

Einfluss verschiedener Belastungssituationen auf die EEG-Aktivität

Effects of Different Training Loads and Environmental Conditions on EEG Activity

Zusammenfassung

- ▶ **Im Laufe der letzten Jahre** hat das Interesse der Sportmedizin an der Quantifizierung der Gehirnfunktion während und nach Ausdauerbelastungen zugenommen. Die mittels Elektroenzephalographie (EEG) gewonnenen Befunde zur Dosis-Wirkungs-Beziehung wurden bisher noch nicht zusammenhängend interpretiert.
- ▶ **Dementsprechend war das Ziel** des vorliegenden Reviews die Diskussion der Wirkung ausgewählter Belastungsnormative und Umgebungsbedingungen auf die zentralnervale Aktivität. Die dargestellte Studienlage bestätigt diesbezüglich, dass die Belastungssituation im Ausdauersport die EEG-Aktivität maßgeblich beeinflusst. In den einzelnen Frequenzbändern zeigten sich dabei zwischen Nachbelastungsbefunden und EEG-Daten während Belastung teilweise unterschiedliche Reaktionen. Bei kontinuierlicher Aufzeichnung des EEGs manifestierten sich mit erhöhter Kadenz, Intensität und Belastungsdauer meist frequenzband- und regionsübergreifend Zunahmen der spektralen Leistungsdichte, während spezifische topographische Unterschiede eher bei Ruhedaten nachweisbar waren.
- ▶ **Im Gegensatz zu den Wirkungen** der Belastungsnormative lagen bezüglich der Effekte der Umgebungsbedingungen auf die EEG-Aktivität nur wenige, teils inkonsistente Ergebnisse vor. Eine Zunahme der EEG-Leistung während einer Ausdauerbelastung unter Hitze- oder Sauerstoffmangelbedingungen wurde dennoch von einigen Autoren bestätigt.
- ▶ **Insgesamt unterstützt der derzeitige Forschungsstand** die Beobachtung, dass speziell die Alpha- und Beta-Aktivität regionsübergreifend ansteigt, wenn die Beanspruchung verschiedener Teilsysteme des Organismus erhöht wird. Somit führt die Veränderung der Belastungsnormative und der Umgebungssituation nicht nur zu akuten Anpassungen des Herz-Kreislauf-Systems und der Muskulatur, sondern auch der kortikalen Aktivität. Dies könnte eventuell für eine gezielte Provokation chronischer Adaptationen auf zentralnervaler Ebene von entscheidender Bedeutung sein.

SCHLÜSSELWÖRTER:

Hirnaktivität, EEG, Ausdauerbelastung, Hypoxie, Hyperthermie

Einleitung

Trainingsbelastungen lösen komplexe organismische Reaktionen aus und beanspruchen unterschiedliche Funktionssysteme. Diesbezüglich existieren bereits umfassende Kenntnisse zur trainingsbedingten Umstellung und Anpassung des Herz-Kreislauf- und Atem-Systems sowie des Ener-

Summary

- ▶ **Interest in the quantification of brain cortical activity** during and after endurance exercise has increased in sports medicine within the past few years. However, the findings have not yet been combined in a literature review.
- ▶ **Therefore, the present review** investigates how the quantification of loads and environmental conditions influence brain cortical activity. Depending on the time of the recordings (either during or after exercise) different reactions of EEG frequency bands were observed in the available studies. Whereas recordings during motion confirmed increases of power spectral density across regions and frequency bands with progressing exercise intensity, cadence and duration; specific topographic differences were observable in EEG after exercise.
- ▶ **The current state of research** provides inconsistent findings regarding the influence of environmental conditions on brain cortical activity. Nevertheless, some previous trials confirmed increases of EEG spectral power during exercise under hypoxia or hyperthermia.
- ▶ **In summary, the available studies** indicate a rise in EEG alpha and beta activity, when exercise-related stress increases in different functional systems of the organism. Apart from acute cardiovascular and muscular adaptations, changes of the training load and environmental conditions therefore lead to alterations of brain cortical activity. Gained insights on the dose-response-relationship might be relevant for the elicitation of chronic adaptations of brain function.

KEY WORDS:

Brain Cortical Activity, EEG, Endurance Exercise, Hypoxia, Hyperthermia

giestoffwechsels. Im Gegensatz dazu liegen deutlich weniger Befunde zur Aktivität des Gehirns während definierter sportlicher Akutbelastungen vor. In diesem Zusammenhang ist es von großer Bedeutung zu analysieren, welche Reserven auf zentralnervaler Ebene vor allem für den Hochleistungssportler >

ÜBERSICHT

ACCEPTED: April 2015

PUBLISHED ONLINE: May 2015

DOI: 10.5960/dzsm.2015.177

Ludyga S, Hottenrott K, Gronwald T. Einfluss verschiedener Belastungssituationen auf die EEG-Aktivität. Dtsch Z Sportmed. 2015; 66: 113-120.

1. UNIVERSITÄT BASEL, *Departement für Sport, Bewegung und Gesundheit, Basel, Schweiz*
2. MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT HALLE-WITTENBERG, *Institut für Leistungsdiagnostik und Gesundheitsförderung, Halle-Wittenberg*
3. MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT HALLE-WITTENBERG, *Department Sportwissenschaft, Halle-Wittenberg*
4. OTTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITÄT MAGDEBURG, *Institut für Sportwissenschaft, Magdeburg*



QR-Code scannen und Artikel online lesen.

KORRESPONDENZADRESSE:

Dr. Sebastian Ludyga
Universität Basel,
Departement für Sport,
Bewegung und Gesundheit
Gellerstr. 156, 4052 Basel, Schweiz
✉ : sebastian.ludyga@unibas.ch

bestehen und ob auch hier akute Anpassungsvorgänge im Bezug zur Trainingsbelastung zu erwarten sind.

Die technische Weiterentwicklung der Elektroenzephalografie (EEG), vor allem in Form von aktiven und abgeschirmten Elektroden, macht es möglich, den kortikalen Aktivierungszustand bei standardisierter Bewegungsausführung auch während sportlicher Akutbelastung zu erfassen. Abgesehen von einer guten zeitlichen Auflösung liegt der Vorteil des EEGs gegenüber bildgebenden Verfahren also darin, dass die Bewegung der Probanden nicht stark eingeschränkt werden muss. Dennoch wurde die EEG-Aktivität bei einem Großteil der bislang durchgeführten Studien nur vor und nach spezifischen sportlichen Belastungen aufgezeichnet. Frühere Nachbelastungsstudien waren dabei vornehmlich auf die Untersuchung der Aktivität im Alpha-Frequenzbereich begrenzt und kamen auch aufgrund geringer Fallzahlen zu inkonsistenten Ergebnissen. Trotz dieser Heterogenität konnten Crabbe und Dishman (13) anhand einer Meta-Analyse zeigen, dass sportliche Belastungen einen Effekt auf die EEG-Aktivität haben. Seitdem hat sich die Anzahl der EEG-Studien im Kontext sportlicher Belastung stetig erhöht. Mittlerweile liegen nun einige Befunde vor, die die funktionelle Adaptabilität des Gehirns, ausgelöst durch verschiedene Belastungsnormative und Umgebungsbedingungen, zeigen. Dabei wurden sowohl Nachbelastungsdaten als auch kontinuierlich während der Belastung registrierte EEG-Daten berücksichtigt. Bis dato ist noch keine Synthese der durch beide Methoden gewonnenen Erkenntnisse erfolgt, obwohl dies für die Charakterisierung der Dosis-Wirkungs-Beziehung erforderlich ist.

