Untersuchung der Chronometrie auditiver kognitiver Prozesse mittels Augenbewegungen

Widmann, A.[1], Bendixen, A.[2], Wetzel, N.[1], Duwe, S.[1], Engbert, R.[3] und Schröger, E.[1]

[1] *Kognitive und Biologische Psychologie, Universität Leipzig, E-Mail: widmann@uni-leipzig.de*
[2] *Department für Psychologie, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg*
[3] *Experimentelle und Biologische Psychologie, Universität Potsdam*

Einleitung

Mikrosakkaden sind schnelle, kleine Augenbewegungen, die während Fixationsperioden ca. 1–2 mal pro Sekunde auftreten. Sie dienen unter anderem der Kontrolle der Fixationsposition sowie der Vermeidung von Wahrnehmungseinschränkungen durch sensorische Adaptation [1]. Das Auftreten und die Richtung von Mikrosakkaden wird dabei durch kognitive Prozesse beeinflusst [2]. Visuelle *wie auch auditive* Ereignisse führen zu einer vorübergehenden Inhibition von Mikrosakkaden, meist gefolgt von einem vorübergehenden Anstieg der Häufigkeit von Mikrosakkaden [3].

Im Oddballparadigma werden seltene abweichende Reize (sog. „Oddballs“) zufällig zwischen häufigen gleichartigen Reizen präsentiert. Soll auf die seltenen abweichenden Reize reagiert werden, führt dies zu einer anhaltenden Inhibition von Mikrosakkaden, sowohl im visuellen [4] als auch im audio-visuellen und auditiven Oddballparadigma [5]. Mit dem Dreiton-Oddballparadigma – neben seltenen Zielreiztönen werden auch seltene Nicht-Zielreiztöne präsentiert – konnte gezeigt werden, dass die beobachtete anhaltende Inhibition nicht durch die Seltenheit, sondern durch die Zielreizeigenschaft der Töne verursacht wird [6,7]. Eine Kategorisierung in Zielreiz- und Nicht-Zielreiztöne ist bereits 80–100 ms nach Tonbeginn verfügbar [7] (vgl. Abb. 1; unter Berücksichtigung der Verzögerung von einer Stimulation des Sakkadensystems bis zur tatsächlichen Ausführung der Sakkade von 20 ms). Dies ist wesentlich früher als aufgrund elektrophysiologischer Befunde (N2-Komponente) erwartet.

Als Erklärung dieser Befunde wurde vorgeschlagen [7], dass die Inhibition von Mikrosakkaden die Bindung von Aufmerksamkeitsressourcen widerspiegelt. Selektive Aufmerksamkeit auf die auditive Modalität führt dabei zu einer Inhibition von Mikrosakkaden für alle Töne zu Tonbeginn. Nach Kategorisierung der Nicht-Zielreize können Aufmerksamkeitsressourcen freigegeben werden, was sich in einem Anstieg der Häufigkeit von Mikrosakkaden widerspiegelt, während die Zielreize weiterer Verarbeitung bedürfen und Aufmerksamkeitsressourcen erst nach Abschluss der Aufgabenverarbeitung freigegeben werden.

Die beiden hier vorgestellten Experimente haben zum Ziel, diese Hypothese zu prüfen. Falls die Bindung von Aufmerksamkeitsressourcen ursächlich für die Inhibition von (Mikro-) Sakkaden ist, sollte diese auch im Fall der unwillkürlichen Distraktion von Aufmerksamkeit zu beobachten sein. Dazu haben wir (Mikro-) Sakkadenraten sowohl im aktiven Distraktionsparadigma [8] als auch im passivem Oddballparadigma mit neuartigen Tönen (Novels) gemessen.

