

Verfahren zur Datenanalyse gemessener Signale

Dr. rer. nat. Axel Hutt

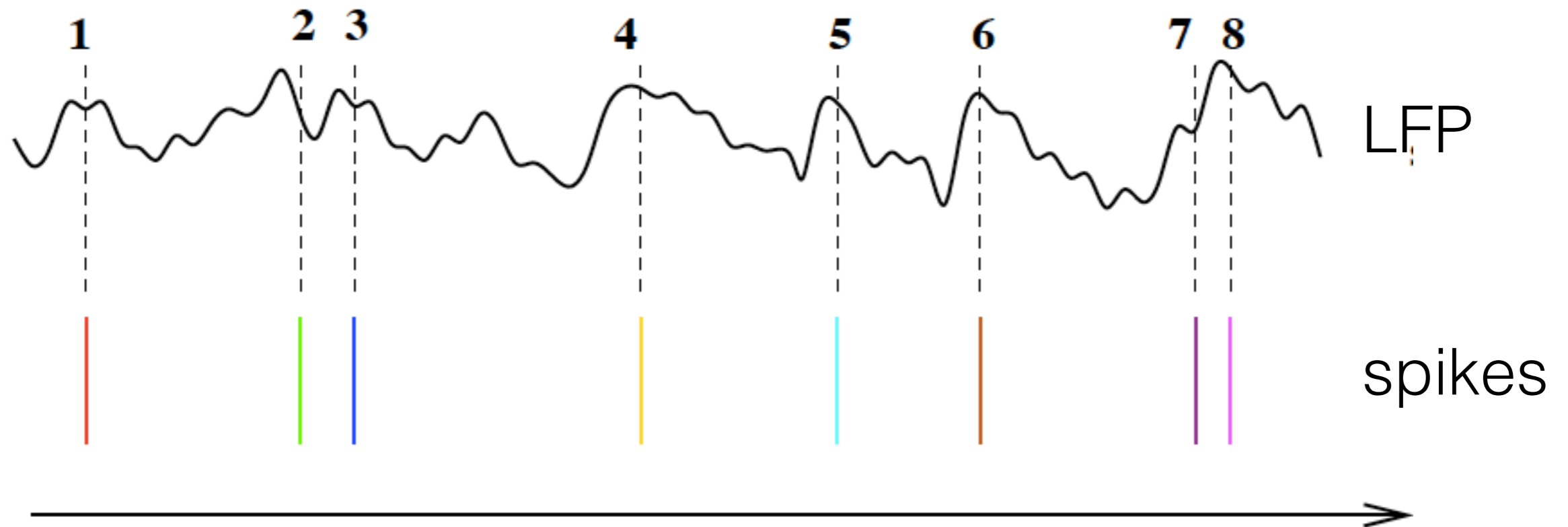
Vorlesung 12

spike-triggered average (STA)

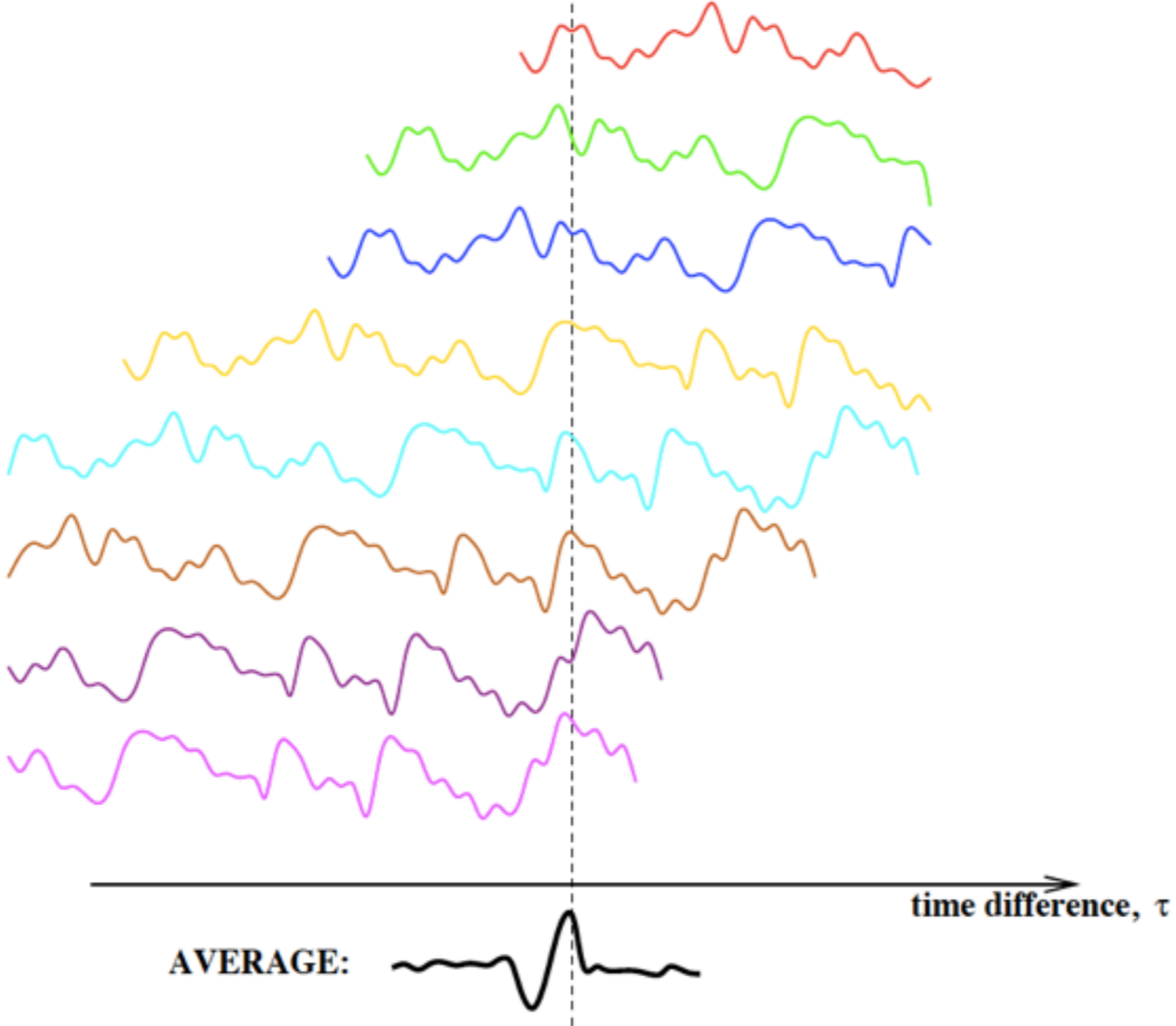
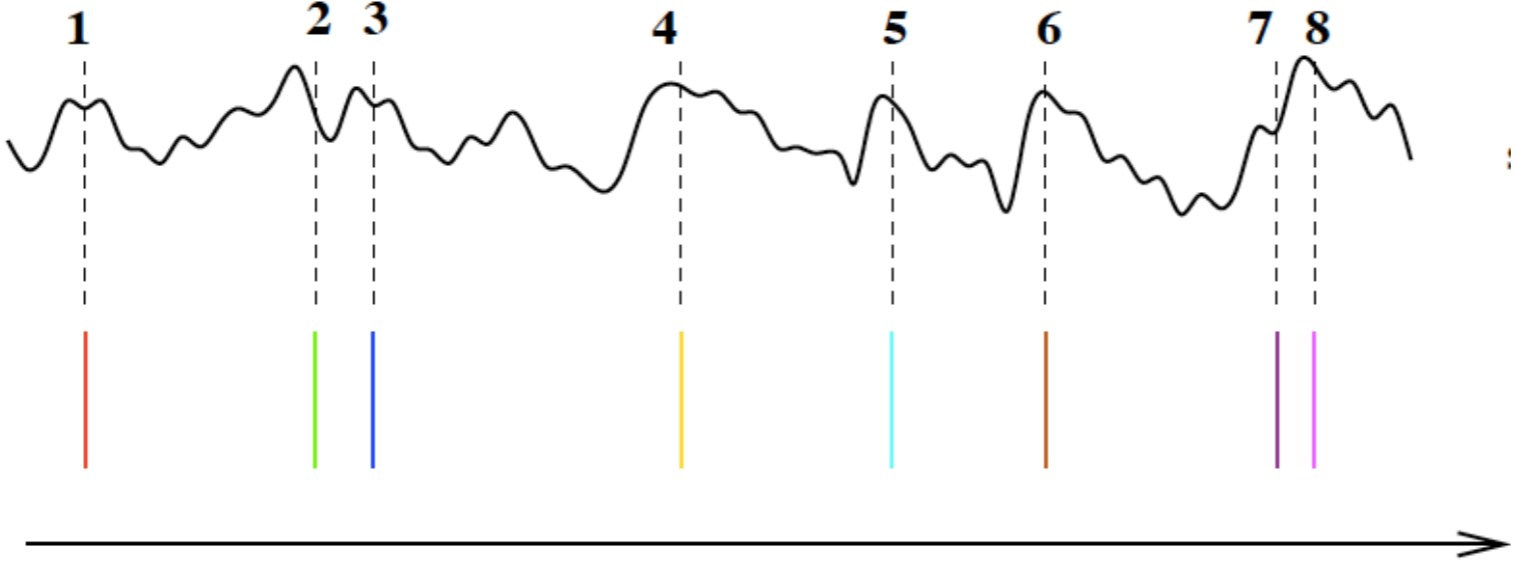
Frage:

wie hängen *einzelne spikes* mit dem Stromfeld im Gewebe (*LFP*) zusammen ?

bestimmen die spikes das LFP, oder vice versa ?

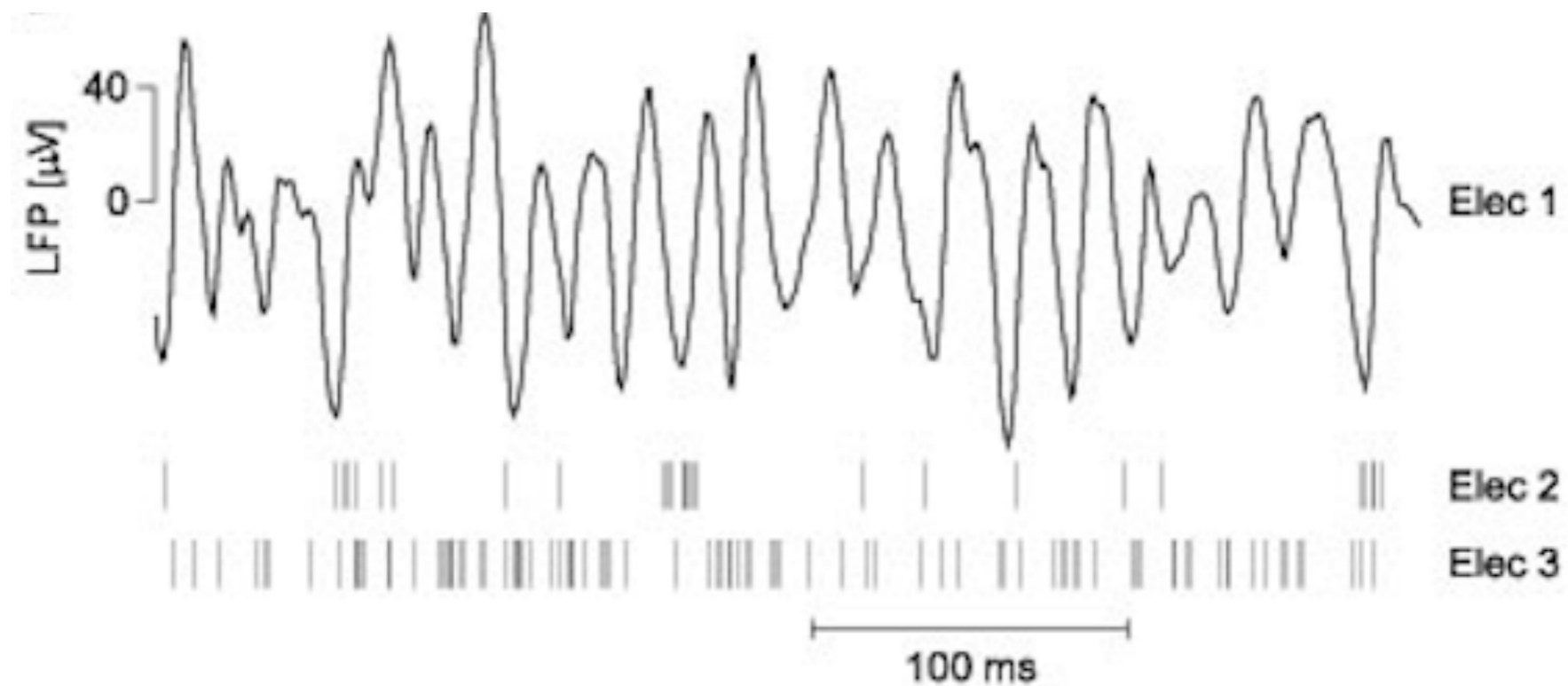


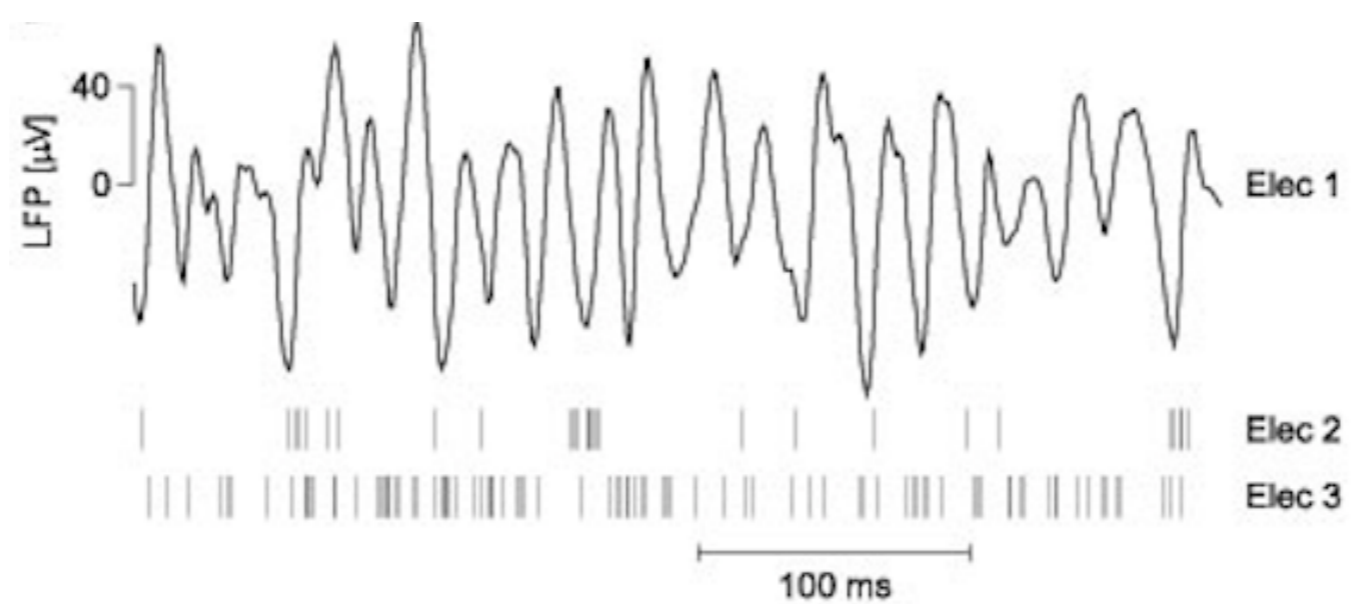
Idee:



Beispiel aus

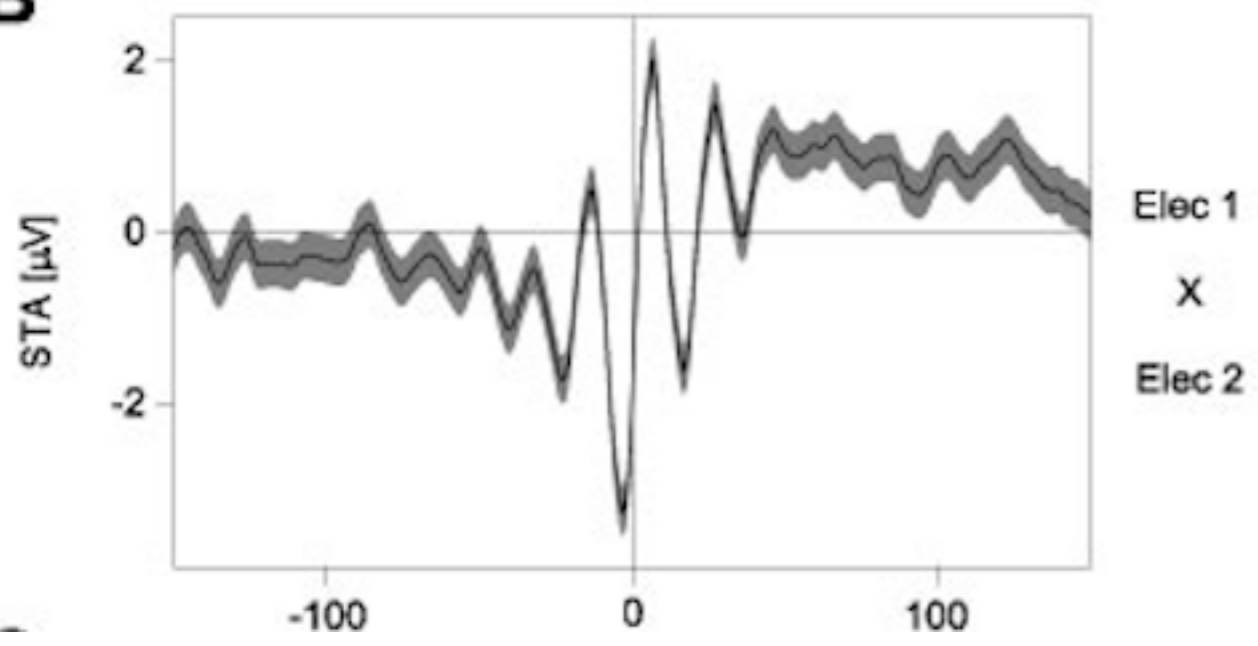
P. Fries et al., Oscillatory Neuronal Synchronization by Selective Visual Attention, Science 291(5508):1560-3 (2001)





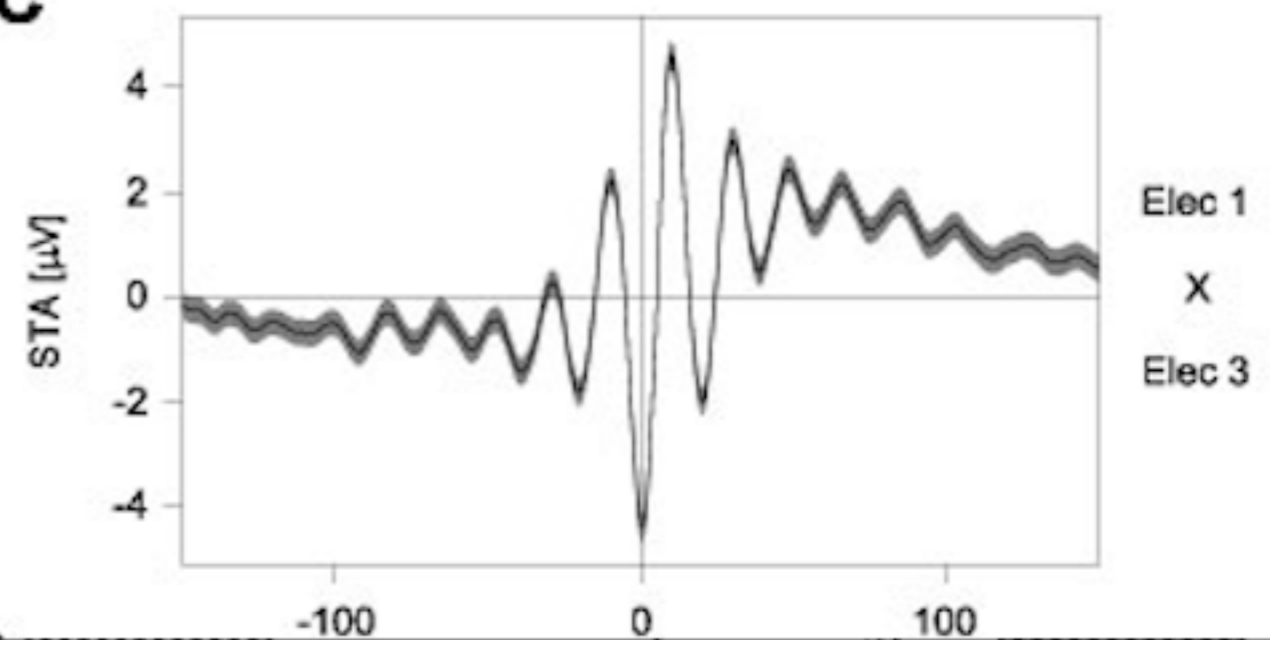
STA 1-2

B



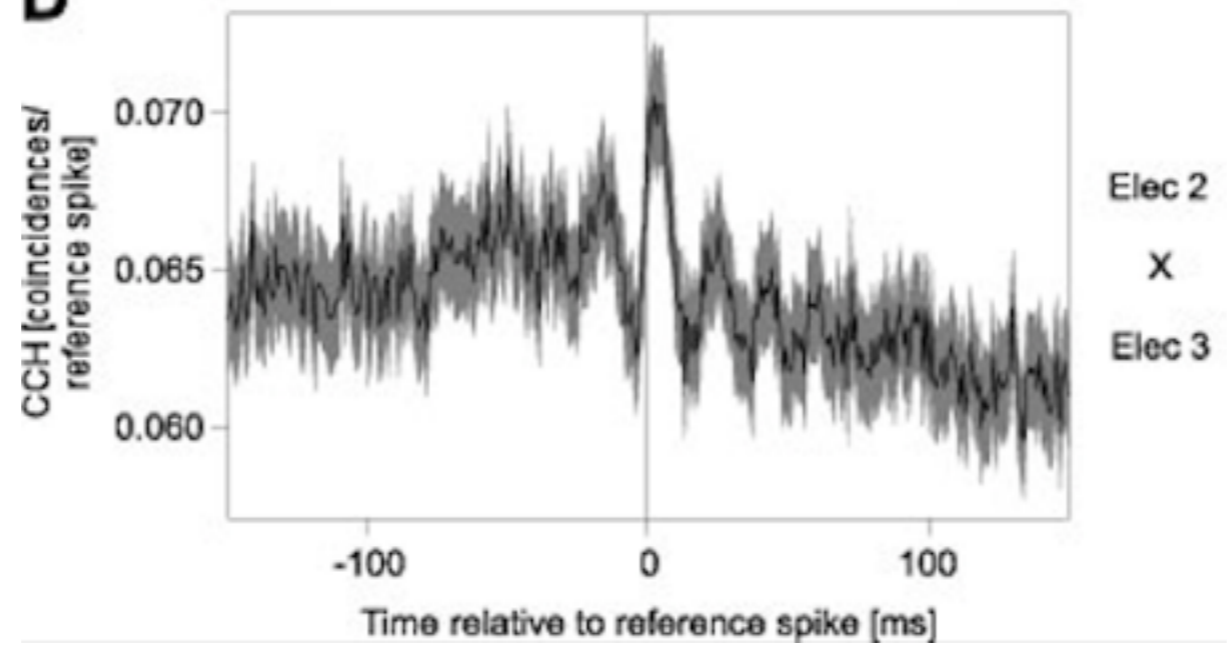
STA 1-3

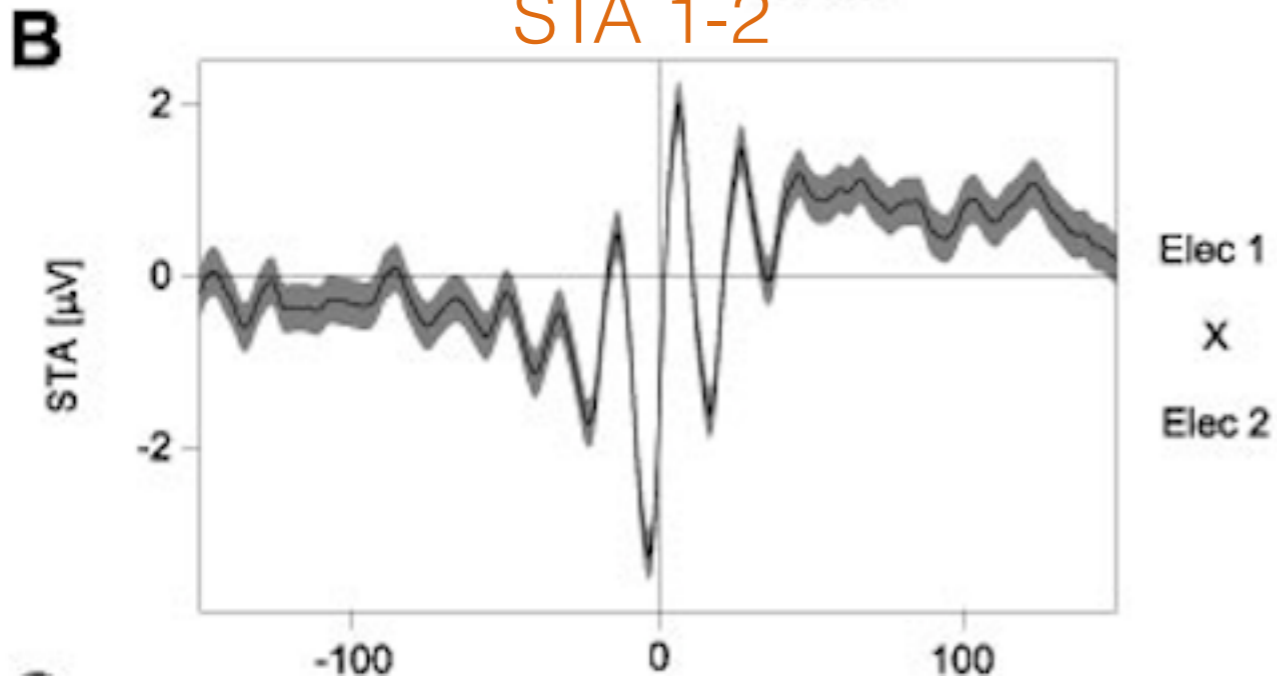
C



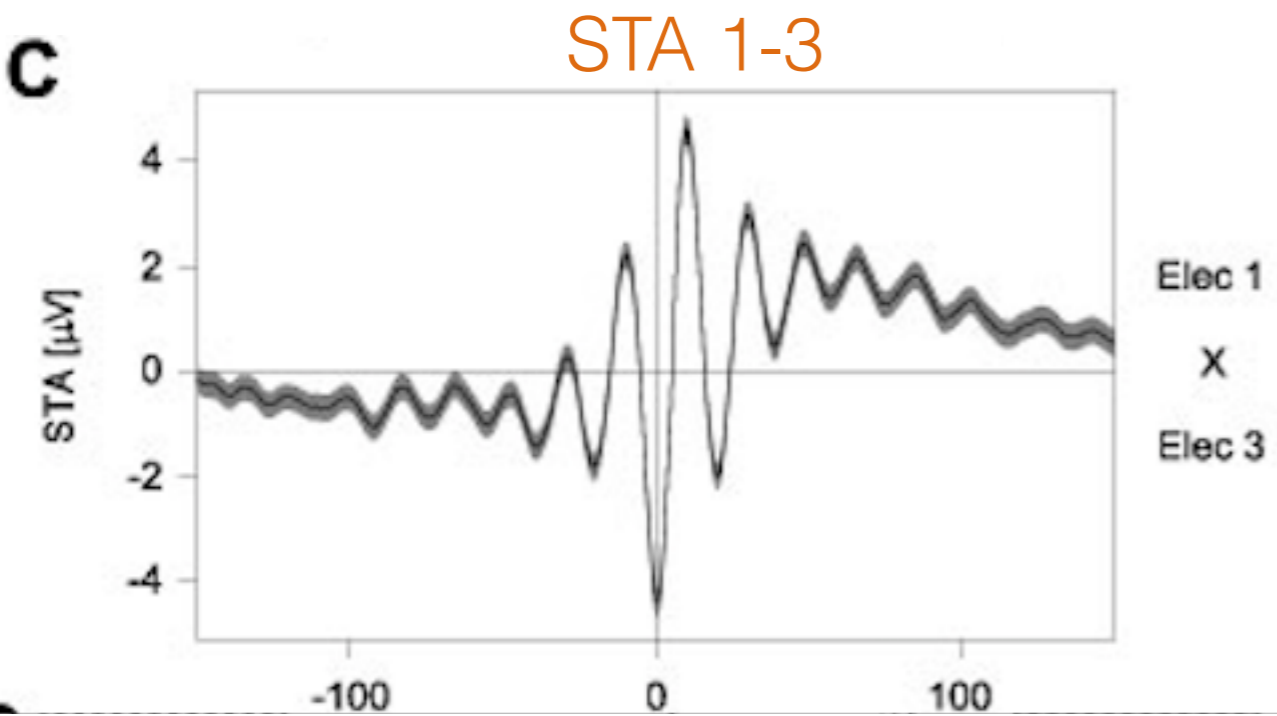
correlation 2-3

D



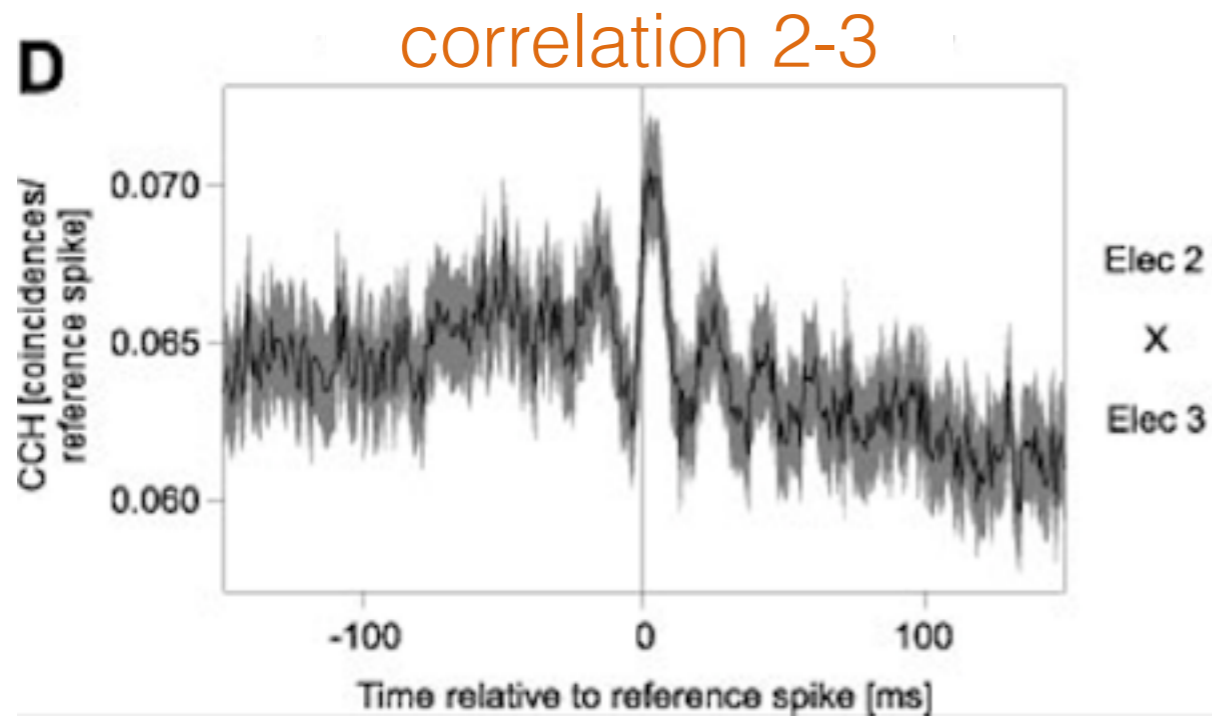


spikes sind



phasen-synchronisiert

mit LFP



spike trains sind
schwach synchronisiert

Frage:

- Wie hängt die Synchronisation mit der Frequenz zusammen ?

