibt Zusammenhänge, die bislang nur relativ selten untersucht wurden, wie z. B. der Zusammenhang zwischen Lärm und Entscheidungsverhalten (siehe z. B. Syndicus et al., 2018). Hinzu kommt, dass die Wirkungen oftmals gar nicht direkt im Arbeitskontext untersucht wurden, oder die Stichproben nicht repräsentativ für die Gruppe der Beschäftigten waren.

In Befragungen im Arbeitskontext, die u. a. Lärm am Arbeitsplatz berücksichtigen, zeigt sich, dass Lärm - auch bei nicht gehörgefährdenden Schalldruckpegeln - ein bedeutsames Problem für Beschäftigte ist (vgl. z. B. Amstutz et al., 2010; Kim & de Dear, 2013). Studien, in denen subjektive Einschätzungen direkt bezogen auf die Bearbeitung von kognitiven Aufgaben erfragt werden, bestätigen ebenfalls, dass ein Großteil der Teilnehmenden das Arbeiten mit einem Hintergrundgeräusch als anstrengender und störender bewertet als ohne ein Hintergrundgeräusch (vgl. z. B. Sukowski, 2022).

Zusammenfassend gibt es somit die Erkenntnis, dass Lärm bei der Arbeit von den meisten Beschäftigten als nachteilig erlebt wird, dass sich aber in Laborstudien manchmal keine so deutlichen Effekte auf die Leistung zeigen. Das Ausbleiben von messbaren Effekten auf die Leistung kann zwar auch mit Hinweisen darauf erklärt werden, dass z.B. die Aufgabe zu

leicht oder die Bearbeitungszeit zu kurz war. Aber es findet sich auch die Erklärung, dass eine mögliche Beeinträchtigung durch das Hintergrundgeräusch mit Hilfe erhöhter Anstrengung kompensiert werden konnte und die Wirkung dadurch in den Leistungsdaten nicht "sichtbar" geworden ist.

Dieser letzte Punkt ist im Hinblick auf den Arbeitskontext von besonderer Bedeutung, denn die erhöhte Anstrengung könnte sich schließlich auch nachteilig auf andere abhängige Variablen auswirken, die zur Beschreibung des psychischen Befindens bei Lärmbelastungen herangezogen werden (z.B. erhöhte erlebte Belästigung, stärker ausgeprägtes Stresserleben, stärkere Ermüdung).

In einem Literaturreview, das im Rahmen des BAuA-Projektes "Psychische Gesundheit in der Arbeitswelt - Wissenschaftliche Standortbestimmung" (Rothe et al., 2017) für den Arbeitsumgebungsfaktor Lärm von Liebl und Kittel (2016) erstellt wurde, wird diese Problematik wie folgt zusammengefasst:

"Lärm bindet nachweislich kognitive Ressourcen, was bestenfalls durch vermehrte Anstrengung kompensiert werden kann. Er kann das Erregungsniveau beeinflussen und kurzfristig sogar eine positive Wirkung auf die Vigilanz haben, was aber längerfristig eine größere Erschöpfung bedingt. Lärm bedingt Störungen und Unterbrechungen bei der Arbeit, die als belastend empfunden werden." (Liebl & Kittel, 2016, S. 57).

In einer Situation, in der ein Effekt möglicherweise zwar vorhanden, aber "nicht sichtbar" ist, bietet sich der Einsatz von Verfahren an, die das Potential haben, diese Effekte aufzudecken und sie somit "sichtbar" zu machen. Solche Verfahren sind grundsätzlich physiologische, neurophysiologische oder endokrinologische Verfahren, die nachfolgend zusammenfassend als "objektive Verfahren" bezeichnet werden. Aber wie ist diesbezüglich die Erkenntnislage in der Forschung zu Wirkungen von Lärm am Arbeitsplatz und speziell zur erlebten Anstrengung in Arbeitssituationen unter Lärm? Welche Verfahren und welche Parameter eignen sich, um ggf. erhöhte Anstrengung während der Bearbeitung einer kognitiven Aufgabe zuverlässig nachzuweisen? Welche Verfahren könnten auch in der realen Arbeitsumgebung und nicht nur im Labor eingesetzt werden? Unter anderem diese Fragen waren im Jahr 2019 der Ausgangspunkt für ein Forschungsvorhaben innerhalb der BAuA, das von der Projektidee bis zum vollständigen Projektplan von der Autorin dieses Beitrags ausgearbeitet wurde.

Motivation, zunächst die Verfahren genauer zu betrachten

Objektive Verfahren, wie beispielsweise Blutdruck- oder Pulsmessungen, Elektroenzephalografie (EEG), Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) oder die Erfassung endokrinologischer Maße werden seit vielen Jahren auch im Zusammenhang mit Fragestellungen der Lärmwirkungsforschung, der Hörforschung oder der Audiologie eingesetzt. Das oben genannte Review von Liebl und Kittel (2016) bestätigt dies zwar ebenfalls, es zeigt aber auch, dass es nur verhältnismäßig wenige Arbeiten gibt, die beispielsweise Effekte von pegelorientierten Merkmalen sowohl auf die Leistung als auch auf das Herz-Kreislauf-System bzw. das physische Befinden untersucht haben (vgl. z. B. Liebl & Kittel, 2016, Anhang B). Zudem wird deutlich, dass es grundsätzlich eine große Zahl von objektiven Verfahren bzw. möglichen Messgrößen gibt, die in diesem Zusammenhang verwendet werden. Allein in der Legende zur Tabelle "Primärstudien zum Einfluss von Lärm auf das Herz-Kreislauf-System" werden 16 verschiedene Messgrößen/abhängige Variablen genannt (Liebl & Kittel, 2016, S. 45-46). Die Autoren kommen bei der Bewertung dieses Zusammenhangs zu dem Schluss: "Die medizinischen Indikatoren für Einflüsse auf das Herz-Kreislauf-System sind sehr vielfältig, was die Vergleichbarkeit der Studien erschwert" (Liebl & Kittel, 2016, S. 54).

Bereits diese Beobachtungen und Schlussfolgerungen hatten nahegelegt, dass es erforderlich ist, sich zunächst genauer mit den objektiven Verfahren zu beschäftigen, bevor sie ggf. als ergänzende Verfahren in Studien der Lärmwirkungsforschung zur Erfassung von psychischen Beanspruchungen, wie der erlebten Anstrengung, eingesetzt werden können. Dass dies ein wichtiger Ansatz ist, hatte sich auch aus Beiträgen in einem Fachgespräch zum Thema "Extra-aurale Wirkungen von Lärm bei der Arbeit" ergeben, das im Oktober 2017 in der BAuA in Dortmund stattgefunden hat (siehe Sukowski, 2018).

Die Vorträge von Dr. Dorothea Wendt ("Erfassung der Pupillengröße zur Bestimmung der Höranstrengung) sowie von Dr. Marlene Pacharra ("Mit neurophysiologischen Methoden an den Arbeitsplatz - auch zur Erfassung von extra-auralen Wirkungen von Lärm?", Pacharra et al., 2018) hatten verdeutlicht: Grundsätzlich gibt es objektive Verfahren, die soweit ausgereift sind, dass sie in der Forschung unter bestimmten Rahmenbedingungen und zu bestimmten Fragestellungen eingesetzt werden können; die Weiterentwicklung der objektiven Verfahren ist sehr dynamisch und ein Einsatz zu Forschungsfragen im Arbeitskontext ist - zumindest unter kontrollierten Bedingungen - denkbar.

Von der Projektidee zum Projektplan

Ausgehend von der eingangs beschriebenen Problematik wurde die systematische Exploration der Verfahren in den Mittelpunkt des Forschungsvorhabens gestellt, um die grundsätzliche Eignung der Verfahren für die Lärmwirkungsfragen im Rahmen des Arbeitsschutzes abzuklären und um darüber hinaus auch Kenntnisse zu relevanten Messgrößen und der Interpretation von Ergebnissen erwerben zu können.

Im Projektplan wurden die Ziele des Projektes wie folgt formuliert:

"Das Ziel des geplanten Projektes ist die Auswahl von zwei objektiven Verfahren (physiologische und/oder neurophysiologische Verfahren) und geeigneter Parameter zur Erfassung der Anstrengung während der Bearbeitung von kognitiven Aufgaben unter Hintergrundschall. Zumindest eines der Verfahren soll mit handhabbarem technischen Aufwand auch in Feldstudien einsetzbar sein.

Die Auswahl soll sich anhand einer systematischen Exploration relevanter Verfahren vollziehen. Die ausgewählten Verfahren sollen in zukünftigen Studien ermöglichen, Erkenntnisse darüber zu gewinnen,

- ob bzw. in welchem Ausmaß erhöhte Anstrengung grundsätzlich bei der Aufgabenbearbeitung unter Hintergrundschall vorliegt.
- inwieweit erhöhte Anstrengung ggf. sogar dann nachweisbar ist, wenn sich keine signifikanten nachteiligen Effekte der jeweiligen akustischen Arbeitsumgebung auf die kognitive Aufgabe zeigen" (Sukowski: nicht veröffentlichter Projektplan).

Das beantragte Projekt wurde 2019 als BAuA-Eigenforschungsprojekt bewilligt (Abstract: siehe Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin; https://www.baua.de/DE/Aufgaben/Forschung/Forschungsprojekte/f2439.html). Die mit dem Projekt verbundene Stelle wurde mit einem Nachwuchswissenschaftler besetzt.

Bei der Erstellung des Projektplans war es ein zentrales Anliegen, in allen Phasen des Projektes externe Expertise einzubeziehen. Die Landschaft der objektiven Verfahren ist sehr vielfältig und die Weiterentwicklung der bereits vorhandenen Verfahren vollzieht sich rasant, so dass ein kontinuierlicher enger Austausch mit Expertinnen und Experten für bestimmte Verfahren

unerlässlich erscheint, wenn das Projekt einen guten Überblick liefern und mit einer gesicherten Auswahl abschließen soll. Die folgenden Arbeitspakete (AP) sollten dies gewährleisten: (1) die Begleitung des Projektes durch erfahrene interne und externe Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler über die gesamte Projektlaufzeit (Wissenschaftliche Forschungs-Begleitgruppe), (2) das Kennenlernen der verschiedenen Verfahren im engen Kontakt mit Institutionen und Wissenschaftler (inne) n, die die jeweiligen Verfahren in ihrer Forschung einsetzen (Praxisnahe Erkundung), (3) ein wissenschaftlicher Workshop mit ca. 30 Fachexpertinnen und Fachexperten (Experten-Workshop). Ein Überblick über alle Arbeitspakete findet sich auf einem Poster, das auf dem 13th ICBEN Congress on Noise as a Public Health Problem (Sukowski & Grenzebach, 2021) präsentiert wurde.

Der im Dezember 2022 durchgeführte Workshop ist somit ein Element, das gezielt zur Einbindung externer Expertise in den Projektablauf integriert wurde. Das ursprünglich formulierte Ziel des Workshops war, dass anhand von Vorträgen und im Rahmen von praktischen Übungen die bis dahin als grundsätzlich geeignet herausgearbeiteten Verfahren vorgestellt und demonstriert werden. Der Workshop sollte die Entscheidung für bestimmte Verfahren unterstützen und mit einer Empfehlung der Expert(inn)en abschließen. Zusätzlich zu den Expert(inn)en für die verschiedenen Verfahren sollten auch Lärmwirkungsforscher und Lärmwirkungsforscherinnen an dem Workshop teilnehmen, um so auch direkt die Probleme und die Anforderungen aus typischen Lärmwirkungsstudien im Auswahlprozess berücksichtigen zu können. In diesem BAuA Fokus ist der durchgeführte Workshop dokumentiert.

Literatur

Amstutz, S., Kündig, S., & Monn, C. (2010). SBiB-Studie: *Schweizerische Befragung in Büros*. Bern: SECO-Arbeit und Gesundheit, 142 Seiten.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Wirkung von Hintergrundschall auf kognitive Leistungen bei der Arbeit. Systematische Exploration objektiver Verfahren zur Untersuchung der Anstrengung bei der Aufgabenbearbeitung.

https://www.baua.de/DE/Aufgaben/Forschung/Forschungsprojekte/f2439.html

Kim, J., & de Dear, R. (2013). Workspace satisfaction - The privacy-communication trade-off in open-plan offices. *Journal of Environmental Psychology, 36*, 18-26.

DOI: 10.1016/j.jenvp.2013.06.007

Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung vom 6. März 2007 (BGBl. I S. 261), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 27. Juli 2021 (BGBl. I S. 3115) geändert worden ist. https://www.gesetze-im-internet.de/l_rmvibrationsarbschv/

Liebl, A., & Kittel, M. (2016). *Psychische Gesundheit in der Arbeitswelt - Lärm*. 1. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 77 Seiten.

DOI: 10.21934/baua:bericht20160713/4a

https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Berichte/F2353-4a.html

Pacharra, M., Getzmann, S., & Wascher, E. (2018). Mit neurophysiologischen Methoden an den Arbeitsplatz - auch zur Erfassung von extra-auralen Wirkungen von Lärm? In H. Sukowski (Hrsg.), 1. Fachgespräch Extra-aurale Wirkungen von Lärm bei der Arbeit. Themenschwerpunkt: Methoden zur Erfassung von Wirkungen und Bewertungen von Geräuschen, baua: Fokus.

1. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, S. 11-13.

DOI: 10.21934/baua:fokus20180517

https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Fokus/Extra-aurale-Wirkungen-von-Laerm.html

Rothe, I., Adolph, L., Beermann, B., Schütte, M., Windel, A., Grewer, A., Lenhardt, U., Michel, J., Thomson, B., & Formazin, M. (2017). *Psychische Gesundheit in der Arbeitswelt - Wissenschaftliche Standortbestimmung*. 1. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 260 Seiten. DOI: 10.21934/baua:bericht20170421 https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Berichte/Psychische-Gesundheit.html

Schlittmeier, S. J., Hellbrück, J., Thaden, R., & Vorländer, M. (2008). The impact of background speech varying in intelligibility: Effects on cognitive performance and perceived disturbance. *Ergonomics*, *51*(5), 719736. DOI:10.1080/0014013070174592

Sukowski, H. (Hrsg.). (2018). 1. Fachgespräch Extra-aurale Wirkungen von Lärm bei der Arbeit. Themenschwerpunkt: Methoden zur Erfassung von Wirkungen und Bewertungen von Geräuschen, baua: Fokus. 1. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. DOI: 10.21934/baua:fokus20180517

https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Fokus/Extra-aurale-Wirkungen-von-Laerm. html

Sukowski, H. (2022). Subjective assessments of interference during cognitive tasks in noisy and silent working conditions. In: Proceedings of 51st International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Inter-noise 2022). Glasgow, Großbritannien, 21.-24. August 2022, 8 Seiten.

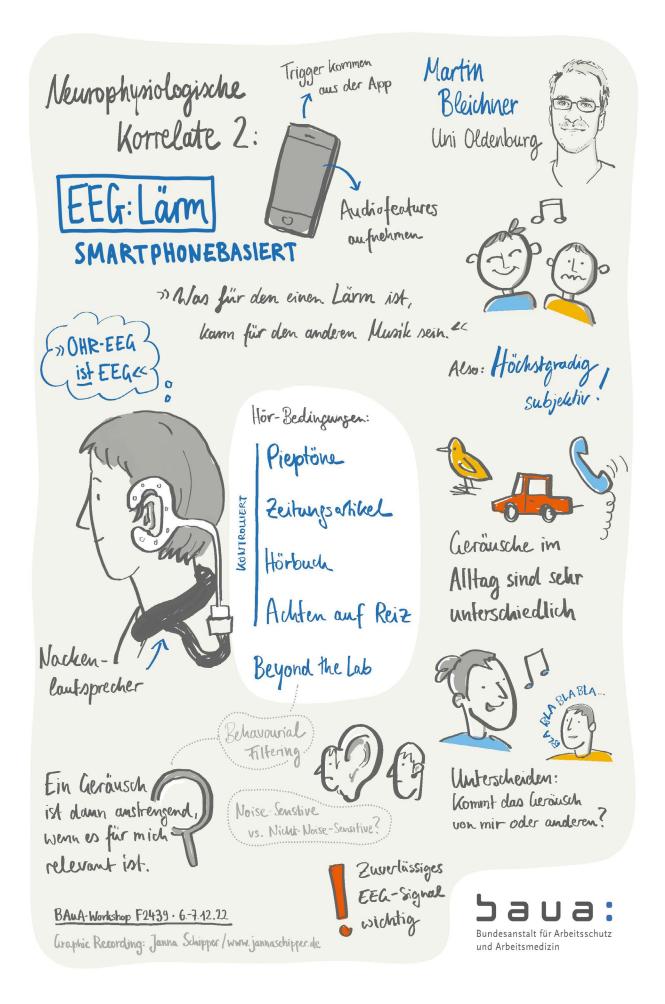
Sukowski, H. (2023). Extra-aurale Wirkungen von Lärm bei der Arbeit. baua: Fokus. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. DOI: 10.21934/baua:fokus20230

Sukowski, H., & Grenzebach, J. (2021). A research proposal on physiological parameters determining effort during cognitive tasks in a noisy work environment. In: Abstracts of 13th ICBEN Congress on Noise as a Public Health Problem (virtuelle Konferenz), Abstract 28640, S. 226, Stockholm, Schweden, 14.-17. Juni 2021.

http://www.icben.org/2021/ICBEN%202021%20Papers/ICBEN2021_abstracts.pdf

Syndicus, M., Wiese, B. S., & van Treeck, C. (2018). In the heat and noise of the moment: Effects on risky decision making. *Environment and Behavior*, 50, 3-27.

Technische Regeln für Arbeitsstätten - Lärm (ASR A3.7). GMBl 2021; 24: 543-556. https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/ASR-A3-7.html



Wahrnehmungsbasierte Lärmdosimetrie im Alltag: Gehirn, Geräusche und Gesundheit

Martin Bleichner

Department für Psychologie, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

"Plink,…..Plink" --- ein stetig tropfender Wasserhahn kann einem den Schlaf rauben und auch am Tag sehr irritieren. Auch wenn Geräusche nicht laut sind, können sie eine Vielzahl von negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und das Wohlbefinden haben. Dazu gehören Schlafstörungen, Stress, Bluthochdruck und sogar Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Deshalb ist es wichtig, den Einfluss von Geräuschen auf die menschliche Gesundheit zu verstehen und zu quantifizieren.

Es ist allgemein bekannt, dass laute Geräusche negative Auswirkungen auf unser Gehör haben können. In Arbeitsumgebungen mit hohem Lärmpegel existieren gesetzliche Grenzwerte, die dazu dienen, eine Schädigung des Gehörs zu vermeiden. Zur Erfassung der Lärmbelastung über längere Zeiträume kann ein klassisches Lärmdosimeter verwendet werden, das eine Person vor einer Überlastung warnen kann. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass eine Lärmpegelmessung nichts darüber aussagen kann ob sich eine Person durch den Lärm belästigt oder gestört fühlt. Das gleiche Rockkonzert wird von seinen Besuchern unter Umständen sehr anders wahrgenommen als von den Anwohnern die am nächsten Morgen früh aufstehen müssen.

Neben der Lautstärke spielen auch andere Faktoren, wie beispielsweise die Art des Geräuschs und die Dauer der Exposition, eine Rolle bei der Beurteilung der Auswirkungen von Lärm auf die menschliche Gesundheit. Selbst ein leises Geräusch kann von Menschen als störend und unangenehm empfunden werden. Auch dabei gibt es große individuelle Unterschiede. Dasselbe Geräusch kann bei einer Person zu einer starken negativen Reaktion führen, während es von anderen überhört oder ignoriert werden kann. Auch kann das identische Geräusch in einer Situation als sehr störend, und in einer anderen Situation sogar als angenehm empfunden werden. In vielerlei Hinsicht ist die Geräuschwahrnehmung hochgradig subjektiv und eine Einschätzung darüber wie stark eine Person von Geräuschen belastet ist, lässt sich nicht durch die Beschreibung und Messung der Geräuschkulisse beantworten. Die akustischen Eigenschaften eines Geräusches geben dabei keinen Aufschluss darüber, wie eine Person dieses Geräusch wahrnimmt und ob es als störend oder belastend empfunden wird.

Unser Ziel ist es, die subjektiv wahrgenommene Störung durch Geräusche objektiv messbar zu machen. Wir möchten kontinuierlich erfassen, wie Geräusche auf Personen wirken, ohne die Person explizit nach ihrer Wahrnehmung zu befragen und dadurch ihre Aufmerksamkeit auf ein Geräusch zu richten. Zu diesem Zweck nutzen wir die Elektroenzephalographie (EEG), um die hirnelektrische Aktivität zu messen. Im Labor wird EEG seit Jahrzehnten eingesetzt, um besser zu verstehen, wie wir Geräusche wahrnehmen. Jedes Geräusch, das wir hören, führt zu einer Veränderung der Gehirnaktivität, die unter bestimmten Voraussetzungen messbar ist. Daraus lassen sich dann Rückschlusse über die zugrunde liegenden Hirnprozesse und die Wahrnehmung einer Person ableiten.

In jüngerer Zeit wurden mobile EEG-Geräte entwickelt, die es ermöglichen, EEG-Messungen außerhalb von Laboren durchzuführen. In Oldenburg haben wir ein System namens "cEE-Grid" entwickelt, bei dem die hirnelektrische Aktivität mittels weniger Messelektroden, die um das Ohr herum angebracht werden, gemessen werden kann. In Kombination mit einem kleinen Signalverstärker, der am Körper getragen wird, können EEG-Messungen im Alltag

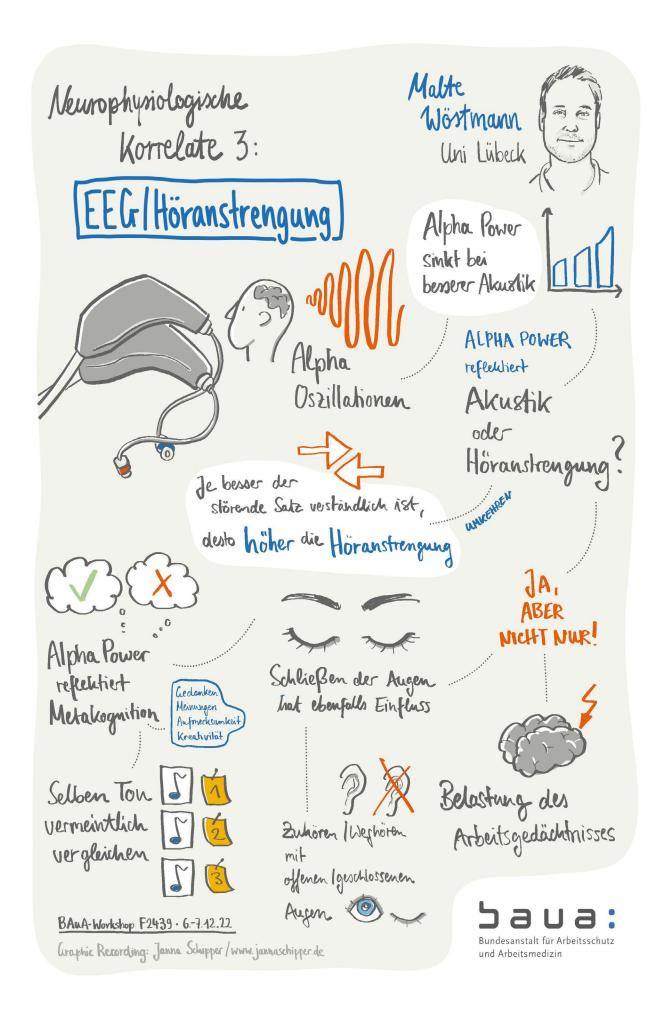
durchgeführt werden. Damit können wir nun auch am Arbeitsplatz, z.B. am Schreibtisch im Büro wenn sich eine Person nicht zu viel bewegt, EEG-Messungen durchführen.

Gleichzeitig zur Hirnaktivität zeichnen wir die von einer Person gehörten Geräusche auf. Um die Privatsphäre der beteiligten Personen zu schützen, verwenden wir eine von uns speziell entwickelte Smartphone-App. Diese App erkennt auftretende Geräusche automatisch und zeichnet lediglich den Zeitpunkt des Auftretens und die Lautstärke auf, ohne dass Rückschlüsse auf den Inhalt eines Gesprächs gezogen werden können. Aus diesen Aufzeichnungen können wir genügend Informationen gewinnen, um die Hirnaktivität mit den gehörten Geräuschen in Verbindung zu bringen um dann im nächsten Schritt ableiten zu können wie stark eine Geräuschkulisse auf eine Person einwirkt. Damit bieten sich uns neue Möglichkeiten um die subjektive Wahrnehmung von Geräuschen situationsabhängig unter realen Bedingungen zu erforschen.

In einer aktuellen Studie haben wir Versuchspersonen mit Ohr-EEG, einem tragbaren Signalverstärker, kleinen Ohrmikrofonen und einem Smartphone ausgestattet. Wir haben während eines normalen Büroarbeitstages kontinuierlich die Gehirnaktivität und Informationen über die Geräuschkulisse aufgezeichnet, einschließlich der vorkommenden Alltagsgeräusche und zusätzlichen Geräuschen, die wir den Versuchspersonen über einen Nackenlautsprecher vorgespielt haben. Wir haben die im Alltag erhobenen Daten im Anschluss mit den Ergebnissen aus dem Labor verglichen und konnten zeigen, dass wir auch unter Alltagsbedingungen EEG nutzen können, um Rückschlüsse über die Geräuschwahrnehmung zu ziehen.

