

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil I – Kurzbericht

WIR!-Projekt: Hyperspektraler LIDAR-Sensor für autonome Schienenfahrzeuge unter Nutzung von Verfahren des maschinellen Lernens;
TP 1: Hyperspektraler LIDAR-Sensor unter Laborbedingungen – spektrale Materialidentifikation, Validierung und Technologiesteuerung (FKZ 03WIR1213A)

**Zuwendungs-
empfänger:** Technische Universität Chemnitz

Laufzeit: 08/2021 – 05/2023

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

1 Ursprüngliche Aufgabenstellung

Das Projekt HYLIGHT4RAIL zielte im Rahmen des SRCC (Smart Rail Connectivity Campus) auf die Entwicklung und Erprobung eines Forschungsfunktionsmusters für einen innovativen hyperspektralen LIDAR (Light Detection And Ranging) Sensor für das automatisierte und autonome Fahren auf der Schiene ab.

Ein LIDAR-Sensor erstellt eine dreidimensionale Abbildung seiner Umgebung über eine winkelabhängige Laufzeitmessung mit kurzen Lichtpulsen. Ein hyperspektraler LIDAR-Sensor erweitert dieses Sensorkonzept. Dieser misst die Reflexion der Lichtpulse bei mehreren Wellenlängen und liefert damit ein von der jeweiligen Oberfläche abhängiges Signal. Dadurch wird die 3D-Abbildung der Umgebung um Informationen zur Materialkomposition erweitert. Erfasste Gegenstände können anhand ihrer spektralen Signatur somit differenziert und potentielle Gefahren besser eingeschätzt werden. In automatisiert oder autonom fahrenden Schienenfahrzeugen könnte hyperspektrales LIDAR zukünftig zur Erkennung und Klassifizierung von Objekten auf der Fahrtrasse und in deren Umgebung eingesetzt werden.

Die Projektarbeiten sollten maßgeblich die folgenden Kernthemen erörtern:

- 1) Konzept und konstruktive Ausführung eines hyperspektralen LIDAR-Sensors im Hinblick auf eine Anwendung in automatisierten und autonomen Schienenfahrzeugen.
- 2) Die sichere Erkennung und Unterscheidung von Materialien, wie sie in der Umgebung der Fahrtrassen von Schienenfahrzeugen vorkommen, mit dem entwickelten Sensorsystem.

Das Projektvorhaben zielte in erster Linie auf einen grundlegenden Nachweis der vorgeschlagenen Technologie anhand eines Forschungsfunktionsmusters ab.

Spektrales LIDAR mit wenigen unterschiedlichen Wellenlängen wurde erstmals um die Jahrtausendwende in der Literatur beschrieben und für die Fernerkundung eingesetzt. Allerdings erst durch die Verfügbarkeit von breitbandig abstimmbaren Laserlichtquellen, wie Superkontinuum-Lasern, erfolgte der schrittweise Übergang von multispektralen zu hyperspektralen Versuchsanordnungen. Hyperspektrales LIDAR wird derzeit ausschließlich in der Forschung angewendet. Als kommerzielles Produkt ist jedoch beispielsweise ein multispektrales LIDAR-System mit 2 Wellenlängen der Leica Geosystems AG für Anwendungen in der Bathymetrie und Topologie von Küstenlinien bekannt.

Die Weiterentwicklung des Standes der Technik von monospektralen LIDAR-Sensoren und deren Anwendung im Bereich der Geowissenschaften und Ökologie wurde bereits in einzelnen wissenschaftlichen Veröffentlichungen beschrieben. Darin wird auf die zukünftige Bedeutung der mehrdimensionalen Datenerfassung eingegangen und der Übergang von monospektralen zu hyperspektralen Systemen vorgestellt. Hyperspektrale LIDAR-Systeme stehen derzeit noch am Anfang ihrer Entwicklung. Es wird gerade erst begonnen, das vielfältige Anwendungspotential abseits der Geowissenschaften und der Ökologie zu erforschen. Interesse fand unter anderem die Messung der Stickstoffkonzentration in Reisblättern und die Klassifizierung von Kohle und Gestein im Bergbau. Die Entwicklung von miniaturisierten und integrierten hyperspektralen LIDAR-Systemen stand zu Projektbeginn nicht im Vordergrund der Forschungsarbeiten.

2 Ablauf des Vorhabens

Das Projekt war in 9 Arbeitspakete gegliedert. Der strukturelle und inhaltliche Zusammenhang ist in der nachfolgenden Abbildung 1 im Überblick dargestellt. Das Vorhaben war als Verbundprojekt zwischen der TU Chemnitz und dem Fraunhofer ENAS angelegt und wurde durch den SRCC e. V. als beratenden, externen Partner begleitet. Die Entwicklung eines hyperspektralen LIDAR-Sensors konnte nur im Zusammenspiel zwischen Grundlagenforschung und anwendungsorientierter Forschung durchgeführt werden. Darüber hinaus war eine enge Vernetzung mit möglichen kommerziellen Anwendern der Technologie erforderlich.

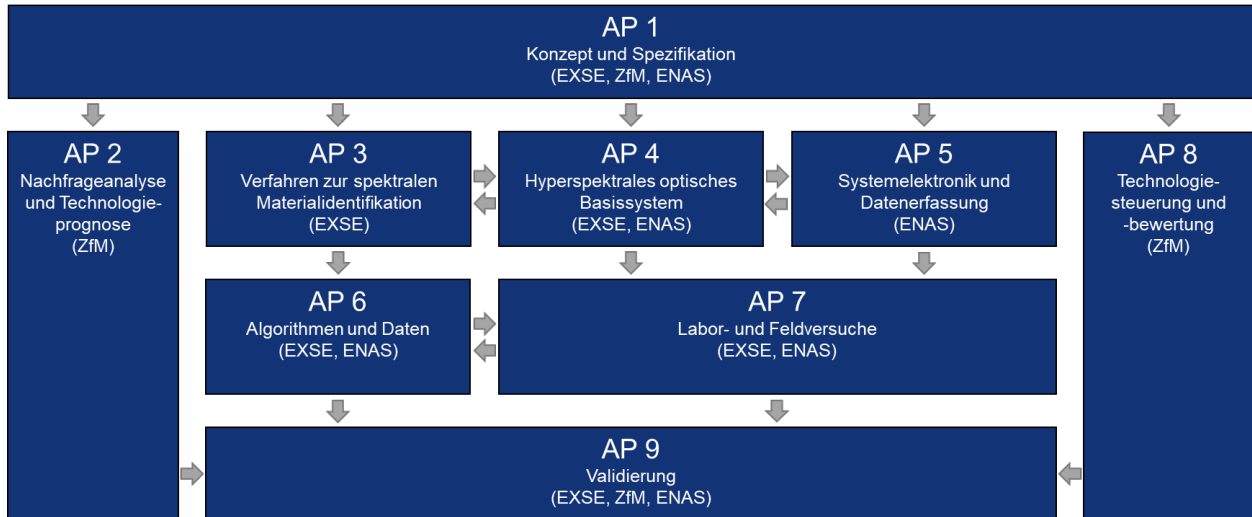


Abbildung 1: Arbeitspakete des Vorhabens

Im Arbeitspaket 1 erarbeiteten die Projektpartner gemeinsam das Konzept und die Spezifikation. Anschließend wurden in den Arbeitspaketen 3 und 6 die grundlegenden Untersuchungen zur spektralen Materialidentifikation und zur Bewertung der Sensordaten mit Algorithmen und Verfahren des maschinellen Lernens durchgeführt. Parallel dazu fanden in den Arbeitspaketen 4, 5 und 7 die stärker auf die Anwendung orientierten Arbeiten statt und es wurden vielzählige Messdaten aufgenommen. Flankiert wurden die Arbeiten durch die Arbeitspakete 2 und 8. Diese beschäftigten sich mit einer Analyse zur Nachfrage und einer an dieser orientierten Technologieprognose. Die Arbeiten wurden bis zu einem möglichen Miniaturisierungskonzept geführt. Im Arbeitspaket 9 wurden abschließend alle Ergebnisse zusammengeführt und validiert.

3 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Der erste Arbeitsschwerpunkt der TU Chemnitz lag in der Entwicklung und Demonstration von Verfahren zur Identifikation anwendungsrelevanter Materialien anhand ihres Reflexionsspektrums. Dies umfasste die Erarbeitung eines für unterschiedliche Experimente konfigurierbaren, optischen Basissystems und die Durchführung von zahlreichen Laborversuchen. Es konnte gezeigt werden, dass Materialien wie sie im Umfeld der Bahn typischerweise vorhanden sind, anhand ihres spektralen Fingerabdruckes aus gemessenen Laser-Reflexionsspektren unterschieden werden können. Darüber hinaus wurde mit der laserbasierten, spektralen Bildgebung im sichtbaren und nahinfraroten Spektralbereich experimentiert. Eine interessante Anwendung für die Bestimmung des NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) liegt beispielsweise in der Landwirtschaft.

Der zweite Arbeitsschwerpunkt der TU Chemnitz lag in der Durchführung einer Nachfrageanalyse und Technologieprognose für hyperspektrale LIDAR-Sensoren. Dies umfasste die Durchführung eines Anwenderworkshops und die Erarbeitung eines miniaturisierten Systemkonzeptes. Dazu wurden Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette recherchiert, mit einer Auswahl dieser Unternehmen wurde der Workshop „Mobilität der Zukunft – autonome/automatisierte Schienenfahrzeuge“ durchgeführt. Die Kenntnisse der Projektpartner zum Stand der Technik wurden durch eine Literatur- und Patentrecherche aktualisiert. Seit Projektbeginn haben die weltweiten Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich der spektralen LIDAR-Sensoren zugenommen. Von Anwendern wird die Technologie als zukunftsweisend, derzeit aber zu teuer eingeschätzt. Die hohen Kosten werden maßgeblich durch die Anforderungen an Laser, Detektoren und die Elektronik zur Datenverarbeitung verursacht. Diese Tatsache wurde in einem Miniaturisierungskonzept mit stufenweiser Umsetzungsstrategie berücksichtigt.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil II – Ausführlicher Bericht

WIRI-Projekt: **Hyperspektraler LIDAR-Sensor für autonome Schienenfahrzeuge unter Nutzung von Verfahren des maschinellen Lernens;
TP 1: Hyperspektraler LIDAR-Sensor unter Laborbedingungen – spektrale Materialidentifikation, Validierung und Technologiesteuerung (FKZ 03WIR1213A)**

Zuwendungsempfänger: **Technische Universität Chemnitz**

Laufzeit: **08/2021 – 05/2023**

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

1 Durchgeführte Arbeiten

AP 1 Konzept und Spezifikation

AP 1.1 Spezifikation von Materialien und Umwelttests

Die kompakte Zielvorgabe war, dass der hyperspektrale LIDAR relevante Materialien möglichst sicher unterscheiden kann und dabei möglichst wenig durch im Außenbereich immer vorhandene Witterungs- und Umwelteinflüsse gestört wird. Es wurden Materialien aufgenommen, die im Umfeld des Gleiskörpers häufig zu finden sind, und solche, die sicherheitsrelevant sind. Können Schienenschwellen aus Holz, Beton oder Stahl von einem im Gleisbett liegenden Baum oder Stein unterschieden werden? Können Tiere von Gesträuch unterschieden werden, eine Warnweste von Herbstlaub?

