

»Optoelektronische Sensoren für anwendungsnahe Systeme für Lebenswissenschaften und intelligente Fertigung – OASYS«

Zusammenfassung

Durch den Strukturwandel in der Lausitz sind in einer gesamten Region neue sozio-ökonomische Perspektiven, Chancen und Systeme für die Menschen zu schaffen. Eine Schlüsselstrategie zur erfolgreichen **Steigerung der Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit** sind Institutionen aus dem Forschungs- und Bildungsbereich wie Hochschulen und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen.

Für eine langfristig angelegte Strategie spielt daher die **dezidierte Förderung von FuE-Aktivitäten** eine entscheidende Rolle. Nur auf diese Weise kann gewährleistet werden, dass **Erkenntnisgewinne, Alleinstellungsmerkmale, Kompetenzen und Fachkräfte** als Grundlage für die spätere wirtschaftliche Verwertung verfügbar sind.

Im Rahmen des seit 2019 geförderten Projekts „Innovationscampus Elektronik und Mikrosensorik Cottbus (iCampus)“ zeigten **regionale Firmen** ein **sehr hohes Interesse** an mikrosensorischen Lösungen z. B. für die industrielle Fertigung, für die Land- und Viehwirtschaft, in der Medizin oder der Gesundheitswirtschaft. Im Projekt „**Optoelektronische Sensoren für anwendungsnahe Systeme für Lebenswissenschaften und intelligente Fertigung (OASYS)**“ werden diese Bedarfe an innovativen optosensorischen Systemen in den Bereichen Gesundheitswirtschaft und smarte Produktion adressiert. OASYS bietet transferorientierte Forschungsarbeiten zur (Weiter-)Entwicklung MEMS-basierter Technologien für bildgebende Verfahren, die gegenüber bisher verfügbaren Lösungen nicht nur neue Möglichkeiten und Funktionalitäten der Bilderfassung bieten, sondern darüber hinaus **kompakt, mobil und extrem energieeffizient** sind und selbst unter **herausfordernden Umweltbedingungen zuverlässige Ergebnisse** liefern. Dabei werden Lösungen für **konkret bestehende Problemstellungen bzw. zur Schließung bestehender technologischer Lücken** entwickelt, die seitens der Praxispartner des Vorhabens sowie weiteren, vor allem in der Lausitz ansässigen Unternehmen, an das Konsortium herangetragen wurden. Diese können dann über Netzwerke wie den Lausitz Science Park und über in der Region angesiedelte außeruniversitäre Forschungseinrichtungen der Leibniz-Gemeinschaft und der Fraunhofer-Gesellschaft in Kooperation mit Unternehmen für neue und wettbewerbsfähige Produkte eingesetzt werden. In Kombination mit der bereits aufgebauten bzw. sich noch im Aufbau befindlichen technologischen Infrastruktur in Cottbus sowie mit den genannten Transferkanälen, hat das hier vorgeschlagene Vorhaben das Potential, Cottbus zu einem **Zentrum für Mikrosensorik mit internationaler Ausstrahlung und Anziehungskraft** für Firmen und Fachkräfte zu entwickeln.

Das BMBF fördert das Projekt mit **12,5 Mio. €** über eine Laufzeit von **5 Jahren (60 Monaten)**. Beteiligt sind die Partner:

- Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg (Konsortialführer),
- Ferdinand-Braun-Institut gGmbH, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH),
- Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme (Fraunhofer IPMS),
- Leibniz-Institut für Innovative Mikroelektronik (IHP).

Eine Ergänzung und Verstärkung in Richtung des oben genannten Zentrums für Mikrosensorik wird über die Akquise von Parallel- und Folgeprojekten (EU, Bund, Land) avisiert. Das Vorhaben fokussiert sich auf zwei thematische Cluster mit insgesamt fünf Leitprojekten:

Die OASYS-Cluster

Im Cluster „**MEMS-basierte hyperspektrale Bildgebung**“ wird durch die Erforschung vielversprechender sensorischer Materialien und Bauelemente die Basis für eine Vielzahl innovativer Anwendungen z. B. im Bereich der medizinischen Diagnostik, der industriellen Fertigung und der Prozesstechnologie, in der modernen Agrarproduktion, aber auch für Smart Mobility-Anwendungen und Konsumelektronik geschaffen.

