

## Sachbericht zum Verwendungsnachweis

### Teil I – Kurzbericht

**WIR!-Projekt:** Hyperspektraler LIDAR-Sensor für autonome Schienenfahrzeuge unter Nutzung von Verfahren des maschinellen Lernens;  
**TP 2:** Hyperspektraler LIDAR-Sensor unter Anwendungsbedingungen – optisches Basissystem, Systemelektronik und maschinelles Lernen (FKZ 03WIR1213B)

**Zuwendungs-empfänger:** Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme ENAS

**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.

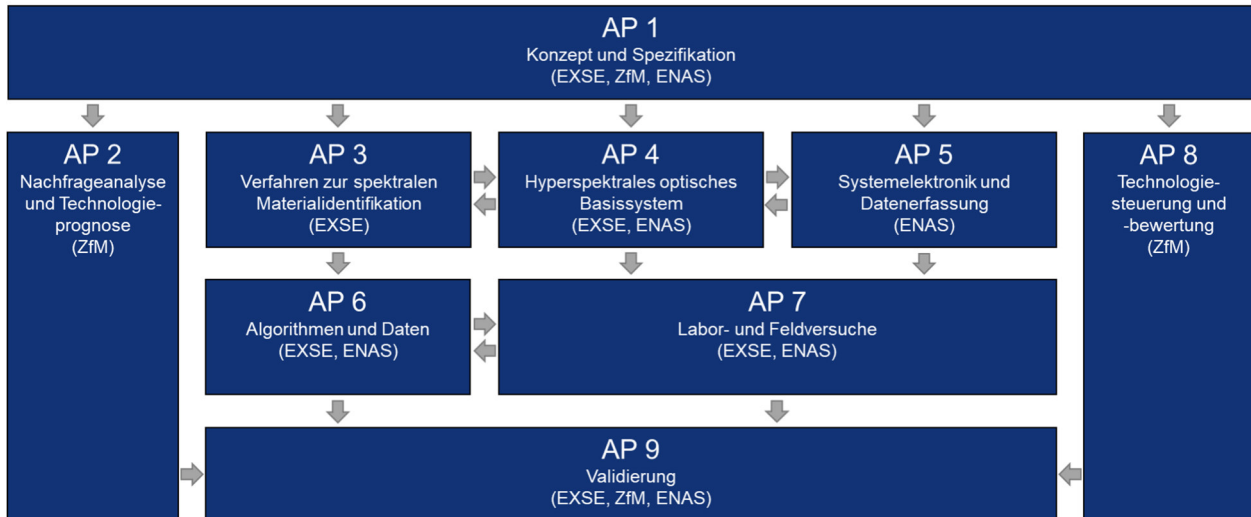


Abbildung 1: Arbeitspakete des Vorhabens

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 Arbeitsschwerpunkt des Fraunhofer ENAS lag in der Entwicklung und Demonstration eines hyperspektralen LIDAR-Sensors im Labormaßstab als Forschungsfunktionsmuster. Dies umfasste die konstruktive Ausführung des optischen Basissystems, der Systemelektronik und der Datenerfassung. Dazu gehörten Algorithmen zur Auswertung der spektralen Messdaten und eine anwendungsspezifische Software zur Ansteuerung der Hardware sowie Erfassung und Verarbeitung der Daten. In zahlreichen Laborversuchen konnte die Funktionsweise des hyperspektralen LIDAR-Sensors nachgewiesen werden.

Die Arbeiten und Versuche orientierten sich an einem dreistufigen Plan. Als erstes wurde ein Aufbau zur Aufnahme von spektralen Reflexionsbildern geschaffen. Dieser bildete die Grundlage für die Messungen der TU Chemnitz zur Entwicklung von Verfahren zur Identifikation anwendungsrelevanter Materialien. Die Aufnahme von spektralen Reflexionsbildern konnte zunächst in zwei Spektralbereichen (VIS und NIR) im Wellenlängenbereich von 450 nm bis 1.100 nm gezeigt werden. Im späteren Projektverlauf fand eine Erweiterung um den SWIR-Bereich von 1.100 nm bis 1.600 nm statt. Im zweiten Schritt wurde ein Aufbau zur Durchführung von Laufzeitmessungen mit einer einzelnen Wellenlänge erarbeitet. Es konnte gezeigt werden, dass diese Messungen im VIS- und NIR-Spektralbereich möglich sind. Ein für den SWIR-Bereich erforderliches NIR-SPCM (Single Photon-Counting Module) konnte aufgrund der zu hohen Einkaufskosten nicht beschafft werden. Als Ersatzlösung wurde der InGaAs-Detektor eines Andor-Gitterspektrometers für Spektralmessungen ohne Laufzeitverfahren eingesetzt. Im letzten Schritt des Arbeitsplanes wurde schließlich ein Aufbau zur kombinierten spektralen Laufzeitmessung für alle drei Messbereiche umgesetzt. Eine Spektralmessung im SWIR muss dabei immer mit einer Laufzeitmessung im VIS oder NIR kombiniert werden. Die Aufnahme spektraler Datenwürfel konnte erfolgreich in allen drei Spektralbereichen gezeigt werden.

## Sachbericht zum Verwendungsnachweis

### Teil II – Ausführlicher Bericht

**WIR!-Projekt:** Hyperspektraler LIDAR-Sensor für autonome Schienenfahrzeuge unter Nutzung von Verfahren des maschinellen Lernens;

**TP 2:** Hyperspektraler LIDAR-Sensor unter Anwendungsbedingungen – optisches Basissystem, Systemelektronik und maschinelles Lernen (FKZ 03WIR1213B)

**Zuwendungs-empfänger:** Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme ENAS

**Laufzeit:** 08/2021 – 05/2023

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## 1 Durchgeführte Arbeiten

### **AP 1 Konzept und Spezifikation**

Die Erarbeitung der Parameter des Gesamtsystems und der Anforderungen an die Teilkomponenten erfolgte in enger Abstimmung mit dem Projektpartner TU Chemnitz.

#### ***AP 1.3 Spezifikation des elektrooptischen Systems***

Die Spezifikation der optischen und elektrischen Parameter ergibt sich einerseits aus der Zielsetzung des Projekts, d. h. der Entfernungbestimmung bei gleichzeitiger Unterscheidung von Materialien, andererseits aus den am Markt verfügbaren Komponenten. Essenziell für das Vorhaben sind eine spektral durchstimmbare Kurzpuls-Lichtquelle, empfindliche Detektoren sowie eine Auswerteelektronik, die eine hohe zeitliche Auflösung der Messsignale gewährleistet. Zur Realisierung des LIDAR-Systems stand als Lichtquelle ein Weißlicht-Lasersystem der Firma NKT Photonics zur Verfügung. Das System besteht aus 2 Lasern, wobei der „kleine“ Laser (SuperK Compact, durchstimmbare von 450 nm bis 1.700 nm) für die Messungen verwendet wurde. Zusätzlich konnte der Laser SuperK FIANIUM für Testmessungen genutzt werden. Er ist in der Lage, Lichtpulse mit ca. 10 ps Pulsdauer in einem Spektralbereich von ca. 420 nm bis 2.000 nm zu emittieren. Mit dem Durchstimmen der Wellenlänge ist neben der Entfernungbestimmung mittels Time-of-Flight-Methode (ToF-Methode) auch die Materialcharakterisierung möglich.

Entsprechend der Lichtgeschwindigkeit von rund  $3 \cdot 10^8$  m/s ist mit der zur Verfügung stehenden Pulsdauer eine Auflösung von unter einem Zentimeter in der Entfernungbestimmung möglich. Die Bestimmung der Laufzeit der Laserpulse vom Laser zum Objekt und wieder zurück zum Detektor sollte mittels TCSPC-Unit (TCSPC – Time-Correlated Single Photon Counting) MultiHarp 150 der Firma PicoQuant erfolgen. Diese Elektronik erlaubt in Verbindung mit einem Single-Photon-Counting-Module (SPCM-AQRH-14, Excelitas) eine hochaufgelöste Bestimmung der Pulslaufzeit mit einer maximalen Auflösung von 10 ps. Damit ist eine Entfernungbestimmung mit einer anvisierten Auflösung von 15 cm (entsprechend 1 ns, vgl. Bericht der TU Chemnitz) sehr gut möglich. Um einen Eindruck der wesentlichen Komponenten des Aufbaus zu geben, sind das Lasersystem inkl. elektrooptischer Select-Box zum Einstellen bzw. Filtern der Emissionswellenlänge, die TCSPC-Unit und das Single-Photon-Counting-Modul in Abbildung 1 gezeigt.

Neben den genannten Hauptkomponenten wurden optische und optomechanische Komponenten wie Strahlteiler, Spiegel, Halter usw. entsprechend der Spektralbereiche VIS und NIR ausgewählt und beschafft. Für das Rastern des Objektbereichs ist ein 2D-Galvo-Spiegelscanner (GVS 002, Thorlabs) vorgesehen. Die beiden Spiegel können stufenlos elektrostatisch im Bereich von +/- 20° (Achse 1) bzw. +/- 25° (Achse 2) mit einer Winkelauflösung von bis zu 0.004° und einer Zeitkonstante von 300 µs (Small Angle Step Response) verstellt werden. Damit können die in den Anforderungen definierten Parameter bezüglich Scanbereich und Geschwindigkeit (vgl. Bericht der TU Chemnitz) mit diesem System sehr gut erfüllt werden.

Reflexionsmessungen wurden an verschiedenen Materialien mit dem SuperK Compact und einem Monochromator mit CCD (Andor/Newton) durchgeführt. In der Abbildung 2 sind Reflexionsspektren von verschiedenen Proben dargestellt. Die Daten wurden auf das Laserspektrum normiert. Das ist notwendig, da die Laserintensität über den Wellenlängenbereich nicht konstant ist, sondern deutliche Abhängigkeiten aufweist. Dieser Effekt ist systembedingt, tritt bei beiden Laserquellen auf und muss bei der Auswertung der LIDAR-Signale berücksichtigt werden.

Aus Abbildung 2 ist erkennbar, dass Unterschiede in den Reflexionsspektren messbar sind. Diese Messungen wurden im weiteren Verlauf des Projektes erweitert und verbessert und in Korrelation mit Spektrometernmessungen an einer großen Auswahl an verschiedenen Stoffen (vgl. Bericht TU Chemnitz) mit hoher Relevanz für den Bahnbereich gebracht.

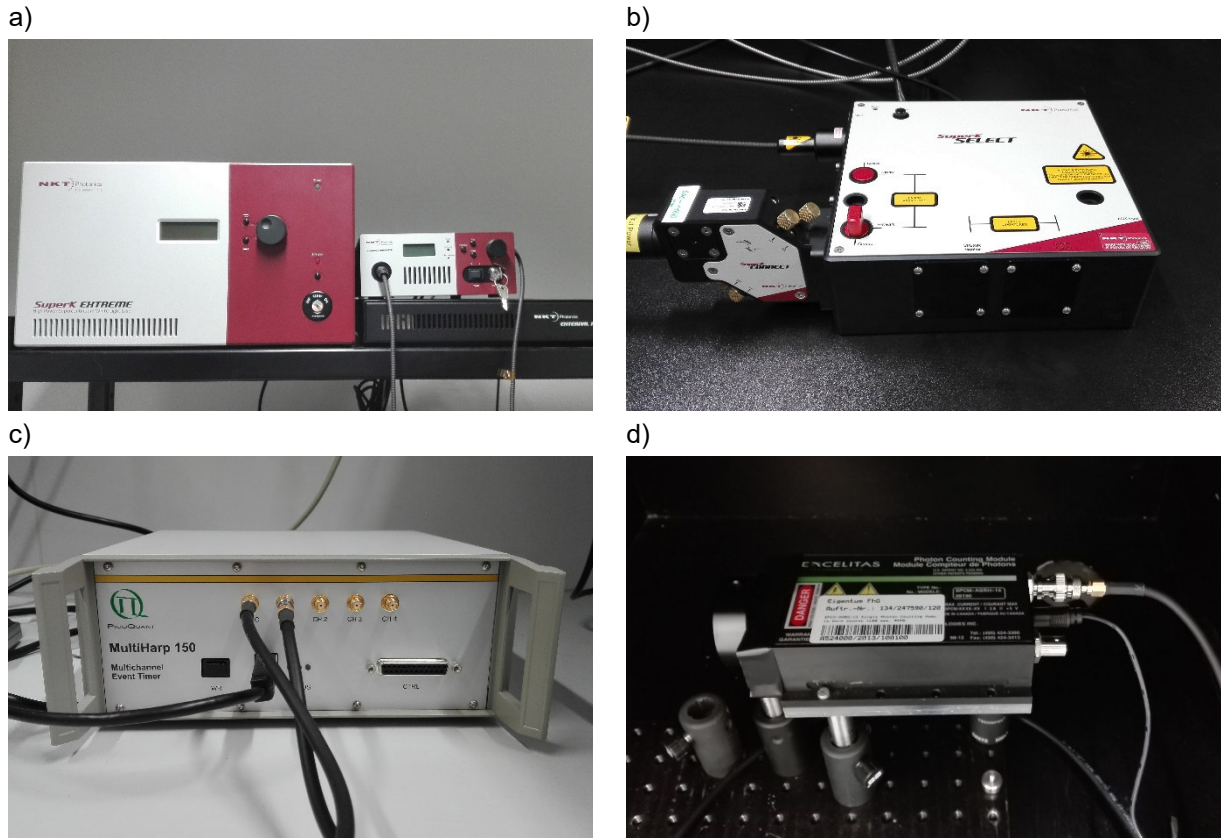


Abbildung 1: a) Kurzpuls-Lasersysteme SuperK Fianium und SuperK Compact, b) Akustooptischer Filter zur Wellenlängenwahl, c) TCSPC-Elektronik MultiHarp 150 und d) Detektor SPCM-AQRH-14.