Ein Katalog an relevanten Materialien wurde angelegt. Die Auswahl erfolgte nach den Gesichtspunkten „Relevanz im Umfeld einer Schienenstrecke“ und „Breite der untersuchten Materialkategorien“. Folgende Materialien wurden aufgenommen:

- Brett und Rinde,
- Schienenschwellen (Holz-, Stahl oder Betonschwellen),
- Stein, Beton (typische Materialien in der Schienenumgebung),
- Eisen mit und ohne Rost,
- Kunststoff z. B. Tüte,
- Organik (Fell, Laub),
- verschiedene Stoffe (Wolle, Jeans),
- Schnee, Eis und Nebel, sowie
- hoch reflektive Materialien wie z. B. Warnweste, Verkehrszeichen und Reflexionsfolien.

Als Referenz wurde Keramik und Teflon als stark und schwach streuende Materialien mit einem konstant hohen Reflexionsgrad im sichtbaren und nahen Infrarotbereich ausgewählt.

Intensität und Spektrum des vom LIDAR erfassten rückgestreuten Lichts hängen im Wesentlichen von der Oberfläche der Objekte ab. Diese können durch Wasser, Schnee, Eis, Blütenstaub, Blätter und anderes organische Material bedeckt werden. Wasser hat charakteristische Absorptionsbanden im infraroten Spektralbereich. Diese Absorptionsbanden können zur Unterscheidung von wasserhaltigen (meist organischen) Materialien und Stein, Eisen oder Kunststoff dienen. Wenn die Software zur Auswertung der Spektren und Klassifizierung der Materialien vor allem diese Absorptionsbanden auswertet, sind falsche Identifizierungen durch feuchte Oberflächen zu erwarten. Deshalb sollen alle Materialien mit trockener und feuchter Oberfläche untersucht werden. Ähnliches gilt für die Bedeckung mit Schnee, Eis, Blütenstaub und Blättern.

Das Licht des LIDAR wird auch auf der Strecke zwischen LIDAR und Objekt von Wassertropfen und -tröpfchen (Nebel) oder Schneeflocken gestreut. LIDAR ist wegen der kurzen Wellenlängen generell stärker von der Witterung beeinflusst als Radar. Ein Übersichtsartikel zum Witterungseinfluss auf LIDAR und Radar im automobilen Kontext findet sich in HASIRLIOGLU/RIENER¹.

AP 1.2 Nachfrageanalyse, Technologieprognose und -bewertung

Begleitend zu den Arbeiten an der Spezifikation sowie den weiteren Anwendungsfeldern wurde im Rahmen des AP 1.2 eine Nachfrageanalyse vorbereitet. Diese Analyse soll aufzeigen, welche Interessen an welchen Stellen die Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette mit den im Projekt definierten Zielen verbinden. Um dies herauszufinden, wurde neben sekundärer Marktforschung und dem Ermitteln des Standes der Technik und der Fortführung der Arbeiten aus der

¹ HASIRLIOGLU, Sinan; RIENER, Andreas. Introduction to rain and fog attenuation on automotive surround sensors. In: 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, 2017. S. 1-7.

Antragstellung hinsichtlich Veröffentlichungen und Schutzrechten auch eine primäre Marktforschung in Form einer Befragung von Experten durchgeführt. Für die Auswahl der Experten wurden im ersten Schritt die fahrzeug- bzw. schienenfahrzeughnahen Partner im SRCC (Smart Rail Connectivity Campus) ausgewählt. Hierfür wurde vom SRCC eine Partnerliste bereitgestellt, die durch Recherche um die jeweiligen Aufgaben und Kompetenzen der Partner ergänzt wurde. Daraus wurden diejenigen mit Bezug zu Sensorik, Elektronik, Messtechnik ausgewählt. In einem nachfolgenden Schritt wurden die weiteren Anwendungsbereiche:

- Klassifizierung der Vegetation im Themenfeld Smart Farming,
- Charakterisierung in der Mineralogie, z. B. im Bergbau und in Bohrlöchern,
- Untersuchungen in der Medizintechnik,
- Stand-off-Detektion von gefährlichen Substanzen in der Sicherheitstechnik,
- Unterscheidung zwischen Personen und Gütern in der Logistik, Lagerhaltung und im unbemannten Transportverkehr

priorisiert und für die anschließende Expertenauswahl auf drei Bereiche fokussiert:

- Klassifizierung der Vegetation im Themenfeld Smart Farming,
- Untersuchungen in der Medizintechnik,
- Unterscheidung zwischen Personen und Gütern in der Logistik, Lagerhaltung und im unbemannten Transportverkehr.

In diesen Bereichen wurden Experten identifiziert und recherchiert, die für eine ähnliche Umfrage geeignet sind.

AP 1.4 Gesamtkonzept und Spezifikation

Ein Systemkonzept für das geplante scannende LIDAR Experiment wurde entworfen. Dabei sollen Weißlicht-Lasersysteme mit anschließender Selektion von engen Spektralbändern eingesetzt werden. Die Abbildung 1 zeigt das vorgeschlagene System, das für zwei Spektralbereiche ausgelegt wird: Einmal der Spektralbereich bis 1.000 nm, bei dem die Detektion mit einem Einzelphotonen-Detektor in Silizium-Technologie (single photon avalanche photo diode) erfolgen kann. Dieser Wellenlängenbereich dient primär zur Systementwicklung. Hier kann im sichtbaren Spektralbereich mit farbigen Objekten gearbeitet werden. Vorteil ist die Möglichkeit einer Justage im für das Auge zugänglichen Spektralbereich und der einfache Zusammenhang zwischen farbigen Objekten und Spektren.

Für eine Kategorisierung der oben aufgeführten Materialien ist der mittlere infrarote Spektralbereich bis 1.700 nm relevant, weil dort materialspezifische spektrale Absorptionsbanden erwartet werden. Als Lichtquelle kann hier ebenfalls der spektral gefilterte Weißlicht-Laser eingesetzt werden. Für die Detektion muss ein InGaAs-Detektor verwendet werden, mit einer kleineren Bandlücke im Vergleich zu Silizium.

Um die Entfernungsauflösung des LIDAR zu erhalten, wird ein „time-correlated single photon counting“ System eingesetzt, das die Detektion einzelner Photonen zeitaufgelöst misst. Wichtig ist ein „Gating“ der Detektoren, d. h. einer Aktivierung nur in dem kurzen Zeitfenster, vom Laserpuls bis zur maximalen Laufzeit des reflektierten Lichts (50 m, entsprechen einer doppelten Laufzeit von 330 ns).

Für die räumliche Winkel-Auflösung wird ein Zweiachsen-Galvo-Spiegel-Scanner eingesetzt, der von einer National-Instruments-Karte mit analogen Ausgängen angesteuert werden soll. Damit erhält man hyperspektrale Datenkuben mit vier Dimensionen (Wellenlänge, Zeit = Entfernung, horizontaler und vertikaler Winkel). Für Voruntersuchungen kann auf die Winkelinformation verzichtet werden. Die Ansteuerung des Gesamtsystems wird in LabView programmiert.

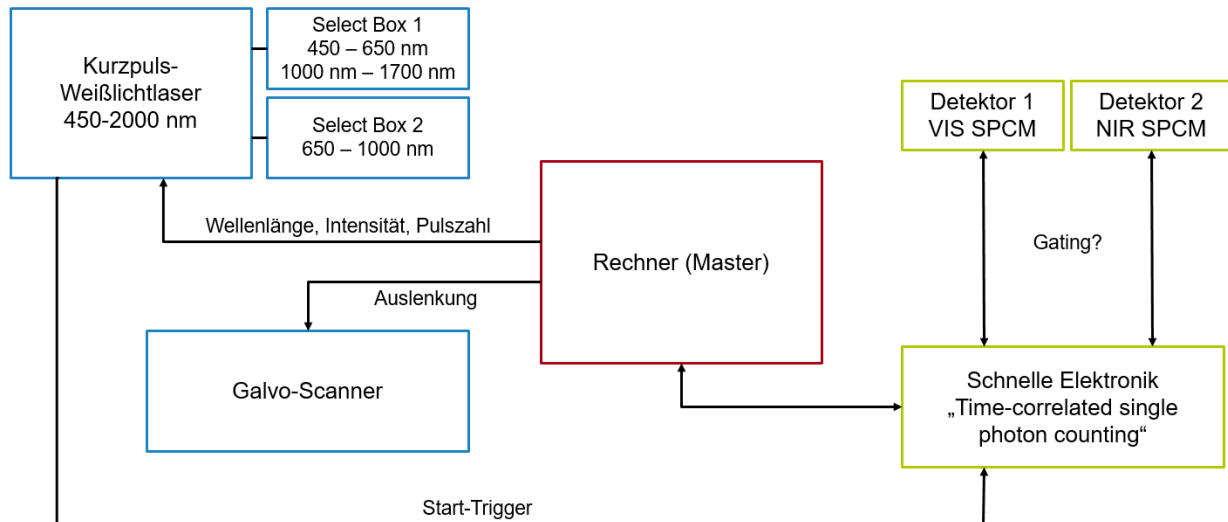


Abbildung 1: Systemkomponenten und Konzept zu deren Ansteuerung.

Die Bereiche und Auflösung in den jeweiligen Dimensionen wurden wie folgend festgelegt:

- Spektralbereich I: 700 nm bis 1.700 nm,
- Spektralbereich II: 450 nm bis 1.000 nm,
- erweiterter Spektralbereich I bis 2.500 nm für Labormessungen (Materialcharakterisierung),
- spektrale Auflösung in beiden Bereichen: 10 nm,
- Entfernungsauflösung (Zeitauflösung): 15 cm (1 ns),
- Maximale Entfernung: 50 m (330 ns),
- Winkelbereich: +/- 25° horizontal, +/- 20° vertikal und
- Winkelauflösung: 1° horizontal und vertikal, 100 x 40 Punkte.

Die Spektralbereiche sind durch die Anregungsquelle und durch die Detektoren gegeben. Für ein robustes und kompaktes System kommen im Wesentlichen Halbleiterdetektoren in Frage. Deren Wellenlängenbereich ist auf der langwelligen Seite durch die Bandlücke des Materials begrenzt. Die beiden am besten geeigneten Materialsysteme sind Silizium mit einer Bandlücke bei etwa 1.000 nm und zu InP gitterangepasstem InGaAs bei etwa 1.700 nm. Auf der kurzwelligen Seite wird der Spektralbereich durch Absorption in Deckschicht oder Substrat begrenzt (für Silizium etwa bei 350 nm, für InP/InGaAs bei 950 nm). Andere Halbleiter haben eine geringere Bandlücke und erweitern den Detektionsbereich ins Infrarote, es existieren aber keine kompakten Einzelphotonen-Detektoren. Entsprechend wurden die Spektralbereiche I und II für den LIDAR ausgewählt. Für die Untersuchung der Materialsysteme wird auf ein Laborspektrometer zurückgegriffen, das bis 2.500 nm messen kann. Damit soll untersucht werden, ob dieser Spektralbereich, in dem u. a. weitere Absorptionsbanden von Wasser liegen, notwendig für die Unterscheidung der Materialien ist.