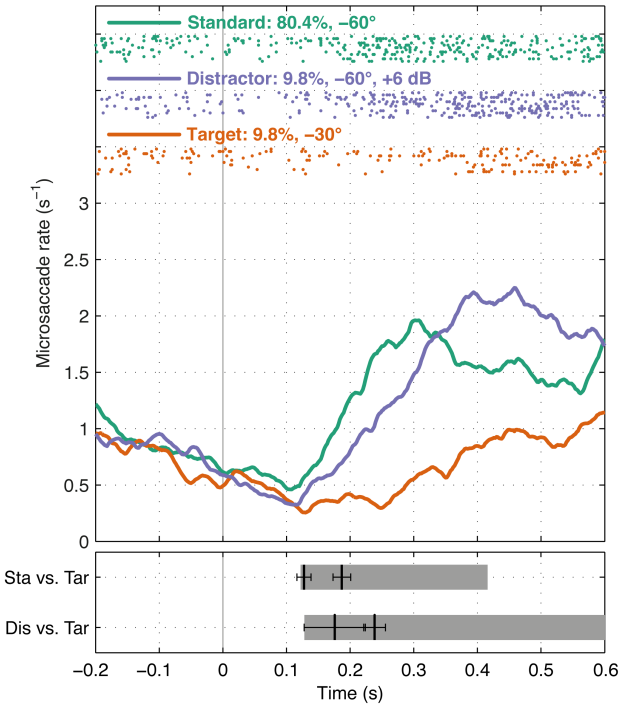

Abbildung 1: Mikrosakkadenraten im Dreiton-Oddballparadigma [7]. Die Mikrosakkadenraten unterscheiden sich 122 ms (Standard vs. Zielreiz) bzw. 128 ms nach Tonbeginn (Standard vs. Distraktor) signifikant voneinander. Die Rastergrafik illustriert die akkumulierten Mikrosakkaden von 25 zufällig ausgewählten Trials je Versuchsperson (1 Punkt je Sakkade und 1 Versuchsperson je Zeile).

Experiment 1: Methoden und Ergebnisse

In einem auditiven Distraktionsparadigma wurden kurze (100 ms; Nogo) und lange Töne (200 ms; Go) mit gleicher Häufigkeit in zufälliger Reihenfolge über Kopfhörer präsentiert. Die Versuchspersonen sollten einen Fixationspunkt fixieren, die Töne hinsichtlich ihrer Dauer unterscheiden und bei Auftreten eines langen Tones eine Taste drücken. In 80% der Durchgänge wurden Sinustöne mit einer Frequenz von 600 Hz präsentiert (Standard). In 20% der Durchgänge wurden Sinustöne mit einer Frequenz von 660 Hz präsentiert (Deviant). Die Versuchspersonen sollten die Änderung der Tonhöhe ignorieren. Die Deviantdurchgänge wurden pseudo-zufällig ausgewählt. Zwischen zwei Deviants wurden mindestens zwei Standards präsentiert.

Bei 20 Versuchspersonen wurden Reaktionszeiten, EEG und Augenbewegungen gemessen. Das EEG wurde nach Vorverarbeitung und Artefaktausschluss in Epochen von 800 ms Dauer segmentiert und für jede Versuchsperson pro Stimulustyp zu ereigniskorrelierten Potentialen (EKPs) gemittelt. In den Augenbewegungsdaten wurden mit dem in [1] be-

schriebenen Algorithmus Sakkaden detektiert; Segmente mit Sakkadenamplituden > 100' wurden von der Auswertung ausgeschlossen. Die Anzahl an Sakkaden wurden je Messzeitpunkt, Versuchsperson und Stimulustyp aufsummiert und normalisiert.

Signifikante Unterschiede zwischen Bedingungen wurden jeweils mit cluster-basierten Permutationstests bestimmt. Der Beginn von Bereichen mit signifikanten Unterschieden wurde zusätzlich mit der Jackknifing-Methode (JK) mit 20% und 50% relativen Gipfelamplitudenkriterien bestimmt.

Die Reaktionszeit auf Standard-Go-Töne betrug 451 ms (98,6% korrekt), auf Deviant-Go-Töne 499 ms (96,0% korrekt). Die Reaktionszeiten und Trefferraten waren jeweils signifikant verschieden.

Die Sakkadenraten zwischen Standard-Nogo-und Standard-Go-Tönen waren in einem Cluster von 212 bis 522 ms (20% JK: 239 ms; 50% JK: 269 ms) signifikant voneinander verschieden. Die Sakkadenraten zwischen Deviant-Nogo- und Deviant-Go-Tönen waren in einem Cluster von 248 bis 552 ms (20% JK: 275 ms; 50% JK: 322 ms) signifikant voneinander verschieden. Die Sakkadenraten zwischen Standard- und Devianttönen (gemittelt über Go/Nogo) waren in einem Cluster von 138 bis 284 ms (20% JK: 145 ms; 50% JK: 177 ms) signifikant voneinander verschieden.