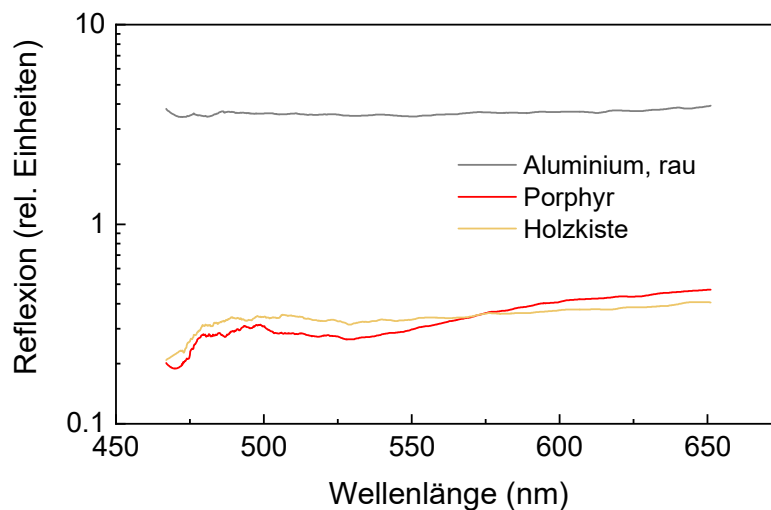


Abbildung 2: Reflexionsspektren von verschiedenen Materialien im sichtbaren Spektralbereich.

Die weiteren Versuche bis zur Realisierung des kompletten spektralen LIDARs wurden entsprechend des folgenden Plans durchgeführt:

### 1. Aufnahme von Reflexionsbildern (spektral)

Mit Hilfe des Galvo-Scanners wurden zunächst Reflexionsbilder, z. B. von verschiedenfarbigen Tafeln aufgenommen. Damit konnte eine erleichterte Korrelation zwischen Bild und realem Objekt erfolgen und eventuelle Abbildungsfehler korrigiert werden. Diese Messungen wurden



anschließend auf den NIR-Bereich ausgedehnt. Hierfür wurden Materialien mit unterschiedlichen NIR-Reflexionseigenschaften in einem „künstlichen Szenario“ kombiniert, z. B. Metall, Holz, Plastik.

Ziel der Experimente war es u. a., die Spektren auf relevante Banden einzugrenzen, Abbildungsfehler zu erkennen und in der Software zu korrigieren, sowie Informationen über die erforderlichen Signalgrößen, Mittelungszeiten usw. zu erhalten.

## *2. Laufzeitmessungen mit einer Wellenlänge*

In einem zweiten Schritt wurden Laufzeitmessungen mit einer Laserwellenlänge durchgeführt. Zur leichteren Justage wurde eine Wellenlänge im sichtbaren Spektralbereich ausgewählt. Mit Hilfe der TCSPC-Elektronik und des SPCM-Detektors wurden Laufzeiten unter verschiedenen Scanwinkeln bestimmt, in Entfernungen konvertiert und in einem LIDAR-Bild für die definierte Wellenlänge zusammengesetzt. Die Messungen konnten dabei separat für verschiedene Wellenlängen wiederholt werden. Als Objekte wurden spezielle Aufbauten im Labor genutzt, beispielsweise eignen sich kleine Holz- und Kunststoffkisten, Metallgefäße, Kartons, Filz, Blätter etc. die in unterschiedlichen Entfernungen von der Lichtquelle auf einer optischen Bank platziert wurden.

Mit diesen Messungen sollten grundlegende Erkenntnisse bezüglich der zu erwartenden Reflexionssignale unter bestimmten Bedingungen erlangt werden. Dazu zählen Oberflächenbeschaffenheiten (glatt, rau, spiegelnd), schräge Ausrichtung der Oberflächen zum Einstrahlwinkel, Einfluss von Umgebungslicht usw.

## *3. Kombination von spektralen Messungen und LIDAR*

In einem dritten Schritt wurden beide Messregime kombiniert. Dazu musste insbesondere die Steuersoftware entsprechend angepasst werden. Für jeden Objektpunkt wurde die Laserwellenlänge in den relevanten Banden variiert und damit die spektrale Signatur aufgenommen. Zusätzlich zu dieser Intensitätsbestimmung (Reflexion) wurde anschließend die Laufzeitmessung vorgenommen, um auch die räumliche Position des jeweiligen Objektpunktes zu erfassen. Letztendlich wurden die Daten in entsprechenden Grafiken visualisiert.

### **AP 1.4 Gesamtkonzept und Spezifikation**

In Zusammenarbeit mit der TU Chemnitz wurde das Systemkonzept für den spektralen LIDAR-Aufbau entworfen. Wie schon in AP 1.3 beschrieben wurde, soll dabei ein Weißlicht-Lasersystem von NKT Photonics zum Einsatz kommen. Es kann jedoch das weiße Licht nicht direkt für die Messungen verwendet werden, sondern es werden mit akusto-optischen Filtern (AOTF 1 bis 3) entsprechende Banden ausgewählt. Dies erfolgt computergesteuert und ermöglicht eine freie Auswahl der Emissionswellenlänge innerhalb der Spektralbereiche 1: 450 nm - 650 nm; 2: 1.100 nm – 1.700 nm und 3: 640 nm – 1.100 nm. Diese Bereiche ergeben sich aus den optischen Komponenten in den Filterboxen und den optimalen Transmissionen der Lichtleitfasern bis zum Auskoppelport. Entsprechend dieser Bereiche muss auch im LIDAR-Aufbau eine mechanische Umstellung durch Klappspiegel erfolgen. Eine feststehende Realisierung mit Strahlteilern wurde verworfen, um eine höhere Signalamplitude und damit höhere Reichweite des LIDARs zu erreichen.

In der Abbildung 3 ist das Systemkonzept skizziert. Aus der Abbildung werden insbesondere die unterschiedlichen Spektralbereiche deutlich. Für die Messungen muss mit den Klappspiegeln der jeweilige Anregungsstrahlengang/ -spektralbereich und der zugehörige Detektor ausgewählt werden. Dieses Vorgehen ist für die Systementwicklung nicht hinderlich. Für eine spätere Anwendung muss jedoch ein fester optischer Strahlengang vorgesehen werden.

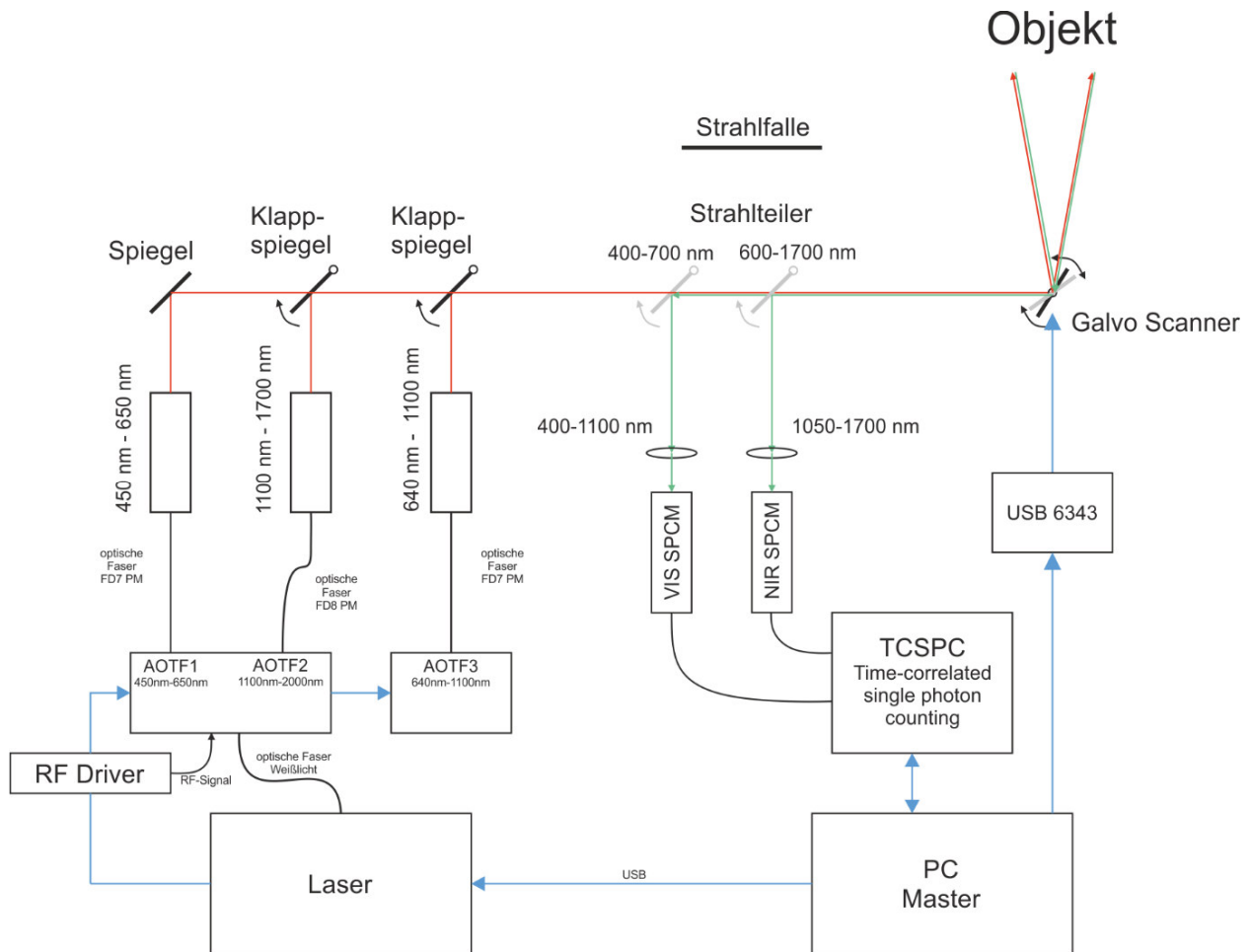


Abbildung 3: Skizze des Systemaufbaus für das spektrale LIDAR.

Wie beschrieben, wird für den Spektralbereich bis ca. 1.100 nm das vorhandene Silizium-SPC-Modul verwendet. Für die Detektion bei längeren Wellenlängen ist ein entsprechender InGaAs-Einzelphotonendetektor (NIR-SPCM) oder als Alternative ein Spektrometer mit InGaAs-Detektor erforderlich. Die Ansteuerung des Gesamtsystems wurde in LabView programmiert.

In Zusammenarbeit mit der TU Chemnitz wurden folgende Ziel-Parameter für das spektrale LIDAR-System festgelegt:

- spektrale Auflösung über den gesamten Spektralbereich: 10 nm;
- Entfernungsauflösung (Zeitauflösung): 15 cm (1 ns);
- Maximale Entfernung: 50 m (330 ns);
- Winkelbereich: +/- 25° horizontal, +/- 20° vertikal;
- Winkelauflösung: 1° horizontal und vertikal, 100 x 40 Punkte.

## **AP 4 Hyperspektrales optisches Basissystem**

### ***AP 4.2 Anwendungsorientiertes optischen Basissystems***

Für die Realisierung des hyperspektralen optischen Basissystems wurden zunächst Simulationen mittels optischer Simulationssoftware ZEMAX durchgeführt. Um die resultierenden Lichtintensitäten am Detektor für unterschiedliche Entfernungen des Objektes abzuschätzen, wurde ein Modell mit Lichtquelle, Strahlteiler, Scanspiegel, Objekt, Linse und Detektor erstellt (siehe Abbildung 4).



