

QUANOMET

EINE FORSCHUNGSLINIE DER STRATEGISCHEN ALLIANZ BRAUNSCHWEIG – HANNOVER

Die Quanten- und Nanometrologie (QUANOMET) verfolgt die methodische Weiterentwicklung und Innovation immer präziserer und empfindlicherer Messverfahren und ist eine von drei Forschungslinien eines Wissenschaftsbündnisses zwischen der Leibniz Universität Hannover und der Technischen Universität Braunschweig. Wissenschaftler beider Hochschulen berichten, wie das Projekt entstanden ist und welche Ziele es hat.

Mit der im März 2015 initiierten Masterplanung der Forschungsregion Braunschweig-Hannover wurde ein neuer Weg beschritten, um die beteiligten Hochschulen im nationalen und internationalen Wettbewerb zukunftssicher aufzustellen. Die strategische Förderung des Niedersächsischen Ministeriums für Wissenschaft und Kultur (MWK) ermöglichte den beteiligten Hochschulen TU Braunschweig und Leibniz Universität Hannover eine besondere Kooperation, die auf gemeinsame Projekte in Forschung, Lehre, Studium und Aus- und Weiterbildung abzielt. Besondere Bedeutung hat hierbei die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses sowie die Gewinnung international herausragend qualifizierter Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Ziel der Zusammenarbeit ist, die wissenschaftliche Exzellenz beider Universitäten auf besonderen Forschungsfeldern (Forschungslinien), die sich nicht nur durch wissenschaftliche, sondern auch durch weitreichende gesellschaftliche und ökonomische Relevanz auszeichnen, weiterzuentwickeln. Die Wissenschaftsallianz Braunschweig-Hannover erstreckt sich daher auf drei gemeinsame Forschungslinien: Mobilität, Lebenswissenschaften und Quanten- und Nanometrologie (QUANOMET).

Mobilise – Forschungslinie Mobilität

Das Ziel der Forschungslinie »Mobilise« ist es, die Mobilität der Zukunft zu planen und zu gestalten sowie wissenschaftlich und interdisziplinär zu begleiten. Im Rahmen zahlreicher Projekte aus den Themenfeldern Digitalisierung, Energiewende sowie Produktion und Leichtbau entwickeln die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Lösungsansätze für aktuelle gesellschaftliche, ökologische, technologische und wirtschaftliche Herausforderungen. Mit der Forschungslinie »Mobilise« wird die Grundlage für einen weiteren Ausbau der Mobilitätsforschung gelegt. Da zukünftige Innovationen insbesondere an den Grenzen zwischen den verschiedenen Disziplinen zu erwarten sind, wird vor allem die interdisziplinäre Zusammenarbeit gestärkt.

Smart BioTecs – Forschungslinie Lebenswissenschaften:

In der Forschungslinie »Smart BioTecs« stehen die Entwicklung und Herstellung neuartiger Wirkstoffe und Arzneimittel, aber auch intelligenter Implantate zur Behandlung von körperlichen Defekten und zur Unterstützung der körperlichen Regeneration im Mittelpunkt. Dazu werden die Forschungsprofile der Universitäten im Bereich der Lebenswissenschaften geschärft und daraus entstehende Synergieeffekte genutzt.

QUANOMET – Forschungslinie Quanten- und Nanometrologie:

Metrologie ist die Wissenschaft vom präzisen Messen. Die Entwicklung metrologischer Verfahren gehört zu den wichtigsten Grundlagen moderner Industriegesellschaften mit erheblicher Relevanz für so unterschiedliche Bereiche wie



beispielsweise eine verbesserte medizinische Diagnostik oder auch die Klimaforschung. Mit der Forschungslinie »QUANOMET« wird die interdisziplinäre wissenschaftliche Zusammenarbeit im Bereich der Nano- und Quantentechnologie gefördert.

