Westfälische
Wilhelms-Universität
Münster

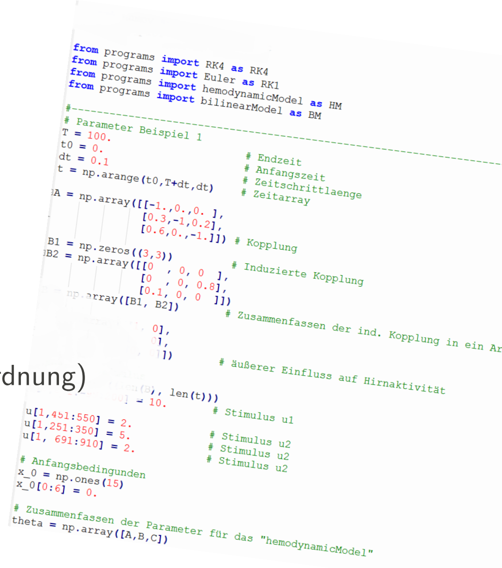
Konnektivität im Gehirn

Lutz Althüser, Tobias Frohoff-Hülsmann, Victor Kärcher,
Lukas Splitthoff, Timo Wiedemann

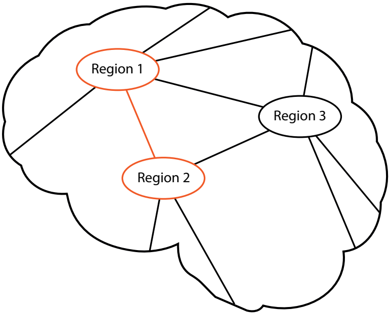
Unterstützt durch: Christian Himpe

Überblick

- Motivation und Ziel
- DCM Modelle
  - Lineares Modell
  - Bilineares Modell
  - Hämodynamisches Modell
- Numerische Methoden
  - Euler-Verfahren
  - Runge-Kutta-Verfahren (4. Ordnung)
- Numerische Simulation
  - 2-Regionen-System
- Literatur



Einleitung in DCM - Dynamic Causal Modelling



Interaktion zwischen verschiedenen Hirnregionen

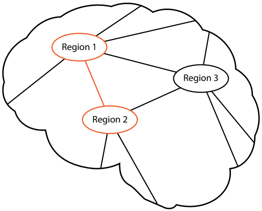
Konnektivität im Gehirn

Über die mathematische Modellierung von Interaktionen zwischen mehreren Regionen des Gehirns.

Ziel

Das Aufstellen eines einfachen und realistischen neuronalen Modells aller betrachteten interagierenden Gehirnregionen.

Lineares Modell



Vernetzung von Hirnregionen

Inputs $u \rightarrow$ Outputs z pro Hirnregion

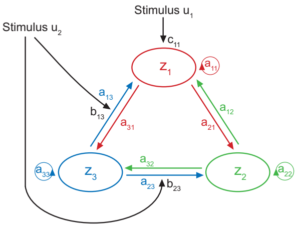
Inputs	Outputs
▸ direkten Input: Stimulation u der Hirnregion ▸ ...	▸ neuronale Aktivität in der Hirnregion ▸ ...

$$\dot{z} = Az(t) + Cu(t)$$

Matrix A: Konnektivitätsmatrix - Verschaltung der Hirnregionen

Matrix C: Einfluss der Inputs auf die neuronale Aktivität einer Hirnregion

Bilineares Modell



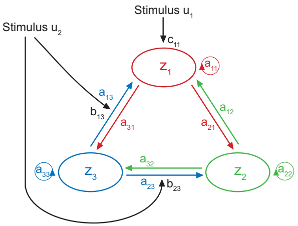
Mathematische Beschreibung

- Modellierung basierend auf Taylorentwicklung
- Dynamik und Konnektivität durch drei Parameter beschreiben

Taylorentwicklung

$$f(z,u) \approx f(0,0) + \frac{\partial f}{\partial z} z + \frac{\partial f}{\partial u} u + \frac{\partial^2 f}{\partial z \partial u} zu$$