Das vorliegende Review gibt einen Überblick über bisherige EEG-Untersuchungen während und nach akuter Ausdauerbelastung. Dabei wird vor allem der Einfluss ausgewählter Belastungsnormative (Intensität, Dauer und Trittfrequenz) und Umgebungsbedingungen (Hypoxie und Hyperthermie) auf die EEG-Aktivität reflektiert.

Material und Methode

Über MEDLINE/Pubmed, Scopus, SPONET und Google Scholar wurden Studien zum Thema kortikale Aktivität während Ausdauerbelastungen gesucht. Unter Berücksichtigung der Schlüsselbegriffe „brain cortical activity“ bzw. „zentralnervale und kortikale Aktivität“, „EEG“ und „endurance exercise“ bzw. „Ausdauerbelastung“ ergab die Suche insgesamt 117 Treffer. Für die Berücksichtigung der Untersuchungen im Review mussten folgende Kriterien erfüllt sein: Untersuchungen an gesunden Probanden, Aufzeichnung des EEGs während und/oder nach einer Ausdauerbelastung, Erkenntnisse zum Einfluss der Belastungssituation auf die EEG-Aktivität. Diese Bedingungen erfüllten insgesamt 24 Studien, die Aussagen zur Wirkung der Intensität (n=10), Dauer (n=4), Bewegungsfrequenz (n=3) sowie der Umgebungstemperatur (n=4) und -luft (n=3) ermöglichten. Trotz der strukturierten Literaturrecherche stellt die vorliegende Arbeit kein systematisches Review dar, da einige Studien mit EEG-Nachbelastungsbefunden aufgrund starker methodischer Limitationen und anderweitiger Fragestellungen nicht berücksichtigt wurden.

Belastungsnormative

Belastungsintensität

Der Einfluss der Belastungsintensität auf die EEG-Aktivität wurde vorwiegend durch Stufenprotokolle mit einem Inkrement von 50 W alle zwei (2,3) bzw. fünf Minuten (9) untersucht. Bei Bailey et al. (2) führte die Leistungssteigerung von 150 bis

200 W bei einem untrainierten Probandenkollektiv zu einem Anstieg der EEG-Leistung in allen untersuchten Frequenzbändern (Alpha-1, Alpha-2, Beta-1, Beta-2 und Theta) und Arealen (frontal, zentral und parietal). Ab einer Belastungsintensität von 150 W, die ca. 60% der VO_{2max} entsprach, fiel die Theta-Aktivität regionsübergreifend bis zum Abbruch des Tests wieder ab. Bei der Ausbelastung war frontal, zentral und parietal ein gesteigertes Alpha/Beta-Verhältnis nachweisbar, was laut den Autoren die Erschöpfung widerspiegelte. In einer weiteren Untersuchung mit identischem Studiendesign zeigten Bailey et al. (3) einen Zusammenhang zwischen dem RPE-Wert (Rating of Perceived Effort) und der EEG-Leistung im Delta-Frequenzband. Topographische Unterschiede der EEG-Aktivität mit zunehmender Belastung waren nicht zu beobachten. Im Gegensatz dazu wiesen Brümmer et al. (9) mittels algorithmusbasierter Quellenlokalisation (sLORETA) regionale Unterschiede während eines Stufentests nach. Konkret stieg die kortikale Aktivität im primären motorischen Kortex mit zunehmender Belastung an, während keine Veränderungen im primären sensorischen und präfrontalen Kortex nachweisbar waren. Die Autoren führten dies darauf zurück, dass die Probanden vor der Untersuchung aufgrund einer Bewegungsvorstellung bereits über eine erhöhte sensorische Aktivierung verfügten.

Um den Einfluss der Belastungsintensität auf die EEG-Aktivität unabhängig von der vorausgehenden Belastungsdauer und der damit einhergehenden Ermüdung zu untersuchen, ließen Hall, Martin, Bailey, Miller und Folger (20) gesunde Probanden fünfminütige Stufenbelastungen bei 50, 100, 150 und 200 W in zufälliger Reihenfolge absolvieren. Sie konnten zeigen, dass zwischen der Belastungsvorgabe und der EEG-Aktivität ein Zusammenhang besteht. Die spektrale Leistungsdichte nahm in allen untersuchten Frequenzbändern (Alpha-1, Alpha-2, Beta-1 und Beta-2) frontal, zentral und parietal mit der Intensität zu. Diese Ergebnisse sind konform mit denen einer früheren Untersuchung von Mechau et al. (29), die bei aufsteigendem und absteigendem Widerstand einen intensitätsabhängigen Verlauf der EEG-Aktivität in allen Frequenzbereichen erfassten. Die größten Belastungseffekte auf die spektrale Leistungsdichte waren diesbezüglich im Delta-, Beta-2- und Theta-Frequenzband zu finden. Dies führten die Autoren auf erhöhte kardiovaskuläre und respiratorische Anforderungen zurück, die auf kortikaler Ebene zu einem verschlechterten Allgemeinzustand führen.

In einer eigenen Untersuchung konnte die Wirkung der Belastungsintensität auf die Hirnfunktion mittels eines Intervallprotokolls nachgewiesen werden (17). Im Vergleich zur Belastung mit 100 W war bei 60-sekündigen Intervallen bei ca. 340 W eine Zunahme der spektralen Leistungsdichte im Alpha-2- und Beta-1-Frequenzband nachweisbar. Weitere Erkenntnisse zur Dosis-Wirkungs-Beziehung liefern Schneider et al. (41), die bei 2-minütigen Belastungsintervallen von 1 bis 5 W/kg Körpergewicht den Zusammenhang zwischen der Aktivität des motorischen Kortex und der Muskulatur untersuchten. Mit zunehmender Intensität stiegen sowohl die Muskelaktivität als auch die kortikale Leistungsdichte, so dass sich die Korrelation zwischen beiden Parametern ebenfalls erhöhte. Die Autoren nehmen diesbezüglich an, dass ein höherer Leistungsoutput bei gleichzeitig fortschreitender Ermüdung die Rekrutierung zusätzlicher Alpha-Motoneuronen und Pyramidalneuronen im Motorkortex erfordert.

In einer weiteren Studie von Schneider et al. (40) wurde der Einfluss einer niedrigen, von dem Probanden bevorzugten und hohen Belastungsintensität während eines Ausdauerlaufs auf die kortikale Aktivierung überprüft. Die niedrige Belastungs-

Tabelle 1

Übersicht der Studien zum Einfluss der Intensität einer Ausdauerbelastung auf die EEG-Aktivität. BA=Brodmann Area; CCD=Cortical Current Density; IMP=Impedanz; P_{max} =maximale Leistung; PSD=Power Spectral Density; sLORETA=Standardized Low Resolution Brain Electromagnetic Tomography; SR=Sampling Rate; VO_{2max} =maximale Sauerstoffaufnahme; ↑=Anstieg; →=keine Veränderung; ↓=Abfall.