Unsere Ergebnisse stellen einen wichtigen Fortschritt in Richtung einer wahrnehmungsbasierten Lärmdosimetrie dar. Dennoch gibt es noch einige Herausforderungen, die es zu bewältigen gilt. Um EEG-Langzeitmessungen im Alltag durchzuführen, benötigen wir noch kleinere und bequemere Signalverstärker, die z.B. hinter dem Ohr platziert werden können und den Träger nicht beeinträchtigen. Ein weiteres Problem besteht darin, dass es schwierig ist, verschiedene Geräuschquellen voneinander zu unterscheiden. Wie Kurt Tucholsky sagte: "Lärm ist das Geräusch der anderen". Viele der Geräusche, die wir im Alltag hören, verursachen wir selbst, aber wir empfinden sie nicht als störend. Um unsere Daten optimal auswerten zu können, müssen wir zwischen selbst erzeugten Geräuschen und Geräuschen von außen unterscheiden können.

Unser Ziel ist es, eine wahrnehmungsbasierte Lärmdosimetrie zu entwickeln, um die individuell empfundene Geräuschbelastung besser zu verstehen. Dadurch können wir Ansatzpunkte liefern, um Arbeits- und Lebensbedingungen so zu gestalten, dass sie für die jeweilige Person angenehmer sind. Unser Ziel ist es, zur präventiven Gesundheitsvorsorge beizutragen und die Folgekosten der durch Geräuschbelastung verursachten Erkrankungen zu reduzieren. Wir sind überzeugt, dass die Ergebnisse unserer Forschung dazu beitragen können, das Gesundheitssystem zu entlasten.



4 Geben Rhythmen im menschlichen Elektroenzephalogramm Aufschluss über die erlebte Höranstrengung?

Malte Wöstmann & Jonas Obleser Institut für Psychologie, Universität zu Lübeck

In alltäglichen Situationen – z. B. am Arbeitsplatz – sind wir umgeben von einer Vielzahl akustischer Sinneseindrücke. Nur ein Bruchteil dieser Geräusche ist für unser zielgerichtetes Handeln relevant, die anderen bezeichnen wir als Störschall oder Rauschen. Subjektiv werden Störgeräusche als belastend beschrieben und das Arbeiten in ihrer Gegenwart wird als anstrengend empfunden, selbst wenn die Störgeräusche oft keinen messbaren Einfluss auf die objektive Leistung haben. In diesem Beitrag erörtern wir kurz, ob und in welchem Rahmen die Messung von Hirnströmen im menschlichen Elektroenzephalogramm (EEG) geeignet ist, um die Höranstrengung zuverlässig abzubilden.

Das EEG wird nicht-invasiv mittels Elektroden an der Kopfoberfläche abgeleitet. Im EEG-Signal zeigen sich Rhythmen verschiedener Frequenz, so genannte Oszillationen. Besonders offensichtlich sind die oft gross-amplitudigen Alpha-Oszillationen mit einer Frequenz von circa 10 Hz. Die Amplitude der Alpha-Oszillationen verändert sich systematisch in Abhängigkeit einer Vielzahl äußerer Faktoren, die sich auf das innere Erleben auswirken. So steigt die Amplitude der Alpha-Oszillationen an, wenn Versuchspersonen im Labor angestrengt zuhören oder wenn sie sich mehrere Informationen gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis merken sollen (z. B. Obleser et al., 2012). Auf den ersten Blick liegt demnach die Vermutung nahe, dass auch die Höranstrengung in den Alpha-Oszillationen im EEG abgebildet werden könnte, da es sich auch bei ihr um einen inneren Erlebenszustand handelt, welcher durch äußere Faktoren beeinflusst wird.

Eine valide Messung der Höranstrengung sollte bestimmte Kriterien erfüllen. Erstens sollten die Messergebnisse einen starken Zusammenhang aufweisen zu den Ergebnissen anderer Messverfahren, z.B. Fragebögen, die dasselbe sog. Konstrukt messen (hier also Höranstrengung). Tatsächlich konnten wir und andere zeigen, dass die Amplitude der Alpha-Oszillationen mit dem subjektiven Erfolg beim Absolvieren einer Höraufgabe korreliert (Wöstmann et al., 2015, 2019). Zweitens sollte auszuschließen sein, dass die Alpha-Oszillationen im EEG ein anderes Konstrukt abbilden, welches eng verbunden ist mit der Höranstrengung. Denkbar wäre, dass die Alpha-Oszillationen nicht etwa die Höranstrengung direkt abbilden, sondern vielmehr die Qualität des akustischen Inputs und den damit verbundenen Höreindruck. In den meisten Hörsituationen steigt die Höranstrengung mit schlechterer Akustik – zum Beispiel bei einem Telefonat mit schlechtem Empfang (aber siehe Ellermeier et al., 2015). In der Vergangenheit konnten wir jedoch in Laborstudien zeigen, dass Veränderungen der Alpha-Amplitude tatsächlich eher das Hörerleben bzw. die Hörabsicht abbilden als die akustische Qualität: In bestimmten Situationen zeigt die Alpha-Amplitude nämlich den umgekehrten Effekt und sinkt sogar mit schlechterer Akustik – und zwar dann, wenn es darum geht, irrelevante Sprache zu ignorieren und schlechte Sprachqualität dieses Ignorieren erleichtert (Wöstmann et al., 2017).

In der Theorie ist das psychologische Konstrukt "Höranstrengung" nur schwer abzugrenzen von anderen, besser umgrenzten kognitiven Konstrukten wie Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis: Wenn wir uns in einer anstrengenden Hörsituation befinden, so zeichnet sich diese oft auch durch hohe Anforderungen an unsere Aufmerksamkeit und eine große Belastung des Arbeitsgedächtnisses aus. Noch komplexer wird dieses Geflecht verschiedener Konstrukte dadurch, dass Forschende verschiedene Formen der Höranstrengung postulieren (z. B. Herrmann & Johnsrude, 2020) – die erlebte Höranstrengung (eng. experienced listening effort)

und die aufgewandte Höranstrengung (eng. expended listening effort). Während die aufgewandte Höranstrengung die Ressourcen beschreibt, die für die Bewältigung einer Höraufgabe von der Hörerin eingesetzt oder zumindest bereitgestellt werden, bezieht sich die erlebte Höranstrengung vor allem auf die metakognitive Evaluation der eigenen kognitiven Prozesse, oft während oder im Nachgang einer schwierigen Hörsituation.

Generell gilt: Soll ein (neuro)physiologisches Maß ein bestimmtes kognitives Konstrukt wie Höranstrengung messen, so ist zu hinterfragen, ob die sodann gemessene Variabilität eindeutig auf Veränderungen im Konstrukt zurückzuführen ist. Dies ist kein triviales Problem: In Bezug auf Alpha-Oszillationen im EEG ist festzustellen, dass diese mit einer ganzen Reihe unterschiedlicher, kognitiver wie nicht-kognitiver Prozesse in Verbindung gebracht wurden. So steigt die auf der Kopfhaut messbare Alpha-Amplitude stark an, wenn Probanden schlicht ihre Augen schließen. In der visuellen Modalität wurden mindestens fünf verschiedene Funktionen der Alpha-Oszillationen postuliert (Clayton et al., 2018). Auch in den anderen Sinnesmodalitäten wird in der Fachliteratur ein Zusammenhang der Alpha-Oszillationen mit verschiedenen Konstrukten wie Aufmerksamkeit oder Arbeitsgedächtnis und verschiedenen zugrundeliegenden Funktionen wie neuraler Erregbarkeit oder sensorischer Sensitivität beschrieben. Unter Laborbedingungen streben Forschende daher eine penible Kontrolle anderer Variablen an, um den Zusammenhang zwischen Alpha-Oszillationen und einem bestimmten Konstrukt zu untersuchen. Bei Messungen, die in natürlichen Umgebungen stattfinden (sog. Feldstudien), lässt eine Veränderung der Alpha-Oszillationen im EEG allerdings nur sehr bedingt Rückschlüsse über ein bestimmtes Konstrukt – z. B. Höranstrengung – zu.

Zwar sind EEG-Labore an Forschungseinrichtungen zumeist darauf ausgelegt, eine Reihe von Störeinflüssen zu kontrollieren – z.B. durch die Verwendung schalldichter Kabinen. Aber das EEG kann mittlerweile auch dank einer neuen Generation von Geräten mobil in Alltagssituationen mit zufriedenstellender Datenqualität abgeleitet werden. Da es sich bei den Alpha-Oszillationen um eine fortwährend stattfindende neurale Signatur handelt, ist keine strikte Relation der Alpha-Oszillationen zu bestimmten Ereignissen nötig, im Gegensatz zu den Ereignis-korrelierten Potentialen (EKPs). Obwohl die Quantifizierung der Alpha-Aktivität somit technisch relativ simpel ist, sollte bedacht werden, dass es den einen Alpha Rhythmus nicht gibt (Schneider et al., 2021). Vielmehr messen wir im EEG eine Mischung räumlich und zeitlich getrennt auftretender Rhythmen, die selbst mithilfe der Messung an einer Vielzahl von Elektroden nur bedingt separiert werden können. Während eine relativ höhere Alpha Aktivität beim Zuhören unter schlechten akustischen Bedingungen (sog. Noise-Vocoding) im EEG vor allem an parietalen Elektroden auftritt (z. B. Obleser & Weisz, 2012), wurde ein ähnlicher Effekt kürzlich an implantierten Elektroden im superioren temporalen Kortex nachgewiesen (Billig et al., 2019). Es ist demnach nicht nur zu beachten, dass Alpha-Oszillationen eine Vielzahl kognitiver und nicht-kognitiver Prozesse abbilden, sondern ebenso, dass es eine Vielzahl von Alpha Rhythmen gibt, welche im EEG zuweilen nicht eindeutig trennbar sind.

Literatur

Billig, A. J., Herrmann, B., Rhone, A. E., Gander, P. E., Nourski, K. V., Snoad, B. F., Kovach, C. K., Kawasaki, H., Howard, M. A., & Johnsrude, I. S. (2019). A Sound-Sensitive Source of Alpha Oscillations in Human Non-Primary Auditory Cortex. Journal of Neuroscience, 39(44), 8679–8689. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0696-19.2019

Clayton, M. S., Yeung, N., & Cohen Kadosh, R. (2018). The many characters of visual alpha oscillations. European Journal of Neuroscience, 48(7), 2498–2508. https://doi.org/10.1111/ejn.13747

Ellermeier, W., Kattner, F., Ueda, K., Doumoto, K., & Nakajima, Y. (2015). Memory disruption by irrelevant noise-vocoded speech: Effects of native language and the number of frequency bands. The Journal of the Acoustical Society of America, 138(3), 1561–1569. https://doi.org/10.1121/1.4928954

Herrmann, B., & Johnsrude, I. S. (2020). A model of listening engagement (MoLE). Hearing Research, 397, 108016. https://doi.org/10.1016/j.heares.2020.108016

Obleser, J., & Weisz, N. (2012). Suppressed Alpha Oscillations Predict Intelligibility of Speech and its Acoustic Details. Cerebral Cortex, 22(11), 2466–2477. https://doi.org/10.1093/cercor/bhr325

Obleser, J., Wöstmann, M., Hellbernd, N., Wilsch, A., & Maess, B. (2012). Adverse Listening Conditions and Memory Load Drive a Common Alpha Oscillatory Network. Journal of Neuroscience, 32(36), 12376–12383.

https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4908-11.2012

Schneider, D., Herbst, S. K., Klatt, L.-I., & Wöstmann, M. (2021). Target enhancement or distractor suppression? Functionally distinct alpha oscillations form the basis of attention. The European Journal of Neuroscience. https://doi.org/10.1111/ejn.15309

Wöstmann, M., Herrmann, B., Wilsch, A., & Obleser, J. (2015). Neural Alpha Dynamics in Younger and Older Listeners Reflect Acoustic Challenges and Predictive Benefits. Journal of Neuroscience, 35(4), 1458–1467. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3250-14.2015

Wöstmann, M., Lim, S.-J., & Obleser, J. (2017). The Human Neural Alpha Response to Speech is a Proxy of Attentional Control. Cerebral Cortex, 27(6), 3307–3317. https://doi.org/10.1093/cercor/bhx074

Wöstmann, M., Waschke, L., & Obleser, J. (2019). Prestimulus neural alpha power predicts confidence in discriminating identical auditory stimuli. European Journal of Neuroscience, 49(1), 94–105. https://doi.org/10.1111/ejn.14226

5 Nutzbarkeit der Herzfrequenzvariabilität für Messungen bei lärmbezogenen Beanspruchungen am Arbeitsplatz

Stefan Sammito^{1,2} & Irina Böckelmann²

¹Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe, Köln

²Bereich Arbeitsmedizin der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Die Analyse der Herzfrequenzvariabilität (HRV) hat sich in den vergangenen Jahrzehnten wissenschaftlich etabliert und ist durch kleinere und tragbarere Messsysteme zur Erfassung der Herzaktionen auch außerhalb von stationären Aufenthalten in der Klinik oder wissenschaftlichen Studien in Laboren durchführbar (Sammito et al. 2021; Sammito and Böckelmann 2016b). Der Begriff HRV vereint eine Vielzahl von mathematisch berechneten Parametern, welche die Varianz, Rhythmik oder Komplexität der Zeitreihe von aufeinanderfolgenden Herzaktionen kennzeichnet. Aufgrund der besseren Erfassung im Rahmen der automatischen Detektierung wird in der Regel die R-Zacke anstelle der P-Welle als Zeichen der Aktivität des Sinusknoten genutzt und die zeitliche Änderung des Abstandes zwischen zwei aufeinanderfolgenden R-Zacken als HRV definiert (Böckelmann and Sammito 2016). Basierend auf der mathematischen Analyse der Variabilität der Abstände der Herzaktionen (den sog. NN-Intervallen bzw. RR-Intervallen) deutet eine erhöhte HRV auf eine verbesserte Anpassungsfähigkeit des Herzkreislaufsystems (HKS) hin, während eine erniedrigte HRV ein Zeichen für eingeschränkte Regulationsmechanismen des HKS und prognostisch auch mit einem erhöhten Risiko für Herzkreislauferkrankungen verbunden ist (Schuster et al. 2016).

Die HRV wird unabhängig von der akuten Belastung durch zahlreiche veränderbare und nicht veränderbare Faktoren beeinflusst. Neben unbeeinflussbaren physiologischen Parametern (z. B. Alter) existiert eine Reihe von veränderbaren Einflussfaktoren - z. B. Lebensgewohnheiten der Probanden bzw. daraus entstehende Folgen oder äußere Rahmenbedingungen (Sammito and Böckelmann 2016a). Des Weiteren geht eine Vielzahl von Krankheiten mit einer reduzierten HRV einher, wobei der Einfluss auf das vegetative Nervensystem vielmehr als Folge der Krankheit und nur selten als potentielle Ursache betrachtet werden kann. Hierbei lassen sich die einzelnen Einflussfaktoren in vier Hauptbereiche (unbeeinflussbare physiologische Faktoren, Krankheiten, beeinflussbare Lebensstilfaktoren und äußere Faktoren) unterteilen (Sammito et al. 2021).

Lärmexposition führt zu einer Sympathikusaktivierung (Gross and Kirchheim 1980) und zu einem Anstieg der Herzschlagfrequenz (Hettinger and Wobbe 1993). Der Einfluss von akuter und chronischer Lärmexposition auf die HRV wurde in einigen Studien untersucht (Lee et al. 2010; Schnell et al. 2013; Veternik et al. 2018; El Aarbaoui et al. 2017; Kraus et al. 2013; Walker et al. 2016; El Aarbaoui and Chaix 2020).

In den aktuellen Technischen Regeln für Arbeitsstätten ASR A3.7 "Lärm" vom März 2021 (Arbeitsschutzausschüsse beim BMAS, Ausschuss für Arbeitsstätten 2021) wird im §4 bei der Gesundheitsgefährdung durch Lärm auf die Unterschiede zwischen auralen und extra-auralen Lärmwirkungen hingewiesen. Je nach betrieblicher Situation können extra-aurale Wirkungen zu Beeinträchtigung der Sprachverständlichkeit führen, Störung der kognitiven Arbeitsleistung verursachen sowie psychisch beeinflussen und physiologische Aktivierungsreaktionen des zentralen und vegetativen Nervensystems hervorrufen (Arbeitsschutzausschüsse beim BMAS, Ausschuss für Arbeitsstätten 2021).

So untersuchten Veternik & Kollegen den Einfluss von Tönen in unterschiedlichen Frequenzen (20 Hz, 50 Hz, 2 kHz, 15 kHz) von jeweils 65 dB(A) in einer Laborstudie und fanden

keinen signifikanten Einfluss auf die HRV im Vergleich zu Ruhemessungen ohne entsprechende Geräuschexposition (Veternik et al. 2018). Demgegenüber fanden Kraus et al. in einer Untersuchung an 110 Probanden in Augsburg einen Zusammenhang zwischen täglicher Lärmexposition und erniedrigter HRV (Kraus et al. 2013). In einer weiteren Laborstudie, in der 16 gesunden Probanden aufsteigende Lärmpegel von 50, 60, 70 und 80 dB(A) ausgesetzt wurden, zeigte sich eine Reduzierung der HRV, welche mit zunehmender Lärmexposition zunahm (Lee et al. 2010). Auch weitere Studien belegten den Zusammenhang von HRV und zunehmender Lärmexposition (El Aarbaoui et al. 2017; Schnell et al. 2013; Walker et al. 2016; El Aarbaoui and Chaix 2020). Bei gleichzeitiger Lärmexposition nimmt die kognitive Beanspruchung zu und es kommt zeitgleich zu einer autonomen Gegenregulation im Sinne eines erhöhten Sympathikotonus (Golmohammadi et al. 2023; Fan et al. 2022).

Zusammenfassend ist die HRV, als Surrogat für das autonome Nervensystem, geeignet, lärmbezogene Beanspruchungen am Arbeitsplatz erfassen zu können. Neben der HRV sollten aber zur wissenschaftlichen Gesamtbewertung auch andere physiologische Messverfahren (z. B. EEG, fNIRS etc.) herangezogen werden. Nur durch die Kombination mehrere entsprechender physiologischer Messsysteme lassen sich aussagefähige Einschätzungen erstellen. Die zunehmende Miniaturisierung und Bedienbarkeit von entsprechenden tragbaren EKG-Geräten mit hoher Abtastrate (idealerweise 1000 Hz) bietet gerade für Felduntersuchungen im arbeitsmedizinischen und -wissenschaftlichen Setting mechanisch robuste, rückwirkungsarme und nicht-invasive Methoden zur Erfassung der RR-Intervalle und zur Analyse der HRV. Die entsprechende AWMF-S2k-Leitlinie "Nutzung der Herzschlagfrequenz und der Herzfrequenzvariabilität in der Arbeitsmedizin und der Arbeitswissenschaft" (Sammito et al. 2021) liefert detaillierte Informationen und Handlungsempfehlungen, u. a. für die Qualitätssicherung entsprechender HRV-Analysen.

Literatur

Arbeitsschutzausschüsse beim BMAS, Ausschuss für Arbeitsstätten (2021) Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A3.7 Lärm

Böckelmann I, Sammito S (2016) A III-3.2.2 – Herzfrequenzvariabilität. In: Letzel S, Nowak D (eds) Handbuch der Arbeitsmedizin. ecomed Verlag, pp 1–32

El Aarbaoui T, Chaix B (2020) The short-term association between exposure to noise and heart rate variability in daily locations and mobility contexts. Journal of exposure science & environmental epidemiology 30(2):383–393.

https://doi.org/10.1038/s41370-019-0158-x

El Aarbaoui T, Méline J, Brondeel R, Chaix B (2017) Short-term association between personal exposure to noise and heart rate variability: The RECORD MultiSensor Study. Environmental pollution (Barking, Essex: 1987) 231(Pt 1):703–711.

https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.031

Fan Y, Liang J, Cao X, Pang L, Zhang J (2022) Effects of Noise Exposure and Mental Workload on Physiological Responses during Task Execution. International journal of environmental research and public health 19(19).

https://doi.org/10.3390/ijerph191912434

Golmohammadi R, Motlagh MS, Aliabadi M, Faradmal J, Ranjbar A (2023) Staffs' physiological responses to irrelevant background speech and mental workload in open-plan bank office workspaces. Work (Reading, Mass.). https://doi.org/10.3233/WOR-220502

Gross R, Kirchheim H (1980) Effects of bilateral carotid and auditory stimulation on renal blood flow and sympathetic nerve activity in the conscious dog. Pflugers Archiv: European journal of physiology 383(3):233–239. https://doi.org/10.1007/BF00587524

Hettinger T, Wobbe G (1993) Kompendium der Arbeitswissenschaft. Kiehl-Verlag, Ludwigshafen

Kraus U, Schneider A, Breitner S, Hampel R, Rückerl R, Pitz M, Geruschkat U, Belcredi P, Radon K, Peters A (2013) Individual daytime noise exposure during routine activities and heart rate variability in adults: a repeated measures study. Environmental health perspectives 121(5):607–612. https://doi.org/10.1289/ehp.1205606

Lee G-S, Chen M-L, Wang G-Y (2010) Evoked response of heart rate variability using short-duration white noise. Autonomic neuroscience basic & clinical 155(1-2):94–97. https://doi.org/10.1016/j.autneu.2009.12.008

Sammito S, Böckelmann I (2016a) Factors influencing heart rate variability. Int J Cardio Forum. https://doi.org/10.17987/icfj.v6i0.242

Sammito S, Böckelmann I (2016b) Möglichkeiten und Einschränkungen der Herzfrequenzmessung und der Analyse der Herzfrequenzvariabilität mittels mobiler Messgeräte: Eine systematische Literaturübersicht (Options and limitations of heart rate measurement and analysis of heart rate variability by mobile devices: A systematic review). Herzschrittmachertherapie & Elektrophysiologie 27(1):38–45.

https://doi.org/10.1007/s00399-016-0419-5

Sammito S, Thielmann B, Klussmann A, Deußen A, Braumann K-M, Böckelmann I (2021) S2k-Leitlinie Nutzung der Herzschlagfrequenz und der Herzfrequenzva-riabilität in der Arbeitsmedizin und der Arbeitswissenschaft: AWMF-RegNr 002/042

Schnell I, Potchter O, Epstein Y, Yaakov Y, Hermesh H, Brenner S, Tirosh E (2013) The effects of exposure to environmental factors on Heart Rate Variability: an ecological perspective. Environmental pollution (Barking, Essex: 1987) 183:7–13. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.005

Schuster AK, Fischer JE, Thayer JF, Mauss D, Jarczok MN (2016) Decreased heart rate variability correlates to increased cardiovascular risk. International journal of cardiology 203:728–730. https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2015.11.027

Veternik M, Tonhajzerova I, Misek J, Jakusova V, Hudeckova H, Jakus J (2018) The impact of sound exposure on heart rate variability in adolescent students. Physiological research 67(5):695–702. https://doi.org/10.33549/physiolres.933882

Walker ED, Brammer A, Cherniack MG, Laden F, Cavallari JM (2016) Cardiovas-cular and stress responses to short-term noise exposures A panel study in healthy males. Environmental research 150:391–397. https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.06.016



6 Die elektrodermale Aktivität als Parameter für die objektive Beanspruchungsmessung unter Lärm

Michael Winter^{1,2} & Rüdiger Pryss²

¹Institut für Datenbanken und Informationssysteme, Universität Ulm, Ulm

²Institut für klinische Epidemiologie und Biometrie, Universität Würzburg, Würzburg

Es existiert ein breites Spektrum an anwendbaren Methoden, welche für die Messung von (extra-) auralen Wirkungen am Arbeitsplatz eingesetzt werden können, die unterschiedliche physio- als auch psychologische Faktoren in Betracht ziehen. Die Messung der elektrischen Hautleitfähigkeit, die sogenannte elektrodermale Aktivität (EDA) (Boucsein, 2012), ist eine zusätzliche Methodik, die zur Untersuchung solcher Wirkungen verwendet werden kann. Die EDA beschreibt Veränderungen in der Schweißproduktion des menschlichen Körpers aufgrund von emotionaler Erregung. Folglich wirken sich diese emotionalen Erregungszustände auf die Schweißproduktion aus, welche zu Unterschieden in der elektrischen Hautleitfähigkeit führen. Dabei stellt die Messung der EDA ein spezifisches Instrument für die Erfassung der autonomen Erregung dar und diese stehen in einem starken Zusammenhang mit Gehirnfunktionen, die motorische, sensorische und kognitive Fähigkeiten regulieren. Veränderungen in der Hautleitfähigkeit sind dabei Indizien für physio- und psychologische Erregungszustände (z. B., Freude, Stress, Angst), welche gesteuert werden vom sympathischen Nervensystem.