Die im Folgenden beschriebene Forschungslinie QUANOMET wurde von den beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern in einem »Bottom-up«-Prozess entworfen und gemeinsam mit den beteiligten Präsidien etabliert. Hierbei ist auch die Kooperation mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) als eines der weltweit führenden staatlichen Metrologieinstitute von Beginn an konstitutiv gewesen. QUANOMET verfolgt die methodische Weiterentwicklung und Innovation immer präziserer und empfindlicherer Messverfahren, bei denen das besondere Potenzial der Quanten- und Nanowissenschaften ausgeschöpft werden soll. QUANOMET hat hierdurch einen stark interdisziplinären Charakter, der nachhaltig zu einer immer stärkeren Verschränkung zwischen beiden Universitäten führen wird. Dies wird dadurch unterstützt, dass beide Standorte mit neuen beziehungsweise im Bau befindlichen Forschungsbauten und Forschungszentren über eine einzigartige Infrastruktur verfügen:

- Das Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE) ist ein Forschungszentrum der Leibniz Universität Hannover und betreibt ein 2009 eröffnetes Forschungsgebäude mit Laboren, Geräten und insbesondere Reinräumen, die Mitgliedsorganisationen zur Verfügung stehen.
- Das im Juli 2018 eröffnete Hannover Institute of Technology (HITEc), bietet modernste Laborinfrastruktur und einzigartige Großgeräte für über 100 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus der Physik und den Ingenieurwissenschaften.
- Im Laboratory for Emerging Nanometrology (LENA) der Technischen Universität Braunschweig werden Forschende aus der Elektrotechnik, der Physik, dem Maschinenbau und der Chemie gemeinsam mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) mithilfe modernster technischer Infrastruktur an wichtigen Fragen des Messens in der Nanowelt arbeiten (geplante Eröffnung Herbst 2018).

QUANOMET ist es gelungen, einen international herausragenden Forschungsverbund der Metrologie zu etablieren, der mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), dem zweitgrößten Metrologie-

Institut der Welt, einen starken Partner an seiner Seite hat, der sowohl mit der Technischen Universität Braunschweig als auch mit der Leibniz Universität Hannover schon jetzt vielfältig strukturell und personell verbunden ist.

Der interdisziplinäre Forschungsschwerpunkt QUANOMET wirkt darüber hinaus auch stark in andere fachliche Bereiche hinein, die von den hier entwickelten Methoden und Konzepten erheblich profitieren werden. Die Forschung in QUANOMET gliedert sich in drei Forschungsknoten: NanoParticles, NanoLight und QuantumTechniques. Jeder Forschungsknoten besteht wiederum aus unabhängigen Nachwuchsrgruppen.

Perspektiven der Quanten- und Nanometrologie

Die Erweiterung unseres wissenschaftlichen Erkenntnishorizonts basiert in den allermeisten Fällen auf immer präziseren Experimenten zur Erforschung der uns umgebenden Vorgänge und Objekte. Damit ist die Weiterentwicklung der Metrologie als der Wissenschaft vom präzisen Messen und deren Anwendung eine wichtige Grundlage sowohl erkenntnisgeleiteter Wissenschaft als auch technisch-wissenschaftlichen Fortschritts.



Abbildung 1
Das Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE), das Hannover Institute of Technology (HITEc) in Hannover und das Laboratory of Emerging Nanometrology (LENA) in Braunschweig sind der Kern der Forschungsinfrastruktur von QUANOMET. Die Forschungszentren verfügen über modernste Analyse- und Forschungsgrößgeräte, die allen QUANOEMT-Forschenden zur Verfügung stehen.

