

# Registrierung stationärer Potenziale des auditorischen Systems (ASSR) in Echtzeit mit einem Lock-in Verstärker

## Recording of auditory steady-state evoked responses (ASSR) in real-time using a lock-in amplifier

### Abstract

Human auditory steady-state responses (ASSRs) are represented in the Electroencephalogram (EEG) by single spectral lines at the stimulus repetition rate. To increase the small signal-to noise ratio of these responses, commercial ASSR systems usually average several segments of the EEG signal prior to be converted from the time domain into the frequency domain. The averaging process however does not allow for a recording of ASSR in real time. This paper describes an experimental setup which replaces averaging and frequency analysis by a lock-in amplifier. Lock-in amplifiers are widely used in experimental physics to extract small signals of known frequency from an extremely noisy background. A lock-in amplifier multiplies the (noisy) input signal by a reference signal. Subsequent integration with a time constant of a few seconds results in a DC signal. In our setup, with a reference signal at the same frequency as the stimulus repetition rate, the DC output is proportional to the ASSR amplitude.

Auditory steady-state responses were evoked in one normal hearing female adult by presenting wide-band chirp stimuli at 40 Hz repetition rate and 50 dB nHL presentation level through an insert earphone. The amplified and band pass filtered EEG signal was fed to the input channel of a Stanford Research Type 830 lock-in amplifier. A reference signal phase locked to the stimulus was fed to the amplifiers reference input. The DC output was maximized by manually shifting the phase of the reference signal. A Digital Multimeter (Keysight DMM34460A) and a Data Acquisition Application (Keysight BenchVue) were used to record the time course of the DC output proportional to the ASSR amplitude. Switching the acoustical stimulus on and off periodically, the DC output follows the response amplitude in real time. Typical examples for time constants of 1 s and 3 s are presented.

This paper presents a feasibility analysis of a recording setup for auditory steady-state responses using a lock-in amplifier. The proposed method could be of some interest for intraoperative monitoring of the auditory nerve during implantation of middle ear prostheses, neurosurgical procedures, and for brain-computer interfaces (BCI).

**Keywords:** auditory steady-state responses, ASSR, lock-in amplifier

### Zusammenfassung

Stationäre Potenziale des auditorischen Systems (ASSR) findet man bei periodischer Stimulation des Hörsystems im EEG-Spektrum als Spektrallinien mit exakt der Reizrate. Benutzt man zur Trennung von Signal und Störung die für transiente Potenziale übliche Mittelung reizsynchrone EEG-Abschnitte, wird die besondere Eigenschaft der stationären Potenziale, die exakte Kenntnis ihrer Frequenz, nicht beachtet. Ein Monitoring der ASSR in Echtzeit ist bei Anwendung des Mittelungsverfahrens nur eingeschränkt möglich. Diese Arbeit greift eine Idee von Schacham et al. auf und beschreibt einen experimentellen

Roland Mühler<sup>1</sup>

1. Abteilung für Experimentelle  
Audiologie, Otto-von-  
Guericke-Universität  
Magdeburg, Deutschland

Aufbau, der es erlaubt, stationäre Potenziale des auditorischen Systems mit Hilfe eines kommerziellen Lock-in Verstärkers (Stanford Research 830) in Echtzeit darzustellen. In einem Lock-in Verstärker wird das verrauschte Nutzsignal mit einem Referenzsignal mit der Frequenz des Nutzsignals multipliziert. Ein Tiefpass eliminiert alle nicht zur Nutzfrequenz synchronen Rauschanteile, so dass am Ausgang des Lock-in Verstärkers eine dem Nutzsignal proportionale Gleichspannung anliegt. Das hier erstmals vorgestellte Messprinzip eignet sich für die Darstellung stationärer evozierte Potenziale bekannter Frequenz besonders gut. Für Chirpreize mit 40 pps und 50 dB nHL Reizpegel wurden an einer erwachsenen normalhörenden Probandin erfolgreich Amplituden-Zeit-Verläufe mit Zeitkonstanten von wenigen Sekunden registriert.