AUTOR	JAHR	PROBANDEN	METHODIK	BELASTUNG	ERGEBNIS
Gronwald et al.	2015	N: 16 m Alter: 26 J VO_{2max} : 54 ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹	32 Elektroden SR: 512 Hz IMP: <10 KΩ EEG: Belastung; Augen geöffnet	3 x 5 x 60 s 340 W/60 s 100 W	PSD (340 vs 100 W): ↑ Beta-1 ↑ Alpha-2 → Theta → Alpha-1 → Beta-2
Guimaraes et al.	2015	N: 10 m Alter: 24 J	20 Elektroden sLORETA SR: 240 Hz EEG: Ruhe	submax., max. und supra-max. Intensität (randomisiert)	PSD (vorher vs nachher): ↑ Alpha-2 (BA 27; max. Intensität) ↑ Beta-1, Beta-2 (BA 19; max. Intensität)
Schneider et al.	2013	N: 3 m, 5 w Alter: 24 J	32 Elektroden sLORETA EEG: Bewegung	1, 2, 3, 4 + 5 W/kg über je 2 min	CCD (5 vs 1 W/kg): ↑ Motorischer Kortex
Brümmer et al.	2011a	N: 8 m, 4 w Alter: 26 J VO_{2max} : 47 ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹	19 Elektroden sLORETA IMP: <10 KΩ SR: 256 Hz EEG: Ruhe; Augen geschlossen	30 min bei jeweils 50 und 80% VO_{2max} (Radergometer, Laufband)	PSD (nachher vs vorher; 50 % VO_{2max}): ↑ Alpha (parietal) ↑ Beta (Rad, parietal) PSD (nachher vs vorher; 80 % VO_{2max}): ↓ Alpha (Laufband, frontal) ↓ Beta (Laufband, frontal)
Brümmer et al.	2011b	N: 15 m, 11 w Alter: 26 J	32 Elektroden sLORETA IMP: <10 KΩ SR: 500 Hz EEG: Ruhe & Bewegung; Augen geschlossen	50 W + 50 W / 5 min	CCD (Inkrement): ↑ Primär motorischer Kortex → Primär sensorischer Kortex → Präfrontaler Kortex
Schneider et al.	2009	N: 15 m, 9 w Alter: 30 J VO_{2max} : 45 ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹	19 Elektroden SR: 256 Hz EEG: Ruhe	Ausdauerlauf bei bevorzugter Intensität, 50 % und 80 % VO_{2max} (randomisiert)	PSD (nachher vs vorher): ↑ Beta-2 ↑ Alpha-1 (50 % VO_{2max} ; frontal) → Beta-1 → Alpha-1 → Theta
Bailey et al.	2008	N: 20 m Alter: 24 J VO_{2max} : 40 ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹	8 Elektroden (F3, F4, F7, F8, C3, C4, P3, P4) IMP: <5 KΩ SR: 512 Hz EEG: Bewegung; Augen offen	50 W + 50 W / 2 min	PSD (Inkrement): ↑ Alpha ↑ Beta ↑ Theta (bis 150 W)
Hall et al.	2006	N: 30 m Alter: 23 J	8 Elektroden (F3, F4, F7, F8, C3, C4, P3, P4) IMP: <5 KΩ SR: 512 Hz EEG: Bewegung; Augen offen	50, 100, 150 + 200 W über je 5 min (randomisiert)	PSD (Inkrement): ↑ Alpha-1, Alpha-2 ↑ Beta-1, Beta-2
Bailey et al.	2005	N: 20 m Alter: 24 J VO_{2max} : 40 ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹	8 Elektroden (F3, F4, F7, F8, C3, C4, P3, P4) IMP: <5 KΩ SR: 512 Hz EEG: Bewegung; Augen offen	50 W + 50 W / 2 min	PSD (Inkrement): ↑ Delta
Mechau et al.	1998	N: 12 m Alter: 24 J	17 Elektroden SR: 512 Hz IMP: <10 KΩ EEG: Ruhe	50 W + 30 bis 40 W / 6 min; P_{max} - 30 bis 40 W / 6 min	PSD (Inkrement): ↑ Beta-1, Beta-2 (frontal) ↑ Alpha-1 (frontal) ↑ Theta (temporal) ↓ Alpha-2 (zentral)

intensität führte im Vergleich zum Ausgangsniveau zu einem Anstieg der Alpha-1-Aktivität (überwiegend frontal), während sich nach der bevorzugten und hohen Belastungsintensität regionsübergreifend eine verringerte Beta-2-Aktivität manifestierte. Die erhöhte Alpha-Aktivität stand dabei mit einer verstärkten Wahrnehmung des körperlichen Zustands im Zusammenhang, während eine Reduktion der Beta-Aktivität mit einer gesteigerten Wahrnehmung der psychischen Belastung und des motivationalen Zustands einherging. Mit einem ähnlichen Testdesign wiesen auch Guimaraes et al. (19) nach, dass höhere Belastungsintensitäten zu Störungen der Stimmungslage und Veränderungen der kortikalen Aktivität führen. Nach maximaler Anstrengung konnten die Autoren im parahippocampalen Kortex, der eng mit dem Belohnungssystem des Gehirns in Verbindung steht, einen Anstieg der Alpha- und Beta-Aktivität beobachten.

Auch Brümmer et al. (8) beobachteten nach einer moderaten, 30-minütigen Dauerbelastung (50 % VO_{2max}) einen Anstieg der parietalen Alpha-Aktivität. Bei einer höheren Intensität (80 % VO_{2max}) war hingegen nach dem gleichen Belastungszeitraum eine Reduktion der Alpha- und Beta-Aktivität, vornehmlich im frontalen Kortex, nachweisbar.

Zusammengefasst bestätigt die aktuelle Studienlage einen Effekt der Belastungsintensität auf die EEG-Aktivität (Tab. 1). Allerdings liegt aufgrund der unterschiedlichen Belastungsprotokolle und der differenzierten methodischen Umsetzung bisher kein Konsens bezüglich des Verhaltens der einzelnen Frequenzbänder und Regionen vor. Bei Erfassung des EEGs während der Bewegung erhöhte sich in den meisten Studien die Aktivität in Abhängigkeit von der Intensität frequenzband- und regionsübergreifend. Im Gegensatz dazu stehen die

Tabelle 2

Übersicht der Studien zum Einfluss der Dauer einer Ausdauerbelastung auf die EEG-Aktivität. FAS=Frontale Asymmetrie; IMP=Impedanz; PIANS=Leistung an der individuellen anaeroben Schwelle; Pmax=maximale Leistung; PSD=Power Spectral Density; LPS=Lagged Phase Synchronization; sLORETA=Standardized Low Resolution Brain Electromagnetic Tomography; SR=Sampling Rate; VO_{2max} =maximale Sauerstoffaufnahme; ↑=Anstieg; →=keine Veränderung; ∩=umgekehrt U-förmiger Verlauf.