Erhoben wird die EDA über spezielle Elektroden, die vorzugsweise entweder an den Fußsohlen, den Handinnenflächen oder an den Fingergliedern befestigt werden, da die Anzahl der Schweißdrüsen an diesen Körperstellen besonders hoch ist. Die EDA stellt die Manifestation eines elektrischen Signals dar, welches charakterisiert wird durch zwei intra-individuelle Hautleitfähigkeitskomponenten (beide gemessen in Mikrosiemens): der tonische Basiswert (Skin Conductance Level, SCL) und der phasische Reaktionswert (Skin Conductance Response, SCR) (Braithwaite, Watson, Jones, & Rowe, 2013). Die SCL stellt dabei ein kontinuierliches Maß für das allgemeine Erregungsniveau der Hautleitfähigkeit dar. Dieses Maß passt sich an den vorherrschenden (Umwelt-)Gegebenheiten an und wird beeinflusst durch physio- und psychologische Zustände, als auch die autonome Regulation. Im Gegensatz zur SCL stellt die SCR signifikante Anstiege des Hautleitwerts als direkte Folge von diskreten Umweltreizen oder ausgelöst durch interne körperliche Prozesse dar. In der Regel treten diese Anstiege zwischen einer und fünf Sekunden nach der Präsentation eines Reizes (z.B. Bild, Ton) auf. Solche Anstiege des Hautleitwerts werden dabei stark mit involvierten neuronalen und kognitiven Prozessen (z. B. Entscheidungsfindung) im aktuellen Erregungszustand assoziiert. Ein SCR-Anstieg wird primär durch vier Faktoren charakterisiert, die eine Objektivierung von emotionalen Erregungszuständen eines Individuums ermöglichen: Latenz, Anstiegszeit, Amplitude und Erholungszeit. Die Latenz beschreibt die Dauer zwischen der Präsentation eines Reizes und dem abrupten Anstieg des Hautleitwerts, welche eine SCR charakterisiert. Die Anstiegszeit umfasst die Dauer der SCR bis zur Erreichung der höchsten Amplitude. Danach sinkt das Signal im Rahmen der Erholungszeit ab und erreicht ein entsprechendes Grundniveau. Während die Latenz in der Regel zwischen einer und fünf Sekunden beträgt, können die anderen Komponenten nur bedingt generalisiert werden und hängen folglich vom Individuum als auch dem dargebotenen Reiz ab.

21

Die folgende Abbildung 6.1 skizziert ein klassisches EDA Signal, welches die zwei Komponenten SCL und SCR präsentiert. Letzteres wird in der Abbildung 6.1 im Detail mit den vier genannten Faktoren charakterisiert.

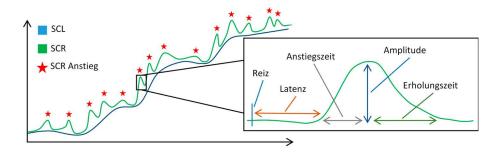


Abbildung 6.1: EDA Signal

Die Messung von Reizen unter Betrachtung der EDA ermöglicht es, die emotionale Erregung eines Individuums zu erheben. Die gewonnenen Erkenntnisse darüber liefern unterschiedlichen akademischen und kommerziellen Domänen interessante Aspekte über die individuelle Emotionswahrnehmung, weshalb die Messung der EDA eine immer breiter werdende Anwendung findet. Prominente Anwendung findet die Messung der EDA in der klinischen und psychologischen Forschung, wo man bestrebt ist, besser zu verstehen, wie Individuen emotional auf unterschiedliche Reize reagieren und wie diese Reaktionen von Eigenschaften (z. B., Farbe und Form), Persönlichkeitsmerkmalen (z. B., extrovertiert vs. introvertiert), sozialen Erwartungen, dem Zusammenspiel von kulturellen Aspekten und dem charakterlichen Hintergrund beeinflusst werden. Aber auch andere Domänen wie das Marketing, Medien und die Software-Entwicklung können von den Erkenntnissen, gewonnen aus EDA Messungen, profitieren. Dadurch lassen sich neue Produkte entwickeln, oder bereits verfügbare anpassen, welche explizit die emotionale intra-individuelle Konformität anstreben Tronstad, Amini, Bach, & Martinsen, 2022)

Die Durchführung von empirischen Studien, in welcher die Messung der EDA zum Einsatz kommt, erfordert eine sorgfältige Vorbereitung als auch kontrollierte Umsetzung. Der Grund liegt darin, dass bereits kleinste Veränderungen in den (Umwelt-)Bedingungen sich auf die Hautleitfähigkeit auswirken können. Unterschiedliche Temperaturen, Störgeräusche oder intra-individuelle Faktoren wie Müdigkeit oder Hunger können das Signal erheblich beeinflussen. Zusätzlich sieht man sich mit nicht-spezifischen Anstiegen (NS-SCR) konfrontiert, die durch körperinterne Prozesse (z.B., Verdauung) ausgelöst werden. Ebenso reagieren Individuen unterschiedlich stark auf gefühlsassozierte Reize, weshalb eine Differenzierung zwischen Hyper- und Hypo-Respondern gemacht werden muss. Um diese Faktoren zu adressieren, wird die Durchführung einer Nullmessung vor der eigentlichen Studie empfohlen. In dieser Nullmessung ist ein Individuum mit keiner Aufgabe beschäftigt und soll im Idealfall einen Zustand der Ruhe erreichen. Dadurch ist man zum Beispiel in der Lage die Anzahl an NS-SCR abzuleiten, welche man im Nachhinein auf die tatsächlichen Messungen übertragen und extrahieren kann. Da sich das EDA Signal mit der Zeit nur langsam verändert, muss ebenso darauf geachtet werden, dass bei der Präsentation von Reizen ein ausreichender zeitlicher Abstand eingehalten wird. Vor allem bei der Evaluation von SCR Anstiegen muss dieser Abstand gewährleistet sein, da es ansonsten nicht möglich ist, SCR Anstiege einem bestimmten Reiz eindeutig zuzuordnen (Braithwaite, Watson, Jones, & Rowe, 2013).

Ebenso wird man bei der Messung der EDA mit diversen Herausforderungen und Limitationen konfrontiert. Hierzu gehören Artefakte, die durch Körperbewegungen ausgelöst werden

oder einem schlechten Kontakt zwischen der Haut und den befestigten Sensoren. Diese auftretenden Artefakte können das EDA Signal negativ beeinflussen und charakterisieren sich durch untypische Schwankungen im Signal. Eine weitere typische Herausforderung stellt das Signal-Rausch-Verhältnis dar. Hierbei wird das Nutzsignal durch das elektrische Rauschen gestört und verringert damit die Qualität. Für die Adressierung dieser Artefakte existieren unterschiedliche Lösungen. Das Signal kann in Echtzeit beobachtet werden, sodass mögliche Störquellen schnellstens identifiziert werden können, und im Postprocessing ermöglicht der Einsatz von spezifischen Filtern (z.B., Tiefpass) eine Verbesserung der Signalqualität.

Mithilfe der Hautleitfähigkeit lassen sich Erkenntnisse über die emotionale Intensität des aktuellen Erregungszustands eines Individuums ableiten, aber die alleinige Anwendung davon ermöglicht keine Aussage über die Valenz. Das heißt, die Frage, ob Emotionen positiv, negativ oder neutral mit dem aktuell präsentierten Reiz assoziiert werden, lässt sich damit nicht beantworten. Der Grund liegt darin, dass mögliche SCR Anstiege, ausgelöst von positiven oder negativen Emotionen, identisch aussehen können und daher keine Rückschlüsse in eine spezifische Richtung ermöglichen (Shaffer, Combatalade, Peper, & Meehan, 2016).

Daher wird das volle Potenzial von EDA Messungen erst mit der Kombination von anderen Biosensoren ausgeschöpft, um die komplexen physio- und psychologischen Prozesse zu objektivieren und damit ein vollständiges Bild des emotionalen Verhaltens eines Individuums zu erhalten. Hierfür eignen sich Methoden wie das Eye Tracking, um EDA Messungen zu validieren und komplementieren. Zum Beispiel lässt sich dafür die Pupillometrie einsetzen, die stark korreliert mit emotionaler Erregung. Ebenso eignen sich weitere bekannte Techniken aus dem psychologischen und klinischen Kontext um EDA Messungen zu erweitern (z. B., Mimik-Analyse, EEG) (López-Gil, et al., 2016).

Die EDA wird als Instrument zur Validierung von psychologischen Konstrukten wie Emotionen, Affekt oder mentaler Belastung verwendet. Im Kontext der Evaluation von (extra) auralen Wirkungen am Arbeitsplatz stellt die Messung der Hautleitfähigkeit ein vielversprechendes Instrument dar. Durch die Erhebung der beiden EDA Komponenten SCL und SCR können neue Erkenntnisse gewonnen werden und ermöglichen ein tieferes Verständnis der Auswirkungen von akustischen Faktoren auf den emotionalen Erregungszustand eines Individuums. Zum Beispiel kann durch die Betrachtung der SCL das allgemeine Erregungsniveau und die einhergehenden Veränderungen, während akustischer Belastungen, objektiviert werden. Hingegen erlaubt die Identifikation von SCR Anstiegen die Ableitung von erlebter emotionaler Intensität (z. B., ausgelöst durch Stress) als Indikator für involvierte kognitive und neuronale Prozesse. Besonders in Kombination mit anderen Instrumenten wie zusätzlichen Biosensoren lässt sich die Interpretation von Effekten auf physio- und psychologischen Komponenten von Lärmauswirkungen deutlich verbessern. Jedoch Bedarf es dafür einen definierten kohärenten methodischen Rahmen, der die Validierung zwischen den von der Theorie erwarteten Ergebnissen und den tatsächlichen Effekten von extra-auralen Belastungen ermöglicht.

Literatur

Boucsein, W. (2012). Electrodermal activity. Springer Science & Business Media.

Braithwaite, J. J., Watson, D. G., Jones, R., & Rowe, M. (2013). A guide for analysing electrodermal activity (EDA) \& skin conductance responses (SCRs) for psychological experiments. Psychophysiology, 49(1), 1017-1034.

López-Gil, J.-M., Virgili-Gomá, J., Gil, R., Guilera, T., Batalla, I., Soler-González, J., & García, R. (2016). Method for Improving EEG Based Emotion Recognition by Combining It with Synchronized Biometric and Eye Tracking Technologies in a Non-invasive and Low Cost Way. Frontiers in computational neuroscience, 10, 85.

Shaffer, F., Combatalade, D., Peper, E., & Meehan, Z. M. (2016). A guide to cleaner electrodermal activity measurements. Biofeedback, 44(2), 90-100.

Tronstad, C., Amini, M., Bach, D. R., & Martinsen, \emptyset . G. (2022). Current trends and opportunities in the methodology of electrodermal activity measurement. Physiological Measurement, 43(2), 02TR01.



7 Neuroergonomie am Arbeitsplatz: Mobiles EEG zur Messung kognitiver Beanspruchung in naturalistischen Umgebungen

Julian Elias Reiser & Edmund Wascher Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der TU Dortmund (IfADo)

Was nutzen mobile neurophysiologische Verfahren in der Arbeitsforschung?

Moderne Arbeitsumgebungen sind von einem ständigen Fluss an Informationen geprägt. Im Gegensatz zu früheren Arbeitsplätzen, die hauptsächlich körperliche Arbeit erforderten, liegt der Fokus nun vermehrt auf der Ausführung mentaler Aufgaben. Allerdings gibt es auch hier viele Stressfaktoren, die sowohl physischer (z. B. Lärm, Helligkeit) als auch kognitiver Natur (z. B. Unterbrechungen, Multitasking) sein können. Diese Faktoren können zu psychischen Belastungen für Arbeitnehmer*innen führen und sich je nach individuellen Voraussetzungen in unterschiedlicher psychischer Beanspruchung niederschlagen (Joiko et al., 2010). Obwohl psychische Belastungen und die resultierenden Beanspruchungen bereits seit Jahren Bestandteil der betrieblichen Gefährdungsbeurteilung sind (gemäß dem Arbeitsschutzgesetz § 5, Absatz 3), fehlt es bisher an objektiven Verfahren, um diese Faktoren zu quantifizieren und zuverlässig zu beurteilen. Zwar gibt es die Möglichkeit, Fragebögen und Arbeitsplatzanalysen durchzuführen, doch sind diese häufig subjektiven Verzerrungen ausgesetzt oder aufgrund spezifischer Tätigkeiten nur schwer durchführbar.

Physiologische und insbesondere neurophysiologische Methoden bieten die Möglichkeit, mentale Prozesse non-invasiv und mit sehr hoher zeitlicher Auflösung abzubilden (Parasuraman, 2003, 2011). Das Elektroenzephalogramm (EEG) ist aufgrund seiner hohen Mobilität und den vergleichsweise geringen Kosten besonders gut für Untersuchungen in Arbeitsumgebungen geeignet (Wascher et al., 2023). Das EEG erfasst die elektrische Aktivität des Gehirns über kleine Elektroden, die an der Kopfoberfläche angebracht sind. Diese Aktivität kann dann über Stunden mobil aufgezeichnet werden, entweder über eine SD-Karte im Verstärker (z. B. LiveAmp, Brain Products GmbH, GER) oder auf einem Mobiltelefon (z. B. Smarting, mBrain-Train, SER). Diese Aufnahmen können später auf Veränderungen in der Informationsverarbeitung spezifischer Ereignisse oder auf den Wechsel mentaler Zustände über längere Zeitspannen hinweg analysiert werden.

Kognitive Ressourcen und Workload

Kognitiver Workload – oft als die englische Entsprechung psychischer Beanspruchung genutzt – wird als der Aufwand geistiger Ressourcen beschrieben, der zu jedem Zeitpunkt geleistet werden muss, um gegebene Anforderungen zu bewältigen (Mandrick et al., 2016). Diese aufgewendeten Ressourcen haben eine begrenzte Kapazität, sodass es bei einem zu hohen Ressourcenbedarf zu Fehlern bei der Aufgabenausführung kommen kann. Diese Kapazitätsgrenze kann bei einer oder mehreren gleichzeitig ausgeführten Aufgaben auftreten. Insbesondere, wenn Ressourcen für Aufgaben der gleichen Modalität benötigt werden (bspw. visuell oder auditiv), kann es schneller zu Engpässen und folglich zur falschen Aufgabenausführung kommen (Wickens, 2008). So können zum Beispiel an einem Logistikarbeitsplatz die visuelle Darbietung von Paketinformationen über eine Datenbrille und die visuelle Kontrolle des Gangs schnell interferieren und zu Unfällen führen. Dies ist jedoch nur schwer über Fragebögen festzustellen und bedarf eines zeitlich hoch aufgelösten Maßes, das während der Bewegung kontinuierlich eben jene Ressourcen aufzeichnen kann.

Neuroergonomie – Erfassung von mentaler Beanspruchung am Arbeitsplatz

Hier kommen neuroergonomische Verfahren zum Tragen. Diese Disziplin beschreibt die menschenzentrierte Untersuchung des menschlichen Gehirns und dessen Arbeitsweisen in alltags- und arbeitsrelevanten Umwelten (Mehta & Parasuraman, 2013). Mit mobilen Erhebungsmethoden werden Aufnahmen in Arbeitsplatzsimulationen oder an richtigen Arbeitsplätzen gemacht und auf Markern mentaler Beanspruchung untersucht. Mit den neuen Entwicklungen bei Aufnahme- und Analysemethoden ist es mittlerweile auch möglich, nicht nur stationäre Arbeitsplätze zu untersuchen, sondern auch Belastungseffekte an immer häufiger anzutreffenden Arbeitsplätzen mit kognitiven als auch physischen Anteilen (z.B. bei der Logistiklagerarbeit) zu erforschen. Denn nicht nur Denkarbeit kann mentale Beanspruchung hervorrufen. Auch motorische Prozesse haben kognitive Anteile, wie z.B. die Handlungsplanung oder die visuelle Kontrolle der Fortbewegung. Bewegung kann einen starken Einfluss auf mentale Verarbeitungsprozesse haben, so zum Beispiel auch das einfache Laufen, das bis vor einiger Zeit als automatischer Prozess galt (Dietz, 2003; Dietz et al., 1998). Mittlerweile zeigten viele Studien, dass z. B. die Fortbewegung zu Fuß negative Auswirkungen auf die Ressourcenverfügbarkeit für eine mentale Zweitaufgabe haben kann (Al-Yahya et al., 2011; Reiser et al., 2021, 2021; Shaw et al., 2018).

Auch Analysemethoden entwickeln sich stetig fort, sodass die sonst übliche Präsentation aufgabenfremder Stimuli nicht mehr zwingend nötig ist. Da das Signal, das an der Kopfhaut gemessen wird, sehr verrauscht ist, bedarf es oft vieler gleicher Ereignisse, um kognitive Prozesse über diese Ereignisse hinweg zu aggregieren und artefaktbehaftetes Signal heraus zu mitteln (Luck, 2014). Dies wurde bisher durch die Darbietung dutzender gleichförmiger visueller oder auditiver Stimuli erreicht. Mittlerweile können jedoch auch körpereigene Verhaltensweisen genutzt werden, um ereignisbasierte Analysen durchzuführen. Insbesondere die Nutzung von Augenaktivität, also von Blinzlern, Sakkaden und Fixationen, hat sich über die letzten Jahre als ein interessanter Ansatz zur Analyse von kognitiven Prozessen herausgestellt (Alyan et al., 2023; Wascher et al., 2014, 2015, 2022; Wunderlich & Gramann, 2021). Dabei wurde bereits gezeigt, dass insbesondere ein Augenblinzler immer dann auftritt, wenn eine Informationseinheit beendet ist - ein geschriebener Satz (Orchard & Stern, 1991), ein gesprochener Satz (Kobald et al., 2019) oder eine Filmszene (Nakano et al., 2009). Dieses Verhalten kann nun zur Beanspruchungsmessung genutzt werden, indem das EEG gezielt nach den Blinzlern in einer spezifischen Belastungssituation analysiert wird und somit Aufschlüsse über Verarbeitungsprozesse und Ressourcenverfügbarkeit zum Zeitpunkt des Lidschlags gibt. Wenn das Signal über mehrere Blinzler aggregiert wird, können bereits valide Analysen der Beanspruchungssituation durchgeführt werden (Alyan et al., 2023).

Extra-aurale Wirkungen von Lärm bei der Arbeit

Mithilfe des EEGs können nicht nur Einflüsse von visuellen, sondern auch von auditiven Reizen auf die Beanspruchung einer Person analysiert werden. Dadurch bietet sich die Möglichkeit, den Einfluss von störenden Schallquellen auf die reizspezifische Informationsverarbeitung des Menschen zu erfassen. So zeigten Kobald et al. (2016) in einem Laborexperiment, dass starke Lärmexposition einen negativen Einfluss auf eine visuelle Aufmerksamkeitsaufgabe haben kann. Versuchspersonen zeigten Verhaltensdekremente, die mit Inhibierungsprozessen im Gehirn einhergingen, um den Effekt von Lärm auf die Reizverarbeitung zu mindern oder zu unterdrücken. Ähnliche Befunde wurden von Rosenkranz et al. (2023) berichtet, die Arbeitsplatzlärm während einer visuell-motorischen Aufgabe präsentierten.

Da diese Studien jedoch in abgeschirmten und reizarmen Laborumgebungen durchgeführt wurden, lassen sich diese Erkenntnisse teilweise nur schwer für die Beurteilung tatsächlicher Arbeitsplätze übertragen. Es zeigten sich jedoch auch beeinträchtigende Effekte von alltäglichen Geräuschkulissen auf die auditive Reizverarbeitung in natürlichen Umgebungen

(Scanlon et al., 2019, 2020). Hier wurde ebenfalls demonstriert, dass bestimmte Prozesse der Reizverarbeitung durch natürliche Umgebungsgeräusche moduliert werden, um die sensorische und kognitive Reizverarbeitung vor äußeren Einflüssen abzuschirmen.

Die Zukunft der neurophysiologischen Beanspruchungsmessung

Durch die Entwicklung neuer Sensoren und die Vernetzung des EEGs mit anderen, non-invasiven Messmodalitäten kann die Messung psychischer Beanspruchung, die durch äußere Reize hervorgerufen wird, immer weiter verfeinert werden (Gramann et al., 2011, 2014). Indem der Hintergrundschallpegel mit dem Mobiltelefon aufgezeichnet (Blum et al., 2021) und mit dem EEG ereignisbasiert analysiert wird, ist eine Erfassung der psychischen Beanspruchung in natürlichen Umgebungen in der Zukunft denkbar. Durch systematische Untersuchungen kann es gelingen, zuerst in Laborumgebungen und später in Realweltsituationen – mit weniger Kontrolle über Umgebungsparameter – konkrete Marker zur Messung von Beanspruchung zu destillieren (Parada, 2018) und mit subjektiven Maßen zu verbinden (Matthews et al., 2015). Nur durch eine multimodale Erfassung des mentalen Loads kann ein umfassendes Bild der Belastungs- und Beanspruchungssituation an einem Arbeitsplatz abgebildet werden, so auch in Bezug auf Lärm.

Literatur

Al-Yahya, E., Dawes, H., Smith, L., Dennis, A., Howells, K., & Cockburn, J. (2011). Cognitive motor interference while walking: A systematic review and meta-analysis. Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 35, 715–728.

https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2010.08.008

Alyan, E., Wascher, E., Arnau, S., Kaesemann, R., & Reiser, J. E. (2023). Operator State in a Workplace Simulation Modulates Eye-Blink Related EEG Activity. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 31, 1167–1179.

https://doi.org/10.1109/TNSRE.2023.3241962

Blum, S., Hölle, D., Bleichner, M. G., & Debener, S. (2021). Pocketable Labs for Everyone: Synchronized Multi-Sensor Data Streaming and Recording on Smartphones with the Lab Streaming Layer. Sensors, 21(23), 8135. https://doi.org/10.3390/s21238135

Dietz, V. (2003). Spinal cord pattern generators for locomotion. Clinical Neurophysiology, 114(8), 1379–1389. https://doi.org/10.1016/S1388-2457(03)00120-2

Dietz, V., Wirz, M., Colombo, G., & Curt, A. (1998). Locomotor capacity and recovery of spinal cord function in paraplegic patients: A clinical and electrophysiological evaluation. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Electromyography and Motor Control, 109(2), 140–153. https://doi.org/10.1016/S0924-980X(98)00002-2

Gramann, K., Ferris, D. P., Gwin, J., & Makeig, S. (2014). Imaging natural cognition in action. International Journal of Psychophysiology, 91(1), 22–29. https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2013.09.003

Gramann, K., Gwin, J. T., Ferris, D. P., Oie, K., Jung, T. P., Lin, C. T., Liao, L. D., & Makeig, S. (2011). Cognition in action: Imaging brain/body dynamics in mobile humans. Reviews in the Neurosciences, 22(6), 593–608. https://doi.org/10.1515/RNS.2011.047

Joiko, K., Schmauder, M., & Wolff, G. (2010). Psychische Belastung und Beanspruchung im Berufsleben (5th ed.). BAuA.

Kobald, S. O., Getzmann, S., Beste, C., & Wascher, E. (2016). The impact of simulated MRI scanner background noise on visual attention processes as measured by the EEG. Scientific Reports, 6(1), 28371. https://doi.org/10.1038/srep28371

Kobald, S. O., Wascher, E., Heppner, H., & Getzmann, S. (2019). Eye blinks are related to auditory information processing: Evidence from a complex speech perception task. Psychological Research, 83(6), 1281–1291. https://doi.org/10.1007/s00426-017-0952-9

Luck, S. J. (2014). An introduction to the event-related potential technique. MIT Press.

Mandrick, K., Chua, Z., Causse, M., Perrey, S., & Dehais, F. (2016). Why a comprehensive understanding of mental workload through the measurement of neurovascular coupling is a key issue for Neuroergonomics? Frontiers in Human Neuroscience, 10(May), 1–5. https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00250

Matthews, G., Reinerman-Jones, L. E., Barber, D. J., & Abich, J. (2015). The psychometrics of mental workload. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 57(1), 125–143. https://doi.org/10.1177/0018720814539505

Mehta, R. K., & Parasuraman, R. (2013). Neuroergonomics: A review of applications to physical and cognitive work. Frontiers in Human Neuroscience, 7(December), 1–10. https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00889

Nakano, T., Yamamoto, Y., Kitajo, K., Takahashi, T., & Kitazawa, S. (2009). Synchronization of spontaneous eyeblinks while viewing video stories. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 276(1673), 3635–3644. https://doi.org/10/fh2v3q

Orchard, L. N., & Stern, J. A. (1991). Blinks as an index of cognitive activity during reading. Integrative Physiological and Behavioral Science, 26(2), 108–116. https://doi.org/10/bvrmjs

Parada, F. J. (2018). Understanding natural cognition in everyday settings: 3 pressing challenges. Frontiers in Human Neuroscience, 12(September), 1–5. https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00386

Parasuraman, R. (2003). Neuroergonomics: Research and practice. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 4(1–2), 5–20. https://doi.org/10.1080/14639220210199753

Parasuraman, R. (2011). Neuroergonomics: Brain, cognition, and performance at work. Current Directions in Psychological Science, 20(3), 181–186. https://doi.org/10.1177/0963721411409176

Reiser, J. E., Wascher, E., Rinkenauer, G., & Arnau, S. (2021). Cognitive-motor interference in the wild: Assessing the effects of movement complexity on task switching using mobile EEG. European Journal of Neuroscience, 54(August), 8175–8195. https://doi.org/10.1111/ejn.14959

Rosenkranz, M. (2023). Investigating the attentional focus to workplace-related soundscapes in a complex audio-visual-motor task using EEG. Frontiers in Neuroergonomics, 3, 1–14. https://doi.org/10.3389/fnrgo.2022.1062227 Scanlon, J. E. M., Cormier, D. L., Townsend, K. A., Kuziek, J. W. P., & Mathewson, K. E. (2019). The ecological cocktail party: Measuring brain activity during an auditory oddball task with background noise. Psychophysiology, 56(11).

