

Interaktive Photonik: Planare Optik voranbringen

20.7.2026 - Laura Na Liu | Universität Stuttgart

Neu in Nature Communications.

Ein interaktiv adressierbares, organisches Bauelement ermöglicht es, einzelne Pixel von Metaoberflächen im sichtbaren Wellenlängenbereich individuell anzusteuern. Das eröffnet neue Perspektiven für adaptive optische Technologien in der Bildgebung, Kommunikation, Sensorik und tragbaren Photonik. DOI: 10.1038/s41467-026-75757-4

Metaoberflächen sind ultradünne optische Komponenten, die Licht auf eine Weise steuern können, die mit konventioneller Optik nur schwer zu erreichen ist. Während bei konventionellen optischen Komponenten in der Regel Form und Dicke dafür verantwortlich sind, wie Licht gelenkt wird, manipulieren Metaoberflächen Licht mithilfe speziell strukturierter Nanostrukturen. Diese Nanostrukturen sind auf einer planaren, also flachen, Oberfläche angeordnet.

„Aktive Metaoberflächen erweitern die Möglichkeiten der planaren Optik: Sie ermöglichen es, optische Funktionen dynamisch zu konfigurieren“, sagt Prof. Laura Na Liu, Direktorin des 2. Physikalischen Instituts der Universität Stuttgart. „Um dieses Potential zu nutzen, müssen wir lernen, einzelne Pixel einer Metaoberfläche innerhalb des sichtbaren Wellenlängenbereichs individuell anzusteuern.“

Forschende der Universität Stuttgart haben nun ein Metaoberflächen-Bauelement entwickelt, das Licht mithilfe elektrisch schaltbarer organischer Materialien dynamisch lenkt. Mithilfe der neuen Plattform kann jedes Pixel einer Metaoberfläche einzeln elektronisch angesteuert werden. Dadurch lassen sich Nutzerbefehle direkt in dynamische holografische Bilder übersetzen. Mit ihrer Arbeit schaffen die Forschenden einen wichtigen Meilenstein von der aktiven Metaoberfläche hin zu programmierbaren optischen Technologien. Die Ergebnisse stellt das Team in der Fachzeitschrift Nature Communications vor.

Von statischen Funktionen hin zu programmierbaren Metaoberflächen

Metaoberflächen haben die planare Optik in den letzten zehn Jahren revolutioniert, da sie mithilfe von Nanostrukturen eine präzise Steuerung von Licht ermöglichen. Jedoch führen die meisten bisher entwickelten Metaoberflächen-Bauelemente nur vordefinierte Aufgaben aus. In zahlreichen Ansätzen gelang bereits eine dynamische Änderung der optischen Funktion nach der Herstellung des Bauelements. Individuelle Pixel konnten bisher nur bedingt angesteuert werden.

Ziel der Stuttgarter Forschenden war es, eine frei programmierbare Metaoberfläche zu realisieren. Um das zu erreichen, kombinierten sie plasmonische Gold-Nanoantennen mit ultradünnen, elektrochemisch aktiven, leitfähigen Polymeren und einer planaren elektronischen „Fan-Out-Architektur“. Diese Architektur ermöglicht die individuelle Ansteuerung von Pixeln, die jeweils aus vielen Nanostrukturen bestehen. Die Pixel lassen sich mit elektrischen Signalen im Sub-Volt-Bereich innerhalb von Millisekunden schalten; elektrische Störungen zwischen benachbarten Pixeln sind dabei vernachlässigbar.

Die Plattform, die die Forschenden entwickelt haben, ermöglicht es, die optische Funktionalität durch elektronische Steuerung auf Ebene einzelner Pixel dynamisch anzupassen. „Individuelle Adressierbarkeit ist die Grundlage jeder programmierbaren Technologie – das gilt auch für Metaoberflächen“, sagt Laura Na Liu. „Indem jedes optische Pixel eine eigene elektronische Adresse erhält, werden aus Metaoberflächen programmierbare photonische Plattformen, die ihre Funktionalität in Echtzeit anpassen können.“

Direkte Steuerung durch die Nutzer*innen

Um die Leistungsfähigkeit der Plattform zu demonstrieren, integrierten die Forschenden ihr Metaoberflächen-Bauelement in ein komplettes elektronisches Steuerungssystem. Tastatureingaben am Computer wurden bei dem Experiment umgehend in holografisch projizierte Buchstaben und Zahlen übersetzt. In einer zweiten Demonstration spielten die Nutzer*innen mit einem Handheld-Gamecontroller holografische Versionen klassischer Spiele – darunter „Snake“ und ein von „Tetris“ inspiriertes Block-Fall-Spiel. Anstatt vordefinierte optische Muster anzuzeigen, passte sich die holografische Szene kontinuierlich an die Nutzereingaben an, es kam also eine direkte Interaktion zwischen Nutzer*innen, Elektronik und Licht zustande.

„Entscheidend dabei ist, dass jedes Pixel schnell schaltet, aber gleichzeitig von seinen Nachbarpixeln elektrisch isoliert bleibt“, erklärt Dr. Xiangyu Huang, Erstautor der Studie. „Zu sehen, wie holografische Bilder augenblicklich auf Befehle reagierten, war ein packender Moment. Wir haben gezeigt, dass individuell adressierbare Metaoberflächen zu wahrhaft interaktiven optischen Bauelementen werden können.“

Meilenstein für die zukünftige Entwicklung programmierbarer aktiver Metaoberflächen

Im Gegensatz zu konventionellen optischen Bauelementen, deren Funktionalität weitgehend bei der Fertigung festgelegt wird, kann ein Metaoberflächen-Bauelement verschiedene optische Aufgaben allein durch die Änderung der elektronischen Ansteuersignale erfüllen. Dieser programmierbare Betrieb ermöglicht es einer einzigen optischen Plattform, mehrere dynamische Funktionen bereitzustellen, ohne dass ihre physische Struktur geändert werden muss.

Die Forschenden sind überzeugt, dass das Konzept weit über die in der Studie gezeigten holografischen Anwendungsbeispiele hinausgeht. Mit der zunehmenden Verfügbarkeit größerer Pixel-Anordnungen, verbesserter leitfähiger Polymere und hochentwickelterer elektronischer Steuerungssysteme könnten individuell ansteuerbare Metaoberflächen zunehmend leistungsfähige adaptive optische Technologien für die Bildgebung, Kommunikation, Sensorik und tragbare Photonik ermöglichen.

„Diese Arbeit stellt einen wichtigen Schritt hin zu programmierbaren aktiven Metaoberflächen dar“, sagt Laura Na Liu. „Mit der zunehmenden Skalierbarkeit individuell ansteuerbarer optischer Pixel eröffnen sich völlig neue Perspektiven für dynamische optische Technologien an der Schnittstelle zwischen Nanophotonik, Elektronik und intelligenter Steuerung.“

<https://www.uni-stuttgart.de/universitaet/aktuelles/meldungen/Interaktive-Photonik-Planare-Optik-voranbringen>