Beim ausgewählten Winkelbereich muss die Messzeit mit beachtet werden. Ein hyperspektraler LIDAR, bei dem für jeden Punkt ein Spektrum aufgenommen wird, benötigt pro Punkt im Winkelspektrum länger als ein konventioneller, monochromatischer LIDAR. Deshalb wurde die geringe Anzahl der Messpunkte angesetzt. Die mit Scanner und Optik erreichbare Winkelauflösung soll aber deutlich besser sein. Damit wird es möglich, Bildausschnitte selektiv mit höherer Winkelauflösung abzutasten.

AP 2 Nachfrageanalyse und Technologieprognose

AP 2.1 Nachfrageanalyse

Entsprechend der Ziele des AP 2 wurde, um mit dem Vorhaben die Interessen der Unternehmen mit denen des Projektes zu verknüpfen, eine Nachfrageanalyse durchgeführt. Hierfür erfolgte zunächst die Priorisierung der möglichen Anwendungsbereiche, sodass neben dem des Schienenverkehrs auch die folgenden Anwendungsgebiete selektiert wurden:

- Klassifizierung der Vegetation im Themenfeld Smart Farming,
- Untersuchungen in der Medizintechnik und
- Unterscheidung zwischen Personen und Gütern in der Logistik, Lagerhaltung und im unbemannten Transportverkehr.

Daraufhin wurden Unternehmen und Personen identifiziert und recherchiert, welche sich durch Expertise auf diesen Gebieten auszeichnen. Eine erste Auswahl erfolgte mithilfe einer vom SRCC bereitgestellten Partnerliste bestehend aus 155 Mitgliedern des SRCC, welche um deren Kompetenzportfolio ergänzt wurde. So konnte eine Auswahl der Firmen mit Bezug zu den oben genannten Anwendungsbereichen vorgenommen werden. Eine Recherche zu weiteren Unternehmen ergänzte diese Auswahl. Somit konnten insgesamt ca. 30 relevante Firmen aus dem Bereich des Schienenverkehrs sowie ca. 40 Firmen mit Expertise auf den weiteren Anwendungsgebieten identifiziert werden.

Ein Interview mit Prof. Dr. Marcel Lichters, Leiter der Professur für Marketing und Handelsbetriebslehre der TU Chemnitz, konkretisierte das Konzept der Nachfrageanalyse – weg von quantitativen standardisierten Fragebögen hin zur qualitativen Marktforschung bestehend aus Fokusgruppen oder individuellen Interviews, um so tiefere Einblicke in die Entscheidungskriterien und Motivationsstrukturen der Teilnehmenden zu erlangen.

Ausgehend von diesen Überlegungen wurde ein Workshop-Konzept entwickelt, welches durch eine Befragung der identifizierten Experten in Form eines interaktiven Treffens mit moderierten Diskussionen die relevanten Komponenten der Nachfrageanalyse abdecken sollte. Im Fokus stand dabei mit Bezug zum Projekthintergrund zunächst das Anwendungsgebiet des Schienenverkehrs. Im Speziellen wurden unter dem Workshop-Titel „Mobilität der Zukunft – automatisierte / autonome Schienenfahrzeuge“ zukünftige Entwicklungen sowie aktuell auftretende Probleme, Hindernisse und Verbesserungsmöglichkeiten im Bereich der autonomen Schienenfahrzeuge diskutiert und evaluiert. Daran schloss sich eine Vorstellung des sich im Projekt in Entwicklung befindenden Systems an, sodass dessen anwendungsbezogenen Anforderungen direkt mit den Personen diskutiert werden konnten, die als zukünftige Anwender mit solchen Technologien in direkten Kontakt treten.

Die Ergebnisse des Workshops zeigen, dass neue Entwicklungen intelligenter Sensorik zur Umgebungs-, Abstands- und Fahrwegerfassung sowie zur Erkennung von Gegenständen als wünschenswerte Verbesserung für die Zukunft des Schienensektors angesehen werden. Sofern alle notwendigen Voraussetzungen erfüllt sind, die (Daten-)Sicherheit aktuelle Standards erreicht oder überschreitet und die Zuverlässigkeit des Systems gegeben ist, wird dies als Zukunftsmodell angesehen, bei welchem die Vorteile die Nachteile überwiegen. Zur Umsetzung autonomen Schienenverkehrs in Deutschland werden vor allem der Ausbau der Infrastruktur, die Erweiterung der Netzabdeckung sowie das Schaffen rechtlicher Voraussetzungen als grundlegend betrachtet. Um dies zu erreichen, seien mehrere Entwicklungsschritte nötig, die schrittweise zur Schaffung der Grundlagen, Automatisierung der Fahrzeuge und deren Anwendung führen. Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen zusammenfassend die weiteren Ergebnisse des Workshops. Die Kontaktaufnahme mit den Experten im Bereich Schienenverkehr ermöglichte außerdem die Vernetzung der Teilnehmenden im Hinblick auf eine weitere Zusammenarbeit.



Abbildung 2: Zusammenfassung der Ergebnisse des Workshops in Bezug auf notwendige Grundlagen für die Umsetzung autonomen Schienenverkehrs sowie wünschenswerte Entwicklungen, Verbesserungsbedarf sowie ungelöste Probleme im Bereich Sensorik.



Abbildung 3: Zusammenfassung der Ergebnisse des Workshops in Bezug auf verschiedene anwendungsbezogene Anforderungen an das HyLight4Rail-System.

AP 2.2 Technologieprognose

LIDAR-Sensoren gewinnen eine immer größere Bedeutung. Die Anwendungen sind vielfältig und gehen weit über den Einsatz als Umgebungssensoren an automatisierten oder autonomen Fahrzeugen hinaus. LIDAR-Sensoren werden in hochgenauen Messsystemen, Sicherheitssystemen, in der Überwachung, Abfallwirtschaft, Landwirtschaft, in der Vermessungstechnik, Robotik, Lagerhaltung, in Computer-Tablets, Smartphones und bei VR/AR-Brillen eingesetzt.

Zukünftige Systeme werden preiswert, robust und miniaturisiert sein, wobei es beständige Entwicklungsbestrebungen zur Erhöhung der Reichweite und der Bildauflösung geben wird. Obwohl zahlreiche Firmen am Einsatz von Mikrosiegeln zur Miniaturisierung der LIDAR-Sensoren arbeiten, gibt es einen stärker werdenden Trend zu Systemen ohne bewegliche Komponenten.

Multi- oder hyperspektrale Systeme werden erforscht, spielen jedoch im praktischen Einsatz noch keine Rolle. Als Grund wird hierbei der kostenintensive Weißlichtlaser gesehen. Diese Systeme sind derzeit ausschließlich für den Laboreinsatz oder in einzelnen Prototypen im Feldversuch vorstellbar. Eine Alternative bilden multispektrale Systeme, welche wenige, ausgewählte Wellenlängen nutzen und dadurch herkömmliche Diodenlaser einsetzen können. Vorstellbar ist die Integration eines solchen Systems in einem PIC (Photonic Integrated Circuit), wobei insbesondere die Effizienzprobleme bei der Licht Ein- und Auskopplung gelöst werden müssen.

Die Anforderungen an die Datenverarbeitung steigen drastisch mit jeder zusätzlichen Wellenlänge. Hinzu kommen die Anforderungen aus der spektroskopischen Materialidentifikation. Hier

können KI-Beschleuniger unterstützen, auch die Verwendung spezieller neuromorpher Schaltkreise ist vorstellbar.

Chemische Bildgebung in Echtzeit in Kombination mit AR/VR-Technologien, wie z. B. der Apple Vision Pro, können zu einem völlig neuen Erleben unserer Umgebung führen und zahlreiche neue Anwendungen im Bereich Extended Reality eröffnen. Wesentlich und wichtig ist es, diese Systeme so stark zu miniaturisieren, dass sie mit den entsprechenden Geräten und Anwendungen kompatibel werden. Hier gibt es erheblichen Forschungs- und Entwicklungsbedarf und zahlreiche Möglichkeiten auf Anschlussprojekte zu diesem Vorhaben.

AP 3 Verfahren zur spektralen Materialidentifikation

AP 3.1 Spektrale Materialidentifikation

Mit einem Infrarot-Reflexionsmikroskop (Bruker Hyperion 3000 an einem Bruker Vertex 70) wurden die Spektren von Materialien aus den einzelnen Kategorien im Spektralbereich von 900 nm bis 2.500 nm vermessen. Einige der Proben sind in Abbildung 4 gezeigt. Im Folgenden sollen ausgewählte Spektren im Vergleich diskutiert werden.



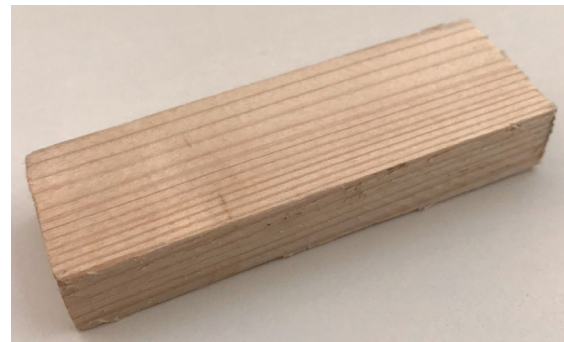
Probe #1



Probe #2



Probe #3



Probe #4



Probe #5



Probe #6



Probe #7



Probe #Keramik



Probe #Filz-braun



Probe #Filz-rot



Probe #Filz-rosa



Probe #Aluminium



Probe #Polymer-weiß



Probe #Polymer-grau



Probe #Polymer-soft



Probe #Polystyrol

Abbildung 4: Einige der Proben zur Entwicklung der spektralen Materialidentifikation.

Als Referenzproben wurden Materialproben mit einer rauen Oberfläche gewählt. Gegenstände mit einer glatten Oberfläche reflektieren das Licht spiegelnd und damit gerichtet, mit einem geringen Anteil an gestreutem Licht. Damit hängt das vom Detektor empfangene Signal sehr stark von der Orientierung der Oberflächennormale relativ zur Verbindungslinie von LIDAR zum Gegenstand ab. Dieser Effekt ist für LIDAR im Automotive-Umfeld als problematisch bekannt. Diese reflektiven Glanzlichter sind störend und erschweren die Auswertung, können aber mit entsprechenden Algorithmen herausgefiltert werden. Bei gleichmäßig strukturierten Oberflächen kann es zu Beugungseffekten am Gitter der Struktur kommen, was wiederum zu starken, richtungsabhängigen Reflexen führt. Bei rauen Oberflächen ist der spiegelnde Reflex schwach und die breite Winkelverteilung des gestreuten Lichts überwiegt. Als Referenzprobe für die spektrale Empfindlichkeit wurde eine raue Keramik ausgewählt, die im sichtbaren und infraroten Spektralbereich „weiß“ ist, d. h. ein hohes und wellenlängenunabhängiges Reflexionsvermögen und eine breite Winkelverteilung der rückgestreuten Photonen aufweist.