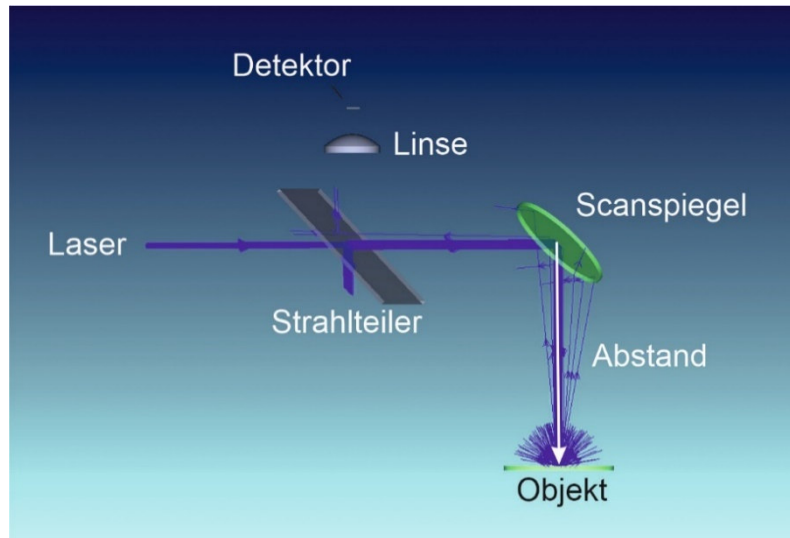


Abbildung 4: Simulationsmodell des hyperspektralen optischen Basissystems in ZEMAX.

Als Lichtquelle dient dabei ein Laser mit einem Strahldurchmesser von 1 mm mit Gaußscher Intensitätsverteilung und einer Wellenlänge von 550 nm. Der Laser trifft dabei zunächst auf einen Strahlteiler (50:50), wobei der transmittierte Lichtanteil über einen Scanspiegel zum Objekt geleitet wird. Auf dem Objekt befindet sich eine Beschichtung, welche die einfallenden Lichtstrahlen nach einer Lambert'schen Verteilung in den Halbraum zurückstret. Je nach Abstand des Objektes vom Scanspiegel wird so ein gewisser Anteil des gestreuten Lichtes über Scanspiegel und Strahlteiler sowie über die Linse zum Detektor geleitet. Für die Linse wurde eine asphärische Linse mit einem Durchmesser von 12,5 mm und einer Brennweite von 10 mm modelliert. Die Fläche des Detektors entspricht der Fläche des Single-Photon-Counting-Modules (SPCM) und hat einem Durchmesser von 180 µm.

Für die Simulation wurde nun der Abstand zwischen dem Scanspiegel und dem Objekt von 25 mm bis 13 m variiert und die Lichtintensität am Detektor mit und ohne asphärische Linse aufgetragen (siehe Abbildung 5).

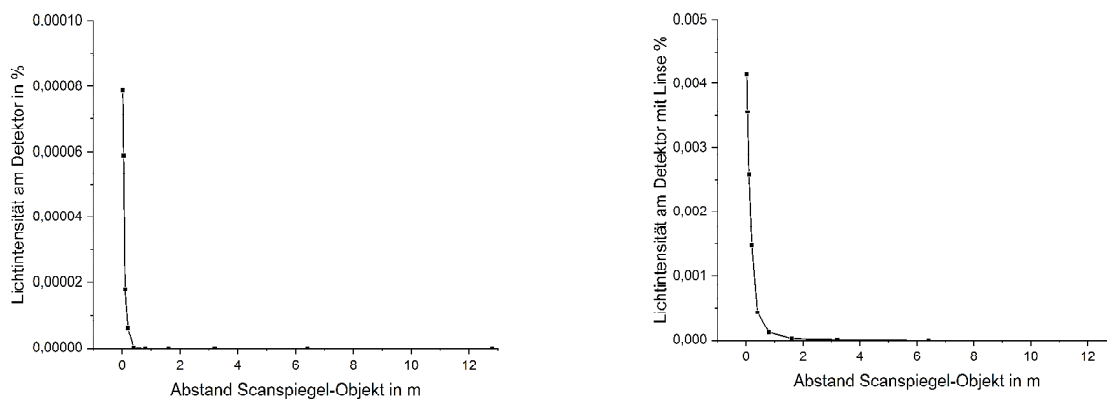


Abbildung 5: Resultierende Lichtintensität des Lasers am Detektor ohne asphärische Linse (links) und mit asphärischer Linse (rechts).

Wie in Abbildung 5 ersichtlich, sinkt die Lichtleistung am Detektor mit zunehmendem Abstand des Objektes gemäß der LIDAR-Abstandsgleichung mit der vierten Potenz. Aus beiden Simulationen ist zudem ersichtlich, dass durch den Einsatz der Linse zwischen Detektor und Strahlteiler erheblich mehr Licht aufgesammelt werden kann. Bei Annahme des Lasers „SuperK Compact“ als Lichtquelle mit einer durchschnittlichen Leistungsdichte von 80 µW/nm und des Single-Photon-Counting-Modules als Detektor mit einer Empfindlichkeit im fW-Bereich, sollten Messung ohne Linse bis 80 cm (77 fW/nm) und mit Linse mehr als 3,2 m (5.753 fW/nm) möglich

sein. Durch die Verwendung des Lasers „SuperK Fianium“ mit einer durchschnittlichen spektralen Leistungsdichte von 4 mW/nm, kann der Messbereich entsprechend vergrößert werden.

Für die Realisierung des hyperspektralen optischen Basissystems für die spektrale und abstandstechnische Charakterisierung des Messobjektes, wurde ein Aufbau gemäß dem Gesamtkonzept aus AP 1.4 aufgebaut (siehe Abbildung 6).

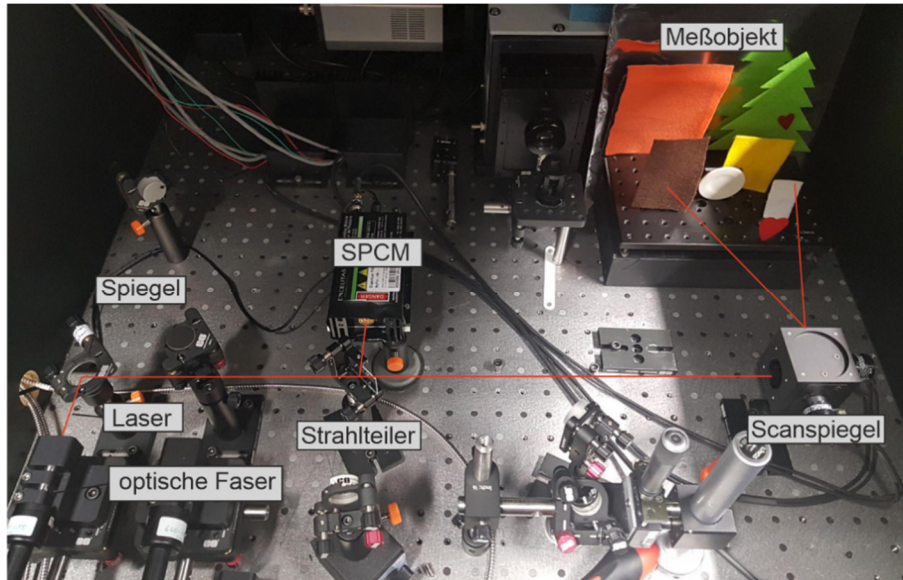


Abbildung 6: Aufbau des hyperspektralen Basissystems.

Dazu wird der durchstimmbare Laser über einen Spiegel durch den Strahlteiler zum Scanspiegel geleitet. Durch Ansteuerung des Scanspiegels (GVS002, Thorlabs) mittels Multifunktions-I/O-Gerät (NI-USB 6343) kann der Laser unter verschiedenen Winkeln zum Messobjekt abgelenkt werden und erlaubt so ein punktwises Abtasten des Messobjektes. Das vom Objekt gestreute Licht wird schließlich über den Scanspiegel und dem Strahlteiler zum Single-Photon-Counting-Module (SPCM) geleitet. Die Information über die spektralen Eigenschaften sowie die Position des abgetasteten Messobjektes erfolgt durch die Aufnahme von Histogrammen. Dazu ist die SPCM mit dem MultiHarp 150 (TCSPC-Einheit) der Firma PicoQuant verbunden. Mit dem Einschalten der Emission des Lasers sendet dieser für jeden Lichtimpuls einen Triggerimpuls an die MultiHarp 150. Nach jedem Impuls wird die Laufzeit gemessen bis das erste Photon mit dem SPCM registriert wurde. Nach einer gewissen Mittelungsdauer ergibt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der registrierten Photonen über ein gewisses Zeitfenster. In Abbildung 7 ist als Beispiel ein Histogramm dargestellt, bei dem der Laser mit einer Wellenlänge von 620 nm auf einen gelben Filz (siehe Abbildung 6) ausgerichtet wurde.

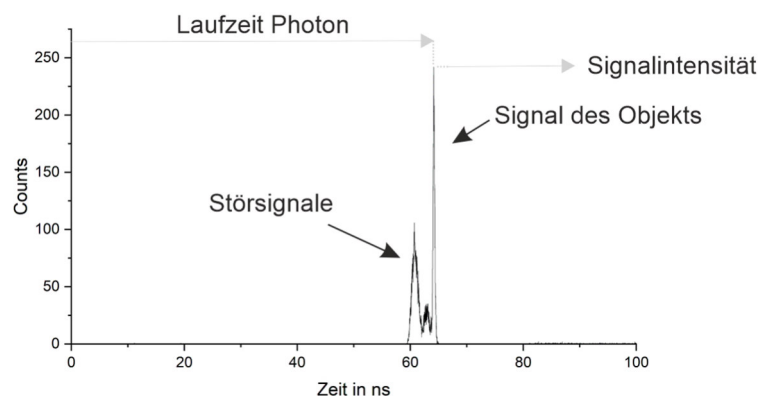


Abbildung 7: Beispielhistogramm mit einer Anregungswellenlänge von 620 nm auf gelben Fließ.

In dem Histogramm ist deutlich das reflektierte Signal des Objektes zu erkennen. Aus der Laufzeit des Photons kann nun der Abstand des einen Punktes des gelben Filzes vom Scanspiegel berechnet sowie die spektrale Charakteristik für die eingestellte Wellenlänge aus der Signalintensität abgelesen werden. Die automatisierte hyperspektrale Charakterisierung des dreidimensionalen Messobjektes erfolgt über ein im Projekt erarbeitetes LabView-Programm. Zu jedem Messpunkt und jeder Wellenlänge wird eine separate Datei der Form „Y-Pixel\_X-Pixel\_Wellenlänge.txt“ abgespeichert. Innerhalb der Dateien befindet sich in der ersten Spalte die Zeit in Nanosekunden (ns) und in der zweiten Spalte die gezählten Photonen (Counts).

### SWIR-Erweiterung des hyperspektralen optischen Basissystems

Das in Abbildung 6 gezeigte und darauffolgend beschriebene System kann für hyperspektrale LIDAR-Messungen im sichtbaren (VIS) und nahinfraroten (NIR) Spektralbereich eingesetzt werden. Aus den VIS-Messdaten können LIDAR-Farbbilder berechnet werden, die den Oberflächenfarben der jeweiligen Messobjekte entsprechen. Messdaten im NIR-Bereich liefern darüber hinaus weitere und für das menschliche Auge nicht sichtbare Informationen, wie z. B. verschiedene Vegetationsindizes. Eine echte Unterscheidung von Materialien (Oberflächenmaterialien der Messobjekte) ist bei größeren Wellenlängen im SWIR- und MIR-Spektralbereich möglich. Untersuchungen zur Materialcharakterisierung im Spektralbereich zwischen 1.000 nm und 2.500 nm wurden vom Projektpartner TU Chemnitz an unterschiedlichen für den Bahnbereich relevanten Materialien durchgeführt (vgl. Bericht der TU Chemnitz). Es konnte gezeigt werden, dass sich verschiedene Materialien wie z. B. Holz, Steine und Kunststoff anhand ihrer spektralen Signatur klassifizieren lassen. Das hyperspektrale Basissystem wurde daher im weiteren Projektverlauf um den SWIR-Spektralbereich erweitert. Dazu wurde der gesamte Aufbau auf der optischen Bank neu angeordnet. Das Funktionsprinzip entspricht dabei weiterhin dem in AP 1.3 und AP 1.4 erarbeiteten und in Abbildung 3 gezeigten Gesamtkonzept. Das erweiterte optische Basissystem ist in Abbildung 8 aufgezeigt.