Bilineares Modell



Taylorentwicklung

$$f(z,u) \approx f(0,0) + \frac{\partial f}{\partial z} z + \frac{\partial f}{\partial u} u + \frac{\partial^2 f}{\partial z \partial u} zu$$

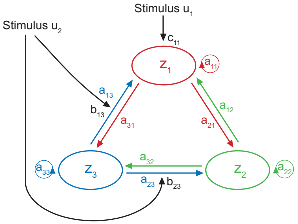
Bsp: Aktivität der Region 1

$$\dot{z}_1 = a_{11} z_1 + a_{12} z_2 + a_{13} z_3 + u_2 b_{13}^{(2)} + c_{11} u_1$$

Mathematische Beschreibung

- Modellierung basierend auf Taylorentwicklung
- Dynamik und Konnektivität durch drei Parameter beschreiben

Bilineares Modell



Mathematische Beschreibung

- Modellierung basierend auf Taylorentwicklung
- Dynamik und Konnektivität durch drei Parameter beschreiben

Taylorentwicklung

$$f(z,u) \approx f(0,0) + \frac{\partial f}{\partial z} z + \frac{\partial f}{\partial u} u + \frac{\partial^2 f}{\partial z \partial u} zu$$

Bsp: Aktivität der Region 1

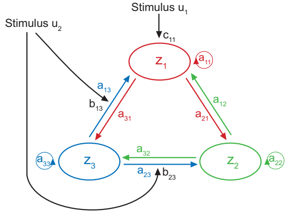
$$\dot{z}_1 = a_{11} z_1 + a_{12} z_2 + a_{13} z_3 + u_2 b_{13}^{(2)} + c_{11} u_1$$

$$\dot{z} = (A + \sum_i u_i B^{(i)}) z + Cu$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & b_{13} \\ 0 & 0 & b_{23} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Bilineares Modell



Taylorentwicklung

$$f(z,u) \approx f(0,0) + \frac{\partial f}{\partial z} z + \frac{\partial f}{\partial u} u + \frac{\partial^2 f}{\partial z \partial u} zu$$

Bsp: Aktivität der Region 1

$$\dot{z}_1 = a_{11} z_1 + a_{12} z_2 + a_{13} z_3 + u_2 b_{13}^{(2)} + c_{11} u_1$$

$$\dot{z} = (A + \textstyle\sum_i u_i B^{(i)}) z + Cu$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & b_{13} \\ 0 & 0 & b_{23} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

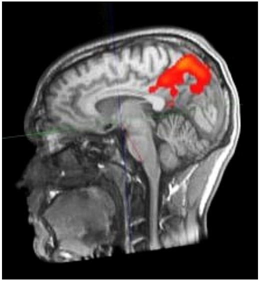
Parameter A, B, C

- A: feste Verknüpfung der Hirnregionen
- B: Einfluss des Inputs auf Konnektivität
- C: Einfluss des Inputs auf neuronale Aktivität der Hirnregionen

Vergleichbarkeit

Bilineare Modell $\Rightarrow$ Gehirnaktivitäten $z_i(t)$

Experiment (funktionelle MRT)$\Rightarrow$ BOLD-Signal/Kontrast $y_i(t)$
$\approx$ Sauerstoffgehalt der roten Blutkörperchen



Hämodynamisches Modell

4 biophysikalische Zustandsvariablen übermitteln $z_i(t) \rightarrow y_i(t)$:
$s_i(t)$: Zusammenfassung mehrerer neurogener Signale
$f_i^{in}(t)$: (sauerstoffreicher) Blutzufluss
$v_i(t)$: Venenvolumen
$q_i(t)$: Desoxyhämoglobinmenge

Biophysikalisch:

$$\dot{s}_i = z_i - \kappa s_i - \gamma(f_i^{in} - 1)$$
$$\dot{f}_i^{in} = s_i$$
$$\dot{v}_i = \frac{1}{\tau}(f_i^{in} - f_i^{out}) = \frac{1}{\tau}(f_i^{in} - v_i^{1/\alpha})$$
$$\dot{q}_i = \frac{1}{\tau}(f_i^{in} E_i/\rho - f_i^{out} q_i/v_i)$$