AUTOR	JAHR	PROBANDEN	METHODIK	BELASTUNG	ERGEBNIS
Hottenrott et al.	2013	N: 16 m Alter: 26 J VO_{2max} : 54 ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹	32 Elektroden SR: 512 Hz IMP: <10 KΩ EEG: Belastung; geöffnete Augen	60 min bei 90 % PIANS; Wechsel der Kadenz nach jeweils 10 min (90-120-60-120-60-90 U/min)	PSD (über Zeit): ∩ Theta, Alpha, Beta
Hilty et al.	2011	N: 17 m Alter: 26 J VO_{2max} : 59 ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹	128 Elektroden sLORETA SR: 500 Hz IMP: <30 KΩ EEG: Belastung	60 % VO_{2max} bis zur Erschöpfung	LPS (Ende vs Beginn): ↑ Alpha/Mu (insulärer und motorischer Kortex) PSD (Beginn vs Ende): → Alpha/Mu
Fumoto et al.	2010	N: 9 m, 1 w Alter: 32 J	2 Elektroden (Cz; Pz) SR: 200 Hz EEG: Belastung	15 min bei RPE 12-13	PSD (über Zeit): ↑ Alpha-2 (15 min; Cz & Pz) ↑ Alpha-1 (10 min) ↓ Beta (15 min; Pz) → Theta
Woo et al.	2009	N: 16 w Alter: 21 J VO_{2max} : 36 ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹	2 Elektroden (F3; F4) SR: 512 Hz IMP: <5 KΩ EEG: Ruhe	15, 30 und 45 min bei 60 % VO_{2max}	FAS (über Zeit): ∩ Theta, Alpha, Beta PSD (über Zeit): ∩ Delta, Theta, Alpha

Ergebnisse von Schneider et al. (40) und Brümmer et al. (8), die bei einer Registrierung des EEGs in Bewegungspausen einen abfallenden Verlauf der Beta-Aktivität bei höheren Intensitäten feststellten. Einige wenige Studien beschreiben den Verlauf des Delta- und Theta-Frequenzbandes während der Belastung, welche aufgrund der hohen Artefaktanfälligkeit in Frage gestellt werden müssen. Zudem ist eine differenzierte Betrachtung der unterschiedlichen Frequenzbereiche hinsichtlich variierender Funktionszustände des ZNS und speziell der Großhirnrinde noch nicht möglich.

Der Einfluss der Belastungsintensität auf die kortikale Aktivierung ist auf verschiedene komplexe Vorgänge im Gehirn zurückzuführen, die für eine genaue Charakterisierung der zugrundeliegenden Prozesse noch nicht ausreichend erforscht sind. Mittels bildgebender Verfahren wurde gezeigt, dass Veränderungen der kortikalen Aktivität u.a. eng im Zusammenhang mit der zerebralen Durchblutung stehen (43). Diese steigt schließlich überregional (21,25), wenn die Belastungsintensität erhöht wird. Weiterhin gehen Youngstedt et al. (46) davon aus, dass die Veränderung der kortikalen Aktivität während einer Ausdauerbelastung auf einer Störung der Überleitung und/oder einem Informationsüberfluss der somatosensorischen, afferenten Bahnen zurückzuführen ist. Somit nimmt womöglich mit der Belastungsintensität auch das zu verarbeitende Feedback aus der Peripherie zu. Gleichermaßen passen sich Feedforward-Mechanismen an, so dass zusätzliche motorische Einheiten für die Bewältigung der Belastung angesprochen werden (40).

Belastungsdauer

Obwohl der Einfluss der Belastungsdauer auf die EEG-Aktivität nicht gänzlich unabhängig von der Intensität betrachtet werden kann, beobachteten verschiedene Autorenkollektive spezifische Veränderungen mit der Länge des Belastungszeitraums (Tab. 2). Diesbezüglich stellten Woo et al. (45) anhand von Nachbelastungsdaten einen umgekehrt U-förmiger Verlauf der frontalen EEG-Asymmetrie und der spektralen Leistungsdichte im Delta-, Theta- und Alpha-Frequenzband über die Belastungszeiträume (15, 30 und 45 min) dar. In der Phase des Hochplateaus (30 min) bewerteten die Probanden ihren Elan („vigor“) am höchsten.

Dies deckt sich mit der Annahme von Beyer und Schumann (4), dass über den Belastungszeitraum des Plateaus die Phase der optimalen Leistungsfähigkeit vorliegt. In eigenen Studien (23,18) wurde nachgewiesen, dass sich die Leistungsdichte im Gesamtspektrum bei konstanter Belastungsintensität über den Zeitraum während der Belastung umgekehrt U-förmig entwickelt. Der frequenzbandübergreifende Abfall der spektralen Leistungsdichte im EEG zum Ende der Belastung wurde dabei als Symptom der psycho-physischen Ermüdung interpretiert

Fumoto et al. (16) untersuchten ebenfalls den Effekt der Belastungsdauer auf die EEG-Aktivität. Dazu wurde das EEG während des Pedalierens bei 1, 5, 10 und 15 min aufgezeichnet. Die Autoren konnten daraufhin parietal und zentral einen Haupteffekt der Belastungsdauer auf die Aktivität in allen analysierten Frequenzbändern nachweisen (Theta, Alpha-1, Alpha-2 und Beta). Gegenüber der ersten Belastungsminute war zum Ende des Tests in beiden untersuchten Regionen eine höhere Alpha-1- (10 min) und Alpha-2-Aktivität (15 min) und niedrigere Beta-Aktivität (15 min) nachweisbar. Das Autorenkollektiv assoziierte die Veränderungen der zentralnervalen Aktivität mit der Aktivierung des 5-HT-Systems (Hydroxytryptamine), da die Konzentration von 5-HT nach der Belastung gegenüber dem Ruhenniveau deutlich erhöht war. Laut Newsholme (30) wird die erhöhte Aktivität des serotonergen Systems durch eine gesteigerte Expression des 5-HT von Tryptophan in Verbindung mit einer verstärkten Wahrnehmung der Ermüdung gebracht. Dies steht teilweise im Widerspruch zur Zunahme der Wachsamkeit, die Fumoto et al. (16) aus der erhöhten Alpha-2-Aktivität schlussfolgerten. Des Weiteren war im Gegensatz zu Hottenrott et al. (23) und Gronwald et al. (18) kein umgekehrt U-förmiger Verlauf der spektralen EEG-Leistung im Alpha- und Beta-Band zu beobachten, was womöglich auf eine deutlich geringere Belastungszeit und -intensität zurückzuführen ist.

Eine aktuelle Studie von Hilty et al. (22) bestätigt auch einen Einfluss der Belastungsdauer auf die intrakortikale Kommunikation. Vom Beginn bis zum Ende einer Belastung bei 60% der VO_{2max} erhöhte sich neben der Alpha- und Beta-Aktivität die Phasensynchronisation zwischen dem insulären und dem motorischen Kortex. Daraus schlussfolgerten die Autoren, dass bei verstärkter Beanspruchung über den Belastungszeitraum der

Tabelle 3

Einfluss von Intensität, Belastungsdauer, Kadenz und Umgebungstemperatur auf die EEG-Aktivität in verschiedenen Frequenzbereichen. Einige Studien weichen geringfügig von den definierten Frequenzbereichen ab. Die Lokalisation der Veränderungen der EEG-Aktivität sind nur begrenzt aussagekräftig, da in einigen Untersuchungen ausschließlich bestimmte Regionen überprüft wurden. ↑=Anstieg; ↓=Abfall; →=keine Veränderung; ∩=umgekehrt U-förmiger Verlauf; BA=Brodman Area.