Die SCD-transformierten EKPs zwischen Standards und Deviants (gemittelt über Go/Nogo; P3a-Zeitbereich) waren in einem Cluster von 238 bis 312 ms (20% JK: 208 ms; 50% JK: 224 ms) signifikant voneinander verschieden. Der Beginn des Standard-Deviant-Unterschiedes war sowohl für das 20%- als auch das 50%-Jackknifing-Kriterium in den Sakkadenraten jeweils signifikant früher als in den EKPs.

Experiment 2: Methoden und Ergebnisse

In einem passiven Oddballparadigma wurde den Versuchspersonen in zufälliger Reihenfolge häufig (80%) ein Standardgeräusch (Glocke) oder selten (20%) ein neuartiges Geräusch (Novel) über zwei Lautsprecher präsentiert. Die Tondauer betrug 200 ms, das Interstimulusintervall 800 ms. Die Lautstärke aller Töne war RMS-normalisiert. Zwischen zwei Noveltönen wurden mindestens zwei Standardtöne präsentiert. Jeder der 120 Noveltöne wurde während des Experiments zweimal präsentiert. Die Versuchspersonen betrachteten vier 5-minütige tonlose Videosequenzen und sollten die Töne ignorieren. Da keine Fixationsaufgabe vorlag, wurden in Experiment 2 auch Sakkaden > 100' ausgewertet. Darüber hinaus waren die Methoden der EEG- und Augenbewegungsmessung bzw. -auswertung identisch zu Experiment 1.

Die Sakkadenraten zwischen Standard- und Noveltönen waren in einem Cluster von 78 bis 178 ms (20% JK: 64 ms; 50% JK: 100 ms) signifikant voneinander verschieden.

Die SCD-transformierten EKPs zwischen Standards und Deviants waren in einem Cluster von 162 bis 306 ms (20% JK: 161 ms; 50% JK: 175 ms) signifikant voneinander verschieden. Der Beginn des Standard-Novel-Unterschiedes war sowohl für das 20%- als auch das 50%-Jackknifing-Kriterium in den Sakkadenraten jeweils signifikant früher als in den EKPs.