BOLD-Signal (fMRT):

$$y_i = V_0(k_1(1 - q_i) + k_2(1 - q_i/v_i) + k_3(1 - v_i))$$

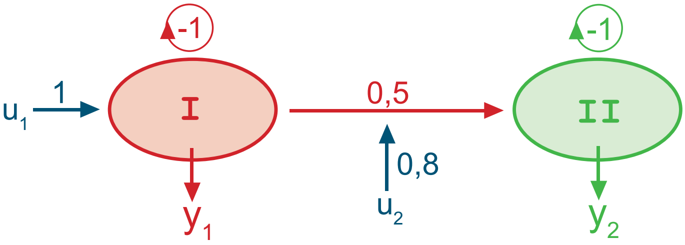
Euler-Verfahren

explizites Verfahren

Runge-Kutta-Verfahren (4. Ordnung)

Analyse der effektiven Konnektivität

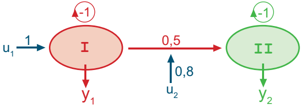
Simulation eines 2-Regionen-Systems

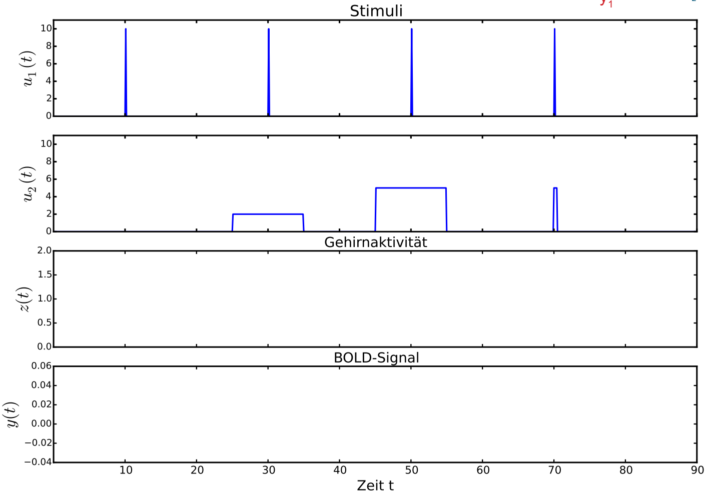


$$\dot{z}(t) = A \cdot z(t) + \sum_j u_j B^j \cdot z(t) + C \cdot u(t)$$

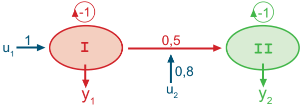
$$A = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0.5 & -1 \end{pmatrix} \quad B_1 = 0 \quad B_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0.8 & 0 \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