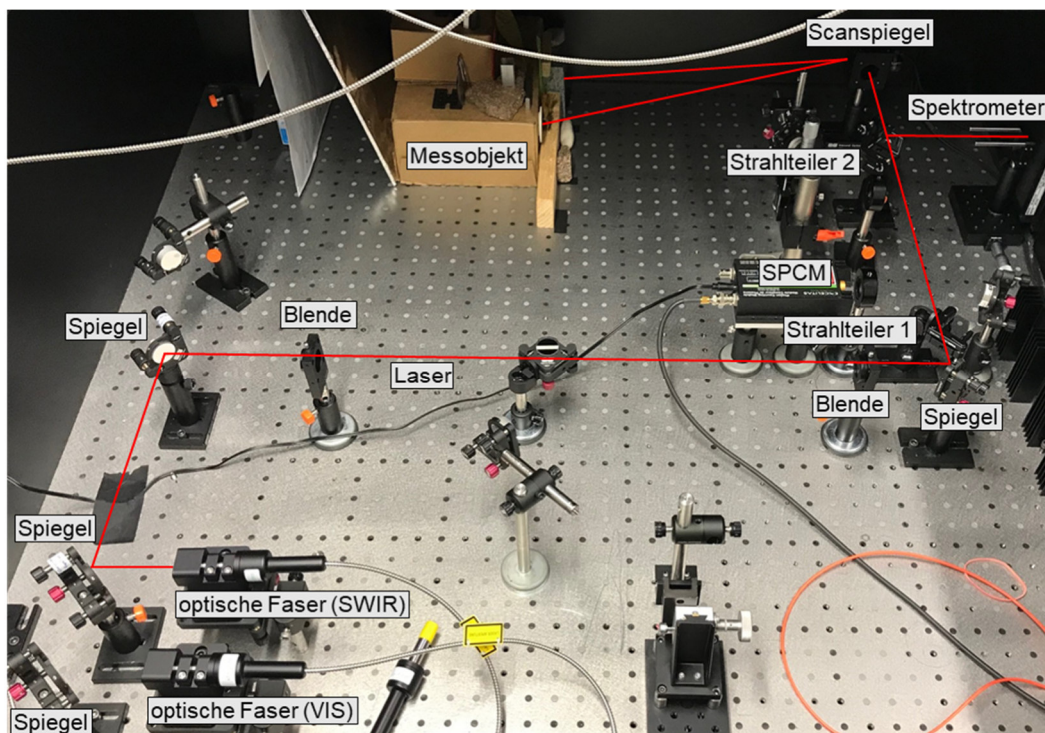


Abbildung 8: Aufbau des hyperspektralen Basissystems mit SWIR-Spektralbereichserweiterung.

Laserpulse werden vom NKT Photonics Weißlicht-Lasersystem über eine optische Faser auf die optische Bank geleitet und dort in den Strahlengang eingekoppelt (siehe Abbildung 8). Vom Ausgang der optischen Faser (SWIR) werden diese über drei Spiegel und den Strahlteiler 2 zum Scanspiegel geführt und von dort auf das Messobjekt. Der Scanspiegel kann in zwei Raumrichtungen geneigt werden und so die Laserpulse auf verschiedene Punkte des



Messobjektes, innerhalb eines definierten Messfeldes, auslenken. Die Laserpulse werden in Abhängigkeit von der Position auf dem Messobjekt und der eingestellten Laserwellenlänge unterschiedlich stark reflektiert. Die zum Scanspiegel zurückreflektierten Laserpulse werden von dort zum Strahlteiler 2 und anschließend zum Spektrometer (Andor Gitterspektrometer mit InGaAs-Detektor) geleitet. Das Spektrometer registriert die eintreffenden Laserpulse in Abhängigkeit von der Wellenlänge. In dieser Konfiguration können mit dem Basissystem Laser-Reflexionsspektren des Messobjektes im Wellenlängenbereich von 1.100 nm bis 1.700 nm aufgenommen werden. Die Bestimmung der Entfernung zwischen Messobjekt und Scanspiegel erfolgt in einem zweiten Schritt mit einer ToF-Messung im VIS- oder NIR-Spektralbereich. Dazu wird der Strahlteiler 1 über einen Kippmechanismus in den Strahlengang eingebracht und der Strahlenteiler 2 aus diesem entfernt (ebenfalls durch einen Kippmechanismus). Ebenfalls wird der Spiegel vor dem SWIR-Faserausgang aus dem Strahlengang gekippt. Mit dem sich ergebenden Strahlengang können nun VIS- oder NIR-Laserpulse über den ansonsten gleichen Weg auf das Messobjekt gelenkt werden. Die rückreflektierten Pulse werden anschließend für die ToF-Messung durch den Strahlteiler 1 auf das SPCM geleitet.

Mit einem NIR-SPCM (ab 1.100 nm Wellenlänge) könnten ToF-Messungen direkt im SWIR-Spektralbereich durchgeführt werden. Eine Beschaffung während der Projektlaufzeit war jedoch aufgrund der zu dieser Zeit geltenden hohen Herstellerpreise nicht möglich. Mit dem in Abbildung 8 gezeigten Aufbau konnte allerdings eine gute Alternativlösung gefunden werden. Abgedeckt werden die VIS-, NIR und SWIR-Spektralbereiche von 450 nm bis 1.700 nm Wellenlänge. Eine kombinierte ToF- und Spektralmessung ist von 450 nm bis 1.100 nm möglich. Im SWIR-Bereich kann ausschließlich die Spektralmessung durchgeführt werden, wobei diese mit einer ToF-Messung in den anderen beiden Spektralbereichen kombiniert werden kann. Damit können auch im SWIR-Bereich hyperspektrale LIDAR-Messdaten aufgenommen werden.

## **AP 5 Systemelektronik und Datenerfassung**

### ***AP 5.1 Entwurf und Aufbau der Systemelektronik***

Für einen hyperspektralen LIDAR-Sensor, welcher nach dem ToF-Prinzip arbeitet, wurde ein entsprechender Aufbau für eine Systemelektronik entworfen. Dabei wurden folgende Hauptkomponenten festgelegt:

- PC mit Steuersoftware LabView,
- Lasersystem von NKT Photonics,
- 2D-Galvo-System von THORLABS,
- Time-Correlated Single Photon Counting Modul (TCSPC) von PicoQuant,
- Single Photon Counting Module (SPCM) von Excelitas,
- USB 6343 von National Instruments und
- Spektrometersystem mit VIS/NIR-CCD von Andor.

Die Systemelektronik mit entsprechender Ansteuerung der Hauptkomponenten ist in nachfolgender Abbildung 9 dargestellt.

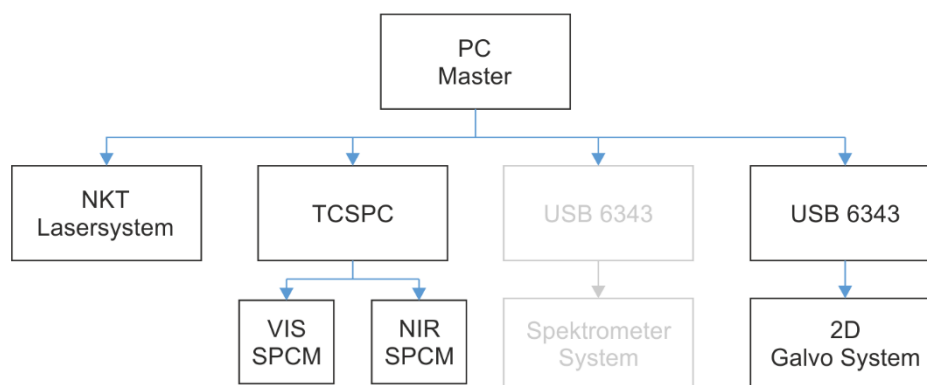


Abbildung 9: Systemelektronik mit Ansteuerung der Hauptkomponenten.

Die Ansteuerung aller Komponenten im Aufbau übernimmt ein PC mit der Steuersoftware LabView. Dadurch kann eine automatisierte Messabfolge programmiert werden, so dass mehrdimensionale Messdaten aufgenommen, ausgewertet, abgespeichert und grafisch dargestellt werden können. Über vorhandene LabView-APIs von NKT können entsprechende Register im Lasersystem (SuperK Compact/Fianium, RF Driver, SuperK Select, SuperK Connect, optische Faser FD7/FD8) beschrieben werden, so dass die gewünschte Wellenlänge mit Amplitude und Pulsfrequenz gezielt eingestellt werden kann. Die Ansteuerung des Galvo-Systems mit zwei einstellbaren Silberspiegeln (GVS002) erfolgt über das Multifunktions-I/O Gerät USB-6343. Durch die Ausgabe zweier unabhängiger analoger Spannungen (16 Bit /  $\pm 10$  V) können die Silberspiegel separat eingestellt werden. Die maximale Auslenkung der Spiegel beträgt dabei  $\pm 12,5^\circ$  bei einstellbaren Auflösungen am Galvo-System von  $1,0^\circ/V$ ,  $0,8^\circ/V$  und  $0,5^\circ/V$ . Der Datenaustausch zwischen PC und der TCSPC (MultiHarp 150) mit zwei angeschlossenen SPCM im sichtbaren und nahen infraroten Messbereich erfolgt über eine schnelle USB 3.0-Verbindung. Zur Analyse der spektralen Charakteristik kann anstelle des TCSPC auch ein Spektrometersystem (Andor Shamrock 303i + DU920P-BEX2-DD/ DU491A-1.7) angeordnet werden. Hierfür wird lediglich ein Triggersignal (TTL 5V) über das Multifunktions-I/O Gerät USB-6343 an das Spektrometersystem zur Aufnahme eines Spektrums benötigt.

### AP 5.2 Erfassung und Speicherung mehrdimensionaler Messdaten

Für die Erfassung und Speicherung mehrdimensionaler Messdaten wurde eine Software in LabView entwickelt, welche das Lasersystem, das Galvo-System sowie das Spektrometersystem ansteuern kann. Dabei kann der Laser in einem einstellbaren rechteckigen Bereich ausgelenkt werden sowie an jedem dieser Punkte die Wellenlänge des Lasers in einem einstellbaren Bereich durchstimmen (siehe nachfolgende Abbildung 10).

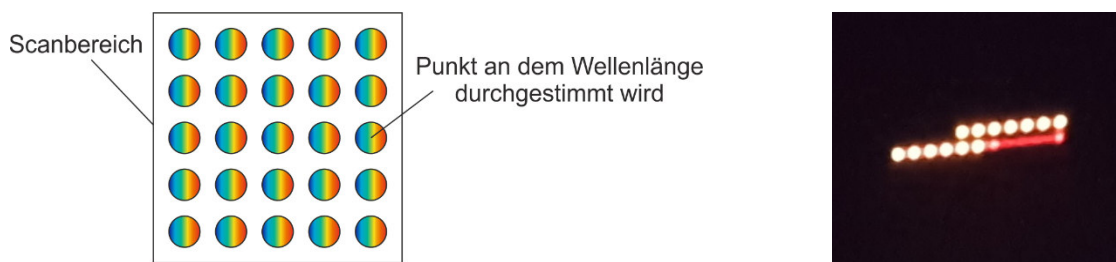


Abbildung 10: Beispiel eines Scanbereiches von 5 x 5 Punkten an dem die Wellenlänge des Lasers durchgestimmt wird (links) und Langzeitaufnahme während des Scans (rechts).

Der entsprechende Programmablaufplan der Software ist in nachfolgender Abbildung 11 dargestellt.

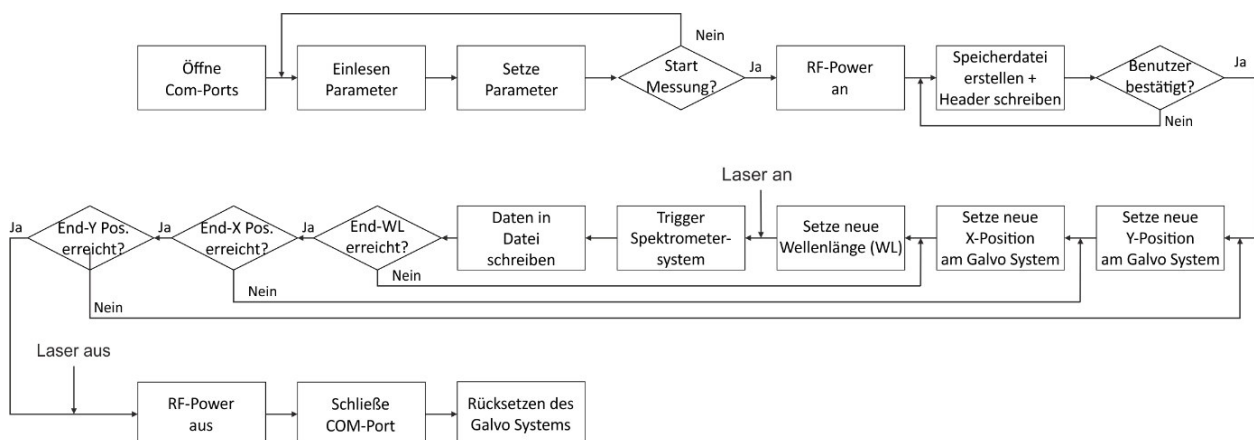


Abbildung 11: Programmablaufplan zur Erfassung und Speicherung mehrdimensionaler Messdaten.