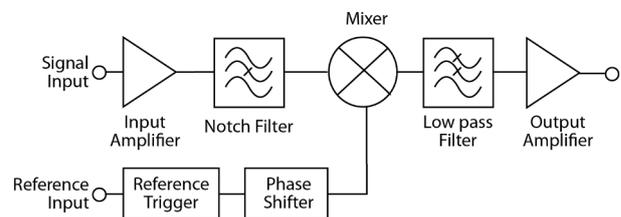
**Schlüsselwörter:** evozierte Potenziale, stationäre Potenziale, ASSR, Lock-in Verstärker

## Einleitung

Stationäre Potenziale des auditorischen Systems (ASSR) stehen seit den 1990er Jahren im Fokus der klinisch-audiologischen Forschung, eröffnen sie doch die Möglichkeit, objektive Hörschwellen für bis zu vier Frequenzen in beiden Ohren simultan zu ermitteln [5]. Bei den ASSR handelt es sich nicht um eine neue Entität evozierter Potenziale (EP), sondern um eine Analyse der bekannten transienten evozierten Potenziale im Frequenzbereich [9]. Diese Analyse im Frequenzbereich ist per se besser geeignet, das entscheidende Wesensmerkmal stationärer Potenziale herauszustellen – ihr Auftreten exakt bei der bekannten Reizfolgerate.

Da stationäre Potenziale im historischen Kontext von den Arbeitsgruppen und Geräteherstellern bearbeitet wurden, die bereits seit mehreren Jahrzehnten mit transienten Potentialen vertraut waren, verwundert es nicht, dass zur Extraktion der kleinen stationären Potenziale aus dem Spontan-EEG zunächst das bei den transienten Potentialen etablierte Methodeninventar benutzt wurde: Die reizsynchrone Mittelung von EEG-Abschnitten. Das „Alleinstellungsmerkmal“ der ASSR, die genaue Kenntnis ihrer Frequenz, findet bei dieser Methode nicht ausreichend Beachtung [10].

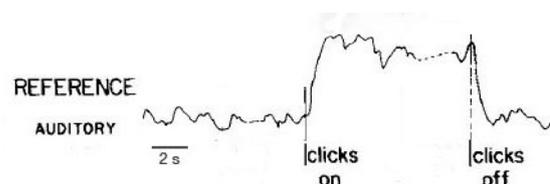
In der Experimentalphysik werden zur Darstellung kleiner sinusförmiger Signale bekannter Frequenz im Rauschen traditionell Lock-in Verstärker benutzt. Abbildung 1 zeigt das Funktionsprinzip eines solchen Lock-in Verstärkers. Das verrauschte Nutzsignal wird verstärkt und durch eine Bandsperrung von Signalanteilen, die synchron zur Netzfrequenz sind, befreit. Danach wird es in einem Mischer mit einem Referenzsignal der bekannten Frequenz multipliziert, wobei die Phase des Referenzsignals zuvor mit dem Nutzsignal synchronisiert werden kann. Ein Tiefpass integriert das Mischsignal und eliminiert dabei alle nicht zur Nutzfrequenz synchronen Rauschanteile, so dass am Ausgang des Lock-in Verstärkers eine dem Nutzsignal proportionale Gleichspannung anliegt [4].



**Abbildung 1:** Funktionsprinzip eines Lock-in Verstärkers

Dass sich dieses Messprinzip für die Darstellung evozierter Potenziale bekannter Frequenz besonders gut eignet, erkannten Euler und Kießling bereits zu Beginn der 1980er Jahre. Sie nutzten einen Lock-in Verstärker zur Messung von Frequenzfolgepotenzialen [3].

