



Doctoral Thesis

## Neurally inspired models of belief-propagation in arbitrary graphical models

**Author(s):**

Steimer, Andreas

**Publication Date:**

2012

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007623280> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH No. 20325

# Neurally Inspired Models of Belief-Propagation in Arbitrary Graphical Models

A dissertation submitted to the

ETH ZÜRICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

**Andreas Steimer**

Dipl.-Ing. Mikrosystemtechnik,  
Albert-Ludwigs Universität Freiburg im Breisgau

born January, 21th, 1978

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Rodney J. Douglas, examiner

Dr. Shih-Chii Liu, co-examiner

Prof. Dr.phil.nat. Walter M. Senn, co-examiner

2012

## Abstract

In recent years psychophysical experiments have revealed information processing in the human brain to be largely consistent with Bayesian inference in graphical models. Likewise, in an attempt to unify hitherto existing approaches to learning problems, parallel ongoing research in the field of machine learning has converged to the same framework. A natural question then to ask is, what is the physical nexus between the abstract Bayesian techniques from machine learning and information processing in the brain, or, more precisely, how can the known biophysical properties of neurons and their networks give rise to such Bayesian computations?

By focussing particularly on the Belief-Propagation (BP) algorithm, this thesis provides answers to that question. Our answers reside on different levels of abstraction, ranging from abstract, spike-based principles that deal with the problem at the level of neural coding, to more concrete approaches for implementing BP in neural substrates.

In the first case, we define a general sampling-based scheme that entails BP as a statistical meta-property, such that no special-purpose processing blocks for emulating the elementary BP-computations are needed. Using an interspike-interval and a spike-count code respectively, two BP processors are deduced from this scheme and verified by simulation. In particular we show that the interspike-interval processor is extremely general, since it allows for BP in arbitrary graphical models, even in presence of analog variables.

Concerning the concrete BP implementations we describe and simulate a setup of interconnected Liquid-State Machines (LSMs) as an ensemble of locally interacting nodes that give rise to BP. This general message-passing architecture was inspired by the stereotypical, graph-like connectivity observed in a variety of mammalian neocortices. Moreover, the architecture is consistent with - and provides a reasonable interpretation for- the hypothesized, canonical microcircuitry in cortex.

Finally we combine the above two levels of abstraction, by concretely implementing the sampling-based processors in our LSM setup. With respect to the interspike-interval processor we furthermore provide an interpretation of its functionality in terms of single-neuron processing. In all cases we found our simulation results to be in very good agreement with numerical evaluations of the BP algorithm.

In summary this thesis pushes forward flexible, spike-based models of BP, that reside on several levels of abstraction. At each such level, the respective models are general enough to give rise to a multitude of more concrete versions that can be experimentally tested, and of which we verify an exemplary selection by simulation. Therefore, the validity of our general models remains, even should subsequent experimental research specifically falsify their concrete versions. Moreover, some of these models provide an algorithmic meaning to the long speculated function of cortical microcircuitry, whereas others allow for BP in analog

## IV

graphical models - a setup found to be intractable in traditional software versions of BP. Hence, the latter models may also serve as fruitful inspiration for unconventional hardware implementations, e.g. in the context of 'analog Very-Large-Scale-Integrated' electronic circuits.

## Zusammenfassung

In den letzten Jahren konnte durch psychophysikalische Studien gezeigt werden, dass das Resultat der Informationsverarbeitung im menschlichen Gehirn in weiten Teilen mit bayes'scher Inferenz in graphischen Modellen übereinstimmt. Im Versuch bis anhin existierende Lösungsansätze für Lernprobleme zu vereinfachen, griff auch die Forschung im Bereich des maschinellen Lernens parallel dazu immer stärker auf bayes'sche Methoden zurück. Es lässt sich daher die Existenz eines physikalischen Nexus' zwischen den abstrakten, bayes'schen Techniken, wie sie aus dem maschinellen Lernen bekannt sind, und der Informationsverarbeitung im Gehirn vermuten. Genauer gesagt stellt sich die Frage, wie einzelne Neurone bzw. neuronale Netzwerke es schaffen, mit ihren biophysikalischen Eigenschaften bayes'sche Berechnungen durchzuführen.

Indem sie sich speziell auf den 'Belief-Propagation' (BP)-Algorithmus konzentriert gibt die vorliegende Arbeit Antworten auf diese Frage, wobei sie von verschiedenen Abstraktionsebenen Gebrauch macht, welche von allgemeinen, spikebasierten Prinzipien bis hin zu konkreten Implementierungen des BP-Algorithmus' in neuronalen Substraten reichen.

Im abstrakten Fall, d.h. wenn das Problem auf der Ebene der neuronalen Kodierung behandelt wird, zeigen wir ein allgemeines Verfahren auf, aus welchem die BP-Berechnungsvorschriften als statistische Meta-Eigenschaft hervorgehen. Wir leiten zwei Arten von BP-Prozessoren aus diesem Verfahren ab und verifizieren diese durch computergestützte Simulation. Die beiden Prozessoren unterscheiden sich in der Art der Spikekodierung der für den Algorithmus wichtigen Informationen: Im ersten Ansatz werden Informationen durch das Zeitintervall zwischen zwei Spikes (Interspike-Intervall) übertragen, im Zweiten dagegen durch die Anzahl der Spikes. Wir zeigen auf, dass insbesondere der Interspike-Intervall basierte Prozessor sehr allgemein einsetzbar ist, da er BP in beliebigen graphischen Modellen, auch solchen mit analogen Variablen, ermöglicht.

Im Fall konkreter BP-Implementierungen in neuronalen Netzwerken hingegen beschreiben und simulieren wir eine Architektur von miteinander verknüpften 'Liquid-State Machines' (LSMs), welche die vom BP-Algorithmus benutzten, lokal interagierenden Knoten eines graphischen Modells imitieren. Diese Architektur wurde durch die stereotype, graphenartige Verbindungsstruktur motiviert, wie sie zwischen Neuronen im Neokortex in einer Vielzahl von Säugetieren vorkommt. Darüberhinaus befindet sich dieser Ansatz in Übereinstimmung mit der Idee kortikaler, kanonischer Mikroschaltkreise und weist diesen algorithmische Bedeutung zu.

Zuletzt kombinieren wir die beiden genannten Abstraktionsebenen, indem wir die abstrakten Ansätze mithilfe der LSM-Architektur implementieren. Im Fall des Interspike-Intervall Prozessors ist es darüberhinaus auch möglich, dessen Funktionalität durch die Informationsverarbeitung eines einzelnen Neurons zu

beschreiben.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass in dieser Dissertation flexible spikebasierte BP-Ansätze vorangetrieben werden. Auf jeder Abstraktionsebene sind die entsprechenden Ansätze allgemein genug, so dass mehrere konkrete Modelle aus ihnen abgeleitet werden können und wir nur eine exemplarische Auswahl davon durch Simulation überprüfen. Jedes dieser Modelle wiederum könnte individuell durch nachfolgende experimentelle Forschung verifiziert/falsifiziert werden, ohne dass dadurch die Gültigkeit des dahinterstehenden, allgemeinen Ansatzes gefährdet würde. Darüberhinaus statten einige der Modelle die hypothetischen kortikalen Mikroschaltkreise mit einer algorithmischen Bedeutung aus, wohingegen andere die Realisierung von BP in analogen graphischen Modellen erlauben. Letzteres lässt sich in herkömmlichen Softwaresystemen nur schwer ermöglichen, weshalb die vorliegende Arbeit auch als Inspiration für BP-Implementierungen in z.B. analogelektronischen Hardwaresystemen dienen kann.