Nach dem Öffnen des COM-Ports zum NKT-Lasersystem befindet sich das Programm zunächst in einer Schleife, in der Parameter, wie Wellenlängenbereich mit Schrittweite, Amplitude und Pulsfrequenz sowie Scanbereich des Galvo-Systems mit Schrittweite abgefragt und eingestellt

werden. Nach dem Start der Messung wird anschließend die RF-Power am Lasersystem zugeschaltet und ein Abfrage-Dialog zur Speicherdatei initiiert. Nach Eingabe des Speicherorts und Name der Datei wird diese erstellt und ein entsprechender Header in die Datei geschrieben. Anschließend erfolgt der Ablauf der drei Hauptschleifen für die Einstellung des Galvo-Systems für X- und Y-Position sowie die Schleife für die Durchstimmung der Wellenlänge. Nach erfolgreichem Ablauf der Hauptschleifen wird die RF-Power abgeschaltet, der COM-Port geschlossen sowie das Galvo-System auf die Ausgangsposition gesetzt.

Zur Übersicht der einstellbaren Parameter ist in nachfolgender Abbildung 12 das Frontpanel der Software dargestellt.

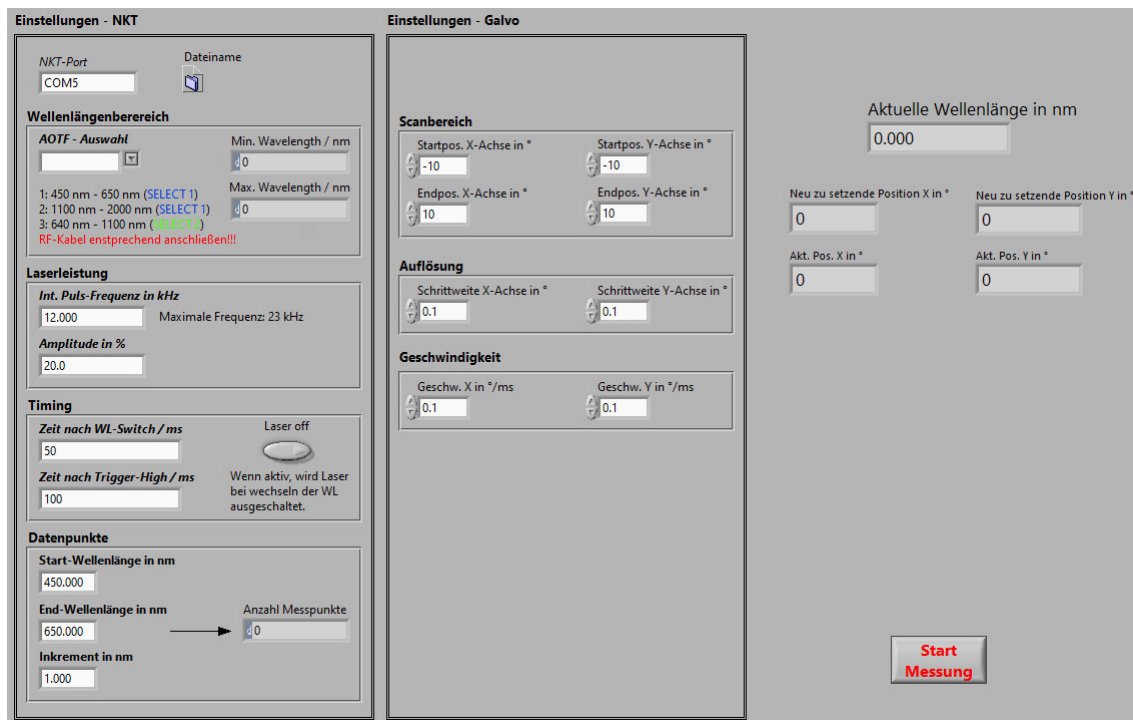


Abbildung 12: Frontpanel mit einstellbaren Parametern und Anzeige der aktuellen Wellenlänge und Position.

### SWIR-Erweiterung der LabView-Software zur Hardwaresteuerung

Im Zusammenhang mit der SWIR-Erweiterung des hyperspektralen Basissystems wurde ebenfalls die LabView-Software weiterentwickelt. Zum einen wurde eine flexible Auswahl und Konfiguration aller Geräte (Lasersystem, Multiharp, Spektrometer und Galvo-Scanner) integriert. Zum anderen hatte sich gezeigt, dass ein fester Programmablauf für die angestrebten Messkampagnen nicht flexibel genug ist. Daher wurde die Benutzeroberfläche neugestaltet und um die zusätzlichen Konfigurationsmöglichkeiten erweitert. An Abbildung 13 ist die aktuelle Benutzeroberfläche dargestellt. Hinzugekommen ist die Geräteauswahl auf der linken Seite, gefolgt vom Konfigurationsdialog für die Multiharp 150 TCSPC. Auf der rechten Seite sind Dialogfelder für den Speicherpfad der Messdaten und die Auswahl eines Steuerskriptes hinzugekommen. Wie in AP 6.2 beschrieben, kann über Steuerskripte die Messablaufsteuerung sehr flexibel festgelegt werden. Das betrifft sowohl das Scanmuster des Galvo-Spiegels, als auch die Wellenlängenauswahl des Lasersystems. Die Implementierung der Skriptsteuerung erforderte eine Erweiterung der zugrundeliegenden Programmstruktur.



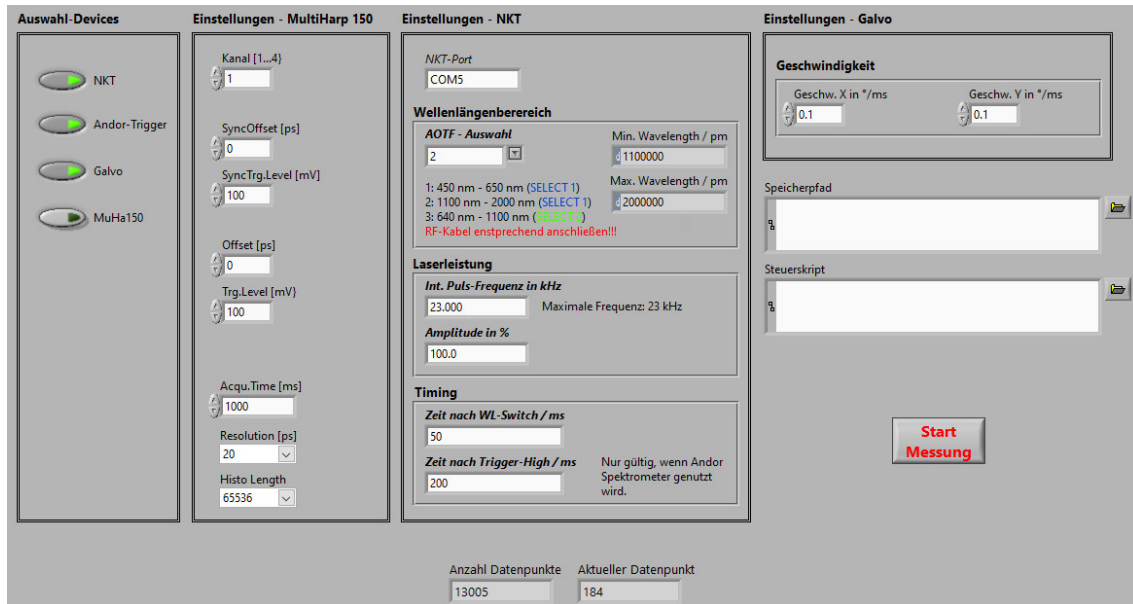


Abbildung 13: Frontpanel mit einstellbaren Parametern und SWIR-Erweiterung.

## **AP 6 Algorithmen und Daten**

### ***AP 6.2 Datenverarbeitung und -auswertung***

Im Projekt wurden zwei Softwarepakete zur Datenverarbeitung und –auswertung erarbeitet. Das erste Softwarepaket besteht aus einem LabView-Programm zur Ansteuerung aller Hardwarekomponenten (siehe AP 5.2) und einem Skript zur Datenauswertung mit Mathematica (siehe AP 7.2). Es wurde in der Entwicklungsphase des LIDAR-Systems und der Algorithmen zur Datenauswertung eingesetzt. Es ermöglichte Änderungen an Hardware und einzelnen Programmbestandteilen mit nur geringem Aufwand und in kurzer Zeit. Dadurch konnten verschiedene Hardwarekonfigurationen und Algorithmen ausprobiert und verglichen werden.

Das zweite Softwarepaket wurde im weiteren Projektverlauf in der Programmiersprache Python entwickelt und setzte die bisher erprobten Funktionen und Algorithmen in einer einheitlichen Software um. Dieses Softwarepaket ist für den Betrieb mit einem Embedded System wie einem NVIDIA Jetson Nano oder Xavier geeignet und erlaubt die hardwarebeschleunigte Ausführung von neuronalen Netzen (Inferenz). Das Softwarepaket besitzt eine Datenschnittstelle zum LabView-Programm, um die bestehenden Messdaten einlesen und verarbeiten zu können. Es soll im Folgenden detaillierter vorgestellt werden.

Die Messsoftware basiert auf einem modularen, objektorientierten Softwarekonzept. Alle Funktionen sind über eine Benutzeroberfläche zugänglich. Jeder Messvorgang wird in einem eigenen Projekt erfasst und gespeichert, wobei ein Projekt je nach Konfiguration und Datenverarbeitung aus mehreren Dateien bestehen kann. Die Software zeigt sowohl verarbeitete Messdaten und Ergebnisse, als auch bestimmte Zwischenergebnisse (wie z. B. Histogramme) in der Benutzeroberfläche an. Es ist möglich den Messvorgang in Echtzeit zu beobachten und Parameter der Datenverarbeitung zu ändern (z. B. die Ergebnisdarstellung). Die Benutzeroberfläche der Software ist in Abbildung 14 dargestellt.

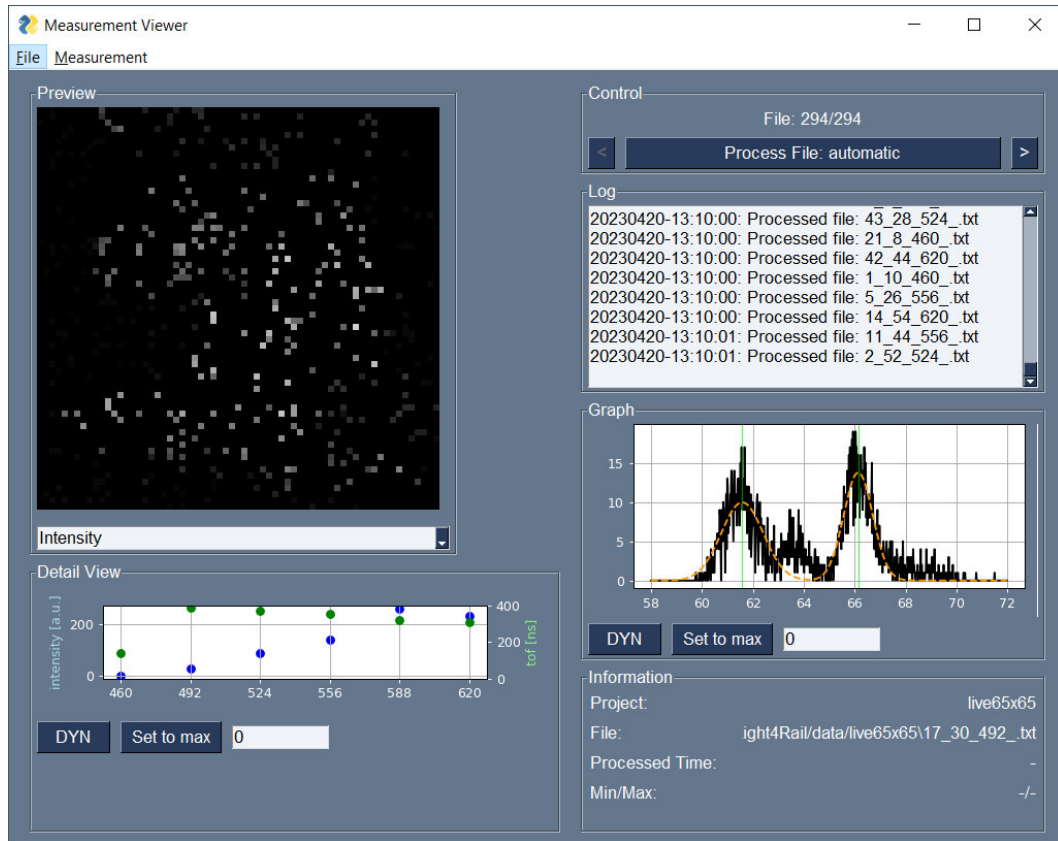


Abbildung 14: Benutzeroberfläche der Messsoftware.