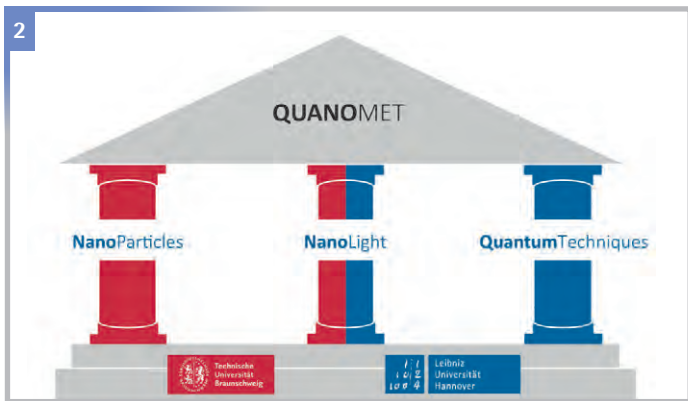


Abbildung 2
Die gemeinsame Forschung bei der Hochschulen gliedert sich in drei Forschungsknoten: NanoParticles, NanoLight und QuantumTechniques. Diese unterteilen sich wiederum in weitere unabhängige Nachwuchsgruppen.

Besonders prominente Beispiele für die enge Verbindung zwischen Metrologie und Fortschritten in der wissenschaftlichen Grundlagenforschung wurden durch Nobelpreise ausgezeichnet: Klaus von Klitzing (Präzisionsmessung des Hall-Widerstands, Nobelpreis 1985), Theodor Hänsch (Präzisionsmessung der Frequenz von Licht, dadurch Entdeckung von Exoplaneten, Nobelpreis 2005), Stefan Hell (optische Präzisionsmikroskopie, dadurch direkte optische Abbildung von Molekülen, Nobelpreis 2014) und zuletzt (2017) Rainer Weiss, Barry C. Barish und Kip S. Thorne für den direkten Nachweis von Gravitationswellen. In all diesen Beispielen sind die Grenzen des Messbaren und damit auch unser Erkenntnishorizont signifikant verschoben worden.

Abbildung 3
nanoLEDs lassen sich einzeln ansteuern. In eine Matrix angeordnet, bilden sie ein LED-Array.

Die Anforderungen an die Metrologie und im Besonderen der Quantenmetrologie

sind im Allgemeinen äußerst komplex, insbesondere, weil für deren Weiterentwicklung eine massiv interdisziplinäre Herangehensweise erforderlich ist. Dabei spielen die wissenschaftlichen Methoden der Quantenphysik nicht nur beim Messvorgang selbst, sondern mittlerweile auch bei der Neudefinition des Internationalen Systems der Einheiten, SI oder bei der Entwicklung neuer Sensoren eine zunehmend zentrale Rolle.

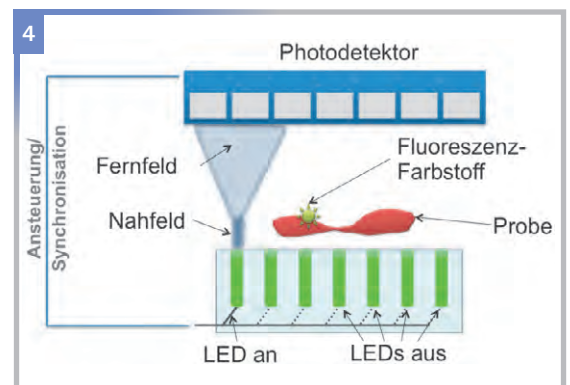
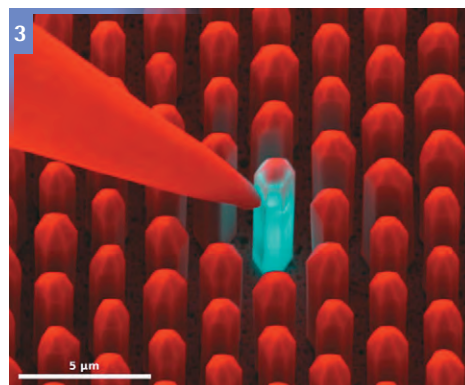
Zeit- und Frequenzmessung über große räumliche Distanzen, Gravitationswellendetektoren wie zum Beispiel der Detektor GEO600 bei Hannover, Erdbeobachtungssatelliten zur Bestimmung von Schmelzprozessen großer Eismassen oder der Veränderung des globalen Grundwasserspiegels, aber auch Atomuhren der neuesten Generation mit Unsicherheiten im Bereich von 10 bis 18 Stellen hinter dem Komma sowie Anwendungen zur Vermessung des Erdgravitationsfeldes und dessen Dynamik, sind exzellente Beispiele für die Verbindung von Quantenphysik mit der Metrologie makroskopischer Objekte.