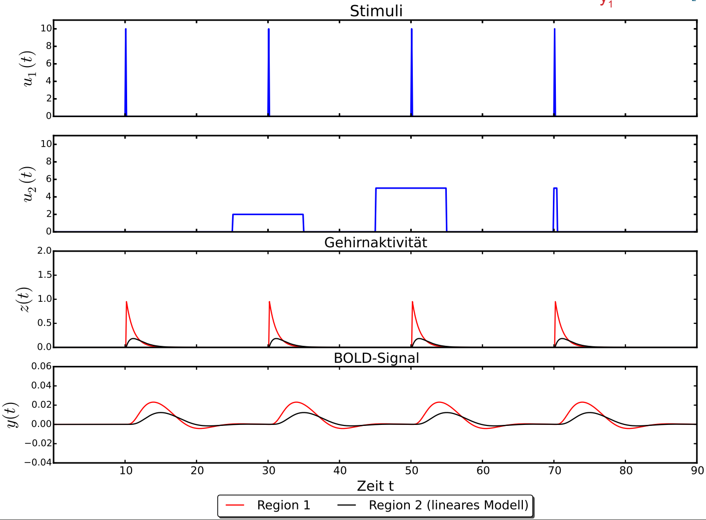
Simulation eines 2-Regionen-Systems



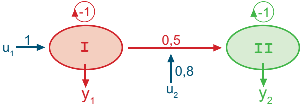


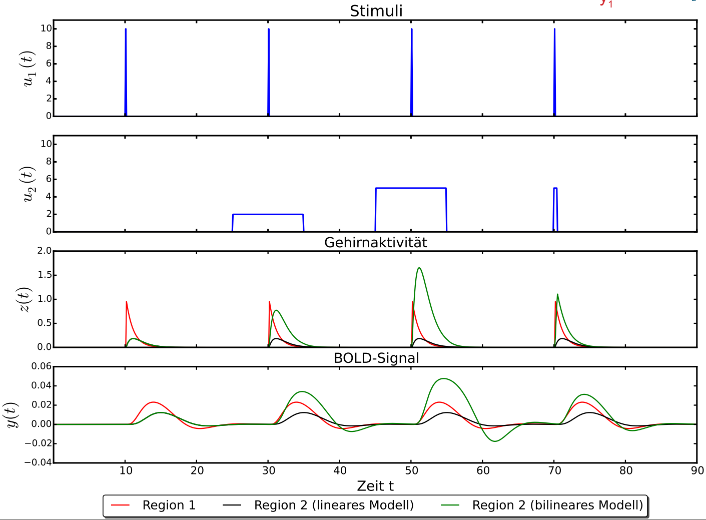
Simulation eines 2-Regionen-Systems





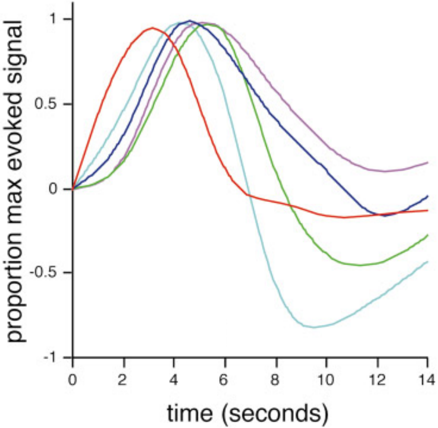
Simulation eines 2-Regionen-Systems





Zusammenfassung und Ausblick

- *Ziel:*
  Modellierung von Interaktionen in einem neuronalen Netzwerk
- *Ansatz:*
  Taylorentwicklung bis zur 2ten Ordnung für die neuronale Aktivität
- *Vergleichbarkeit mit Experiment:*
  Hämodynamisches Modell Variation des Blutvolumens und des desoxygenierten Hämoglobins



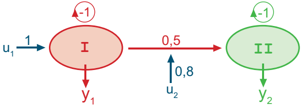
Hämodynamische Antworten einer Gruppe von fünf Probanden.
(nach Aguirre et al., NeuroImage **8**, 1998)

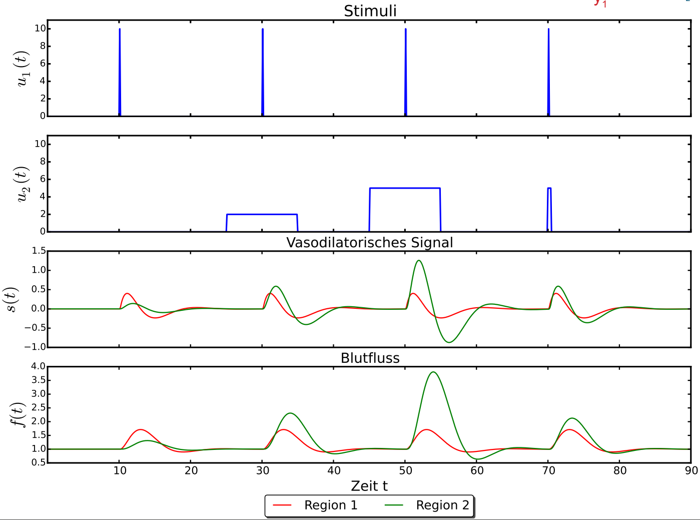
Danke für die Aufmerksamkeit!

Literatur

- *Dynamic causal modelling*
  K.J. Friston, L. Harrison and W. Penny / NeuroImage (2003)
  `web.mit.edu/swg/ImagingPubs/connectivity/Dcm_Friston.pdf`

Simulation eines 2-Regionen-Systems





Simulation eines 2-Regionen-Systems