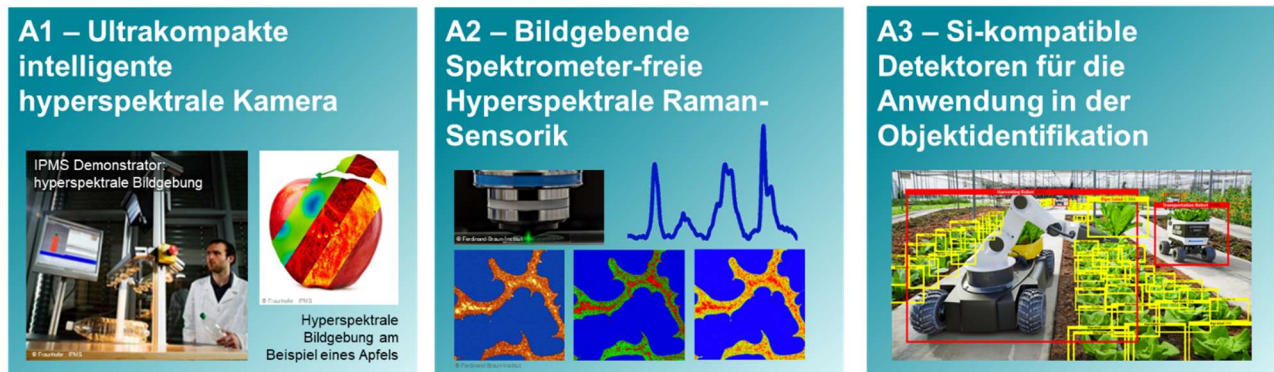


Abbildung 1: Die drei Leitprojekte (A1 – A3) des Clusters A

Im Cluster „**Hochauflösende optische Verfahren für die Biowissenschaften**“ werden zukünftig zu erwartende Bedarfe bezüglich der Erkennung und Charakterisierung von Objekten in den Feldern Biologie, Biotechnologie, Medizin, Medizintechnik und Gesundheitswissenschaften adressiert.



Abbildung 2: Die zwei Leitprojekte (B1, B2) des Clusters B

Zur Durchführung der Arbeiten wird wesentlich auf bestehende **Infrastruktur-Netzwerke** wie beispielsweise die **Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland** und die **Forschungslabore Mikroelektronik Deutschland** zurückgegriffen, so dass für die Forschungsarbeiten eine einzigartige Auswahl an Technologien und Materialien zur Verfügung steht. **Potentielle Anwender:innen und Applikationsexpert:innen** aus Universitäten und Unternehmen, vor allem in Brandenburg, Deutschland und Europa, werden frühzeitig intensiv eingebunden. Durch die Kompetenzen dieser Partner wird die fortwährende Anwendungs- und Verwertungsorientierung der Arbeiten sichergestellt. Damit wird die Basis für zukünftige Innovationen bis hin zu Sprunginnovationen im Hochtechnologiebereich geschaffen.

Die OASYS-Leitprojekte

Leitprojekt A1: Ultrakompakte intelligente hyperspektrale Kamera

Zahlreiche Anwendungen, beispielsweise in der zerstörungsfreien Prüftechnik in Produktionsprozessen, bei der Lebensmittelerzeugung und -verarbeitung oder der Textilverarbeitung, beim Einsatz von Umweltmesstechnik bis hin zu Sortierprozessen im Recycling, erfordern die präzise Kenntnis von physischen Objekten, d. h. ihrer Struktur und ihrer chemischen Materialzusammensetzung. Kamerasysteme, die in der Umgebung solcher moderner Fertigungsprozesse zum Einsatz kommen, müssen somit einerseits ständig steigenden Ansprüchen auf höchstem Niveau gerecht werden, damit die erfassten Objekte mit hoher Genauigkeit charakterisiert werden können. Andererseits werden neben der Qualität der erfassten Daten zunehmend nicht nur Baugröße und Systemkosten der Kamerasysteme, sondern auch die Möglichkeiten der hardware-nahen Datenvorverarbeitung, d. h. Offsetkorrektur, Weißabgleich oder Datenverdichtung, relevant.