Zur Konfiguration eines Messprojektes wird automatisch ein separates Fenster geöffnet. In diesem können alle Einstellungen zur gewünschten Bild- und Spektralaufösung vorgenommen werden. Darüber hinaus sind Anpassungen für die Datenauswertung möglich. Die Benutzeroberfläche zur Projekterstellung ist in Abbildung 15 aufgezeigt.

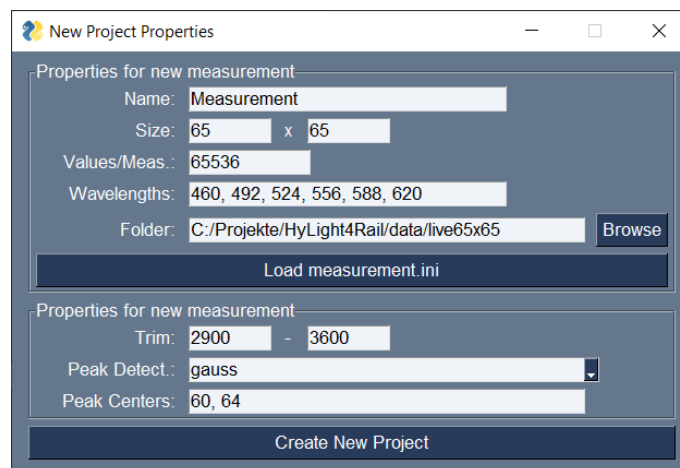


Abbildung 15: Benutzeroberfläche zur Konfiguration eines neuen Messprojektes.

Im Projekt wird mit verschiedenen Scanmustern (Scan-Patterns) für die Aufnahme der hyperspektralen LIDAR-Daten gearbeitet. Neben einem linearen Muster mit Zeilensprung sind auch verschachtelte (Mäander, Interleaved, Checkerboard) oder zufällige Muster möglich. Ebenfalls kann die Wellenlängenauswahl eingestellt werden. Die mit dem Pattern Generator erzeugten Messskripte können von der in Abbildung 13 gezeigten Version der LabView-Software zur Steuerung der Hardware eingelesen und verarbeitet werden. Die Benutzeroberfläche des Mustergenerators (Pattern Generator) ist in Abbildung 16 dargestellt.

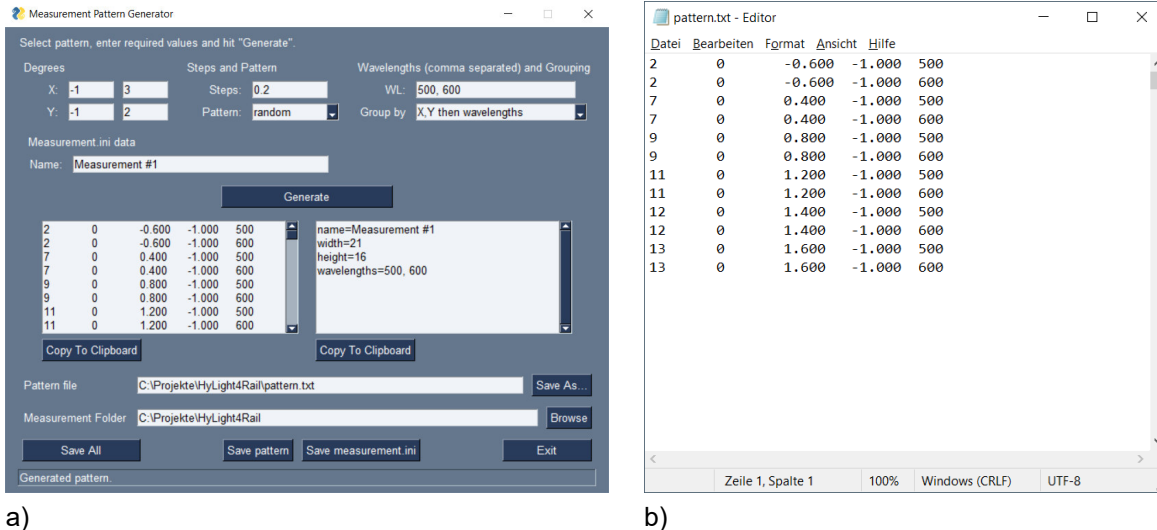


Abbildung 16: a) Benutzeroberfläche des Pattern Generators und b) beispielhaftes Steuer-Pattern.

Die Messsoftware wurde im Projektverlauf kontinuierlich weiterentwickelt und um weitere Algorithmen zur Darstellung der Messergebnisse ergänzt. Ein besonderer Fokus lag dabei auf der Klassifikation von Materialien in den hyperspektralen LIDAR-Daten und deren Darstellung mit einem entsprechenden Farbmuster.

## **AP 7 Labor- und Feldversuche**

### ***AP 7.2 Durchführung von Feldversuchen***

#### *Spektrale LIDAR-Messungen im NIR-Bereich*

In der Multiparadigmen-sprache Mathematica wurde eine Umgebung zur Vorverarbeitung der Rohdaten, der Auswertung und der Darstellung der hyperspektralen Information entwickelt. Die Rohdaten eines einzelnen hyperspektralen Bildes mit 65 x 65 Pixeln und Tiefenauflösung für sechs spektral unabhängigen Kanäle ergeben ein unkomprimiertes Datenvolumen von etwa 4 GByte. Eine Eingrenzung des Entfernungsbereichs und Filterung der Daten reduziert das Datenvolumen um einen Faktor 40. Anschließend wird ein wellenlängenabhängiger Zeitversatz ausgeglichen, der von einem Wellenlängen-Chirp der Kurzpuls-Weißlichtquelle verursacht wird. Die Intensitäten der sechs Farbkanäle werden über den aus der mitgemessenen Keramikprobe abgeleiteten Weißabgleich normiert.

Zunächst kann für jeden Farbkanal separat die Intensität als Funktion von Winkel und Abstand aufgetragen werden. Im LIDAR ist ein starkes Signal von der ersten Oberfläche aus der Sicht des Scanners enthalten. Mit dieser Darstellung der einzelnen Kanäle konnte die räumliche Auflösung nachgewiesen werden.

Anschließend werden die hyperspektralen Kanäle farblich dargestellt. Die gemessenen Wellenlängen liegen im infraroten Spektralbereich. Die Wahl der Zuordnung von Wellenlängen auf Farben in der Falschfarbendarstellung der hyperspektralen Information ist weitgehend frei. Ziel ist, einen sichtbaren Kontrast zwischen den Materialien zu generieren. Dabei ist die Darstellung auf dem Computerbildschirm und in der visuellen Wahrnehmung dadurch eingeschränkt, dass die sechs Wellenlängenkanäle auf die drei RGB-Farben oder ein anderes Farbmodell abgebildet werden müssen. Es wurden sowohl eine Auswahl von nur drei Kanälen und direkte Abbildung auf RGB probiert, wie auch kompliziertere Kombinationen der sechs Kanäle mit unterschiedlichen Gewichten. Bei diesen Versuchen war der visuelle Eindruck des Ergebnisses wichtig. Eine quantitative Auswertung wurde nicht durchgeführt. Auch wurden die Wellenlängen in diesen Versuchen nicht für die Detektion spezieller Banden der charakteristischen Spektren im mittleren Infrarot ausgewählt, sondern im sichtbaren und nahen Infrarot etwa gleichverteilt gesetzt.

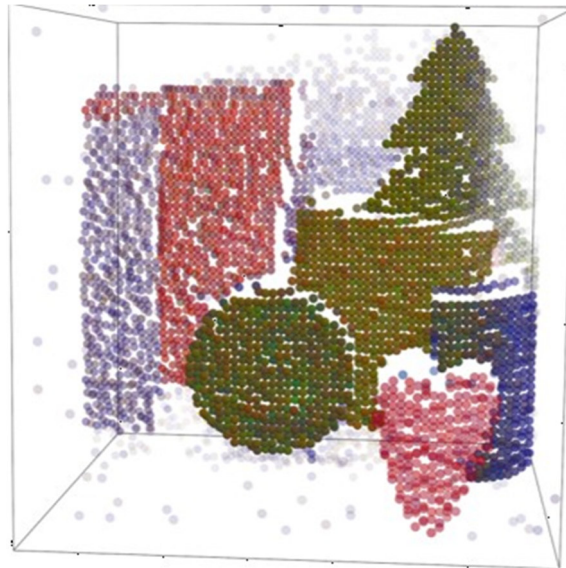


Abbildung 17: Dreidimensionale, eingefärbte Darstellung einer hyperspektralen ToF-Messung (65x65 Messpunkte mit jeweils 6 Wellenlängen im NIR-Spektralbereich).

Eine Auswertung in Echtzeit ist für eine reale Anwendung notwendig. Als Vorbetrachtung dazu wurde im Projekt in der Programmiersprache Python ein Programm zur Verarbeitung und partiellen Auswertung der LIDAR-Daten entwickelt (siehe auch AP 6.2).

Um Materialien durch die hyperspektrale Information separieren zu können, wurden die Intensitäten der einzelnen Kanäle (Wellenlängen) zusammengeführt und paarweise oder als Tripel miteinander korreliert. Diese Tripel (oder allgemein n-Tupel mit  $n \leq 6$  bei sechs Kanälen) bilden Cluster im n-dimensionalen hyperspektralen Raum. Mit den Messdaten konnten diese Cluster dargestellt werden. Die Korrelationsplots in Abbildung 18 zeigen diese Art der Auswertung.

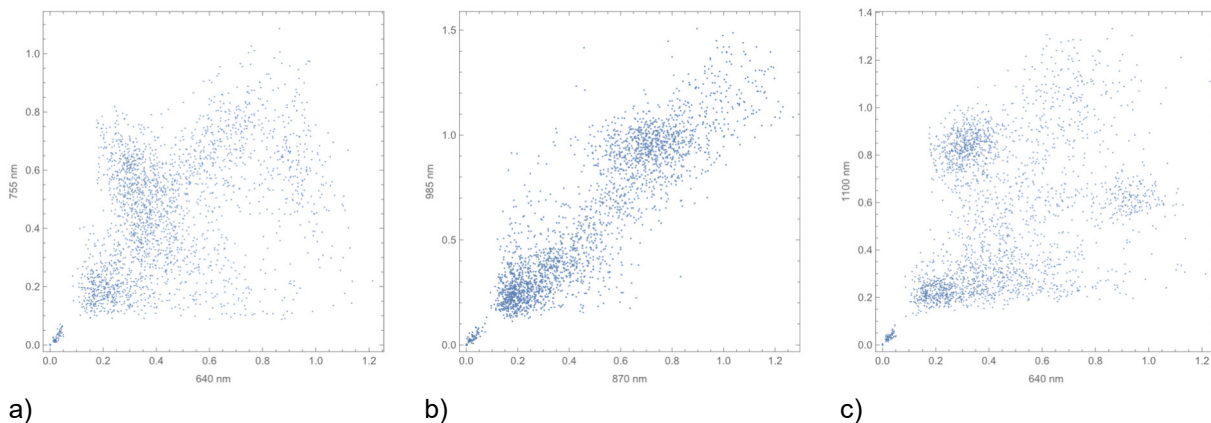


Abbildung 18: Korrelationsplots der Intensitäten bei je zwei Wellenlängen. Die Daten stammen aus einem 51 x 51 Punkte Scan mit Wellenlängen im roten und nahen infraroten Spektralbereich (640 nm, 755 nm, 870 nm, 985 nm und 1.100 nm).