- Idee: PSD von STA

doch:

starke Frequenzen haben
großen Beitrag zu STA

Lösung:

Normierung mit mittlerem PSD der trials

spike-field coherence (SFC):

$$SFC = \frac{S[\langle \{T_n\} \rangle]}{\langle \{S[T_n]\} \rangle}$$

T_n : spike-triggered LFP single trial n

$S[x]$: PSD von Datensatz x

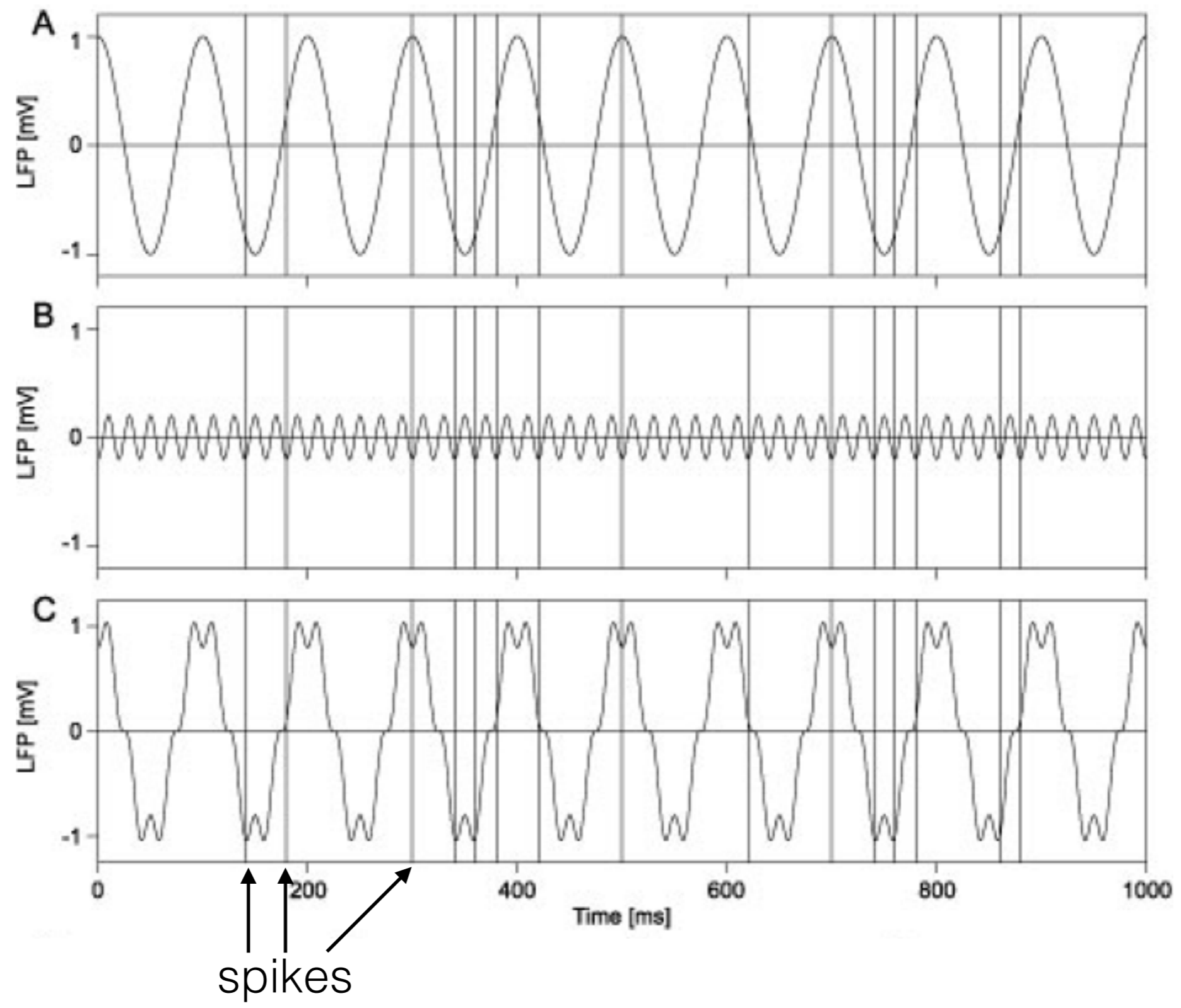
$\langle \cdot \rangle$: Mittelwert

Beispiel: simulierte spikes und LFP

10Hz

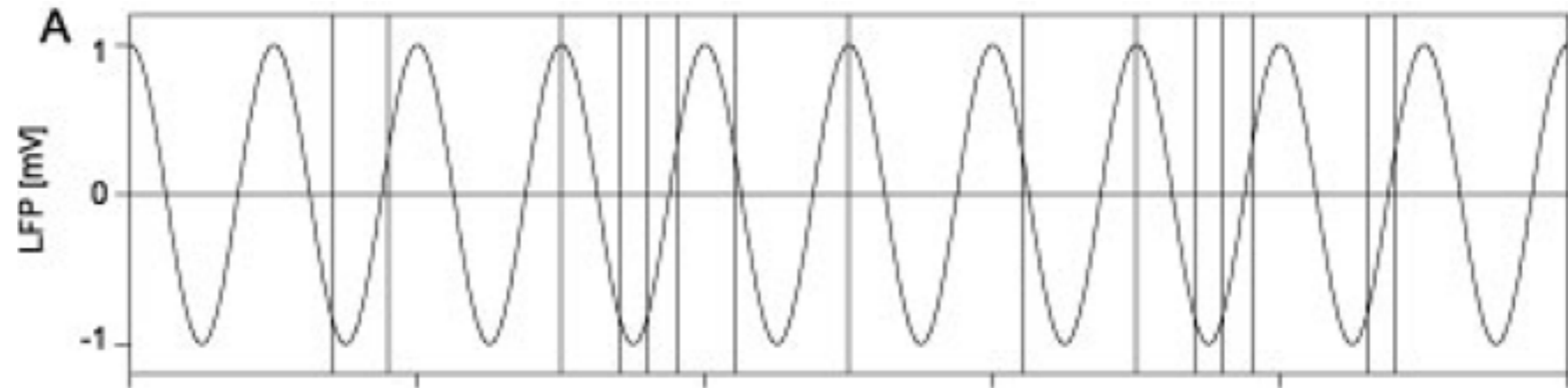
50Hz

Summe
aus A und B

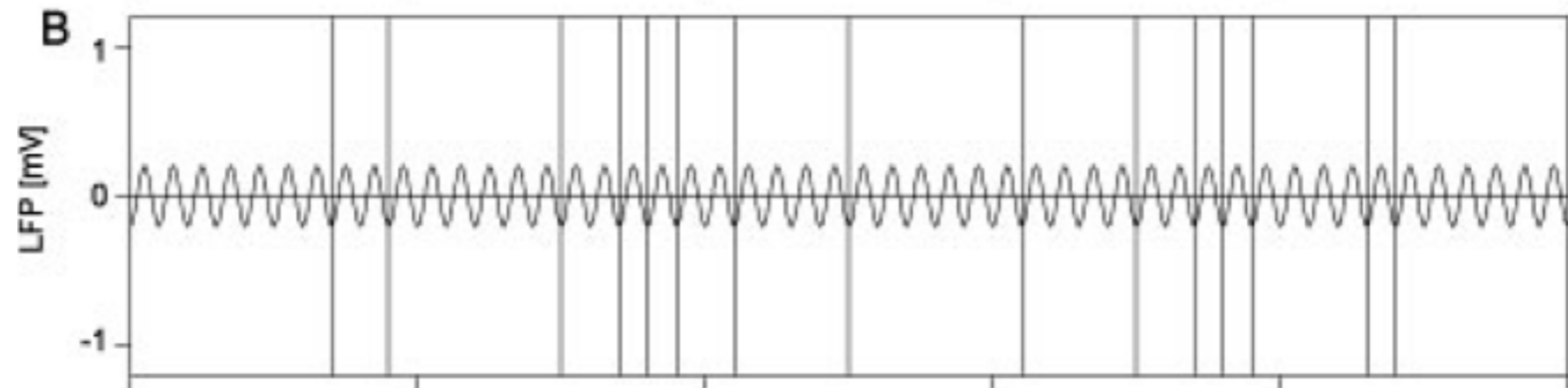


Beispiel: simulierte spikes und LFP

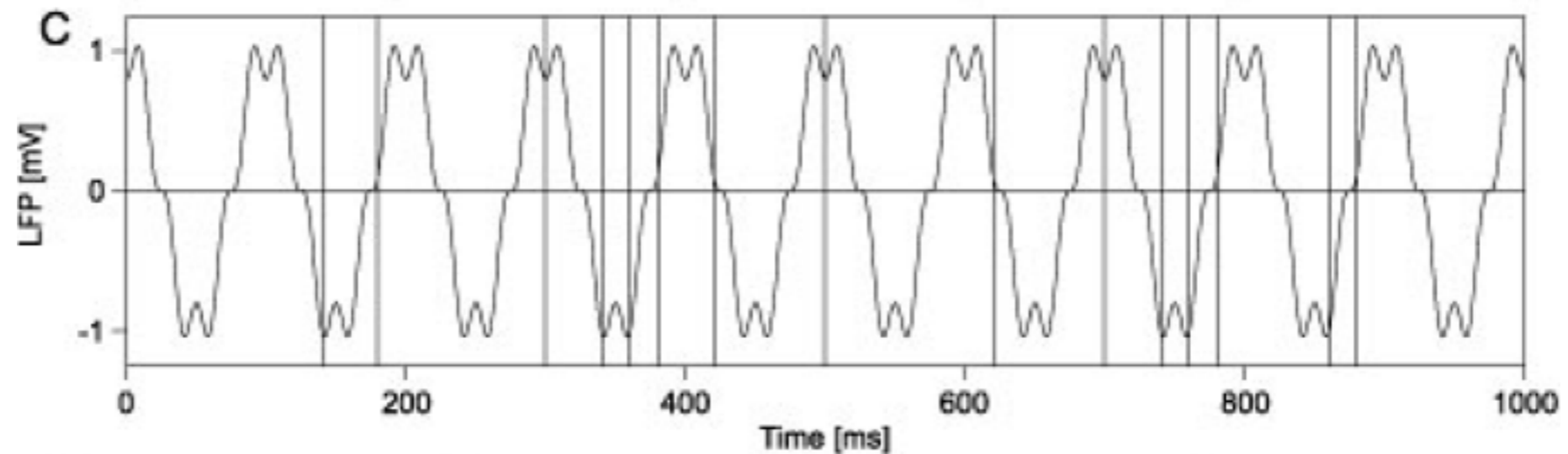
10Hz



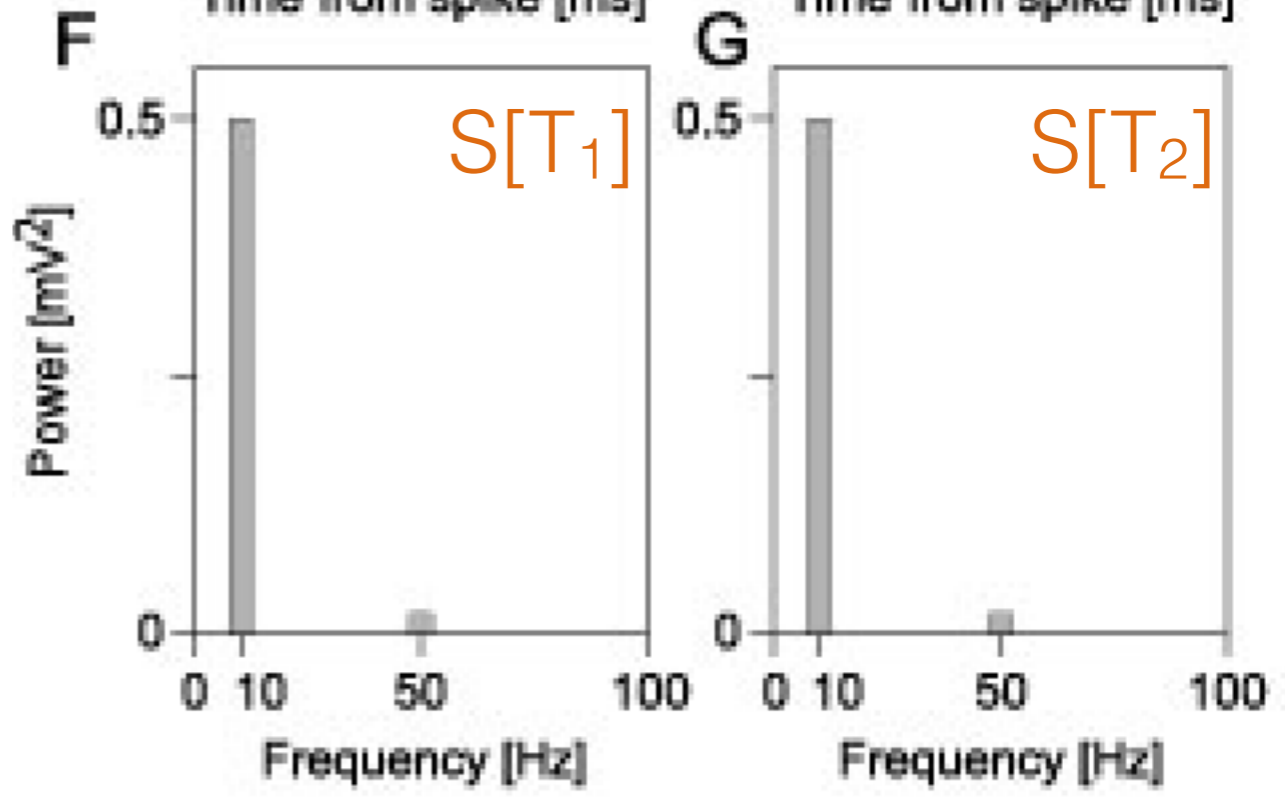
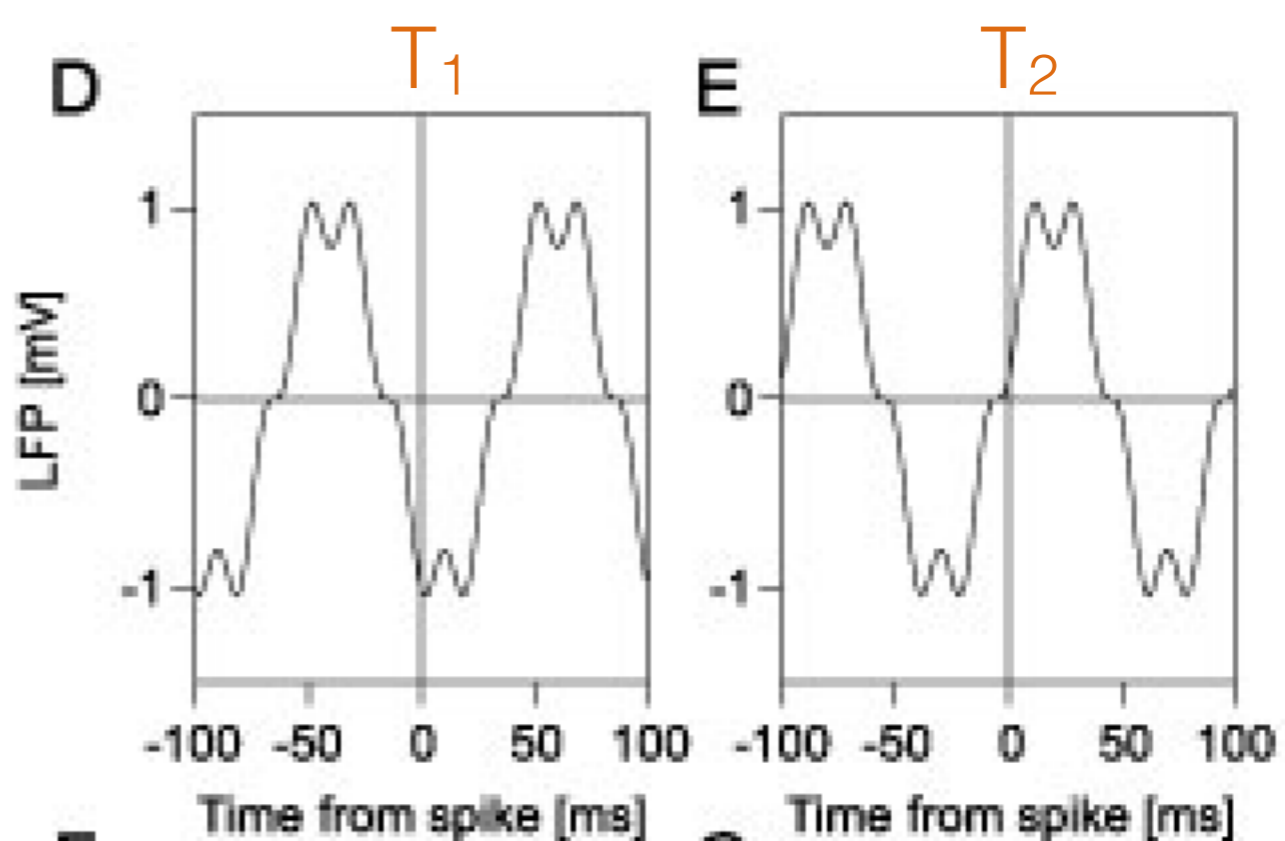
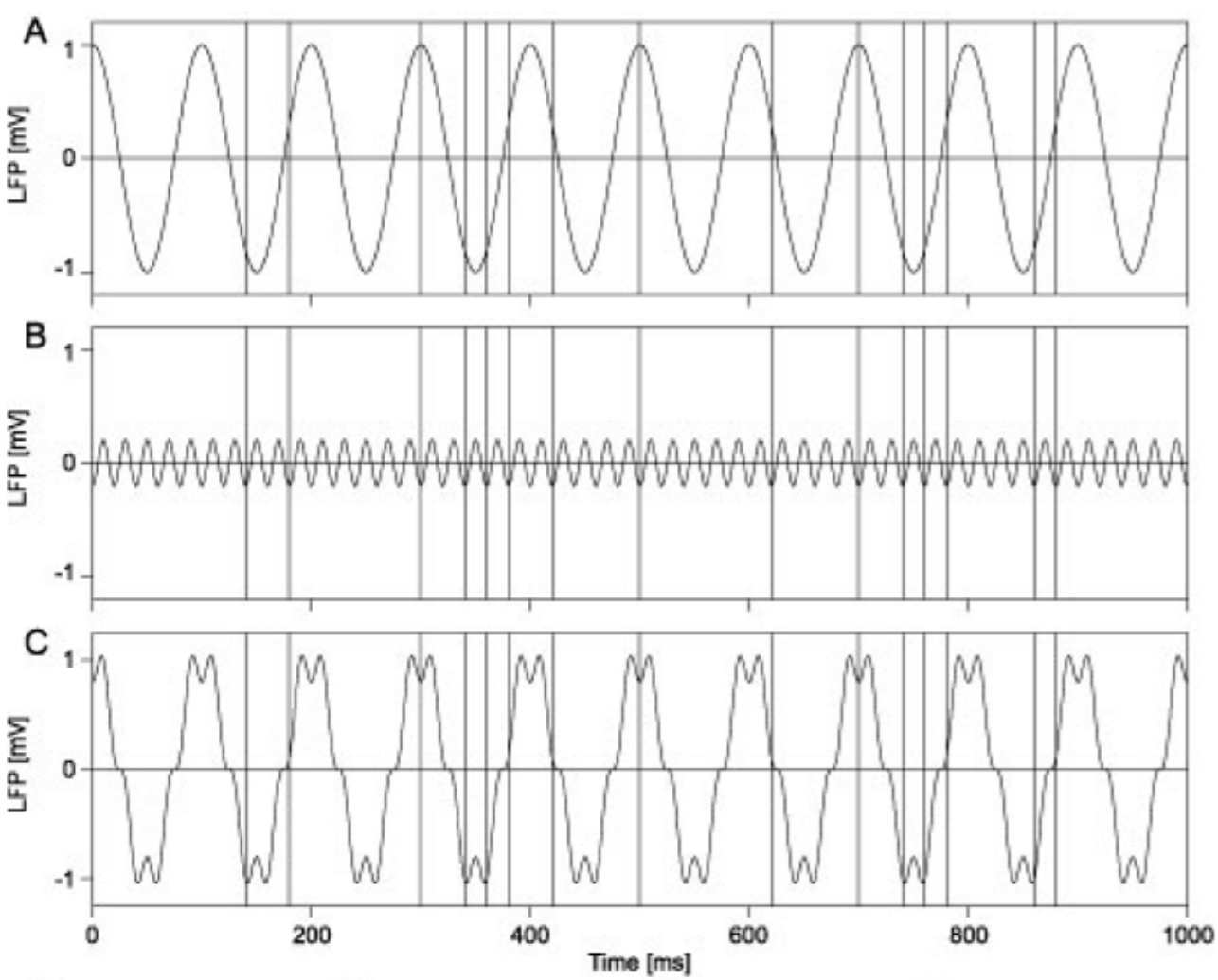
50Hz



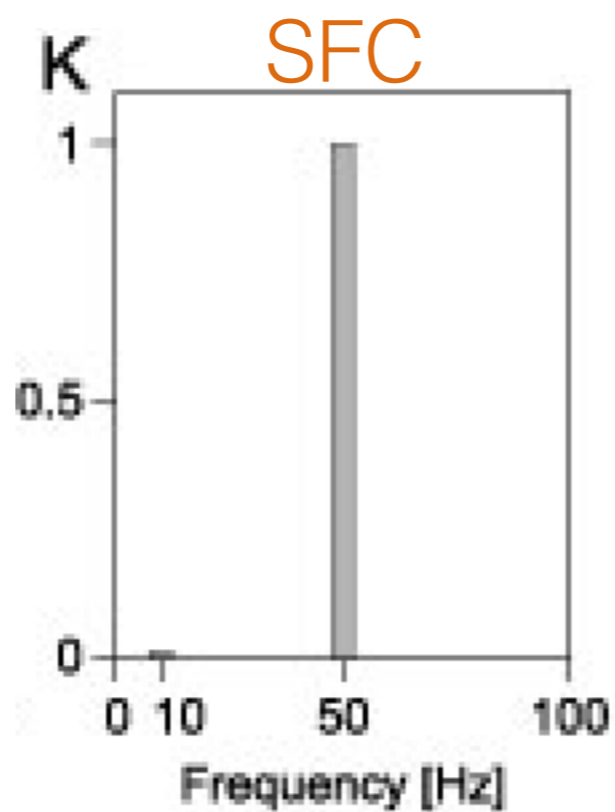
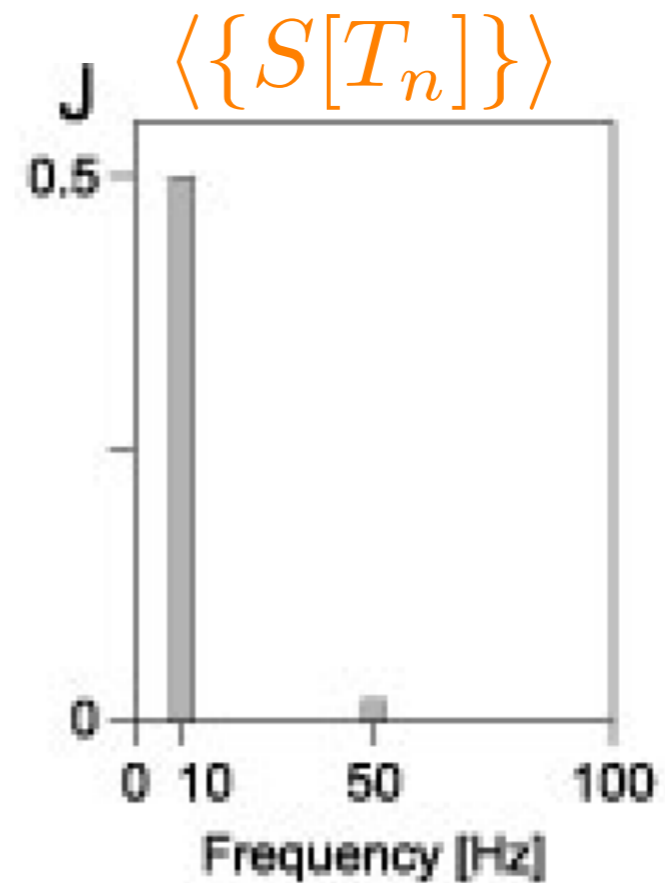
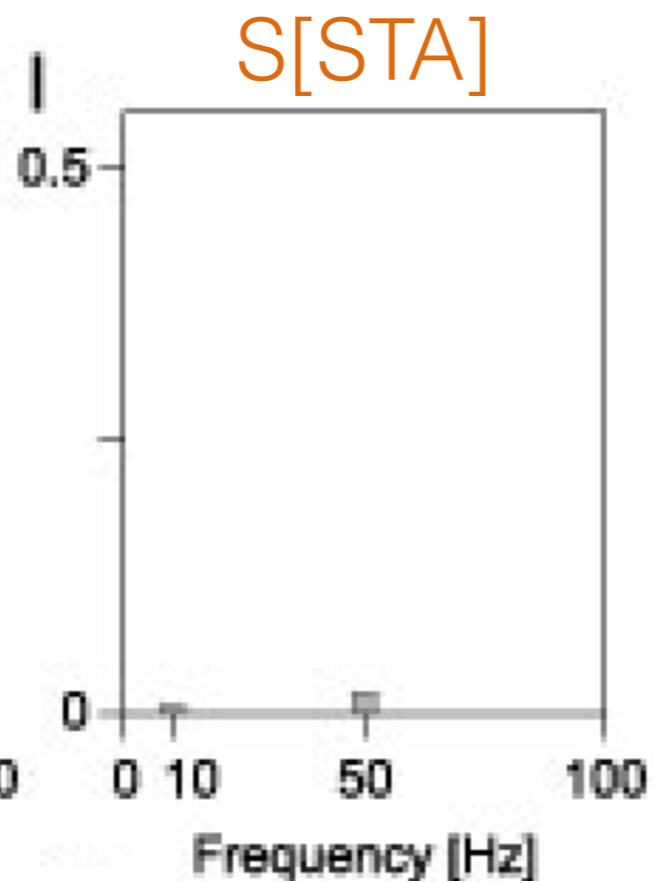
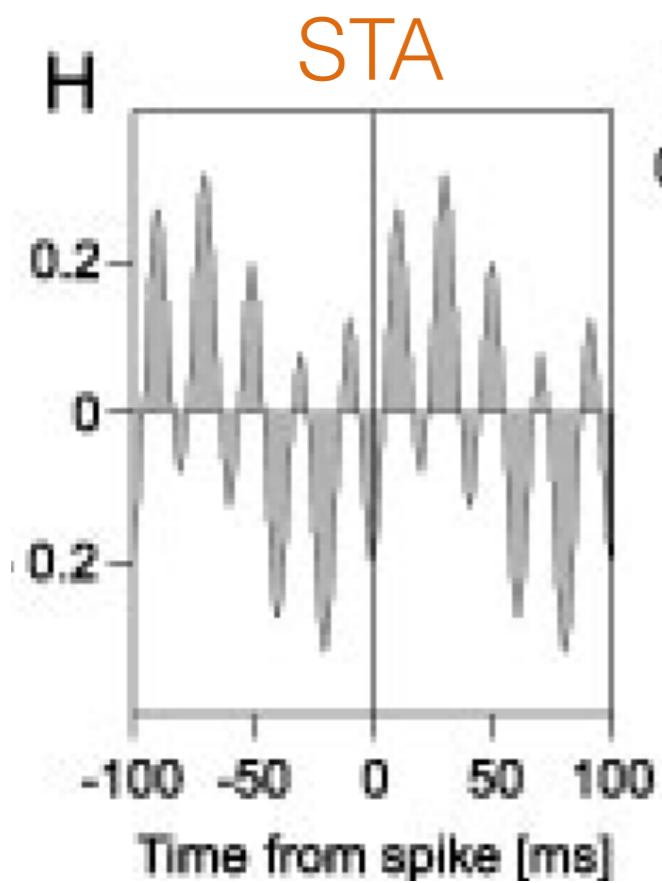
Summe
aus A und B



spikes sind **phasen-synchronisiert mit 50Hz Oszillation,**
nicht mit 10 Hz Oszillation



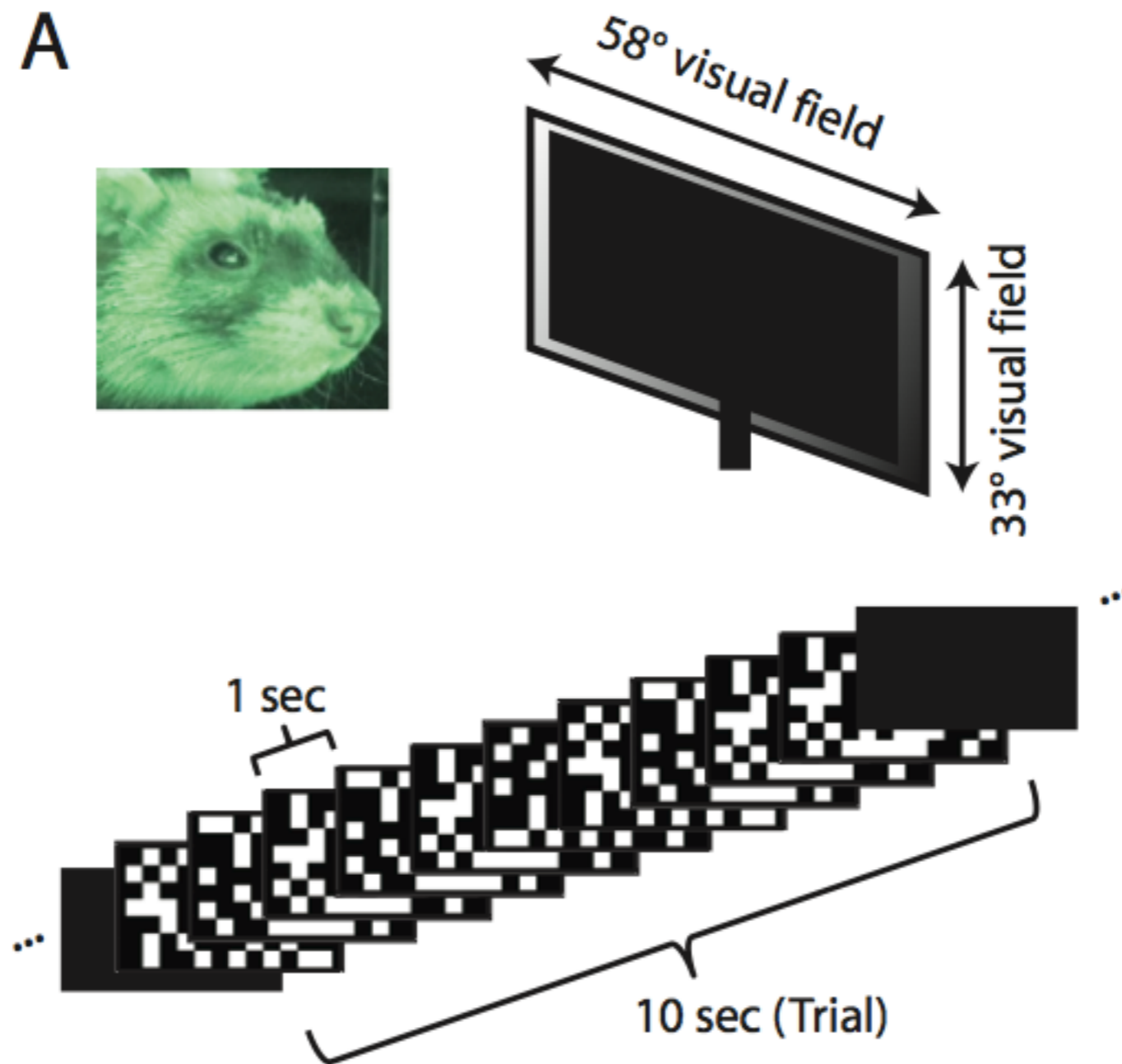
PSD ist unabhängig von Phase



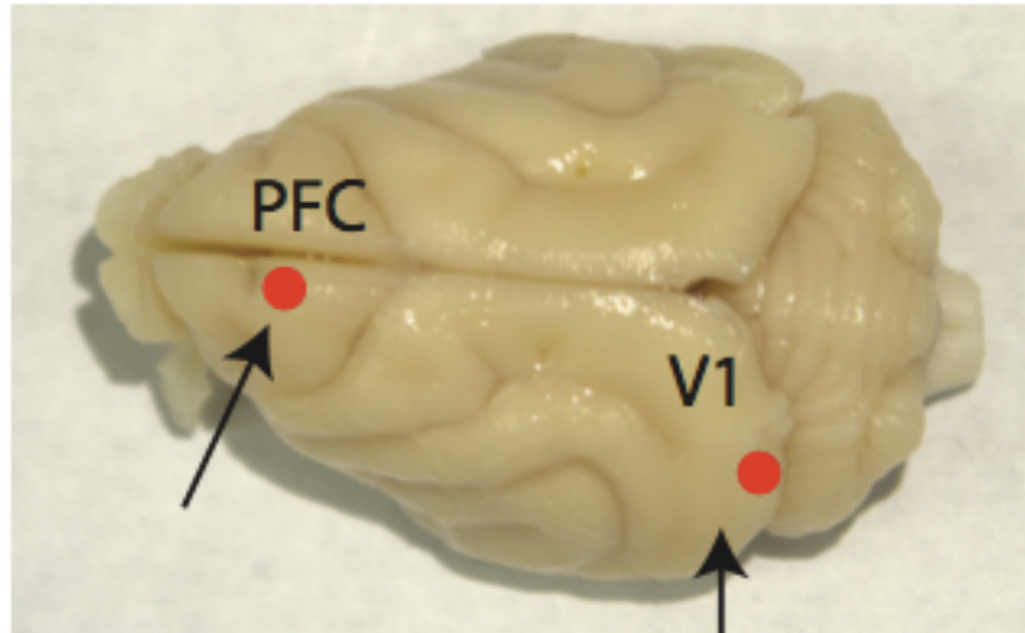
Phasensynchronisation
nur bei 50Hz

Beispiel:

Artikel von K. K. Sellers et al., J. Neurophysiol. (2014)



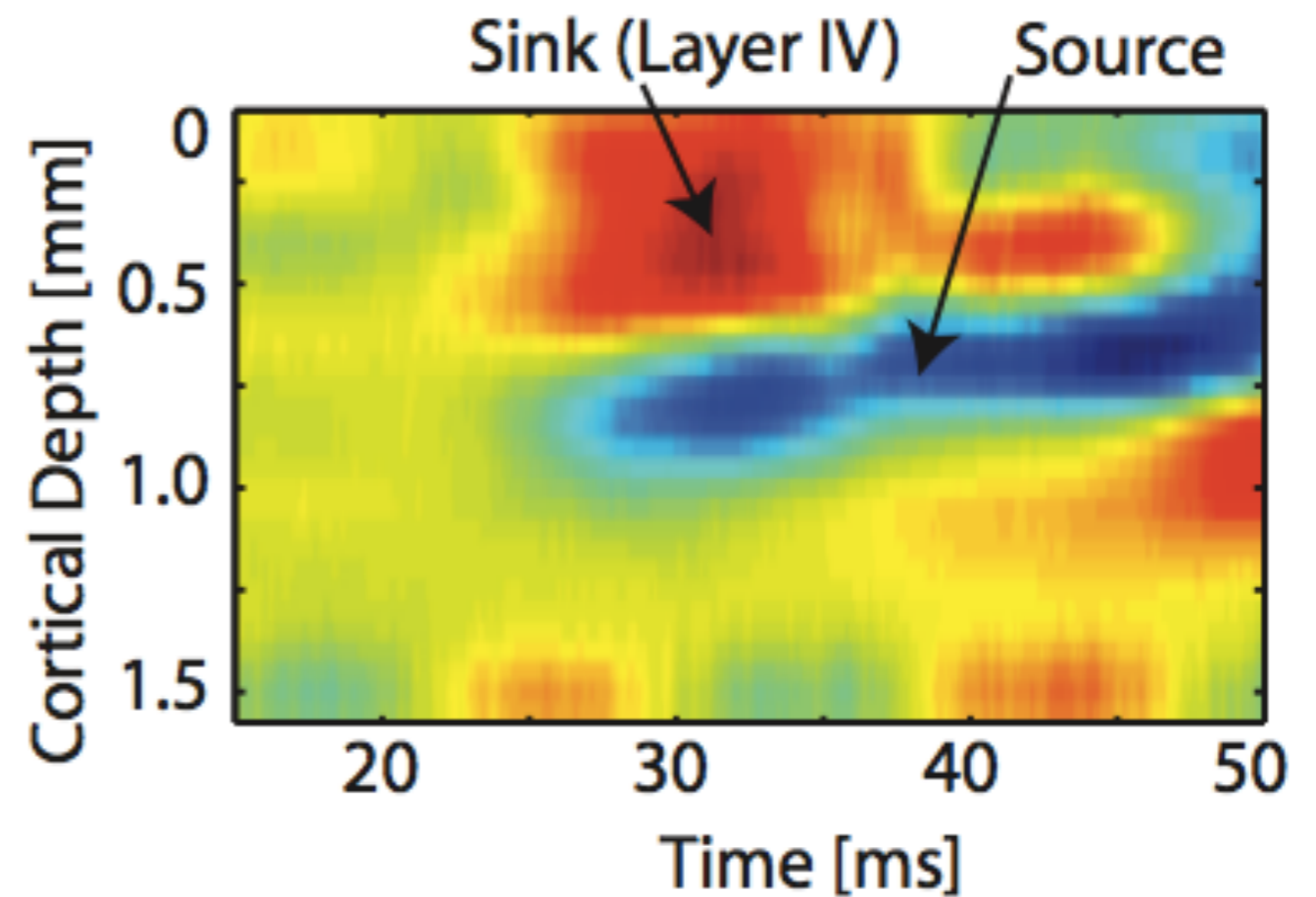
Lateral-Elektroden im PFC



Anterior Sigmoid
Gyrus

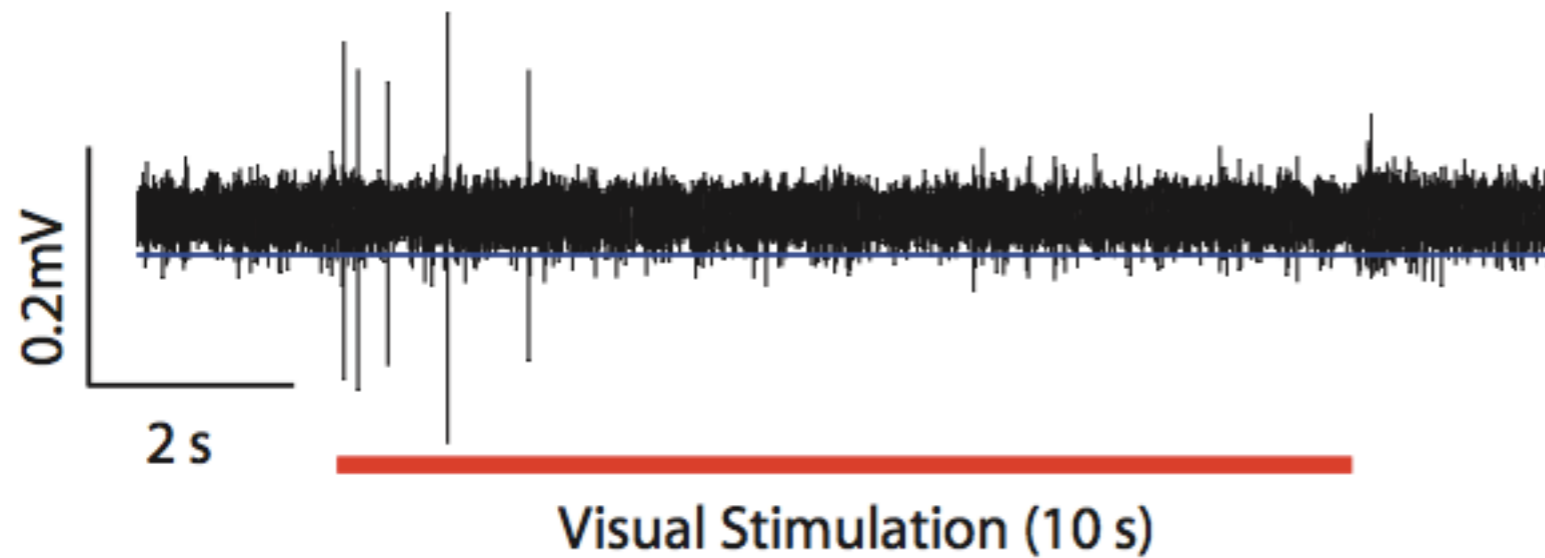
Lateral Gyrus

Current Source Density



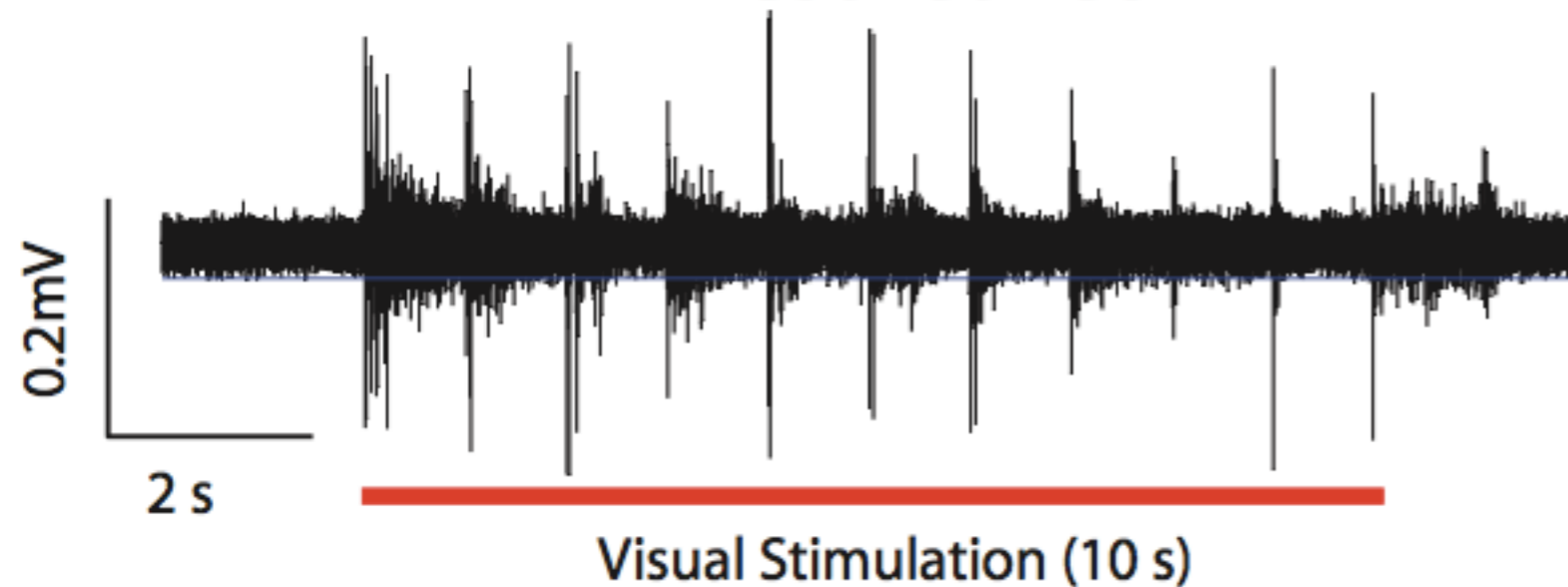
Zeitreihe einer Elektrode

Awake



aperiodische neuronale Antwort zu **periodischem** Stimulus

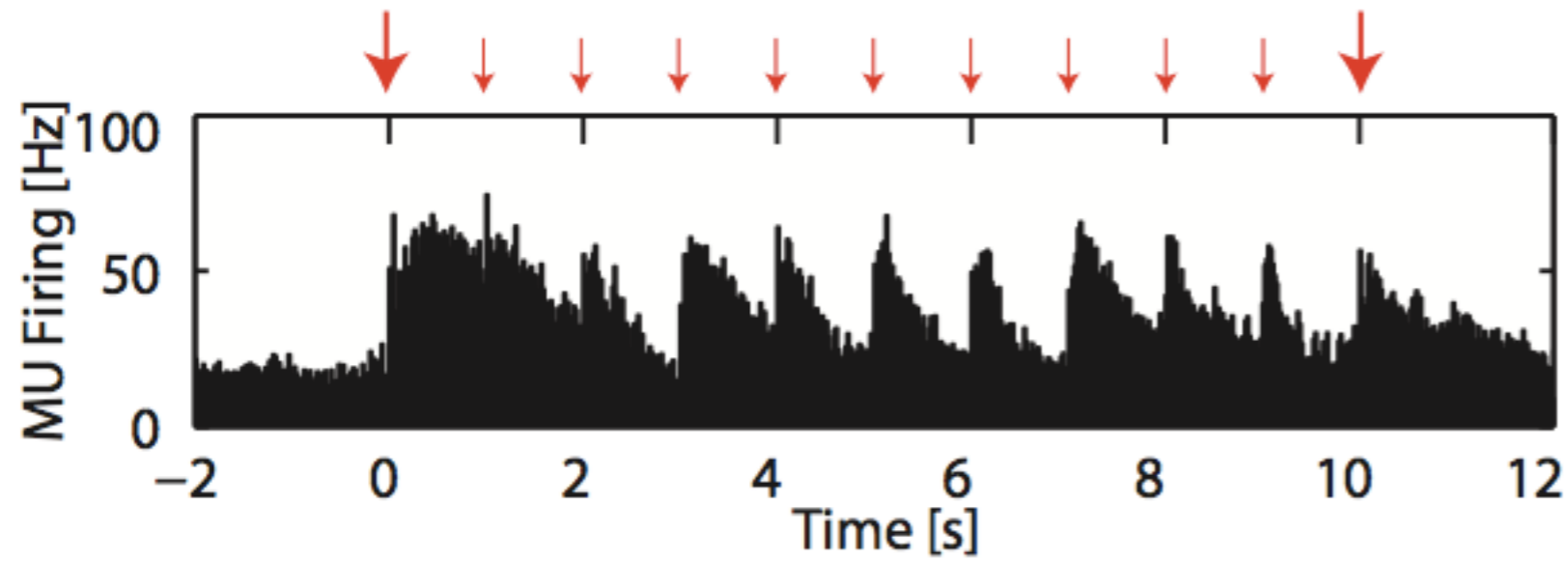
Anesthetized



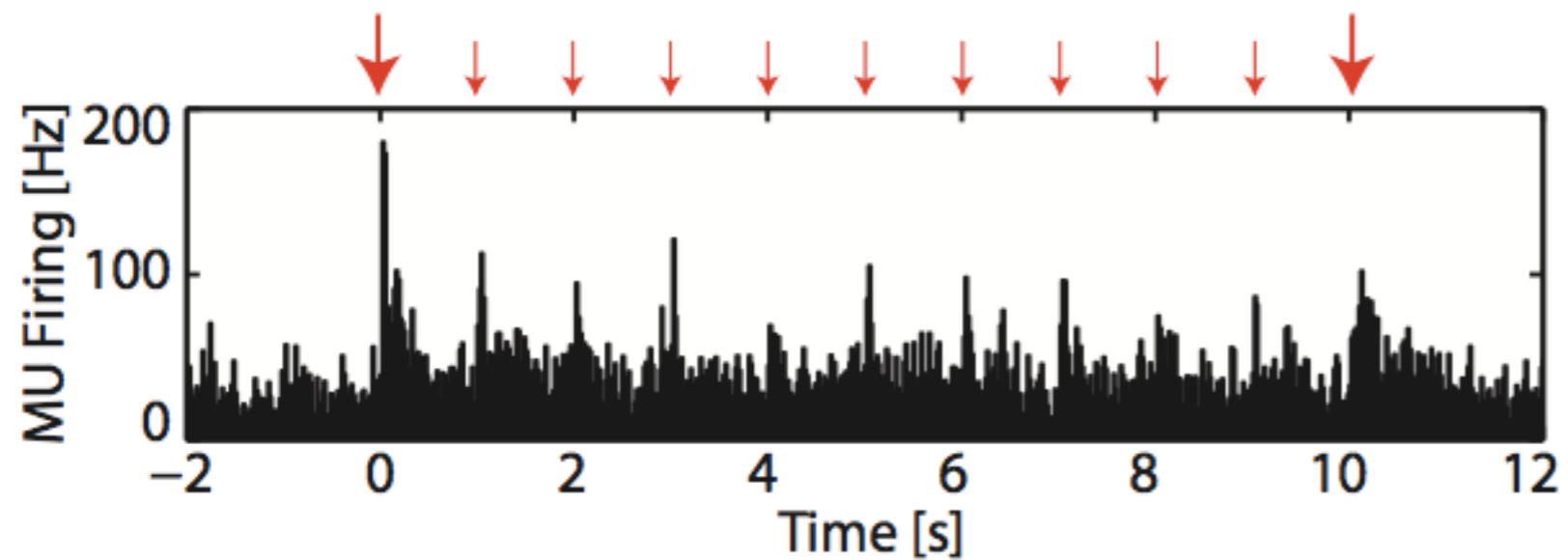
periodische neuronale Antwort zu **periodischem** Stimulus

Instantane Feuerrate an einer Elektrode

wach

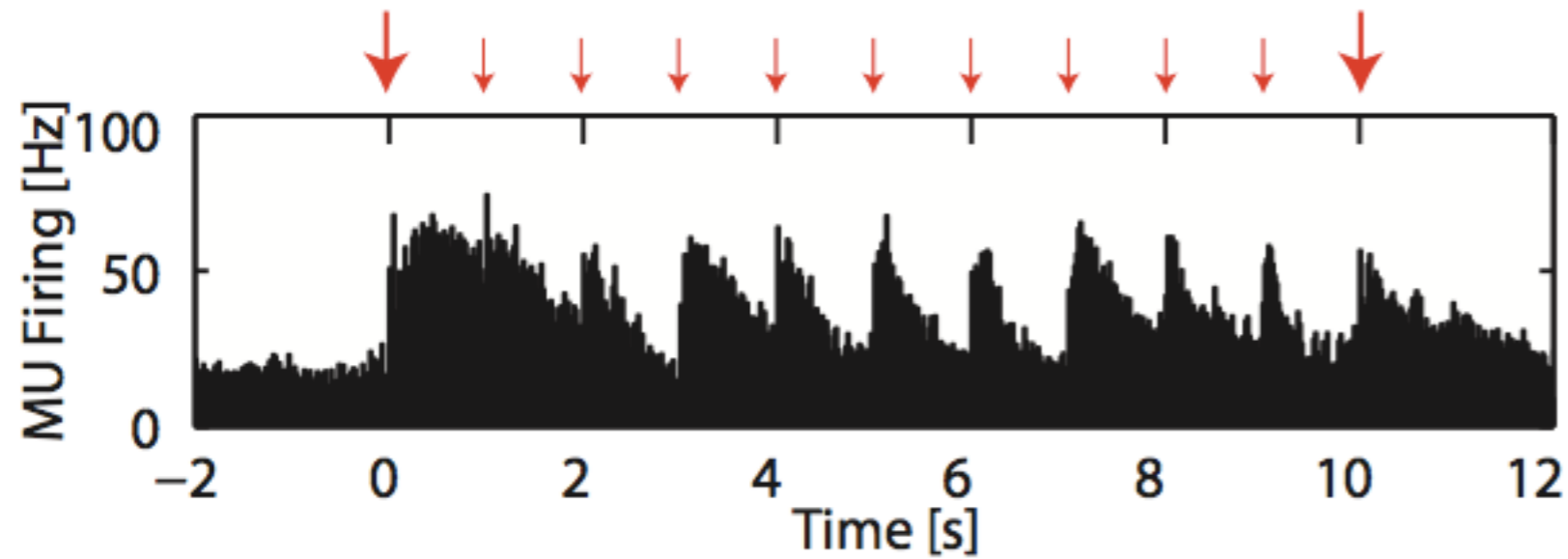


anästhesiert



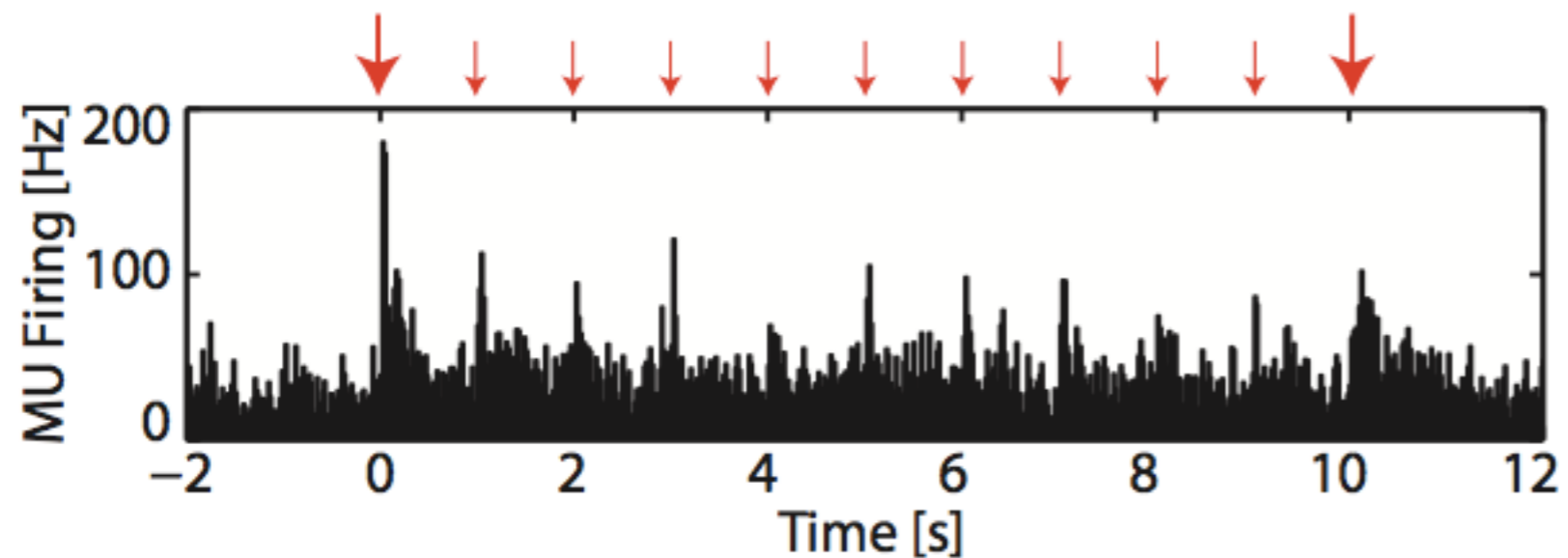
Instantane Feuerrate an einer Elektrode

wach



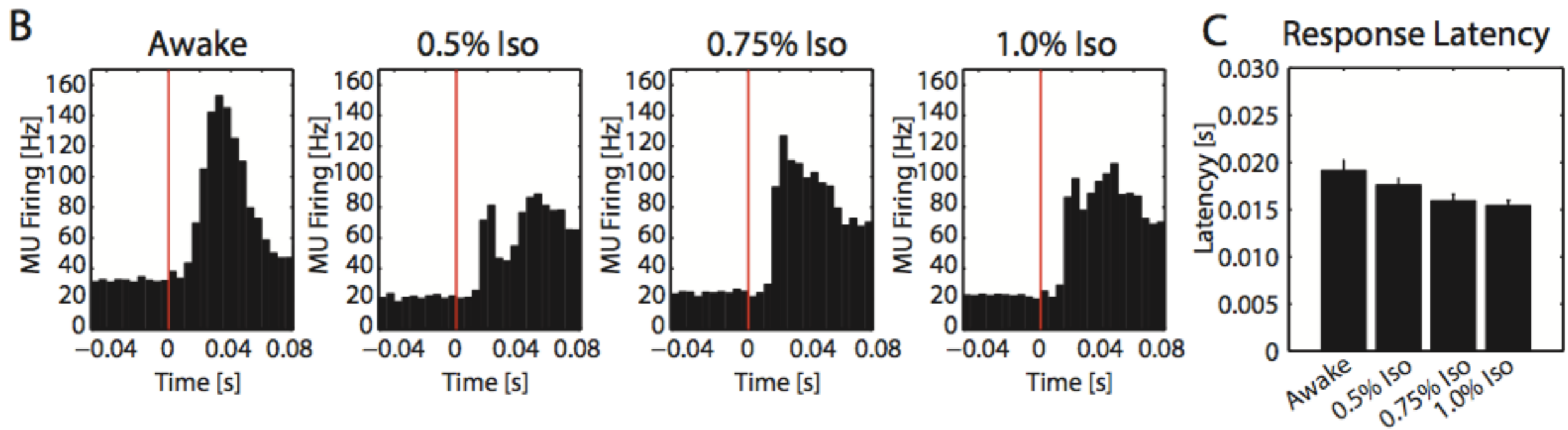
schwach periodische Antwort
zu **periodischem** Stimulus

anästhesiert



Feuerrate kein aussagekräftiges Maß

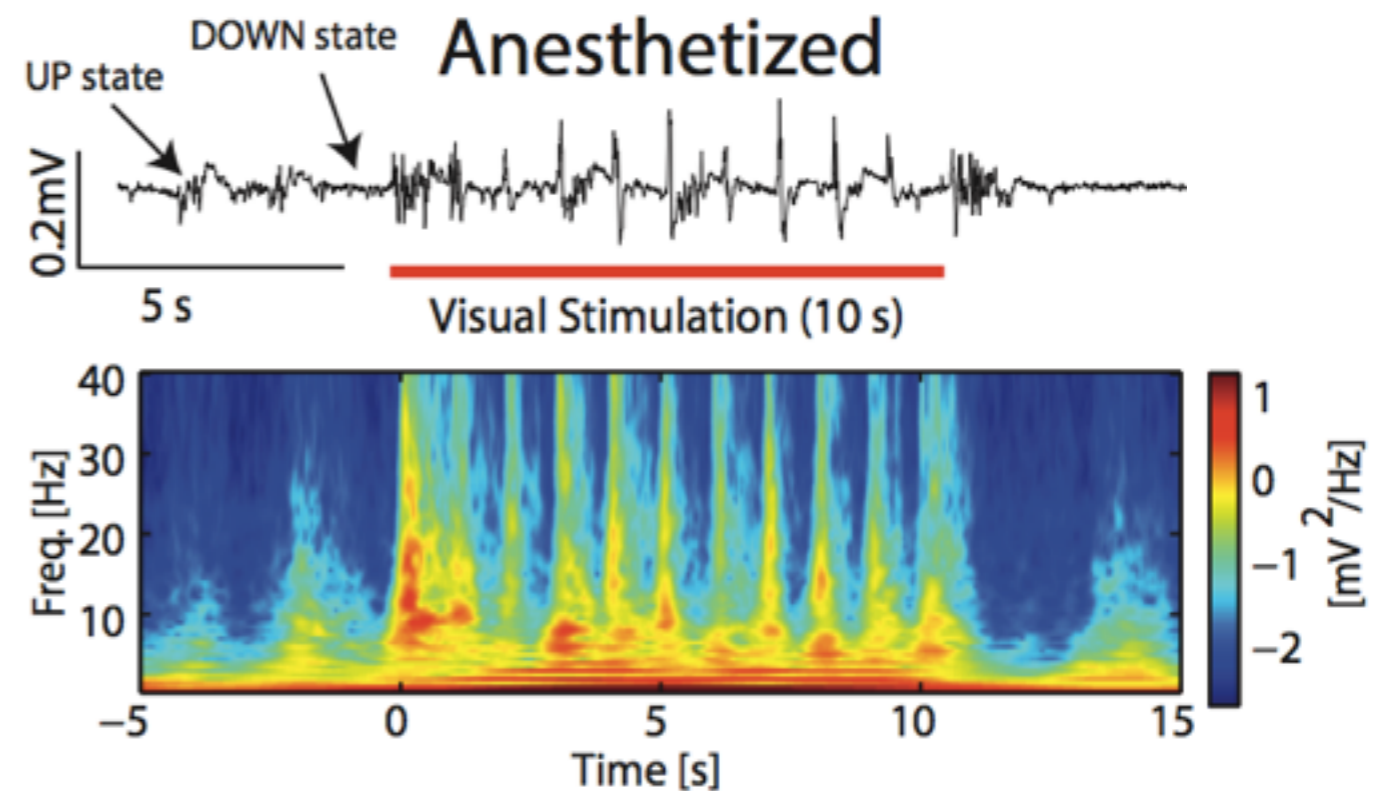
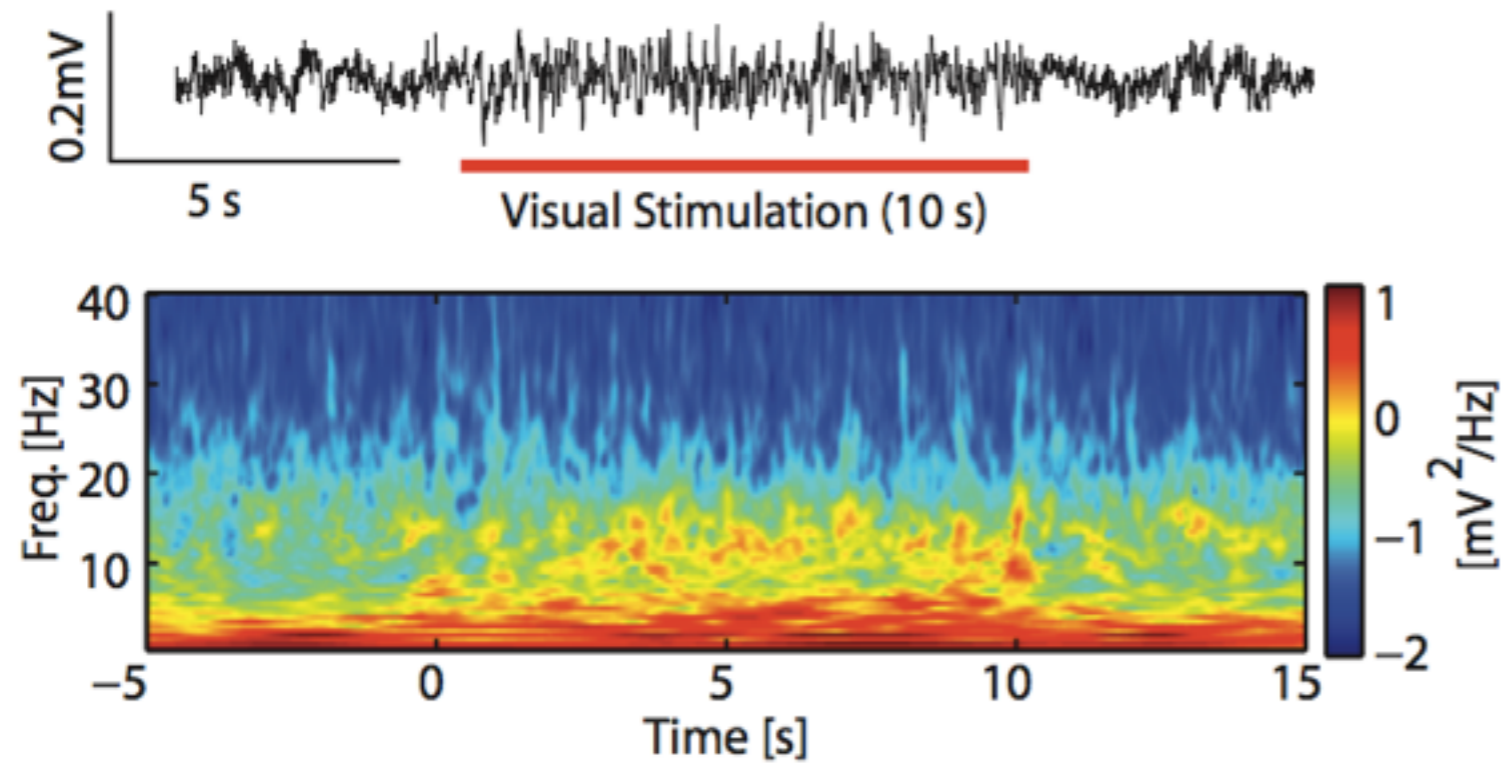
Verzögerung der spikes zum Stimulus