Scanlon, J. E. M., Redman, E. X., Kuziek, J. W. P., & Mathewson, K. E. (2020). A ride in the park: Cycling in different outdoor environments modulates the auditory evoked potentials. International Journal of Psychophysiology, 151, 59–69. https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2020.02.016

https://doi.org/10.1111/psyp.13435

Shaw, E. P., Rietschel, J. C., Hendershot, B. D., Pruziner, A. L., Miller, M. W., Hatfield, B. D., & Gentili, R. J. (2018). Measurement of attentional reserve and mental effort for cognitive workload assessment under various task demands during dual-task walking. Biological Psychology, 134, 39–51. https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2018.01.009

Wascher, E., Arnau, S., Gutberlet, M., Chuang, L. L., Rinkenauer, G., & Reiser, J. E. (2022). Visual Demands of Walking Are Reflected in Eye-Blink-Evoked EEG-Activity. Applied Sciences, 12(13), 6614. https://doi.org/10.3390/app12136614

Wascher, E., Heppner, H., & Hoffmann, S. (2014). Towards the measurement of event-related EEG activity in real-life working environments. International Journal of Psychophysiology, 91(1), 3–9. https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2013.10.006

Wascher, E., Heppner, H., Möckel, T., Kobald, S. O., & Getzmann, S. (2015). Eye-blinks in choice response tasks uncover hidden aspects of information processing. EXCLI Journal, 14, 1207–1218. https://doi.org/10.17179/excli2015-696

Wascher, E., Reiser, J., Rinkenauer, G., Larrá, M., Dreger, F. A., Schneider, D., Karthaus, M., Getzmann, S., Gutberlet, M., & Arnau, S. (2023). Neuroergonomics on the Go: An Evaluation of the Potential of Mobile EEG for Workplace Assessment and Design. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 65(1), 86–106. https://doi.org/10.1177/00187208211007707

Wickens, C. D. (2008). Multiple resources and mental workload. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 50(3), 449–455. https://doi.org/10.1518/001872008X288394.

Wunderlich, A., & Gramann, K. (2021). Eye movement-related brain potentials during assisted navigation in real-world environments. European Journal of Neuroscience, 54, 8336–8354. https://doi.org/10.1111/ejn.15095



8 Biologische (endokrinologische) Stressmarker zur Beanspruchungsmessung bei Lärm am Arbeitsplatz

Linda Becker

Institut für Psychologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Die akute biologische Stressreaktion ist vielfältig und verläuft in unterschiedlichen Phasen. In der ersten unmittelbaren Phase, welche auch als Kampf-oder-Flucht-Reaktion (Selye, 1950) bekannt ist, wird das Sympathische Nervensystem (SNS) aktiviert und die Aktivität des Parasympathischen Nervensystem herunterreguliert. Die Kampf-oder-Flucht-Reaktion dient in erster Linie dazu, das Überleben zu sichern und in Bedrohungssituationen Energiereserven zu mobilisieren und nicht überlebensnotwendige Prozesse herunterzufahren. Messbar ist diese Reaktion über elektrophysiologische Maße wie der Messung der Herzrate, der Herzratenvariabilität oder des Blutdrucks. Ein weiterer SNS-Marker, um die SNS-Reaktivität in akuten Stresssituationen zu untersuchen, ist das Enzym Alpha-Amylase, welches unkompliziert über die Verwendung von Speichelproben gemessen werden kann (Nater & Rohleder, 2009).

Eine weitere, verzögert auftretende biologische Stressreaktion ist die Aktivierung der Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinden-Achse (HHNA), welche die Ausschüttung des Stresshormons Cortisol aus den Nebennierenrinden stimuliert. Cortisol hat sich als geeignete Stressmarker vor allem in akuten psycho-sozialen Belastungssituationen erwiesen und ist der bekannteste endokrinologische Stressmarker. Auch Cortisol kann aus Speichelproben gewonnen werden, was diesen Marker ebenfalls für den Einsatz in Labor- und Feldstudien prädestiniert.

Mit weiterer Verzögerung wird das Immunsystem aktiviert. Die Effekte sind nach wenigen Stunden bis Tagen messbar. Zur unmittelbaren Beurteilung von Beanspruchung am Arbeitsplatz eignen sich Immunsystemmarker daher nur bedingt.

In Laborstudien zur Untersuchung von akuten Stressreaktionen hat sich eine Kombination der Messung von speichelbasierten Maßen (sAA und Cortisol) und elektrophysiologischen Maßen (in der Regel Herzrate und Herzratenvariabilität) etabliert [z. B. Becker et al. (2020); Becker & Rohleder (2019)]. Sind diese Maße aber nun geeignete Marker für die Beanspruchungsmessung am Arbeitsplatz bei Lärmexposition?

Bevor diese Frage beantwortet werden kann, muss auf die Stressorspezifitätshypothese (Kemeny, 2003) eingegangen werden: Ob ein bzw. welches Stresssystem aktiviert wird, hängt unter anderem von der Art des Stressors ab. Soziale, als Bedrohung erlebte Stressoren aktivieren in der Regel sowohl das SNS als auch die HHNA (siehe Studien zum Trier Social Stress Test; Kirschbaum et al., 1993). Physische Stressoren wie z. B. Kälte aktivieren vornehmlich das SNS (Lovallo, 1975). Eine Kombination aus Kältestress und sozialer Evaluation kann zur Aktivierung beider Stresssysteme führen (wie z. B. beim sozial-evaluativen Kaltwassertest; Becker et al., 2019; Schwabe et al., 2008). Körperliche Stressoren, die mit einer kardiovaskulären Belastung einhergehen führen hauptsächlich zu einer SNS-Aktivierung und nur bei längerer Dauer oder sehr hoher Intensität zusätzlich zu einer HHNA-Reaktion. Auch Krafttraining aktiviert vornehmlich das SNS (Becker et al., 2021). Wie sieht es nun aber mit kognitiven Stressoren aus?

In einer aktuellen Studie haben wir untersucht, zu welchen biologischen Stressreaktionen Multitasking, als ein Beispiel für einen vor allem am modernen Arbeitsplatz, allgegenwärtigem kognitiven Stressor, führt. Eine systematische Literaturrecherche (Becker et al, 2022a) hat gezeigt, dass Multitasking im Vergleich zum Durchführen nur einer Aufgabe (sog. Sin

gle-Tasking) zu einer Aktivierung des SNS führt. Die Studienlage bzgl. der HHNA und des Immunsystems war zu diesem Zeitpunkt nicht eindeutig. Daher wurde ein aufwändiges Studiendesign entwickelt, mit dem Ziel, biologische Stressreaktionen bei Multitasking zu untersuchen (Becker et al., 2022b). An der Studie nahmen knapp 200 Personen teil, die zufällig einer von 6 Bedingungen zugeteilt wurden. Zwei dieser Bedingungen waren Kontrollbedingungen. In den anderen Bedingungen mussten zwischen 2 und 3 Aufgaben entweder abwechselnd oder gleichzeitig durchgeführt werden. Es wurde eine umfangreiche Messung der biologischen Stresssysteme (u. a. über die Messung speichelbasierter Marker) durchgeführt. Die Studienergebnisse zeigen, dass Multitasking sowohl zu dem subjektiven Empfinden, sich gestresst zu fühlen führt, und außerdem das SNS aktiviert. Es konnte jedoch keine Reaktion der HHNA oder des Immunsystems gefunden werden (Becker et al., under revision). Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass SNS-Marker, jedoch nicht HHNA-Maße, geeignet sein können, um Beanspruchung durch Multitasking zu messen.

Jedoch ist zu beachten, dass auch Lärm ein Stressor sein kann, der zu biologischen Stressreaktionen führen kann (Bigert et al., 2005; Daiber et al., 2019). Über die oben vorgestellten Verfahren wäre es damit nicht eindeutig möglich, ausschließlich die durch Multitasking induzierte Beanspruchung zu erfassen. Bei einer Kombination von Multitasking mit einem Lärmstressor bedarf es also geeigneter Kontrollbedingungen, um zwischen beiden Stressoren (Lärm und Multitasking) unterscheiden zu können.

Zuletzt soll noch ein kurzer Ausblick auf die Messung der Langzeitfolgen von chronischer Stressbelastung z. B. durch Lärm gegeben werden. Dauerhafter Stress kann zu einer langfristigen (in den meisten Fällen Über-) Aktivierung der biologischen Stresssysteme führen. Chronische Überaktivierung des SNS kann sich in einer dauerhaften Erhöhung des Blutdrucks oder der Herzrate äußern und ist über diese Maße unkompliziert messbar. Die Auswirkungen von chronischem Stress auf die HHNA lassen sich über die Messung von Cortisolkagesprofilen [Pretscher et al., (2021); Stalder et al. (2016)] oder über die Messung der Cortisolkonzentration im Haar realisieren (Staufenbiel et al., 2013). Die Erfassung der Langzeitfolgen von chronischem Stress auf das Immunsystem kann über blutbasierte Maße erfolgen, wie z. B. über die Messung des C-reaktiven Proteins (CRP). CRP kann relativ einfach aus Kapillarblutproben über die sog. Dried-Blood-Spot-Methode (DBS; McDade, 2014) bestimmt werden, wie es z. B. in Becker, Keck et al. (2022) oder Kaltenegger et al. (2023) durchgeführt wurde. All diese Maße sind in der Forschung etabliert, um die gesundheitlichen mit Stress assoziierten Langzeitfolgen von chronischem Stress zu messen.

Fazit: Biologische (endokrinologische) Stressmarker eignen sich, um biologische Stressreaktionen in akuten Stresssituationen wie z.B. bei akuter Lärmexposition oder die Folgen von chronischer Stressbelastung zu untersuchen. Die Verfahren sind jedoch nicht sensitiv genug, um kognitive Beanspruchung direkt zu erfassen. Daher wird eine Kombination mit anderen Methoden (z.B. EEG und Pupillometrie) empfohlen.

Literatur

Becker, L., & Rohleder, N. (2019). Time course of the physiological stress response to an acute stressor and its associations with the primacy and recency effect of the serial position curve. PloS One, 14(5), e0213883.

Becker, L., Kaltenegger, H. C., Nowak, D., Rohleder, N., & Weigl, M. (2022a). Differences in stress system (re-)activity between single and dual- or multitasking in healthy adults: a systematic review and meta-analysis. Health Psychology Review, 1–26.

Becker, L., Kaltenegger, H. C., Nowak, D., Weigl, M., & Rohleder, N. (2022b). Physiological stress in response to multitasking and work interruptions: Study protocol. PloS One, 17(2), e0263785.

Becker, L., Kaltenegger, H., Nowak, D., Weigl., M, & Rohleder, N. (under revision). Biological stress in responses to multitasking and work interruptions: a randomized controlled trial, submitted to Psychoneuroendocrinology.

Becker, L., Keck, A., Rohleder, N., & Müller-Voggel, N. (2022). Higher Peripheral Inflammation Is Associated With Lower Orbitofrontal Gamma Power in Chronic Tinnitus. Frontiers in Behavioral Neuroscience, 133.

Becker, L., Schade, U., & Rohleder, N. (2019). Evaluation of the socially evaluated cold-pressor group test (SECPT-G) in the general population. PeerJ, 7, e7521.

Becker, L., Schade, U., & Rohleder, N. (2020). Activation of the hypothalamic-pituitary adrenal axis in response to a verbal fluency task and associations with task performance. PloS One, 15(4), e0227721.

Becker, L., Semmlinger, L., & Rohleder, N. (2021). Resistance training as an acute stressor in healthy young men: associations with heart rate variability, alpha-amylase, and cortisol levels. Stress, 1–13.

Bigert, C., Bluhm, G., & Theorell, T. (2005). Saliva cortisol—a new approach in noise research to study stress effects. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 208(3), 227–230.

Daiber, A., Kröller-Schön, S., Frenis, K., Oelze, M., Kalinovic, S., Vujacic-Mirski, K., Kuntic, M., Bayo Jimenez, M. T., Helmstädter, J., & Steven, S. (2019). Environmental noise induces the release of stress hormones and inflammatory signaling molecules leading to oxidative stress and vascular dysfunction—Signatures of the internal exposome. Biofactors, 45(4), 495–506.

Kaltenegger, H. C., Becker, L., Rohleder, N., Nowak, D., Quartucci, C., Weigl, M. (2023). Associations of techno-stressors at work with burnout symptoms and chronic low-grade inflammation: A cross-sectional analysis in hospital employees. International Archives of Occupational and Environmental Health, 1-18.

Kemeny, M. E. (2003). The psychobiology of stress. Current Directions in Psychological Science, 12(4), 124–129.

Kirschbaum, Pirke, & Hellhammer (1993). The 'Trier Social Stress Test'—a tool for investigating psychobiological stress responses in a laboratory setting. Neuropsychobiology, 28(1-2), 76–81.

Lovallo, W. (1975). The cold pressor test and autonomic function: A review and integration. Psychophysiology, 12(3), 268–282.

McDade, T. W. (2014). Development and validation of assay protocols for use with dried blood spot samples. American Journal of Human Biology, 26(1), 1–9.

Nater, U. M., & Rohleder, N. (2009). Salivary alpha-amylase as a non-invasive biomarker for the sympathetic nervous system: current state of research. Psychoneuroendocrinology, 34(4), 486–496.

Pretscher, A., Kauzner, S., Rohleder, N., & Becker, L. (2021). Associations between social burden, perceived stress, and diurnal cortisol profiles in older adults: implications for cognitive aging. European Journal of Ageing, 1–16.

Schwabe, L., Haddad, L., & Schachinger, H. (2008). HPA axis activation by a socially evaluated cold-pressor test. Psychoneuroendocrinology, 33(6), 890–895.

Selye, H. (1950). Stress and the general adaptation syndrome. British Medical Journal, 1(4667), 1383.

Stalder, T., Kirschbaum, C., Kudielka, B. M., Adam, E. K., Pruessner, J. C., Wüst, S., Dockray, S., Smyth, N., Evans, P., & Hellhammer, D. H. (2016). Assessment of the cortisol awakening response: expert consensus guidelines. Psychoneuroendocrinology, 63, 414–432.

Staufenbiel, S. M., Penninx, B. W., Spijker, A. T., Elzinga, B. M., & van Rossum, E. F. C. (2013). Hair cortisol, stress exposure, and mental health in humans: a systematic review. Psychoneuroendocrinology, 38(8), 1220–1235.



9 Messung des lokalen Energieverbrauchs im Gehirn mit Hilfe der funktionellen Nah-Infrarotspektroskopie (fNIRS)

Torsten Wüstenberg Research Council Field of Focus 4, Core Facility for Neuroscience of Self-Regulation (CNSR), Universität Heidelberg

Geräusche sind eine wichtige Störquelle im Berufsalltag vieler Menschen. In Abhängigkeit von ihrer Charakteristik und Intensität werden sie als unangenehm, störend oder stressig wahrgenommen (Park et al., 2018; Skagerstrand et al., 2017). Um trotzdem die Anforderungen des Arbeitsalltags zu erfüllen, sind kompensatorische mentale Prozesse zur Stressbewältigung, Emotionsregulation und Aufmerksamkeitssteuerung notwendig. Eine erfolgreiche Regulation von Stress und negativen Emotionen ist zudem essentiell für die mentale Gesundheit (Aldao et al., 2010; Hu et al., 2014). Der mit diesen Regulationsprozessen verbundene kognitive Aufwand ist mit erhöhter Aktivität in bestimmten präfrontalen, zingulären und mediotemporalen Gehirnarealen assoziiert (Buhle et al., 2014; Lee & Xue, 2018; Messina et al., 2015; Morawetz et al., 2017). Dabei kommt es mit zunehmendem Regulationsaufwand zu einer Zunahme der Aktivität in den genannten Netzwerken (Moodie et al., 2020). Wenn es gelingt, diese neurophysiologischen Effekte zu quantifizieren, können sie als Proxyvariablen für die zugrundeliegenden mentalen Prozesse genutzt werden.

Da es im Gehirn keine lokalen Energiespeicher gibt, werden bei jeder neuronal verursachten Energieanforderung Sauerstoff und Nährstoffe in die aktiven Hirnbereiche transportiert und dort lokal verstoffwechselt. Deshalb sind die lokalen zerebralen Stoffwechselprozesse zu ca. 75-80% auf neuronale Aktivität zurückzuführen (Hyder et al., 2013). Der Transport des dazu notwendigen Sauerstoffs erfolgt über das Blutgefäßsystem. In der Nähe aktiver Hirnregionen kommt es deshalb zu einer Veränderungen im Blutfluss und -volumen, die wiederum zu einer Veränderung der Gewebeoxygenierung führen. Dieser Effekt wird auch als neurovaskuläre Kopplung bezeichnet (Abb.9.1A).

Die funktionelle Nah-Infrarot Spektroskopie (fNIRS) nutzt die neurovaskuläre Kopplung, um lokale Aktivität im Gehirn zu detektieren. Dazu wird mit Hilfe von Licht im nahen Infrarotbereich (NIR) die Absorption des Lichts an den im Hämoglobin enthaltenen Farbstoffen (Chromophoren) gemessen. Entsprechend der Sauerstoffsättigung verändern sich deren optische Eigenschaften und damit auch die spezifische Absorptionsrate des Lichtes. Die damit verbundene Lichtabschwächung kann entlang der optischen Kanäle zwischen den alternierend angeordneten Lichtquellen (NIR-Laserdioden) und Lichtsensoren (NIR-Photodioden) gemessen und mit Hilfe des modifizierten Beer-Lambert-Gesetzes (Beer, 1852) in die lokale Konzentration von Oxyhämoglobin (HbO2) und Desoxyhämoglobin (HbR) umgerechnet werden (Abb. 9.1B). Das am Detektor ankommende Licht enthält somit Informationen über den momentanen physiologischen Zustand jenes Gewebes, welches es durchquert hat.

Die funktionelle NIR-Spektroskopie des menschlichen Gehirns ist ein nichtinvasives Verfahren. d. h. die Lichtquellen und -detektoren werden auf der Kopfoberfläche über den zu messenden Hirnbereichen platziert (Abb. 9.1E). Für die Messung der lokalen Oxygenierung kann deshalb nur das im Gewebe diffus an die Oberfläche zurückgestreute Licht genutzt werden (Abb. 9.1C). Das beschränkt die mit Hilfe der fNIRS zu messenden Bereiche auf laterale, d. h. äußere Kortexregionen (Abb. 9.1D). Die Aktivität tiefer liegender Strukturen wie z. B. der Amygdala, kann mit der fNIRS nicht gemessen werden.

Die optimale räumliche Konfiguration der optischen Kanäle erfolgt unter Nutzung von anatomischen Atlanten des menschlichen Gehirns und Simulationen der Lichtausbreitung

im Kopf (Zimeo Morais et al., 2018). Damit die im Detektor gemessenen Signale aber auch mit hinlänglicher Sicherheit auf kortikale Effekte zurückführbar sind, müssen Quellen und Detektoren in einem Abstand von ca. 3 cm angeordnet werden. Diese Distanz bestimmt gleichzeitig die räumliche Auflösung dieses Verfahrens. Diese beiden räumlichen Limitationen der fNIRS werden jedoch durch ihre hohe Alltagstauglichkeit zumindest teilweise kompensiert (Piper et al., 2014). Durch die Entwicklung mobiler fNIRS-Systeme wie z. B. NIRSport2 der Firma NIRx (Abb. 9.1E, https://nirx.net/nirsport), LUMO der Firma Goverlabs (https://www.gowerlabs.co.uk/lumo) oder Brite der Firma Artinis (https://www.artinis.com/brite), sowie Fortschritte in der Eliminierung von Signalartefakten (Pinti et al., 2017), kann heute dieses Verfahren auch im Alltagskontext zur Messung der Gehirnaktivität genutzt werden. Darüber hinaus sind moderne fNIRS-Systeme aufgrund ihrer hohen Messfrequenz von bis zu 250 Hz für die Echtzeit-Hirnbildgebung geeignet und können zum Neurofeedback eingesetzt werden (Kohl et al., 2020).

Bei der Auswertung von fNIRS-Signalen kommen in der Regel statistische Verfahren auf der Basis des allgemeinen linearen Modells (ALM) zum Einsatz. Dabei werden die optischen Kanäle identifiziert, in deren Signalzeitreihen sich mit den interessierenden Prozessen zeitlich koinzidente Signalmuster zeigen. Da bekannt ist, in welchem Gehirnbereich dieser optische Kanal die Durchblutungsänderungen erfasst, kann durch diesen mathematischen Ansatz auf dessen Aktivität zurückgeschlossen werden.

Die hier geschilderten technisch-methodischen Entwicklungen haben zu einem Bedeutungszuwachs und zur intensiveren Nutzung der fNIRS in den systemischen Neurowissenschaften geführt. Insbesondere durch ihre Mobilität und Alltagstauglichkeit kann mit dieser Methode die Lücke zwischen Labor- und Feldforschung überbrückt (oder zumindest verkleinert) werden. Das erweitert auch die experimentellen Freiheitsgrade für arbeitsschutz- oder arbeitsmedizinisch relevante Forschungsprojekte. Darüber hinaus wird die Validität und Generalisierbarkeit der Befunde erhöht und somit langfristig dazu beigetragen, die mit akustischen Stressoren assoziierten neurophysiologischen Reaktionen besser zu verstehen.

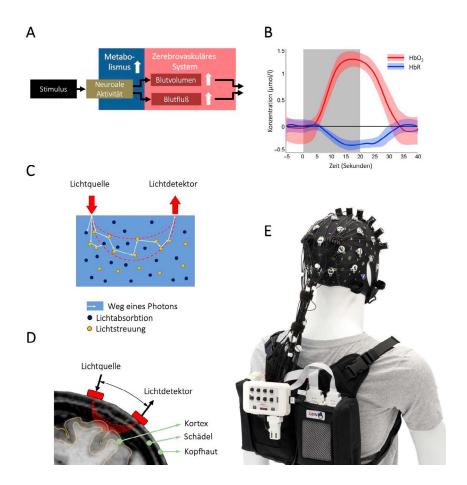


Abbildung 9.1: In der fNIRS genutzte optische Effekte zur Messung der neuronal verursachten Änderungen in der lokalen Konzentration von HbO2 und HbR.

(A) Schematische Darstellung der neurovaskulären Kopplung und (B) der damit verbundenen Änderungen in der HbO2- und HbR-Konzentration. (C) Weg eines an die Oberfläche des Mediums zurückgestreuten Photons. Die gestrichelten roten Linien markieren dabei die Menge der wahrscheinlichsten Wege von der Quelle zum Detektor. (D) Projektion der in (C) dargestellten Prinzipien auf die menschliche Hirnanatomie. Zur Messung kortikaler Durchblutungseffekte muss der Abstand zwischen Lichtquelle und –detektor etwa 3 Zentimeter betragen. Die Lage dieser optischen Kanäle und damit die Sender-Empfänger-Anordnung, ist von den zu untersuchenden Kortexbereichen abhängig. (E) Mobiles fNIRS-Gerät.