Limitierend sind mit den bisherigen Systemansätzen neben den hohen Kosten für Nahinfrarot (NIR)-Flächenbildsensoren, auch die große Baugröße der Systeme und ihr hoher Energiebedarf. Mit bisherigen Systemen wird zu jedem Bildpunkt ein Nahinfrarot-Spektrum erfasst und ausgewertet. Unter Berücksichtigung von verfügbaren Informationen aus der Anwendung und der optischen Bilderfassung ist diese hohe Anzahl an Spektren oftmals nicht zwingend erforderlich. Bei homogenen Objekten reicht somit theoretisch eine Reduktion der NIR-spektralen Erfassung auf einen aussagekräftigen Punkt.

An dieser Stelle setzt die Entwicklung im Rahmen des **Leitprojekts „Ultrakompakte intelligente hyperspektrale Kamera“** an. Die kostengünstig und hochkompakt verfügbare Bilderfassung im sichtbaren Spektralbereich wird mit einer **intelligent gesteuerten Ablenkeinheit auf Basis von MEMS-Scannerspiegeln** erweitert, die eine gezielte Spektralmessung an einem oder wenigen ausgewählten Punkten erlaubt. Durch die schnelle **hardwarenahe Auswertung (KI Sensor Edge)** werden kurze Feedbackschleifen ermöglicht, die die ausgewählte Aufnahme von Nahinfrarot-Spektren durch die Steuerung der Messeinheit in dem Gesamtmessbereich ermöglichen.

Ein solcher Hybridansatz für hyperspektrale Kamerasysteme wurde bislang nicht realisiert. Die Leistungsfähigkeit ist sowohl seitens der Bildauflösung als auch der spektralen Erfassungsgenauigkeit mit dem Stand der Technik konkurrenzfähig. Das System ist ultrakompakt und ermöglicht durch die Kombination aus effizienter Datenaufnahme und örtlicher Vorverarbeitung (Edge Computing) extrem kompakte und energieeffiziente Systeme, wodurch auch mobile Anwendungen ermöglicht werden. Zudem erlaubt die Nutzung von MEMS-Komponenten und innovativer Integrationsverfahren, z. B. der vom Fraunhofer IPMS entwickelten Faltmontage, eine kostengünstige und skalierbare Herstellung in großen Stückzahlen.

Leitprojekt A2: Bildgebende Spektrometer-freie Hyperspektrale Raman-Sensorik

Die berührungslose, zerstörungsfreie und bildgebende Detektion von Stoffverteilungen erlangt in immer mehr Anwendungsfeldern, wie z. B. in der Medizin, der Nahrungsmittelindustrie und der Umweltsensorik, eine besondere Bedeutung. Die Raman-Spektroskopie bietet hierbei die Möglichkeit einer molekülspezifischen Analyse auch in Stoffgemischen ohne Probennahme und Probenvorbereitung. Mittels Laserlicht werden die zu untersuchenden Proben angeregt, und ein Teil des inelastisch gestreuten Laserlichts erzeugt ein Raman-Spektrum mit einer charakteristischen Signatur. Diese kann als unverwechselbarer Fingerabdruck eines Stoffes für eine qualitative und quantitative Analyse genutzt werden. Raman-spektroskopische Untersuchungen erfolgen meist als Punktmessung mit Anregungsfleckgrößen im sub-Millimeterbereich. Eine stoffspezifische Verteilung wird daher oftmals über ein serielles Abtasten der Probe realisiert.

Zwei Limitierungen sind hierbei jedoch zu beachten: Zum einen werden bei realen Proben die sehr schwachen Raman-Signale oftmals von Störsignalen wie z. B. der Fluoreszenz überlagert und verhindern somit eine Analyse insbesondere von Proben mit einer unbekanntem Stoffzusammensetzung. Darüber hinaus benötigt man für ein großflächiges Abtasten einer Probe im z. B. cm-Bereich oftmals Messzeiten von mehreren zehn Minuten bis Stunden.