Weitere Referenzproben sind Filze unterschiedlicher Farbe. Im sichtbaren Spektralbereich haben diese Filze ein deutlich wellenlängenabhängiges Absorptions- und damit Reflexionsspektrum, eben eine Farbe. Im infraroten Spektralbereich unterscheiden sich die Spektren dagegen kaum, wie an drei beispielhaften Spektren in Abbildung 5 gezeigt ist. Alle drei Proben weisen eine Reihe für das Material charakteristischer Absorptionsbanden auf, unabhängig von der Farbe der Proben. Die Verschiebung des Absolutwerts der Intensität liegt am unterschiedlichen Abstand zwischen Scanner und jeweiliger Probe.

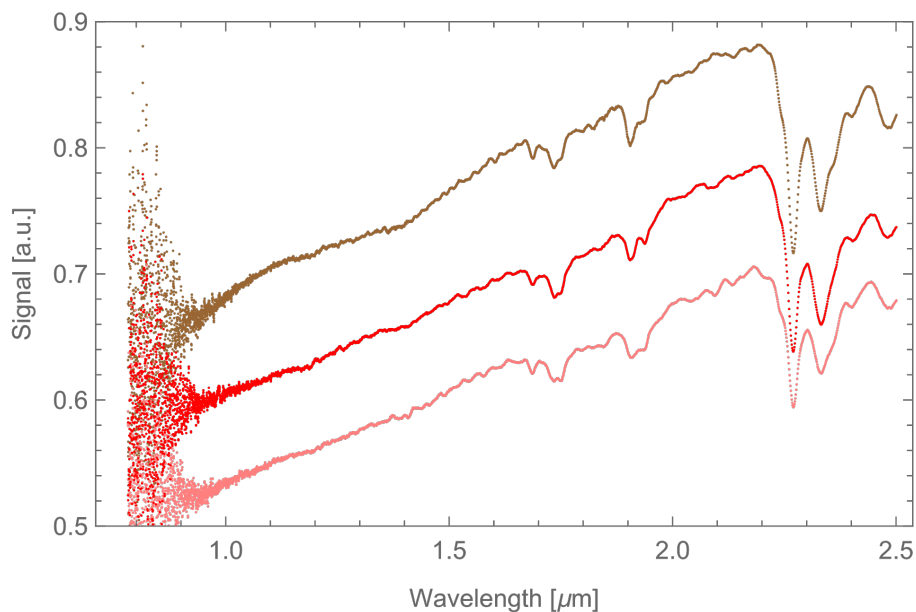


Abbildung 5: Infrarot-Reflexionsspektren von braunem, rotem und rosa Filz (Kurven in den jeweiligen Farben), gemessen gegen Keramik als Referenz. Während die drei Materialproben im sichtbaren Spektralbereich sehr unterschiedlich (farbig) sind, unterscheiden sich die Infrarotspektren nur gering. Diese sind also ein Indikator für das Material, nicht für dessen Farbe.

Ein Vergleich für unterschiedliche Materialien zeigt Abbildung 6. Es wurden mit rostigem Eisen, Holz und Filz, drei Proben mit rauer Oberfläche, verglichen. Eisen zeigt eine weitgehend lineare Zunahme des Signals mit der Wellenlänge mit wenigen schwachen Absorptionsbanden. Eisen hat wie alle Metalle eine hohe Reflektivität über einen großen Spektralbereich. Bei Silber und Aluminium reicht die hohe Reflektivität bis ins Ultraviolett. Bei Eisen ist die Reflektivität im sichtbaren Spektralbereich deutlich verringert. Ursache dafür ist die Rost-Schicht auf der Oberfläche. Längere Wellenlängen werden aber wieder am leitenden Metall unter der Rostschicht reflektiert. Ob die schwachen Absorptionspeaks im Spektrum von der Rostschicht selbst oder von Oberflächenadsorbaten stammen, muss separat untersucht oder recherchiert werden.

Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass das Spektrum der Kombination von Kurzpuls-Weißlichtlaser und Detektoren stark von der Wellenlänge abhängt. Deshalb wurden die Spektren mit Hilfe der rauen Keramik-Probe normiert, also ein Weiß-Abgleich durchgeführt.

Es gibt mehrere Absorptionsbanden, die in unterschiedlicher relativer Stärke als Minima der Reflexionsspektren sowohl von Holz als auch Filz auftreten (siehe Abbildung 6). Die Absorptionsbanden bei 1,2 μm , 1,45 μm und 1,95 μm in Holz sind dabei vermutlich auf Wasser zurückzuführen. Diese Banden sind allerdings nur bedingt für die Unterscheidung von organischen und anorganischen Materialien geeignet, weil auch ein Wasserfilm auf einer anorganischen Oberfläche zu diesen Absorptionslinien führen kann. Entsprechende Untersuchungen mit feuchten Proben im Labor wurden durchgeführt (siehe AP 3.2). Unabhängig davon zeigen aber die Spektren von Holz und Filz im mittleren Infrarot große Unterschiede auf.

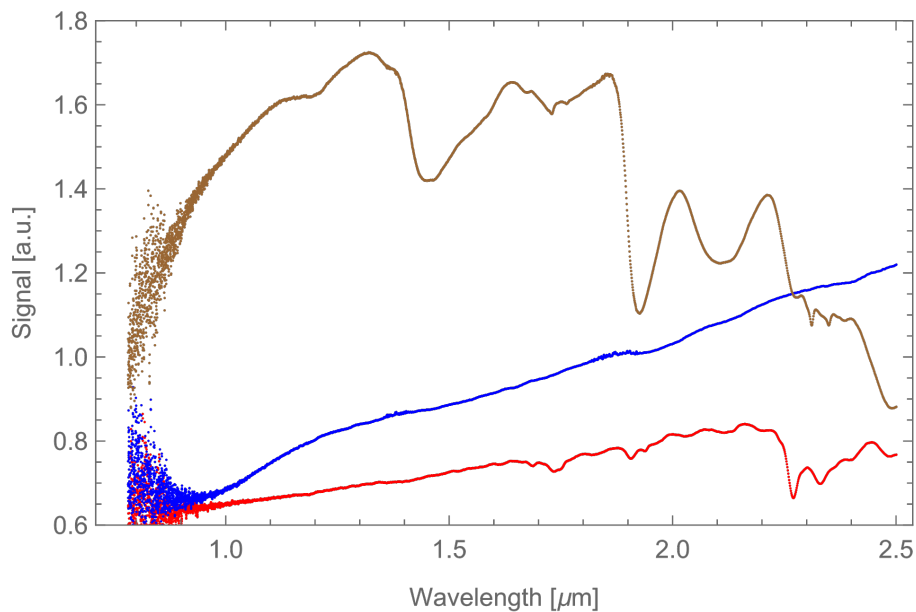


Abbildung 6: Infrarot-Reflexionsspektren von Filz (rote Kurve), rostigem Metall (Probe 5, blaue Kurve) und Holz (Probe 6, braune Kurve), alles gegen Keramik als Referenz. Die spektralen Unterschiede („Fingerabdrücke“) der Materialien sind deutlich sichtbar. Die Absorptionsbanden bei 1,2 μm , 1,45 μm und 1,95 μm in Holz sind vermutlich auf Wasser zurückzuführen.

Darüber hinaus wurden unterschiedliche organische und anorganische Materialien mit dem in AP 4.1 beschriebenen experimentellen optischen Basissystem untersucht. Dabei wurde keine signifikante Abhängigkeit der zeitlichen Länge des Echos gemessen. Zeitliche Echos oder ein verzögertes Signal durch Anregung und Rekombination in den Materialien wurden ebenso nicht beobachtet. Das schließt nicht aus, dass bei geeigneter spektraler Filterung ein Fluoreszenzsignal bei einer anderen Wellenlänge als der anregende Laser beobachtet werden könnte. Bei den durchgeführten Messungen wurde diese Signatur aber unabhängig vom Material nicht beobachtet.

Pflanzliche Produkte können, wie in AP 6.1 aufgezeigt, sehr gut im sichtbaren und nahinfraroten Spektralbereich charakterisiert werden. Das aufgezeigte Verfahren basiert auf der Bestimmung des NDVI (engl. Normalized Difference Vegetation Index).

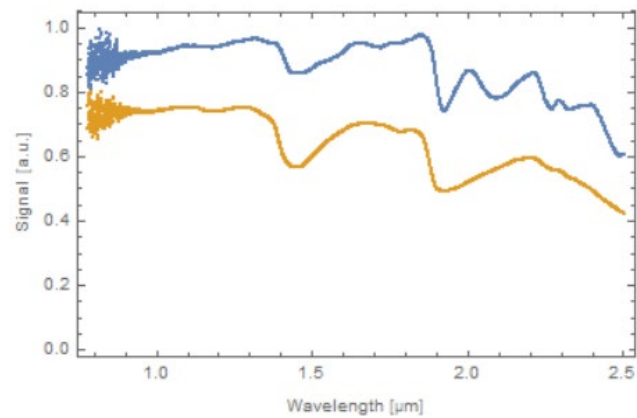
AP 3.2 Umwelttests

Für Messungen im frei zugänglichen Außenbereich ist die Lasersicherheit zu garantieren. Das verwendete System ist für den Laborbetrieb ausgelegt, der Umbau auf eine mobile Plattform und die Implementierung von Detektoren zur Überwachung der Lasersicherheit hätte einen im Projekt nicht darstellbaren Aufwand bedeutet. Deshalb wurden alle Messungen im Labor durchgeführt. Nur die spektroskopisch untersuchten Materialien stammen aus dem Umfeld eines Bahnkörpers, um reale spektrale Signaturen zu generieren.

Im Labor wurden mit dem Infrarot-Reflexionsmikroskop (siehe AP 3.1) sowohl trockene als auch mit Wasser befeuchtete und durchweichte Proben charakterisiert. In Abbildung 7 sind beispielhaft die spektralen Kennlinien für trockenes und feuchtes Holz im SWIR-Spektralbereich aufgezeigt.



a)



b)

Abbildung 7: Untersuchung des Einflusses von Wasser auf das Infrarot-Reflexionsspektrum von Holz, a) befeuchtete Holzprobe und b) zugehörige, gemessene Kennlinien im SWIR-Spektralbereich.

Besonders bei den größeren Wellenlängen ist ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Kennlinien der Holzprobe sichtbar. Die in diesem Arbeitspaket aufgenommenen Datensätze helfen, den Einfluss von Feuchte und damit unterschiedlicher Umweltbedingungen auf die Messergebnisse des hyperspektralen LIDAR-Sensors besser zu verstehen. Die Daten wurden ebenso bei der Entwicklung der Auswertalgorithmen und zum Trainieren der neuronalen Netze in AP 6.1 verwendet.

