

Diss. ETH No. 25995

**Computation with Artificial Spin Ice:
Nanomagnetic Logic and Monopole Circuits**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
Hanu Arava

M.Sc., Texas State University

born 02.09.1987
citizen of India

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Laura J. Heyderman
Prof. Dr. Pietro Gambardella
Prof. Dr. Christopher H. Marrows

2019

ABSTRACT

In this PhD thesis, a new perspective to computation using nanomagnets is provided. The thesis makes use of dipolar coupled single domain nanomagnets, which are arranged on a lattice such as a square (or kagome lattice), producing an artificial square ice. For such an arrangement of nanomagnets, there are a large number of magnetic moment configurations that are associated with different dipolar energies and could eventually be exploited to mimic synaptic connectivity in the human brain. In this thesis, it is systematically shown that artificial spin ice inspired structures could be implemented in the transport of data, and to perform deterministic and probabilistic computational logic. In addition, a new scheme to control the location of nucleation of monopoles and the direction of the generated monopole currents is presented. Such a deterministic control of monopole currents could be implemented in monopole based computation.

In the first instance, chains of square rings are used to transport data from one location to another. Transportation of data was demonstrated by setting the initial state of the nanomagnets with an applied magnetic field and then allowing the relaxation of the magnetic moments to a ground state by increasing the temperature. It was shown that the ground state ordering in a linear chain of square rings could be controlled with an input nanomagnet, which was sufficiently long to ensure that it did not change its moment orientation when the temperature was raised. The data could be transported between the input and output magnet over a distance that was an order of magnitude larger than the distance previously achieved with a linear chain of nanomagnets.

Subsequently, a NAND logic gate was designed with an arrangement of up to 12 nanomagnets to reliably perform Boolean logic operations. A logic operation involved the relaxation of the nanomagnets from a particular initial state to a final ground state involving a sequence of moment reorientations. The energy path from the initial state to the final state, or the relaxation pathway, was engineered to reliably give one specific final output moment. It was demonstrated that this is reliable for all the four logic operations required to produce a NAND logic gate. The experimentally observed operational reliability of over 90% of the logic gates surpassed the ~50% operational reliability found in traditional nanomagnetic logic.

With the goal of creating a device that would mimic the human brain, a probabilistic logic gate was experimentally demonstrated, in which higher energy metastable states were incorporated into a relaxation pathway to produce a probabilistic output. A set of rules were derived to help identify arrangements of nanomagnets that would give moment reorientations to a higher energy state within a given relaxation pathway. Importantly, it was shown that the probability of an output could be tuned to any value by changing the strength of dipolar coupling between different magnets. Such a tuneable probability is essential for the development of artificial neural networks, in which the probability of

obtaining a certain output needs to be modified based on feedback. As a last step, a scheme to connect several logic gates was developed to demonstrate their use in extended circuits.

The final challenge addressed in this thesis was the control of the location of nucleation (or injection) of emergent magnetic monopoles and the generation of directional monopole currents in an artificial square ice. In order to understand the probability of injecting monopoles at the edges of an artificial square ice, it was important to consider the influence of the single vertex arrangements. The number of magnets at a single vertex can be reduced from four nanomagnets at the vertex to three or two nanomagnets. Assuming a globally applied initial field set state, the dipolar energies associated with these different vertex configurations will be different. In particular, the switching probabilities, from the initial state to a next state, continue to decrease as the number of magnets decreases. It was experimentally shown that deterministic injection of monopole currents is therefore possible when one of the artificial square ice edges was modified to include two nanomagnets at a vertex and the other incorporated four nanomagnets. Smaller structures were also built, in which deterministic injection and termination of monopole currents was demonstrated and a preliminary idea towards building a monopole current based transistor was introduced. Finally, the idea of using different vertex configurations incorporated in artificial spin ice structures is proposed, to give probabilistic generation and termination of monopole currents. Such probabilistic currents could be used for building monopole based probabilistic computing devices.

The ideas developed in this thesis could serve as foundational building blocks towards using artificial spin ice for computational applications. More importantly a new perspective is provided where relaxation pathways are considered for use in computation.

Zusammenfassung

In dieser Dissertation wird eine neue Perspektive auf den Transfer und die Verarbeitung von binären Daten mithilfe von Nanomagneten gegeben. Hierzu werden dipolar gekoppelte eindomänige Nanomagnete verwendet, die auf einem zweidimensionalen Gitter, etwa einem Quadrat-Gitter oder einem Kagome-Gitter, angeordnet sind. Solche sogenannte „künstlichen Spin-Eise“ ergeben eine große Anzahl magnetischer Konfigurationen mit verschiedenen dipolaren Energien, die letztendlich dazu genutzt werden könnten, um die synaptische Verbindung im menschlichen Gehirn nachzuahmen. In dieser Arbeit wird systematisch gezeigt, dass in von künstlichen Spinsystemen inspirierte nanomagnetische Konfigurationen Daten transportieren werden können sowie deterministische und probabilistische Berechnungslogiken ausgeführt werden können. Weiterhin wird ein neues Schema vorgestellt, mit dem sich der Ort der Entstehung und die Propagationsrichtung von sogenannten magnetischen Monopolen in nanomagnetischen Kagome-Gittern steuern lässt. Eine derartige deterministische Kontrolle von Monopolströmen könnte ebenfalls für die Verarbeitung von binären Daten verwendet werden.

