

Neuroinformatik: Theorie Neuronaler Informationsverarbeitung

Martin Paul Nawrot

Jahrgang 1970
Neuroinformatik und
Theoretische Neuro-
wissenschaften
Freie Universität Berlin

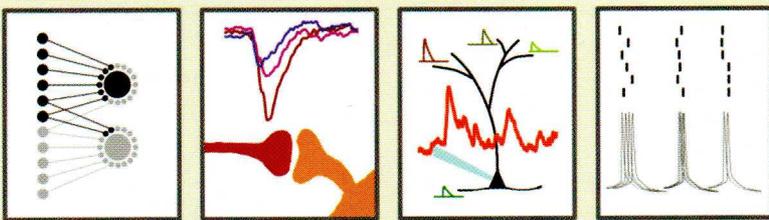
Mit seinem Team forscht Martin Nawrot über grundlegende Prinzipien der Informationsverarbeitung in Gehirnen. Der Fokus liegt hierbei auf zwei Modellsystemen. In der Großhirnrinde von Säugetieren stehen die Zuverlässigkeit und Präzision neuronaler Substrate sowie die zentrale Steuerung von willentlicher Bewegung im Blickpunkt. Im Gehirn von Insekten, insbesondere der Honigbiene, untersucht er die zeitliche Dynamik sensorischer Wahrnehmung sowie die neuronalen Substrate von Lernen, Gedächtnisbildung und Entscheidungsfindung mit dem langfristigen Ziel, künstliche Gehirne in biomimetischen Robotern einzusetzen.

Den zentralen methodischen Ansatz seiner Forschungsarbeit bilden mathematische und rechnergestützte Modelle von Hirnfunktionen. Eine erfolgreiche Theoriebildung setzt die enge Zusammenarbeit mit experimentellen Arbeitsgruppen in der systemischen Neurobiologie voraus und erfordert als weiteren methodischen Aspekt statistische und modellgetriebene Analysen von physiologischen Daten aus Verhaltensversuchen mit Mensch und Tier.

Präzision und Variabilität im Gehirn

Wir sind in unserem täglichen Leben mühelos dazu in der Lage, zuverlässig sensorische Reize zu interpretieren und unsere Bewegungen zeitlich präzise zu koordinieren, etwa beim Autofahren. Misst man jedoch die neuronalen Signale des Gehirns während einer wiederholten sensorischen Reizung oder während der wiederholten Durchführung einer Handlung, so zeigen diese eine äußerst hohe Variabilität auf verschiedenen zeitlichen und räumlichen Skalen. Diese Beobachtung gilt für globale Massensignale, wie z.B. das Enzephalogramm (EEG), ebenso wie für die Aktivität einzelner Nervenzellen, und sie trifft in besonderem Maße auf die neuronale Aktivität der Großhirnrinde zu. Für unser Verständnis neuronaler Informationsverarbeitung im Gehirn ist ein tieferes Verständnis der Ursachen und Quellen der hohen neuronalen Variabilität von fundamentaler Bedeutung.

Abb. 1 Eine Nervenzelle erhält Eingänge von vielen vorgeschalteten Nervenzellen (links), welche über synaptische Schaltstellen (mitte links) übertragen werden. Die Summe aller einlaufenden Signale bildet das zeitliche veränderliche postsynaptische Summenpotential (mitte rechts), welches zu zeitlich mehr oder weniger präzisen Aktionspotentialen (Ausgangssignal) führt (rechts). Jeder dieser biochemischen und biophysikalischen Einzelprozesse kann zur Variabilität in Amplitude und zeitlicher Präzision beitragen.



Eine grundsätzliche Frage lautet: Sind die neuronalen Grundbausteine des Gehirns – die Nervenzellen und Synapsen – für sich genommen dazu in der Lage, eingehende Signale zuverlässig und zeitlich präzise zu ver-

arbeiten (Abb. 1)? In Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern von der Universität Freiburg hat Martin Nawrot für die Untersuchung dieser Frage eine neue experimentelle Methode entwickelt, die es erlaubt, das neuronale Netzwerk in einem Hirnschnittpräparat kontrolliert zu aktivieren. Die Wiederholung raum-zeitlicher präsynaptischer Reizmuster und die Auswertung der postsynaptischen Antworten ergab eine hohe Reproduzierbarkeit sowie eine zeitliche Genauigkeit von unter einer Millisekunde für die synaptische Übertragung und dendritische Integration in Pyramidalzellen (Nawrot et al., 2009; Abb. 2). Dies zeigt, Neurone in der Großhirnrinde sind prinzipiell geeignet für eine zeitlich präzise Kodierung, wie sie von einigen gängigen Theorien gefordert wird. In einer theoretischen Studie wurde weiterhin gezeigt, dass neuron-intrinsische Mechanismen der Selbstinhibition und Adaptation die Variabilität einzelner Nervenzellen und auch die des sogenannten Populationscodes aktiv unterdrücken und somit einer zuverlässigen Kodierung dienen (Farkhooi, Strube-Bloss & Nawrot, 2009; Nawrot 2010).