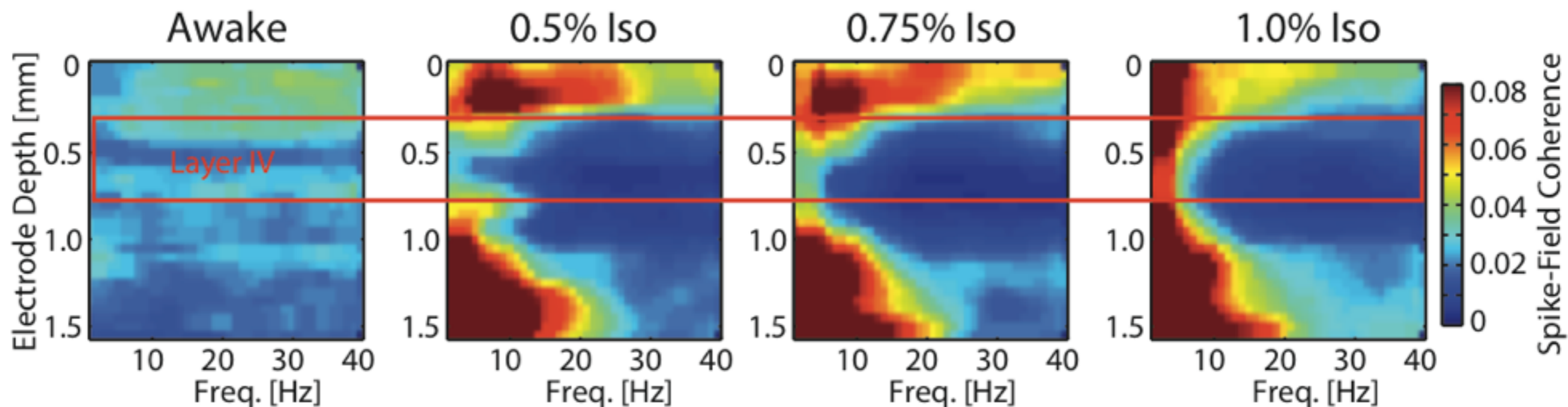
Statistik über alle trials und Elektroden

Zeit-Frequenz Darstellung der Zeitserie einer Elektrode

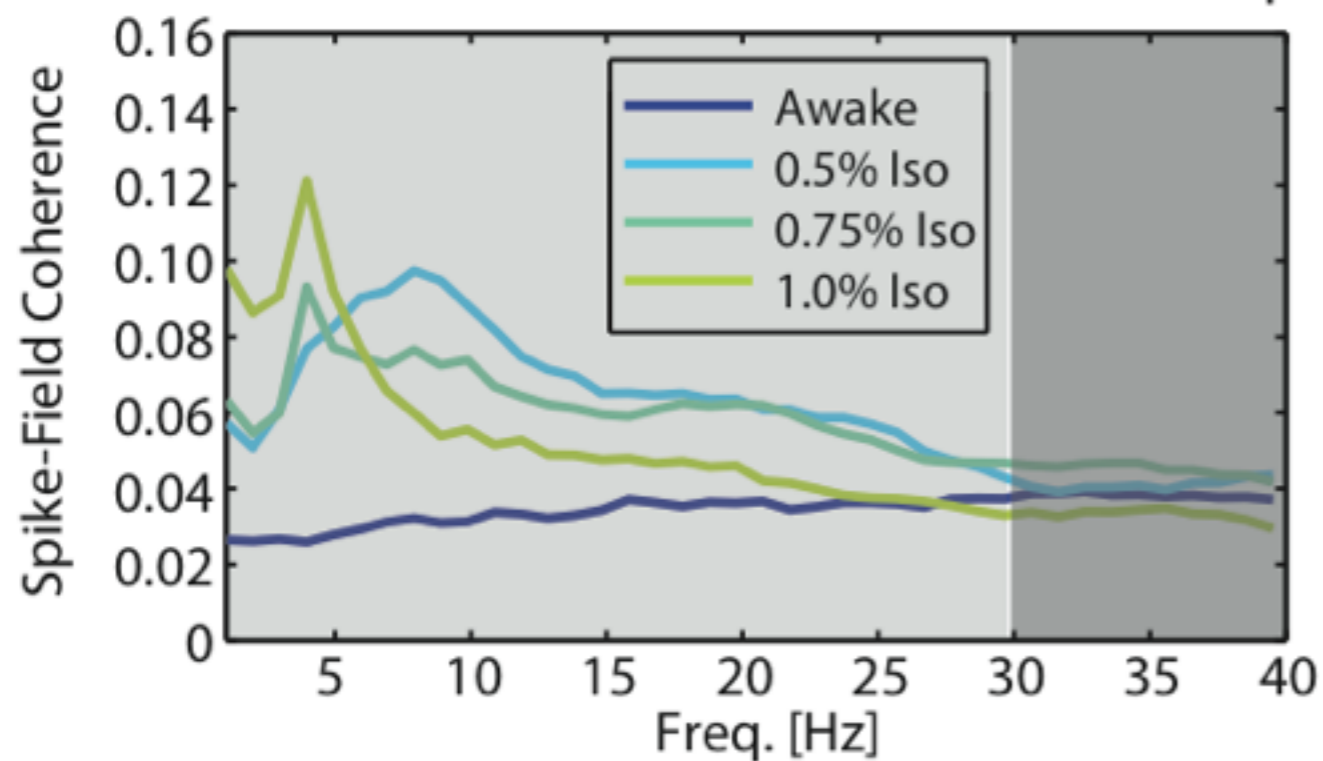
Awake



Spike-Field Coherence

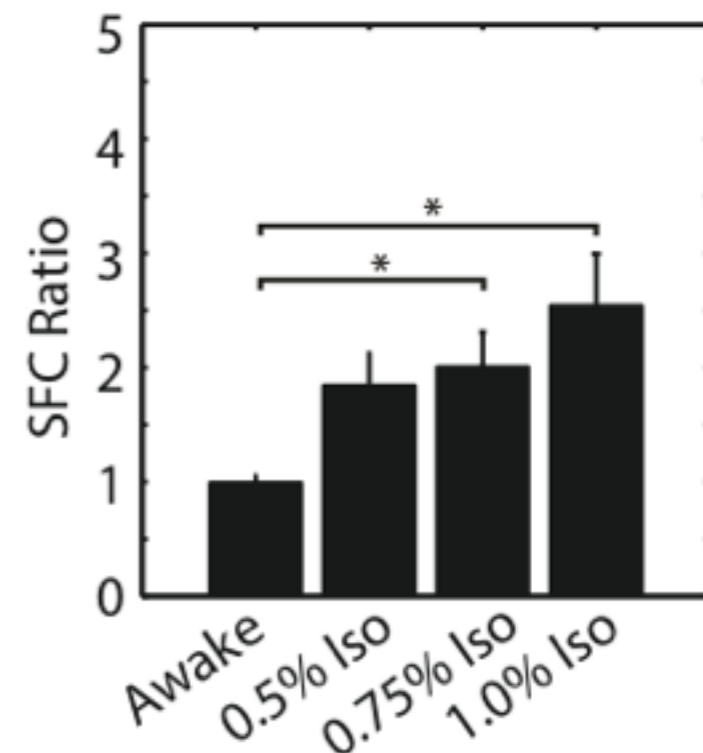


Supragranular

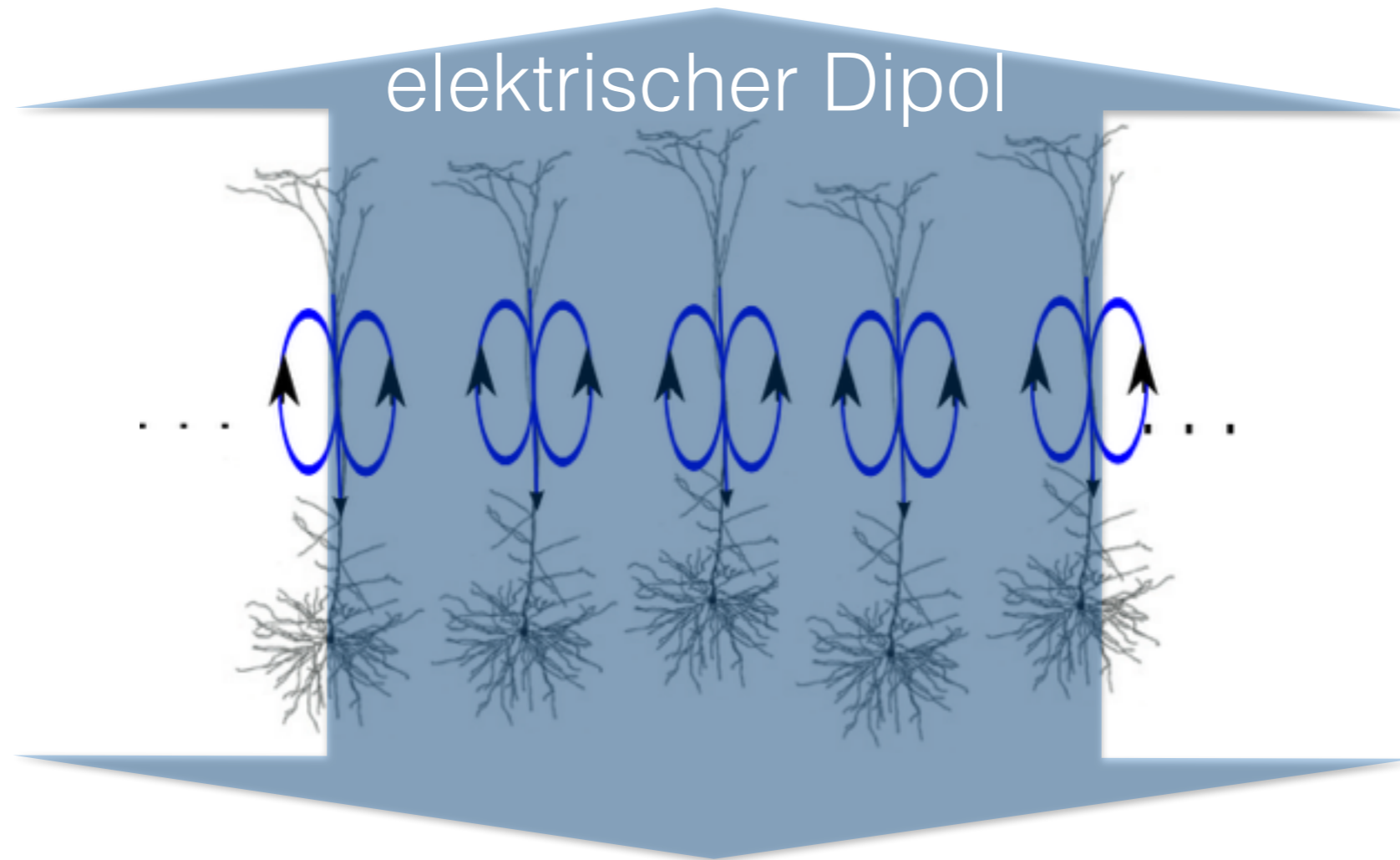


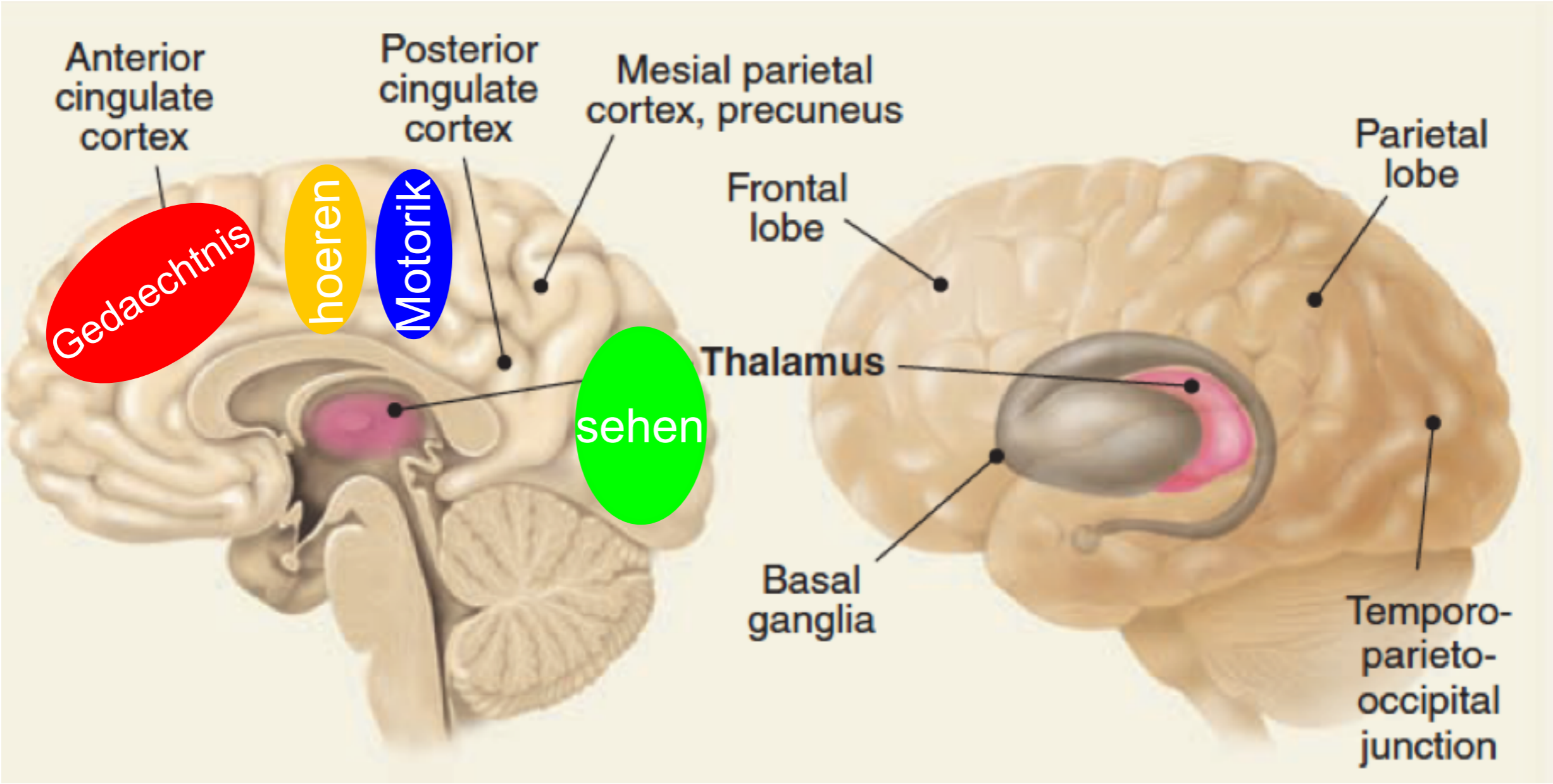
SFC Ratio =

$$\frac{\text{SFC}(0.5\text{Hz to }30\text{Hz})}{\text{SFC}(30\text{ Hz to }40\text{Hz})}$$

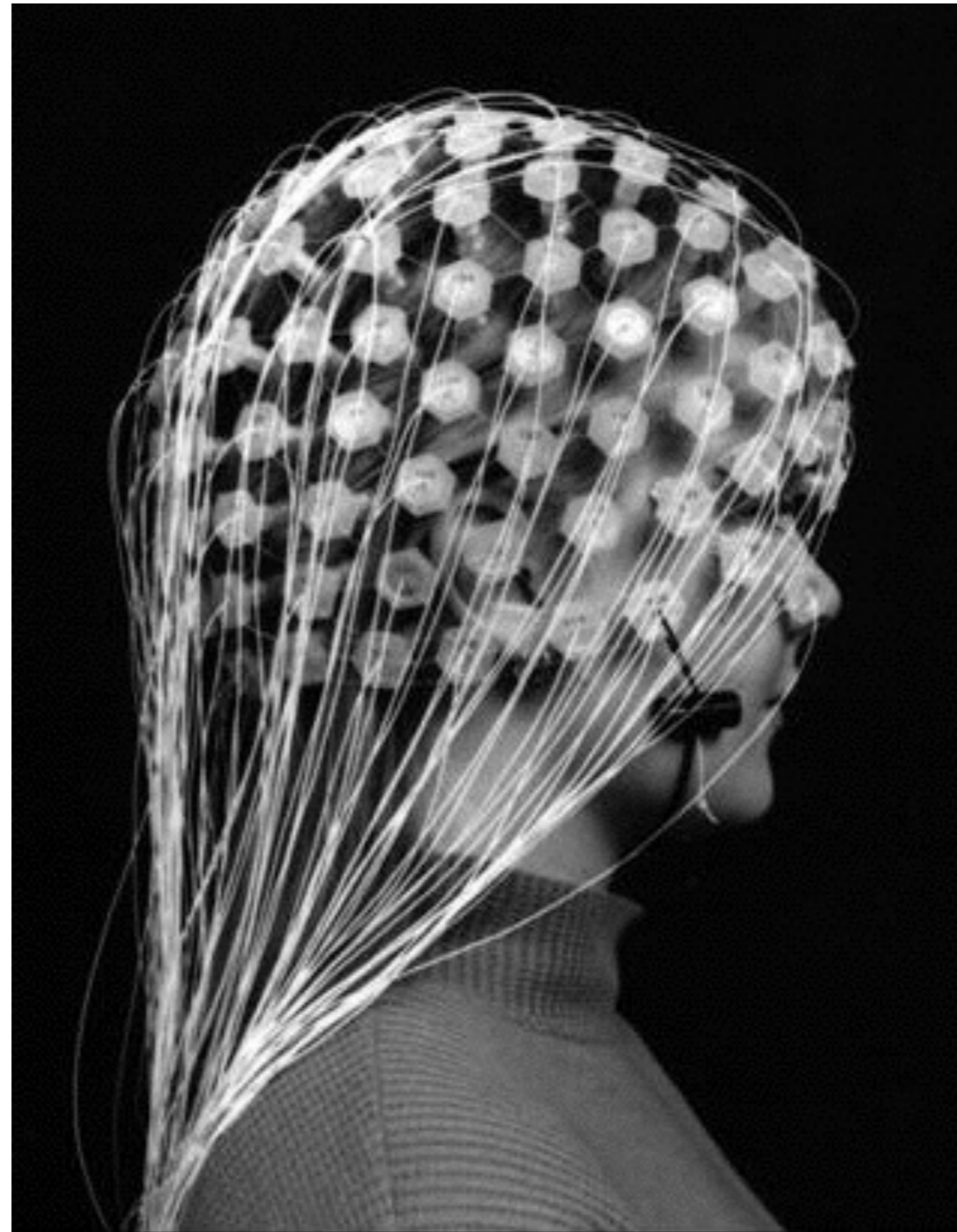


c) Neuronenpopulationen

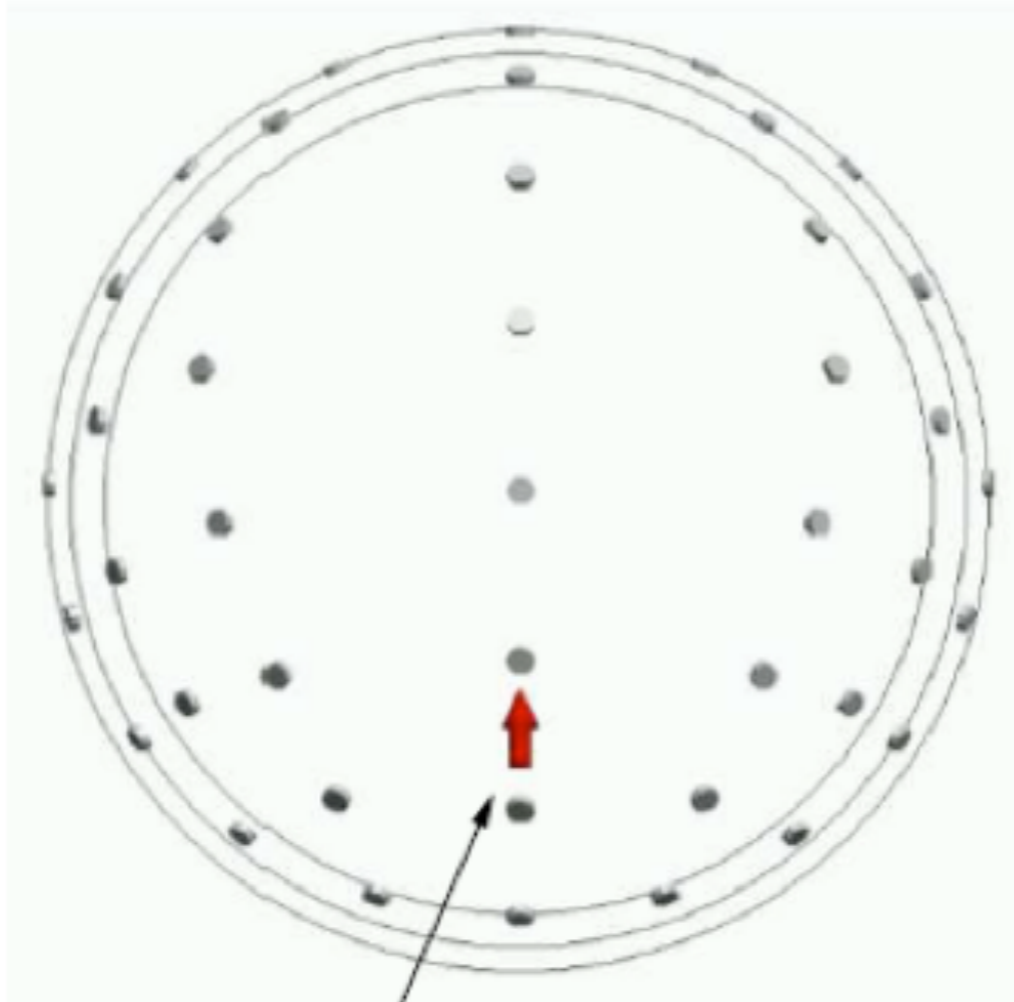




Elektroenzephalogram (EEG)

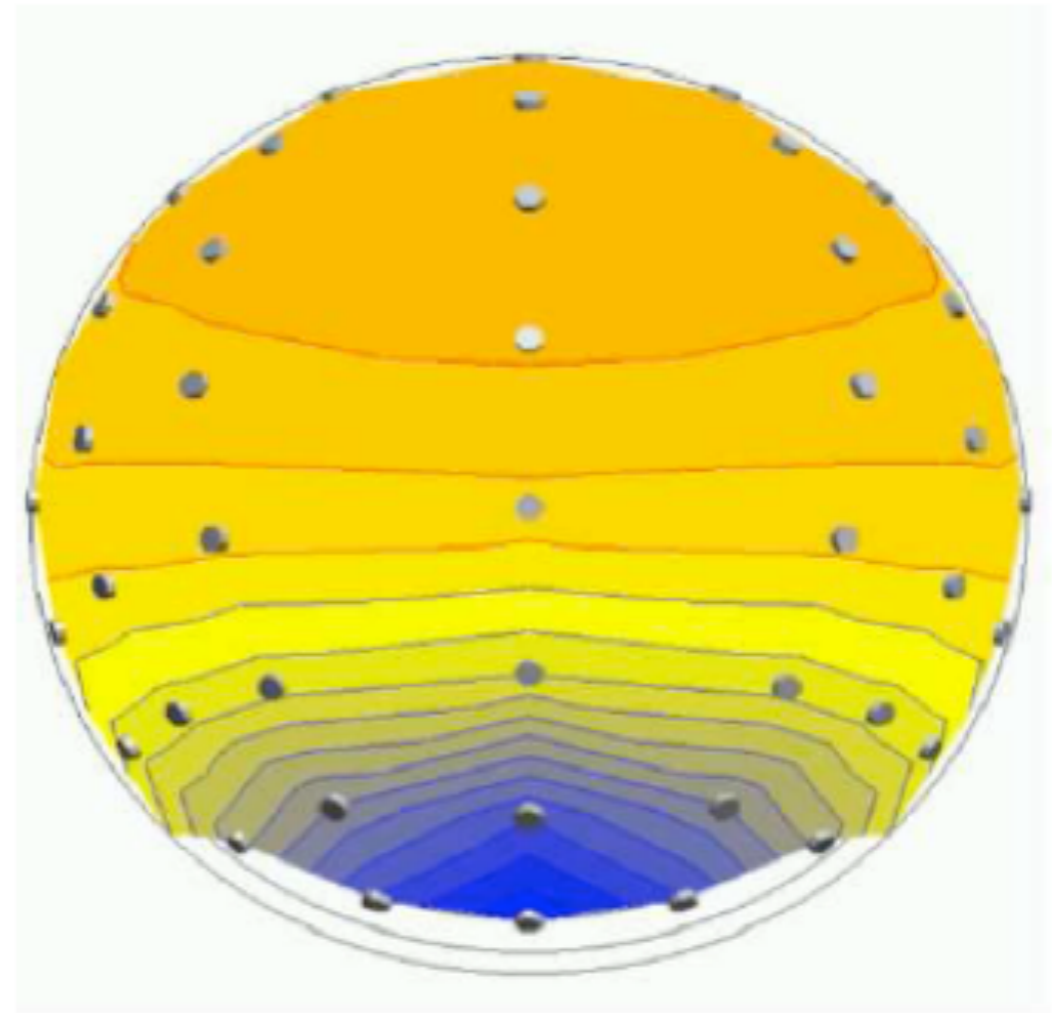


elektrischer Dipol

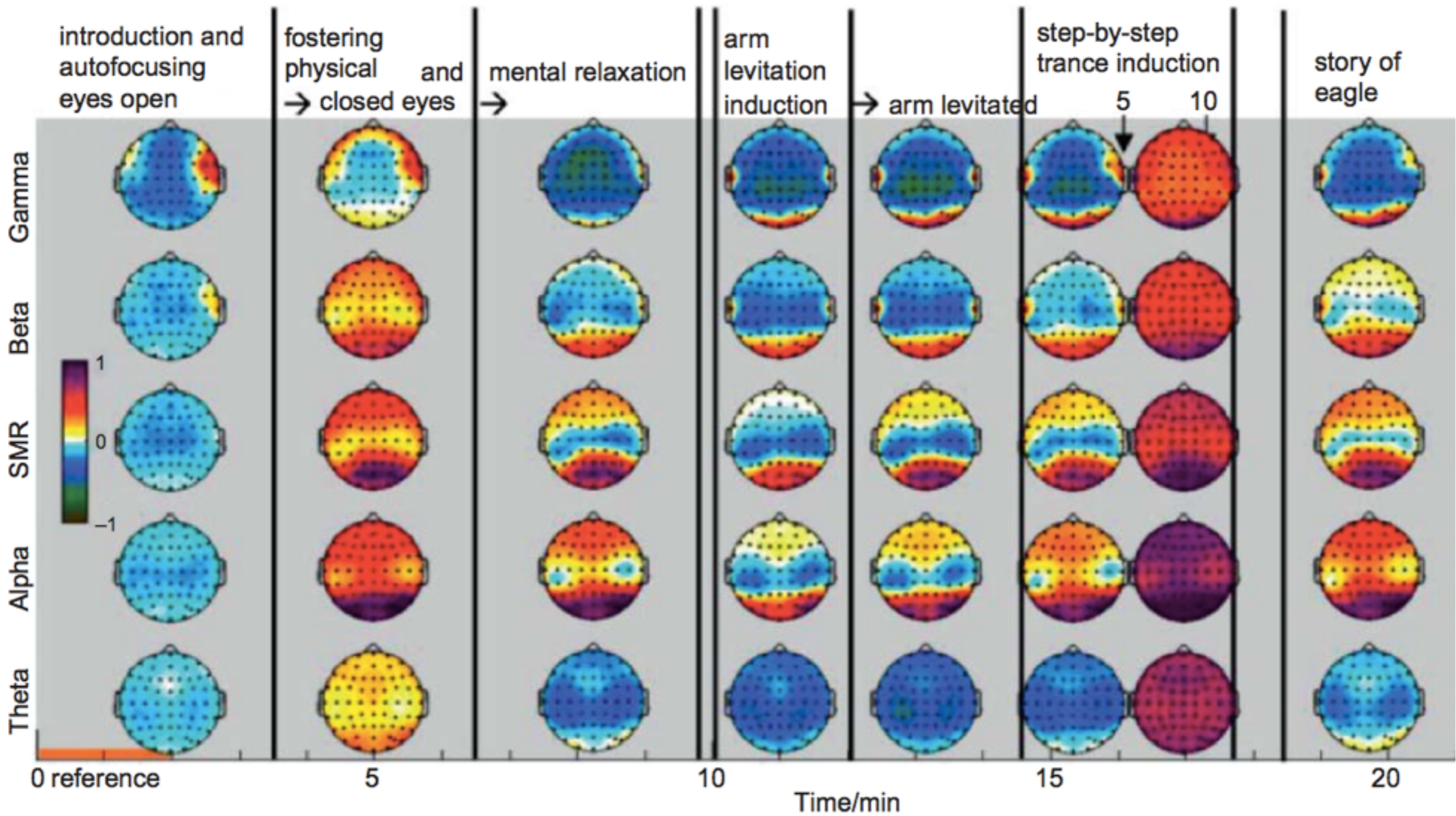


Dipol

EEG



Beispiel: Hypnose



Fragen:

gibt es phasensynchronisierte Teile des Gehirns ?

erkennt man diese im EEG ?

welche Elektroden sind synchronisiert ?