Die Punktwolken (Scatter Plots) stellen die Intensitäten in je zwei aus sechs hyperspektralen Wellenlängenbereichen dar. Es bilden sich Cluster höherer Punktdichte. Diese stehen für ein charakteristisches Reflexionsverhältnis eines Stoffes bei zwei Wellenlängen. In diesen zweidimensionalen Darstellungen überlappen die Cluster teilweise. Dennoch kann für einzelne Cluster ein Schwerpunkt der jeweiligen Punktwolke gebildet werden. Der Abstand der Punktwolke eines unbekanntes Objekts zu diesem Schwerpunkt ist dann ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass es sich um das jeweilige Material handelt. Diese Cluster-Analyse muss im höherdimensionalen Raum durchgeführt werden, um die Information aller hyperspektralen Kanäle zu berücksichtigen. Nur für die Darstellung wird das auf jeweils zwei Dimensionen



heruntergebrochen. Für eine weitergehende, systematische Auswertung eignen sich Methoden wie z. B. die Hauptkomponentenanalyse (vgl. Bericht der TU Chemnitz).

### Spektrale LIDAR-Messungen im SWIR-Bereich

In AP 4.2 wurde die Erweiterung des hyperspektralen Basissystems in den SWIR-Spektralbereich beschrieben. Der in Abbildung 8 vorgestellte Messaufbau wurde im Folgenden genutzt, um spektrale LIDAR-Messungen im SWIR durchzuführen. Messobjekte aus verschiedenen Materialien wurden zusammengestellt. Abbildung 19 zeigt beispielhaft ein Messobjekt so, wie es vom Scanspiegel aus sichtbar ist. Der Bildausschnitt entspricht in etwa dem vom Laser erreichbaren Messbereich.

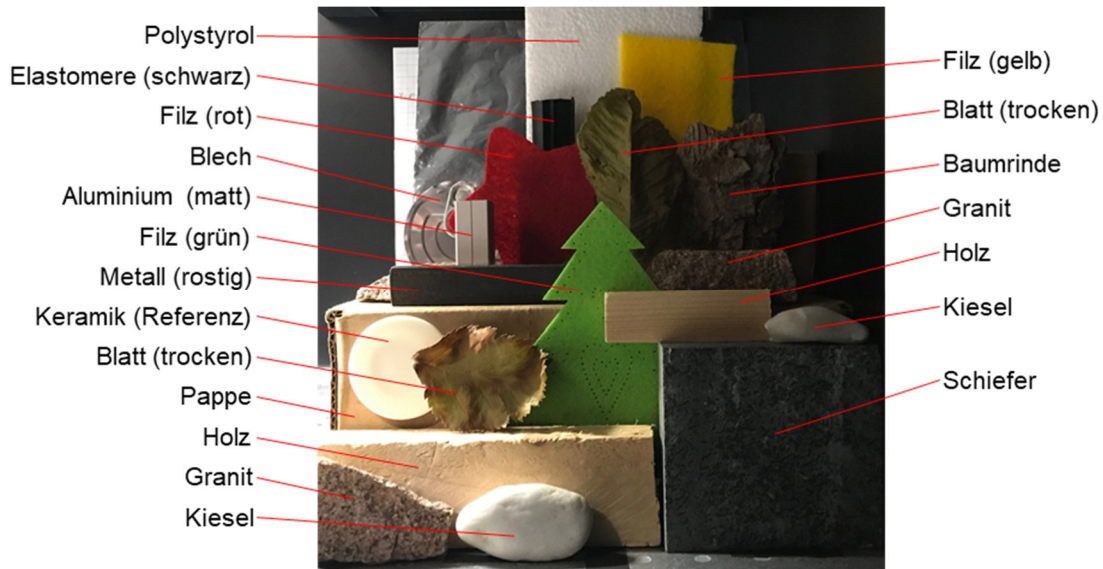


Abbildung 19: Beispielhaftes Messobjekt für LIDAR-Messungen im SWIR-Spektralbereich.

Für das gezeigte Messobjekt wurde folgender Messablauf ausgeführt. Als erstes wurde eine ToF-Messung bei 550 nm Wellenlänge mit einer Auflösung von 101 x 101 Messpunkten durchgeführt. Diese lieferte 10.201 Histogramme mit einer Größe von je 1,322 MB. Aus den Histogrammen konnten die Laufzeiten der Laserpulse und die Intensitäten berechnet werden. Dazu wurde nach den Maximalwerten im Histogramm gesucht. Alternativ kann eine Hilfsfunktion (z. B. die Gauß-Funktion) an die Messwerte zur Maximalwertbestimmung angenähert werden. In Abbildung 20 ist die Seitenansicht des Messobjektes und die Punktwolke der Messung abgebildet.

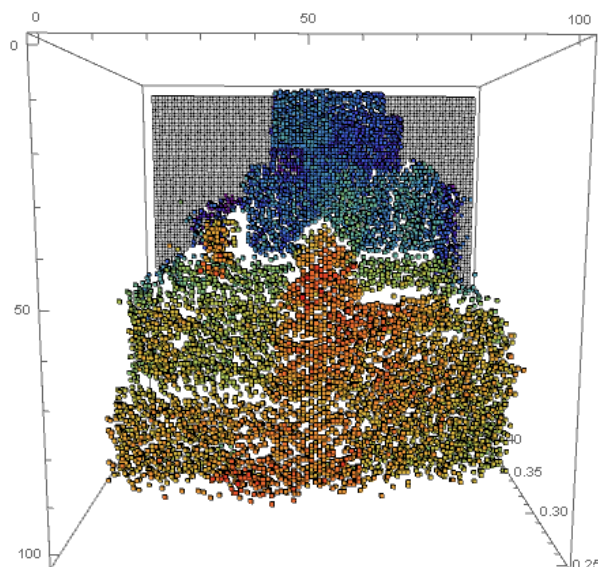


Abbildung 20: Monospektrale LIDAR-Punktwolke mit 101 x 101 Messpunkten bei 550 nm Wellenlängen (links). Die Farbe der Messpunkte entspricht der Distanz vom Scanspiegel. Seitenansicht des Messobjektes (rechts).

In der Seitenansicht (rechte Abbildung) ist die räumliche Verteilung des Messobjektes ersichtlich. Diese ist qualitativ ebenfalls in der LIDAR-Punktwolke (linke Abbildung) erkennbar. Die Punktwolke ist mit einer Farbskala in den Regenbogenfarben eingefärbt. Die roten Punkte kennzeichnen dabei die kürzeste Distanz zum Scanspiegel.

Aus den Histogrammen kann neben der Pulslaufzeit und damit der Entfernung des Messobjektes zum Messsystem ebenfalls die Intensität der reflektierten Lichtpulse ermittelt werden. In Abbildung 21 wurden beide Messwerte in Diagrammen gegenübergestellt. Die linke Abbildung zeigt die Distanzdarstellung und die rechte Abbildung die Intensitätsdarstellung der Messwerte.

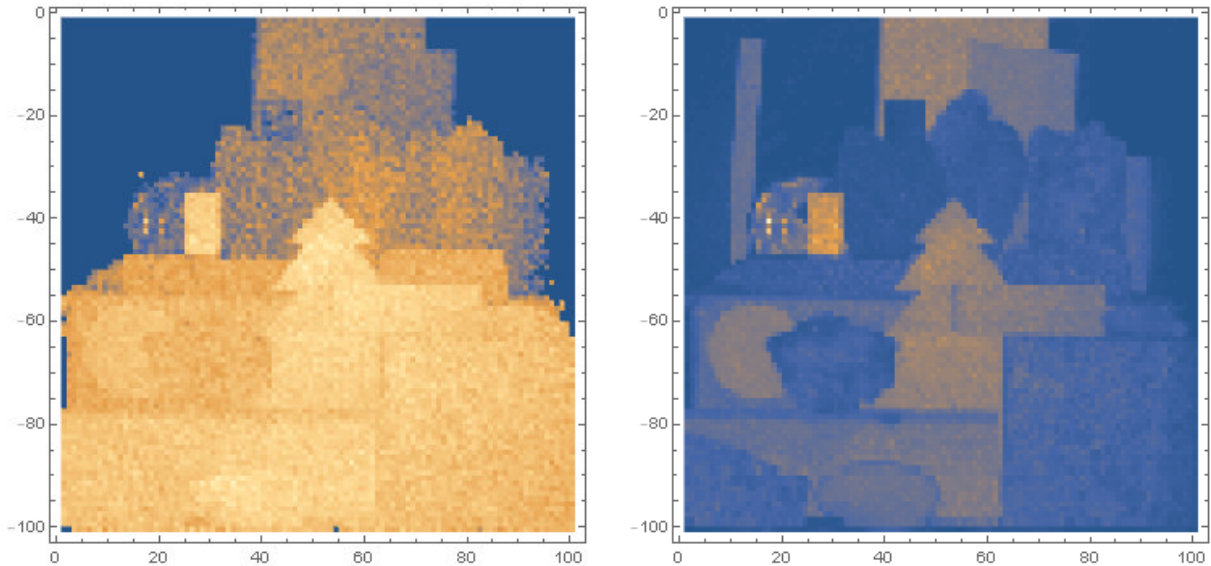


Abbildung 21: Monospektrale LIDAR-Messung mit 101 x 101 Messpunkten bei 550 nm Wellenlänge. Distanzdarstellung (links) und Intensitätsdarstellung (rechts).

Im weiteren Messverlauf wurde ein Laserreflexionsspektrum im SWIR zwischen 1.100 nm und 1.600 nm mit einer Auflösung von 51 x 51 Messpunkten aufgenommen. Jeder Messpunkt wurde bei 26 Wellenlängen mit einer Spektralauflösung von 20 nm vermessen. Dies ergibt einen spektralen Datenwürfel mit 67.626 Elementen. Da als Detektor ein Gitterspektrometer mit InGaAs-Detektor von Andor verwendet wurde, besteht jedes dieser Elemente wiederum aus einem Spektrum mit 1.024 Elementen. Um die Intensitätswerte zu erhalten, wurden diese Spektren um ihren Offset korrigiert und darauffolgend integriert. Der spektrale Datenwürfel kann anschließend unter Anwendung einer Farbskala grafisch dargestellt werden (siehe Abbildung 22).

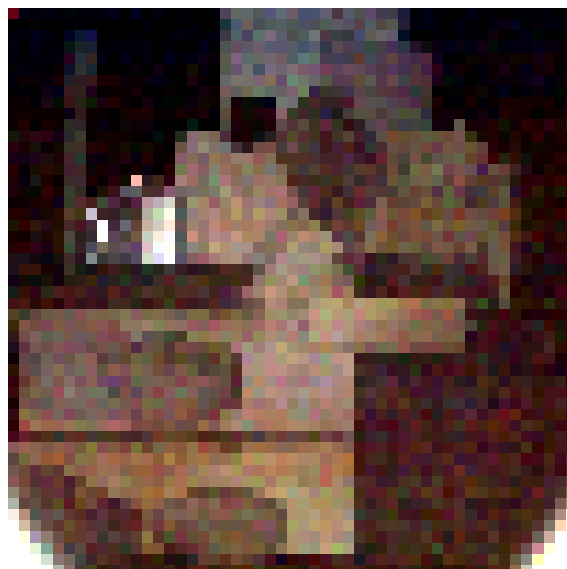


Abbildung 22: Laserreflexionsmessung im SWIR-Spektralbereich (1.100 nm bis 1.600 nm) mit 51 x 51 Messpunkten und jeweils 26 Wellenlängen in Falschfarbdarstellung (geglättete Darstellung).



Die Abbildung 22 wurde mit der Software Perception Studio (Version 2.0.5582.1) von der Firma Perception Park aus den Messdaten erstellt. Dazu wurden diese auf eine rot/grün/blau-Farbskala umgerechnet. Das Messobjekt lässt sich qualitativ gut in der Abbildung erkennen. Aufgrund der geringen Anzahl an Messpunkten (51 x 51) konnten viele Details des Messobjektes durch die Messung jedoch nicht aufgelöst werden. Mit dem Versuchsaufbau können auch höhere Auflösungen gemessen werden. Die Messdauer verlängert sich proportional zur Anzahl der Messpunkte. Insgesamt waren die Amplituden der reflektierten Laserpulse im SWIR-Spektralbereich sehr niedrig. Einzelne Objekte können anhand der Farbunterschiede allerdings bereits gut unterschieden werden.

### **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 Fraunhofer ENAS und TU Chemnitz verteilt. Die Validierung der Projektergebnisse wurde in enger Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern durchgeführt.

