

Digitale Holographische Mikroskopie zur Untersuchung von Nanostrukturen

von Krisztian Neutsch

Nanostrukturen sind eine stark wachsende Zukunftstechnologie und erlangen zunehmende Bedeutung in den technischen Herausforderungen der heutigen Zeit. Ihre besondere Eigenschaft liegt in ihrer Größenordnung im Nanometerbereich, durch welche sie für bestimmte Anwendungen gezielt funktionalisiert werden können. Hierdurch können sie mit biologischen Objekten wie Bakterien, Viren und Zellen sowie in technischen Anwendungen sogar mit Licht auf eine Weise interagieren, wie es für größere Strukturen nicht möglich wäre. Der technologische Fortschritt auf diesem Gebiet ist eng an die Entwicklung von Messtechniken zu ihrer Untersuchung gekoppelt, um solche Effekte sichtbar und damit optimierbar zu machen.

Häufig verwendete Verfahren sind die Rasterkraftmikroskopie (AFM) oder Elektronenmikroskopie (SEM). Diese Verfahren bestechen durch extrem hohe Auflösungen bis hin zu einzelnen Atomen. Andererseits gehen sie mit starken Limitierungen für ihre Verwendbarkeit einher. Sie sind kostenintensiv, erfordern hohen technischen Aufwand, kontrollierte Laborbedingungen und sind weithin auf reine Oberflächenuntersuchungen beschränkt. Volumenuntersuchungen sind somit nicht ohne weiteres möglich oder erfordern ein schichtweises, schwer-invasives Abtragen der Strukturoberfläche.

Neue hochauflösende digital-holographische Mikroskopieverfahren (DHM) bieten hier durch die Berücksichtigung von Amplituden und Phaseninformationen des Lichts großes Potential, um eine Reihe von Limitierungen konventioneller Verfahren zu überwinden. Sie ermöglichen trotz geringerem apparativem und finanziellem Aufwand eine dreidimensionale topographische Bildgebung von Strukturen und bringen zusätzliche Probeninformationen bspw. über die optische Brechungsindexverteilung zu Tage, welche mittels der zuvor genannten Techniken nicht zugänglich sind. Darüber hinaus bergen DHM-Techniken enorme Vorteile durch ihre komplett kontaktlose und zerstörungsfreie Messmethodik. Dabei sind sie nicht auf Oberflächen beschränkt, sondern eignen sich zusätzlich für die Untersuchung von Strukturen innerhalb von Volumenproben. Die erzielbare laterale Auflösung fällt aufgrund der optischen Beugungsgrenze zwar geringer aus, dieser Nachteil kann aber durch eine hohe axiale Phasensensitivität zum Teil kompensiert werden. Daher stellen DHM-Verfahren oft leistungsfähige und attraktive Alternativen dar.

In dieser Dissertation wurden moderne DHM-Verfahren zur Untersuchung von Nanostrukturen entwickelt, welche jeweils unterschiedliche Anforderungen erfüllen; von hochauflösenden, stationären Techniken bis hin zur mobilen Smartphone-Lösung. Das erste Hauptkapitel behandelt das leistungsfähigste und technisch anspruchsvollste Holographieverfahren dieser Arbeit: Die synthetische optische Holographie (SOH) wird zur Untersuchung von laser-induzierten periodischen Oberflächenstrukturen (LIPSS) eingesetzt und zeigt dabei die holographische Bildgebung ihrer charakteristischen Strukturmerkmale. Diese konnten nicht nur topographisch an der Oberfläche, sondern erstmals durch eine überlagernde Schicht hindurch dreidimensional holographisch abgebildet werden. Eine weitere Anwendungsstudie zeigt die Untersuchung eines vergrabenen Mikroschaltkreises im laufenden Betrieb. Dabei werden Größenordnungen bis zur optischen Beugungsgrenze erschlossen.

Der zweite Teil der Dissertation stellt das Verfahren der Common-Path Holographie vor. Im Gegensatz zur SOH strebt dieses Verfahren an, die technischen Anforderungen an den Aufbau selbst zu reduzieren, die Messgeschwindigkeit signifikant zu erhöhen und dabei dennoch Sub-Mikrometer Auflösung zu erzielen. Aufgrund der inhärenten Stabilität des Aufbaus werden dabei die für gewöhnlich hohen Rahmenbedingungen wie eine mechanisch und thermisch kontrollierte Laborumgebung stark reduziert. Dies eröffnet eine breite Palette von Anwendungsmöglichkeiten, da somit holographische Mikroskopie nicht mehr auf Institutionen mit vollwertiger Laborausstattung beschränkt ist. Dieses Verfahren konnte erstmals zur holographischen Untersuchung von Nanopartikelproben gezeigt werden, die ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden und durch ihre einzigartigen Partikelanordnungen als physikalisch gespeicherte, fälschungssichere, kryptographische Schlüssel (sog. optische PUFs) dienen.

Das dritte Kapitel bricht diese Grenze noch weiter auf und präsentiert ein Verfahren, welches die holographische Mikroskopie aus den Laboren und in den Alltag von Endnutzern bringt. Auf das absolut Wesentliche reduziert und maximal niederschwellig wird mit ein paar wenigen technischen Bauteilen ein holographisches Mikroskop vorgestellt, welches als Erweiterung eines Smartphones die Untersuchung von Nanopartikeln ohne jede Laborumgebung oder sonstige Stabilisierung ermöglicht. Dies konnte ebenfalls erstmalig am Beispiel der optischen PUFs gezeigt werden.

Eine Analyse aller drei Verfahren im Hinblick auf ihre Fähigkeiten und Potentiale, ihre Möglichkeiten, ihre Grenzen und ihrem Nutzen im Bezug auf die aufgeführten Anwendungen werden diskutiert.