Die Anwendung quantenphysikalischer Konzepte auf nanoskalige Objekte ist eine besondere Herausforderung, da hier die Messsonde (zum Beispiel das Photon, das Elektron, das Atom) nicht mehr eindeutig vom zu messenden Objekt zu

trennen ist. Einzelelektronen-Transistoren als Quantenstandard für Strom, Einzelphotonenemitter als Quantenstandard für die Candela (SI-Einheit für die Lichtstärke) oder Einzelmolekül-Detektion in der Sensorik und deren Anwendung auf die Metrologie sehr kleiner Objekte und Messgrößen sind Beispiele für die Kombination von Quanten- und Nanometrologie. Entsprechende Sensoren, wie das in QUANOMET entwickelte nanoLED Array, basieren auf neuen nanoskaligen Chipstrukturen in Kombination mit photonischen Systemen.

Zukunftsweisende Forschungsziele sind insbesondere speziell angepasste Quantensysteme zu entwickeln, wie zum Beispiel eine Anordnung von vielen einzelnen Ionen, die in Mikro- und Nanofallen gespeichert werden oder kohärente atomare Ensembles in sogenannte optischen Kristallen, die aus entsprechenden optischen Stehwellenfeldern geformt werden. Derartige Quantensysteme ermöglichen eine hohe Kurzzeitstabilität und Genauigkeit, welche die von klassischen Sensoren, die für die Absolutmessung zum Beispiel in Atomuhren oder bei Gravitationsmessungen eingesetzt werden, bereits deutlich übertreffen. Hier können zukünftig auch Quantenkorrelationen genutzt werden, um klassische Rausch-Limits zu unterschreiten. Die Kombina-

Abbildung 4
Das LED-Array-Mikroskop erlaubt Auflösungen unterhalb von 1 µm. Einzelne LEDs werden in einer Matrix sequentiell nacheinander betrieben. Dabei befindet sich die Probe direkt auf dem LED-Array, ein gegenüberliegender Photodetektor nimmt die transmittierte Intensität auf. Der genaue Ort der Messung ist durch die bekannte Position der aktiven LED bestimmt.



tion der Kompetenzen in Hannover (QUEST-LFS und HITec mit dem VLBAI-Teststand), Braunschweig (in der neu entstehenden Forschungsinfrastruktur LENA innerhalb der Metrology Initiative Braunschweig), PTB (mit der Erforschung und Entwicklung von Atomuhren und der Präzisionsmesstechnik) oder Laserzentrum Hannover (mit der Präzisionslaserbearbeitung) stellen ein weltweites Alleinstellungsmerkmal hinsichtlich Präzisionsherstellungsverfahren, Analytik, Messtechnik und quantenphysikalischem Grundlagenverständnis dar.

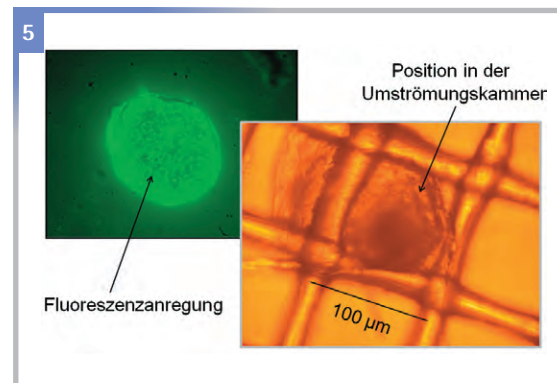
Ein zusätzlicher Anspruch ergibt sich aus der metrologischen Erfassung von Systemen aus den Lebenswissenschaften und der Medizin wie zum Beispiel lebende Zellen oder DNA. Derartige Objekte sind oft eingebettet in eine komplexe (oft biologische) Umgebung mit Prozessen, die teilweise in-