	INTENSITÄT (HOCH VS NIEDRIG)	BELASTUNGSDAUER (VERLAUF)	KADENZ (HOCH VS NIEDRIG)	TEMPERATUR (HOCH VS NORMAL)
Theta 4-7,5 Hz	↑ gesamtkortikal (n=1), temporal (n=1) → n=2	∩ gesamtkortikal (n=1), frontal (n=1) → n=2	↑ n=1	
Alpha 7,5-12,5 Hz	↑ gesamtkortikal (n=1), parietal (n=1) ↓ frontal (n=1)	∩ gesamtkortikal (n=1), frontal (n=1) → n=1	↑ gesamtkortikal (n=2) → n=1	→ n=3
Alpha-1 7,5-10 Hz	↑ frontal (n=2), gesamtkortikal (n=1) → n=2	↑ zentral und parietal (n=1)	↑ gesamtkortikal (n=1)	
Alpha-2 10-12,5 Hz	↑ gesamtkortikal (n=2), BA 27 (n=1) ↓ zentral (n=1)	↑ zentral und parietal (n=1)	↑ gesamtkortikal (n=1)	
Beta 12,5-32 Hz	↑ gesamtkortikal (n=1), parietal (n=1) ↓ frontal (n=1)	∩ gesamtkortikal (n=1) ↓ frontal (n=1)	↑ gesamtkortikal (n=1)	∩ frontal (n=1) ↓ frontal (n=2), gesamtkortikal (n=1)
Beta-1 12,5-18 Hz	↑ gesamtkortikal (n=2), frontal (n=1), BA 19 (n=1) → n=1		↑ gesamtkortikal (n=1)	
Beta-2 18-32 Hz	↑ gesamtkortikal (n=2), BA 19 (n=1) → n=1		↑ n=1	

insuläre Kortex, der an der Evaluation von schmerzassoziierten Stimuli beteiligt ist, zunehmenden Einfluss auf den motorischen Kortex ausübt. Dementsprechend könnte die verstärkte Wahrnehmung von Schmerzen (z.B. in der Muskulatur) nach einer langanhaltenden Belastung zu einer Down-Regulierung der motorischen Impulse führen, so dass der Belastungsabbruch einer akuten Überlastung vorbeugt.

Für eine Charakterisierung des Verlaufs der EEG-Leistung über den Zeitraum einer Ausdauerbelastung sind weitere Studien zwingend notwendig, da die bisher geringe Anzahl keine gesicherten Aussagen zulässt. Mit einer Ausnahme bestätigen die wenigen Befunde jedoch überwiegend einheitlich einen umgekehrt U-förmigen Verlauf der spektralen Leistungsdichte und frontalen Asymmetrie (Tab. 3). Dieser spezifische Trend ähnelt stark dem Verlauf der zerebralen Sauerstoffversorgung während einer Ausdauerbelastung (6,37,44). Demnach sind Veränderungen der EEG-Leistung unter anderem auf eine dauerhafte Beanspruchung des zerebralen Metabolismus mit den zur Verfügung stehenden Energielieferanten (Sauerstoff, Glukose, Laktat) zurückzuführen (43). Der ermüdungsbedingte Abfall der kortikalen Aktivität zum Ende des Tests könnte dabei auf der Reduktion der zerebralen metabolischen Rate (Sauerstoffaufnahme/Glukoseaufnahme + Laktataufnahme) beruhen. Schließlich sinkt bei höherer Belastungsintensität die Sauerstoffaufnahme im Gehirn, so dass eine verstärkte Nutzung von Glukose und Laktat als Energiequellen erforderlich ist (14).

Trittfrequenz

Schumann und Seibt untersuchten 1993 (42) erstmalig den Einfluss der Kadenz auf die EEG-Aktivität während einer fahrradergometrischen Belastung. Dazu absolvierten Radsportler und Untrainierte 3-minütige Belastungsstufen mit 60 und 100 U/min jeweils bei einer aeroben Beanspruchungsintensität von 2 mmol/l und aerob-anaeroben Intensität von 6 mmol/l Laktat. Bei der aeroben und anaeroben Belastung konnten die Autoren einen gesamtkortikalen Anstieg der Alpha-1-Aktivität nachweisen, der erwartungsgemäß bei einer Kadenz von 100 U/min am höchsten ausgeprägt war. Brach (7) versuchte diesen Befund später mit einem identischen Studiendesign zu replizieren. In seiner Untersuchung war jedoch kein Einfluss der Trittfrequenz auf die EEG-Aktivität nachweisbar, da die Alpha-Aktivität bei allen Belastungsformen und in allen Regionen weitestgehend unter dem Ruhenniveau blieb. Im Gegensatz dazu wurde in einer

eigenen aktuellen Studie ein stark positiver Zusammenhang zwischen der EEG-Aktivität und der Kadenz bestätigt (23). Bei einer Dauerbelastung mit konstanter Gestaltung des Widerstands führte die Erhöhung der Trittfrequenz von 60 auf 120 U/min gleichzeitig zu einer regionsübergreifenden Steigerung der spektralen Leistungsdichte im Alpha-2- und Beta-2-Frequenzband. Umgekehrt führte die Reduktion der Kadenz von 120 auf 60 U/min in allen analysierten Frequenzbereichen (Theta, Alpha-1, Alpha-2, Beta-1 und Beta-2) gesamtkortikal zu einer geringeren EEG-Leistung. Die Autoren erklärten dies mit einer gesteigerten psychophysischen Beanspruchung, die mit einer hohen Kadenz einhergeht.

Zur Dosis-Wirkungs-Beziehung der Kadenz und der kortikalen Aktivität liegen derzeit nur wenige Befunde vor. Die Ergebnisse deuten jedoch darauf hin, dass sich mit der Bewegungsfrequenz auch die EEG-Aktivität in mehreren Frequenzbereichen gesamtkortikal erhöht (Tab. 3). Laut Christensen et al. (11) hat afferentes Feedback von den Extremitäten bei Belastung einen wesentlichen Anteil am Anstieg der kortikalen Aktivierung. Eine Steigerung der Bewegungsfrequenz stellt somit zusätzliche Anforderungen an die intramuskuläre Koordination, da der Wechsel von Flexion zu Extension und umgekehrt pro Zeiteinheit schneller erfolgen muss. Nachweislich ist die kortikale Aktivität an diesem fließenden Übergang am höchsten (24). Dies beruht womöglich auf einer schnelleren Verarbeitungsgeschwindigkeit von Feedback- und Feedforward-Mechanismen, die notwendig ist, um die hohe Bewegungsfrequenz aufrecht zu erhalten. Somit erklärt sich der Effekt der Kadenz auf die EEG-Aktivität zumindest teilweise durch ein verändertes zentralnervales Anforderungsprofil der Weitergabe von Impulsen an die arbeitende Muskulatur und der daraus resultierenden Rückkopplung.