AP 4 Hyperspektrales optisches Basissystem

AP 4.1 Experimentelles optische Basissystem

Für die Realisierung eines experimentellen optischen Basissystems zur spektralen Charakterisierung eines 2D-Messobjektes wurde ein entsprechender Aufbau auf einer optischen Bank realisiert. Dazu wurden folgende Hauptkomponenten verwendet:

- Weißlichtlasersystem mit akustooptisch durchstimmbaren Filtern (SuperK Compact, RF Driver, SuperK Select, SuperK Connect, optische Faser FD7/FD8),
- Scanspiegel (Galvoscaner GVS002, Thorlabs),
- Strahlteiler (BSW29R, Thorlabs),
- Multifunktions-I/O-Gerät (NI-USB 6343) und
- Gitterspektrometer (Andor Shamrock 303i mit Andor Newton DU920P-BEX2-DD).

Als Lichtquelle dient dabei ein Weißlichtlasersystem von NKT Photonics, bei dem über akustooptische durchstimmbare Filter Laserlicht im Wellenlängenbereich von 450 nm – 1.700 nm in optische Fasern eingekoppelt werden kann (siehe Abbildung 8 links). Diese Fasern leiten das Laserlicht mit einer bestimmten Wellenlänge auf die optische Bank, wo es in einem Freistrahl Aufbau für die spektrale Charakterisierung eines 2D-Messobjektes verwendet wird (Abbildung 8 rechts). Der Laser wird dazu zunächst über einen Spiegel durch einen Strahlteiler zu einem Scanspiegel geleitet. Der Scanspiegel lenkt den Laserstrahl unter verschiedenen Winkeln in Richtung Messobjekt ab und erlaubt so eine punktweise Beleuchtung des Messobjektes unter verschiedenen Wellenlängen. Das reflektierte Licht des Messobjektes wird über den Scanspiegel zurück an den Strahlteiler geleitet, wo es erneut in Richtung Eingangsspalt eines Gitterspektrometers

reflektiert wird (blaue Linie in Abbildung 8). Mit Hilfe des Spektrometers kann das reflektierte Licht des Messobjektes nun spektral charakterisiert werden.

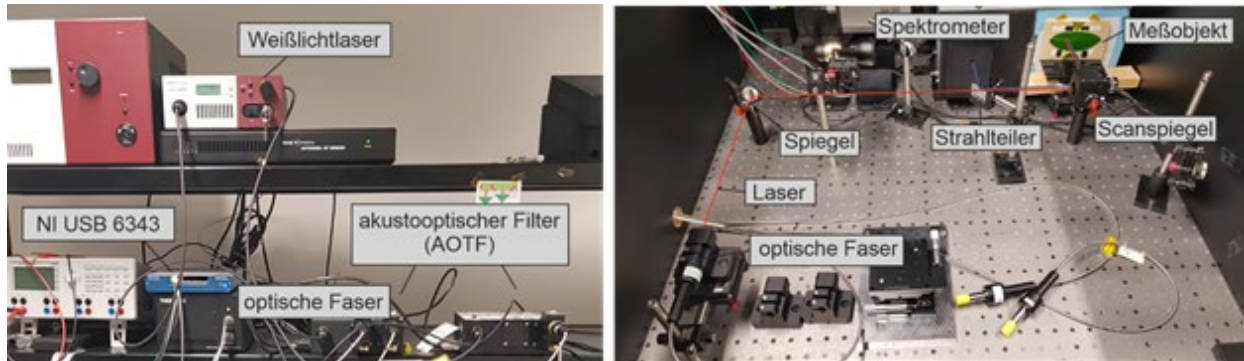


Abbildung 8: Weiβlichtlaser mit akustooptischen durchstimmbaren Filter (links) und optischer Aufbau zur spektralen Charakterisierung eines Messobjektes (rechts).

Für eine automatisierte spektrale Charakterisierung des zweidimensionalen Messobjektes für unterschiedliche Wellenlängen wurde ein entsprechendes LabView-Programm geschrieben. Dabei wird zunächst über ein Multifunktions-I/O-Gerät eine Spannung am Scanspiegel eingestellt, um die gewünschte Ablenkung des Lasers zu erreichen. Anschließend erfolgt das Einstellen einer definierten Wellenlänge sowie die Emission des Lasers. Nach einer kurzen Pause von wenigen Millisekunden wird über das Multifunktions-I/O-Gerät ein Triggerimpuls an das Spektrometer gesendet, wodurch ein Spektrum des entsprechenden Datenpunktes aufgenommen wird. Nachdem das Messobjekt zeilenweise komplett gescannt wurde, erfolgt der Export der Spektrenserie in ein Messdatenfile (Beispiel siehe Abbildung 9). Dabei befindet sich in der ersten Spalte die Wellenlänge und in der zweiten Spalte die Anzahl der Photonen, welche innerhalb der Mittelungszeit bei der entsprechenden Wellenlänge detektiert wurden. Beide Werte sind mit Tabulator voneinander getrennt. Die einzelnen Spektren der Spektrenserie werden fortlaufend untereinander in das Messdatenfile geschrieben.

629,1676	476
629,44415	482
629,72076	481
629,99731	483
630,27386	476
630,55048	480
630,82703	491
631,10358	476
631,38013	474
631,65674	482
631,93329	486
632,20984	486
632,48639	486
632,76294	495
633,03943	499
633,31598	517
633,59253	525
633,86908	523
634,14557	526

Abbildung 9: Ausschnitt eines Messdatenfiles mit Wellenlänge und Anzahl der detektierten Photonen.

Das erarbeitete experimentelle optische Basissystem ist flexibel einsetzbar. Der Öffnungswinkel und damit der abgetastete Bildbereich im Fernfeld wird über den Auslenkwinkel des Galvoscaners eingestellt. Die Bildauflösung kann über die Schrittweite des Scanners angepasst werden. In Abhängigkeit vom Divergenzwinkel des Lasers kann so immer die optimale Konfiguration eingestellt werden. Über entsprechend intelligente Algorithmen ist damit auch eine lokale Auflösungs-erhöhung bei wichtigen Bildobjekten realisierbar. Das optische Basissystem erlaubt darüber hinaus eine adaptive Regelung der Laserleistung in Abhängigkeit von der Objektentfernung und der Objektreflektivität, wobei die Grenzwerte für die Augensicherheit beachtet werden müssen.

AP 6 Algorithmen und Daten

AP 6.1 Algorithmen zur Materialidentifikation

In AP 3 wurden Experimente zur Unterscheidung von verschiedenen Materialien durchgeführt. Dabei ist eine Sammlung von zahlreichen Materialproben entstanden, wie sie auch im Bahn-umfeld angetroffen werden können (z. B. Eisen, Holz, Gestein, Textilien und Pflanzen). Mit einem Reflexionsspektrometer wurden von diesen Proben Spektren im nahen Infrarot zwischen 900 nm und 2.500 nm Wellenlänge aufgenommen. Wie weiterhin in AP 3 dargestellt, lassen sich die einzelnen Materialien und Materialgruppen mehr oder weniger deutlich aufgrund dieser Reflexionspektren unterscheiden. Die Herausforderung bestand nun darin, die Unterscheidung oder sogar Erkennung dieser Materialien mit mathematischen Algorithmen zu automatisieren.

Entsprechende mathematische Methoden lassen sich vor allem im Wissensgebiet der Chemometrie finden. Sie umfassen statistische Verfahren der multivariaten Datenanalyse und können strukturentdeckend oder strukturprüfend sein. Zu den strukturentdeckenden Verfahren zählen beispielsweise die Hauptkomponenten- oder die Clusteranalyse, zu den strukturprüfenden die Regressionsanalyse oder künstliche neuronale Netze.

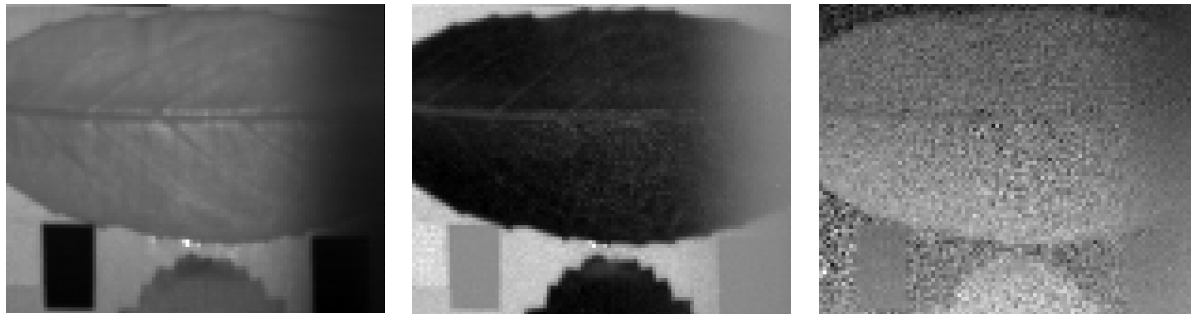
Die beschriebenen Verfahren lassen sich nicht nur auf Einzelspektren anwenden, sondern können genauso bei der Auswertung von multi- oder hyperspektralen Bilddaten eingesetzt werden, wie sie im beschriebenen Versuchsaufbau des AP 4.1 entstehen. Eine visuelle Einschätzung der stofflichen Zusammensetzung eines Messobjektes kann durch Verfahren der chemischen Bildgebung vorgenommen werden. Im einfachsten Fall wird dem spektralen Datenwürfel eine bestimmte Farbskala zugeordnet, vergleichbar den Farbbildern im sichtbaren Spektralbereich. Am Beispiel des Messobjektes aus Abbildung 17 kann das eine einfache rot/grün/blau Farbskala sein. Das Ergebnis ist in Abbildung 10 dargestellt.



Abbildung 10: Chemische Bildgebung des Messobjektes „Vegetation“ unter Anwendung einer rot/grün/blauen Farbskala auf ein nahinfrarotes Multispektralbild (aufgenommen mit dem experimentellen optischen Basissystem).

Die Farben im Bild entsprechen dabei nicht den natürlichen Farben des Messobjektes, sondern seiner Materialzusammensetzung. Oft lässt sich bereits anhand dieser Farbbilder ein guter Eindruck über die Zusammensetzung der Probe gewinnen.

Eine andere Analysemöglichkeit bietet die Hauptkomponentenanalyse (engl. Principal Components Analysis, PCA). Durch Hauptachsentransformation lassen sich die Daten dekorrelieren und einzeln oder in Clustern darstellen. Im gewählten Beispiel lassen sich vorrangig drei Hauptkomponenten unterscheiden: Blatt, Hintergrund und schwarze Markierung. Die weiße Markierung ist in diesem Fall dem Hintergrund zu ähnlich. Das Ergebnis der Hauptkomponentenanalyse ist in Abbildung 11 aufgezeigt.



PC 1

PC 2

PC 3

Abbildung 11: Hauptkomponentenanalyse des Messobjektes „Vegetation“.

In Abbildung 12 ist eine weitere Analyse­methode dargestellt. Bei dieser werden relevante Spektren ausgewählt und anschließend alle Bildpunkte mit gleichem oder sehr ähnlichem Spektrum markiert. Im Beispiel entsprechen die hellen Bildpunkte einer guten Übereinstimmung mit dem Referenzspektrum.