nerhalb von Femtosekunden (0,000 000 000 001 s) ablaufen. Ein exzellentes Beispiel stellen Proteine in Zellmembranen dar. Diese Moleküle vermitteln die Kommunikation von äußeren Signalgebern in die Zelle. Diese filigrane Gesamtregulation kann bisher noch nicht abgebildet werden. Die Kontrolle und Vermessung derartiger Strukturen würde einen großen Schritt für das Verständnis der zugrundeliegenden Vorgänge bedeuten.

Eine weitere Herausforderung ergibt sich dadurch, dass nano- und quantenskalierte sowie biologische Komponenten und Systeme in Zukunft allgegenwärtig auf unsere technisierte Gesellschaft und natürliche Umwelt einwirken werden. Zur Einschätzung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge ist die Entwicklung begleitender metrologischer Verfahren unabdingbar, momentan aber

nicht oder nicht ausreichend entwickelt. Sofern metrologische Verfahren überhaupt verfügbar sind, sind diese meist sehr komplex und nur eingeschränkt zugänglich. Ziel muss es auch sein, eine möglichst hohe Verfügbarkeit metrologischer Verfahren zur Charakterisierung von Quanten- und Nanosystemen zu garantieren. Dies ist heute aufgrund der hohen Komplexität der Messverfahren noch nicht gegeben.

Abbildung 5
nanoLED-Arrays mit Abmessungen im sub-mm-Bereich lassen sich zukünftig durch örtlich aufgelöste Fluoreszenzanregung für Untersuchungen von physiologischen Regulationsvorgängen der Pankreasinsel und deren Störungen bei der Entstehung des Typ-2-Diabetes einsetzen.



Prof. Dr. Wolfgang Ertmer

Jahrgang 1949, ist seit 1994 Professor für Physik an der Leibniz Universität Hannover. Von 1997 bis 2009 war er Sprecher des SFB 407 »Quantenlimitierte Meßprozesse mit Atomen, Molekülen und Photonen«, von 2007 bis 2014 war er Sprecher des Exzellenz Clusters »Quantum Engineering and Space-Time Research« (QUEST). Er ist Sprecher von QUANOMET und Sprecher des HITec-Vorstands.
Kontakt: ertmer@iqo.uni-hannover.de



Prof. Dr. Andreas Waag

Jahrgang 1961, ist seit 2003 Leiter des Instituts für Halbleitertechnik an der Technische Universität Braunschweig. Er ist Sprecher der Forschungsbauintiative »Laboratory of Emerging Nanometrology« (LENA), seit 2016 Leiter des »Epitaxy Competence Centres EC2« in Braunschweig sowie Co-Sprecher der Forschungslinie QUANOMET in der Wissenschaftsallianz Braunschweig-Hannover.
Kontakt: a.waag@tu-bs.de



Dr. Thorben Dammeyer

Jahrgang 1977, hat 2008 am Institut für Mikrobiologie der Technischen Universität Braunschweig in Proteinbiochemie promoviert. Seit 2015 ist er Geschäftsführer des Forschungszentrums »Laboratory for Emerging Nanometrology« (LENA) in Braunschweig und seit 2017 parallel Geschäftsführer der »Metrologie Initiative Braunschweig (MIB)«
Kontakt: t.dammeyer@tu-braunschweig.de



Dr. Alexander Wanner

Jahrgang 1978, hat 2013 am Institut für Gravitationsphysik in technischer Physik promoviert. Seit 2013 hat er als Geschäftsführer der QUEST Leibniz Forschungsschule die Planung und den Bau des HITec begleitet. Seit der Gebäudeeröffnung im Juni 2018 ist er Geschäftsführer vom HITec sowie Geschäftsführer des Sonderforschungsbereichs 1227 DQ-mat.
Kontakt: alexander.wanner@quest.uni-hannover.de