Die erste und bis heute einzige Beschreibung einer Registrierung von ASSR mit einem Lock-in Verstärker geht auf Schacham et al. [16] zurück. Sie ersetzten den Analog-Digital-Wandler und den Mittelwertrechner eines konventionellen EP-Systems durch einen Lock-in Verstärker (Princeton Research Model 5101) und wollten damit demonstrieren, dass der damals überall für EP-Messungen benutzte teure und große Prozessrechner PDP11 (DEC) durch ein preiswertes analoges Laborgerät ersetzt werden kann. Schacham et al. [16] registrierten stationäre Potenziale bei Stimulation mit 40-Hz-Klicks. Abbildung 2 zeigt, wie die Gleichspannung am Verstärkerausgang dem Ein- und Ausschalten des akustischen Reizes quasi in Echtzeit folgt.



**Abbildung 2:** Erste Beschreibung einer ASSR-Registrierung mittels Lock-in Verstärker durch Schacham et al. [16] (Abbildung modifiziert). Die Kurve zeigt das Ausgangssignal des Lock-in Verstärkers bei einer akustischen Stimulation mit 40 Hz Klicks.

Praktische Bedeutung hätte eine Registrierung von ASSR in Echtzeit heute vor allem in zwei Bereichen. Entwickler

von BCI-Systemen (Brain Computer Interface) suchen nach wie vor Verfahren für ein robustes Neuro-Feedback zur Steuerung von Prothesen [6] und Neurochirurgen benötigen schnelle und robuste Verfahren zum Monitoring der funktionellen Integrität von Hirnnerven [15].

Durch die Verwendung allgemein verfügbarer messtechnischer Komponenten ermöglicht das hier beschriebene experimentelle Setup eine Untersuchung aller wesentlichen Faktoren, die bei der Registrierung von ASSR mit einem Lock-in Verstärker eine Rolle spielen. Damit schließt sich diese Arbeit an Vorschläge zur Registrierung von ASSR mit Laborsystemen an, die bereits 2005 in dieser Zeitschrift erschienen sind [12].

## Methodik

Um die prinzipielle Möglichkeit einer Registrierung Chirp-evozierter ASSR mit einem Lock-in Verstärker zu demonstrieren, wurden Messungen an einer erwachsenen normalhörenden Probandin (37 Jahre) durchgeführt. Für das Experiment lag eine Genehmigung der zuständigen Ethikkommission sowie eine schriftliche Einwilligungserklärung vor. Der in Abbildung 3 schematisch dargestellte Versuchsaufbau befand sich in einem ruhigen Büroraum, die Probandin lag während der Messungen 1 m neben dem Versuchsaufbau entspannt auf einer EEG-Liege.

Zur Reizerzeugung wurde eine USB-Soundkarte Fireface UC (RME Audio, Haimhausen) benutzt, die von einem PC über eine USB-Schnittstelle durch die MATLAB-Applikation SoundMexPro (HörTech, Oldenburg) angesteuert wurde. Die stationären Potenziale wurden durch einen CE-Chirp [2], [11] mit einer Reizwiederholrate von 40 Hz ausgelöst. Die Reizapplikation erfolgte über einen Einsteckhörer ER-3A (Etymotic Research, Elk Grove Village, IL) im rechten Ohr. Ein Reizpegel von 50 dB nHL wurde über einen programmierbaren Abschwächer PA5 und eine Kopfhörer-Endstufe HB7 (beides Tucker-Davis Technologies, Alachua, FL) eingestellt und mittels Ohrsimulator (Bruel & Kjaer Typ 4157) kalibriert.

Die EEG-Aktivität wurde mit drei Ag/AgCl-Klebeelektroden von der Kopfhaut abgeleitet (Stirn nicht invertierend, Nacken invertierend, Erdelektrode am Jochbein), mit einem EEG-Verstärker g.bsamp (g.tec, Graz) verstärkt und gefiltert (Bandpass 10...100 Hz, 6 dB/Okt.). Über ein zusätzliches Bandpassfilter (30...60 Hz, BenchMaster8, Kemo Ltd, Dartford) mit einer Steilheit von 48 dB/Okt. wurde das EEG-Signal in einen DSP-Lock-in Verstärker SR830 (Stanford Research, Sunnyvale, CA) eingespeist. Ein zum Reiz exakt phasengleiches Sinussignal wurde über einen zweiten Kanal der Soundkarte in den Referenzeingang des Lock-in Verstärkers eingespeist.