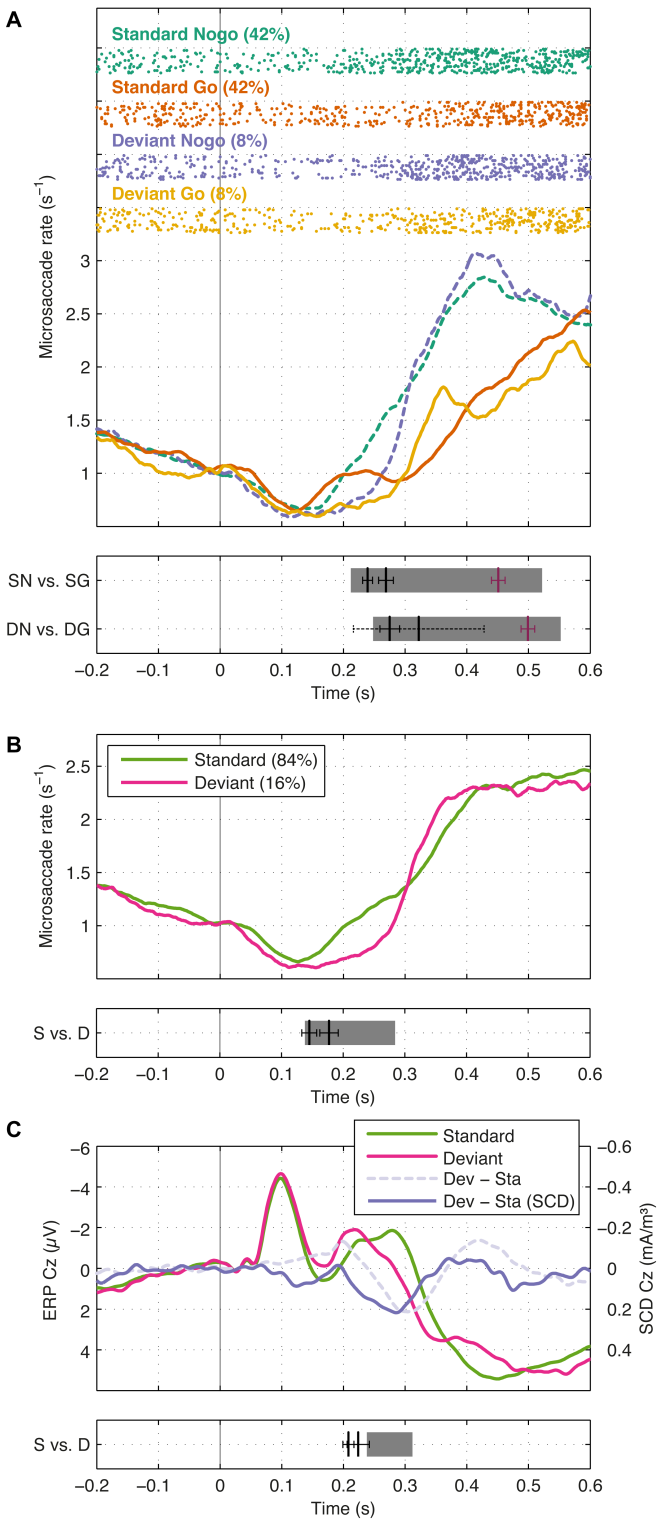

Abbildung 2: Mikrosakkadenraten und EKPs in Antwort auf Go- und Nogotöne bzw. Standards und Deviants in Experiment 1. Mit dargestellt sind jeweils die Cluster, in denen ein signifikanter Bedingungsunterschied beobachtet wurde (graue Balken) sowie die Latenz des 20% bzw. 50% relativen Jackknifing-Kriteriums (mit Standardfehler).

Diskussion

In zwei Experimenten wurde die Hypothese geprüft, ob auditive Distraktion zu einer Inhibition von Mikrosakkaden (Exp. 1) bzw. Sakkaden (Exp. 2) führt. Im auditiven Distraktionsparadigma konnte sowohl eine anhaltende Inhibition von Mikrosakkaden für Go- im Vergleich zu Nogo-Stimuli

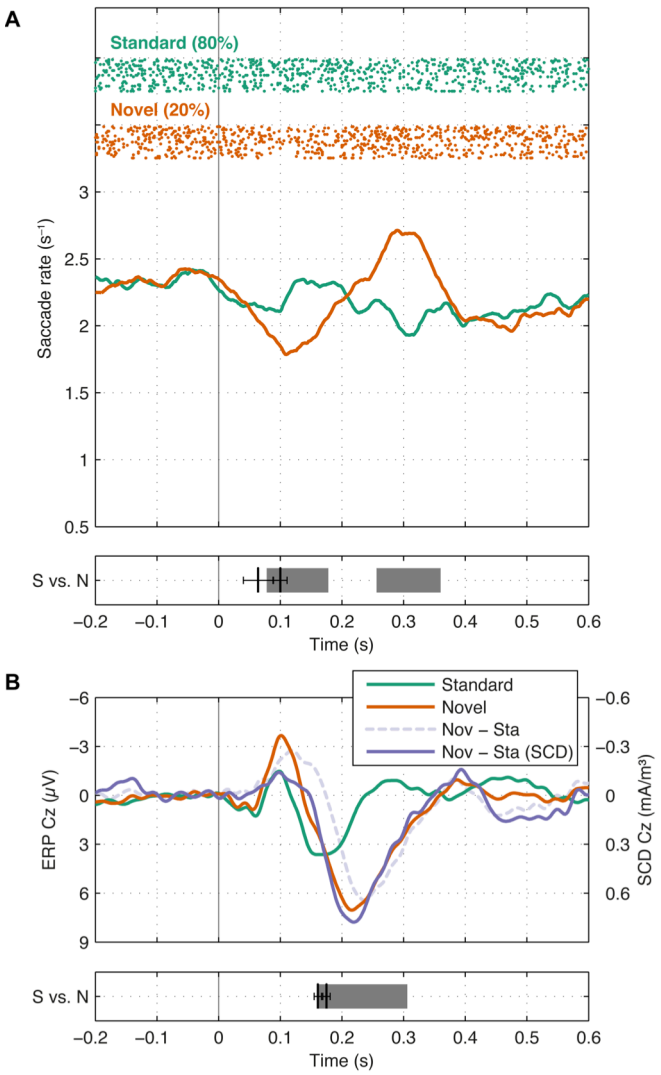

Abbildung 3: Sakkadenraten und EKPs in Antwort auf Standard- und Noveltöne in Experiment 2.

als auch eine zusätzliche vorübergehende Inhibition von Mikrosakkaden für Deviant- im Vergleich zu Standardstimuli beobachtet werden. Seltene neuartige Töne im passiven Oddballparadigma während der Betrachtung eines Videos führten ebenfalls zu einer vorübergehenden Inhibition von Sakkaden.