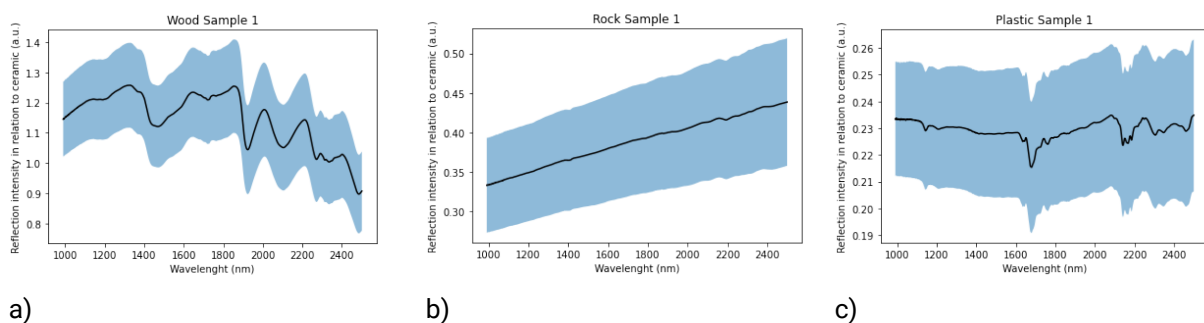
Spektrum 1

Spektrum 2

Spektrum 3

Abbildung 12: Spektralvergleichsanalyse des Messobjektes „Vegetation“.

Die beschriebenen Algorithmen helfen, die Materialzusammensetzung eines Messobjektes zu erkennen und durch Anwendung einer Farbskala sichtbar zu machen. Das ist eine wirksame und anschauliche Methode. Wird das PCA-Verfahren nun auf die in AP 3.1 erstellte Materialdatenbank angewendet, so ergeben sich folgende ausgewählte Ergebnisse. In Abbildung 13 sind die Infrarot-Reflexionsspektren von jeweils 100 Einzelmessungen an verschiedenen Messpunkten jeweils einer Holz-, einer Gesteins- und einer Kunststoffprobe abgebildet.



a)

b)

c)

Abbildung 13: Infrarot-Reflexionsspektren von jeweils 100 Einzelmessungen gemessen an verschiedenen Messpunkten einer a) Holzprobe, einer b) Gesteinsprobe und einer c) Kunststoffprobe. Die schwarzen Kurven repräsentieren den Mittelwert der zugehörigen Einzelspektren.

Die Spektren der drei Materialproben unterscheiden sich deutlich in Verlauf und Details. Diese subjektive, visuelle Einschätzung wird durch die PCA unterstützt. Das Ergebnis ist in Abbildung 14 dargestellt.

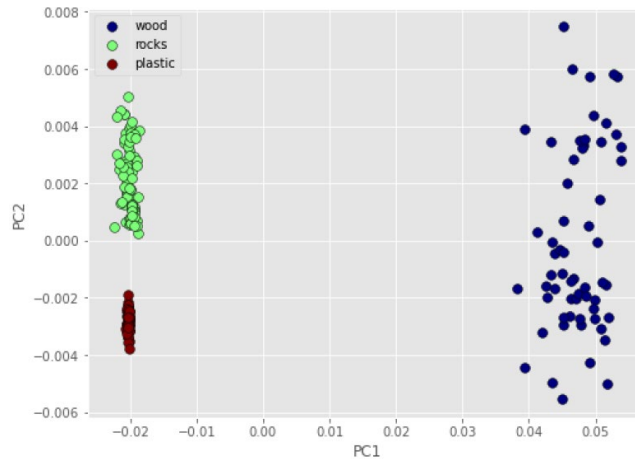


Abbildung 14: Ergebnis der PCA für die Infrarot-Reflexionsspektren von Holz, Gestein und Kunststoff.

Die Unterscheidung ist anhand der ersten beiden Hauptkomponenten (engl. Principal Components, PC) möglich. Die Daten gruppieren sich in drei gut unterscheidbaren Bereichen. Besteht eine größere Ähnlichkeit in den Messdaten, vermischen sich diese Bereiche. Dies begrenzt die Anwendbarkeit der PCA. Des Weiteren hängt das Ergebnis stark vom Signal-zu-Rausch-Verhältnis der Daten und von der Datenvorverarbeitung, wie z. B. einer Normierung, ab.

Sollen darüber hinaus die im Messobjekt enthaltenen Materialien auch identifizierbar sein, so müssen strukturprüfende Verfahren eingesetzt werden. In diesem Arbeitspaket wurde dazu die Anwendung von ausgewählten Verfahren des maschinellen Lernens (Support Vector Machine SVM, Random Forest) untersucht. Diese Algorithmen wurden mit der in AP 3.1 erstellten Materialdatenbank trainiert. Besonders für das Training und die Verifikation ist eine größere Menge an Einzelspektren eines jeden Materials (im Projekt wurden 100 Spektren verwendet) notwendig. Sowohl das SVM als auch das Random-Forest-Verfahren lieferten eine gute Klassifizierungsgenauigkeit. In Abbildung 15 ist die Wahrheitsmatrix (engl. Confusion Matrix) beispielhaft für die drei Materialien Holz, Gestein und Kunststoff aufgezeigt.

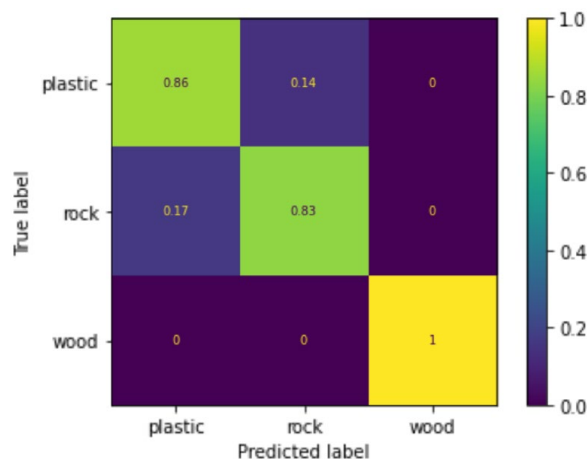


Abbildung 15: Wahrheitsmatrix (engl. Confusion Matrix) als Ergebnis des Random-Forest-Klassifikationsverfahrens.

Eine äußerst datensparsame Möglichkeit der Analyse von spektralen Bilddaten ist die Berechnung von bestimmten Indizes aus den Verhältnissen einzelner Spektrallinien. Ein Beispiel dafür ist der Vegetationsindex NDVI (engl. Normalized Difference Vegetation Index). Dieser kann für die Bestimmung der Vegetationsdichte und -gesundheit angewendet werden und ist ein wichtiger Indikator in der modernen Landwirtschaft.

Die gezeigten Analyseverfahren (chemische Bildgebung, Spektrenvergleich, PCA, SVM, Random Forest) eignen sich gut für die Datenverarbeitung und die Datenreduktion in unmittelbarer Nähe

des hyperspektralen LIDAR-Sensors (Edge Computing). Andererseits haben cloudbasierte Ansätze ebenfalls einige Vorteile, insbesondere wenn die Klassifizierungsmöglichkeiten des Sensorsystems über die Einsatzdauer stetig verbessert werden sollen (z. B. durch eine Steigerung der Sensitivität und/oder Selektivität). Die Schwierigkeit liegt in den riesigen Datenmengen, welche Hyperspektralkameras oder hyperspektrale LIDAR-Sensoren pro Zeiteinheit erzeugen. Es muss also zukünftig ein Kompromiss gefunden werden zwischen dem Detailgrad der übertragenen Daten und dem Datenvolumen. Im Projekt wurden verschiedene Datenreduktionsverfahren untersucht. Bei einem hyperspektralen LIDAR-Sensor wirkt sich vor allem die spektrale Auflösung stark auf das Datenvolumen aus. Verringert werden kann diese durch eine gezielte Auswahl von für die Anwendung besonders relevanter Spektrallinien oder Spektralbereiche sowie über das Zusammenfassen (Binning) von benachbarten Spektrallinien. Darüber hinaus können Komprimierungsverfahren und Übertragungsprotokolle das Datenvolumen reduzieren.

AP 7 Labor- und Feldversuche

AP 7.1 Durchführung von Laborversuchen

Mit Messaufbau (AP 4.1) und Algorithmen (AP 6.1) wurden in diesem Arbeitspaket verschiedene Versuche durchgeführt, um die Funktionsweise und Leistungsfähigkeit zu ermitteln. Aufgrund der großen Datenmengen musste die in AP 4.1 vorgestellte Messdatendatei automatisiert ausgewertet werden. Dazu wurde mit der Software Mathematica von Wolfram Research ein Auswerteskript erstellt. Die vom Messaufbau erzeugten Messdatendateien bestehen pro Messpunkt und Emissionswellenlänge aus einem Spektrum mit 1.024 Datenpunkten. Das Skript führt zunächst eine Nulllinienkorrektur durch und bestimmt anschließend die Intensität der Messung durch Integration dieses Spektrums. Es entsteht ein mehrdimensionaler, spektraler Datenwürfel aus den Wellenlängen und den Raumkoordinaten der Messpunkte. Die Messdaten werden hinsichtlich der wellenlängenabhängigen Intensität des Weißlichtlasers korrigiert, ein Weißlichtabgleich sowie die Skalierung der Messdaten durchgeführt.

Als beispielhaftes Messobjekt wurde eine farbige Pixelgrafik genutzt und im sichtbaren Spektralbereich vermessen. Der sichtbare Spektralbereich bietet den Vorteil der einfachen, visuellen Überprüfung des Messergebnisses. Das Messobjekt wurde mit einer Auflösung von 41 x 41 Bildpunkten mit 17 verschiedenen Wellenlängen im Spektralbereich von 460 nm bis 650 nm vermessen. Die Farbdarstellung wurde mit einem rot/grün/blauem Farbschema erzeugt, welches mit fünf ausgewählten Spektrallinien abgeglichen wurde. Abbildung 16 zeigt Messobjekt und Messergebnis mit einer bereits guten Übereinstimmung der Farbdarstellung.

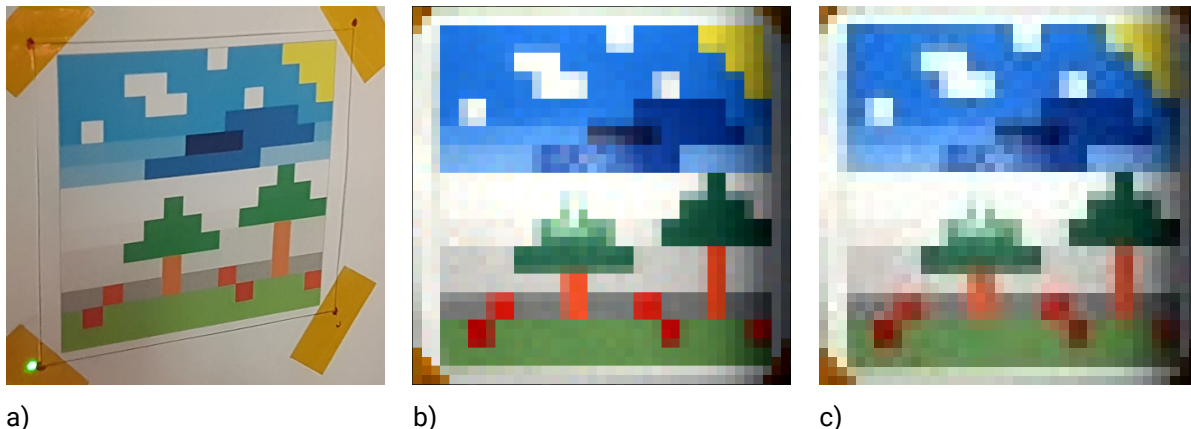


Abbildung 16: a) Messobjekt „Pixel Art“-Grafik mit Laserpunkt, b) Messergebnis im sichtbaren Spektralbereich (41 x 41 Pixel, 460 bis 650 nm, 17 Spektren) und c) Nachbearbeitung von Bild b) unter Hinzufügen einer Bildunschärfe.