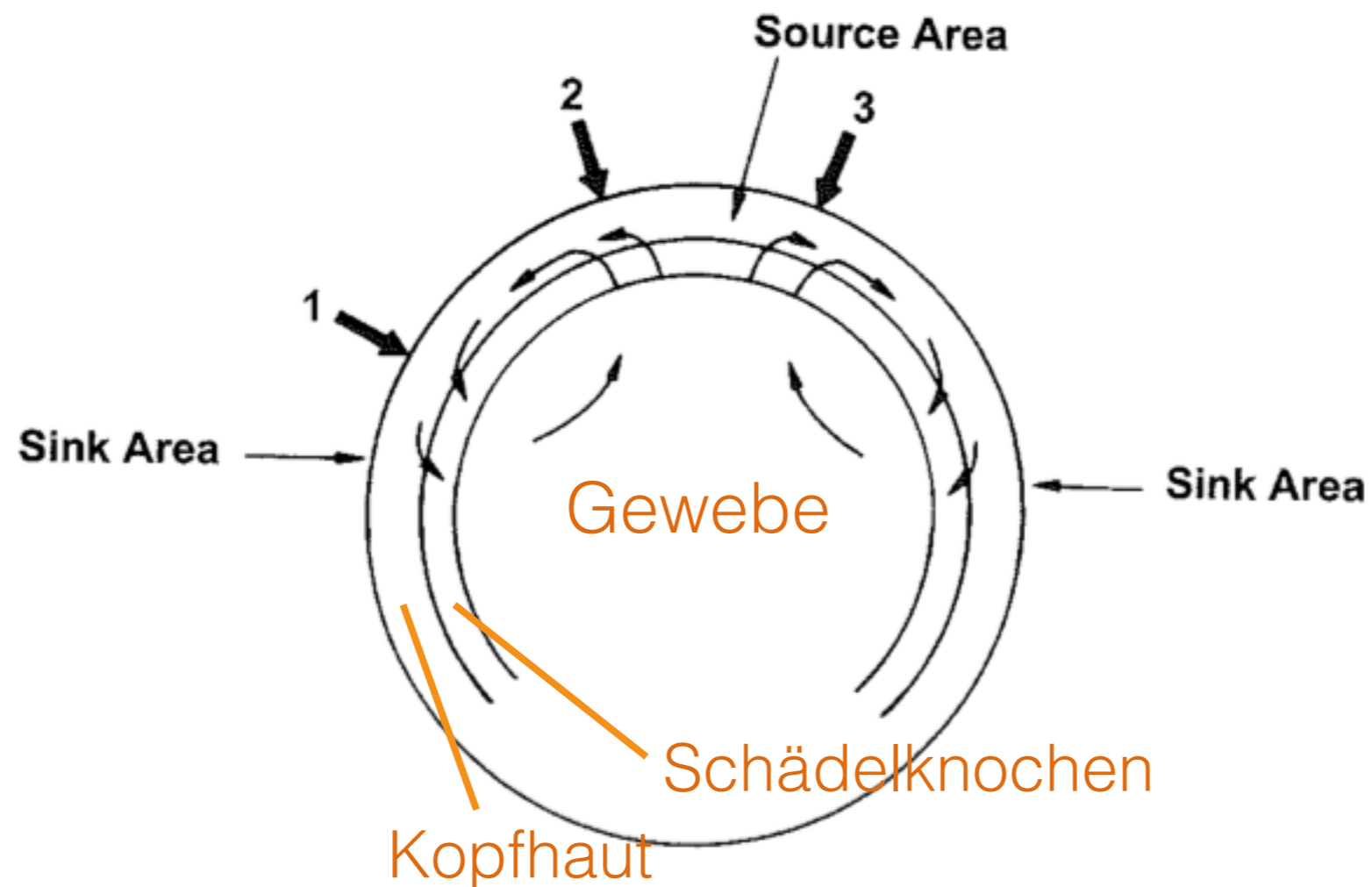
Idee:

berechne räumliche und zeitliche Synchronisation
des EEG

Problem:

benachbarte Elektroden sind synchronisiert durch

Volumenleitfähigkeit



Man kann zeigen, dass

CSD der Stromdichte-Gradient

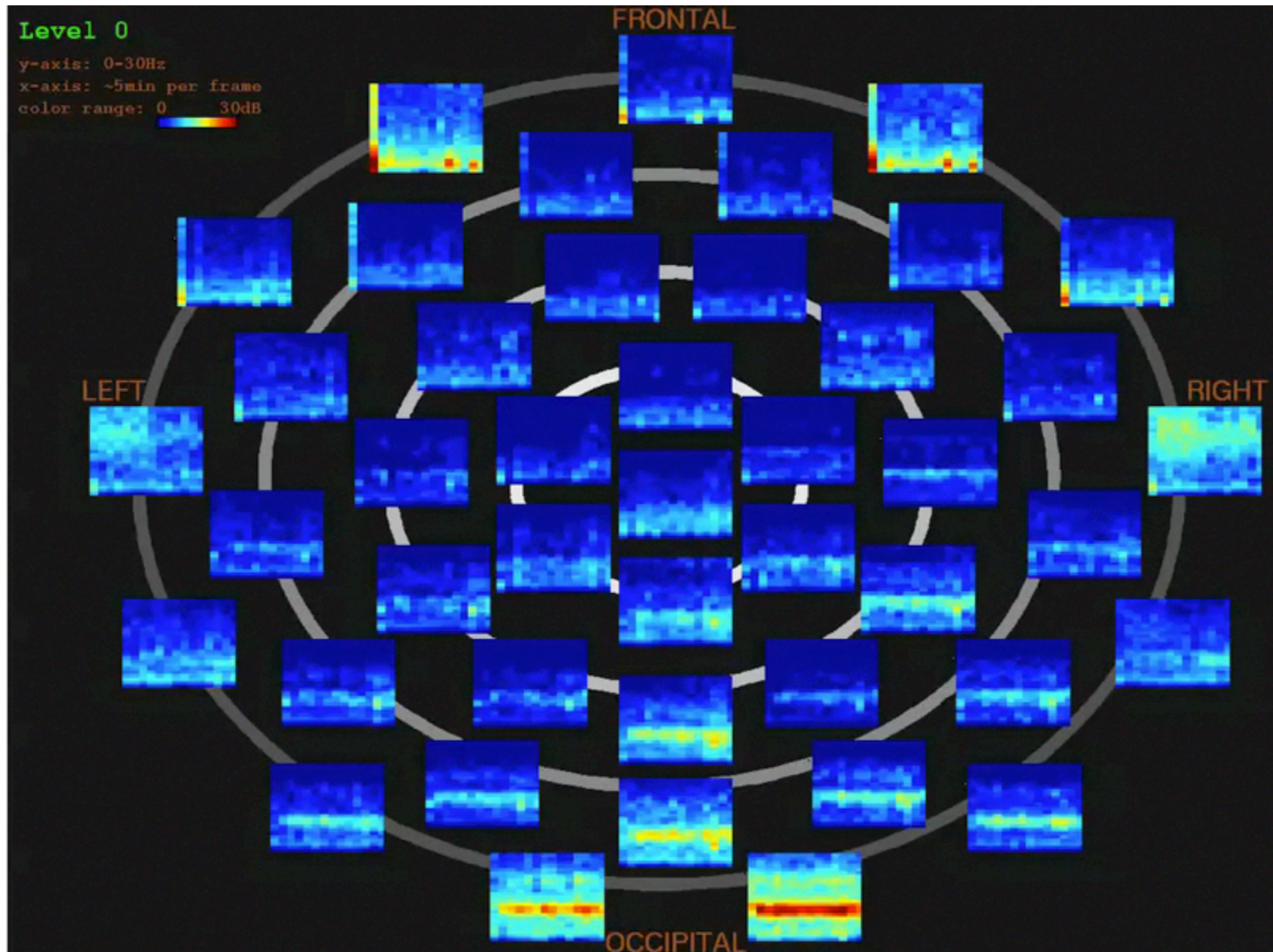
unterhalb des Schädelknochens ist

CSD:

$$I_m(\mathbf{x}, t) = -\sigma \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) V(\mathbf{x}, t)$$

Beispiel: Anästhesie (Cimenser et al. (2010))

current source density of EEG



IV. Synchronisation

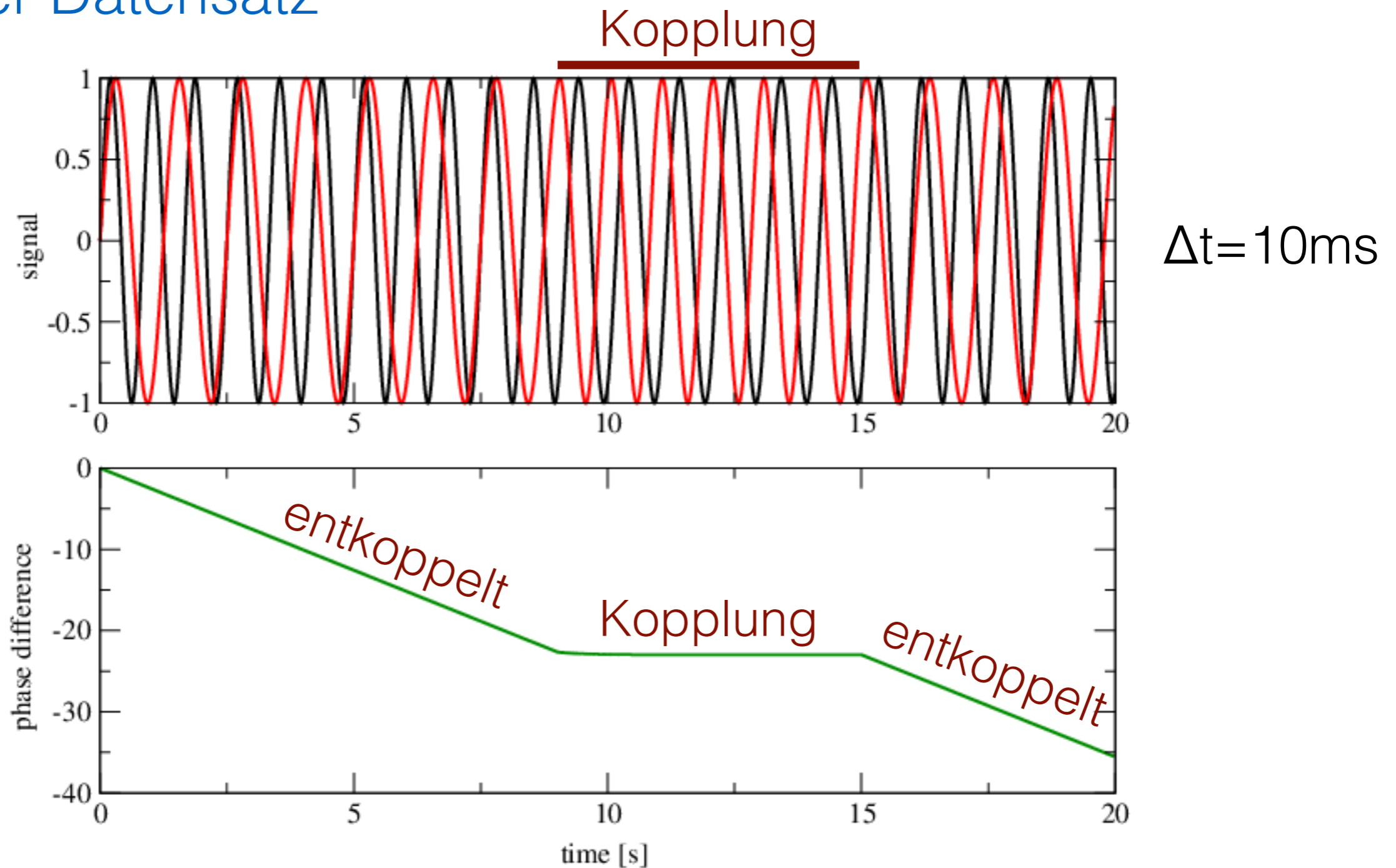
1. Historie und Definition

2. Statistische Analyse von verschiedenen Datentypen

3. Amplituden- und **Phasensynchronisation**

4. Vollständige und partielle Synchronisation

künstlicher Datensatz



- zwei gekoppelte nichtlineare Oszillatoren (Kuramoto Modell mit $K=3.0$)
- Frequenz der Oszillatoren: 1.2Hz and 0.8Hz
- Kopplung setzt ein bei $t=8\text{s}$ und setzt aus bei $t=15\text{s}$

Kuramoto Phasenmodell:

$$\dot{\phi}_1(t) = 2\pi f_1 + \frac{K}{2} \sin(\phi_1 - \phi_2)$$

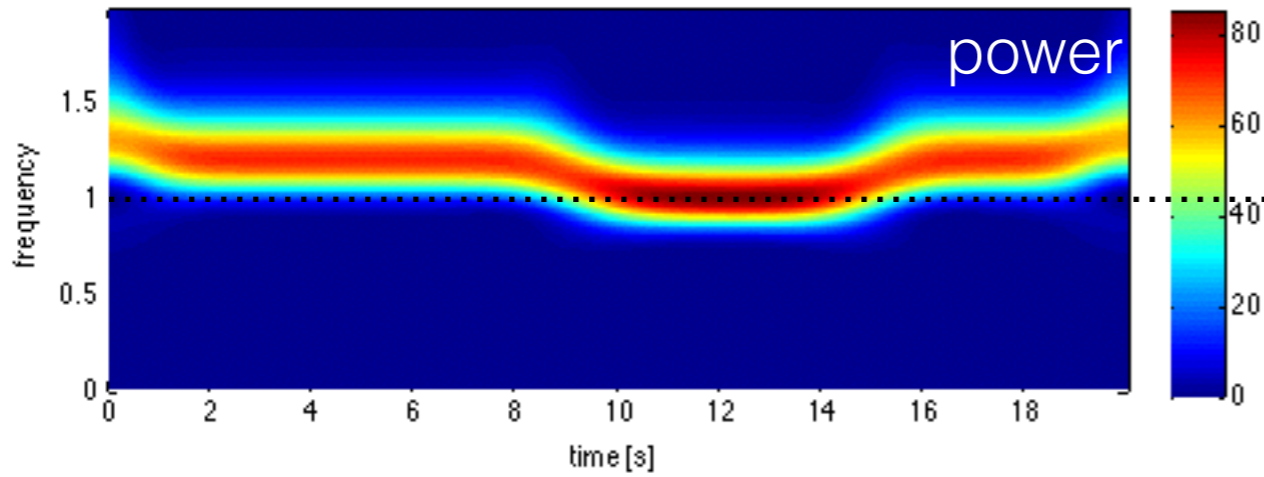
$$\dot{\phi}_2(t) = 2\pi f_2 - \frac{K}{2} \sin(\phi_1 - \phi_2)$$

$$s_1(t) = \sin \phi_1(t)$$

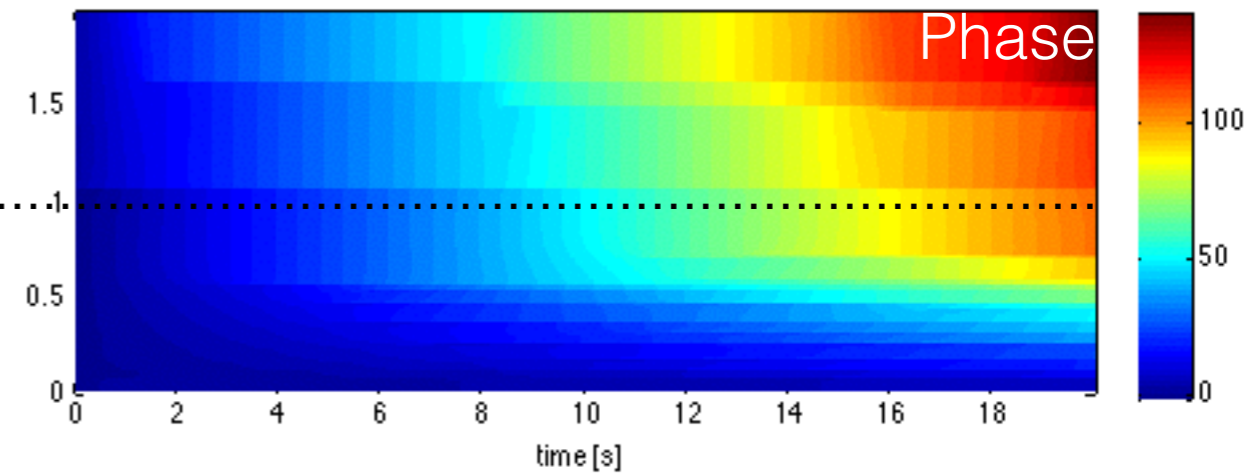
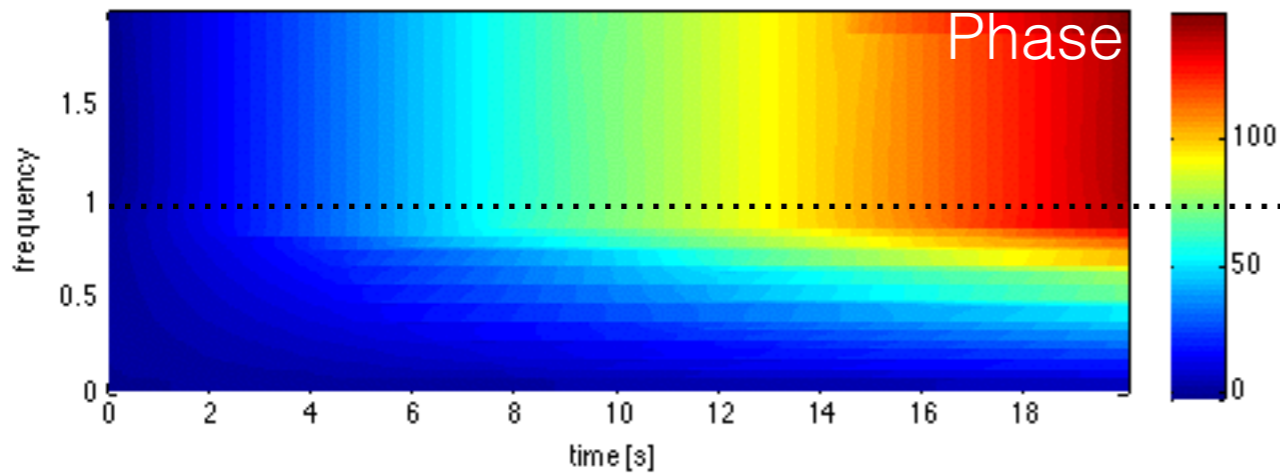
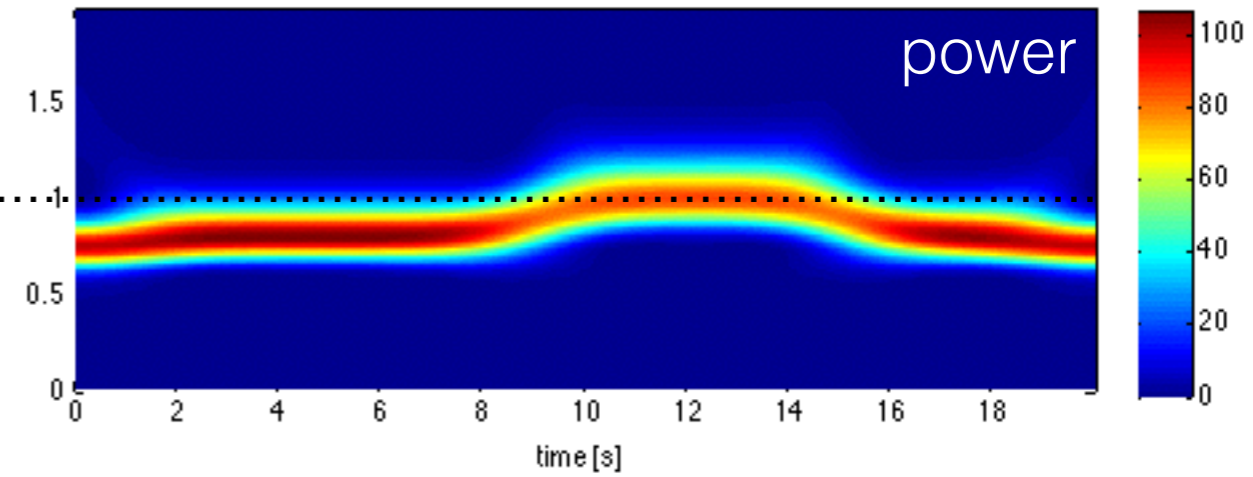
$$s_2(t) = \sin \phi_2(t)$$

Zeit-Frequenz Darstellung

Kanal 1

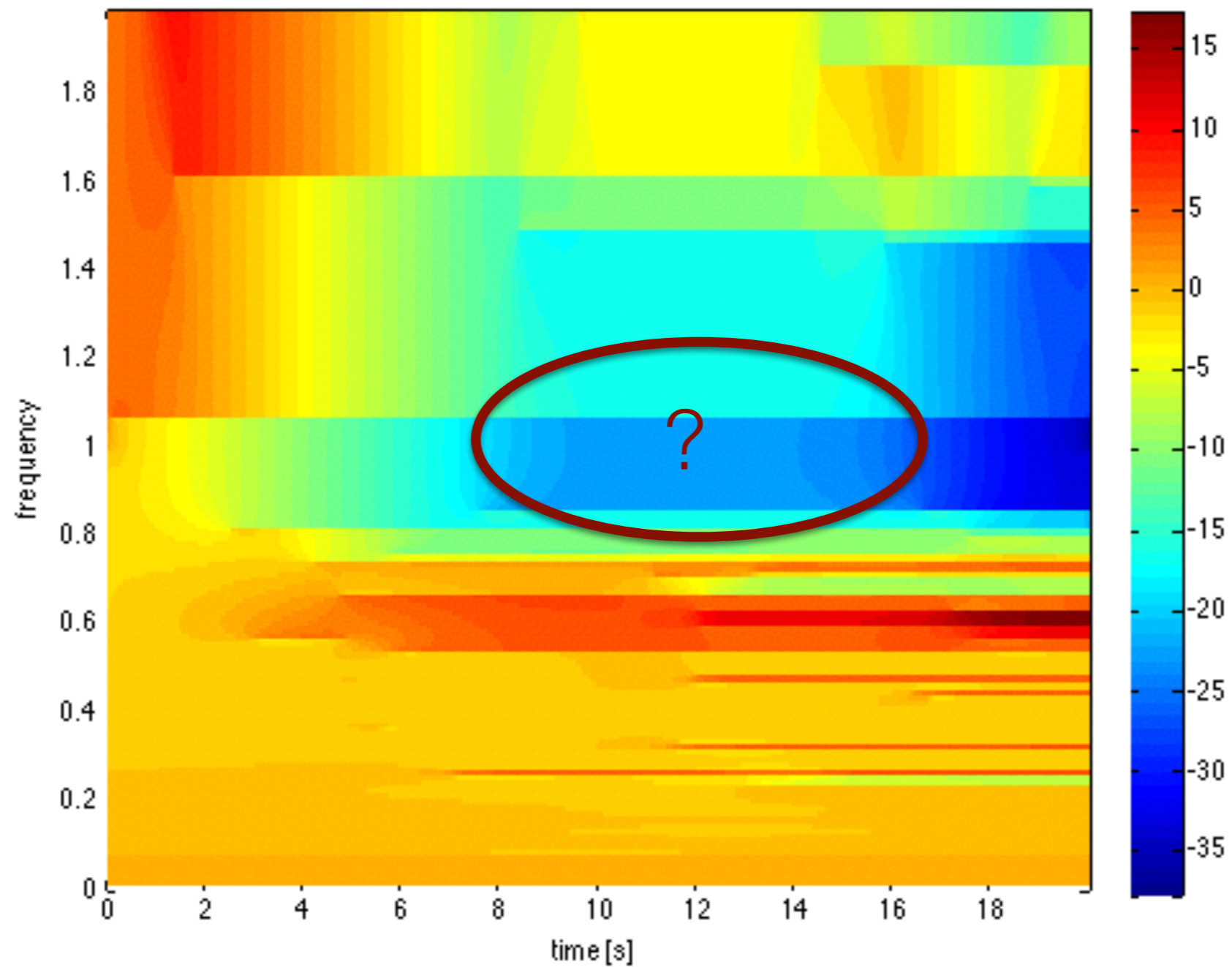


Kanal 2

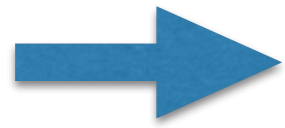


Frequenz-Synchronisation während der Phasenkopplung

Phasendifferenz

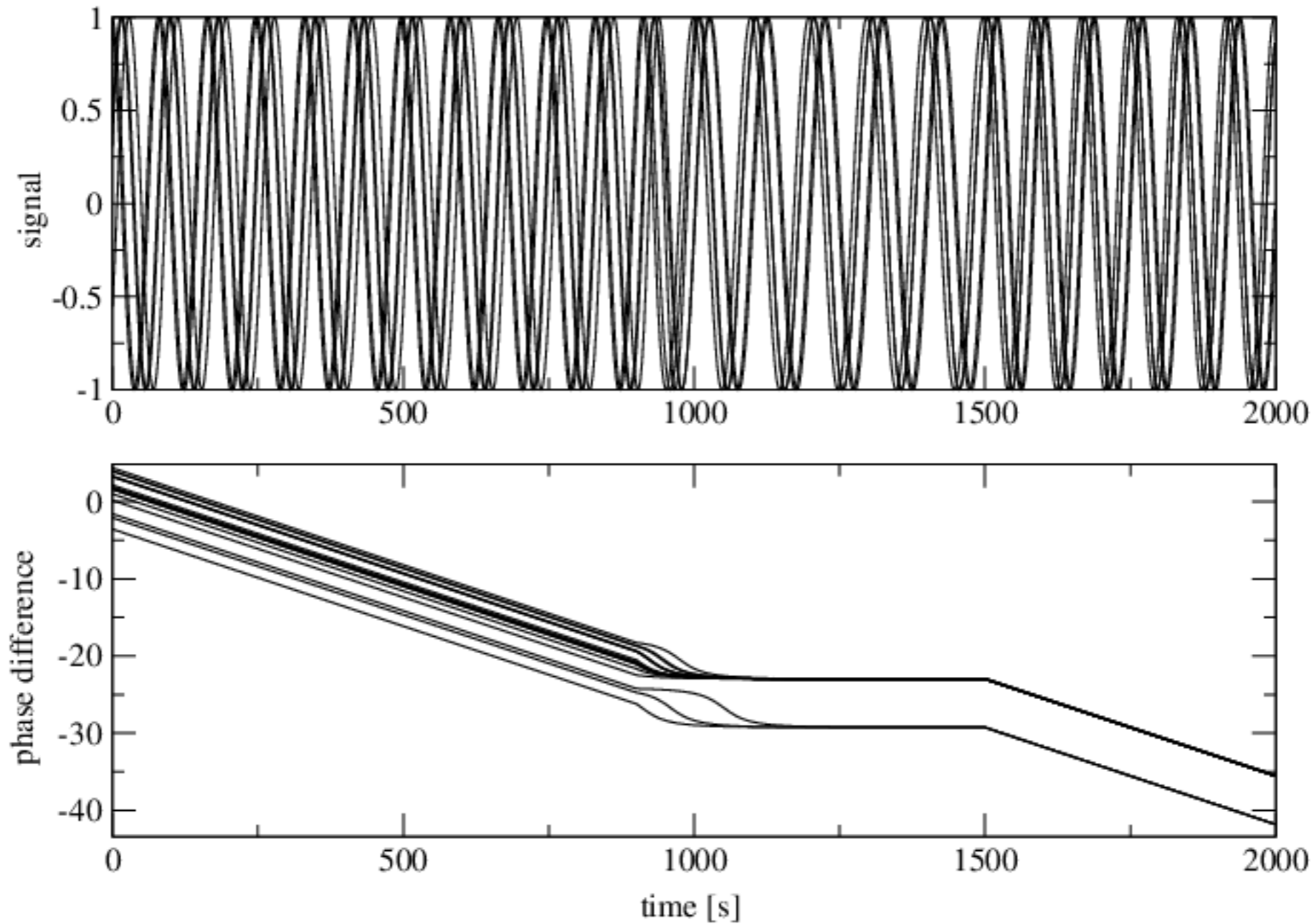


schwierige Interpretation



statistische Schätzung notwendig

Neue Simulation



40 Versuche mit verschiedenen Anfangswerten

lineares Maß der Korrelation: **coherence**

lineares Maß der Korrelation: **coherence**

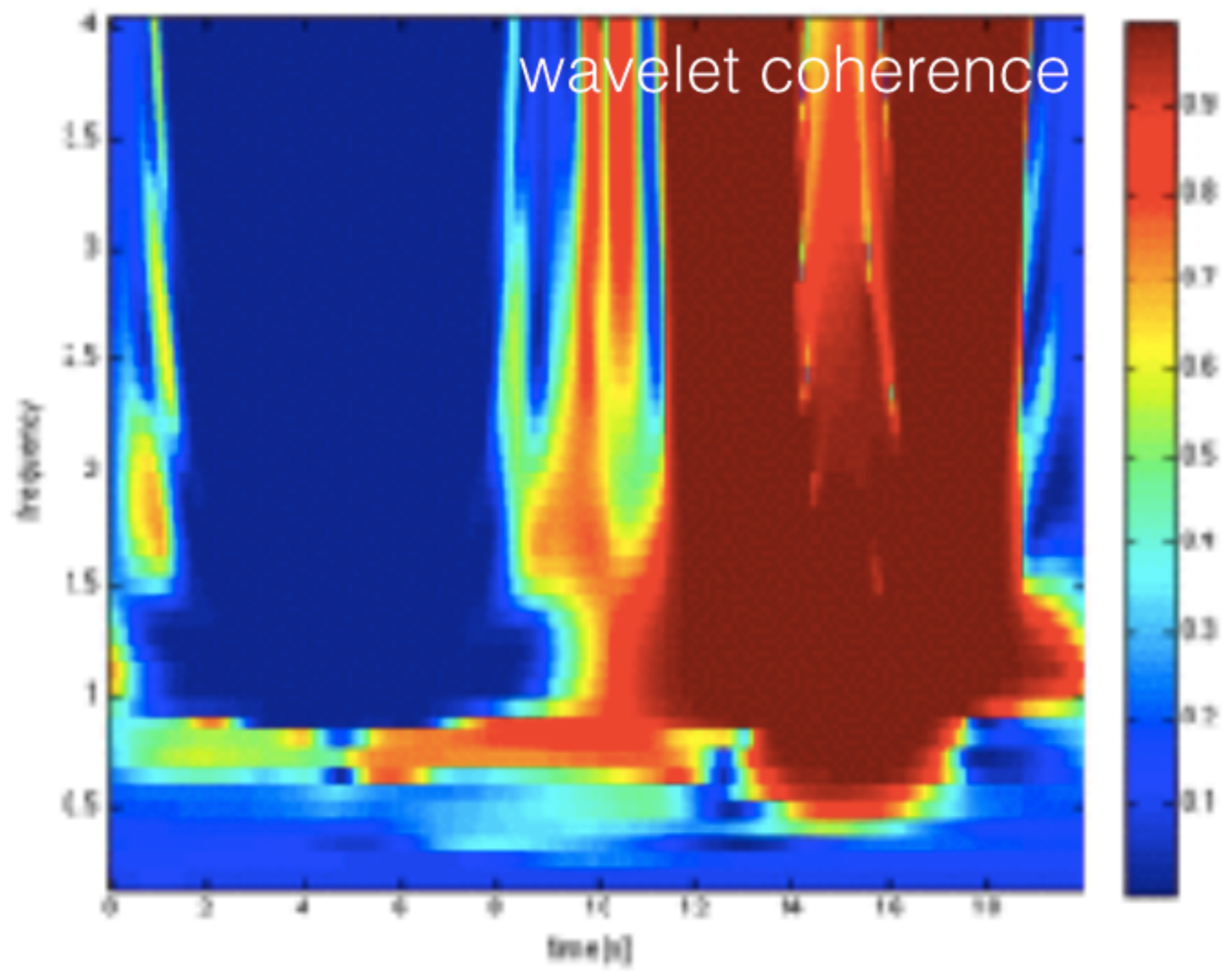
spectral coherence für stationäre Signale

$$G_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}$$

wavelet coherence für nicht-stationäre Signale

$$G_{xy}(t, f) = \frac{\hat{S}[|W_{xy}(t, f)|^2]}{\hat{S}[|W_{xx}(t, f)|] \hat{S}[|W_{yy}(t, f)|]}$$

\hat{S} : Mittel über Versuche



Problem mit *spectral coherence*:

Problem mit spectral coherence:

- *coherence* ist nur für lineare WW interpretierbar

Problem mit spectral coherence:

- *coherence* ist nur für lineare WW definiert
- hängt stark von spektraler Leistungsdichte ab, kann zu Artefakten führen

Problem mit spectral coherence:

- *coherence* ist nur für lineare WW definiert
- hängt stark von spektraler Leistungsdichte ab, kann zu Artefakten führen

$$G_{xy}(t, f) = \frac{\hat{S}[|W_{xy}(t, f)|^2]}{\hat{S}[|W_{xx}(t, f)|] \hat{S}[|W_{yy}(t, f)|]}$$

Problem mit spectral coherence:

- *coherence* ist nur für lineare WW definiert
- hängt stark von spektraler Leistungsdichte ab, kann zu Artefakten führen

$$G_{xy}(t, f) = \frac{\hat{S}[|W_{xy}(t, f)|^2]}{\hat{S}[|W_{xx}(t, f)|] \hat{S}[|W_{yy}(t, f)|]}$$

anderes nichtlineares Maß:

phase locking value (PLV) oder **mean phase coherence**

Idee:

Idee:

- analytisches Signal oder komplexe Zeit-Frequenz Transformation führt zu komplexem instantanen Signal

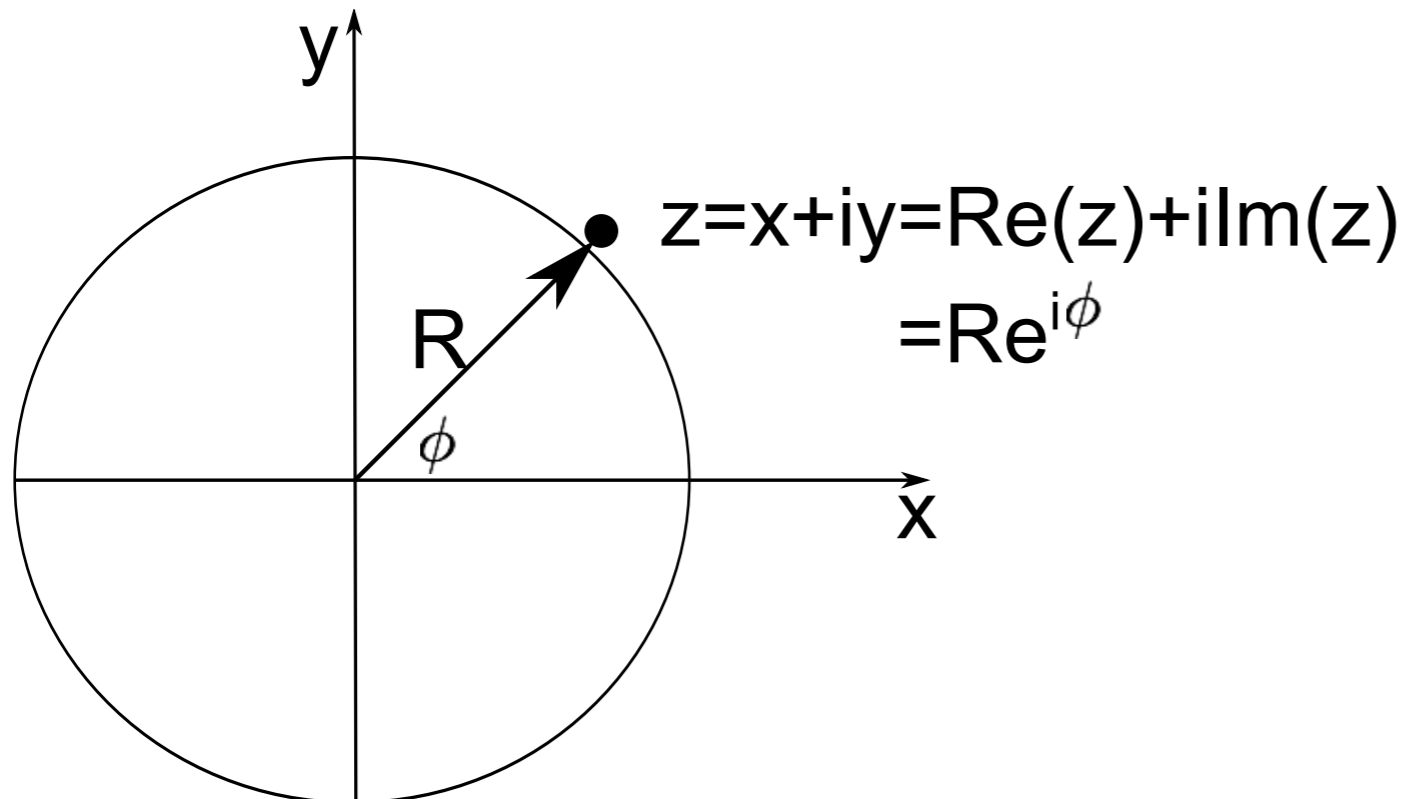
$$z(t) = R(t)e^{i\phi(t)}$$

Idee:

- analytisches Signal oder komplexe Zeit-Frequenz Transformation führt zu komplexem instantanen Signal

$$z(t) = R(t)e^{i\phi(t)}$$

ein Zeitmoment

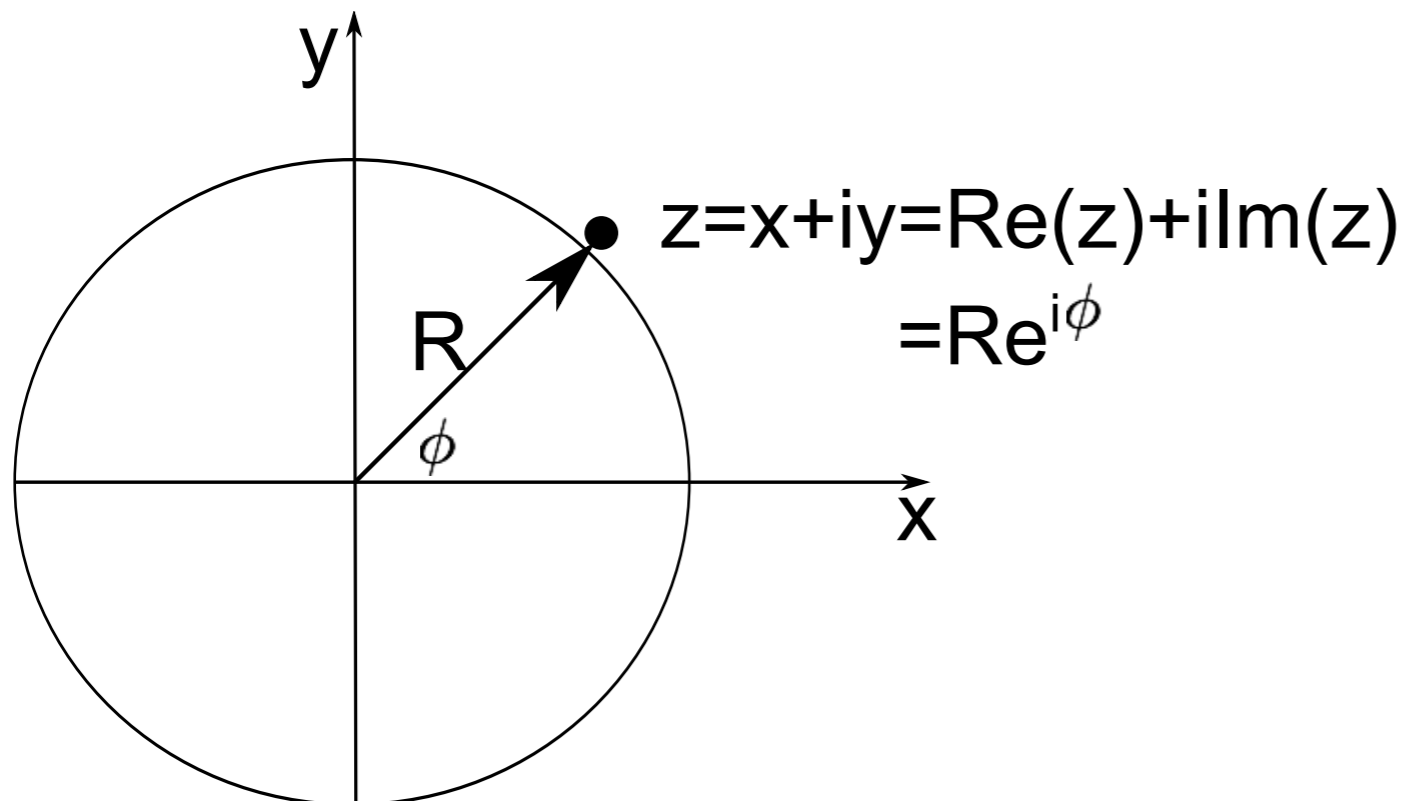


Idee:

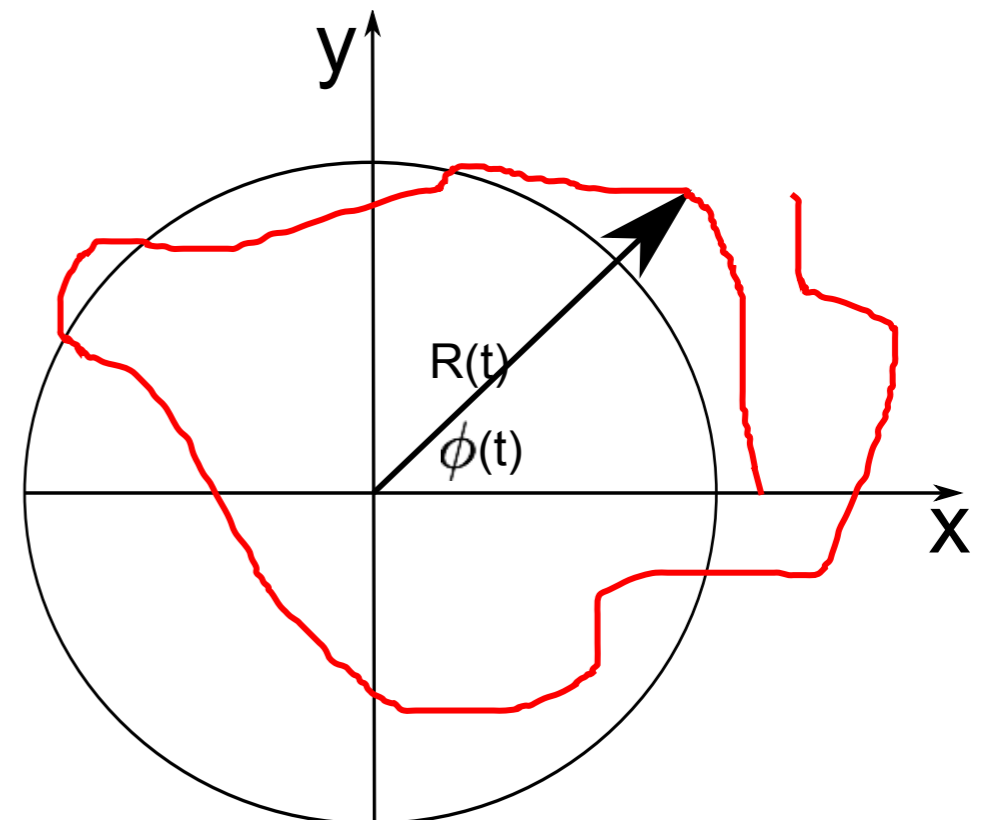
- analytisches Signal oder komplexe Zeit-Frequenz Transformation führt zu komplexem instantanen Signal

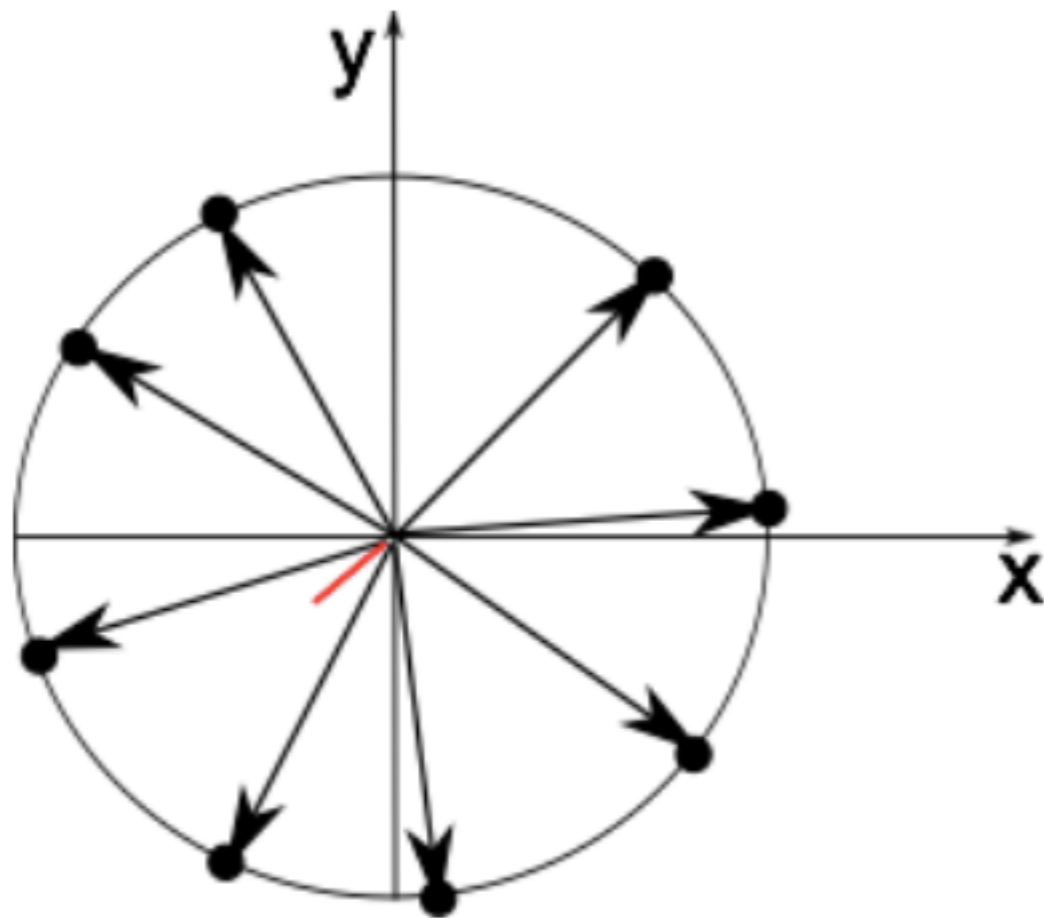
$$z(t) = R(t)e^{i\phi(t)}$$

ein Zeitmoment



komplexe Zeitreihe





Summe der komplexen Werte

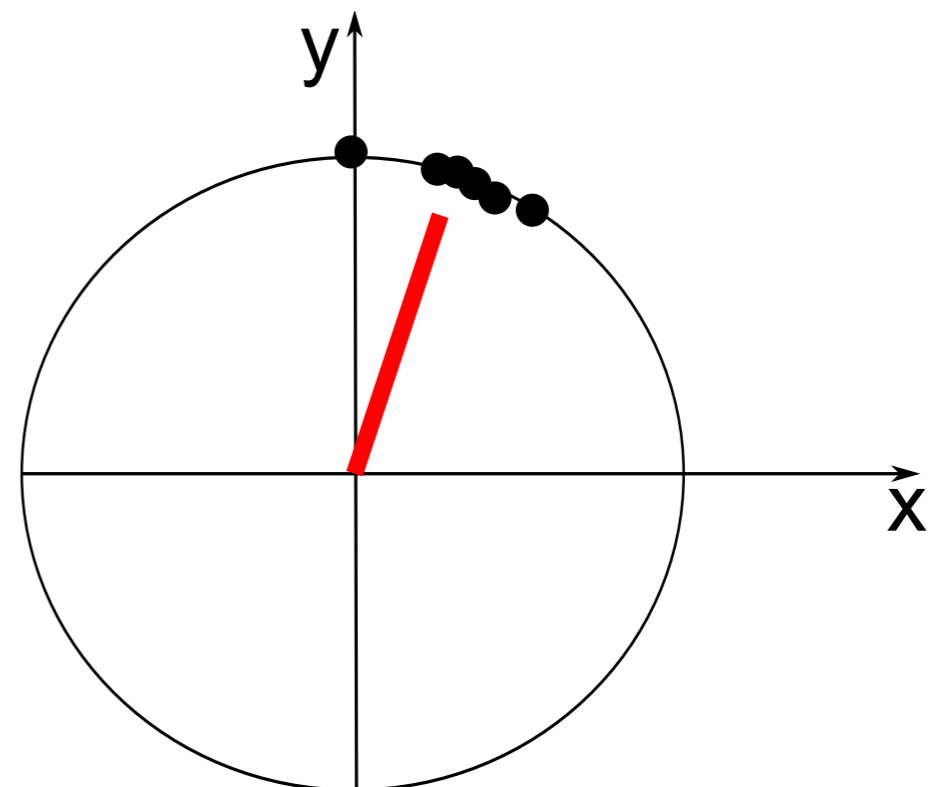
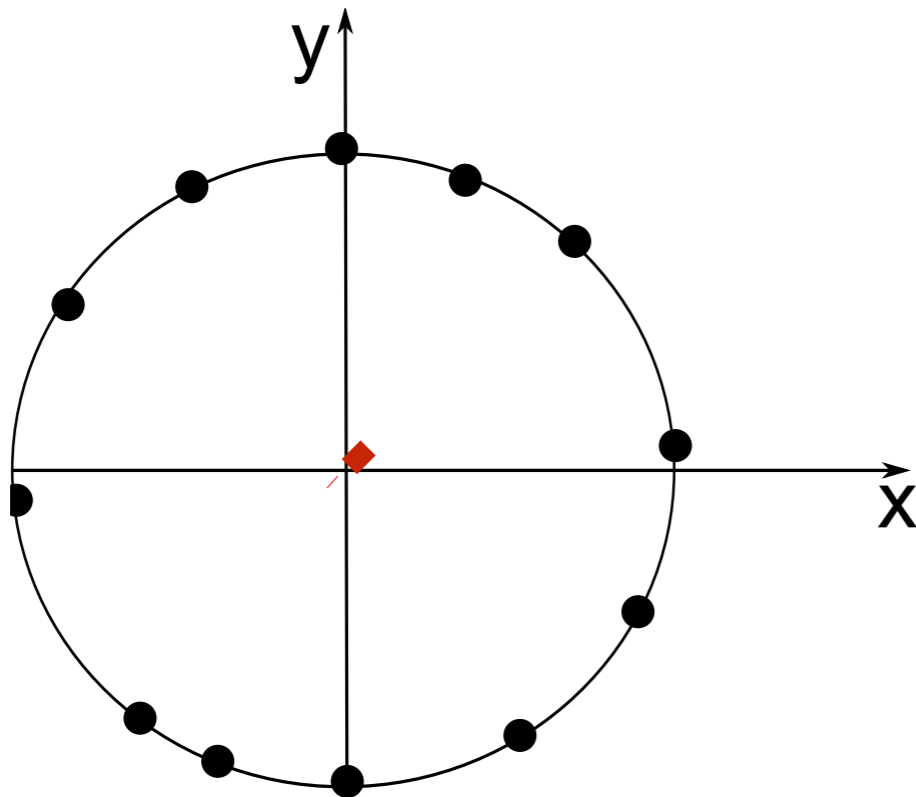
$$\begin{aligned}
 \Psi &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e^{i\phi_n} \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\underbrace{\cos(\phi_n)}_{x_n} + i \underbrace{\sin(\phi_n)}_{y_n} \right) \\
 &= \bar{x} + i\bar{y}
 \end{aligned}$$

falls der Vektor Ψ

- sehr kurz ist, i.e. $|\Psi| \approx 0$, dann sind \bar{x} und \bar{y} klein und die Phasen sind untereinander verschieden
- lang ist, i.e. $|\Psi| \approx 1$, dann sind \bar{x} und/oder \bar{y} groß und die Phasen sind ähnlich zueinander

falls der Vektor Ψ

- sehr kurz ist, i.e. $|\Psi| \approx 0$, dann sind \bar{x} und \bar{y} klein und die Phasen sind untereinander verschieden
- lang ist, i.e. $|\Psi| \approx 1$, dann sind \bar{x} und/oder \bar{y} groß und die Phasen sind ähnlich zueinander



mittlere Phase $\bar{\phi} = \arctan\left(\frac{\bar{y}}{\bar{x}}\right)$

$$R = |\Psi| = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$$

$$= \frac{1}{N} \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N \cos \phi_n\right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N \sin \phi_n\right)^2}$$

Bemerkung: $\sigma_s^2 = 1 - R$ heisst *circular variance*

Lachaux et al. (1999):

$$\Psi(t, f) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n e^{i\phi_k(t, f)}$$

n: Anzahl der Versuche

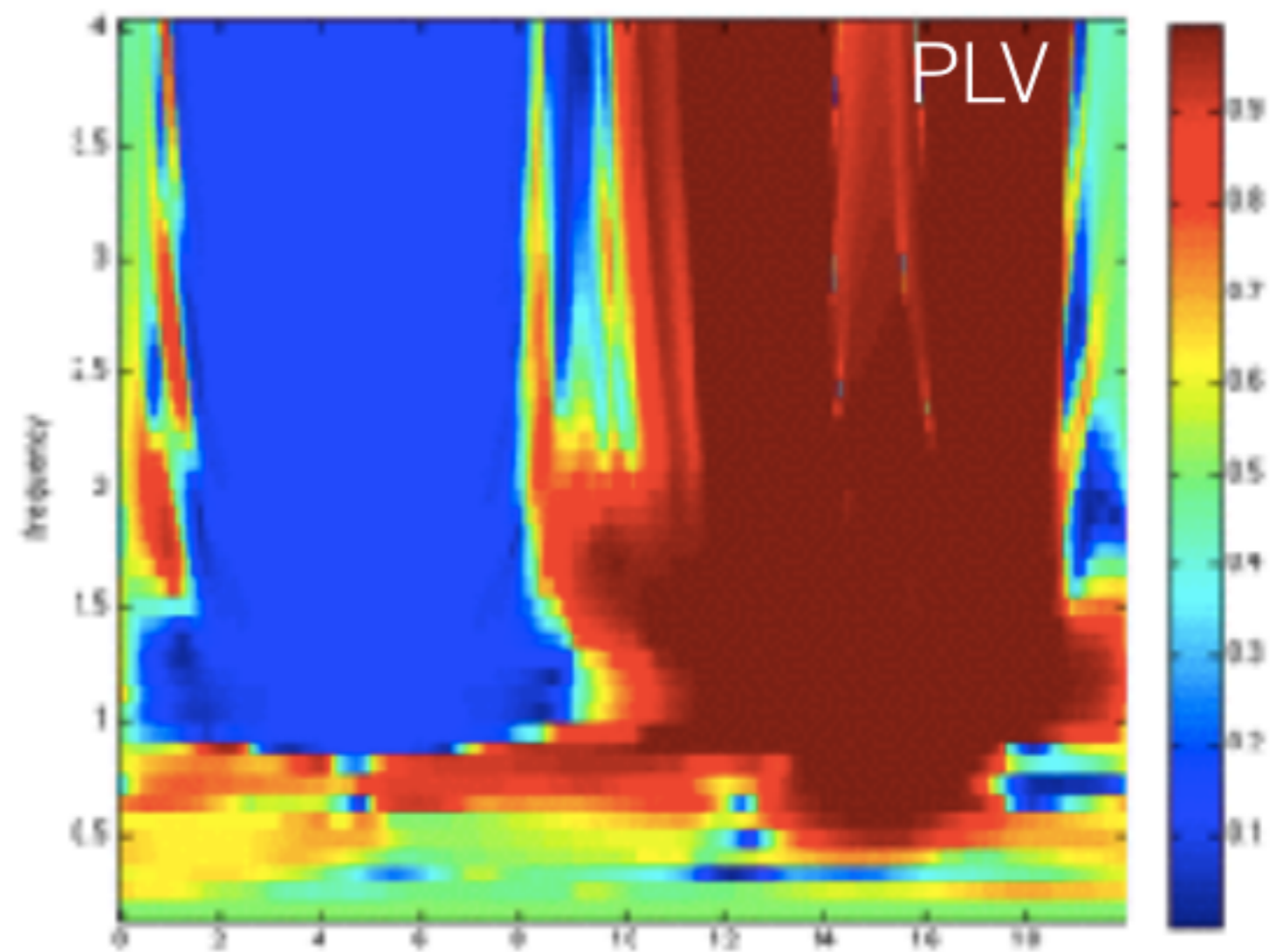
phase locking value (PLV)

$$R = |\Psi(t, f)|$$

$\phi_k(t, f)$:

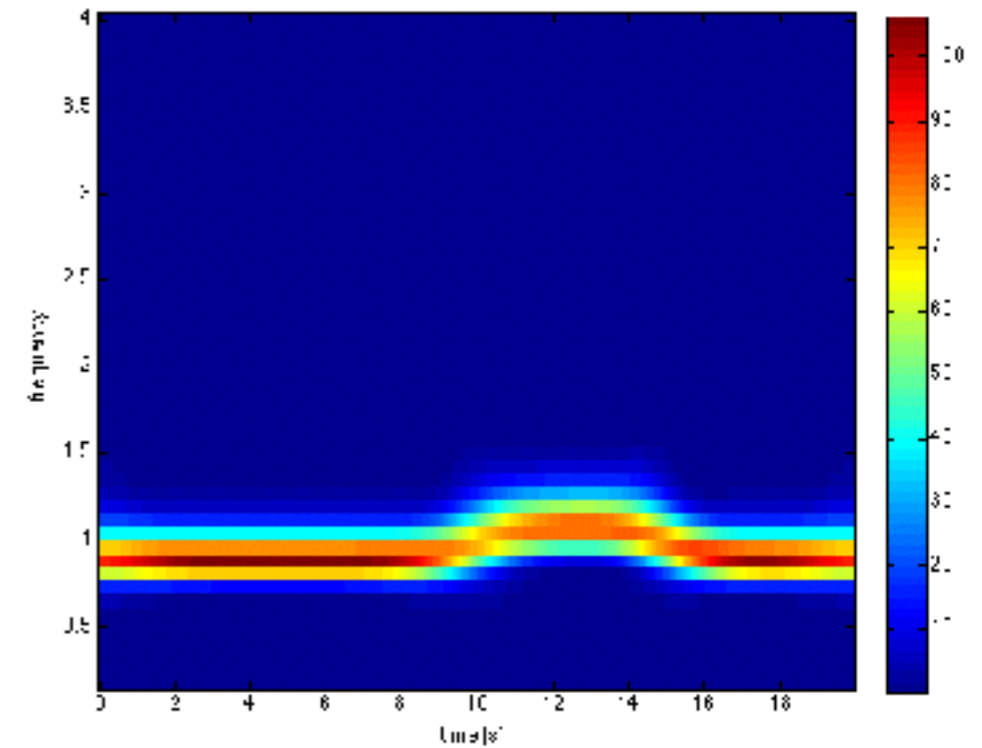
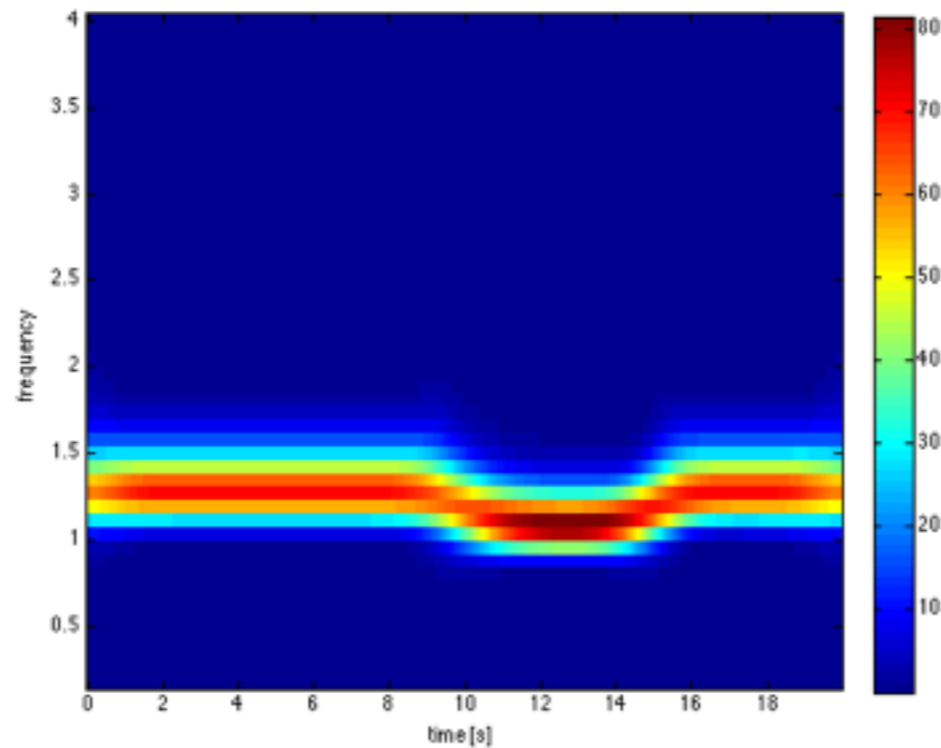
instantane Phase

zur Zeit t und Frequenz f



Problem: zufällige *coherence* und zufälliges PLV

Fehler in der *coherence*:



Fehler in PLV:

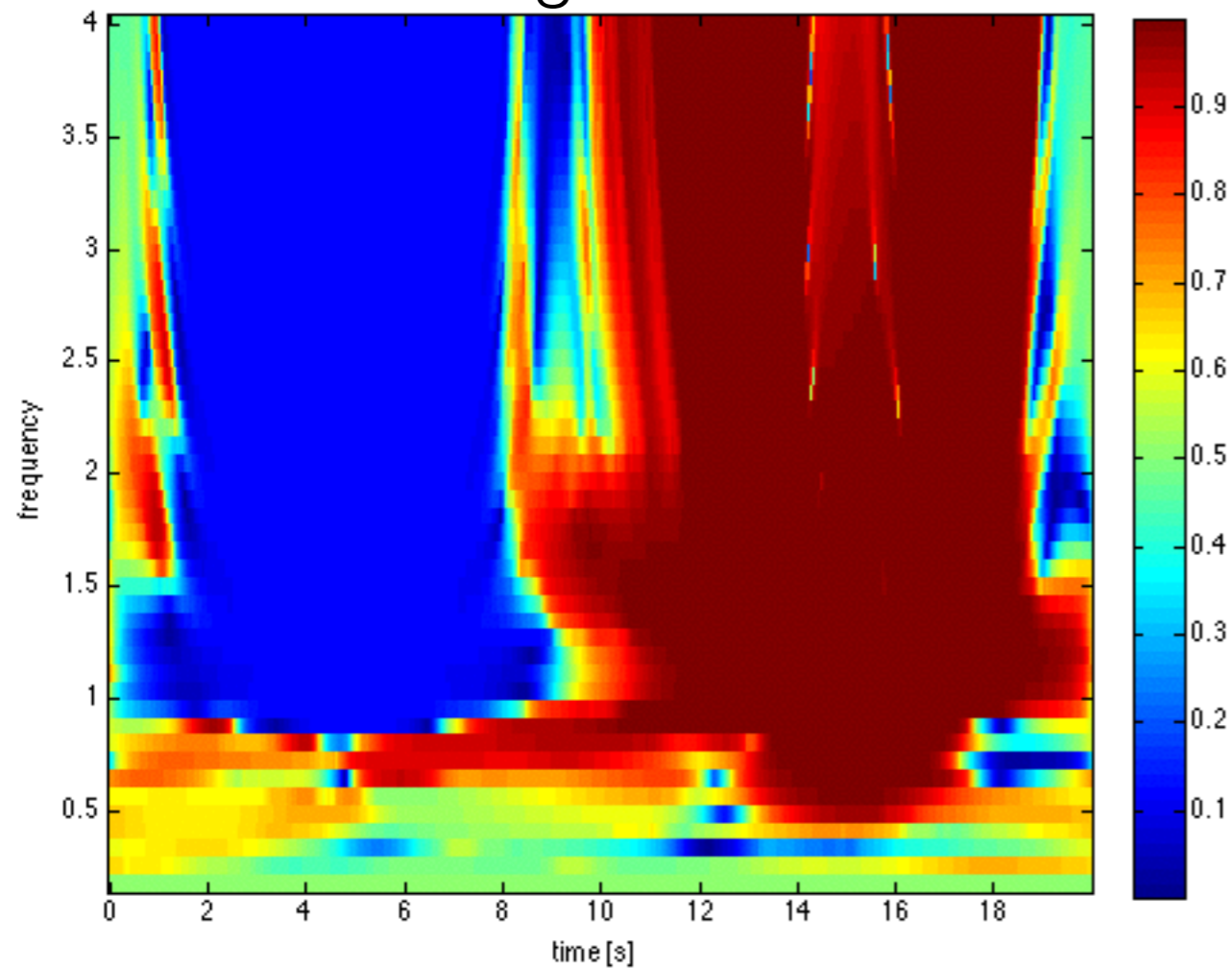
Definition der Phase unabhängig von Amplitude