Umgebungsbedingungen

Temperatur

Während einer Belastung beeinflusst die Temperatur die Beanspruchung verschiedener Funktionssysteme des Organismus. Folglich stellt sich die Frage, welche Reaktion die Hirnfunktion auf die veränderte Umgebungstemperatur zeigt. Unter dieser Fragestellung wurden Experimentalstudien durchgeführt, bei denen gesunde Probanden bei einer konstanten Belastungsintensität von 60% der VO_{2max} jeweils bei 22 und 35 °C (15) ➤

bzw. 18 und 40 °C (32) über eine Stunde pedalierten, sofern die Erschöpfung nicht schon vorher eintrat. Während des Belastungszeitraums stieg der frontale Alpha-/Beta-Index bis zur Erschöpfung bei normaler und erhöhter Umgebungstemperatur an (15). Dies konnte in der Studie von Nybo und Nielsen (32) nur für die Belastung während 40 °C nachgewiesen werden. Die Begründung dafür liegt in der Tatsache, dass die Probanden lediglich bei einer hohen Umgebungstemperatur den Zustand der Erschöpfung erreichten. In beiden Untersuchungen ging der erhöhte Alpha-/Beta-Index, der nur frontal erfasst wurde, auf eine verminderte Beta-Aktivität mit fortschreitender Ermüdung zurück. Auch Kacem et al. (26) konnten bei einer Ergometerbelastung mit hoher Intensität (100% $\text{VO}_{2\text{max}}$) bei 22 und 35 °C eine Verringerung des Alpha-/Beta-Index unmittelbar vor der Erschöpfung nachweisen. Zwischen den unterschiedlichen Temperaturbedingungen waren im nur frontal registrierten EEG allerdings keine Unterschiede nachweisbar. De Pauw et al. (36) beobachteten während einer längeren Ausdauerbelastung bei einer Umgebungstemperatur von 30 °C auf dem Fahrradergometer unter Verwendung einer Quellenlokalisierung regionsübergreifend ein Absinken der EEG-Aktivität im Beta-Frequenzband. Von den Autoren wurde dies als Abnahme der psychophysischen Erregung interpretiert. Dieser Ansatz wird durch den von Ftaiti et al. (15) beobachteten Anstieg der Alpha-Aktivität unterstützt, da eine niedrigere Beta-Leistung und eine höhere Alpha-Aktivität nach der klassischen Auffassung für einen niedrigeren kortikalen Aktivierungszustand stehen (5). Bei Nybo und Nielsen (32) war hingegen keine Veränderung der EEG-Aktivität im Alpha-Frequenzband nachweisbar.

Die aktuelle Studienlage ist inkonsistent und bestätigt nicht in jedem Fall einen Einfluss der Temperatur auf die kortikale Aktivität während sportlicher Akutbelastung (Tab. 3). Dies beruht womöglich auch darauf, dass sich die wenigen Untersuchungen fast ausschließlich auf die Erfassung der frontalen EEG-Aktivität über nur eine Elektrode beschränken. Dennoch könnte die von einigen Autoren beobachtete Zunahme des frontalen Alpha-/Beta-Index auf spezifische Veränderungen des zerebralen Metabolismus hinweisen. Körperliche Belastungen bei hoher Umgebungstemperatur führen zu einem Anstieg der Temperatur im arteriellen Blut und zu einer Reduktion des zerebralen Blutflusses (31). Dies wiederum löst eine Akkumulation der Wärmespeicherung im Gehirn aus. Der Belastungsabbruch erfolgt daraufhin bei der Überschreitung einer kritischen Innentemperatur (12), weil die thermische Überlastung des Gehirns die motorische Aktivität beeinträchtigt (33). Der erhöhte frontale Alpha-/Beta-Index könnte dementsprechend auf einer reduzierten Aktivität verschiedener neuronaler Schaltkreise beruhen, denen aufgrund der veränderten zerebralen Stoffwechsellage keine ausreichenden Energiequellen zur Verfügung stehen (43).

Sauerstoffmangelbedingungen

In den letzten Jahrzehnten wurde eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt, um den Einfluss von hypoxischen Zuständen auf die kortikale Aktivierung unter Ruhebedingungen und mit Hilfe von Provokationsmethoden zu analysieren. Unabhängig von der Expositionsdauer zeigte sich studienübergreifend eine Reduktion der Alpha-Aktivität und ein Anstieg der EEG-Leistung in den langsamen Frequenzbereichen (Delta, Theta), was als Hemm- und Kompensationsmechanismen des Gehirns unter Sauerstoffmangelbedingungen interpretiert wurde (1,27,34,47). Im Gegensatz dazu beobachteten einige Autoren neben dem Auftreten langsamer Wellen eine Zunahme der Alpha- (35,38) und/oder der Beta-1-Aktivität (39).

Nur in wenigen Studien wurde der Einfluss hypoxischer Bedingungen auf die kortikale Aktivität mittels standardisierter Belastungsvorgaben untersucht. Lehnert (28) analysierte zwei Sportler nach einem Kreistraining (12 Stationen) unter Sauerstoffmangelbedingungen (reine Stickstoffatmung). Innerhalb kurzer Zeit kam es zu einer massiven Verlangsamung der elektrischen Abläufe im EEG und frontal wurde das Auftreten von 7-s-Wellen (Theta) beobachtet. Im weiteren Verlauf traten in der gleichen Region außerdem 3,5-s-Wellen (Delta) auf. An Langstreckenläufern untersuchte Buhl (10) die Auswirkung eines 15-minütigen Dauerlaufs auf das Nachbelastungs-EEG im Alpha-Frequenzbereich in verschiedenen Höhen (0-7000 m) bei abnehmender Geschwindigkeit. Zwischen 2000 und 4000 m war eine Stabilität der EEG-Aktivität des Alpha-Bereichs im präzentralen und okzipitalen Kortexareal gegeben, ab 4000 m sank die Aktivität ab. Der Autor schlussfolgerte, dass koordinative und integrierende Funktionen bei Belastung in mittleren Höhen nicht eingeschränkt sind, während Störungen der zentralnervalen Koordination hinsichtlich der motorischen Anforderungen ab Höhen von 4000 m auftreten.

Im Gegensatz zur Sauerstoffversorgung des Kortex liegen bezogen auf die EEG-Aktivität während einer sportlichen Akutbelastung unter hypoxischen Bedingungen nur eigene Erkenntnisse vor (18). In unserer Studie führten 12 leistungsstarke Radsportler eine Dauerbelastung an der individuellen anaeroben Schwelle jeweils unter normalen Sauerstoffbedingungen (FiO_2 : 20,9%) und unter normobar hypoxischen Umgebungsbedingungen (FiO_2 : 15%) in einer Höhenkammer durch. Die Probanden wurden unter Hypoxie bis zur Erschöpfung belastet. Beim Zeitpunkt des Abbruchs unter Hypoxie zeigte sich im Vergleich zur Belastung unter normalen Sauerstoffbedingungen gesamtkortikal eine höhere spektrale Leistungsdichte im Beta-1-, Beta-2- und Gesamt-Spektrum. Vor dem Belastungsabbruch war unter Hypoxie zudem regionsübergreifend eine höhere EEG-Leistung in mehreren Frequenzbändern (Alpha-1-, Beta-1- und Beta-2) zu verzeichnen. Neben den kardiopulmonalen und metabolischen Mechanismen sowie dem subjektiven Beanspruchungsempfinden wird demzufolge auch die EEG-Aktivität maßgeblich durch veränderte Sauerstoffbedingungen beeinflusst. Eine Differenzierung dieser Ergebnisse im Bezug zum Einfluss der Belastungsintensität lässt sich aufgrund der defizitären Studienlage nicht anbringen. Sauerstoffmangel in mittleren Höhen hat im Bezug zur Belastungsdauer vermutlich den annähernd gleichen Einfluss wie die Steigerung der Belastungsintensität unter Normal-Null-Bedingungen.