Der Arbeitsschwerpunkt des Fraunhofer ENAS lag in der Entwicklung und Demonstration eines hyperspektralen LIDAR-Sensors im Labormaßstab als Forschungsfunktionsmuster. Dies umfasste die konstruktive Ausführung des optischen Basissystems, der Systemelektronik und der Datenerfassung. Dazu gehörten Algorithmen zur Auswertung der spektralen Messdaten und eine anwendungsspezifische Software zur Ansteuerung der Hardware sowie Erfassung und Verarbeitung der Daten. In zahlreichen Laborversuchen konnte die Funktionsweise des hyperspektralen LIDAR-Sensors nachgewiesen werden. Die Arbeiten und Versuche orientierten sich an einem dreistufigen Plan (siehe AP 1.3). Als erstes wurde ein Aufbau zur Aufnahme von spektralen Reflexionsbildern geschaffen. Dieser bildete die Grundlage für die Messungen der TU Chemnitz zur Entwicklung von Verfahren zur Identifikation anwendungsrelevanter Materialien. Die Aufnahme von spektralen Reflexionsbildern konnte zunächst in zwei Spektralbereichen (VIS und NIR) im Wellenlängenbereich von 450 nm bis 1.100 nm gezeigt werden. Im späteren Projektverlauf fand eine Erweiterung um den SWIR-Bereich von 1.100 nm bis 1.600 nm statt. Im zweiten Schritt wurde ein Aufbau zur Durchführung von Laufzeitmessungen mit einer einzelnen Wellenlänge erarbeitet. Es konnte gezeigt werden, dass ToF-Messungen im VIS und NIR Spektralbereich möglich sind. Ein für den SWIR-Bereich erforderliches NIR-SPCM konnte aufgrund der zu hohen Einkaufskosten nicht beschafft werden. Als Ersatzlösung wurde der InGaAs-Detektor eines Andor-Gitterspektrometers für Spektralmessungen ohne ToF eingesetzt. Im letzten Schritt des Arbeitsplanes wurde schließlich ein Aufbau zur kombinierten spektralen Laufzeitmessung für alle drei Messbereiche umgesetzt. Eine Spektralmessung im SWIR muss dabei immer mit einer ToF-Messung im VIS oder NIR kombiniert werden. Die Aufnahme spektraler Datenwürfel konnte erfolgreich in allen drei Spektralbereichen gezeigt werden.

#### *Zusammenfassung der Ergebnisse aus AP 6 und AP 7 (alle Partner)*

Im AP 6 (Algorithmen und Daten) wurden verschiedene Algorithmen zur Materialidentifikation, wie z. B. chemische Bildgebung, Spektrenvergleich, PCA, SVM und Random Forest, untersucht. Die Unterscheidung von Materialien aus dem Bahnumfeld (z. B. Eisen, Holz, Gestein, Textilien und Pflanzen) konnte damit gezeigt werden. Zur Ansteuerung der Hardware des hyperspektralen Basissystems und zur Erfassung der Messdaten wurde ein LabView-Programm entwickelt. Für die Datenverarbeitung und Analyse wurden Mathematica-Skripten verwendet. Im weiteren Projektverlauf wurde eine Messsoftware in der Programmiersprache Python zur Anzeige und Verarbeitung der Messdaten erarbeitet, mit dem Ziel der Optimierung und Beschleunigung der Datenverarbeitung sowie einer Vereinfachung der Benutzerinteraktion.

Im AP 7 (Labor- und Feldversuche) wurden zahlreiche Versuche und Experimente mit den entwickelten Versuchsaufbauten durchgeführt. Ein hyperspektraler LIDAR-Sensor wurde im Labormaßstab aufgebaut und seine Funktionsfähigkeit nachgewiesen. Mit diesem Basissystem können in seiner aktuellen Konfiguration kombinierte spektrale Laufzeitmessungen in den drei Spektralbereichen VIS, NIR und SWIR von 450 nm bis 1.600 nm durchgeführt werden. Die dabei entstehenden Datenwürfel beinhalten für jeden Messpunkt sowohl die Entfernung zum Messsystem, als auch die Intensität der Reflexion.

*Validierung mit den Ergebnissen aus AP 1 und AP 2 (alle Partner)*

Im AP 1 (Konzept und Spezifikation) wurde ein Konzept und eine Zielspezifikation für den hyperspektralen LIDAR-Sensor erarbeitet. In der folgenden Tabelle 1 wird die Zielspezifikation mit den Projektergebnissen verglichen.

Tabelle 1: Vergleich von Zielspezifikation und Projektergebnis (alle Partner)

<b>Parameter</b>	<b>Zielspezifikation</b>	<b>Projektergebnis</b>
Spektrale Auflösung über den gesamten Spektralbereich	10 nm	≤ 10 nm erreicht (1)
Entfernungsauflösung (Zeitauflösung)	15 cm (1 ns)	< 15 cm (1 ns) erreicht (2)
Maximale Entfernung	50 m (330 ns)	Mit dem Versuchsaufbau technisch möglich, aber im Projekt nicht nachgewiesen. (3)
Winkelbereich	+/- 25° horizontal +/- 20° vertikal	Im Projekt erreicht.
Winkelauflösung	1° horizontal und vertikal 100 x 40 Punkte	Im Projekt erreicht: 101 x 101 Punkte.

- (1) Die spektrale Auflösung wird u. a. von der Bandbreite der Lichtpulse bestimmt, wie diese vom Detektor registriert werden.
- (2) Der Versuchsaufbau erlaubt eine hochaufgelöste Bestimmung der Pulslaufzeit mit einer maximalen Auflösung von 10 ps, also weit unter 15 cm (siehe auch Abbildung 20).
- (3) Mit der MultiHarp 150 der Firma PicoQuant (TCSPC) kann eine Pulslaufzeit von 330 ns gemessen werden. Die derzeit aufgenommenen Histogramme messen sogar bis 1.310 ns. Die spezifizierte Entfernung liegt im Bereich der technischen Möglichkeiten des Versuchsaufbaus. Der praktische Nachweis konnte innerhalb des Labors jedoch nicht erbracht werden.

Im AP 2 wurde eine Nachfrageanalyse und Technologieprognose für den im Projekt entwickelten hyperspektralen LIDAR-Sensor durchgeführt. Die Entwicklung intelligenter Sensorik zur Umgebungs-, Abstands- und Fahrwegerkennung sowie zur Erkennung von Gegenständen wird von den Anwendern als wünschenswerte Verbesserung für die Zukunft angesehen (siehe AP 2 der TU Chemnitz). Insgesamt gewinnen LIDAR-Sensoren eine immer größere Bedeutung. Die Anwendungen sind vielzählig 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 (siehe AP 2 der TU Chemnitz).

*Miniaturisierungskonzept auf der Basis von AP 8 (alle Partner)*

In AP 8 (Technologiesteuerung und -bewertung) wurden System- und Technologiekonzepte für die Miniaturisierung des hyperspektralen LIDAR-Sensors erarbeitet. Dabei wurde sowohl eine schrittweise, eher konservative Weiterentwicklung des Sensors betrachtet, als auch Zukunftsinnovationen wie LIDAR-PICs (siehe AP 8.1 der TU Chemnitz).

Ein realistisches Miniaturisierungskonzept auf der Grundlage der im Projekt erzielten Ergebnisse besteht aus Sicht der Projektpartner aus den folgenden Schritten: (1) einem anwendungsspezifischen, miniaturisierten Design des elektrooptischen Basissystems, (2) der vollständigen Integration aller Komponenten (einschließlich der Datenverarbeitung) in ein kompaktes Gehäuse, (3) die Verwendung von Einschubkarten (z. B. PCIe) für TCSPC, (4) die Verwendung von auf die Anwendung abgestimmten Einzellasern mit ausgewählten Wellenlängen anstatt des Weißlicht-Lasersystems, (5) die Verwendung von Mikrosiegeln anstatt des großen Galvo-Scanners, (6) die Nutzung von miniaturisierten APD-Modulen mit angepasster Kühlung und (7) der Einsatz von FPGA zur Miniaturisierung und Leistungssteigerung der Datenverarbeitung und Materialklassifikation mit Echtzeitfähigkeit der Datenanalyse.

Darüber hinaus können Projekte zur Erforschung und Vorausbildung von Einzeltechnologien im Bereich der Flash-LIDAR-Systeme und der LIDAR-PICs in Betracht gezogen werden.

#### *Verwertungsprognose aus AP 2 und AP 8 (alle Partner)*

Die Anwendungsmöglichkeiten von hyperspektralen LIDAR-Sensoren sind weitreichend, denn Objekte werden nicht mehr nur mit ihrer geometrischen Struktur wahrgenommen, sondern darüber hinaus über ihre (Oberflächen-)Beschaffenheit. Das Reflexionsspektrum vieler Materialien ist charakteristisch und kann über mathematische Algorithmen und Bibliotheken sehr genau unterschieden werden. Neben einer Anwendung für das autonome Fahren sind weiterhin denkbar: (1) Klassifizierung der Vegetation im Themenfeld Smart Farming, (2) Charakterisierung in der Mineralogie, z. B. im Bergbau und in Bohrlöchern, (3) Untersuchungen in der Medizintechnik, (4) Stand-off-Detektion von gefährlichen Substanzen in der Sicherheitstechnik und (5) Unterscheidung zwischen Personen und Gütern in der Logistik, Lagerhaltung und im unbemannten Transportverkehr (siehe AP 2 und AP 8 der TU Chemnitz).

## **2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die im Rahmen des Projektes entstandenen Kosten betragen insgesamt 205.883,73 EUR. Sie liegen damit 208,69 EUR unter der bewilligten Zuwendung. Die Gelder wurden im Wesentlichen für Personalkosten zur Beschäftigung wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer ENAS (203.949,41 EUR) verwendet.

Gegenüber den geplanten Kosten wurden 16.156,99 EUR mehr Personalkosten (Pos. 0837) benötigt, die aber im Wesentlichen durch Einsparungen bei den Dienstreisen (Pos. 0838, 3.300,00 EUR) ausgeglichen wurden. Dienstreisen wurden u. a. bedingt durch die Corona-Pandemie und durch die sich ergebenden digitalen Möglichkeiten zum Austausch eingespart.

Zudem wurden die in Zusammenarbeit mit der TU Chemnitz 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 von Gesprächen wurden online durchgeführt. Dies wurde von den teilnehmenden Firmen als sehr positiv und effizient angesehen.

Zudem waren gegenüber der Planung bei Antragstellung weniger Kosten für die Beschaffung von optomechanischen Komponenten und optischen Bauelementen erforderlich (Pos. 0813, Einsparung in Höhe von 13.065,68 EUR). 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 das Fraunhofer ENAS durchgeführten Arbeiten hätten ohne die bereitgestellte Förderung nicht durchgeführt werden können. Die erzielten Ergebnisse und die bei der Projektbearbeitung gewonnenen Erkenntnisse bieten dem Fraunhofer ENAS 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 das Fraunhofer ENAS schwerpunktmäßig mit der Entwicklung und Demonstration eines hyperspektralen LIDAR-Sensors im Labormaßstab als Funktionsmuster. Dies umfasste die konstruktive Ausführung des optischen Basissystems, der Systemelektronik und der Datenerfassung. Dazu gehörten Algorithmen zur Auswertung der spektralen Messdaten und eine anwendungsspezifische Software zur Ansteuerung der Hardware sowie Erfassung und Verarbeitung der Daten. In zahlreichen Laborversuchen konnte die Funktionsweise des hyperspektralen LIDAR-Sensors nachgewiesen werden.

Die erarbeiteten Projektergebnisse sind von hohem Nutzen für das Fraunhofer ENAS und insgesamt von großer praktischer Verwertbarkeit. Sie stärken die wissenschaftliche Kompetenz in den Bereichen Optik, Elektronik und Datenerfassung sowie maschinelles Lernen. 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 anwendungsorientierte Forschungsprojekte initiiert werden. Besonders wertvoll sind die zu erwartenden Fortschritte bei der automatischen Auswertung der Sensormessdaten mit speziellen auf maschinellem Lernen basierenden Algorithmen und Hardwarekomponenten. Diese werden für potentielle Industriepartner voraussichtlich von großem Interesse sein. Der Industrie können die Forschungsergebnisse über anwendungsorientierte Auftragsforschung zur Verfügung gestellt werden. Dies ist ein weiteres wichtiges Verwertungspotential für das Fraunhofer ENAS.

Die Forschungsergebnisse des Fraunhofer ENAS fließen zudem in die Ausbildung von Studierenden und Doktoranden ein. Während der Projektlaufzeit wurden in Zusammenarbeit mit der TU Chemnitz ein studentisches Praktikum und eine Bachelorarbeit betreut und erfolgreich abgeschlossen. Zwei weitere Masterarbeiten zum Thema (ebenfalls in Zusammenarbeit mit der TU Chemnitz) wurden nach Projektabschluss begonnen, um die Projektergebnisse gezielt weiterzuentwickeln. Auch in Workshops und Seminare 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 Fraunhofer ENAS und TU Chemnitz in einem Journal oder auf einer Fachkonferenz (z. B. SPIE Photonics Europa oder SPIE Photonics West) vorzustellen.