Verbesserung (Lachaux, 1999):

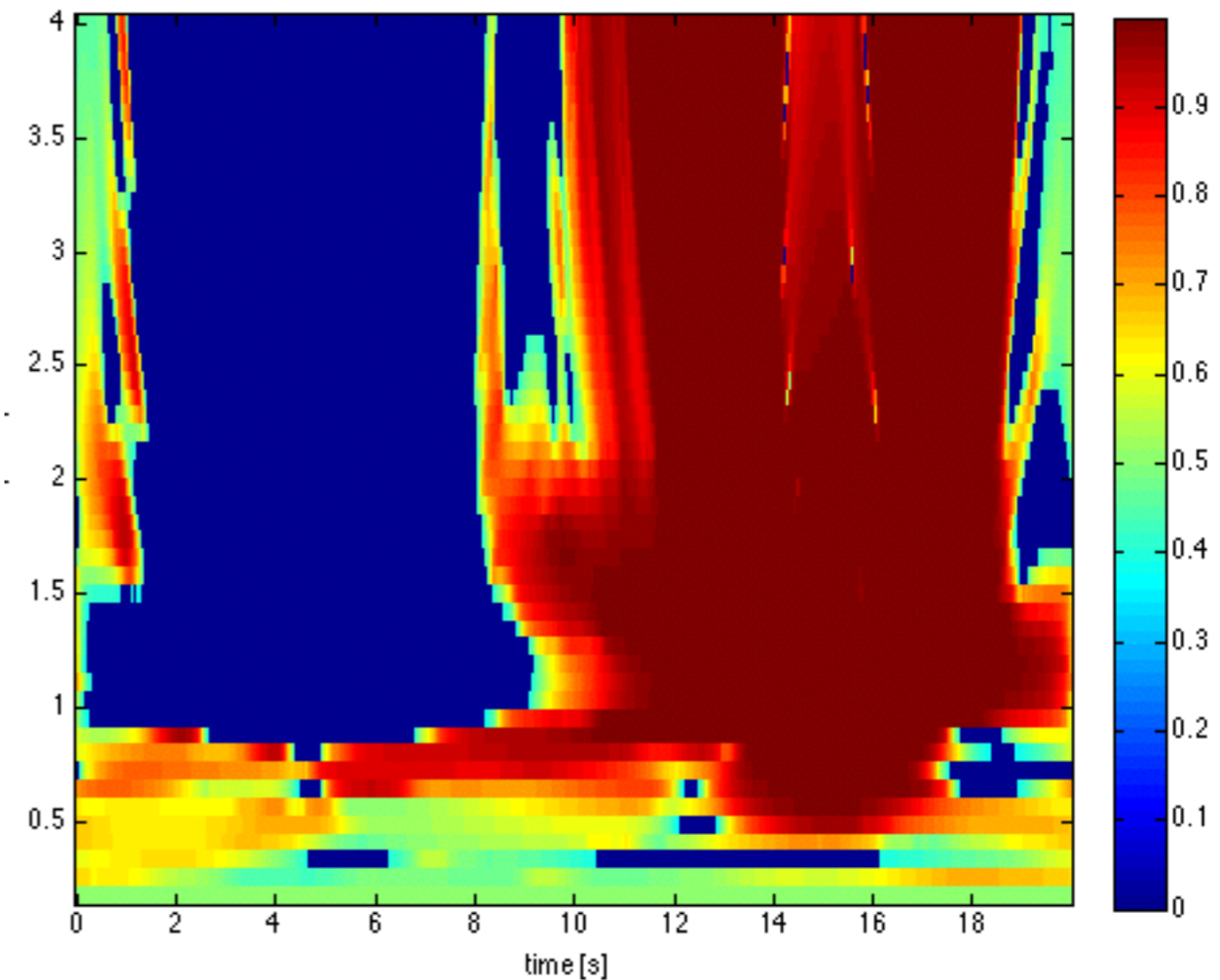
erzeuge **Surrogat-Daten**

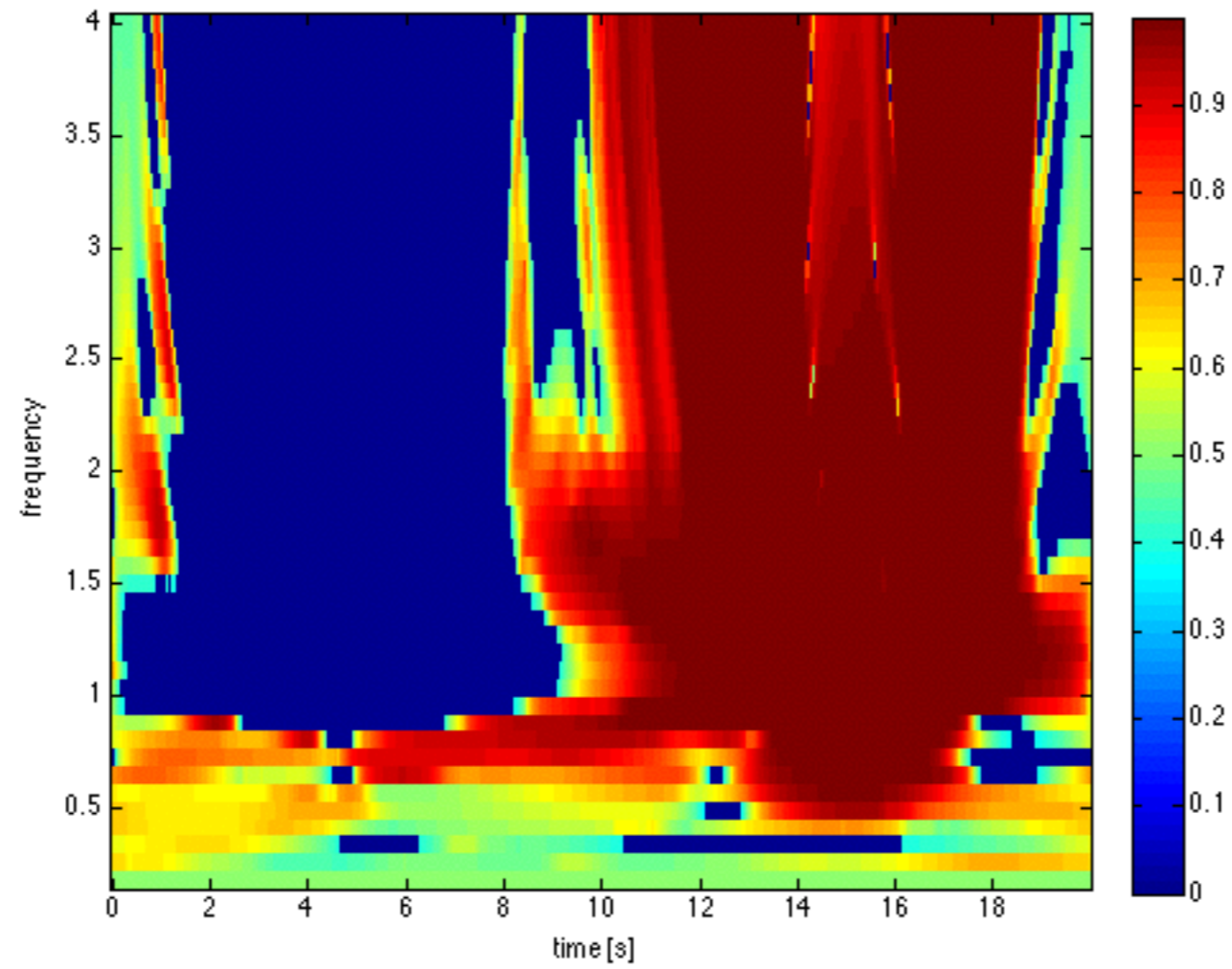
und berechne **Signifikanztest** auf Resultate

originales R



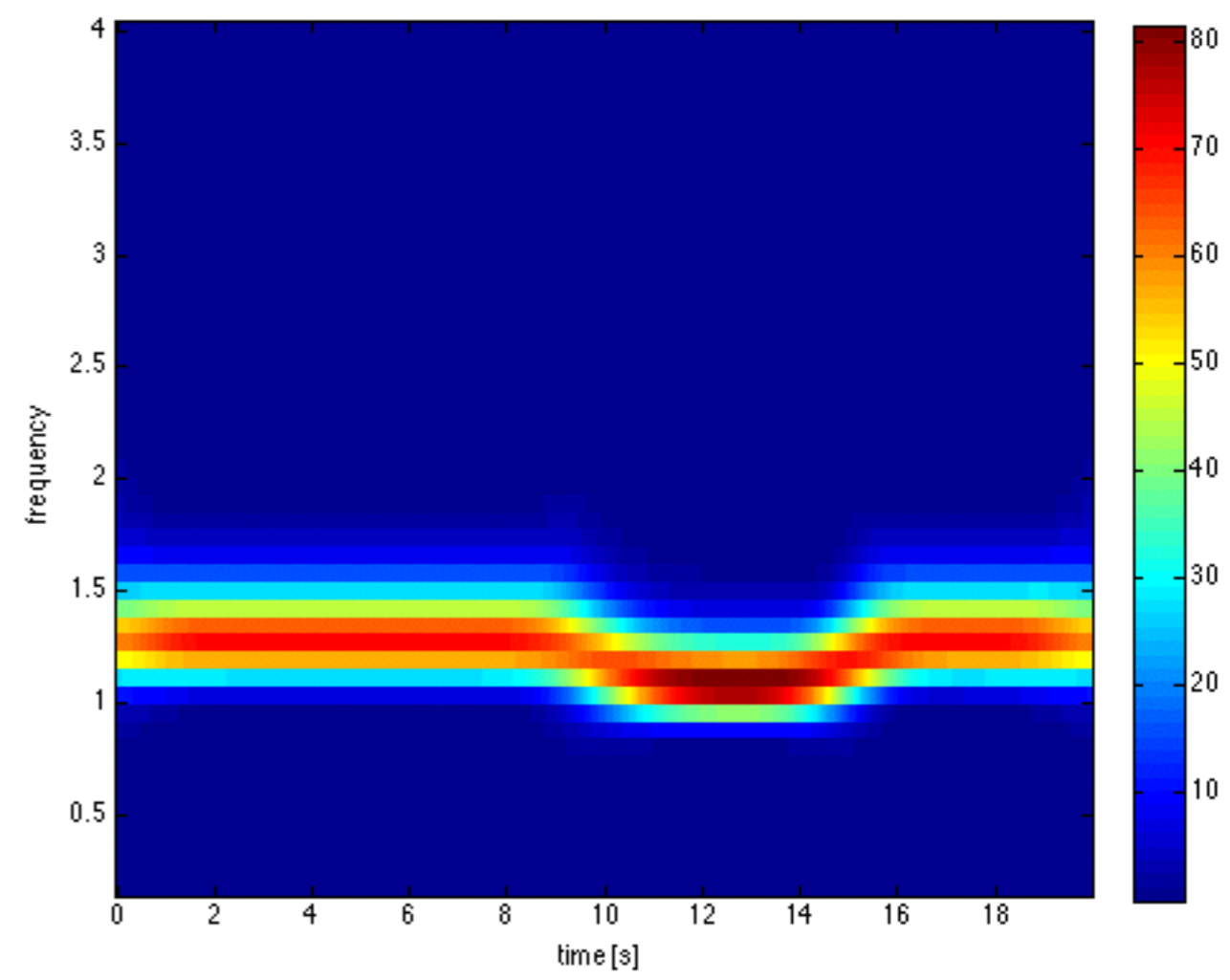
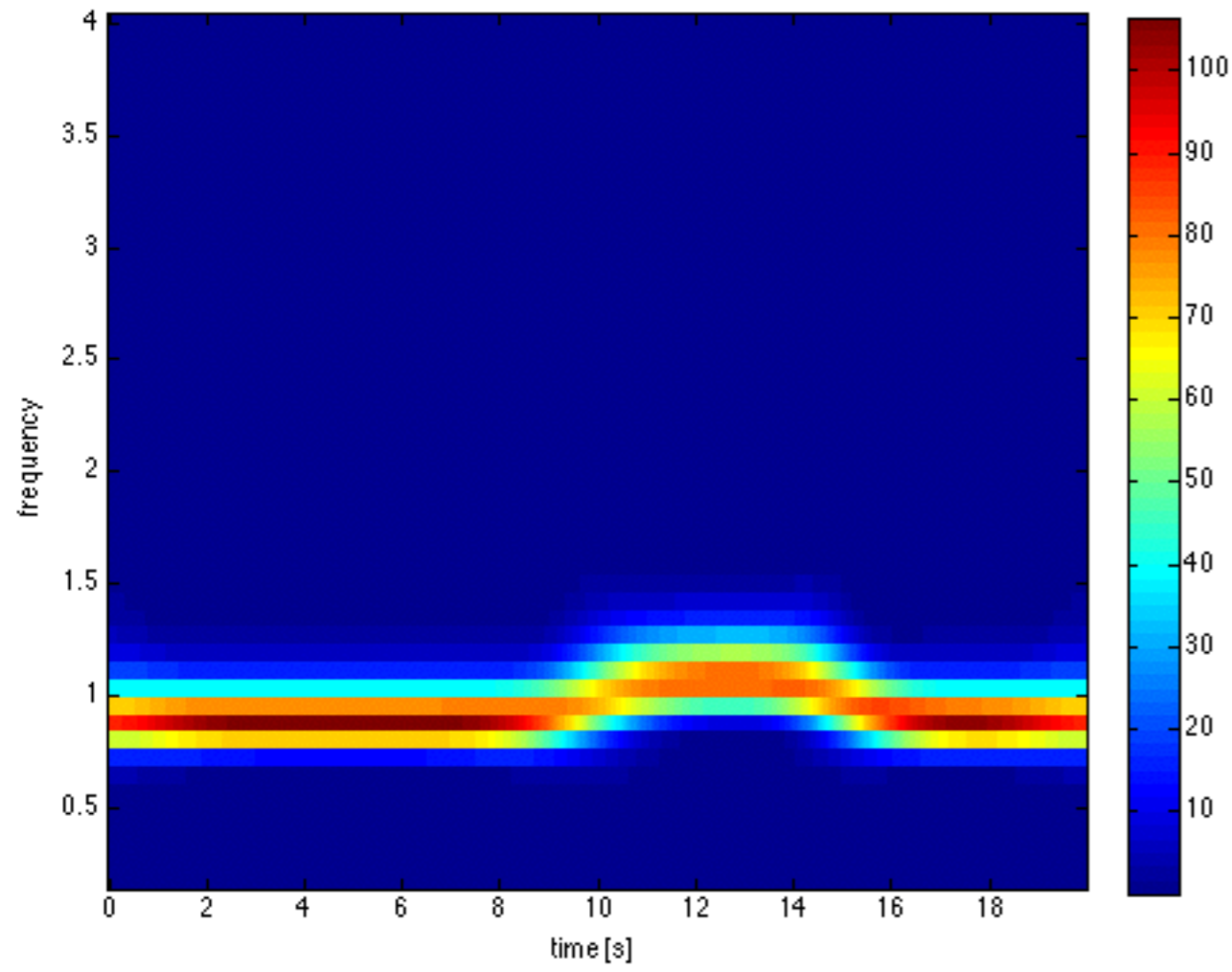
signifikantes R



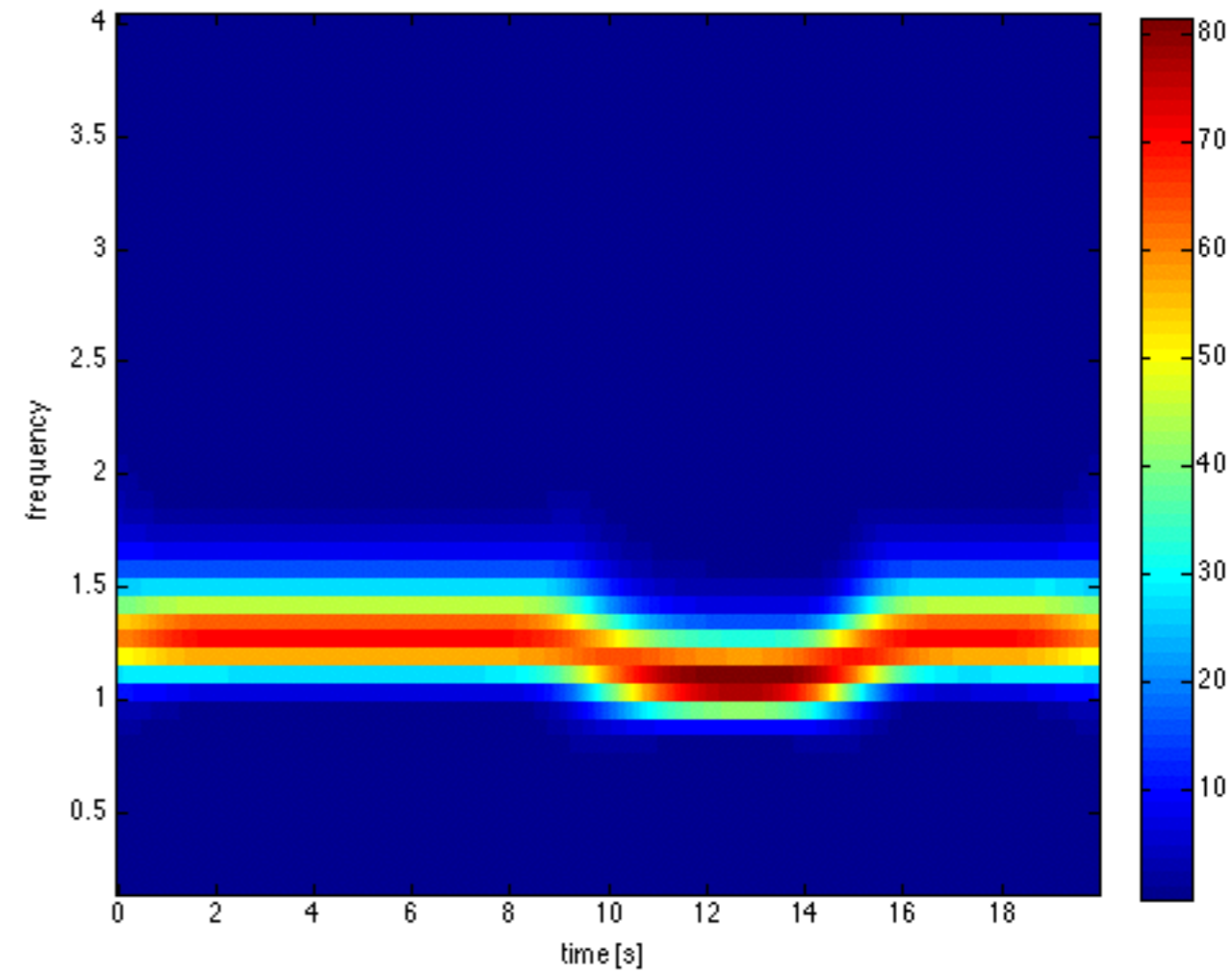
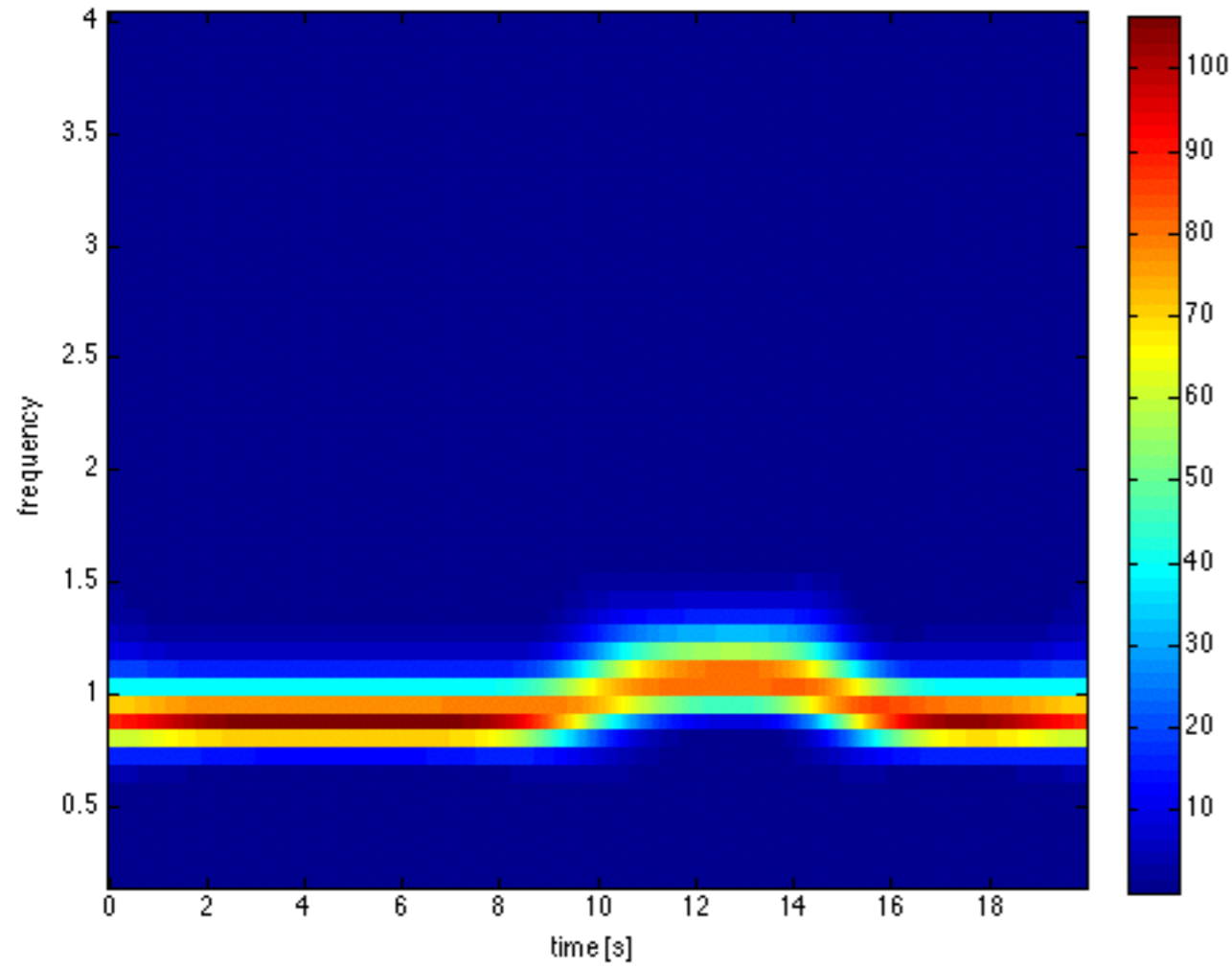


Ergebnis immer noch nicht gut!!

Idee:

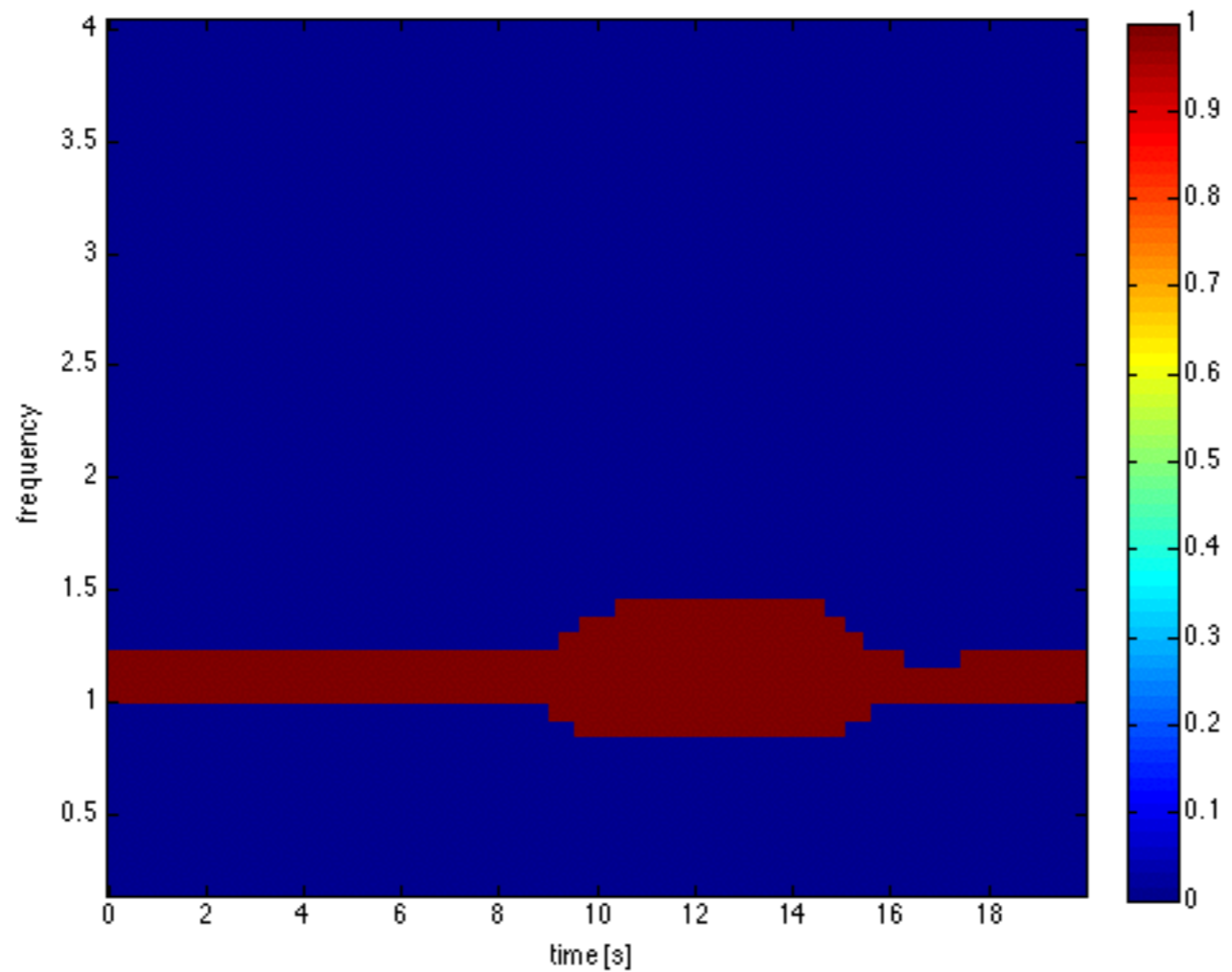
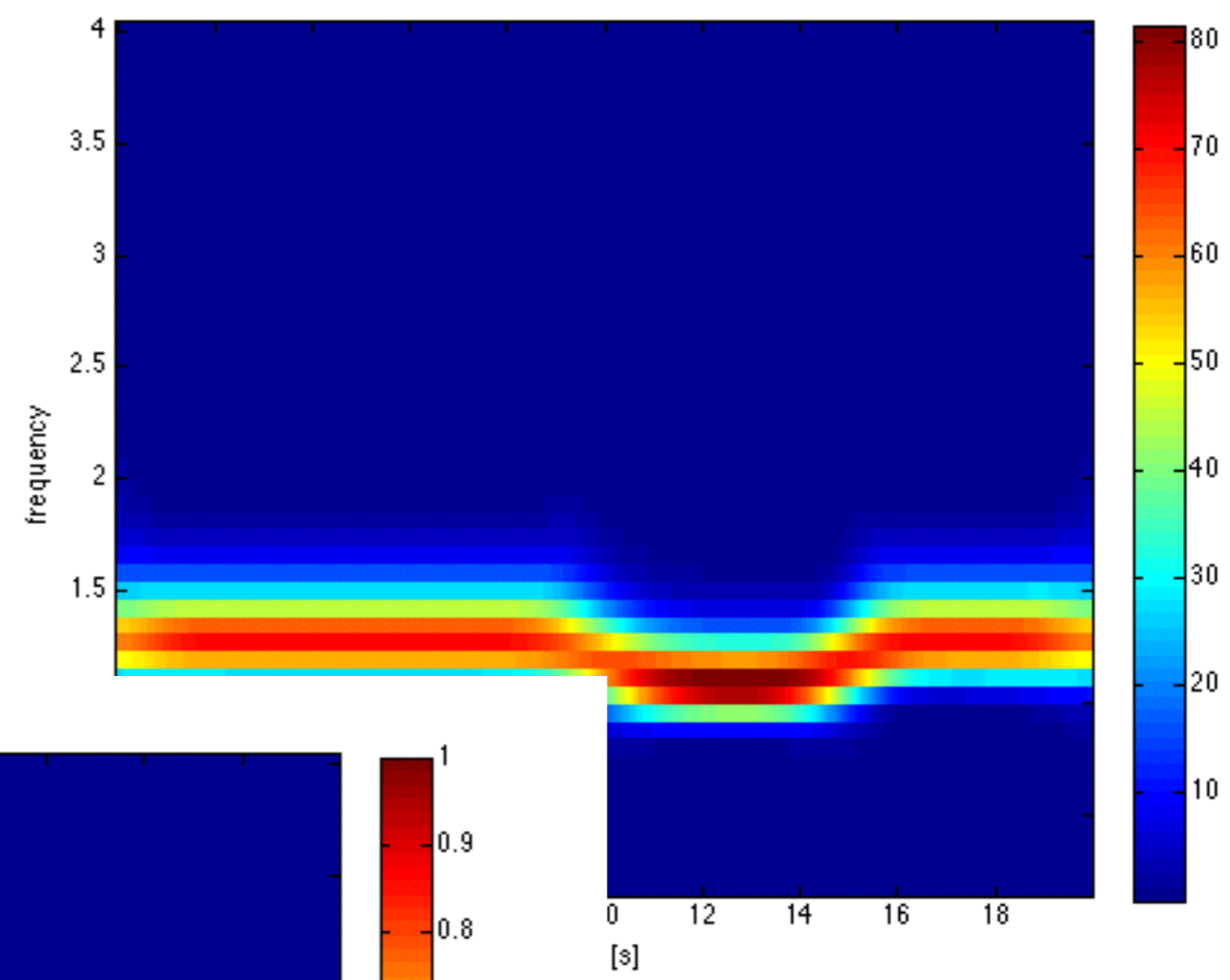
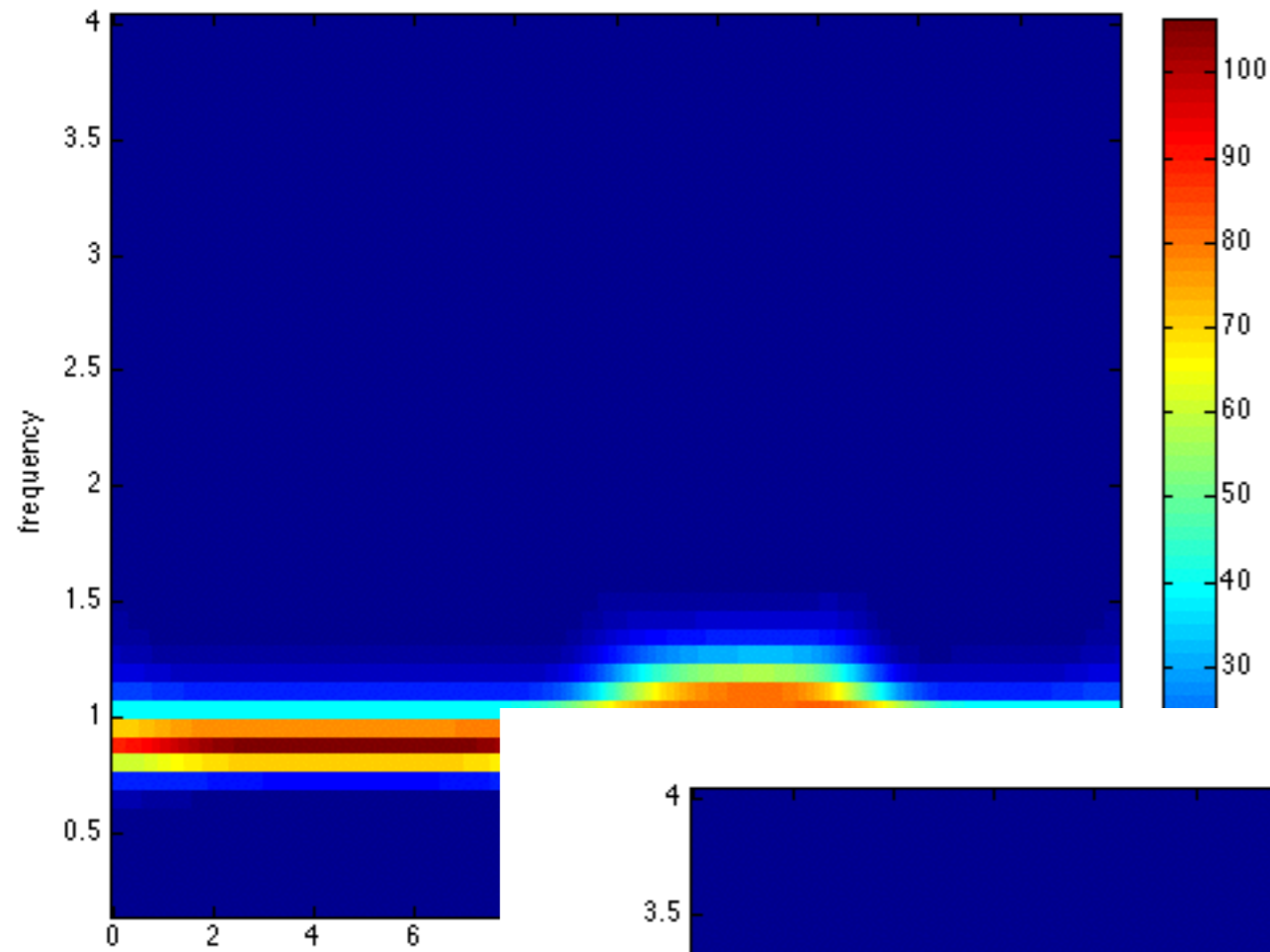