Unwillkürliche auditive Aufmerksamkeitsablenkung (Distraktion) führt also zu einer Inhibition von Mikrosakkaden bzw. Sakkaden. Dieser Befund stärkt die Hypothese [7], dass die Inhibition von (Mikro-) Sakkaden bzw. der ihr folgende Anstieg die Bindung bzw. Freigabe von Aufmerksamkeitsressourcen widerspiegelt.

Bei der Beurteilung des Zeitverlaufs der beobachteten Effekte in den Sakkadenraten muss die Verzögerung von der Stimulation bzw. Aktivierung der zentralen Strukturen des Sakkadensystems im superioren Colliculus bis zur tatsächlichen Ausführung der Sakkade von 20 ms beachtet werden. Der Befund einer schnellen Kategorisierung von Go- und Nogostimuli in [7] konnte repliziert werden. Die Töne konnten bereits ca. 90–110 ms nach Ende der kurzen Töne – also bereits zum Ende der langen Töne – hinsichtlich ihrer Dauer kategorisiert werden.

Die transienten Sakkadeninhibitionseffekte 140–150 ms nach Auftreten eines abweichenden (Exp. 1) bzw. 60–80 ms nach Auftreten eines neuartigen Tones (Exp. 2) deuten ebenfalls auf die schnelle Detektion von Abweichungen wie auch insbesondere die schnelle Ablenkung von Aufmerksamkeit hin. Die beobachteten Sakkadeninhibitionseffekte treten über 100 ms früher auf als die P3a-Komponente des EKP, von der bisher angenommen wurde, dass sie erst die Aufmerksamkeitsablenkung widerspiegelt [8]. Die Befunde sind Sakkadeninhibitionseffekten in Morphologie und Latenz ähnlich, die auf periphere Blitzreize hin auftreten [9]. Ob ein funktionaler Zusammenhang besteht, bedarf weiterer Forschung, da Tonreize in diesen Experimenten bisher nicht zu Sakkadeninhibitionseffekten führten.

Die Messung von Augenbewegung stellt ein vielversprechendes Werkzeug zur Untersuchung (der Chronometrie) auditiver kognitiver Prozesse dar. Von besonderer Relevanz ist der Befund, dass die Prozesse der Kategorisierung von Tönen und der auditiven Aufmerksamkeitsablenkung schneller abzulaufen scheinen als auf Basis vergleichbarer elektrophysiologischer Daten erwartet. Die Bindung bzw. Freigabe von Aufmerksamkeitsressourcen scheint eine zentrale Rolle bei der Inhibition von Sakkaden zu spielen.

Literatur

[1] Engbert, R. & Mergenthaler, K.: Microsaccades are triggered by low retinal image slip. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 103 (2006), 7192–7197

[2] Engbert, R.: Microsaccades: a microcosm for research on oculomotor control, attention, and visual perception. Progress in Brain Research 154 (2006), 177–192

[3] Rolfs, M., Kliegl, R. & Engbert, R.: Toward a model of microsaccade generation: the case of microsaccadic inhibition. Journal of Vision 8 (2008), 5.1–5.23

[4] Valsecchi, M., Betta, E. & Turatto, M.: Visual oddballs induce prolonged microsaccadic inhibition. Experimental Brain Research 177 (2007), 196–208

[5] Valsecchi, M. & Turatto, M.: Microsaccadic responses in a bimodal oddball task. Psychological Research 73 (2009), 23–33

[6] Yuval-Greenberg, S. & Deouell, L.Y.: Scalp-recorded induced gamma-band responses to auditory stimulation and its correlations with saccadic muscle-activity. Brain Topography 24 (2011), 30–39

[7] Widmann, A., Engbert, R. & Schröger, E.: Microsaccadic responses indicate fast categorization of sounds: a novel approach to study auditory cognition. Journal of Neuroscience 34 (2014), 11152–11158

[8] Schröger, E. & Wolff, C.: Behavioral and electrophysiological effects of task-irrelevant sound change: a new distraction paradigm. Brain Research 7 (1998), 71–87

[9] Reingold, E.M. & Stampe, D.M.: Saccadic inhibition in voluntary and reflexive saccades. Journal of Cognitive Neuroscience, 14 (2002), 371–388