In einer Reihe weiterer Studien widmete sich Martin Nawrot der Frage, wie sich die langsame Änderung globaler Netzwerkzustände im Gehirn – etwa auf Grund von veränderter Aufmerksamkeit – auf die neuronale Variabilität auswirkt. In einer Kombination von experimentellen und theoretischen Studien ergab sich eine eindeutige Schätzung: Mehr als die Hälfte der empirisch beobachteten Variabilität lässt sich durch globale Netzwerkdynamiken erklären (zusammengefasst in Nawrot 2010).

Neuronale Grundlagen von Gedächtnisbildung und Entscheidungsfindung

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt sind die neuronalen Mechanismen von Lernen, Entscheidungen und Verhaltenssteuerung in der Honigbiene. In enger Kooperation mit der experimentellen Arbeitsgruppe um Randolph Menzel an der Freien Universität Berlin konnte Martin Nawrot jüngst zeigen, dass eine bestimmte Gruppe von Nervenzellen im Pilzkörper – eine zentrale Struktur des Insektengehirns (Abb. 3) – zuverlässig die Assoziation von Duftreizen mit einer Belohnung kodiert (Strube-Bloss, Nawrot & Menzel,

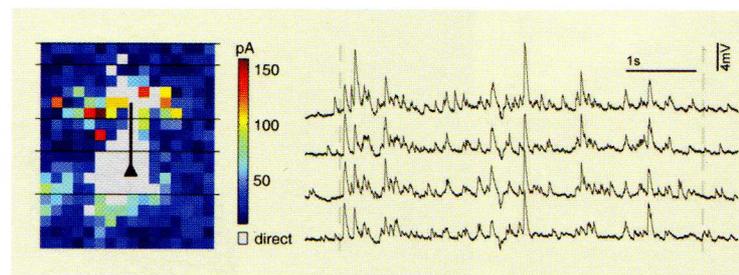
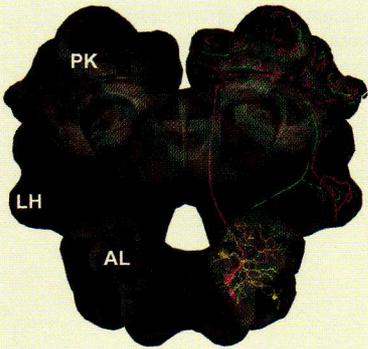


Abb. 2 Pyramidalzellen in der Großhirnrinde arbeiten zeitlich präzise. Links: Orte präsynaptischer Reizung von Nervenzellen im Hirnschnittpräparat und farblich dargestellt die resultierende Amplitude des jeweiligen postsynaptischen Stroms gemessen in einer Pyramidalzelle (schwarz). Rechts: Das Summenpotential in der postsynaptischen Zelle zeigt eine hohe Zuverlässigkeit und zeitliche Präzision während vier identisch wiederholter Reizmuster. Abbildung modifiziert nach Nawrot et al., 2009.

Abb. 3 Standardgehirn der Honigbiene. Im sensorischen Netzwerk des Antennallobus (AL) werden olfaktorische Eingänge verarbeitet. Gezeigt ist in gelb ein lokales Interneuron und in violett und grün je ein Projektionsneuron, die in den Pilzkörper (PK) und das laterale Horn (LH) projizieren. Dank an Jürgen Rybak für das Bildmaterial. Rekonstruierte Nervenzellen aus Krofczik, Menzel & Nawrot, 2009.



2011). Die Erwartung einer erst zwei Sekunden später auftretenden Belohnung wird dabei bereits ca. 150 Millisekunden nach Beginn des Duftreizes vorhergesagt und somit nur etwa 20ms nachdem die Duftidentität im vorgeschalteten sensorischen Netzwerk kodiert wird (Krofczik, Menzel & Nawrot, 2009). Es verbleiben ca. 250–400 ms, bis die Biene das erlernte Reizverhalten zeigt. Diese Zeit dient, so die neue Hypothese, der zeitlichen Integration der sensorischen Evidenz als Basis für eine Verhaltensentscheidung.