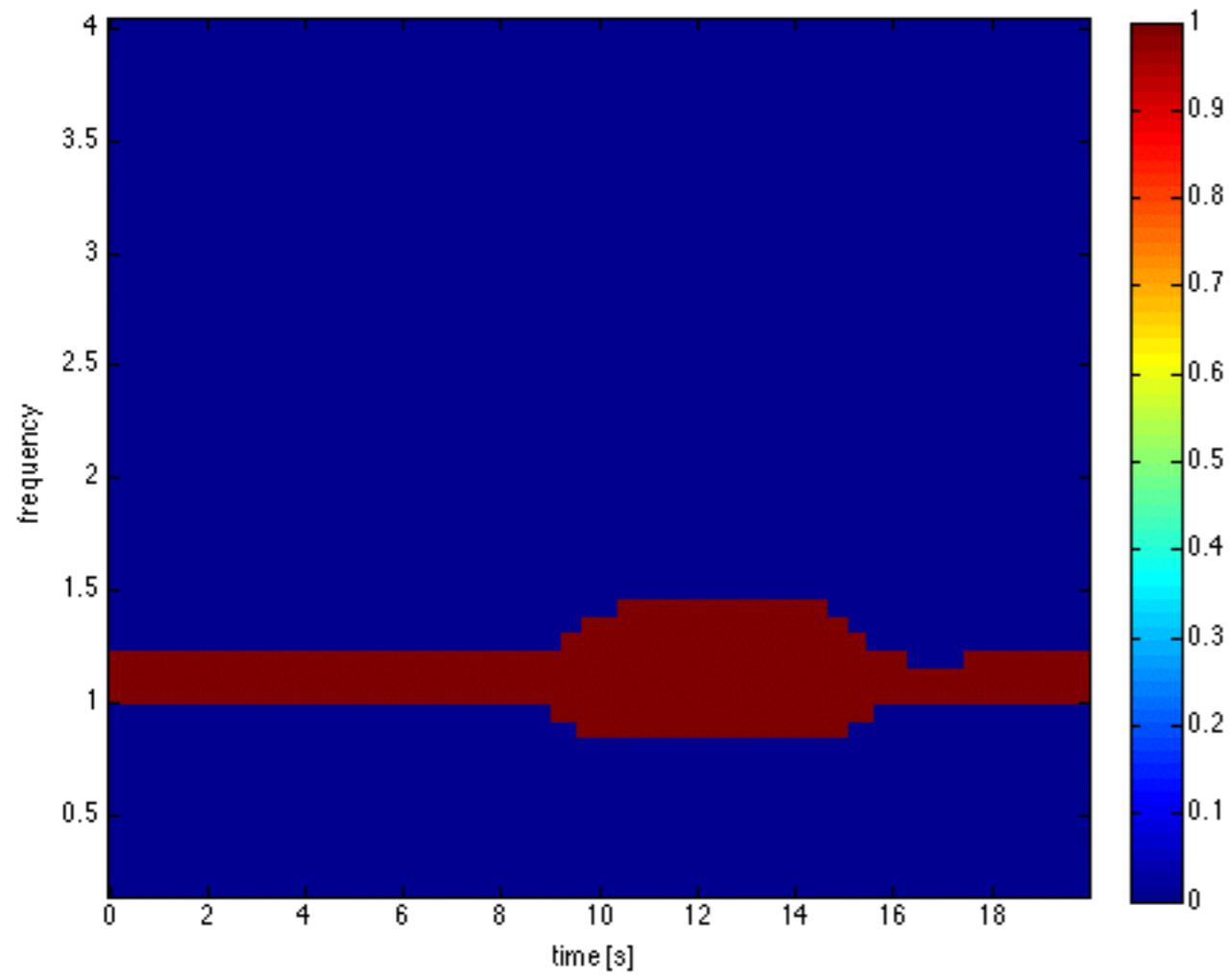
Idee:



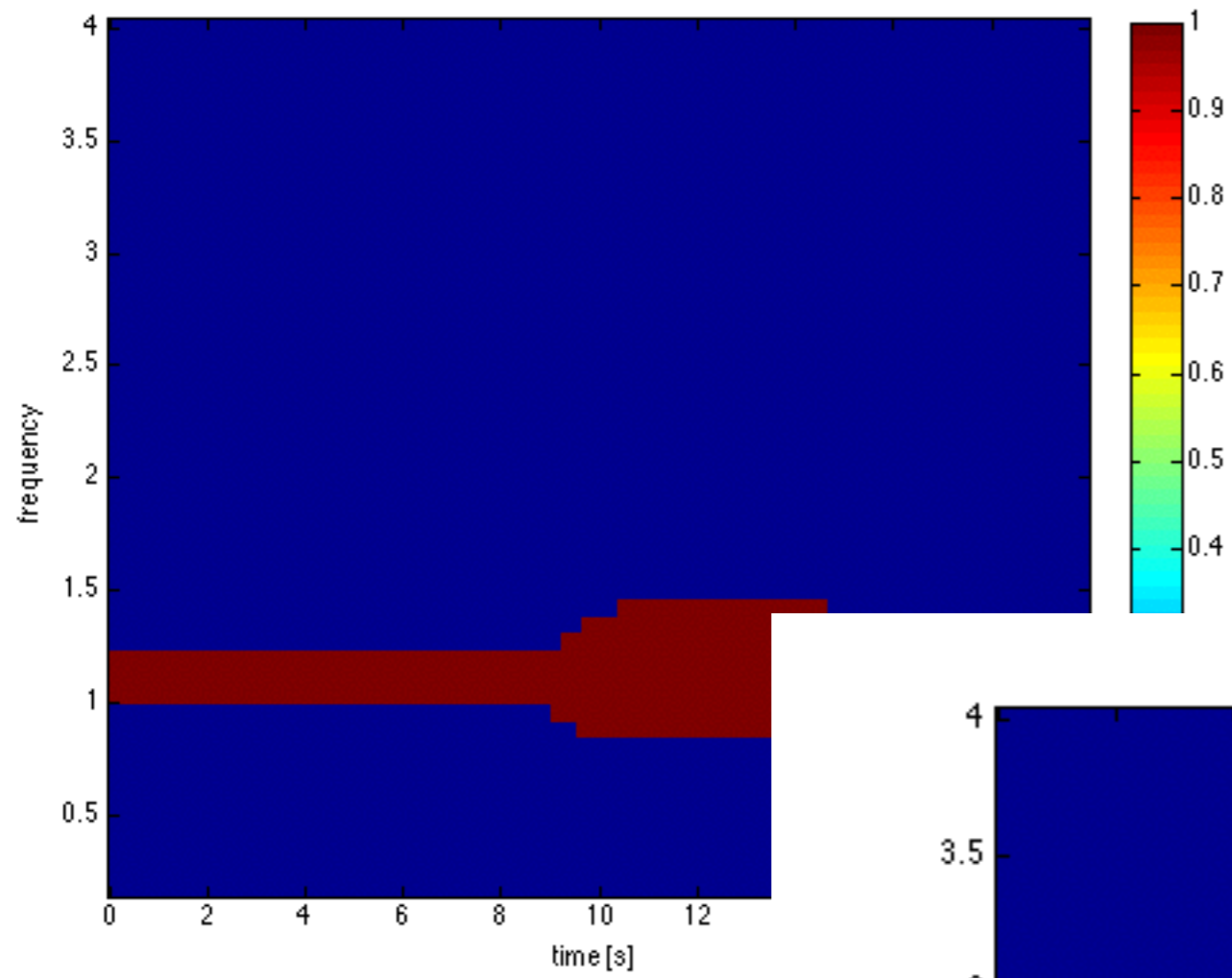
nur die Bereiche zählen,
in denen PSD in **beiden** Kanälen groß ist.

Idee:



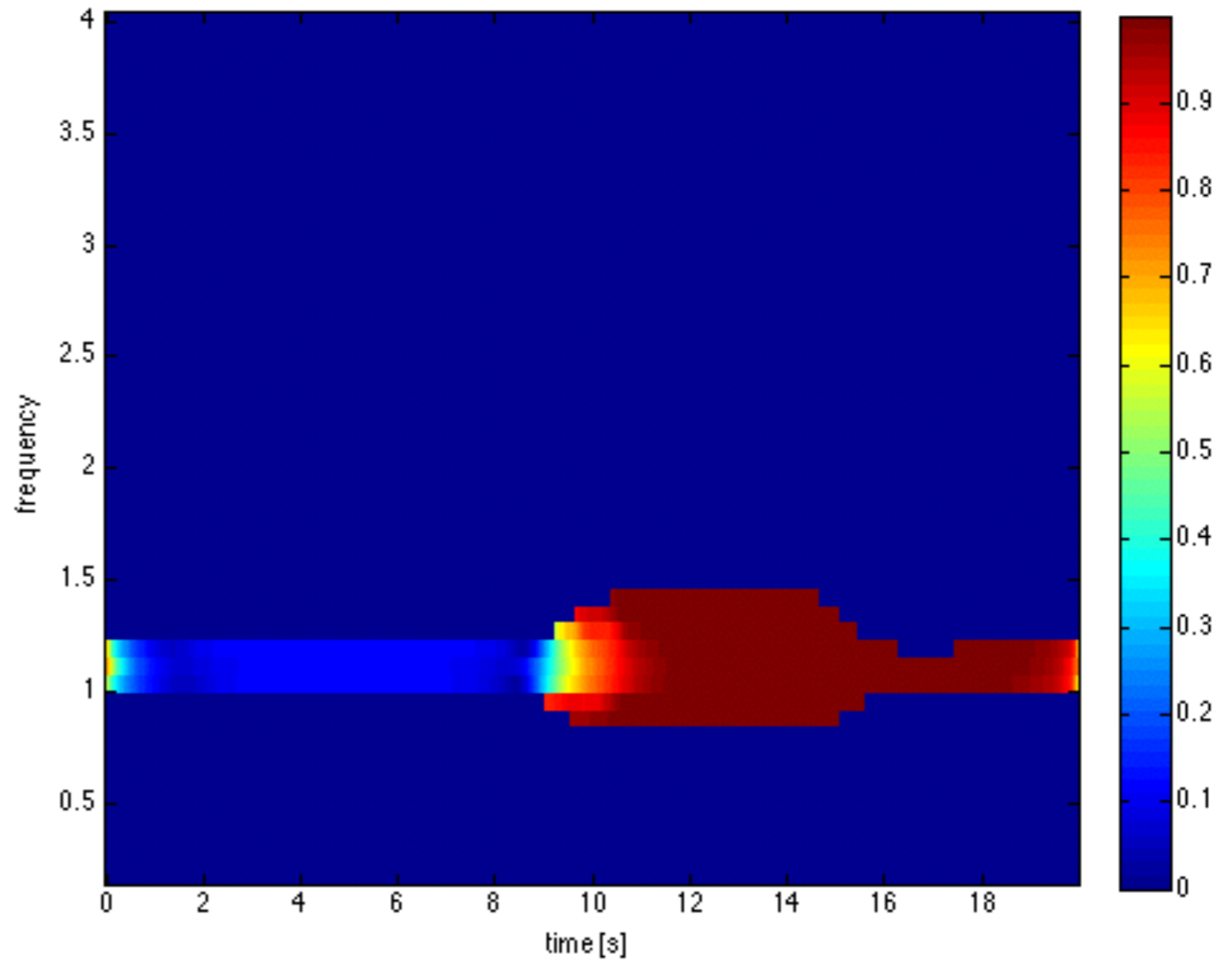


“Schablone” für R



“Schablone” für R

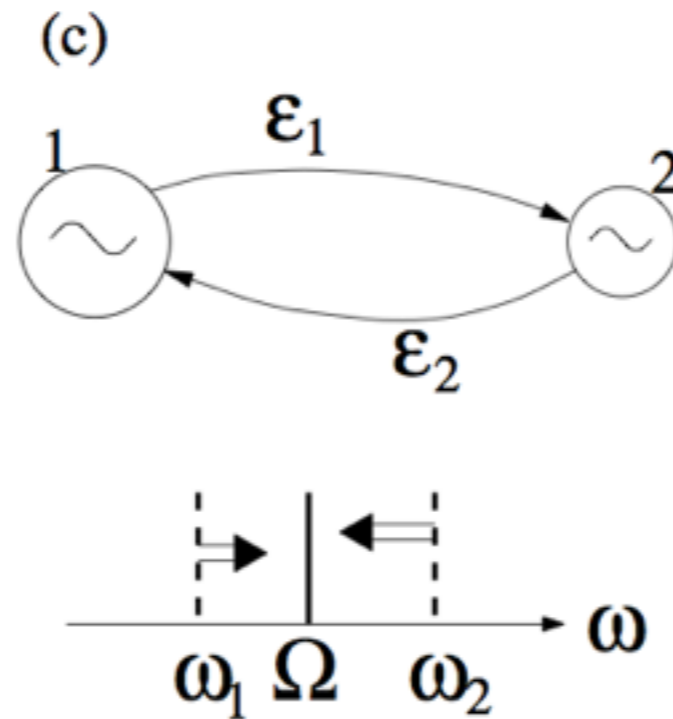
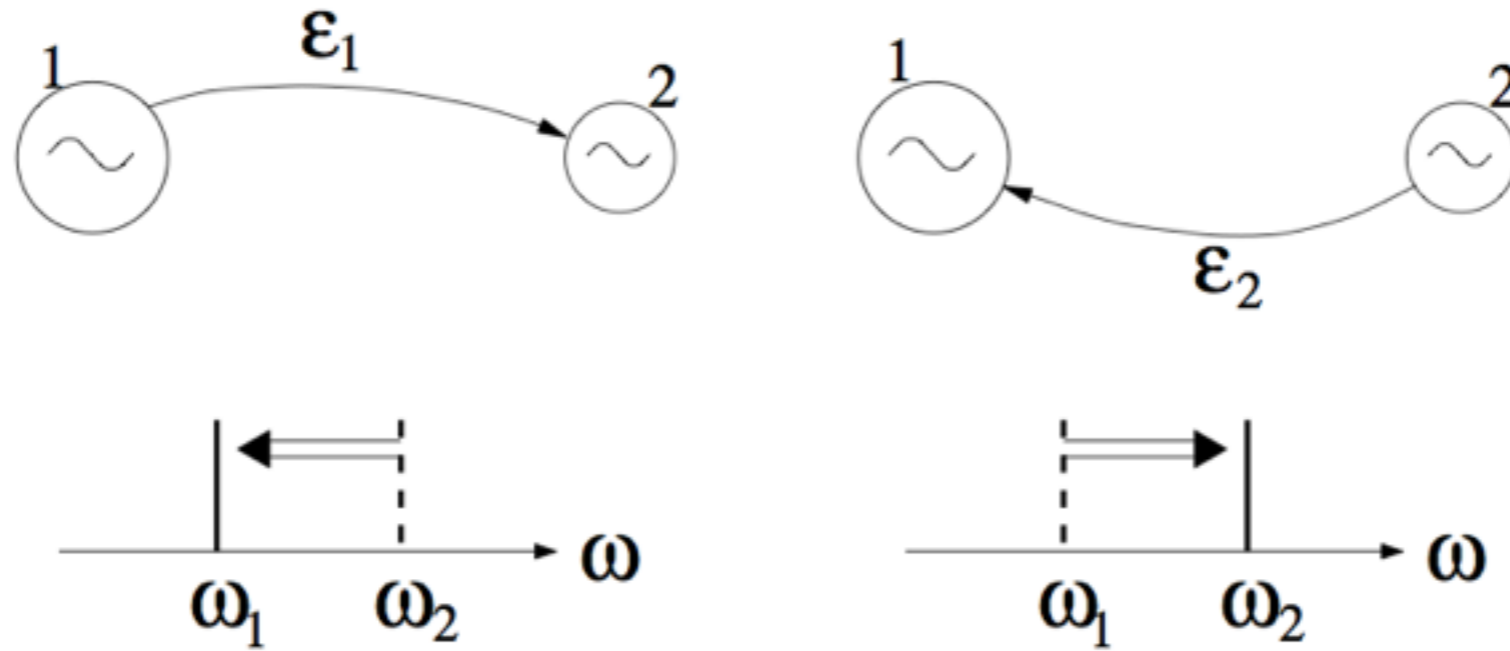
Ergebnis gut!!



IV. Synchronisation

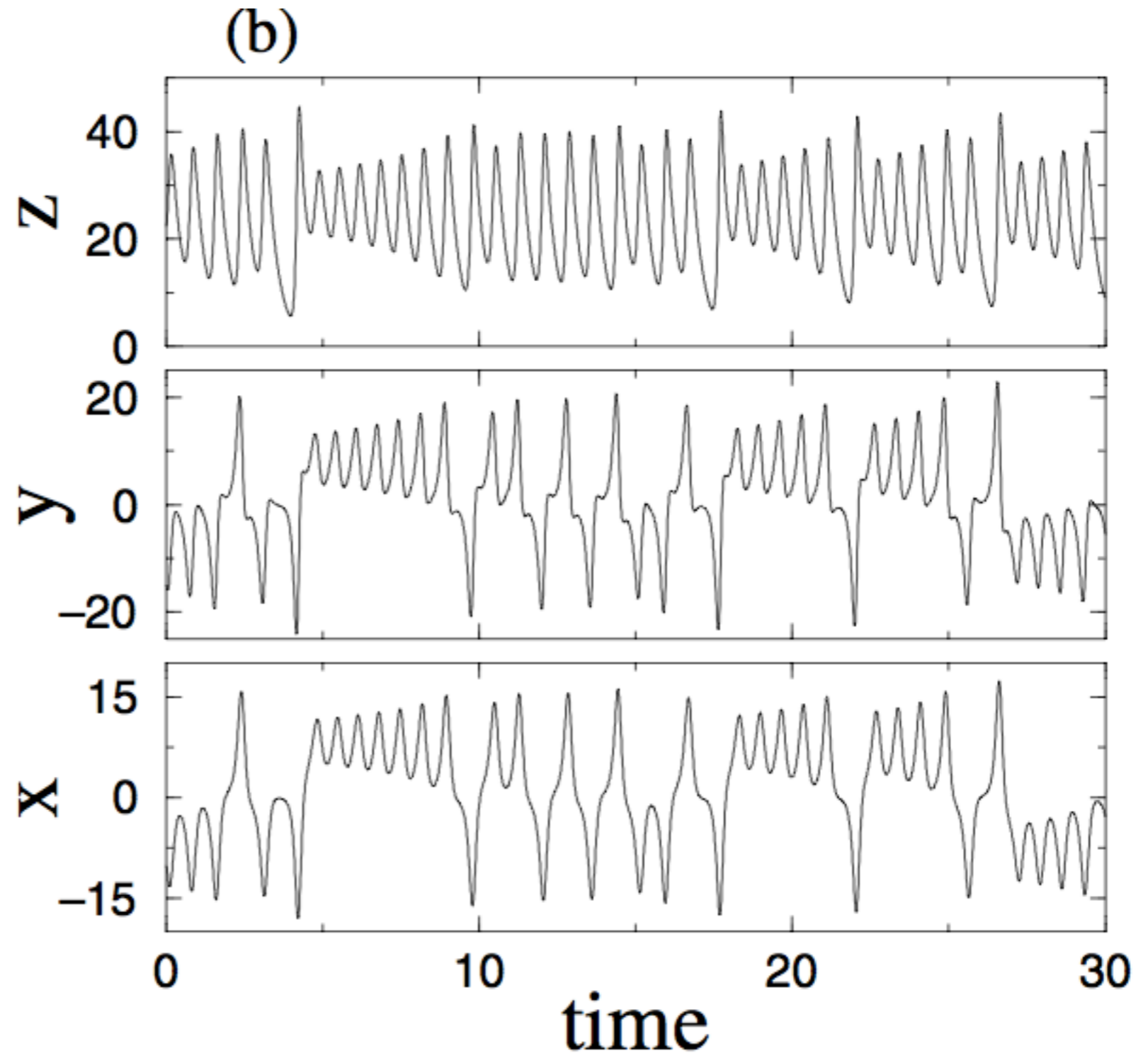
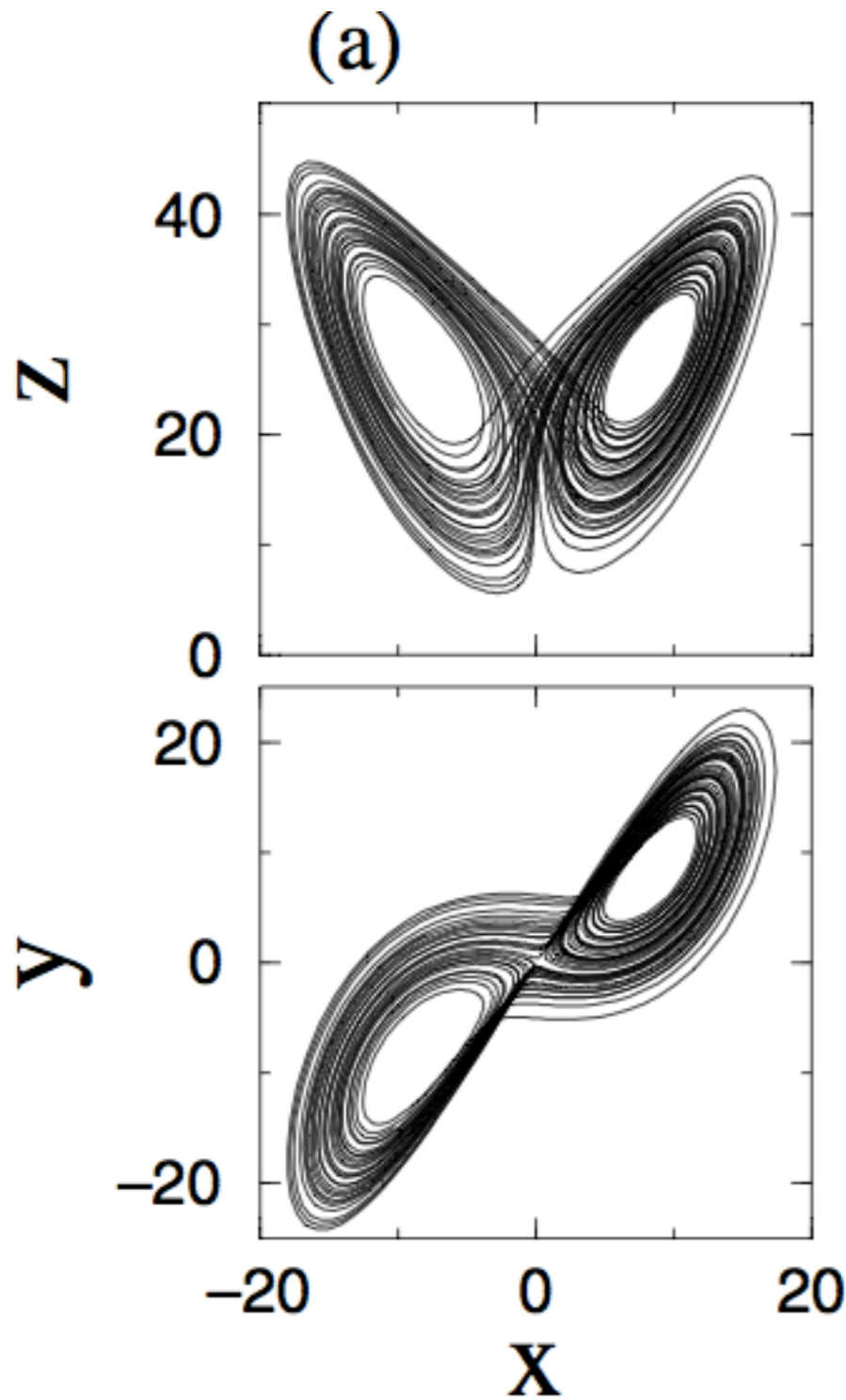
1. Historie und Definition
2. Statistische Analyse von verschiedenen Datentypen
3. Amplituden- und Phasensynchronisation
4. Vollständige und partielle Synchronisation

entrainment: mutual synchronisation



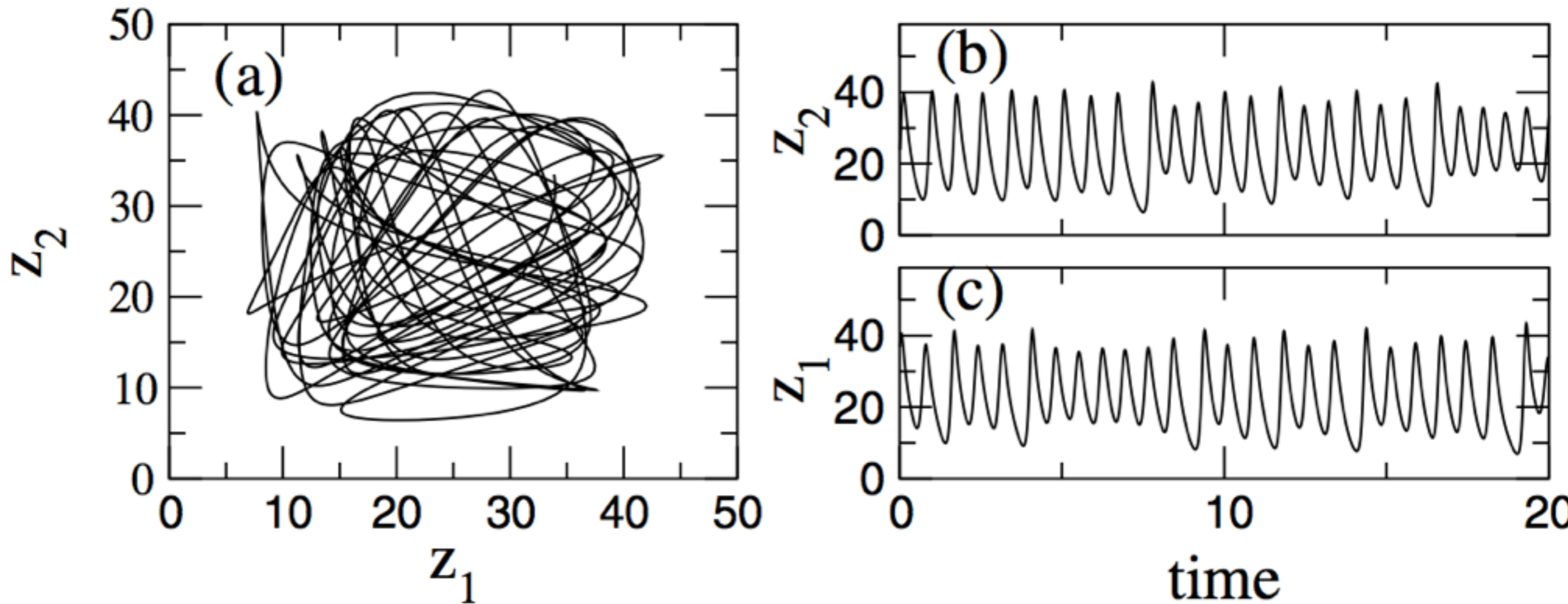
Volle Synchronisation

Beispiel: Lorenz-Attraktor



keine Kopplung

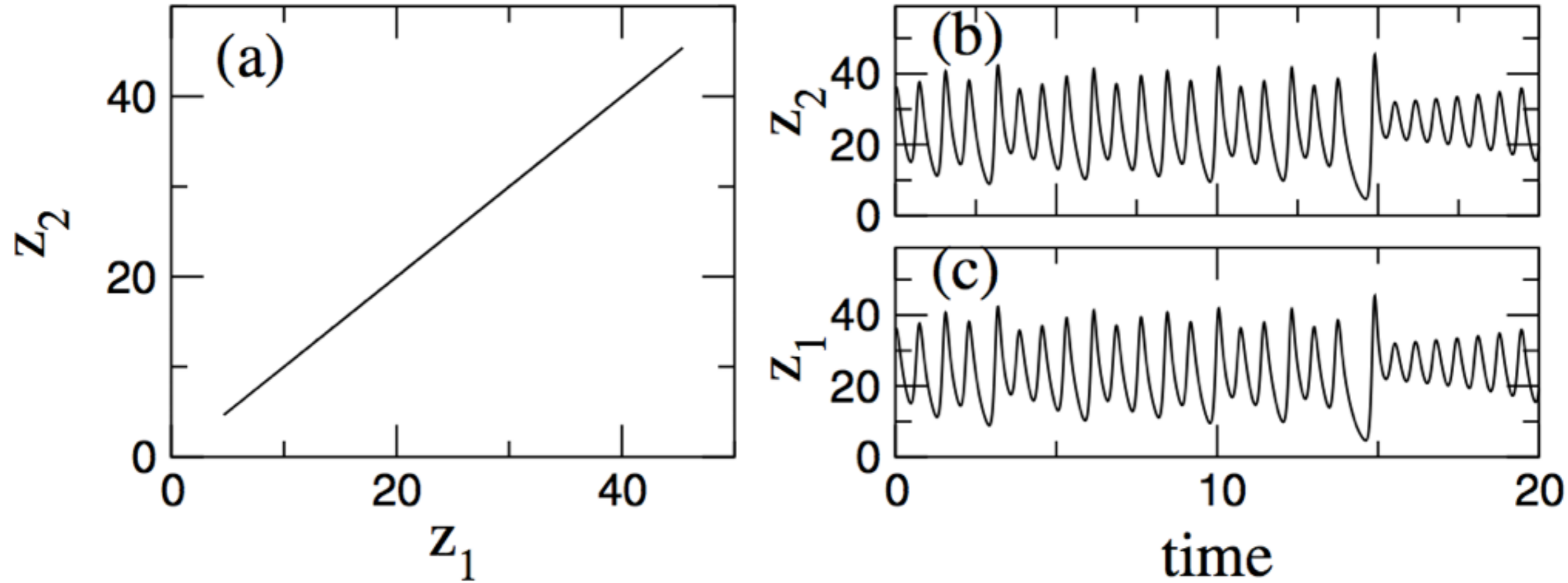
2 chaotische Attraktoren (Lorenz-System)



keine Synchronisation

schwache Kopplung

2 chaotische Attraktoren (Lorenz-System)



volle Synchronisation

Ende