Messungen im infraroten Spektralbereich wurden zunächst bis 900 nm Wellenlänge durchgeführt. Als Messobjekte dienten verschiedene gesunde, vertrocknete oder kranke Blätter, die auf

Holztafeln angebracht wurden. Die Tafeln waren weiterhin mit weißen und schwarzen Markierungen zum Helligkeitsabgleich ausgestattet. Abbildung 17 zeigt Messobjekt und Messergebnis einer Messung mit 101 x 85 Bildpunkten und 21 Wellenlängen im Spektralbereich von 640 nm bis 900 nm. Die Farbdarstellung wurde auf der Grundlage des NDVI berechnet. Das bedeutet, dass photosyntheseaktive Bildbereiche grün dargestellt werden. Dies kann auf eine hohe Reflektivität des Mesophylls ab 750 nm zurückgeführt werden.

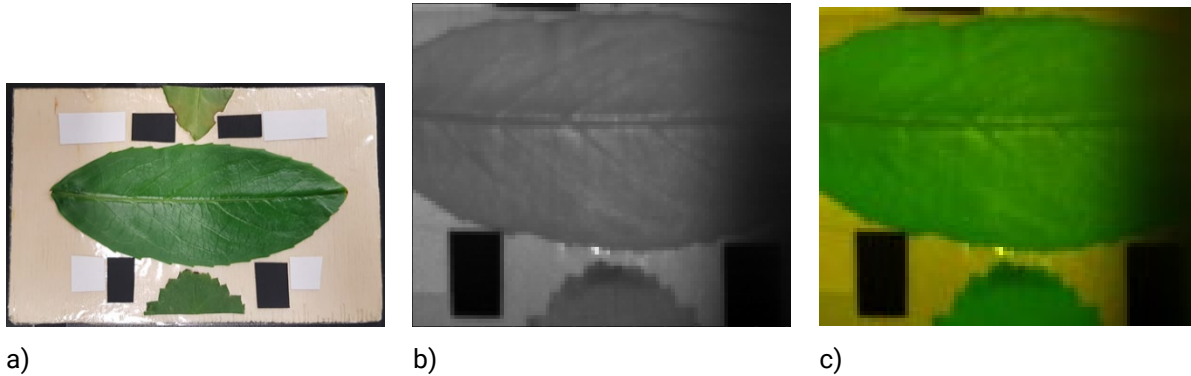


Abbildung 17: a) Messobjekt „Vegetation“ mit Markierungen zum Weiß- und Schwarzabgleich, b) Messergebnis im nahen IR-Spektralbereich (101 x 85 Pixel, 640 bis 900 nm, 21 Spektren) und c) Auswertung der Spektralinformationen im Bild und Hinzufügen einer Bildunschärfe.

Nachdem die Funktionsweise im VIS- und NIR-Spektralbereich nachgewiesen werden konnte, wurde der Messaufbau bis in das SWIR erweitert. Über die Messergebnisse wurde im Schlussbericht des Fraunhofer ENAS im Zusammenhang mit der ToF-Messung ausführlich berichtet.

Für die Laborversuche wurde, wie in AP 4.1 beschrieben, ein Weißlichtlasersystem mit akustooptischen, durchstimmbaren Filtern der Firma NKT Photonics eingesetzt. Dieses wurde bei allen Messungen mit maximaler Leistung und bei einer maximalen Wiederholrate von 23 kHz betrieben. Für diese Einstellungen kann das Lasersystem die in Abbildung 18 für den VIS-Spektralbereich dargestellte Leistung emittieren.

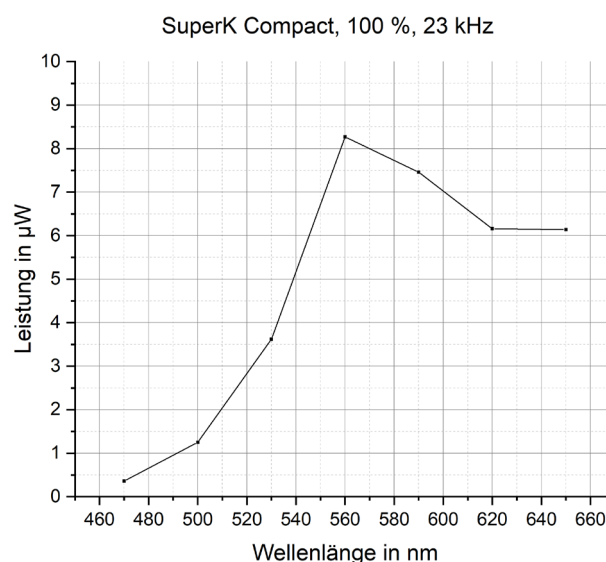


Abbildung 18: gemessene Laserleistung des Weißlichtlasers SuperK Compact bei maximaler Leistung und einer Pulsfrequenz von 23 kHz.

Laserstrahlung hat für den Einsatz in Sensorsystemen viele vorteilhafte Eigenschaften. Dazu zählen eine sehr hohe Monochromasie, Kohärenz, eine starke Strahlenbündelung und eine hohe

Strahlungsdichte. Entfernungsmessende und bildgebende Verfahren, wie der im Projekt untersuchte hyperspektrale LIDAR-Sensor, können dadurch Reichweiten von einigen hundert Metern erreichen. Zu beachten ist in jedem Fall die Lasersicherheit, da bei entsprechender Laserleistung erhebliche und schwerwiegende Schädigungen von Augen und Haut entstehen können. Beim Einsatz von Lasern sind aus diesem Grund umfangreiche rechtliche Vorschriften zu beachten und Schutzmaßnahmen vorzusehen. Die nutzbare Laserleistung und damit die maximal messbare Entfernung sind in der praktischen Anwendung aufgrund dessen begrenzt. Möglichkeiten zur Optimierung bieten die Gestaltung des optischen Systems und die Empfindlichkeit des Detektors. Ein weiterer wichtiger technischer Parameter ist das notwendige Zeitfenster zur Aufnahme einer Szene bzw. eines hyperspektralen Datenwürfels. Im Versuchsaufbau wird diese bestimmt durch die Laserleistung, die Empfindlichkeit des Detektors, die Schrittgeschwindigkeit und Einschwingdauer der Galvo-Scanner, die Schaltzeit des akustooptischen Filters und die Geschwindigkeit der Datenverarbeitung. In Anhängigkeit von den Messparametern liegt die Messdauer für einen hyperspektralen Datenwürfel daher im Bereich mehrerer Minuten bis zu mehreren Stunden, bei hoher lateraler und spektraler Bildauflösung.

Eine Steigerung des Technologie-Reifegrades von der Stufe des Versuchsaufbaus zum Prototyp muss daher die Optimierung der benannten Punkte beinhalten. Dies war nicht Ziel des Projektes. Der geschaffene Versuchsaufbau bietet allerdings optimale Bedingungen für entsprechende Versuche und die schrittweise Weiterentwicklung des hyperspektralen LIDAR-Sensors. Ab TRL 5 (Versuchsaufbau in Einsatzumgebung) muss darüber hinaus die Störsicherheit von elektrooptischen Systemen und der Elektronik betrachtet werden. Dazu kann eine FMEA (engl. Failure Mode and Effects Analysis) durchgeführt werden. In die Betrachtung einfließen können beispielsweise EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit), Vibrationen, Stöße, Temperatur und Luftfeuchte.

AP 8 Technologiesteuerung und -bewertung

AP 8.1 System- und Technologiekonzept für eine Miniaturisierung des hyperspektralen LIDAR-Sensors

Im Zuge des AP 8 und aufbauend auf der Literaturrecherche aus der Antragstellung wurde der Stand der Technik und die Schutzrechtssituation weiter ausgearbeitet.

In den Bereichen

- Kamerasensoren,
- Radarsensoren und
- LIDAR-Sensoren (mechanisch, Solid-State [MEMS, OPA], Flash-LIDAR, multi-spektral)

wurden die Veröffentlichungen recherchiert. Zur Miniaturisierung des hyperspektralen LIDAR-Sensors sind mehrere Systemkonzepte möglich. Einige sind praxisnäher, andere wiederum benötigen noch Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten.

Zu den konservativen, praxisnahen Ansätzen zählt der Einsatz von Mikrospiegeln und der Verzicht auf den Weißlichtlaser. In diesem Ansatz kommen mehrere parallel arbeitende Laserdioden und Detektoren für die einzelnen relevanten Wellenlängen zum Einsatz. Ein solches System ist mit derzeitigen Komponenten realisierbar, wenngleich die Integration aller Komponenten sowie die erforderliche performante Datenverarbeitung einen erheblichen Entwicklungsaufwand bedeuten. Ebenso vorstellbar ist der Einsatz der Flash-LIDAR-Technologie zusammen mit einer multispektralen Lichtquelle, welche ebenso aus mehreren Diodenlasern bestehen kann. Dies ist aktuell der bevorzugte Miniaturisierungsansatz der Konsortialpartner. Ein entsprechendes System wäre kompakt und ohne bewegliche Teile. Besonders im infraroten Spektralbereich gibt es jedoch Forschungsbedarf in Bezug auf APD-Arrays mit der benötigten Auflösung und Miniaturisierungsgrad.

Hochinnovative Zukunftsthemen sind LIDAR-PICs (engl. Photonic Integrated Circuits), welche FMCW (engl. Frequency Modulated Continuous Wave) Konzepte einsetzen oder OPA (engl. Optical Phased Arrays) integrieren. Hier ist eine vollständige Integration von Emittlern, Detektoren und optischen, auf Wellenleitern basierten, Schaltkreisen vorstellbar. Dies würde zu den kleinsten und robustesten derzeit vorstellbaren Systemen führen – ein Ansatz, der jedoch erheblichen Forschungs- und Entwicklungsbedarf mit sich bringt. PICs könnten helfen die aktuellen Grenzen der Miniaturisierung zu überwinden.²

AP 8.2 Patentanalyse und Patentierung

Zusätzlich zu den bekannten Patenten wurden im Projekt Recherchen zu MEMS-LIDAR-Sensoren durchgeführt, d. h. mit MEMS-Komponenten zur optischen Strahlableitung. Aus ca. 100 gefundenen Schriften konnten 10 wichtige Patente herausgefiltert werden. Darüber hinaus wurde die Recherche zum Stand der Technik aktualisiert und insbesondere nach neuen Aktivitäten zu multispektralen und hyperspektralen LIDAR-Sensoren gesucht. Es konnten 7 relevante Patentschriften identifiziert werden. Davon sind 2 Schriften besonders wichtig, da diese von Unternehmen aus dem LIDAR-Bereich eingereicht wurden.