Mit dem im **Leitprojekt „Bildgebende Spektrometer-freie Hyperspektrale Raman-Sensorik“** verfolgten Ansatz stellt sich das OASYS-Konsortium dieser Herausforderung der Überlagerung schwacher Raman-Signale und der schnellen bildlichen Erfassung von Stoffverteilungen und ermöglicht somit erstmals eine bildgebende und molekülspezifische Messtechnik mit kurzen Messzeiten im Sekundenbereich für Applikationen z. B. in der Prozesskontrolle unter realen Umweltbedingungen.

Dazu wird die **Raman-Differenzspektroskopie mit verschobener Anregung** oder auch die **sequentiell verschobene Raman-Spektroskopie mit der Methode des Compressed Sensing** kombiniert und somit eine neuartige bildgebende und molekülspezifische Messtechnik mit kurzen Messzeiten im Sekundenbereich realisiert.

Der Ansatz beinhaltet inhärent die Möglichkeit der **Raman-Spektroskopie mit räumlichem Versatz (Spatial Offset Raman Spectroscopy)**, der darüber hinaus Tiefeninformationen aus der Probe liefert und somit z. B. ein **Deep Tissue Imaging** ermöglicht, einer optischen Methode zur molekülspezifischen in-Vivo-Abbildung tiefer Gewebeschichten.

Leitprojekt A3: Si-kompatible Detektoren für die Anwendung in der Objektidentifikation

Die Erkennung und Unterscheidung von Objekten mit bildgebenden Verfahren hat sich als Standard zur Automatisierung von Prozessen etabliert. Die zunehmende Rechenleistung von miniaturisierten Systemen zur Bildverarbeitung ermöglicht die Anwendung selbst in mobilen Geräten. Im Zusammenspiel mit komplexen Algorithmen, wie etwa dem maschinellen Lernen, ist eine Realisierung von (teil-)autonomen Systemen absehbar. Die Vorteile von autonomen Geräten kommen insbesondere dann zum Tragen, wenn sie nicht nur ihre Aufgabe zuverlässig erfüllen, sondern auch im Anwendungsumfeld auf Absicherungen verzichtet werden kann und Gefahrensituationen vorausschauend vermieden werden können.

Zur Entscheidungsfindung nutzen diese Systeme häufig von Sensoren generierte Informationen auf der Basis von Kamerasystemen, welche Bildinformationen im sichtbaren Bereich erfassen. Derartige Systeme erzielen unter kontrollierten Umgebungsbedingungen, etwa in einer abgeschirmten industriellen Fertigungshalle, bereits gute Ergebnisse. Im Außenbereich, **unter realen Umweltbedingungen**, lassen sich, beispielsweise Beleuchtungsszenarien, jedoch selten konstant halten. Darüber hinaus können sich hier auch **sicherheitsrelevante Objekte** wie Personen, Tiere oder Fremdkörper (z. B. Steine) im Arbeitsbereich befinden und müssen erkannt werden.

Um diese Fragestellungen zu adressieren, werden für einige Anwendungsfälle bereits mehrere Kameramodule räumlich nebeneinander platziert, die jeweils einen entsprechen Spektralbereich abdecken können. Durch die zusätzlichen Kamerasysteme ergeben sich aber **Limitierungen hinsichtlich der Skalierbarkeit in Baugröße, Gewicht, Datendurchsatz und Energieverbrauch**. Für den erweiterten Spektralbereich bis zum mittleren Infrarot stehen außerdem aktuell nur Kamerasysteme zur Verfügung, die aufgrund ihrer Kosten für die meisten Einsatzszenarien **unwirtschaftlich** sind.