Literatur

Aldao, A., Nolen-Hoeksema, S., & Schweizer, S. (2010). Emotion-regulation strategies across psychopathology: A meta-analytic review. Clinical Psychology Review, 30(2), 217–237. https://doi.org/10.1016/j.cpr.2009.11.004

Applegate, M. B., Istfan, R. E., Spink, S., Tank, A., & Roblyer, D. (2020). Recent advances in high speed diffuse optical imaging in biomedicine. APL Photonics, 5(4), 040802. https://doi.org/10.1063/1.5139647

Beer. (1852). Bestimmung der Absorption des rothen Lichts in farbigen Flüssigkeiten. Annalen der Physik und Chemie, 162(5), 78–88.

https://doi.org/10.1002/andp.18521620505

Buhle, J. T., Silvers, J. A., Wager, T. D., Lopez, R., Onyemekwu, C., Kober, H., Weber, J., & Ochsner, K. N. (2014). Cognitive Reappraisal of Emotion: A Meta-Analysis of Human Neuroimaging Studies. Cerebral Cortex, 24(11), 2981–2990.

https://doi.org/10.1093/cercor/bht154

Hu, T., Zhang, D., Wang, J., Mistry, R., Ran, G., & Wang, X. (2014). Relation between Emotion Regulation and Mental Health: A Meta-Analysis Review. Psychological Reports, 114(2), 341–362. https://doi.org/10.2466/03.20.PR0.114k22w4

Hyder, F., Rothman, D. L., & Bennett, M. R. (2013). Cortical energy demands of signaling and nonsignaling components in brain are conserved across mammalian species and activity levels. Proceedings of the National Academy of Sciences, 110(9), 3549–3554. https://doi.org/10.1073/pnas.1214912110

Kohl, S. H., Mehler, D. M. A., Lührs, M., Thibault, R. T., Konrad, K., & Sorger, B. (2020). The Potential of Functional Near-Infrared Spectroscopy-Based Neurofeedback—A Systematic Review and Recommendations for Best Practice. Frontiers in Neuroscience, 14, 594. https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00594

Lee, T.-W., & Xue, S.-W. (2018). Does emotion regulation engage the same neural circuit as working memory? A meta-analytical comparison between cognitive reappraisal of negative emotion and 2-back working memory task. PLOS ONE, 13(9), e0203753. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203753

Messina, I., Bianco, S., Sambin, M., & Viviani, R. (2015). Executive and semantic processes in reappraisal of negative stimuli: Insights from a meta-analysis of neuroimaging studies. Frontiers in Psychology, 6. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00956

Moodie, C. A., Suri, G., Goerlitz, D. S., Mateen, M. A., Sheppes, G., McRae, K., Lakhan-Pal, S., Thiruchselvam, R., & Gross, J. J. (2020). The neural bases of cognitive emotion regulation: The roles of strategy and intensity. Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience, 20(2), 387–407. https://doi.org/10.3758/s13415-020-00775-8

Morawetz, C., Bode, S., Derntl, B., & Heekeren, H. R. (2017). The effect of strategies, goals and stimulus material on the neural mechanisms of emotion regulation: A meta-analysis of fMRI studies. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 72, 111–128. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.11.014

Park, S. H., Lee, P. J., & Jeong, J. H. (2018). Emotions evoked by exposure to footstep noise in residential buildings. PLOS ONE, 13(8), e0202058. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202058

Pinti, P., Merla, A., Aichelburg, C., Lind, F., Power, S., Swingler, E., Hamilton, A., Gilbert, S., Burgess, P. W., & Tachtsidis, I. (2017). A novel GLM-based method for the Automatic IDentification of functional Events (AIDE) in fNIRS data recorded in naturalistic environments. NeuroImage, 155, 291–304. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.05.001

Pinti, P., Tachtsidis, I., Hamilton, A., Hirsch, J., Aichelburg, C., Gilbert, S., & Burgess, P. W. (2020). The present and future use of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for cognitive neuroscience. Annals of the New York Academy of Sciences, 1464(1), 5–29. https://doi.org/10.1111/nyas.13948

Piper, S. K., Krueger, A., Koch, S. P., Mehnert, J., Habermehl, C., Steinbrink, J., Obrig, H., & Schmitz, C. H. (2014). A wearable multi-channel fNIRS system for brain imaging in freely moving subjects. NeuroImage, 85, 64–71.

https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.06.062

Sandell, J. L., & Zhu, T. C. (2011). A review of in-vivo optical properties of human tissues and its impact on PDT. Journal of Biophotonics, 4(11–12), 773–787. https://doi.org/10.1002/jbio.201100062

Skagerstrand, Å., Köbler, S., & Stenfelt, S. (2017). Loudness and annoyance of disturbing sounds – perception by normal hearing subjects. International Journal of Audiology, 56(10), 775–783. https://doi.org/10.1080/14992027.2017.1321790

Zimeo Morais, G. A., Balardin, J. B., & Sato, J. R. (2018). fNIRS Optodes' Location Decider (fOLD): A toolbox for probe arrangement guided by brain regions-of-interest. Scientific Reports, 8(1), 3341. https://doi.org/10.1038/s41598-018-21716-z



10 Ansatz zur multimodalen Datenverarbeitung physiologischer Vitalparameter mittels maschinellen Lernens zur Abschätzung des subjektiven Lärm- und Stressempfindens

Kevin Penner & Marc Hesse Arbeitsgruppe Kognitronik & Sensorik, Universität Bielefeld

Mentale Stresssituationen können durch diverse Stressauslöser hervorgerufen werden und bewirken bei Menschen physiologische Reaktionen. Eine häufige Ursache von Stress ist eine hohe Lärmbelastung, wie sie durch laute Arbeitsumgebungen oder Verkehrssituationen auftreten kann.

Aus dem Elektrokardiogramm (EKG) abgeleitete Merkmale, wie die Herzfrequenz und die Herzratenvariabilität, können messbare physiologische Stressreaktionen anzeigen. Eine höhere Herzfrequenz und eine geringere Herzratenvariabilität deuten auf Stress hin und können frühzeitig als Indikator für Stressbelastungen verwendet werden, um geeignete Maßnahmen zur Stressbewältigung zu ergreifen. Neben der Veränderung des EKG können auch weitere physiologische Effekte wie die Hautleitfähigkeit bzw. elektrodermale Aktivität (EDA), Muskelaktivität, Atemfrequenz und Körperbewegung als zusätzliche Indikatoren für den mentalen Stress genutzt werden.

Im Kontext dieser multimodalen Sensordatenerfassung bietet maschinelles Lernen (ML) einen entscheidenden Vorteil: Es ermöglicht eine automatisierte Verarbeitung großer Datenmengen und erkennt Zusammenhänge und Muster in den Daten selbst dann, wenn diese für den Menschen schwierig zu erkennen oder zu interpretieren sind. Insbesondere in der medizinischen Forschung kann ML dazu beitragen, komplexe Zusammenhänge zwischen verschiedenen physiologischen Parametern und mentalen Zuständen wie Stress zu identifizieren und präzise Vorhersagen zu treffen. Die Kombination von ML und multimodaler Sensordatenerfassung eröffnet die Möglichkeit, wertvolle Erkenntnisse zu gewinnen, die dazu beitragen können, die Diagnostik und Behandlung von Stressbelastungen und anderen Erkrankungen zu verbessern. ML kann somit als ein wichtiger Baustein für eine verbesserte Gesundheitsversorgung und forschung angesehen werden. Die Einbettung von ML in mobile Messgeräte eröffnet zudem die Möglichkeit, Sensormessdaten in Echtzeit zu nutzen, um Vorhersagen über eine angestrebte Zielgröße zu treffen. Eine besondere Stärke von ML ist es, dass es komplexe, multidimensionale Messgrößen auf eine komprimierte Ausgangsgröße reduzieren kann, die für den Menschen besser verständlich ist. Ausschließlich auf Daten basierende Verfahren erfordern jedoch eine große Menge an diversen und variablen Daten, um eine hohe Generalisierbarkeit zu erreichen.

Im Folgenden werden exemplarisch zwei Studien (Hörmann, et al., 2016; Hörmann, et al., 2015) vorgestellt, in denen ML auf multimodale physiologische Sensordaten angewandt wird, um die kognitive Beanspruchung und das körperliche Aktivitätsverhältnis vorherzusagen. Die beiden Studien zeigen auf, dass die Verwendung von ML-Verfahren in Kombination mit der Aufnahme von einfachen Sensormessgrößen, komplexere mentale und körperliche Zustände prädizieren können.

Für eine breite Anwendung dieses Ansatzes ist ein geeignetes Messgerät erforderlich, das qualitativ hochwertige Messwerte erfasst und zugleich die Anforderungen an Usability und Tragekomfort besonders bei Langzeiterfassungen erfüllt. Aus diesem Grund wird in einem weiteren Kapitel das mobile Messsystem BI-Vital vorgestellt, welches nicht nur über die erforderlichen physikalischen Schnittstellen zur Datenerfassung verfügt, sondern auch die Ausführung der ML-Verfahren (Inferenz) auf einem ressourcenbeschränkten System ermöglicht.

Es bietet somit eine ganzheitliche Lösung für die multimodale Sensordatenerfassung und integrierte Analyse der Daten mittels ML-Methoden, ohne die Notwendigkeit, die hochsensiblen Daten nach außen zu kommunizieren.

Vorhersage kognitiver Beanspruchung anhand physiologischer Parameter

Die erste Studie (Hörmann, et al., 2016) befasst sich mit der Vorhersage der kognitiven Beanspruchung bzw. des individuellen Stresslevels, indem multimodale Sensordaten aufgenommen und mit einem ML-Ansatz ausgewertet wurden. In der Studie wurden synthetisch hervorgerufene Stresssituationen simuliert, die den 31 Teilnehmenden (20 männlich, 11 weiblich) in 5 Studienabschnitten mit unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad als Aufgabe vorgelegt wurden. Die Teilnehmenden gaben direkt nach jeder Aufgabe ihre empfundene kognitive Beanspruchung auf einer 5-stufigen Likert-Skala an, welche im weiteren Verlauf als Referenz genutzt wurde. Um die kognitive Beanspruchung sensorisch zu erfassen, wurden die EKG-und EDA-Messdaten aufgezeichnet und der Zusammenhang durch diverse ML-Verfahren trainiert.

Die Ergebnisse der Studie sind vielversprechend. Im Vergleich der Vorhersagegenauigkeiten, erreichte die beste getestete ML-Methode in der Studie für eine binäre Vorhersage der Beanspruchung eine Klassifikationsgenauigkeit von 96,03 %. Für die feingranulare Vorhersage in 5 Stufen liegt die Genauigkeit noch bei 74,05 %. Es wurden insgesamt 49 zeitbasierte Features aus den erhobenen Messdaten extrahiert und ein Feature-Subset von 9 Features ausgewählt, das sich auf EDA- und Herzfrequenz-basierte Features fokussierte. Die Relevanz der Features wurde durch ein Feature Ranking ermittelt.

Schätzung der körperlichen Aktivität durch adaptive Zusammenführung mehrerer Parameter

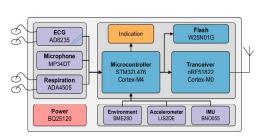
Die zweite Studie (Hörmann, et al., 2015) beschäftigt sich mit der robusten Schätzung der körperlichen Aktivität durch die adaptive Fusion mehrerer Parameter. Hierbei wurden verschiedene Sensordaten (EKG-, Atmungs- und Beschleunigungs-Merkmale) sowie personenbezogene Daten wie Größe, Gewicht und BMI von 20 Teilnehmenden (14 männlich, 6 weiblich) erhoben. Mithilfe von ML-Modellen wurde versucht, das Verhältnis der körperlichen Aktivität (engl. physical activity ratio, kurz PAR) vorherzusagen. Die Referenz wurden mittels Ergospirometrie (Cortex Metalyzer 3b) im Labor erhoben, während die Teilnehmenden auf einem Laufband mit verschiedenen Geschwindigkeiten liefen. Infolge der Bewegung der Probanden lassen sich kurze Anomalien im erfassten EKG nicht vollständig verhindern. Die ML-Verfahren müssen daher lernen, mit diesen Artefakten umzugehen und sie durch die weiteren erfassten Modalitäten zu kompensieren. Die beste in der Praxis erzielte Regressionsgenauigkeit R² lag bei 0,82. Die Modelle konnten somit erfolgreich dazu eingesetzt werden, das PAR mittels Echtzeit-Inferenz auf den Sensordaten abzuschätzen

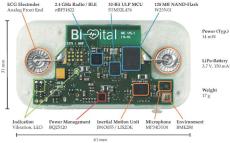
Die Übertragbarkeit der Ergebnisse bzw. Methoden der beiden Studien auf andere Stressbelastungen, wie beispielsweise akustisch ausgelösten Stress, ist aufgrund der ähnlichen physiologischen Reaktionen wahrscheinlich. Beide Arten von Stressbelastungen können durch die Messung von physiologischen Signalen erfasst werden, was die Anwendung von ähnlichen Methoden zur Vorhersage des individuellen Stresslevels ermöglicht. Eine Untersuchung der extra-auralen Wechselwirkung wäre dementsprechend von großem Interesse, um die Anwendung von ML-Methoden auf physiologischen Reaktionen auszuweiten.

Messsystem zur multimodalen Datenerfassung und Inferenzausführung

Zur Erfassung und Verarbeitung von multimodalen Datenströmen ist ein Messsystem erforderlich, das eine Vielzahl von Sensorschnittstellen bereitstellt und in der Lage ist, Daten effizient zu verarbeiten, zu speichern und zu übertragen. Eine Lösung dafür bietet der Sensorknoten BI-Vital, der von der AG Kognitronik & Sensorik entwickelt wurde (vgl. Abbildung 10.1).

Dieses System ist ein kompakter, hoch integrierter und skalierbarer Open-Source Wearable Body Sensor (WBS), welcher als Hochfrequenz-Datenlogger oder Experimentierplattform für aktuelle Wearable-Algorithmen genutzt werden kann. So können auf dem Sensorknoten beispielsweise neuronale Netze und weitere ML-Verfahren eingesetzt werden, um EKG-Signale zu analysieren oder menschliche Aktivitäten zu erkennen. Das System ist äußerst energieeffizient und wiegt weniger als 17 g, sodass es an der Brust getragen werden kann. Es verfügt über die standardisierte drahtlose Kommunikationsschnittstelle Bluetooth Low Energy (BLE) und ist mit einem USB-Anschluss ausgestattet, der das Auslesen des internen Speichers ermöglicht. Insgesamt bietet das Sensorsystem eine Vielzahl von Möglichkeiten zur multimodalen Erfassung und Überwachung von physiologischen, biokinematischen und umgebungsbezogenen Daten. Zu diesen Daten gehören EKG, Herzfrequenz, Herzratenvariabilität, translatorische und rotatorische Beschleunigungen, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck. Außerdem besteht durch ein weiteres Analog-Frontend die Möglichkeit, weitere physiologische Größen wie die Atmungsfrequenz oder die EDA zu erfassen.





- a) Funktionsübersicht des BI-Vital
- b) Hardwareansicht des BI-Vital

Abbildung 10.1: Funktionsübersicht und Hardwarekomponenten des mobilen Sensorknoten BI-Vital (Hörmann, 2019)

Der BI-Vital ist zudem mit einem integrierten Mikrofon ausgestattet, das es ermöglicht, akustische Signale zu erfassen und zu interpretieren. Diese Signale können entweder als reiner Schalldruckpegel (SPL) oder durch Interpretation der Audiospur, beispielsweise als Sprache, erfasst werden. Die gesammelten Daten können in Echtzeit verarbeitet und zeitsynchron mit den anderen Sensormodalitäten gespeichert und übertragen werden, was eine multimodale Datenerhebung auf dem internen Speicher oder in einer externen BLE Applikation erlaubt. Die Möglichkeit, akustische Signale mobil und parallel zu weiteren physiologischen Daten zu erfassen und interpretieren, eröffnet auch für Untersuchungen der extra-auralen Wechselwirkung interessante Möglichkeiten. Beispielsweise können die Daten genutzt werden, um die Reaktion von Personen auf Lärmbelastung zu bestimmen und in Echtzeit Interventionen einzuleiten, dessen Wirksamkeit wiederum direkt ermittelt werden kann.

Literatur

Hörmann, T., 2019. Design and Application of Wireless Body Sensors, Bielefeld: Dissertation.

Hörmann, T., Hesse, M., Christ, P., Adams, M., Menßen, C., & Rückert, U., 2016. Fine-Grained Prediction of Cognitive Workload in a Modern Working Environment by Utilizing Short-Term Physiological Parameters. In: Proceedings of the 9th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies.

Hörmann, T., Peter, C., Hesse, M. & Rückert, U., 2015. Robust Estimation of Physical Activity by Adaptively Fusing Multiple Parameters. In: Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN). IEEE 12th International Conference.



11 Die Abschätzung kognitiver Beanspruchung mittels Blickbewegungsmessung

Simon Schwerd & Axel Schulte Institut für Flugsysteme, Universität der Bundeswehr München

Die Blickposition ist ein Indikator für visuelle Aufmerksamkeit und verrät damit viel über die gegenwärtige Informationsverarbeitung eines Menschen. Dies gilt vor allem in typischen Aufgabensituationen der modernen Arbeitswelt, welche durch die Arbeit mit Computern und technischen Systemen geprägt ist. Diese Umgebung zeichnet sich dadurch aus, dass der Mensch dort zielgerichtet Aufgaben verfolgt, welche in der Regel hohe visuelle Anteile haben. Hier kann die Blickbewegung als eine der wenigen direkt beobachtbaren Verhaltensmaße herangezogen werden, um die Aufmerksamkeit des Menschen abzuschätzen.

Kognitive Beanspruchung beschreibt die Auslastung der mentalen Ressourcen in der Informationsverarbeitung eines Menschen durch dessen gegenwärtige Tätigkeit und Arbeitsumwelt. Da sie nicht direkt messbar ist, muss die kognitive Beanspruchung über Korrelate messbarer abhängiger Variablen abgeschätzt werden. Die grundlegende Annahme bei der Verwendung von Blickbewegungsmetriken ist also, dass das Blickbewegungsverhalten - als beobachtbare Ausprägung der menschlichen Informationsverarbeitungsprozesse - abhängig von der kognitiven Beanspruchung ist.

Moderne Blickbewegungsmessverfahren sind dank einer hohen Verfügbarkeit von ausgereifter Messtechnik sehr robust und einfach einzusetzen. Die Messtechnik kann in naturalistischen Arbeitsumgebungen eingesetzt werden, was viele Studien in anwendungsnahen Domänen zeigen, in denen Blickbewegung im Baugewerbe oder Flugzeugcockpit gemessen wurde (Martinez-Marquez et al., 2021). Zur Beanspruchungsmessung ist dies ist ein Vorteil gegenüber physiologischen Messverfahren wie beispielweise EEG oder fNIRS, welche einen höheren Aufwand zur Kalibrierung benötigen und empfindlich gegenüber Störgrößen wie Bewegungen sind.

Der folgende Artikel gibt eine Übersicht über verschiedene Blickbewegungsmaße zur Abschätzung von kognitiver Beanspruchung. Hierbei wird sich ausschließlich auf Maße der Blickbewegung bezogen. Es ist anzumerken, dass bei physiologischen Maßen des Auges wie Pupillendurchmesser ein Zusammenhang mit der kognitiven Beanspruchung nachgewiesen wurde, welcher im Folgenden aber nicht genauer beleuchtet wird (Egeth & Kahneman, 1975).

Methodenüberblick

Blickbewegungen lassen sich grundsätzlich in drei Kategorien einteilen: der ruhende Blick (Fixation), die ruckartige Blickbewegung (Sakkade) sowie das Folgen sich bewegender Objekte (Folgebewegung).¹ Die klassischen Ansätze zur Abschätzung von kognitiver Beanspruchung mittels Blickbewegungsmessung basieren maßgeblich auf der Verarbeitung von Fixationen oder Sakkaden. Die etablierten Ansätze zur Verarbeitung können in zwei Kategorien unterteilt werden:

(1) **kontextfreie Methoden**, welche keinerlei Informationen über die Aufgaben- oder Arbeitsumgebung des Menschen benötigen (bspw. Fixationsfrequenz), und

¹ Innerhalb der Kategorie der Fixationen gibt es weitere Unterscheidungen, wie beispielsweise Mikrosakkaden, deren Messung aber eine erhöhte Anforderung an Genauigkeit und Technik stellen und nicht weiter berücksichtigt werden.

(2) **kontextbehafteten Methoden**, die Informationen über die Konfiguration der Arbeitsumgebung verwenden, um beispielsweise Blickverweildauern auf bestimmten Bereichen der Arbeitsumgebung zu quantifizieren.

Kontextfreie Methoden

Gängige Metriken bei der Verarbeitung von Fixationen sind die durchschnittliche Fixationsdauer und -frequenz. Hierbei wurde beispielsweise der Zusammenhang einer erhöhten kognitive Beanspruchung mit einer reduzierten Fixationsdauer in verschiedenen Aufgabenumgebungen, wie beispielsweise in der Flugsimulation (Rivecourt et al., 2008) oder beim Autofahren (Foy & Chapman, 2018), nachgewiesen. Eine erhöhte Fixationsfrequenz deutete in einigen Studien auf eine erhöhte kognitive Beanspruchung hin (Evans & Fendley, 2017). Bei der Auswertung von Sakkaden können Frequenz und Geschwindigkeit dieser Blickbewegungsart ein Maß dafür sein, wie hoch die kognitive Beanspruchung in einer Aufgabe ist, was beispielsweise bei Autofahrern gezeigt wurde (Yang et al., 2012). In einigen Studien wurden Fixations- und Sakkadenmaße in einem Verhältnis kombiniert, um beispielsweise die Strukturiertheit der Blickbewegung zu erfassen (Dehais et al., 2015).

Bei der Verwendung dieser kontextfreien Blickbewegungsmaße ist jedoch auf den Erfahrungsgrad der Probanden in den Aufgabenumgebung zu berücksichtigen, da es hier Unterschiede im Blickbewegungsverhalten gibt. So wurde in verschiedenen Aufgabenumgebungen (z. B. Flugzeugcockpit) bei Experten gegenüber Novizen kürzere Fixationszeiten und eine höhere Fixationsanzahl nachgewiesen (Dalveren et al., 2018; Lounis et al., 2021).

Die bisher genannten Metriken können ohne Kenntnis über die Arbeitsumgebung genutzt werden, um kognitive Beanspruchung zu messen. Es gilt jedoch stets zu beachten, dass die Übertragbarkeit zwischen verschiedenen Arbeitsumgebungen überprüft werden muss. Der Aufbau der Arbeitsumgebung hat einen Einfluss auf das Blickbewegungsverhalten. So könnte beispielsweise die Nutzung mehrerer Bildschirme oder die Bearbeitung paralleler Aufgaben eine erhöhte Sakkadenzahl und -länge bedingen.

Kontextbehaftete Methoden

Die kontextbehafteten Größen machen sich gegenüber kontextfreien Ansätzen die Kenntnis über die Arbeitsumgebung zunutze, indem sie Maße definieren, die von sogenannten Interessensgebieten (Areas of Interest, AoI) abhängen, welche in einer Aufgabensituation relevant und von anderen Gebieten abzugrenzen sind. Ein einfaches Beispiel ist die Verweildauer, welche als Integration aller Fixationszeiten auf einem Interessensgebiet definiert ist. Diese kann herangezogen werden, um beispielsweise die grundsätzliche Aufmerksamkeitsverteilung in einem Arbeitsplatz zu messen. Eine erhöhte Verweildauer auf einem bestimmten Arbeitsbereich kann in diesem Zusammenhang auf eine erhöhte kognitive Beanspruchung hindeuten.

Neben Größen mit Bezug zu einem einzelnen Interessensgebiet gibt es Maße, die die Sequenz von Blickposition auf Interessensgebiete abbilden und somit das Überwachungsmuster eines Menschen quantifizieren, wie beispielsweise die Transitionsmatrizen oder Blickbewegungsentropie. Letztere quantifiziert die Vorhersagbarkeit der Blickbewegung, welche bei Hubschrauberpiloten beispielsweise mit der Komplexität einer Aufgabensituation negativ korreliert (Diaz-Piedra et al., 2019).

Zuletzt können Blickbewegungsmessungen genutzt werden, um modellbasierte Inferenz zu betreiben, die gegenwärtige Tätigkeit eines Menschen aufbauend auf der Blickbewegung ableitet. Mithilfe eines Aufgabenmodells, welches Tätigkeiten und kognitive Belastungen verknüpfen, kann dann die kognitive Belastung abgeleitet werden. Mithilfe dieses Ansatzes demonstrierte beispielsweise Honecker (2021) die Abschätzung der kognitiven Beanspruchung von Hubschrauberpiloten in einer militärischen Mission.

Resümee

Blickbewegungsmessungen können auf unterschiedliche Art und Weise verarbeitet und interpretiert werden und eignen sich vor allem dann zur Bestimmung von kognitiver Beanspruchung, wenn die visuellen Anforderungen der Arbeitsumgebung bekannt sind. Die Studien aus den unterschiedlichsten Bereichen der Steuerung dynamischer Systeme zeigen, dass sich die Blickbewegungsmessung für naturalistische Arbeitsumgebungen eignet. Die Anwendung dieser Methode geht über den analytischen Einsatz hinaus. So können Blickbewegungsmessungen beispielsweise auch gemessen werden, um adaptive Assistenzsysteme zu entwickeln, die sich an die gegenwärtige Beanspruchung eines Menschen anpassen (Brand & Schulte, 2021). Aufgrund dieser vielversprechenden Ansätze könnten Blickbewegungsmesssysteme in den kommenden Jahren zunehmend in Arbeitsplätzen zum Einsatz kommen, um den Menschen bei seiner Arbeit zu beobachten und zu unterstützen.

Literatur

Brand, Y. & Schulte, A. (2021). Workload-adaptive and task-specific support for cockpit crews: design and evaluation of an adaptive associate system. Human-Intelligent Systems Integration. Vorab-Onlinepublikation. https://doi.org/10.1007/s42454-020-00018-8

Dalveren, M., Gokce, G. & Cagiltay, E. (2018). Insights from surgeons' eye-movement data in a virtual simulation surgical training environment: effect of experience level and hand conditions. Behaviour & Information Technology, 37(5), 517–537. https://doi.org/10.1080/0144929X.2018.1460399

Dehais, F., Peysakhovich, V., Scannella, S., Fongue, J. & Gateau, T. (2015). "Automation Surprise" in Aviation. In B. Begole, J. Kim, K. Inkpen & W. Woo (Hrsg.), Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (S. 2525–2534). ACM. https://doi.org/10.1145/2702123.2702521

Diaz-Piedra, C., Rieiro, H., Cherino, A., Fuentes, L. J., Catena, A. & Di Stasi, L. L. (2019). The effects of flight complexity on gaze entropy: An experimental study with fighter pilots. Applied ergonomics, 77, 92–99. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.01.012

Egeth, H. & Kahneman, D. (1975). Attention and Effort. The American Journal of Psychology, 88(2), 339. https://doi.org/10.2307/1421603

Evans, D. C. & Fendley, M. (2017). A multi-measure approach for connecting cognitive workload and automation. International Journal of Human-Computer Studies, 97, 182–189. https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2016.05.008

Foy, H. J. & Chapman, P. (2018). Mental workload is reflected in driver behaviour, physiology, eye movements and prefrontal cortex activation. Applied ergonomics, 73, 90–99. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.06.006

Honecker, F. (2021). Aufgabenzentriertes Pilotenassistenzsystem mit maschineller Tätigkeitserkennung und Workload-Abschätzung (Dissertation).