AP 8.3 Workshop zum Thema „hyperspektraler LIDAR-Sensor“

Wie in AP 2.1 berichtet, wurde im Oktober 2022 ein Workshop zum Thema „Mobilität der Zukunft – autonome/automatisierte Schienenfahrzeuge“ organisiert und durchgeführt. Der Workshop lieferte wesentliche Informationen zur Durchführung der Nachfrageanalyse und zur Verwertung der Projektergebnisse. Darüber hinaus wurden zur Anbahnung von Folgeprojekten Gespräche zur Flash-LIDAR-Technologie geführt und dabei ebenfalls ein multispektraler Ansatz diskutiert. Die angesprochenen Firmen fanden den Ansatz interessant und es wird derzeit davon ausgegangen, dass daraus ein Folgeprojekt entstehen kann.

AP 9 Validierung

In diesem Arbeitspaket wurden die Ergebnisse aus AP 6 (Algorithmen und Daten) und AP 7 (Labor- und Feldversuche) zusammengeführt und mit den Ergebnissen aus AP 1 (Konzept und Spezifikation) und AP 2 (Nachfrageanalyse und Technologieprognose) validiert. Anschließend wurden die Ergebnisse aus AP 8 (Technologiesteuerung und -bewertung) hinzugenommen und ein abschließendes Konzept für das miniaturisierte Sensorsystem festgelegt. Anhand der Arbeiten in AP 2 und AP 8 wurde eine Prognose über die Verwertung der Projektergebnisse erstellt. Der Arbeitsaufwand war in diesem Arbeitspaket gleichmäßig auf die Projektpartner TU Chemnitz und Fraunhofer ENAS verteilt. Die Ergebnisse wurden ausführlich im Schlussbericht des Fraunhofer ENAS dargestellt, da die abschließenden Laborversuche mit dem anwendungsorientierten optischen Basissystem durchgeführt wurden.

Der erste Arbeitsschwerpunkt der TU Chemnitz lag in der Entwicklung und Demonstration von Verfahren zur Identifikation anwendungsrelevanter Materialien anhand ihres Reflexionsspektrums. Dies umfasste die Erarbeitung eines für unterschiedliche Experimente konfigurierbaren optischen Basissystems und die Durchführung von zahlreichen Laborversuchen. Es konnte gezeigt werden, dass Materialien, wie sie im Umfeld der Bahn typischerweise vorhanden sind, anhand ihres spektralen Fingerabdruckes aus gemessenen Laser-Reflexionsspektren unterschieden werden können. Darüber hinaus wurde mit der laserbasierten, spektralen Bildgebung im sichtbaren und nahinfraroten Spektralbereich experimentiert. Eine interessante Anwendung für die Bestimmung des NDVI liegt beispielsweise in der Landwirtschaft.

Der zweite Arbeitsschwerpunkt der TU Chemnitz lag in der Durchführung einer Nachfrageanalyse und Technologieprognose für hyperspektrale LIDAR-Sensoren. Dies umfasste die Durchführung

² https://picmagazine.net/article/115025/Samsung_progresses_in_developing_PICs_for_LiDAR

eines Anwenderworkshops und die Erarbeitung eines miniaturisierten Systemkonzeptes. Dazu wurden Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette recherchiert, mit einer Auswahl dieser Unternehmen wurde der Workshop „Mobilität der Zukunft – autonome/automatisierte Schienenfahrzeuge“ durchgeführt. Die Kenntnisse der Projektpartner zum Stand der Technik wurden durch eine Literatur- und Patentrecherche aktualisiert. Seit Projektbeginn haben die weltweiten Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich der spektralen LIDAR-Sensoren zugenommen. Von Anwendern wird die Technologie als zukunftsweisend, derzeit aber zu teuer eingeschätzt. Die hohen Kosten werden maßgeblich durch die Anforderungen an Laser, Detektoren und die Elektronik zur Datenverarbeitung verursacht. Diese Tatsache wurde in einem Miniaturisierungskonzept mit stufenweiser Umsetzungsstrategie berücksichtigt.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Projekt wurde an der TU Chemnitz durch die Professur Experimentelle Sensorik und das Zentrum für Mikrotechnologien durchgeführt. Die im Rahmen des Projektes entstandenen Ausgaben betragen insgesamt 150.616,12 € (zzgl. Projektpauschale i. H. v. 30.123,22 €). Sie liegen damit 11.038,66 € (ohne Projektpauschale) unter der bewilligten Zuwendung. Die Ausgaben wurden im Wesentlichen für Personalausgaben zur Beschäftigung wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TUC (144.861,03 €) verwendet.

Gegenüber den geplanten Ausgaben wurden 2.906,25 € mehr Personalausgaben (Pos. 0812) benötigt, die aber im Wesentlichen durch Einsparungen bei den Dienstreisen (Pos. 0846, 2.226,80 €) ausgeglichen wurden. Dienstreisen wurden u. a. bedingt durch die Corona-Pandemie und durch die sich ergebenden digitalen Möglichkeiten zum Austausch eingespart.

Zudem wurden die im Projekt vorgesehenen Umwelttests (siehe AP 3.2) und die in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ENAS geplanten Feldversuche (siehe AP 7) durch weitere Laborversuche ersetzt. Zum einen konnte ohne erheblichen Mehraufwand die Lasersicherheit im Außenbereich nicht garantiert werden. Zum anderen hätte der Schutz des elektrooptischen Basissystems und der wertvollen Laborgeräte vor Schmutzpartikeln und Feuchte nicht mit angemessenem finanziellem und personellem Aufwand durchgeführt werden können. Das Risiko für die Labortechnik wurde als zu hoch eingeschätzt. Die Versuche wurden daher im Labor mit Materialien aus dem Umfeld der Bahn in gleichwertiger Weise durchgeführt. Die Gelder für die entsprechenden Dienstreisen wurden daher eingespart.

Ebenso konnten Dienstreisen zu Firmen in der Region eingespart werden. Sowohl die Organisation und Anbahnung als auch die Durchführung des Workshops wurden online durchgeführt. Dies wurde von den teilnehmenden Firmen als sehr positiv und effizient angesehen.

Zudem waren gegenüber der Planung bei Antragstellung weniger Ausgaben für die Beschaffung von optomechanischen Komponenten und optischen Bauelementen erforderlich (Pos. 0843, Einsparung in Höhe von 11.718,11 €). Im Projekt konnten mehr vorhandene Geräte und Optiken genutzt werden als ursprünglich in der Planungsphase erwartet worden war.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die durchgeführten Arbeiten sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen. Sie entsprechen im Wesentlichen der im Projektantrag dargelegten Planung und den im Arbeitsplan formulierten Aufgaben. Die durch die TU Chemnitz durchgeführten Arbeiten hätten ohne die bereitgestellte Förderung nicht durchgeführt werden können. Die erzielten Ergebnisse und die bei der Projektbearbeitung gewonnenen Erkenntnisse bieten der TU Chemnitz aufgrund ihrer Relevanz einen unmittelbaren Mehrwert. Darüber hinaus mussten keine zusätzlichen Ressourcen zur Durchführung des Vorhabens aufgewendet werden.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Projekt beschäftigte sich die TU Chemnitz schwerpunktmäßig mit der sicheren Erkennung und Unterscheidung anwendungsrelevanter Materialien aus den Messdaten eines hyperspektralen LIDAR-Sensors sowie mit der Erstellung eines miniaturisierten Systemkonzeptes auf der Grundlage einer Nachfrageanalyse, einer Technologieprognose und eines Anwenderworkshops. Es wurde ein optischer Experimentieraufbau erarbeitet, Versuche mit verschiedenen Konfigurationen, Materialien und Messparametern wurden durchgeführt. Ausgewählte Algorithmen für die edge- und cloudbasierte Datenauswertung wurden untersucht.

Die erarbeiteten Projektergebnisse sind von hohem Nutzen für die TU Chemnitz und insgesamt von großer praktischer Verwertbarkeit. Sie stärken die wissenschaftliche Kompetenz in den Bereichen Optik, Spektroskopie sowie Mikro- und Nanotechnologien. Die untersuchten Methoden und Verfahren helfen, die Detektion und Bewertung von spektralen Informationen aus den Messdaten eines hyperspektralen LIDAR-Sensors besser zu verstehen und für die Anwendung relevante Messobjekte unter verschiedenen Bedingungen zu erkennen. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse können weiterführende grundlagenorientierte Forschungsprojekte initiiert werden. Insbesondere die Übertragung der Ergebnisse auf miniaturisierte Systemansätze und darauf aufbauend zur Technologieentwicklung spezieller Lasermodule, dem Einsatz von speziellen MEMS-Scannern zur Erfassung der räumlichen Lage und spektralen Charakteristik der Objekte, spezieller spektraler Filtertechnologien oder miniaturisierter Detektortechnologien sind dabei von forschungsseitigem und marktseitigem Interesse. Der Industrie können die Forschungsergebnisse über grundlagenorientierte Auftragsforschung zur Verfügung gestellt werden. Dies ist ein weiteres wichtiges Verwertungspotential für die TU Chemnitz.

Die Forschungsergebnisse der TU Chemnitz fließen zudem in die Ausbildung von Studierenden und Doktoranden ein. Während der Projektlaufzeit wurde ein studentisches Praktikum und eine Bachelorarbeit betreut und erfolgreich abgeschlossen. Zwei weitere Masterarbeiten zum Thema wurden nach Projektabschluss begonnen, um die Projektergebnisse gezielt weiterzuentwickeln. Auch in Vorlesungen und Seminaren können ausgewählte Forschungsergebnisse des Projektes einfließen. Somit trägt dieses Vorhaben unmittelbar dazu bei, hervorragend ausgebildete Fachkräfte in der Region aufzubauen und einen Wissenstransfer in der Region zu sichern.

5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Das Projekt wurde mit einer Laufzeit von 18 Monaten geplant. Hinzu kam eine ungeplante Verlängerung von 4 Monaten aufgrund von Verzögerungen bei der Bearbeitung durch die Corona-Pandemie. Der Zeitplan wurde von allen Projektpartnern als straff aber vorteilhaft für eine nachfolgende, schnelle Verwertung eingeschätzt. Wesentliche Projektergebnisse standen erst gegen Ende der Bearbeitungszeit zur Verfügung. Eine Veröffentlichung während der Projektlaufzeit war dadurch nicht möglich.

Es ist jedoch geplant, die Arbeitsergebnisse nach Abschluss des Projektes in einer gemeinsamen Veröffentlichung von TU Chemnitz und Fraunhofer ENAS in einem Journal oder auf einer Fachkonferenz (z. B. SPIE Photonics Europa oder SPIE Photonics West) vorzustellen.