Das **Leitprojekt „Si-kompatible Detektoren für die Anwendung in der Objektidentifikation“** adressiert diese Herausforderungen für zukünftige Sensormodule durch die Anwendung von sogenannten **Metaoberflächen**, die **applikationsspezifische Filterfunktionen** bezogen auf das Spektrum und die **Polarisation der einfallenden Strahlung** ermöglichen. Durch die **geringe Baugröße, die voll adaptierbaren Eigenschaften und die Möglichkeit zur Kombination mit Detektoren im sichtbaren und infraroten Wellenlängenbereich** stellt dieser Ansatz eine vielversprechende Möglichkeit dar, skalierbare Detektoren für die Anwendung in der Objekterkennung zu realisieren.

Leitprojekt B1: MEMS-basierte Bildgebung in/durch streuende(n) Medien

Bildgebung in und durch streuende(n) Medien stellt eine elementare sensorische Herausforderung dar, die an entscheidenden Stellen in der biomedizinischen Forschung bis hin zum klinischen Alltag von unmittelbarem Interesse ist.

Eingesetzte Verfahren, bei denen diese Fragestellung von Relevanz ist, sind beispielsweise **Endoskopie sowie Deep Tissue Imaging mittels optischer Kohärenztomographie (Optical Coherence Tomography - OCT)**:

Die Endoskopie ist eine etablierte bildgebende Methode zur humanmedizinischen Diagnostik, die auch zur Durchführung minimal-invasiver operativer Eingriffe an Mensch und Tier eingesetzt werden kann. Bei sämtlichen gängigen Endoskopen ist allerdings aufgrund der Phasenverzerrung des Lichtes im Aufnahmegerät eine Wellenfrontkorrektur erforderlich.

Beim Deep Tissue Imaging mittels OCT werden nichtinvasiv, berührungslos und ohne Einsatz ionisierender Strahlung optische Informationen aus tiefen Gewebeschichten gewonnen, die ohne besondere wellenfrontformende Techniken nicht zugänglich sind. Um die Einsatzmöglichkeiten für die medizinische Diagnostik zu verbessern, stehen bisherige OCT-Lösungen vor der Herausforderung tiefer einzudringen, größere Volumina zu erfassen und die Bildgebung zu beschleunigen.

Eine elementare Anforderung bei der Bildgebung in/durch streuende(n) Medien ist eine orts aufgelöste, möglichst schnelle und äußerst präzise Intensitäts- und/oder Phasenkontrolle des Lichts. Eine Schlüsselkomponente hierfür sind sogenannte **Flächenlichtmodulatoren (Spatial Light Modulators - SLM)** - programmierbare Bauteile, die zur räumlichen Modulation der Amplitude und Phase einer optischen Wellenfront in zwei Dimensionen verwendet werden. Anwendungen im Bereich der biomedizinischen Bildgebung können aber zum Teil nur mit Einschränkungen mit kommerziell verfügbaren SLM-Produkten umgesetzt werden. Oftmals gibt es dabei Limitationen, da die Modulatoren zu langsam, nicht analogfähig, oder nicht für die benötigte Wellenlänge des Lichts geeignet sind. Um diese Lücke in Hinblick auf die Bildgebung in/durch streuende(n) Medien zu schließen, entwickeln die Projektpartner im **Leitprojekt „MEMS-basierte Bildgebung in/durch streuende(n) Medien“** erstmalig ein MEMS-basiertes **hochintegriertes Senkspiegel-SLM-Modul mit einer sehr hohen Phasenauflösung gekoppelt mit einer Geschwindigkeit im kHz-Bereich**.

Der Mehrwert in der Verwendung von MEMS-basierten hochauflösenden Lichtmodulatoren besteht in der Kombination von Geschwindigkeit und analoger Funktionalität bei Modulation von Phase und/oder Intensität des für die Sensorikanwendung verwendeten Lichts. Erst die hohe Geschwindigkeit der Schlüsselkomponente erlaubt eine Bildgebung in biowissenschaftlichen Anwendungen mit akzeptablen Analyse-/Diagnosezeiten. Zusätzlich zu den Verbesserungen für die oben genannten sensorischen Anwendungen auf dem Gebiet der Biomedizin ist davon auszugehen, dass darüber hinaus analoge, schnelle Mikrospiegelmatrizen mit hoher Phasenauflösung zum Key Enabler für neue Anwendungen werden können.