Das zum stationären Potenzial proportionale Gleichspannungssignal am Ausgang des Lock-in Verstärkers wurde mit einem Digitalvoltmeter DMM34460A (Keysight Technologies, Santa Rosa, CA) gemessen. Das Digitalvoltmeter war über eine USB 3.0 Schnittstelle mit der „Data Acquisition Control & Analysis“-Applikation der Softwareplattform BenchVue (Keysight) verbunden.

Zur Darstellung des stationären Potenzials am Ausgang des Lock-in Verstärkers wurde die Phasenlage des Referenzsignals am Verstärker manuell so eingestellt, dass die Ausgangsspannung im eingeschwungenen Zustand maximal wurde. Der alternativ benutzte automatische Phasenabgleich des Verstärkers lieferte ähnliche Ergebnisse. Um den akustischen Reiz ein- und auszuschalten, wurde der Schlauch des Einsteckhörers durch eine Klemme unterbrochen. Die Geometrie aller elektrischen Komponenten (EEG-Kabel, Audiokabel, Gehäuse des ER-3A) blieb dabei unverändert. Der Spannungsverlauf am Verstärkerausgang bei mehrfachem Aus- und Einschalten des akustischen Reizes wurde für verschiedene Zeitkonstanten des Integrators aufgezeichnet.

## Ergebnisse

Die von BenchVue aufgezeichneten Zeitverläufe wurden nach Excel exportiert und grafisch dargestellt. Abbildung 4 zeigt exemplarisch zwei Spannungsverläufe bei wiederholtem Ein- und Ausschalten des akustischen Reizes. In Abhängigkeit von der Zeitkonstanten des Integrators (Tiefpass) folgt die Gleichspannung am Ausgang des Lock-in Verstärkers dem evozierten Potenzial nahezu in Echtzeit. Steilere Anstiege bei einer kleinen Zeitkonstanten (1 s) gehen mit einer stärkeren Variabilität der Spannung im stationären Zustand einher. Diese Variabilität kann durch die Wahl einer größeren Zeitkonstanten (3 s) verringert werden, was zwangsläufig zu einem flacheren Anstieg der Kurve beim Ein- und Ausschalten führt.

## Diskussion

Die Extraktion akustisch evozierter stationärer Potenziale (ASSR) aus dem Spontan-EEG in Echtzeit mit einem Lock-in Verstärker hatte das Ziel, 35 Jahre nach der Erstbeschreibung [16] die großen Möglichkeiten dieser Potenziale wieder stärker in den Fokus experimenteller Untersuchungen zu rücken. Dabei wurde eine komplett Hardware-basierte Lösung gewählt, bei der das Ergebnis des komplexen Messprozesses als Gleichspannung auf einem Voltmeter abzulesen ist. Damit grenzt sich diese Arbeit von numerischen Simulationen des Lock-in Prinzips in zahlreichen aktuellen Arbeiten zu BCI-Systemen ab [1], [7], [8], [13].

Ein zentraler Aspekt bei der Bewertung von Experimenten mit stationären Potenzialen ist der Nachweis, dass es sich bei dem registrierten Signal nicht um einen Reizartefakt handelt. Da ein Übersprechen der elektrischen Aktivität in den Zuleitungen und Spulen des Kopfhörers in die Eingänge des EEG-Verstärkers nicht ausgeschlossen werden kann, wurde in dieser Studie eine Unterbrechung des akustischen Reizes im Schlauch unter Beibehaltung aller anderen elektrischen und geometrischen Parameter zum Ausschluss von Artefakten gewählt. Diese Methode wird bereits durch Euler und Kießling beschrieben [3]. Um die Experimente bei mittellauten Reizpegeln (50 dB nHL)