Lounis, C., Peysakhovich, V. & Causse, M. (2021). Visual scanning strategies in the cockpit are modulated by pilots' expertise: A flight simulator study. PloS one, 16(2), e0247061. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247061 Martinez-Marquez, D., Pingali, S., Panuwatwanich, K., Stewart, R. A. & Mohamed, S. (2021). Application of Eye Tracking Technology in Aviation, Maritime, and Construction Industries: A Systematic Review. Sensors, 21(13). https://doi.org/10.3390/s21134289

Rivecourt, M. de, Kuperus, M. N., Post, W. J. & Mulder, L. J. M. (2008). Cardiovascular and eye activity measures as indices for momentary changes in mental effort during simulated flight. Ergonomics, 51(9), 1295–1319.

https://doi.org/10.1080/00140130802120267

Yang, Y., McDonald, M. & Zheng, P. (2012). Can drivers' eye movements be used to monitor their performance? A case study. IET Intelligent Transport Systems, 6(4), 444–452. https://doi.org/10.1049/iet-its.2012.0008

12 Funktionelle Magnetresonanztomographie – Kandidat für die Lärmwirkungsforschung?

Stefan Uppenkamp Medizinische Physik, Universität Oldenburg

Die funktionelle Magnetresonanztomographie gehört mittlerweile zu einer Standardmethode in den kognitiven Neurowissenschaften für viele verschiedene Fragestellungen, von der gezielten Untersuchung des Effektes spezifischer sensorischer Reize über Fragestellungen, wie unterschiedliche Regionen im Gehirn bei komplexeren Aufgaben miteinander interagieren bis hin zu allgemeinen Aussagen z. B. über mentale Erregungszustände. Damit stellt die funktionelle MR-Tomographie im Prinzip auch einen Kandidaten dar, in der Lärmwirkungsforschung zu einem besseren Verständnis der komplexen Wechselwirkung zwischen der Beanspruchung wie z. B. erlebter Anstrengung bei kognitiven Aufgaben und zusätzlicher Belastung durch störende Geräusche beizutragen.

Im laufenden Forschungsprojekt der BAuA (F2439) wurde die funktionelle Magnetresonanztomographie nicht in die Auswahl für ein mögliches neurophysiologisches Messverfahren zur Aufdeckung von lärminduzierten Effekten bei der Erledigung von kognitiven Aufgaben genommen. Dennoch soll in diesem Beitrag ein kurzer Einblick in die Möglichkeiten und Grenzen der funktionellen MR-Tomographie für die Hörforschung gegeben werden, die letztlich ja auch eine Säule der Lärmwirkungsforschung darstellt.

Bei der Magnetresonanztomographie wird der quantenmechanische Effekt der Kernspinresonanz ausgenutzt, um unterschiedliche Gewebearten im Körper auf Grund ihres unterschiedlichen Relaxationsverhaltens bei der Absorption und Emission von elektromagnetischen Wellen darzustellen. Mit funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) ist es auf indirektem Weg möglich, Änderungen der neuronalen Aktivität im Gehirn bei unterschiedlichen sensorischen Reizen oder bei der Erledigung unterschiedlicher Aufgaben zu untersuchen. Dabei wird der Effekt ausgenutzt, dass die Aktivierung von spezifischen Regionen im Gehirn eine Stoffwechselantwort zur Folge hat. Verbrauchter Sauerstoff wird über den Blutfluss durch die fein verästelten Gefäße des Gehirns wieder zugeführt. Dadurch ändern sich lokal die magnetischen Eigenschaften des Blutes in der Umgebung der aktivierten Nervenzellverbünde, was wiederum einen Einfluss auf das mit dem MRT-Scanner gemessene Signal aus dem Gehirn hat (Buxton, 2002). Dabei wird eine räumliche Auflösung von wenigen Millimetern und eine zeitliche Auflösung in der Größenordnung von wenigen Sekunden erreicht. Die Kombination von funktionellen und anatomischen MRT-Bildern ermöglicht auf einzigartige Weise eine direkte Zuordnung von physiologischen Prozessen zu den entsprechenden anatomischen Strukturen im Gehirn.

Neben den generellen Restriktionen beim Einsatz der Magnetresonanztomographie auf Grund verschiedener Kontraindikationen, wie Herzschrittmacher, metallische Implantate usw., gibt es eine Reihe von Herausforderungen, die insbesondere bei Experimenten in der auditorischen Domäne eine Rolle spielen. Ein offensichtliches Problem stellt das in der Regel sehr laute Geräusch des MRT-Scanners selber dar (Schalldruckpegel bis zu 90 dB SPL), das während der Datenaufnahme auf Grund des verwendeten Prinzips der Ortskodierung mit zusätzlichen magnetischen Feldgradienten entsteht. Für die Erzeugung dieser Gradientenfelder werden mit sehr kurzen Schaltzeiten Wechselströme durch elektrische Spulen geschickt, die dann in dem starken Magnetfeld des Scanners (typische magnetische Flussdichte heutzutage: 3 Tesla) durch Lorentzkräfte ähnlich wie bei einem Lautsprecher das ganze Gerät zu Schwingungen im hörbaren Frequenzbereich anregen. Es gibt zwar MR-kompatible High-Fidelity-Kopfhörer, die in herkömmliche Ohrschützer eingepasst sind.

Diese dämpfen den Außenlärm je nach Frequenz um bis zu 15 bis 40 dB. Eine zusätzliche Dämpfung der Scannergeräusche um bis zu 15 dB kann durch den Einsatz von aktiver Störgeräuschunterdrückung erzielt werden. Dennoch können die Hintergrundgeräusche, je nach Versuchsparadigma, natürlich zu einer erheblichen Veränderung des eigentlich interessierenden Geräuschszenarios beitragen (Scarff et al., 2004).

Ein Versuchsparadigma für die fMRT, mit dem in den vergangenen Jahrzehnten trotz der ungünstigen akustischen Bedingungen wesentliche Erkenntnisse über die prinzipielle Organisation der auditorischen Areale im Gehirn gewonnen werden konnten, ist das sogenannte sparse temporal sampling (Hall et al., 1999), in Kombination mit clustered volume acquisition (Edmister et al., 1999). Hier wird der vermeintliche Nachteil der fMRT, dass ähnlich wie bei der Positronenemissionstomographie (PET) oder auch der Nahinfrarotspektroskopie (fNIRS) das gemessene Signal nicht direkt die neuronale Antwort repräsentiert, sondern indirekt über eine Stoffwechselantwort erfasst wird, zu einem Vorteil genutzt. Zwischen Reizdarbietung und Maximum der gemessenen Antwort gibt es eine zeitliche Verzögerung von bis zu 6 Sekunden. Auf diesem Weg ist es möglich, akustische Reize und die mit einem Störgeräusch verknüpfte Datenaufnahme zeitlich zu entkoppeln. Eine Zusammenfassung einiger Ergebnisse der auditorischen fMRT sowohl im Zusammenhang mit grundlegenden psychoakustischen Fragestellungen als auch im Zusammenhang mit dem Verstehen von Sprache findet sich zum Beispiel in einer Überblicksarbeit in der Zeitschrift für Medizinische Physik (Uppenkamp, 2021). Eine überaus lesenswerte Zusammenfassung geradezu enzyklopädischen Ausmaßes stellt der Review-Artikel von C. Price zur funktionellen Bildgebung von Sprachsignalen mit fMRT und auch mit PET dar (Price, 2012).

Insgesamt haben die Arbeiten mit funktioneller MR-Tomographie in den vergangenen Jahren zu bedeutenden Fortschritten bei der Untersuchung des Gehörs in den Neurowissenschaften geführt. Ein wichtiges Prinzip dabei ist einerseits die teilweise räumliche Separierung der neuronalen Aktivierung für unterschiedliche grundlegende Reizmerkmale, wie z. B. Tonhöhe und empfundene Lautheit. Andererseits zeigen die bisherigen Arbeiten aber auch, dass ein umfassendes Verständnis der neuronalen Prozesse bei komplexeren kognitiven Aufgaben wie z. B. dem Verstehen von Sprache nur möglich ist, wenn gleichzeitig verschiedene Areale in ihrer Interaktion miteinander analysiert werden. Hierzu bieten Bildgebungsdaten, wie sie mit funktioneller MRT gewonnen werden, auf Grund ihrer hohen räumlichen Auflösung eine hervorragende Grundlage. Es ist zu hoffen, dass sowohl technische Fortschritte auf Seiten der zur Verfügung stehenden Messmethoden als auch theoretische Fortschritte auf Seiten der Signalanalysestrategien für die in der Regel stark verrauschten Signale in Zukunft dazu beitragen können, dass auch die Methoden der neurowissenschaftlichen Bildgebung für die wichtigen Fragestellungen der Lärmwirkungsforschung zugänglich werden.

Literatur

Buxton RB. Introduction to functional magnetic resonance imaging. Cambridge University Press, Cambridge, 2002.

Edmister WB, Talavage TM, Ledden PJ, Weisskoff RM (1999) Improved auditory cortex imaging using clustered volume acquisitions. Hum Brain Mapp 7, 89-97.

Hall DA, Haggard MP, Akeroyd MA, Palmer AR, Summerfield AQ, Elliott MR, Gurney EM, Bowtell RW (1999) "Sparse" temporal sampling in auditory fMRI. Hum Brain Mapp 7, 213-223.

Price CJ (2012) A review and synthesis of the first 20 years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading. Neuroimage 62(2), 816-847.

Scarff CJ, Dort JC, Eggermont JJ, Goodyear BG (2004) The effect of MR scanner noise on auditory cortex activity using fMRI. Hum Brain Mapp 22, 341-349.

Uppenkamp S (2021) Functional neuroimaging in hearing research and audiology. Z Medizinische Physik 31(3), 289-304.

13 Beanspruchung durch Lärm am Arbeitsplatz Gibt es Evidenzen für eine Fehlregulation des endokrinen Stresssystems?

Silja Bellingrath
Institut für Psychologie, Universität Duisburg-Essen

Umweltstressoren wie beispielsweise Luftverschmutzung oder Lärmbelastung, werden zunehmend als wichtige Determinanten unserer Gesundheit erkannt. Insbesondere die Lärmexposition am Arbeitsplatz stellt hier eine wichtige Einflussgröße dar, da nicht nur direkte Auswirkungen auf das auditive System in Form von Gehörschäden zu beobachten sind, sondern ebenso Beeinträchtigungen bei geistig anspruchsvollen Tätigkeiten in Form von Leistungs- und Konzentrationseinbußen oder Beeinträchtigungen bei Tätigkeiten, die sprachliche Kommunikation erfordern, wie z. B. Lehrtätigkeiten oder auch Arbeit im Callcenter.

Die neuroendokrine Stressreaktion ist eine evolutionsbiologisch bedeutsame Anpassungsleistung, da sie bei akuter physiologischer oder psychologischer Bedrohung hilft, unsere Funktionsfähigkeit aufrecht zu erhalten. Unter Stress kommt es unmittelbar zu einer Aktivierung des sympathischen Nervensystems sowie in einem zweiten Schritt zu einer die Aktivierung der Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinden-Achse (HHNA), mit ihrem Endprodukt Cortisol. Erst eine gesteigerte Cortisolausschüttung ermöglicht die erfolgreiche Anpassung des Organismus an akuten Stress (Bellingrath & Kudielka, 2016). Abgesehen von der stressbezogenen Ausschüttung folgt die basale Cortisol-Sekretion einem ausgeprägten zirkadianen Rhythmus, mit einem deutlichen Anstieg während der ersten Stunde nach dem Erwachen und abnehmenden Werten über den restlichen Tag (Wüst et al. 2000). Die morgendliche Erhöhung des Cortisolspiegels, auch als Cortisolaufwachreaktion (CAR) bezeichnet, wird als adaptive Reaktion interpretiert, welche die erforderlichen Ressourcen bereitstellt, um die Anforderungen des kommenden Tages zu erfüllen (Stalder et al. 2016). Eine veränderte Reaktivität auf akute Stressoren oder Veränderungen in den Cortisolprofilen über den Tagesverlauf, bedingt durch anhaltende oder wiederkehrende Stressoren, kann nachhaltige Schädigungen des Gehirns sowie verschiedener Körpersysteme bewirken. Eine solche Fehlregulation der HHNA, kann sowohl eine Hyper- als auch eine Hypoaktivität der Stressachse beinhalten (Kudielka & Wüst, 2010).

McEwen`s Allostatic Load-Modell hat seit seiner Einführung Ende der 1990er Jahre unser Verständnis der Mechanismen, über die chronischer Stress zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen kann, in bedeutsamer Weise erweitert (McEwen, 1998). Der Terminus Allostase wurde ursprünglich von Sterling und Eyer (1988) verwendet, um ein fundamentales physiologisches Anpassungsprinzip zu beschreiben: "Stabilität durch Veränderung". Zur Aufrechterhaltung von Stabilität muss ein Organismus alle Parameter seines internalen Milieus variieren können, um sie in angemessener Form an die Bedingungen der Umwelt anzupassen. Dies bezeichnet McEwen als allostatische Reaktion. Die oben beschriebene Aktivierung der HHNA unter akutem Stress sowie die Rückkehr in den physiologischen Ausgangszustand nach Beendigung der Stresssituation stellt eine solche allostatische Reaktion dar, die dem Individuum eine Anpassung an dynamische Umweltbedingungen ermöglicht. Dieselben Prozesse, die unter akuten Belastungsreaktionen eine gute Anpassung ermöglichen, können bei chronischen Stressoren allerdings einen schädigenden Einfluss ausüben ("wear and tear") und so sowohl basale Prozesse der Selbststeuerung beeinträchtigen, als auch die Entwicklung von sowohl somatischen als auch psychischen Erkrankungen begünstigen (McEwen, 2007). Diese kumulative physiologische Beanspruchung des Organismus aufgrund wiederholter Anpassungsversuche wird als Allostatic Load (AL) bezeichnet. Die anhaltende aber auch ungenügende Sekretion von sogenannten primären Stressmediatoren (insbesondere

Stresshormone aber auch Zytokine) können das Gehirn und den Körper beeinträchtigen und sekundäre Folgen bedingen, zum Beispiel in Form von Bluthochdruck, Insulinresistenz oder chronisch niedrigschwellige Entzündungsprozesse (McEwen, 2006). Solche Veränderungen resultieren aus der Kompensation für übermäßige oder auch eine zu geringe Produktion der primären Stressmediatoren. Den Endpunkt des AL stellen manifeste Erkrankungen dar (so genannte tertiäre Folgen), die mit diesen physiologischen Fehlregulationen assoziiert sind, wie z. B. kardiovaskuläre Erkrankungen, Diabetes oder psychiatrische Störungsbilder.

Es ist anzunehmen, dass auch ein Umweltstressor wie Lärmexposition am Arbeitsplatz einen Risikofaktor für eine chronische Dysregulation der HHNA darstellen kann, welche über die Zeit mit einem erhöhten Allostatic Load und verminderter Anpassungsfähigkeit an Alltagsanforderungen einhergehen kann. Eine veränderte Reaktivität der HHNA auf akuten Stress sowie Veränderungen der Cortisolausschüttung über den Tagesverlauf wurden z. B. mit Veränderungen in der Arbeitsgedächtniskapazität und kognitiver Flexibilität in Verbindung gebracht (Shields, Sazma and Yonelinas, 2016; Law and Clow 2020); wichtige Grundfertigkeiten in verschiedenen Arbeitskontexten.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage inwiefern die Erfassung von primären Stressmediatoren, i.e. Cortisol, dazu beiträgt den Zusammenhang von Lärm und (kognitiver) Beanspruchung besser zu verstehen. Verschiedene Studien geben durchaus erste Hinweise darauf, dass Lärmbelastung während der Arbeit die Regulation der HHNA beeinträchtigt. In einer Untersuchung von Waye und Kolleg:innen (2002) wurden z. B. 32 Proband:innen, während der Bearbeitung von Konzentrationsaufgaben (Arbeitsgedächtnisaufgabe, Korrekturlesen) Lüftungsgeräuschen mit entweder dominanten niedrigen Frequenzen (niederfrequenter Lärm) oder einem flachen Frequenzspektrum ausgesetzt. Beide Geräusche hatten einen Pegel von 40 dB(A). Die Cortisolkonzentrationen während der Bearbeitung der Aufgaben wurden nicht signifikant durch die Geräusche moduliert. Der zirkadiane Abfall der Cortisolkonzentration über den Tag wurde jedoch in Reaktion auf den niederfrequenten Lärm signifikant gedämpft, allerdings nur bei Personen die angegeben hatten, generell hochempfindlich auf Lärm zu reagieren. Eine weitere Studie konnte einen Zusammenhang zwischen dem Cortisolspiegel am Ende eines Arbeitstages und der Lärmexposition in 78 Mitarbeiter:innen eines Automobilherstellers beobachten, die verschiedenen Lärmpegeln (Schallpegel reichten von 60 - 95 dB(A)) ausgesetzt waren. Insbesondere die subjektive Beeinträchtigung durch den Lärm nach der Arbeit schien mit den Cortisolspiegeln assoziiert (Yaghoubi et al. 2020).

In einer dritten Studie wurde der protektive Effekt von Ohrenschützern auf Urincortisolwerte in 35 Industriearbeitern untersucht, die ohne Gehörschutz hohen Lärmpegeln (>85 dB(A)) ausgesetzt waren (Melamed und Bruhis 1996). Die Ergebnisse zeigten, dass unter Bedingungen chronischer Lärmbelastung (ohne Ohrenschützer) der Cortisolspiegel am Ende der Arbeitsschicht hoch war und fast den morgendlichen Wert erreichte. Dies ging einher mit berichteter Müdigkeit und Reizbarkeit nach der Arbeit. Nach einer 7-tägigen Nutzung von Ohrenschützern durch die Teilnehmer und der damit erreichten Reduktion der Schalpegel um ca. 30 dB(A), konnte der normale Cortisol-Tagesrhythmus wiederhergestellt werden. Gleichzeitig zeigten sich Verringerungen der berichteten Müdigkeit und der Reizbarkeit nach der Arbeit. In einer Studie von Fouladi und Kollegen (2012) wurden schließlich 80 männliche Teilnehmer eines Haushaltswarenherstellers untersucht, die an zwei Tagen (Arbeitstag und Ruhetag) morgens und abends Speichelproben sammelten. Die Lärmexpositionspegel wurden mittels einem Schallpegelmesser und einem Lärmdosimeter gemessen. Bezüglich der abendlichen Cortisolkonzentrationen wurde ein starker signifikanter Unterschied zwischen Freizeittag und Arbeitstag beobachtet und die abendlichen Cortisolwerte am Arbeitstag korrelierten signifikant mit einer Lärmbelastung > 80 dB(A).

Zusammenfassend legen diese ersten Untersuchungen nahe, dass Lärm am Arbeitsplatz insbesondere die zirkadiane Rhythmik der HHNA zu beeinflussen scheint. Anzumerken ist allerdings, dass es sich bei allen oben genannten Studien, um Studien mit recht kleinen Stichproben handelt und die Messung der Cortisolwerte nur bedingt zu vergleichbaren Messzeitpunkten erfolgte. Darüber hinaus hat keine der genannten Studien explizit kognitive Beanspruchung oder andere Maße von Leistungsfähigkeit im Rahmen der Lärmexposition mit den Cortisolanalysen in Verbindung gebracht.

Literatur

Bellingrath S. & Kudielka B.M. Psychobiological pathways from work stress to reduced health: naturalistic and experimental studies on the model of Effort-Reward-Imbalance. (2016). In: J. Siegrist, M. Wahrendorf (Eds.). Work stress and health in a globalized economy - The model of effort-reward imbalance. Springer: Berlin.

Fouladi, D. B., Nassiri, P., Monazzam, E. M., Farahani, S., Hassanzadeh, G., & Hoseini, M. (2012). Industrial noise exposure and salivary cortisol in blue collar industrial workers. Noise and Health, 14(59), 184.

Kudielka, B. M. & Wüst, S. (2010). Human models in acute and chronic stress: Assessing determinants of individual hypothalamus—pituitary—adrenal axis activity and reactivity. Stress, 13 (1), 1-14.

Law, R., & Clow, A. (2020). Stress, the cortisol awakening response and cognitive function. International review of neurobiology, 150, 187-217.

McEwen, B. S. (1998). Stress, adaptation, and disease: Allostasis and allostatic load. Annals of the New York Academy of Sciences, 840 (1), 33-44.

McEwen, B. S. (2006). Protective and damaging effects of stress mediators: Central role of the brain. Dialogues in Clinical Neuroscience, 8 (4), 367.

McEwen, B. S. (2007). Physiology and neurobiology of stress and adaptation: Central role of the brain. Physiological Reviews, 87 (3), 873-904.

Melamed, S., & Bruhis, S. (1996). The effects of chronic industrial noise exposure on urinary cortisol, fatigue, and irritability: a controlled field experiment. Journal of occupational and environmental medicine, 38(3), 252-256.

Shields, G. S., Sazma, M. A., & Yonelinas, A. P. (2016). The effects of acute stress on core executive functions: A meta-analysis and comparison with cortisol. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 68, 651-668.

Stalder, T., Kirschbaum, C., Kudielka, B. M., Adam, E. K., Pruessner, J. C., Wüst, S., Dockray, S., Smyth, N., Evans, P., & Hellhammer, D. H. (2016). Assessment of the cortisol awakening response: expert consensus guidelines. Psychoneuroendocrinology, 63, 414-432.

Sterling, P., & Eyer, J. (1988). Allostasis: A new paradigm to explain arousal pathology. New York: Wiley.

Waye, K. P., Bengtsson, J., Rylander, R., Hucklebridge, F., Evans, P., & Clow, A. (2002). Low frequency noise enhances cortisol among noise sensitive subjects during work performance. Life sciences, 70(7), 745-758.

Wüst S, Wolf J, Hellhammer DH, Federenko I, Schommer N, Kirschbaum C (2000) The cortisol awakening response - normal values and confounds. Noise Health 2 (7):79-88.

Yaghoubi, K., Alimohammadi, I., Abolghasemi, J., Shandiz, M. S., Aboutaleb, N., & Ebrahimi, H. (2020). The relationship between noise annoyance and salivary cortisol. Applied Acoustics, 160, 107131.

14 Maschinelles Lernen in der Analyse des Elektroenzephalogramms zur Diagnostik psychischer Beanspruchung

Thea Radüntz

Gruppe 3.1 Prävention arbeitsbedingter Erkrankungen, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Berlin

Der heutige Arbeitsplatz erfordert in der Regel Daueraufmerksamkeit und Konzentration und ist gleichzeitig gekennzeichnet durch Arbeitsunterbrechungen und Störungen. Zudem tragen eine Zunahme und Etablierung des Homeoffice und des mobilen Arbeitens dazu bei, dass lärminduzierte Prozesse zusätzlich auf die kognitive Leistungsfähigkeit und die psychische Beanspruchung einwirken.

Die effiziente und fehlerfreie Bearbeitung der Arbeitsaufgaben unter den Bedingungen am Arbeitsplatz sollte jedoch nicht mit Risiken für die Gesundheit der Menschen einhergehen. Das ist ein wichtiges Thema des Arbeitsschutzes und Gegenstand intensiver Forschung. Die Ermittlung der psychischen Beanspruchung am Arbeitsplatz ist folglich eine wichtige Forschungsfrage. Erst wenn es gelingt, diese Beanspruchung zu quantifizieren, kann nach Wegen gesucht werden, sowohl eine Über- als auch Unterbeanspruchung zu vermeiden und dem Ziel einer menschengerechten und gesundheitsförderlichen Gestaltung des Arbeitsplatzes näher zu kommen.

Die Betrachtung physiologischer Kenngrößen bietet sich an, da sie einen direkten Zusammenhang zwischen dem Aktivierungspotenzial des Organismus und der psychischen Beanspruchung abbildet. Naheliegend ist aufgrund der menschlichen Informationsverarbeitung im Gehirn insbesondere die Erfassung und Analyse des Elektroenzephalogramms (EEG), welche mit Herausforderungen für die Signalverarbeitung und Mustererkennung einhergeht. Maschinelles Lernen kann dazu beitragen sich dem Ziel einer objektiven Erfassung der psychischen Beanspruchung zu nähern. Forschungsarbeiten mit dieser Thematik wurden im Rahmen von Projekten der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA; F2312, F2402) geleistet und werden im Folgenden beschrieben. Ausgehend von einer kurzen Einführung in die Begrifflichkeiten psychischer Beanspruchung und maschinellen Lernens, werden die zwei entwickelten Verfahren zur automatisierten Artefaktelimination und Beanspruchungsindexierung aus dem EEG skizziert.

Belastung und Beanspruchung

Bereits in den 40er Jahren wurde der Begriff geistige Beanspruchung von Bornemann im Kontext der Optimierung von Mensch-Maschine-Systemen benutzt (Bornemann, 1942). Seitdem wurde er vielmals definiert und verwendet.

Im Jahr 1975 wurden die Begriffe Belastung und Beanspruchung von Rohmert und Rutenfranz im arbeitswissenschaftlichen Kontext definiert (Rohmert & Rutenfranz, 1975). Belastung ist als Einwirkungsgröße zu verstehen und damit als eine objektiv von außen auf den Menschen wirkende Größe. Beanspruchung ist die Auswirkung der einwirkenden Belastung in und auf den Menschen. Beide Begriffe sind zunächst wertneutral zu verstehen und erst bei einer Unter- oder Überforderung lässt sich eine Wertung vornehmen. Diese Definitionen aus dem arbeitswissenschaftlichen Kontext haben Eingang in die Norm DIN EN ISO 10075 mit dem Titel "Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung" gefunden. Die psychische Belastung umfasst dabei die kognitiven und emotionalen Prozesse des Individuums und ist somit individuell. Das bedeutet, dass gleiche Anforderungen nicht unbedingt zu der gleichen psychischen Beanspruchung führen müssen. Im anglo-amerikanischem Sprachraum existiert neben den Begriffen mental stress und mental strain auch der Begriff mental workload.

In dem vorliegenden Text wird der Begriff "psychische Beanspruchung" verwendet und ist damit durch die in diesem Abschnitt erwähnte DIN EN ISO 10075-1 definiert.