Schlussfolgerung

Die mittels EEG quantifizierte kortikale Aktivität wird während und nach einer Ausdauerbelastung nicht nur durch die Intensität, Dauer und Bewegungsfrequenz beeinflusst. Sie reagiert schließlich auch auf die Veränderung der Umgebungsbedingungen äußerst sensibel. Regionsübergreifende, größere Anstiege der EEG-Leistung – speziell im Alpha- und/oder Beta-Frequenzband – gegenüber dem Ruhezustand sind dabei insbesondere bei Belastungssituationen zu erwarten, die mit einer höheren kardiovaskulären und/oder muskulären Beanspruchung einhergehen. Bei einer länger andauernden Belastung sind mit fortschreitender Ermüdung hingegen Reduktionen der spektralen Leistungsdichte in diesen Frequenzbändern nachweisbar. Diese Veränderungen der EEG-Aktivität waren in den meisten Studien nicht nach Regionen zu differenzieren. Die gewonnenen Erkenntnisse zur Dosis-Wirkungs-Beziehung können genutzt werden, um über eine spezifische Gestaltung

der Belastungsvorgaben akute und eventuell sogar langfristig anhaltende Adaptationen der Hirnfunktion zu provozieren. Für die Erforschung der zugrundeliegenden Mechanismen der Veränderung der kortikalen Aktivität unter Ausdauerbelastungen werden weitere Studien empfohlen. Zukünftige Untersuchungen sollten vor allem weiterführende topografische Analysemethoden verwenden, damit die Veränderungen der EEG-Aktivität innerhalb verschiedener Regionen besser diffe-

renziert werden können. Außerdem sind möglichst einheitliche Methoden in der Erhebung und Auswertung der EEG-Daten zugunsten einer besseren Vergleichbarkeit zwischen den Studien anzustreben. ■

Angaben zu finanziellen Interessen und Beziehungen, wie Patente, Honorare oder Unterstützung durch Firmen:

Keine

Literatur

- (1) **ALEKSANDROV MV, IVANOV AO, KOSEKOV NI, LUTSYK MA.** Effects of hypoxic hypoxia on the spontaneous electrical activity of the human brain. *Hum Physiol.* 2001;6:58-62.
- (2) **BAILEY SP, HALL EE, FOLGER SE, MILLER PC.** Changes in EEG during graded exercise on a recumbent cycle ergometer. *J Sports Sci Med.* 2008;7:505-511.
- (3) **BAILEY SP, HALL EE, MILLER PC, FOLGER SE.** Changes in brain activity, affect, and perception during grades exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2005;5:S207.
- (4) **BEYER L, SCHUMANN H.** Möglichkeiten neurophysiologischer Untersuchungen in der Sportmedizin anhand von zwei ausgewählten Beispielen. *Med Sport (Berl).* 1981;3:65-70.
- (5) **BEYER L, ROST R, HANSEN E, WEISS T, GRUNWALD M.** EEG-Analyse und Veränderungen der EEG-Aktivität während sportlicher Belastung. In: L Zichner, M Engelhardt, J Freiwald (Hrsg.), *Die Muskulatur - sensibles, integratives und messbares Organ* (S. 99-121). Nürnberg: Novartis Pharma Verlag; 1998.
- (6) **BHAMBHANI Y, MALIK R, MOOKERJEE S.** Cerebral oxygenation declines at exercise intensities above the respiratory compensation threshold. *Respir Physiol Neurobiol.* 2007;156:196-202. doi:10.1016/j.resp.2006.08.009
- (7) **BRACH M.** EEG-Untersuchungen im Radsport unter Berücksichtigung der klassischen Aktivierungstheorie. In: U Bartmus, H Heck, J Mester, H Schumann, G Tidow (Hrsg.), *Aspekte der Sinnes- und Neurophysiologie im Sport*. In memoriam Horst de Marées (S. 131-147). Köln: Sport & Buch Strauß Verlag; 1996.
- (8) **BRÜMMER V, SCHNEIDER S, ABEL T, VOGT T, STRÜDER HK.** Brain cortical activity is influenced by exercise mode and intensity. *Med Sci Sports Exerc.* 2011a;43:1863-1872. doi:10.1249/MSS.0b013e3182172a6f
- (9) **BRÜMMER V, SCHNEIDER S, STRÜDER HK, ASKEW CD.** Primary motor cortex activity is elevated with incremental exercise intensity. *Neurosci.* 2011b;181:150-162. doi:10.1016/j.neuroscience.2011.02.006
- (10) **BUHL H.** Funktionelle und morphologische Veränderungen beim Höhentraining unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens von L-Carnitin. *Medical Triathlon World.* 2004;15:10-16.
- (11) **CHRISTENSEN LOD, JOHANSEN P, SINKJÆR T, PETERSEN N, PYNDT HS, NIELSEN JB.** Cerebral activation during bicycle movements in man. *Exp Brain Res.* 2000;11:66-72. doi:10.1007/s002210000493
- (12) **CORBETT RJ, LAPTOOK AR.** Failure of localized head cooling to reduce brain temperature in adult humans. *Neuroreport.* 1998;9:2721-2725. doi:10.1097/00001756-199808240-00007
- (13) **CRABBE JB, DISHMAN RK.** Brain electrocortical activity during and after exercise: A quantitative synthesis. *Psychophysiol.* 2004;41:563-574. doi:10.1111/j.1469-8986.2004.00176.x
- (14) **DALSGAARD MK, QUISTORFF B, DANIELSEN ER, SELMER C, VOGELSANG T, SECHER NH.** A reduced cerebral metabolic ratio in exercise reflects metabolism and not accumulation of lactate within the human brain. *J Physiol.* 2004;554:571-578. doi:10.1113/jphysiol.2003.055053
- (15) **FTAITI F, KACEM A, JAIDANE N, TABKA Z, DOGUI M.** Changes in EEG activity before and after exhaustive exercise in sedentary women in neutral and hot environments. *Appl Ergon.* 2010;41:806-811. doi:10.1016/j.apergo.2010.01.008
- (16) **FUMOTO M, OSHIMA T, KAMIYA K, KIKUCHI H, SEKI Y, NAKATANI Y, YU X, SEKIYAMA T, SATO-SUZUKI I, ARITA H.** Ventral prefrontal cortex and serotonergic system activation during pedalling exercise induces negative mood improvement and increased alpha band in EEG. *Behav Brain Res.* 2010;213:1-9. doi:10.1016/j.bbr.2010.04.017
- (17) **GRONWALD T, LUDYGA S, HOTTENROTT K.** Einfluss einer intensiven Intervallbelastung auf die Beanspruchung der kortikalen Gehirnaktivität. *Schweiz Z Sportmed.* 2015a;1:1-6.
- (18) **GRONWALD T, LUDYGA S, HOTTENROTT K.** Gehirnaktivität bei identischer Belastung - Eine standardisierte fahrradergometrische Laborstudie unter Normoxie und normobarer Hypoxie. *Leistungssport.* 2015b;2:42-47.
- (19) **GUIMARAES TT, MACEDO DA COSTA B, CERQUEIRA LS, SERDEIRO ADCA, POMPEU FAMS, SALES DE MORAES H.** Acute effect of different patterns of exercise on mood, anxiety and cortical activity. *Arch Neurosci.* 2015;1:1-6.
- (20) **HALL EE, MARTIN BE, BAILEY SP, MILLER PC, FOLGER SE.** Changes in EEG activity during exercise: Due to Duration or intensity of exercise? *Med Sci Sports Exerc.* 2006;38:S54. doi:10.1249/00005768-200605001-00244
- (21) **HERHOLZ K, BUSKIES W, RIST M, PAWLK G, HOLLMANN W, HEISS WD.** Regional cerebral blood flow in man at rest and during exercise. *J Neurol.* 1987;234:9-13. doi:10.1007/BF00314001
- (22) **HILTY L, LANGER N, PASCUAL-MARQUI R, BOUTELLIER U, LUTZ K.** Fatigue-induced increase in intracortical communication between mid/anterior insular and motor cortex during cycling exercise. *Eur J Neurosci.* 2011;34:2035-2042. doi:10.1111/j.1460-9568.2011.07909.x
- (23) **HOTTENROTT K, TAUBERT M, GRONWALD T.** Cortical brain activity is influenced by cadence in cyclists. *Open Sports Sci J.* 2013;6:9-14. doi:10.2174/1875399X01306010009
- (24) **JAIN S, GOURAB K, SCHINDLER-IVENS S, SCHMIT BD.** EEG during pedaling: Evidence for cortical control of locomotor tasks. *Clin Neurophysiol.* 2013;124:379-390. doi:10.1016/j.clinph.2012.08.021
- (25) **JØRGENSEN LG, PERKO G, SECHER NH.** Regional cerebral artery mean flow velocity and blood flow during exercise in humans. *J Appl Physiol.* 1992;73:1825-1830.
- (26) **KACEM A, FTAITI F, CHAMARI K, DOGUI M, GRÉLOT L, TABKA Z.** EEG-related changes to fatigue during intense exercise in the heat in sedentary women. *Health.* 2014;06:1277-1285. doi:10.4236/health.2014.611156
- (27) **KRAAIER V, VAN HUFFELEN AC, WIENEKE GH.** Quantitative EEG changes due to hypobaric hypoxia in normal subjects. *Electroen Clin Neurophysiol.* 1988;69:303-312. doi:10.1016/0013-4694(88)90002-8
- (28) **LEHNERT K.** Versuch der Erfassung ermüdungsbedingter Veränderungen bestimmter zentralnervöser Funktionen (Elektroenzephalographie, Nervenleitgeschwindigkeit). *Theorie und Praxis Leistungssport.* 1971;5:107-113.
- (29) **MECHAU D, WEISS M, LIESEN H.** Auswirkungen von Stufenbelastungen auf dem Fahrradergometer im EEG. *Dtsch Z Sportmed.* 1998;49:81-86.
- (30) **NEWSHOLME EA, ACWORTH I, BLOMSTRAND E.** Amino acids, brain neurotransmitters and a functional link between muscle and brain that is important in sustained exercise. In: G Benzi (Hrsg.), *Advances in Biochemistry* (S. 127-133). London: John Libbey Eurotext; 1987.