Künstliche Gehirne und biomimetische Robotik

Aufbauend auf den Erkenntnissen über die physiologischen Vorgänge im Insektengehirn und aufbauend auf dem detaillierten Wissen über die Anatomie der Gehirne entwickeln Martin Nawrot und seine Mitarbeiter funktionelle neuronale Netzwerkmodelle – man spricht in diesem Zusammenhang auch von neuromorphen Modellen – welche wesentliche Gehirnfunktionen von der Reizverarbeitung bis zur Verhaltenssteuerung nachahmen. Diese künstlichen Gehirne sollen in einem nächsten Schritt in biomimetische Roboter eingesetzt werden. Das realistische Ziel ist es, autonom agierende Roboter nach biologischem Vorbild zu entwickeln, die natürliche Verhaltensweisen wie Explorationsverhalten, autonomes Lernen (und Vergessen) nachahmen.

Klassische Ansätze in der Künstlichen Intelligenz nutzen prozedurale Algorithmen, die in Form von Software auf einem Computer ablaufen. Dabei wird Information in diskreten Schritten und nach fest vorgegebenen Regeln abgearbeitet. »Lernen« führt in solchen Systemen zu einem expliziten »Gedächtnis« das in Form von Tabellen und Assoziationsmatrizen angelegt wird. Der neue Ansatz neuromorpher Modellierung unterscheidet sich vom klassischen Ansatz in drei wesentlichen Aspekten. (1) Information wird in einem neuronalen Netzwerk parallel und ohne Taktung verarbeitet. (2) Die Regeln sind nur implizit angelegt durch die biophysikalischen Eigenschaften der Neuronenmodelle und durch die der Anatomie von biologischen Gehirnen nachempfundene Netzwerkarchitektur – man spricht in diesem Zusammenhang von einer »tiefen« Architektur. (3) Gedächtnis wird verteilt und implizit durch plastische Veränderung von Synapsenmodellen angelegt. Der Nachteil dieses Ansatzes liegt vor allem in der begrenzten Formalisierbarkeit biologischer Netzwerkarchitektur.

In diesem Zusammenhang testen Martin Nawrot und seine Mitarbeiter die noch junge Technologie der neuromorphen Hardware, bei der Neurone und Synapsen in Form analoger integrierter Schaltkreise realisiert sind. Diese Chips bieten in der Zukunft die Möglichkeit, künstliche neuronale Netze kosten-, platz- und energiesparend in intelligenten Systemen einzusetzen.

Martin Paul Nawrot | Physiker

Jahrgang 1970
 Neuroinformatik, Institut für Biologie
 Freie Universität Berlin
 Königin-Luise-Straße 1–3
 14195 Berlin
 martin.nawrot@fu-berlin.de
 www.biologie.fu-berlin.de/neuroinformatik/

**STUDIUM UND WISSENSCHAFTLICHER WERDEGANG**

1989	Abitur, Technisches Gymnasium, Freiburg im Breisgau
1990–1998	Studium der Physik, Politikwissenschaft und Geschichte, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und University of Kent at Canterbury (GB)
1998	Diplom Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
2003	Promotion zum Doctor rerum naturalium, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
2005–2006	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Biologie der Freien Universität Berlin
2007–2008	Nachwuchsgruppenleiter am Bernstein Zentrum für Computational Neuroscience Berlin
Seit 2008	Juniorprofessor für Bioinformatik an der Freien Universität Berlin

AUSZEICHNUNGEN / STIPENDIEN / FORSCHUNGSFÖRDERUNGEN

2005	Founding Member of the Bernstein Center for Computational Neuroscience Freiburg
2002–2005	WIN-Kollegiat (Sprecher) der Heidelberger Akademie der Wissenschaften

AUSGEWÄHLTE PUBLIKATIONEN

- Strube-Bloss M, Nawrot MP, Menzel R (2011) *Mushroom Body Output Neurons Encode Odor-Reward Associations*. *Journal of Neuroscience* 31(8):3129–3140
- Nawrot MP (2010) *Analysis and Interpretation of Interval and Count Variability in Neural Spike Trains*. In: Grün S, Rotter S (Eds.) *Analysis of Parallel Spike Trains*, Springer Series in Computational Neuroscience 7, Springer, New York
- Farkhooi F, Strube M, Nawrot MP (2009) *Serial correlation in neural spike trains: experimental evidence, stochastic modelling, and single neuron variability*. *Physical Review E* 79: 021905
- Krofczik S, Menzel R and Nawrot MP (2009) *Rapid odor processing in the honeybee antennal lobe network*. *Frontiers in Computational Neuroscience* 2:9
- Nawrot MP, Schnepel P, Aertsen A and Boucsein C (2009) *Precisely timed signal transmission in neocortical networks with reliable intermediate-range projections*. *Frontiers in Neural Circuits* 3:1
- Rickert J, Riehle A, Aertsen A, Rotter S, Nawrot MP (2009) *Dynamic encoding of movement direction in motor cortical neurons*. *Journal of Neuroscience* 29: 13870–13882

POSITION 2011

Juniorprofessor für Bioinformatik, Fachgebiet Neuroinformatik, Freie Universität Berlin