Maschinelles Lernen

Maschinelles Lernen wird als die Fähigkeit eines Systems verstanden, Wissen aus Erfahrung zu generieren. Im Speziellen bedeutet das, dass das System nicht nur auswendig lernt, sondern aus den Beispielen, die es für einen Sachverhalt bekommt, Gesetzmäßigkeiten extrahiert, die einer Klasse gemein sind. Dadurch lernt es die Klassen zu trennen und ist nach der Lernphase in der Lage zu verallgemeinern und neue Fälle den einzelnen Klassen zuzuordnen. Lernt der Algorithmus aus korrekt vorgegebenen Funktionswerten zu einzelnen Eingaben, so spricht man von überwachtem Lernen. Hat er hingegen nur Eingaben und muss zuerst allein Cluster bilden, die sich voneinander unterscheiden, um dann die Zugehörigkeit von neuen Eingaben dazu abzuschätzen, so handelt es sich um unüberwachtes Lernen. Bei beiden im Folgenden beschriebenen Klassifikationsverfahren handelt es sich um überwachtes Lernen.

Automatisierte EEG-Artefaktbereinigung

Beim EEG handelt es sich um ein sehr kleines Signal (µVolt Bereich), das durch verschiedene biologische und technische Artefakte kontaminiert ist. Das sind üblicherweise Augenbewegungen und Lidschläge, Muskelaktivität und Herzschläge aber auch defekte Elektroden, hohe Übergangsimpedanzen sowie Netz-Einstreuung und Interferenzen von weiteren elektronischen Geräten. Um das EEG und damit die Gehirnaktivität korrekt zu interpretieren, müssen diese Artefakte vor der Analyse beseitigt werden.

Hierfür wurde ein Verfahren entwickelt, das sich an dem Vorgehen von menschlichen EEG-Experten orientiert. Die Verarbeitungskette besteht aus drei Modulen. Das erste Modul der Vorverarbeitung besteht aus den für das EEG klassischen Verfahren der Bandpassfilterung und linearen Unabhängigkeitsanalyse (ICA: independent component analysis). Die dadurch erzeugten Topoplots (graphische Darstellung der Mischmatrixspalten) und Leistungsspektren der linearunabhängigen Komponenten (IC: independent component) werden dem zweiten Modul der Merkmalsgewinnung übergeben. Hier findet anhand von Bildverarbeitungsalgorithmen eine Merkmalsextraktion und Nachbearbeitung der Merkmalsbilder statt. Diese werden dann zusammen mit den oben erwähnten Leistungsspektren der ICs dem Hauptmodul zur Klassifikation zur Verfügung gestellt. Während der Lernphase, erhält das System zusätzlich noch die Bewertungen von Experten zu den einzelnen Topoplots. Der so berechnete Klassifikator kann anschließend ICs als Artefakt- oder EEG-Komponenten bewerten. Indem nur die EEG-Komponenten rückprojiziert werden, wird ein artefaktbereinigtes Signal gebildet.

Für die Klassifikation wurden neben der logistischen Regression als binärer Klassifikator, die Support Vector Machine und künstliche neuronale Netze implementiert, trainiert und getestet. Dabei waren die künstlichen neuronalen Netze der Support Vector Machine leicht überlegen.

Die hier vorgestellte Methode zur Artefaktelimination anhand von maschinellem Lernen wurde bereits in den Jahren 2015-2017 entwickelt und veröffentlicht (Radüntz et al., 2015; 2017). In der Zwischenzeit sind ähnliche Forschungsarbeiten weltweit erfolgt. Erwähnenswert ist die Arbeit von Pion-Tonachini und Kollegen, die ebenfalls auf die automatisierte Klassifikation von ICs aufgrund von Expertenlabels beruht (Pion-Tonachini et al., 2019). Die Vorgehensweise zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass die Autoren zum Trainieren ihres Systems Bewertungen aus einem Netzwerk von Experten (crowdsourced IC labels) verwendet haben. Die große Anzahl von verschiedenen Experten bewerteter ICA-Komponenten trägt folglich zur Stabilität des Systems und Robustheit des Klassifikators bei.

Automatisierte EEG-Quantifizierung psychischer Beanspruchung

Die bisher zahlreich entwickelten Verfahren zur Erfassung psychischer Beanspruchung anhand des EEGs nehmen meistens nur Bewertungen für spezielle Anwendungen vor. Mit dem Ziel einen universellen Klassifikator zu entwickeln, der die psychische Beanspruchung an einem informationsintensiven Arbeitsplatz vornehmen kann, wurde eine Aufgabenbatterie zusammengestellt, die die Dimension der kognitiven Anforderungen der modernen Arbeitswelt an die exekutive Kontrolle abbildet (Radüntz, 2016). Die ausgewählten Aufgaben waren N-back, Sternberg, Stroop, Switch sowie AOSPAN. Diese wurden unter Laborbedingungen von 57 Erwerbstätigen bearbeitet. Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde auf die traditionellen Frequenzbänder des EEGs fokussiert, unter der Berücksichtigung der in der Literatur mehrmals erwähnten Tatsache, dass mit einer zunehmenden Aufgabenschwierigkeit eine Erhöhung der Leistung des frontalen θ -Bandes und eine Abnahme der Leistung des parietalen α-Bandes einhergehen (Lei, 2011; Gevins & Smith, 2000; Gevins et al., 1997). In einem ersten Schritt wurden z-scores der Leistungen vom α- und θ-Band berechnet und in einer Karte, den Dual Frequency Head Maps (DFHM), fusioniert. Es wurden alle Elektroden einbezogen und je nach Areal die entsprechenden Bänderleistungen abgebildet. Die so entstandenen DFHM haben charakteristische Muster und können von Experten mit Labels versehen werden. Anhand dieser Expertenbewertungen erfolgte das Training eines SVM-Klassifikators. Nach der Trainingsphase erfolgt die Indexierung der DFHM je EEG-Segment in einem der drei Bereiche geringer, mittlerer und hoher Beanspruchung automatisiert. Die genaue Beschreibung der Methode sowie ihrer Umsetzung findet sich in Radüntz (2017).

Fazit

Die DFHM-Methode zur automatisierten Quantifizierung psychischer Beanspruchung mit Hilfe des EEGs und Methoden des maschinellen Lernens wurde zunächst auf Basis von Laboruntersuchungen entwickelt. In einem Folgeprojekt wurde die DFHM-Methode am Beispiel eines Fluglotsenarbeitsplatzes unter realitätsnahen Bedingungen bzgl. ihrer Sensitivität (Differenzierung unterschiedlicher Beanspruchungsniveaus voneinander) validiert (F2402; Radüntz et al. 2020). Dabei wurde kein neuer Klassifikator mehr trainiert (weder für die neuen Personen noch für die neuen Aufgaben). Die systematische Validierung der Diagnostizität (Differenzierung unterschiedlicher Beanspruchungsarten) steht jedoch noch aus. Unklar ist auch, ob bzw. ab welcher Intensität die DFHM-Methode in der Lage ist, lärminduzierte Beanspruchung zu erfassen. Zukünftige Forschungsarbeiten könnten sich folglich mit diesen Fragestellungen intensiver beschäftigen.

Literatur

Bornemann, E. (1942): Untersuchungen über den Grad der geistigen Beanspruchung, 2. Teil: Praktische Ergebnisse. In: Arbeitsphysiologie 12, S. 173-191

Gevins, A. & Smith, M. E. (2000): Neurophysiological Measures of Working Memory and Individual Differences in Cognitive Ability and Cognitive Style. In: Cerebral Cortex 10 (2000), Nr. 9, 829-839. http://dx.doi.org/10.1093/cercor/10.9.829. — DOI 10.1093/cercor/10.9.829. — Last accessed on 2014-02-18

Gevins, A.; Smith, M. E.; McEvoy, L. & Yu, D. (1997): High-resolution EEG mapping of cortical activation related to working memory: effects of task difficulty, type of processing, and practice. In: Cerebral Cortex 7 (1997), Nr. 4, 374-385.

http://dx.doi.org/10.1093/cercor/7.4.374. – DOI 10.1093/cercor/7.4.374. – Last accessed on 2014-02-18

Lei, S. (2011): Driver Mental States Monitoring Based on Brain Signals, Fakultät V: Verkehrsund Maschinensysteme (TU Berlin), Diss., 2011

Pion-Tonachini L., Kreutz-Delgado K., Makeig S. (2019): ICLabel: An automated electro-encephalographic independent component classifier, dataset, and website. Neuroimage. 2019 Sep;198:181-197. doi: 10.1016/j.neuroimage.2019.05.026. Epub 2019 May 16. PMID: 31103785; PMCID: PMC6592775.

Radüntz, T. (2016): Kontinuierliche Bewertung psychischer Beanspruchung an informationsintensiven Arbeitsplätzen auf Basis des Elektroenzephalogramms. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, urn:nbn:de:koby:11-100235873

Radüntz, T. (2017): Dual Frequency Head Maps: A New Method for Indexing Mental Workload Continuously during Execution of Cognitive Tasks. Frontiers in Physiology, 8:1019, doi:10.3389/fphys.2017.01019

Radüntz, T., Fürstenau, N., Mühlhausen, T. & Meffert, B. (2020): Indexing Mental Workload during Simulated Air Traffic Control Tasks by Means of Dual Frequency Head Maps. Frontiers in Physiology, 11:300, doi: 10.3389/fphys.2020.00300

Radüntz, T., Scouten, J., Hochmuth, O. & Meffert, B. (2015): EEG artifact elimination by extraction of ICA-component features using image processing algorithms. Journal of Neuroscience Methods, vol. 243, ISSN 0165–0270,

DOI-http://dx.doi.org/10.1016/j.jneumeth.2015.01.030, pp. 84 – 93

Radüntz, T., Scouten, J., Hochmuth, O. & Meffert, B. (2017): Automated EEG Artifact Elimination by Applying Machine Learning Algorithms to ICA-based Features. Journal of Neural Engineering, vo. 14, IOPscience, DOI-https://doi.org/10.1088/1741-2552/aa69d1

Rohmert, W. & Rutenfranz, J. (1975): Arbeitswissenschaftliche Beurteilung der Belastung und Beanspruchung an unterschiedlichen industriellen Arbeitsplätzen/Der Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung, Bonn. 1975. – Forschungsbericht

15 Kognitive Anstrengung: kognitionspsychologische Grundlagen und Konzepte

Daniel Oberfeld-Twistel

Allgemeine und Experimentelle Psychologie, Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Kognitive Anstrengung und Aufmerksamkeit

Nicht nur körperliche, sondern auch geistige (kognitive) Tätigkeiten können anstrengend sein. Ich kann mühelos und nebenher den Konversationen in der deutsch synchronisierten Fassung meiner Lieblingsserie folgen, muss mich aber anstrengen und konzentrieren, um die sprachlichen Feinheiten in der Originalfassung zu verstehen. Lauter Baulärm oder Gespräche von Kolleg*innen im Hintergrund an meinem Büroarbeitsplatz können selbst simple Tätigkeiten wie das Eintragen von Daten in eine Tabelle herausfordernd machen. Nach längerer konzentrierter Arbeit an zum Beispiel einer anspruchsvollen Datenanalyse oder einem wissenschaftlichen Manuskript fühle ich mich oft müde und geschafft und benötige eine Pause. Wie können diese Beobachtungen erklärt werden? In der Kognitionspsychologie spielt das Konzept der Aufmerksamkeit eine zentrale Rolle. Dieser Begriff hat zahlreiche Lesarten, aber Aufmerksamkeit meint in jedem Fall eine entweder willentliche oder unwillkürliche Zuwendung zu bestimmten externen Reizen bzw. internen Gedanken oder kognitiven Tätigkeiten. Dies impliziert auch Selektion: wir richten unsere Aufmerksamkeit auf einen Reiz oder eine Tätigkeit, in diesem Moment werden somit andere Reize oder Tätigkeiten weniger intensiv ver- bzw. bearbeitet. Manche kognitiven Leistungen gelingen uns scheinbar mühelos (das Verfolgen der Lieblingsserie in der Muttersprache) – dies wird häufig so interpretiert, dass die dafür nötigen kognitiven Prozesse "automatisch" ablaufen (Posner & Snyder, 1975) – andere erfordern unsere aktive Zuwendung, also Aufmerksamkeit (die Lieblingsserie in einer Fremdsprache).

Rahmenkonzept: begrenzte kognitive Verarbeitungskapazität

Ein für das Verständnis dieser Zusammenhänge aus meiner Sicht sehr hilfreiches Werk ist das einflussreiche Buch "Attention and effort" (Aufmerksamkeit und Anstrengung) des späteren Nobelpreisträgers Daniel Kahneman (1973). Kahneman nimmt Bezug auf Berlyne (1960) und betont den Intensitätsaspekt von Aufmerksamkeit: schwierigere Aufgaben erfordern mehr Aufmerksamkeit und gleichzeitig mehr Anstrengung. Für Kahneman sind "aufmerksam sein" (pay attention) und "sich anstrengen" (exert effort) in Bezug auf kognitive Leistungen also synonym. In seinem Buch formuliert er ein Kapazitätsmodell der Aufmerksamkeit. Solche Theorien nehmen an, dass Menschen (und anderen Organismen) nur eine begrenzte kognitive Verarbeitungskapazität zur Verfügung steht. Wie erwähnt, erfordern manche kognitiven Tätigkeiten oder Prozesse (fast) keine Aufmerksamkeit. Wenn kognitive Prozesse jedoch Aufmerksamkeit benötigen, so ist die Menge der zu einem bestimmten Zeitpunkt zuweisbaren Aufmerksamkeit kapazitätsbeschränkt. "Kapazität investieren" (invest capacity) ist somit für Kahneman ein weiteres Synonym für "aufmerksam sein" oder "sich anstrengen". In diesem Konzept besteht nun ein zentraler Zusammenhang zwischen Anstrengung/der Intensität von Aufmerksamkeit auf der einen Seite und Erregung/Aktivierung (arousal) auf der anderen Seite, wobei Erregung hier durchaus physiologisch verstanden wird. Die Bearbeitung anspruchsvollerer Tätigkeiten benötigt eine höhere Aufmerksamkeitsintensität/Anstrengung und führt somit zu höherem Arousal. In die andere Richtung gedacht hängt die momentan zur Verfügung stehende Verarbeitungskapazität mit dem Arousalniveau zusammen: bei mittelhohem Arousal ist mehr kognitive Kapazität verfügbar als bei niedrigem Arousal. Bei zu hohem Arousal wiederum sinkt die verfügbare Kapazität (auch im Sinne des "Gesetzes" von Yerkes & Dodson, 1908). Gerade aus dem Tiefschlaf geweckt können wir kognitiv weniger leisten als im wachen und angeregten Zustand, aber nach einem Hundertmeterlauf mit Vollgas sind auch keine kognitiven Höchstleistungen mehr möglich.

Aus dem Kapazitätsmodell von Kahneman (1973) folgt nun ein sowohl theoretisch als auch praktisch wichtiger Aspekt: ein Anstieg der Schwierigkeit einer Aufgabe kann durch eine Erhöhung der darauf verwendeten kognitiven Ressourcen (also höhere Anstrengung) kompensiert werden. Wir können also auch bei höheren Aufgabenanforderungen dieselbe Leistung erbringen, müssen uns dafür aber mehr anstrengen. Hohe kognitive Anstrengung kann mittel- oder langfristig zu Ermüdung, Überlastung und psychologischem Stress führen. Insofern ist eine Vermeidung zu hoher kognitiver Anstrengung nicht zuletzt auch für die Gestaltung von Arbeitsprozessen (z. B. Wickens, Helton, Hollands, & Banbury, 2021) und für Wohlbefinden und Gesundheit am Arbeitsplatz ein wichtiger Aspekt (Ferreira & Vogt, 2022).

Eine Erhöhung der kognitiven Ressourcenanforderungen kann durch die gerade primär zu bearbeitende Aufgabe selbst bedingt sein ("multipliziere 3 mit 5" versus "multipliziere 3256 mit 6724"), aber auch durch den Kontext. Beispielsweise kann der eingangs beschriebene Effekt von aufgabenirrelevantem Hintergrundschall auf kognitive Tätigkeiten dadurch erklärt werden, dass Gespräche im Hintergrund a) unwillkürlich die Aufmerksamkeit auf sich ziehen und oft auch automatisch semantisch verarbeitet werden und dass b) die Unterdrückung solcher automatischer Prozesse Aufmerksamkeit – also Zuweisung kognitiver Ressourcen und Anstrengung – benötigt (Shiffrin & Schneider, 1977).

Einordnung: Begrifflichkeiten und alternative Konzepte

Wie ordnet sich dieses bereits ab den 1960er Jahren entwickelte Konzept in die umfangreiche nach Kahneman (1973) entstandene Literatur ein? Beginnend in den 1980er Jahren wurde das von Kahneman (1973) und anderen Aufmerksamkeitsmodellen vertretene Konzept kritisiert, dass Selektion (attentive selection) aufgrund einer "zentralen" Kapazitätsbegrenzung erfolgen müsse. Alternative Ansätze wurden formuliert, nach denen die Funktion der Selektion ist, Handlungen zu ermöglichen ("selection for action"; z. B. Allport, 1987; Neumann, 1987) bzw. in denen das von Kahneman (1973) und anderen (z. B. Moray, 1967) vertretene Konzept einer zentralen beschränkten Kapazität durch ein Konzept von multiplen (jedoch auch jeweils beschränkten) Ressourcen ersetzt wurde (z. B. Wickens, 2008). Diese für die Kognitionspsychologie bedeutsamen Entwicklungen stellen jedoch nicht in Frage, dass kognitive Prozesse und Tätigkeiten sich in ihren Ressourcenanforderungen unterscheiden, und dass hohe Ressourcenanforderungen hohe kognitive Anstrengung/Aufmerksamkeitsintensität bedingen.

Eine größere Herausforderung für die Einordnung des Konzepts von Kahneman in Bezug auf andere Literatur zum Thema ist, dass viele verschiedene Begrifflichkeiten verwendet werden, und dies in leider teilweise inkonsistenter Weise. In der relevanten Literatur werden häufiger als "kognitive Anstrengung" (effort) die Begriffe cognitive (oder mental) load (oder workload) verwendet. Zwar identifizierte ein aktuelles Review zum Thema "mental workload" ganze 68 im Detail etwas unterschiedliche Definitionen des Begriffs (Longo, Wickens, Hancock, & Hancock, 2022), jedoch wurde darin folgende "integrative" Definition vorgeschlagen: "Mental workload repräsentiert das Ausmaß an Aktivierung eines kapazitätsbegrenzten Vorrats an Ressourcen [...] durch Anstrengung und Aufmerksamkeit [...] während der kognitiven Bearbeitung einer Hauptaufgabe." ¹ (S. 18, sinngemäße und gekürzte Übersetzung durch den Autor). Diese Definition von mental workload bezieht sich auf den internen Zustand der Person, entspricht kognitiver Anstrengung/Aufmerksamkeitsintensität der Zuweisung von kognitiver Kapazität und folgt dem von Kahneman (1973) vorgeschlagenen Konzept. In diesem Sinne wird der Begriff mental/cognitive load/workload häufig in der kognitionspsychologischen Literatur verwendet.

¹ Im Original: "Mental workload represents the degree of activation of a finite pool of resources, limited in capacity, while cognitively processing a primary task over time, [...] by devoted effort and attention."

Allerdings ist zu beachten, dass mit "load" in anderen Teilen der Literatur die "objektive", von außen kommende Anforderung an das kognitive System beschrieben wird (externer Zustand der Aufgabe, der Situation etc.; z. B. Johannsen, 1979), auf die das System dann unter anderem mit Anstrengung/Investition von kognitiven Ressourcen/Arousal reagieren kann. In der Arbeitswissenschaft wurde von Rohmert und Rutenfranz (1975) eine Unterscheidung zwischen "Belastung" und "Beanspruchung" getroffen. Belastung meint die Einflüsse, die von außen auf einen Menschen zukommen (Aufgabenschwierigkeit, Arbeitsbedingungen etc.), während Beanspruchung die Reaktion des Menschen auf die Belastung ist (interner Zustand), unter anderem im Sinne erhöhter kognitiver Anstrengung (Ferreira & Vogt, 2022). Diese Definitionen wurden z. B. in DIN EN ISO 10075-1 (2018) übernommen; in der englischsprachigen Version der Norm wird Belastung mit "stress" und Beanspruchung mit "strain" übersetzt. Die Begriffe "kognitive Anstrengung", "Aufmerksamkeitsintensität", "investierte kognitive Kapazität", "mental workload" im Sinne eines internen Zustands, sowie "kognitive Beanspruchung" im Sinne von ISO 10075 meinen also dasselbe. "Belastung" im Sinne von ISO 10075 bezieht sich hingegen eindeutig auf externe Einflüsse. Die Begriffe mit "load" (wie "cognitive workload") werden jedoch teilweise für den internen und teilweise für den externen Zustand verwendet. Bei der Rezeption der entsprechenden Literatur muss insofern immer differenziert werden, welche Lesart von "load" (intern oder extern) jeweils gemeint ist. Wünschenswert wäre, dass Autor*innen, die "load" Begriffe verwenden, explizit definieren, ob der Begriff sich auf äußere Einflüsse oder den internen Zustand der Person bezieht. Auch die englische Übersetzung von "Belastung" (äußere Einflüsse) mit "stress" wie in ISO 10075 ist nicht gänzlich unproblematisch, da in der Psychologie der Begriff "Stress" einen internen, nicht einen externen Zustand beschreibt (z. B. Lazarus, 1999).

Messung von der kognitiven Anstrengung

Wie kann nun die Aufmerksamkeitsintensität/die kognitive Anstrengung gemessen werden? Da kognitive Anstrengung dem subjektiven Erleben zugänglich ist, sind hier zunächst subjektive Maße naheliegend und wichtig, mit denen die betroffenen Personen selbst Auskunft über die von ihnen erlebte Anstrengung geben. In der Literatur wird eine größere Anzahl ein- und mehrdimensionaler Fragebogenverfahren unterschiedlicher psychometrischer Qualität verwendet (z. B. Hart & Staveland, 1988; Reid & Nygren, 1988), meist basierend auf Ratingskalen. Ein aktueller Überblick findet sich in Longo, et al. (2022).

Selbsteinschätzungen erfassen einerseits die -per definitionem subjektive- kognitive Anstrengung direkt und sollten insofern möglichst immer (mit-)erhoben werden. Antworten auf Ratingskalen sind aber andererseits generell schwer zwischen Studien vergleichbar (z. B. Bartoshuk et al., 2003) und für Kontexteffekte anfällig (z.B. Lawless, Horne, & Spiers, 2000; Schwarz, 1999). Besonders in der experimentalpsychologischen Grundlagenforschung wurden objektive Leistungsmaße für kognitive Anstrengung/Aufmerksamkeitsintensität entwickelt. Aus der diskutierten Kompensationsmöglichkeit für höhere Aufgabenanforderungen durch eine Erhöhung der investierten Kapazität folgt, dass die Leistung in der aktuell priorisierten Aufgabe (Hauptaufgabe) kein gutes Maß für kognitive Anstrengung ist. Nur wenn die Anforderungen so hoch werden, dass sie die aktuell aktivierbare kognitive Kapazität überschreiten, würde die Leistung in der Aufgabe zurückgehen. Aus dem theoretischen Konzept folgt aber auch (Kahneman, 1973), dass die Leistung in einer Sekundäraufgabe als objektives Verhaltensmaß für kognitive Anstrengung die in die Primäraufgabe investierte kognitive Kapazität genutzt werden kann (z. B. Posner & Boies, 1971). Da alle kognitiven Prozesse im Modell aus einer einzigen, zentralen Kapazität gespeist werden, zieht laut Modell eine höhere Zuweisung von kognitiven Ressourcen auf die Hauptaufgabe Kapazität von der Bearbeitung der Nebenaufgabe (n) ab, was die Leistung in der Nebenaufgabe messbar reduzieren sollte (soweit letztere sinnvoll gewählt ist). Wenn eine Person gebeten wird, die primäre Aufgabe

so gut wie möglich auszuführen und nur die verbleibende Kapazität für die Bearbeitung einer Nebenaufgabe zu nutzen, dann liefert die Leistung in dieser Nebenaufgabe also ein Maß für die aktuelle kognitive Anstrengung. Bei geschickter Gestaltung der Nebenaufgabe kann die Aufmerksamkeitsintensität "online" im zeitlichen Verlauf der Bearbeitung der Primäraufgabe verfolgt werden (z. B. Posner & Boies, 1971). Allerdings erhöht die zusätzliche Nebenaufgabe immer etwas die Komplexität der zu untersuchenden Situation.