- (31) **NYBO L, MØLLER K, VOLIANITIS S, NIELSEN B, SECHER NH.** Effects of hyperthermia on cerebral blood flow and metabolism during prolonged exercise in humans. *J Appl Physiol.* 2002;93:58-64.
- (32) **NYBO L, NIELSEN B.** Perceived exertion is associated with an altered brain activity during exercise with progressive hyperthermia. *J Appl Physiol.* 2001;5:2017-2023.
- (33) **NYBO L, SECHER NH.** Cerebral perturbations provoked by prolonged exercise. *Prog Neurobiol.* 2004;72:223-261. doi:10.1016/j.pneurobio.2004.03.005
- (34) **OZAKI H, WATANABE S, SUZUKI H.** Topographic EEG changes due to hypobaric hypoxia at stimulated high altitude. *Electroen Clin Neurophysiol.* 1995;94:349-356. doi:10.1016/0013-4694(94)00311-8
- (35) **PAPADELIS C, KOURTIDOU-PAPADELI C, BAMIDIS PD, MAGLAVERAS N, PAPPAS K.** The effect of hypobaric hypoxia on multichannel EEG signal complexity. *Clin Neurophysiol.* 2007;118:31-52. doi:10.1016/j.clinph.2006.09.008
- (36) **DE PAUW K, ROELANDS B, MARUSIC U, TELLEZ HF, KNAEPEN K, MEEUSEN R.** Brain mapping after prolonged cycling and during recovery in the heat. *J Appl Physiol.* 2013;115:1324-1331. doi:10.1152/jappphysiol.00633.2013
- (37) **ROOKS CR, THOM NJ, MCCULLY KK, DISHMAN RK.** Effects of incremental exercise on cerebral oxygenation measured by near-infrared spectroscopy: A systematic review. *Prog Neurobiol.* 2010;92:134-150. doi:10.1016/j.pneurobio.2010.06.002
- (38) **SHELLART NA, REITS D.** Transient and maintained changes of the spontaneous occipital EEG during acute systemic hypoxia. *Aviat Space Environ Med.* 2001;5:462-470.
- (39) **SCHNEIDER S, STRÜDER HK.** Monitoring effects of acute hypoxia on brain cortical activity by using electromagnetic tomography. *Behav Brain Res.* 2009;197:476-480. doi:10.1016/j.bbr.2008.10.020
- (40) **SCHNEIDER S, ASKEW CD, DIEHL J, MIERAU A, KLEINERT J, ABEL T, CARNAHAN H, STRÜDER HK.** EEG activity and mood in health orientated runners after different exercise intensities. *Physiol Behav.* 2009;96:709-716. doi:10.1016/j.physbeh.2009.01.007
- (41) **SCHNEIDER S, ROUFFET DM, BILLAUT F, STRÜDER HK.** Cortical current density oscillations in the motor cortex are correlated with muscular activity during pedaling exercise. *Neurosci.* 2013;228:309-314. doi:10.1016/j.neuroscience.2012.10.037
- (42) **SCHUMANN H, SEIBT R.** EEG während der Belastung - Möglichkeiten und Grenzen. *Biomed Tech (Berl).* 1993;38:169-170. doi:10.1515/bmte.1993.38.s1.169
- (43) **SECHER NH, SEIFERT T, VAN LIESHOUT JJ.** Cerebral blood flow and metabolism during exercise: Implications for fatigue. *J Appl Physiol.* 2007;104:306-314. doi:10.1152/jappphysiol.00853.2007
- (44) **TIMINKUL A, KATO M, OMORI T, DEOCARIS CC, ITO A, KIZUKA T, SAKAIRI Y, NISHIJIMA T, ASADA T, SOYA H.** Enhancing effect of cerebral blood volume by mild exercise in healthy men: A near-infrared spectroscopy study. *Neurosci Res.* 2008;61:242-248. doi:10.1016/j.neures.2008.03.012
- (45) **WOO M, KIM S, KIM J, PETRUZZELLO SJ, HATFIELD BD.** Examining the exercise-affect dose-response relationship: Does duration influence frontal EEG asymmetry? *Int J Psychophysiol.* 2009;72:166-172. doi:10.1016/j.ijpsycho.2008.12.003
- (46) **YOUNGSTEDT SD, DISHMAN RK, CURETON KJ, PEACOCK LJ.** Does body temperature mediate anxiolytic effects of acute exercise? *J Appl Physiol.* 1993;74:825-831.
- (47) **ZHONGYUAN S, DEMING Z, ZHENGZHONG G.** The influence of acute and chronic hypoxia on the electroencephalogram of human body. *Ann Physiol Anthropol.* 1987;6:111-121. doi:10.2114/ahs1983.6.111