Leitprojekt B2: Optoakustische Sensorik

Die frühzeitige und exakte Erkennung von Krebserkrankungen hat eine große Bedeutung, um beispielsweise die Ausbreitung von Krebs im Körper zu verhindern. Bisherigen Diagnostikverfahren wie der Ultraschallsonografie oder der Szintigrafie fehlen jedoch ausreichend Spezifität bei der Erkennung oder setzen den Patienten ionisierender Strahlung aus. Die Folge sind teilweise unnötige chirurgische Eingriffe zur Entnahme von Gewebeproben.

Die Krebsdiagnostik kann daher von der **photoakustischen Bildgebung (Photoacoustic Imaging - PAI)** profitieren. Bei der PAI werden durch optische Anregung von Gewebe Schallwellen erzeugt, die mittels Ultraschalldetektor empfangen und ausgewertet werden können, um Bilder von Körperregionen zu generieren. Bedeutender Vorteil der Photoakustik ist die Möglichkeit zur funktionalen Bildgebung, da je nach Gewebeart und -zusammensetzung sowie je nach optischer Quelle ein charakteristisches photoakustisches Signal erzeugt wird. Für die **Diagnostik mittels Photoakustik in Körperregionen tiefer als 4 cm**, z. B. für die Krebsdiagnostik an der Prostata oder im Verdauungstrakt, werden jedoch miniaturisierte und integrierbare Komponenten für Katheter benötigt. Gleiches gilt für **Point-of-care-Lösungen**, bei denen

kleine und kompakte Gesamtsysteme benötigt werden, um diese portabel an unterschiedlichsten Orten einzusetzen.

Das **Leitprojekt „Optoakustische Sensorik“** stellt sich auf Seiten des Ultraschallempfängers den Herausforderungen **Untersuchung tieferer Geweberegionen** und **portabler Anwendung**. Mit zwei unterschiedlichen Ansätzen auf Basis von Mikrotechnologien sollen kompakte und integrierbare hochsensitive Empfänger realisiert werden:

Zum einen wird eine **photonische Empfängertechnologie** basierend auf einer Silicon-on-Insulator (SOI)-Technologie entwickelt. Diese als **elektronisch-photonisch integrierte Schaltung, kurz EPIC**, bezeichnete Technologie ermöglicht die Integration von Sensoren, Detektoren und Ausleseelektronik auf einem einzigen Chip. Bislang wird der breite Einsatz von EPIC-basierten Sensoren jedoch durch die komplexen und teuren Packaging-Methoden behindert. In diesem Leitprojekt wird ein **neuartiges Integrationskonzept** vorgeschlagen und entwickelt, das auf einem Transferverfahren beruht, um dieses Problem zu lösen.

Zum anderen existieren **kapazitive MEMS-basierte Ultraschallwandler (CMUTs)**, welche als kapazitive Druckzellen Druckänderungen (Schall) detektieren. Die Anwendung und Integration von CMUTs für photoakustische Systeme ist jedoch wenig erforscht. Ein in diesem Projekt genutzter Vorteil von CMUTs ist, dass diese Bauelemente gleichzeitig für die konventionelle Ultraschallbildgebung genutzt werden können. Dies ermöglicht Informationen aus der Ultraschallbildgebung zu nutzen, z. B. Erkennen von Flüssigkeitsansammlungen. Weiterhin besitzen CMUTs technologische Vorteile, wodurch sie als hochintegrierbare Sensoren für die Photoakustik außerordentliche Potenziale aufweisen: Miniaturisierbarkeit, CMOS-Kompatibilität und höchste Sensitivität im Empfang. Im Leitprojekt sollen sowohl die **Performance-Potenziale** der mikrosystemtechnischen Detektoren (Sensitivität, etc.) für die photoakustische Bildgebung untersucht, als auch deren **Integrationsmöglichkeiten in ein photoakustisches System** entwickelt werden.