Durch den von Kahneman (1973) diskutierten engen Zusammenhang zwischen kognitiver Anstrengung und Arousal eröffnen sich zudem physiologische Messmöglichkeiten. Insbesondere wurde bereits von Kahneman und seinen Kooperationspartnern die Pupillendilatation als besonders gut geeignetes Maß vorgeschlagen (z. B. Beatty, 1982). Der Pupillendurchmesser steigt mit dem Arousal, die physiologischen Mechanismen dafür sind gut bekannt (Strauch, Wang, Einhäuser, van der Stigchel, & Naber, 2022) und der durch die Pupillendilatation gemessene Intensitätsaspekt der Aufmerksamkeit entspricht dem "Alerting"-Aspekt der Aufmerksamkeit in aktuellen Netzwerkmodellen der Aufmerksamkeit (Petersen & Posner, 2012). Aufgrund der recht kurzen Latenzen der Pupillendilatation kann auch hiermit der zeitliche Verlauf der Aufmerksamkeitsintensität gemessen werden (z. B. Kahneman, Beatty, & Pollack, 1967). Weitere peripherphysiologische Korrelate von Arousal sind unter anderem Hautleitfähigkeit (Boucsein, 1992), Herzrate und Herzratenvariabilität (siehe Longo, et al., 2022). Alle peripherphysiologischen Maße werden natürlich auch von anderen Faktoren als kognitiver Anstrengung beeinflusst (etwa wechselnde Helligkeit bei der Pupillendilatation, Temperaturschwankungen bei der Hautleitfähigkeit oder generell emotional oder durch physische Aktivität statt kognitiv verursachtes Arousal), so dass eine sorgfältige Planung des Untersuchungsdesigns für eine Interpretierbarkeit der Messergebnisse im Sinne von kognitiver Anstrengung entscheidend ist.

Als neurophysiologische Maße für kognitive Anstrengung wurden -unter anderem - erhöhte Aktivität im Theta-Frequenzband und reduzierte Aktivität im Alpha-Frequenzband des Elektroenzephalogramms (EEG) als Indikatoren von hoher Aufmerksamkeitsintensität vorgeschlagen (z. B. Borghini, Astolfi, Vecchiato, Mattia, & Babiloni, 2014; Klimesch, 1999); ebenso erhöhte Aktivität im präfrontalen Kortex, die zum Beispiel per funktioneller Kernspintomographie oder Nahinfrarotspektrografie gemessen werden kann (z. B. Cohen et al., 1996; Fishburn, Norr, Medvedev, & Vaidya, 2014). Auch die neurophysiologischen Maße reagieren nicht exklusiv auf kognitive Anstrengung, sondern auf vielfältige andere Prozesse und Faktoren, so dass auch hier einem geeigneten Design der Messung eine zentrale Bedeutung zukommt.

Literatur

Allport, A. (1987). Selection for action: Some behavioral and neurophysiological considerations of attention and action. In H. Heuer & A. Sanders (Eds.), Perspectives on perception and action (pp. 409-434): Routledge.

Bartoshuk, L. M., Duffy, V. B., Fast, K., Green, B. G., Prutkin, J., & Snyder, D. J. (2003). Labeled scales (e.g., category, Likert, VAS) and invalid across-group comparisons: what we have learned from genetic variation in taste. Food Quality and Preference, 14(2), 125-138. doi: https://doi.org/10.1016/S0950-3293(02)00077-0

Beatty, J. (1982). Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. Psychological Bulletin, 91(2), 276-292. doi: 10.1037/0033-2909.91.2.276

Berlyne, D. (1960). Conflict, arousal and curiosity. New York: McGraw-Hill.

Borghini, G., Astolfi, L., Vecchiato, G., Mattia, D., & Babiloni, F. (2014). Measuring neuro-physiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness. Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 44, 58-75. doi: 10.1016/j. neubiorev.2012.10.003

Boucsein, W. (1992). Electrodermal activity. New York: Plenum Press.

Cohen, M. S., Kosslyn, S. M., Breiter, H. C., DiGirolamo, G. J., Thompson, W. L., Anderson, A. K., Belliveau, J. W. (1996). Changes in cortical activity during mental rotation - A mapping study using functional MRI. Brain, 119, 89-100. doi: 10.1093/brain/119.1.89

DIN EN ISO 10075-1. (2018). Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung - Teil 1: Allgemeine Aspekte und Konzepte und Begriffe.

Ferreira, Y., & Vogt, J. (2022). Psychische Belastung und deren Herausforderungen. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 76(2), 202-219. doi: 10.1007/s41449-021-00292-5

Fishburn, F. A., Norr, M. E., Medvedev, A. V., & Vaidya, C. J. (2014). Sensitivity of fNIRS to cognitive state and load. Frontiers in Human Neuroscience, 8. doi: 10.3389/fn-hum.2014.00076

Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), Human Mental Workload (pp. 139-183). Amsterdam et al.: North-Holland.

Johannsen, G. (1979). Workload and workload measurement. In N. Moray (Ed.), Mental Workload: Its Theory and Measurement (pp. 3-11). Boston, MA: Springer US.

Kahneman, D. (1973). Attention and effort. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.

Kahneman, D., Beatty, J., & Pollack, I. (1967). Perceptual deficit during a mental task. Science, 157(3785), 218-219. doi: 10.1126/science.157.3785.218

Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. Brain Research Reviews, 29(2-3), 169-195. doi: 10.1016/s0165-0173(98)00056-3

Lawless, H. T., Horne, J., & Spiers, W. (2000). Contrast and range effects for category, magnitude and labeled magnitude scales in judgements of sweetness intensity. Chemical Senses, 25(1), 85-92. doi: 10.1093/chemse/25.1.85

Lazarus, R. S. (1999). Stress and emotion: A new synthesis. New York: Springer.

Longo, L., Wickens, C. D., Hancock, P. A., & Hancock, G. M. (2022). Human mental workload: A survey and a novel inclusive definition. Frontiers in Psychology, 13. doi: 10.3389/fpsyg.2022.883321

Moray, N. (1967). Where is capacity limited? A survey and a model. Acta Psychologica, 27, 84-92.

Neumann, O. (1987). Beyond Capacity: A Functional View of Attention. In H. Heuer & A. Sanders (Eds.), Perspectives on perception and action (pp. 375-408): Routledge.

Petersen, S. E., & Posner, M. I. (2012). The attention system of the human brain: 20 years after. In S. E. Hyman (Ed.), Annual Review of Neuroscience, Vol 35 (Vol. 35, pp. 73-89).

Posner, M. I., & Boies, S. J. (1971). Components of attention. Psychological Review, 78(5), 391-407. doi: 10.1037/h0031333

Posner, M. I., & Snyder, C. R. R. (1975). Attention and cognitive control. In R. L. Solso (Ed.), Information Processing and Cognition: The Loyola Symposium (pp. 55-85): Lawrence Erlbaum.

Reid, G. B., & Nygren, T. E. (1988). The Subjective Workload Assessment Technique: A scaling procedure for measuring mental workload. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), Human Mental Workload (pp. 185-218). Amsterdam et al.: North-Holland.

Rohmert, W., & Rutenfranz, J. (1975). Arbeitswissenschaftliche Beurteilung der Belastung und Beanspruchung an unterschiedlichen industriellen Arbeitsplätzen: Der Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung.

Schwarz, N. (1999). Self-reports: How the questions shape the answers. American Psychologist, 54(2), 93-105.

Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information-processing: II. Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. Psychological Review, 84(2), 127-190. doi: 10.1037/0033-295x.84.2.127

Strauch, C., Wang, C. A., Einhäuser, W., van der Stigchel, S., & Naber, M. (2022). Pupillometry as an integrated readout of distinct attentional networks. Trends in Neurosciences, 45(8), 635-647. doi: 10.1016/j.tins.2022.05.003

Wickens, C. D. (2008). Multiple resources and mental workload. Human Factors, 50(3), 449-455. doi: 10.1518/001872008x288394

Wickens, C. D., Helton, W. S., Hollands, J. G., & Banbury, S. (2021). Engineering Psychology and Human Performance. Milton, UK: Taylor & Francis Group.

Yerkes, R. M., & Dodson, J. D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. Journal of comparative neurology and psychology, 18, 459-482.

16 Diskussionspunkte und Aussicht auf die quantitative Lärmwirkungsforschung

Jan Grenzebach

Gruppe 2.2 Physikalische Faktoren, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund

Der Hörsinn ist ein wichtiges Sinnesorgan im Arbeitskontext. Dieser erlaubt u. a. die Aufnahme von tätigkeitsbezogenen Informationen durch bspw. Sprachkommunikation mit Arbeitskollegen. Akustische Signale informieren auch über den derzeitigen Zustand von Maschinen und Geräten, die Menschen in ihrer Arbeit unterstützen. Bestimmte Geräusche oder Töne warnen vor (sich entwickelnden) Gefahren in der direkten Arbeitsumgebung. Die auditive Sinnesmodalität erlaubt damit die kontinuierliche Wahrnehmung von physischen Veränderungen aus der unmittelbaren (Arbeits-)Umgebung. Der Hörsinn ermöglicht es dabei auch, verdeckte Geräuschquellen zu lokalisieren. Daher ist der Hörsinn eine hilfreiche Informationsquelle, die notwendige Orientierung am Arbeitsplatz liefert. Aufgrund seiner Vulnerabilität und seiner permanenten Durchlässigkeit zum Bewusstsein, bedarf der Hörsinn besonderer Aufmerksamkeit und Schutz durch Arbeitgeber, regulierende Behörden und Beschäftigte selbst.

Der Hörsinn ist exponiert gegenüber unerwarteten und lauten Geräuschen mit einem hohen Schalldruckpegel. Dauerhafte akustische Belastungen, wie Lärm von Maschinen am Arbeitsplatz, können eine organische Schädigung des Gehörs bewirken. So kann das Gehör durch bspw. intensive Maschinengeräusche bleibend geschädigt werden, sodass das Hörvermögen zukünftig eingeschränkt wird. Eine dauerhafte Schädigung des Gehörs durch Lärm wird als aurale Auswirkung von Lärm beschrieben. Eine Vielzahl von Regelungen soll bereits heute präventiv das Gehör der Beschäftigten schützen (vgl. TRLV Lärm). Davon unterschieden werden extra-aurale Auswirkungen von Lärm (vgl. ASR 3.7), die sich mit solchen Geräuschkulissen befassen, die zwar keine organische Schädigung des Gehörs auslösen, wohl aber Stress hervorrufen und dadurch mittel- und längerfristige Gesundheitsgefährdungen verursachen können. Kurzfristig könnten solche Geräuschkulissen möglicherweise durch Beschäftigte selbst als harmlos beurteilt werden. Der hier vorgestellte Workshop befasste sich mit den extra-auralen Auswirkungen von Lärm auf die menschliche Psyche, seiner Messbarmachung und der generellen Messbarkeit von mentaler Beanspruchung in diesem besonderen Kontext. Angesichts des Wandels der Arbeit dominieren mentale Tätigkeiten mit kognitiven Aufgaben zunehmend den europäischen Arbeitsmarkt. Mentale Tätigkeiten sind besonders anfällig für Ablenkungen durch neue oder unvorhersehbare Reize in der Umgebung, die automatisch kognitiv bearbeitet werden. Störende Geräuschkulissen zeichnen sich teils auch durch ihre geringe Vorhersagbarkeit aus. Die Bewältigung von kognitiven Aufgaben am Arbeitsplatz wird in ruhigen oder selbstgestalteten Geräuschkulissen, als weniger beanspruchend empfunden. Zusätzlich bedingt die Art der Aufgabe (bspw. kreativ, analytisch, sprachlich, ...), wie eine Geräuschkulisse gestaltet sein muss, damit diese während der Bearbeitung als angenehm und unterstützend wahrgenommen wird.

Diese subjektive Einschätzung bedarf einer empirischen Unterfütterung durch objektive Messverfahren und deren Daten, die mögliche Risiken von nicht gehörschädigenden Geräuschsituationen vertieft untersucht. Die dazu potenziell geeigneten Verfahren waren Gegenstand des Workshops.

Durch den interdisziplinären Charakter des Workshops wurde ein intensiver Austausch zwischen den Teilnehmenden angeregt. Es ergaben sich fachliche Diskussionen zur Technik und

theoretische Erwägungen von Konzepten, die in der psychologischen Forschung eine Rolle spielen. Der Workshop hat durch die facettenreiche Darstellung von Messverfahren und den berücksichtigten Konzepten der Beanspruchung profitiert.

Aufgrund der Literatur und des berichteten Forschungsstandes für artverwandte Fragestellungen waren überwiegend neurophysiologische Verfahren, insbesondere das EEG, auf dem Workshop repräsentiert (Grenzebach & Romanus, 2022). Drei der Vortragenden befassen sich vornehmlich mit dem EEG in ihren Forschungsprojekten. Für das EEG ergaben sich daher Diskussionen hinsichtlich der Verwendbarkeit im Feld und seiner Störanfälligkeit gegenüber Messeinflüssen, die sich weder auf die Tätigkeit noch die Umgebungsfaktoren, also den Lärm, beziehen. In diesem Zusammenhang wurden auch innovative Analyseverfahren vorgestellt, die der Bereinigung des EEG-Signals von Artefakten dienen können. Dazu ist es insbesondere für das EEG-Signal, das in der natürlichen Umgebung gemessen wird, erforderlich, Anker- oder Referenz-Punkte (bspw. Blinzler oder kontrollierte Töne) zu evozieren, die nachvollziehbare Epochen im Signal bestimmen. Ähnliche Herausforderungen durch Artefakte wurden im Bereich der Pupillometrie für eine sich dynamisch verändernde Umgebungsbeleuchtung an realen Arbeitsplätzen identifiziert. Eine Messung außerhalb von Räumen mit regulierter Beleuchtung stellt sich dabei besonders schwierig dar.

Im Bereich der EEG- und pupillometrisch-gemessenen Höranstrengung ("listening effort") waren insbesondere schwer verständliche Sprachreize ein verwendeter Stimulus. Für den akustischen Arbeitsschutz spielt dieser Reiz eine hervorgehobene Rolle, da in vielen Arbeitsumgebungen nur bestimmte Anteile von Sprachreizen für den Empfänger relevant sind. Arbeitsplätze sind soziale Orte, die das Zusammenarbeiten von Personen, durch teils überlappende Sprachkommunikation, organisieren. Im Bereich der Höranstrengung wurde ebenso auf die beiden unterschiedlichen Konzepte der investierten ("invested listening effort") und der erfahrenen ("experienced listening effort") Höranstrengung aufmerksam gemacht, die im Bereich der Lärmwirkungsforschung Anwendung finden können. Für den Bereich des sozialen Lärms ("social noise") spielt die Verbindung von Aspekten der Tätigkeit (Aufgabenart) mit den Arbeitsumgebungsfaktoren (akustische Ergonomie) eine wichtige Rolle.

Das bislang nicht mobil einsetzbare Messverfahren MEG wurde hinsichtlich seiner Komplementarität zu Messungen des EEG bei der Aufklärung von neuronalen Strukturen in der Hörforschung besprochen. Die Beschränkung der Mobilität hat mit dazu geführt, die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) in diesem Workshop nicht zu berücksichtigen, da für dieses Verfahren noch zusätzlich Betriebsgeräusche des Messgeräts hätten berücksichtigt werden müssen. Es wurde aber die funktionelle Nahinfrarotspektroskopie (fNIRS) vorgestellt, die auf der Beobachtung desselben hämodynamischen Prozesses, wie das fMRT, basiert. Ebenso wurde das als mobiles Messverfahren etablierte fNIRS hinsichtlich seiner besonderen Sensitivität für präfrontale, kortikale Strukturen diskutiert, das als indirekter Marker für den erhöhten Energieverbrauch bei kognitiven Aufgaben in mentalen Tätigkeiten unter Lärm eine Rolle spielen kann. Die fNIRS wurde auch im Kontext von emotionalen Belastungen behandelt, wie sie auch in Tätigkeiten der kritischen Infrastruktur (bspw. in einer Leitzentrale zur Gefahrenabwehr) auftreten können. Ein verwandter, etablierter Stressor bezieht sich auf die sozial-evaluative Komponente von Anforderungen, wie sie etwa im "Trier Social Stress Test" untersucht werden (Kirschbaum, Pirke, Hellhammer, 2010). Es wurde im Austausch klar, dass die verglichenen Belastungen (u. a. kognitiv, emotional, sozial) sich hinsichtlich ihrer erwarteten Auswirkungen auf die menschliche Kognition insgesamt und das neuronale System im Speziellen auch grundsätzlich unterscheiden können. Ob Lärm eine dieser Dimensionen von Beanspruchung besonders aktiviert, konnte noch nicht abschließend geklärt werden (vgl. noise annoyance). Psychoendokrinologische Verfahren könnten auf diesem Gebiet einen

Beitrag leisten, auch wenn es Einschränkungen hinsichtlich der Messfrequenz und der Sensitivität gibt. Als weiteres Maß für die generelle Aktivierung (vgl. Arousal) des vegetativen Nervensystems wurde auch die Hautleitfähigkeit identifiziert, die hier im Kontext von komplexen, mentalen Arbeitsaufgaben (Geschäftsplananalyse) vorgestellt wurde. Wohlbefinden und Leistungsänderungen von Piloten im Flugbetrieb wurde u. a. im Zusammenhang mit der Blickbewegungsanalyse durch im Helm integrierte Kamerasysteme untersucht (vgl. mobiles eye-tracking). Es wurden dazu auch Erkenntnisse der adaptiven Beanspruchungsregulierung von Assistenzsystemen durch Blickbewegungs-Messung im Flugzeugcockpit vorgestellt.

Im Bereich der verwendeten (psychologischen) Ressourcenmodelle wurden verschiedene Ansätze vorgestellt und diskutiert. Es wurden dabei Konzepte wie die multiple ressource theory nach Wickens (2008), cognitive workload nach Mandrick et al. (2016) sowie selective attention nach Dehais et al. (2020) besprochen. Auch arbeitsschutzbezogene Modelle, wie das Belastungs-Beanspruchungskonzept nach Rohmert et al. (1975), wurden in diesem Kontext kontrovers diskutiert. Weitere Forschende verfolgen theoretische Konzepte wie Höranstrengung ("listening effort"). Generelle Beanspruchungen werden unter dem Konzept Stress oder Arousal nach Kahnemann (1973) zusammengefasst. Die Forschenden interessierten sich wechselseitig für die Korrelate dieser Konzepte, die Teilnehmer und Teilnehmerinnen vorstellten, und erläuterten Verbindungen zu den eigenen Messmethoden und Modellen. Es hat sich dabei gezeigt, dass sich der Kofferbegriff Anstrengung eignen kann, diese heterogenen Konzepte mentaler Ressourcennutzung zu überschreiben. Wenn überhaupt, können diese Anstrengungskonzepte durch die vorgestellten Messverfahren nur indirekt erhoben werden. Es bleibt in diesem Zusammenhang eine Herausforderung, die investierte Anstrengung auf bestimmte kognitive Prozesse, wie das Ignorieren von störenden Geräuschkulissen, zu attribuieren.

Es hat sich gezeigt, dass kein Messverfahren alle Anforderungen abdecken kann, die in der Erforschung der Lärmwirkung relevant sind, sondern nur durch die Kombination mehrerer Sensorkanäle eine datenbasierte Grundlage geschaffen werden kann. Diese Messkanäle, die Aspekte der neuronalen Aktivierung repräsentieren, können, in einem zweiten Schritt, in der Mustererkennung durch maschinelles Lernen (ML) in Zeitepochen unterschiedlicher Belastung unterteilt werden. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass man im Bereich der "ground truth" (Grundwahrheit, siehe KI) verschiedene Ansatzpunkte identifiziert hat, die sich auf die bisherige Forschung, also leistungs- und selbstauskunftsbezogene Datensätze von Lärmwirkung beziehen können. Es ist daher vielversprechend durch ein konkurrierendes Verfahren solche Algorithmen auszuwählen, die verschiedene Klassen in multidimensionalen Daten bestimmen können, die in diesem Zusammenhang gemessen werden. Dazu wurden auf dem Workshop auch Konfigurationen von neuronalen Netzen diskutiert, die sich insbesondere für Zeitreihen eignen, wie sie in multimodalen, körpernahen Messsystemen anfallen. Inwieweit die automatisierte Messung und Beurteilung der empfundenen Störhaftigkeit von Geräuschkulissen durch KI ("machine listening models", "noise annyance evaluation model") Gefährdungsbeurteilungen vereinfachen kann, ist Gegenstand zukünftiger Untersuchungen (Grenzebach & Brockt, 2023).

Die im Workshop vorgestellten Verfahren wurden im Hinblick auf ihre potenzielle Eignung für die Forschungsfrage im Februar 2023 mit der Forschungs-Begleitgruppe in der BAuA Dortmund reflektiert. Im Ergebnis der Diskussionen im und nach dem Workshop wurden als besonders vielversprechende Verfahren EEG, EKG und EDA als Verbundsystem ausgewählt. Für diese Empfehlung wurden Informationsquellen, wie der Workshop, halb-strukturierte Interviews mit Forschenden in deren Labors und die systematische Literaturanalyse (Grenzebach & Romanus, 2022), herangezogen. Die Verfahren der Psychoendokrinologie wurden in diesem Rahmen ebenfalls als für die Forschungsfrage aufschlussreich eingeschätzt und

sollen in zukünftigen Experimenten, für länger anhaltende Belastungen, näher untersucht werden. Der Autor dankt der Forschungs-Begleitgruppe für die Diskussion der Verfahren und die beratende Unterstützung des Forschungsprojekts.

In einem nächsten Schritt des Forschungsprojekts F2439 sollen die drei Verfahren EEG, EKG und EDA hinsichtlich ihrer u. a. Sensitivität und Praktikabilität, auch im ML-basierten Verbundsystem, in einem Pilot-Experiment näher untersucht werden (Grenzebach & Radüntz, 2023). Die Messverfahren sollen dann in weiteren Studien im Reallabor der BAuA in Dortmund mit einem hybriden Ansatz in virtueller Realität (VR) genutzt werden (Grenzebach, Radüntz, Obleser & Wöstmann, 2023). Dabei wird die audiovisuelle Immersion, die durch arbeitsplatznahe Geräuschkulissen in VR ausgelöst werden kann, hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Wahrnehmung evaluiert werden. Es sollen dabei be- und entlastende Faktoren identifiziert werden.

Durch Studien in synthetischen Geräuschkulissen, die in VR präsentiert werden, gewinnt man Kontrolle über die zeitliche und räumliche Komposition von Schallquellen in Hintergrundgeräuschen. In Zukunft werden zunehmend Algorithmen zur Identifizierung von Schallquellen in realen Geräuschkulissen Arbeitnehmer und Arbeitnehmerinnen darin unterstützen können, nur denjenigen Anteil der Geräuschquellen zu hören, der in der jeweiligen Situation relevant ist (vgl. Hearables). Arbeitgeber sind verpflichtet technische und organisatorische Maßnahmen zu ergreifen, um Beschäftigte vor den Auswirkungen (u. a. empfundener Stress) von unerwünschtem, nicht gehörschädigenden Schall zu schützen (vgl. ASR 3.7). Dabei darf als letztes Mittel in Ausnahmefällen und vorübergehend auch auf persönliche Schutzausrüstung zurückgegriffen werden. Der Störanteil der Geräuschkulisse selbst könnte in Zukunft durch aktive Geräuschunterdrückung (vgl. noise control) mit Methoden des maschinellen Lernens identifiziert und gelöscht werden können. Dazu sind jedoch weitere Forschungsanstrengungen im Bereich der psychoakustischen Forschung und der Mustererkennung in komplexen, natürlichen Geräuschkulissen durch Unterstützungssysteme notwendig (Grenzebach & Brockt, 2023).

Literatur

Dehais, F., Lafont, A., Roy, R., & Fairclough, S. (2020). A neuroergonomics approach to mental workload, engagement and human performance. Frontiers in neuroscience, 14, 268.

Grenzebach, J., & Brockt, G., (2023). Research proposal: Psychoacoustic Modeling of Noise Annoyance in the Workplace - Application of Machine Learning. In Proceedings of the ICBEN Congress on Noise as a Public Health Problem 2023, Belgrade/Serbia

Grenzebach, J., & Romanus, E. (2022). Quantifying the Effect of Noise on Cognitive Processes: A Review of Psychophysiological Correlates of Workload. Noise and Health, 24(115), 199.

Grenzebach, J., & Radüntz, T., (2023). Audio-Visual Induced Mental Workload: A Feasibility Study with Digitally Composed Disruptive Soundscapes and Electroencephalography. In Proceedings of the Forum Acusticum Conference 2023, Torino/Italy

Grenzebach, J., & Radüntz, T., (2023). Soundscape Immersion in Virtual Reality and Living Lab: Comparison of Neuronal Activity under Exposure to Noise and Task-Induced Mental Workload. In Proceedings of the HCI INTERNATIONAL 2023, 25th International Conference on Human-Computer Interaction, Copenhagen/Denmark

Grenzebach, J., Radüntz, T., Obleser, J., & Wöstmann, M. (2023). Give me a break! Designing future VR scenarios for acoustically demanding work environments. In Proceedings of the Audictive Conference 2023 (DFG SPP2236), Aachen/Germany

Kahneman, D. (1973). Attention and effort (Vol. 1063, pp. 218-226). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Kirschbaum, C., Pirke, K. M., & Hellhammer, D. H. (2010). Trier social stress test. Neuropsychobiology.

Mandrick, K., Chua, Z., Causse, M., Perrey, S., & Dehais, F. (2016). Why a comprehensive understanding of mental workload through the measurement of neurovascular coupling is a key issue for neuroergonomics?. Frontiers in human neuroscience, 10, 250.

Mandrick, K., Peysakhovich, V., Rémy, F., Lepron, E., & Causse, M. (2016). Neural and psychophysiological correlates of human performance under stress and high mental workload. Biological psychology, 121, 62-73.

Rohmert, W., & Luczak, H. (1975). Factor analysis of an inventory about subjective health status, strain and job satisfaction of clerks in travelling mail service. International Archives of Occupational and Environmental Health, 36, 105-118.

Lärm, T. R. L. V. (2017). Technische Regeln zur Lärm-und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung. Beuth, Berlin.

Wickens, C. D. (2008). Multiple resources and mental workload. Human factors, 50(3), 449-455.