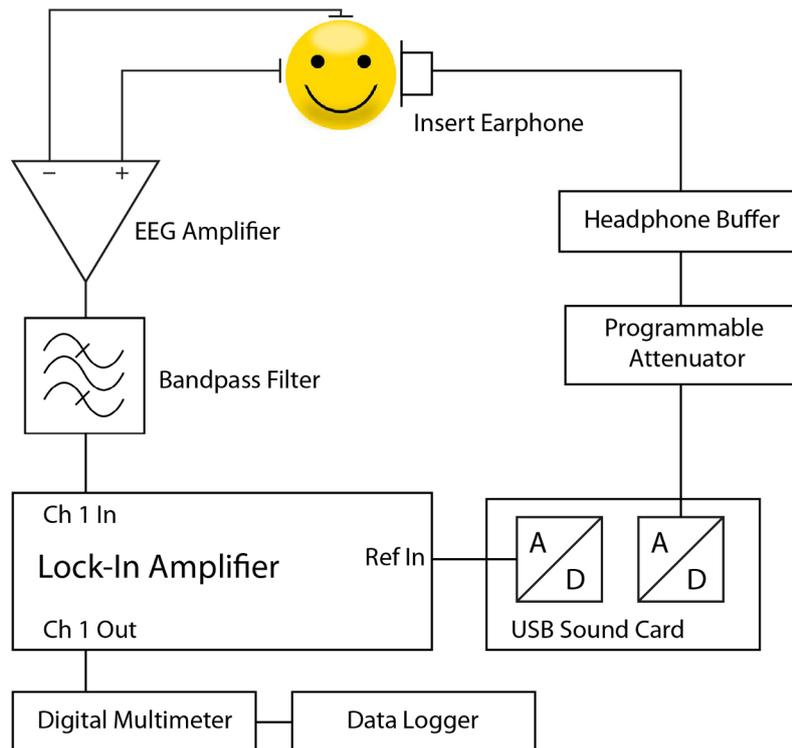


Abbildung 3: Blockschaltbild des in dieser Studie verwendeten Versuchsaufbaus zur Registrierung von ASSR mit einem Lock-in Verstärker

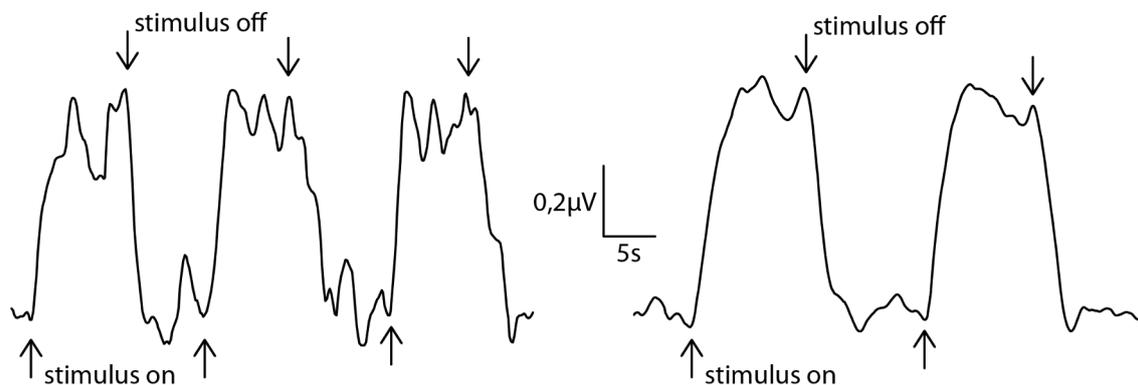


Abbildung 4: Ausgangssignal des Lock-in Verstärkers bei Ein- und Ausschalten eines 40-Hz-Chirpreizes für zwei verschiedene Zeitkonstanten des Integrators (linke Kurve 1 s, rechte Kurve 3 s); die Pfeile markieren den Zeitpunkt des Ein- und Ausschaltens des akustischen Reizes.