In einem ersten Experiment werden Ketten von quadratischen Ringen verwendet, um Daten von einem Ort zu einem anderen zu transportieren. Der Datentransfer wurde experimentell demonstriert, wobei zuerst der Anfangszustand der Nanomagnete mit einem angelegten Magnetfeld initialisiert wurde, und dann die thermische Relaxation der magnetischen Momente in einen Grundzustand durch Erhöhen der Temperatur ermöglicht wurde. Es wurde gezeigt, dass der Grundzustand in einer linearen Kette von quadratischen Ringen durch den Zustand eines Eingabemoments kontrolliert werden kann. Dieser Eingabe-Nanomagnet ist ausreichend lang, um sicherzustellen, dass sich seine magnetische Konfiguration während der Transfer-Phase mit erhöhter Temperatur nicht ändert. Die Daten konnten zwischen dem Eingabe- und dem Ausgabemagneten über eine Distanz transportiert werden, die eine Größenordnung größer war als die Distanz, die zuvor mit einer linearen Kette von Nanomagneten erreicht wurde.

Anschließend wurde ein NAND-Logikgatter mit einer Anordnung von bis zu zwölf Nanomagneten entworfen, um zuverlässig Boolesche Logikoperationen auszuführen zu können. Eine logische Operation beinhaltete die Relaxation der Nanomagnete von einem bestimmten Anfangszustand in einen finalen Grundzustand, durch eine Sequenz von Umorientierung einzelner Nanomagnete. Unter Betrachtung der Energielandschaft der wechselwirkenden Nanomagnete wurde solch ein Relaxationspfad so ausgelegt, dass ein bestimmtes Ausgabemoment zuverlässig erreicht wird. Es wurde gezeigt, dass dies für alle vier Logikoperationen, die zur Herstellung eines NAND-Logikgatters erforderlich sind, eintritt. Die experimentell beobachtete Zuverlässigkeit von über 90% der Logikgatter übertraf weit die von 50% in bisher getesteten nanomagnetischen Logikgattern.

Mit dem Ziel, ein Gerät zu schaffen, das die Datenverarbeitung in einem menschliche Gehirn nachahmt, wurde experimentell ein probabilistisches Logikgatter demonstriert, bei dem die Relaxationspfade metastabile Zustände enthalten, welche zu es ermöglichen verschiedene Endzustände mit bestimmter Wahrscheinlichkeit zu erreichen. Eine Reihe von Regeln wurde abgeleitet, um Anordnungen von Nanomagneten zu identifizieren, welche Relaxationspfade, die Zustände höherer Energie enthalten, bedingen, und somit zu verschiedenen Endzuständen führen können. Es wurde insbesondere gezeigt, dass die Wahrscheinlichkeit einer Ausgabe beliebig eingestellt werden kann, indem die Stärke der dipolaren Kopplung zwischen verschiedenen Magneten verändert wird. Eine solche Kontrolle ist für die Entwicklung künstlicher neuronaler Netze wesentlich, in denen die Wahrscheinlichkeit, eine bestimmte Ausgabe zu erhalten, basierend auf einem Rückkopplungs-Kreis modifiziert werden muss. Als letzter Schritt wurde ein Schema zum Verbinden mehrerer Logikgatter entwickelt, um ihre Verwendung in erweiterten Schaltungen zu demonstrieren.

Die letzte Herausforderung, die in dieser Arbeit angesprochen wurde, war die Kontrolle der Lage der Nukleirung (oder Injektion) von emergenten magnetischen Monopolen und die Erzeugung von gerichteten Monopolströmen in einem künstlichen Spin-Eis. Um die Wahrscheinlichkeit einer Injektion von Monopolen an den Rändern eines künstlichen Spin-Eises zu verstehen, war es wichtig, den Einfluss von einzelnen Vertices, d.h. Treffpunkt verschiedener Nanomagnete, zu berücksichtigen. Die Anzahl der Magneten an einem einzelnen Vertex kann von vier Nanomagneten am Vertex auf drei oder zwei Nanomagnete reduziert werden, was die dipolaren Energien dieser Konfigurationen modifiziert. Insbesondere nimmt mit reduzierter Anzahl Nanomagnete am Vertex die Wahrscheinlichkeit ab, dass sich einzelne Momente umorientieren. Es wurde experimentell gezeigt, dass eine deterministische Injektion von Monopolströmen möglich ist, wenn eine der Kanten des künstlichen Spin-Eises so modifiziert wurde, dass sie zwei Nanomagnete an einem Vertex und die andere Kante vier Nanomagnete pro Vertex enthält. In ähnlichen Strukturen wurde die deterministische Injektion und Termination von Monopolströmen demonstriert und eine erste Idee zum Bau eines Monopolstrom-Transistors eingeführt. Schließlich wird die Idee der Verwendung unterschiedlicher Vertexkonfigurationen in künstlichen Spin-Eis-Strukturen vorgeschlagen, um eine probabilistische Erzeugung und Termination von Monopolströmen zu ermöglichen. Solche probabilistischen Ströme könnten zum Aufbau von auf Monopolen basierenden probabilistischen Gatter verwendet werden.

Die in dieser Arbeit entwickelten Ideen zu Relaxationspfaden in künstlichen Spin-Systemen und die Beziehung der zugrundeliegenden geometrischen Anordnung der Nanomagnete zum erwarteten Relaxationsverhalten können als grundlegende Bausteine für die Verwendung von künstlichen Spin-Eis für den Transport und der Verarbeitung von Daten, insbesondere für neuartige Anwendungen von probabilistische Berechnungsmethoden, dienen.