

Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät

Institut für Physik

Fachgebiet: *Applied Physics*

Betreuer: Prof. Dr. Friedemann Reinhard

Andrii Trelin
(andrii.trelin@uni-rostock.de)

Imaging and motion detection at the nanometer scale: a data-driven approach

Abstract

This doctoral thesis explores the potential of data-driven methodologies in physics, specifically for small signal detection. The work comprises two distinct applications: non-invasive optical detection of neuronal action potentials and nanoscale tomography of nitrogen-vacancy centers in diamonds, which have significant implications for fields ranging from neuroscience to quantum computing.

The main part of this work proposes ChiSCAT, an optical scheme combining interferometric sensitivity to cellular motions with high-NA illumination, supporting high-speed recording, but producing no interpretable image. This issue is resolved by the proposed ChiSCAT algorithm, which relies on data-driven techniques to extract the membrane motion signals associated with action potentials in electrically active cells. This approach has been experimentally validated on human iPSC-derived cardiomyocytes, successfully detecting action potentials in 71% of experiments. A continuation of this work involves a detailed experimental and theoretical analysis of the ChiSCAT scheme using human iPSC-derived neurons, determining exact detection limits and identifying potential directions for future research. Additionally, the measured data from cardiomyocytes and neurons have been published in open-source repositories, facilitating the development of improved algorithms.

The secondary part of the project focuses on the optimization of 3D nanoscale spin tomography for NV centers in diamonds. The research introduced a new approach to data collection and processing that exploits known signal structures to accelerate the measurements. This method resulted in a tenfold reduction in data collection time, thereby reducing errors from slow setup drift during experiments.

This work demonstrates the potential of integrating data-driven methods in experimental physics. It highlights how these approaches can contribute to scientific progress in different areas by overcoming specific limitations, such as when an exact signal model is unknown. The thesis advocates the use of sophisticated data processing to effectively utilize data previously considered uninterpretable, emphasizing the importance of interdisciplinary interplay between data processing and experimental design.

Zusammenfassung

Diese Doktorarbeit untersucht das Potenzial datengetriebener Methoden in der Physik, insbesondere für die Erkennung schwacher Signale. Die Arbeit umfasst zwei verschiedene Anwendungen: die nicht-invasive optische Detektion neuronaler Aktionspotenziale und die nanoskalige Tomographie von Stickstoff-Fehlstellen-Zentren (NV-Zentren) in Diamanten, die bedeutende Auswirkungen auf Bereiche wie Neurowissenschaften und Quantencomputing haben.

Der Hauptteil dieser Arbeit schlägt ChiSCAT vor, ein optisches Verfahren, das interferometrische Empfindlichkeit gegenüber Zellbewegungen mit hochnumerischer Apertur (high-NA)-Beleuchtung kombiniert und die Aufnahme mit hoher Geschwindigkeit unterstützt, jedoch kein interpretierbares Bild erzeugt. Dieses Problem wird durch den vorgeschlagenen ChiSCAT-Algorithmus gelöst, der auf datengetriebenen Techniken basiert, um die Membranbewegungssignale zu extrahieren, die mit Aktionspotenzialen in elektrisch aktiven Zellen assoziiert sind. Dieser Ansatz wurde experimentell an menschlichen, aus iPSC-Zellen abgeleiteten Kardiomyozyten validiert, wobei in 71% der Experimente erfolgreich Aktionspotenziale detektiert wurden. Eine Fortsetzung dieser Arbeit umfasst eine detaillierte experimentelle und theoretische Analyse des ChiSCAT-Verfahrens unter Verwendung von aus

iPSC-Zellen abgeleiteten menschlichen Neuronen, um die genauen Detektionsgrenzen zu bestimmen und potenzielle Forschungsrichtungen für die Zukunft zu identifizieren. Zusätzlich wurden die gemessenen Daten von Kardiomyozyten und Neuronen in Open-Source-Repositories veröffentlicht, um die Entwicklung verbesserter Algorithmen zu fördern.

Der sekundäre Teil des Projekts konzentriert sich auf die Optimierung der dreidimensionalen nanoskaligen Spin-Tomographie für NV-Zentren in Diamanten. Die Forschung führte einen neuen Ansatz zur Datenerfassung und -verarbeitung ein, der bekannte Signalstrukturen nutzt, um die Messungen zu beschleunigen. Diese Methode führte zu einer zehnfachen Reduktion der Datenerfassungszeit und verringerte somit Fehler, die durch langsames Driftverhalten der Apparatur während der Experimente entstehen.

Diese Arbeit zeigt das Potenzial der Integration datengetriebener Methoden in die experimentelle Physik. Sie verdeutlicht, wie solche Ansätze wissenschaftlichen Fortschritt in verschiedenen Bereichen fördern können, indem spezifische Einschränkungen überwunden werden, etwa wenn ein genaues Signalmodell unbekannt ist. Die Dissertation plädiert für die Anwendung fortschrittlicher Datenverarbeitung, um Daten effektiv zu nutzen, die zuvor als nicht interpretierbar galten, und betont die Bedeutung der interdisziplinären Verzahnung von Datenverarbeitung und experimentellem Design.