durchführen zu können, wurde versucht, im Gegensatz zur Stimulation mit Klickreizen [16] durch den Einsatz von breitbandigen Chirps die Amplitude der Reizantwort zu erhöhen [2], [11]. Die Tatsache, dass der Versuchsaufbau ohne Probleme in einem Büroraum betrieben wurde, kann als Indiz für eine besondere Robustheit des Verfahrens gewertet werden. Dieser Aspekt ist für einen intraoperativen Einsatz von Bedeutung [14].

Obwohl eine quantitative Bewertung der Reaktionszeit des Systems nicht Ziel dieser Arbeit war, zeigt ein Vergleich der Ergebnisse in Abbildung 4 mit den von Rapp et al. [15] für intraoperative ASSR-Registrierungen berichteten Zeitkonstanten (16 s für 45% Detektionsrate und 116 s für 80 bis 90% Detektionsrate) die Vorteile des Lock-in Prinzips. Rapp et al. [15] benutzten für ihre Untersuchungen reale EEG-Daten, denen sie simulierte

ASSR-Antworten konstanter Amplitude und Phase überlagerten.

Abschließend ist zu bemerken, dass das hier vorgestellte relativ einfache Experiment zeigt, welches Potenzial in einer konsequenten Ausnutzung der spezifischen Eigenschaften der ASSR für innovative Lösungen in der Audiologie und darüber hinaus liegt. Da die Gleichspannung am Ausgang des Lock-in Verstärkers in Abhängigkeit von der Zeitkonstante des Tiefpasses mehr oder weniger verrauscht ist, eignet sich das Verfahren vorrangig für Anwendungen mit weit überschwelligen Reizpegeln. Ein potenzielles Anwendungsgebiet für die Messung evozierter Potenziale in Echtzeit ist die Optimierung der Wandlerposition bei der Implantation aktiver Mittelohrprothesen. Da das beschriebene Verfahren auch für ein Monitoring der Hörfunktion bei neurochirurgischen Eingriffen am

Hörnerven von Interesse ist, wäre eine Implementation des Lock-in Algorithmus in ein kommerzielles Monitoringssystem erstrebenswert. Bei allen technischen Realisierungen muss jedoch dem Problem möglicher Reizartefakte gebührende Beachtung geschenkt werden.

## Anmerkungen

## Interessenkonflikte

Der Autor erklärt, dass er keine Interessenkonflikte in Zusammenhang mit diesem Artikel hat.

## Förderung

Diese Studie wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unter dem Förderkennzeichen VE 373/3-1 gefördert.

