

## VMQM

Vienna Microscopy for Quantum Materials

<b>Programm / Ausschreibung</b>	Quantum Austria 1. Ausschreibung (2022)	<b>Status</b>	laufend
<b>Projektstart</b>	31.12.2022	<b>Projektende</b>	30.12.2025
<b>Zeitraum</b>	2022 - 2025	<b>Projektlaufzeit</b>	37 Monate
<b>Keywords</b>	quantum materials, solid state quantum systems, quaparticle excitations, electron energy loss spectroscopy, scanning transmission electron microscopy, 4D STEM		

### Projektbeschreibung

Die zweite Quantenrevolution zielt darauf ab, die quantenmechanischen Eigenschaften von Materialien gezielt anzupassen und diese so angepassten Quantensysteme für Anwendungen in verschiedensten Technologiebereichen einzusetzen. Ein Weg diese Systeme zu realisieren ist diese in Systeme kondensierter Materie einzubringen. Da die Eigenschaften von Quantensystemen in entscheidendem Maße von ihrer genauen atomaren Struktur abhängen, ist es von fundamentaler Bedeutung, diese Anpassungen mit atomarer Präzision durchzuführen und untersuchen zu können, um in der Lage zu sein neue Wege für deren Herstellung und Anwendungen zu entdecken.

Die Arbeitsgruppe Physik Nanostrukturierter Materialien (PNM) von Fakultät für Physik an der Universität Wien (UNIVIE) ist seit etwa einem Jahrzehnt führend im Bereich der atomaren Erforschung und gezielten Manipulation von niedrigdimensionalen Materialien. Diese internationale Führungsposition wurde durch die einzigartige selbst gebaute experimentelle Infrastruktur von PNM ermöglicht, in deren Zentrum ein aberrationskorrigiertes Ultrahochvakuum-Rastertransmissionselektronenmikroskop Nion UltraSTEM 100 steht. Dieses ist durch ein weltweit einzigartiges Vakuumtransfersystem an ein modulares Messsystem angeschlossen, welches sich zur Zeit über zwei Stockwerke erstreckt und sowohl die Herstellung, als auch die gezielte Veränderung von Festkörper-Quantensystemen ermöglicht. Die Probenkammer des Mikroskops ist darüber hinaus mit Anschlüssen sowohl für ein Feindosierventil für die Einbringung von Prozessgasen zur Erstellung einer Niederdruckatmosphäre an der Probe als auch für eine optische Ankopplung eines Lasers zur gezielten Manipulation vom Proben direkt im Mikroskop ausgestattet. Das aktuelle Mikroskop stellte bei seiner Installation im Jahr 2013 den neuesten Stand der Technik dar. In der Zwischenzeit hat der technologische Fortschritt zu einer Revolution der Energieauflösung des eingesetzten Elektronenenergieverlustspektrometers geführt, sodass diese nun im Bereich von 10 meV liegt. Auch sind nun deutlich verbesserte Detektoren verfügbar, welche durch ihre deutlich verbesserte Sensitivität vollkommen neue Bildgebungsverfahren ermöglichen. Gleichzeitig ist das aktuelle Mikroskop auch durch seine maximal mögliche Beschleunigungsspannung von 100 kV eingeschränkt, was die Untersuchung von Quantenstrukturen in Halbleitermaterialien wie beispielsweise Diamant oder Silizium bis auf wenige Ausnahmen unmöglich macht. Jüngste Arbeiten der PNM-Gruppe haben gezeigt, dass für die Herstellung von Festkörper-Qubits in Silizium mittels Elektronenstrahl Spannungen von mindestens 120 kV erforderlich sind.

VMQM soll das aktuelle Mikroskop in dem beschriebenen modularen System durch ein Instrument ersetzen, welches dem Stand der neuesten technischen Entwicklungen entspricht und so den aktuellen Stand der Technik sowohl in seiner Möglichkeit für Spektroskopie als auch 4D STEM und des Bereiches möglicher Beschleunigungsspannungen übertrifft. Dies wird Untersuchungen der Anregungen von quantenmechanischen Quasiteilchen in einer nie dagewesenen Genauigkeit, die Abbildung von Ladungsdichteverteilungen, elektrischer und magnetischer Felder und Mikroskopie in Super-Auflösung ermöglichen. Und all das in Kombination mit ergänzenden Messungen mit anderen Instrumenten im bestehenden System. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass VMQM ein weltweit einzigartiges Flaggschiff-Gerät für die Erforschung von Festkörper-Quantensystemen wird—inklusive deren Herstellung, gezielter Veränderung und atomar aufgelöster Untersuchung.

Aus diesen Gründen wird VMQM sicherstellen, dass Österreichs Forschungslandschaft für mindestens ein weiteres Jahrzehnt an der Spitze der weltweiten Forschung im Bereich der Festkörper-Quantensystemen bleiben kann. Es stellt eine Investition in die technologische Souveränität und globale Wettbewerbsfähigkeit Europas zum exakt richtigen Zeitpunkt dar und ist eine strategische Investition in ein international führendes Forschungsgebiet von stetig wachsender technologischer Bedeutung.

## **Abstract**

The second quantum revolution aims at tailoring and exploiting tailored quantum systems for applications in numerous technologically relevant fields. One way to realize such systems is by engineering them into condensed matter systems. Since the properties of the quantum systems sensitively depend on their exact atomic structure, being able to tailor and study such systems at the atomic level is paramount for discovering new ways for their realization and application.

Physics of Nanostructured Materials (PNM) unit of the Faculty of Physics at the University of Vienna (UNIVIE) has for a decade pioneered the research on the atomic structure and tailoring of low-dimensional materials. This internationally leading position has been enabled by the unique self-built experimental infrastructure, centered on an aberration-corrected ultra-high vacuum scanning transmission electron microscope Nion UltraSTEM 100 that is uniquely in the world connected through a direct vacuum sample transfer to an adjacent modular experimental setup currently spanning two floors that allows the creation and tailoring of solid state quantum systems. The microscope column also contains ports enabling introducing controlled low-pressure atmosphere at the sample and for direct optical access for a laser for in situ tailoring of atomic structures. The current microscope represented the state of the art during its installation in 2013. In the meanwhile, instrumental advances have revolutionized electron energy-loss spectroscopy energy resolution, improving it down to below 10 meV, and introduced improved detectors with greatly improved sensitivity that enable new imaging techniques. At the same time, the current instrument is limited to an acceleration voltage of 100 kV preventing the study of for example quantum centres in semiconductor matrices such as diamond or silicon crystals, except for special cases. Crucially, recent work by PNM has shown that solid-state qubit fabrication in silicon using electron-beam manipulation requires voltages of 120 kV and above.

VMQM will replace the current microscope within the modular system with an instrument representing the current development projects in the field, going beyond the state-of-the-art in its capacity for both spectroscopy as well as 4D-STEM, and a wider range of acceleration voltages. It will allow the study of quantum mechanical quasiparticle excitations and interactions at an unprecedented accuracy, imaging of charge densities, electric and magnetic fields, and super-resolution microscopy, in combination with correlative measurements with other instruments in the same system. In short, VMQM will

become a world-wide flagship instrument for the study of solid state quantum systems, including their creation, manipulation and atomic-scale study.

VMQM will ensure that the Austrian research landscape remains at the cutting edge of solid-state quantum research for at least another decade. It presents a timely investment to Europe's technological sovereignty and global competitiveness, and a strategic injection of resources into an internationally leading research area of ever-increasing technological relevance.

### **Projektpartner**

- Universität Wien