## Literatur

- Cheah LA, Hou M. Real-time detection of auditory steady-state responses. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2010;2010:1382-5. DOI: 10.1109/IEMBS.2010.5626731
- Elberling C, Don M. A direct approach for the design of chirp stimuli used for the recording of auditory brainstem responses. *J Acoust Soc Am.* 2010 Nov;128(5):2955-64. DOI: 10.1122/1.3489111
- Euler M, Kiessling J. Frequency-following potentials in man by lock-in technique. *Electroencephal Clin Neurophys.*1981;52:400-4. DOI: 10.1016/0013-4694(81)90022-5
- Giglberger S. Universität Regensburg - Anleitung zum Anfängerpraktikum A2, Versuch 5a - Lock-In-Verstärker. 2009. Verfügbar unter: [https://homepages.uni-regensburg.de/~erc24492/Lock-In/Lock\\_IN\\_StephGig\\_versuch5a.pdf](https://homepages.uni-regensburg.de/~erc24492/Lock-In/Lock_IN_StephGig_versuch5a.pdf)
- John MS, Lins OG, Boucher BL, Picton TW. Multiple auditory steady-state responses (MASTER): stimulus and recording parameters. *Audiology.* 1998 Mar-Apr;37(2):59-82. DOI: 10.3109/00206099809072962
- Kaongoen N, Jo S. A novel hybrid auditory BCI paradigm combining ASSR and P300. *J Neurosci Methods.* 2017 Mar;279:44-51. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2017.01.011
- Kato K, Takahashi K, Mizuguchi N, Ushiba J. Online detection of amplitude modulation of motor-related EEG desynchronization using a lock-in amplifier: Comparison with a fast Fourier transform, a continuous wavelet transform, and an autoregressive algorithm. *J Neurosci Methods.* 2018 Jan;293:289-98. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2017.10.015
- Middendorf M, McMillan G, Calhoun G, Jones KS. Brain-computer interfaces based on the steady-state visual-evoked response. *IEEE Trans Rehabil Eng.* 2000 Jun;8(2):211-4. DOI: 10.1109/86.847819
- Mühler R. Zur Terminologie der stationären Potenziale des auditorischen Systems. Was unterscheidet stationäre und transiente Potenziale [On the terminology of auditory steady-state responses. What differentiates steady-state and transient potentials?]. *HNO.* 2012 May;60(5):421-6. DOI: 10.1007/s00106-011-2382-0
- Mühler R, Mentzel K, Verhey J. Fast hearing-threshold estimation using multiple auditory steady-state responses with narrow-band chirps and adaptive stimulus patterns. *ScientificWorldJournal.* 2012;2012:192178. DOI: 10.1100/2012/192178
- Mühler R, Rahne T, Verhey JL. Auditory brainstem responses to broad-band chirps: amplitude growth functions in sedated and anaesthetised infants. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol.* 2013 Jan;77(1):49-53. DOI: 10.1016/j.ijporl.2012.09.028
- Mühler R, Ziese M, von Specht H. Registrierung von Auditory Steady-State Responses (ASSR) mit Laborsystemen. *Z Audiol.*2005;44:20-30.
- Müller-Putz GR, Eder E, Wriessnegger SC, Pfurtscheller G. Comparison of DFT and lock-in amplifier features and search for optimal electrode positions in SSVEP-based BCI. *J Neurosci Methods.* 2008 Feb;168(1):174-81. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2007.09.024
- Nave G, Eldar YC, Inbar G, Sinai A, Pratt H, Zaaroor M. Real-time change detection of steady-state evoked potentials. *Biol Cybern.* 2013 Feb;107(1):49-59. DOI: 10.1007/s00422-012-0523-5
- Ramp S, Rensch L, Simmermacher S, Rahne T, Strauss C, Prell J. Towards an optimal paradigm for intraoperative auditory nerve monitoring with auditory steady state responses. *J Clin Monit Comput.* 2017 Feb;31(1):123-34. DOI: 10.1007/s10877-016-9837-5
- Schacham SE, Pratt H. Detection and measurement of steady-state evoked potentials in real-time using a lock-in amplifier. Technical note. *J Neurosurg.* 1985 Jun;62(6):935-8. DOI: 10.3171/jns.1985.62.6.0935

### Korrespondenzadresse:

Dr. Roland Mühler  
Langer Weg 52, 39112 Magdeburg, Deutschland  
roland.muehler@gmail.com

### Bitte zitieren als

Mühler R. Registrierung stationärer Potenziale des auditorischen Systems (ASSR) in Echtzeit mit einem Lock-in Verstärker. *GMS Z Audiol (Audiol Acoust).* 2021;3:Doc03. DOI: 10.3205/zaud000015, URN: urn:nbn:de:0183-zaud0000156

### Artikel online frei zugänglich unter

<https://www.egms.de/en/journals/zaud/2021-3/zaud000015.shtml>

Veröffentlicht: 19.05.2021

### Copyright

©2021 Mühler. Dieser Artikel ist ein Open-Access-Artikel und steht unter den Lizenzbedingungen der Creative Commons Attribution 4.0 License (Namensnennung). Lizenz-Angaben siehe <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.