

# Schlussbericht

## zum Vorhaben

Thema:

**Entwicklung eines optisch basierten Systems zur qualitativen und quantitativen Zustandserfassung von Waldwegen (CONTURA, 2220NR061)**

Zuwendungsempfänger:

**Teilvorhaben 1: Fachhochschule Erfurt, Erfurt**

**Teilvorhaben 2: Technische Universität Ilmenau, Ilmenau**

**Teilvorhaben 3: GEO Net solution GmbH, Leipzig**

**Teilvorhaben 4: Zwerrenz Automatisierungstechnik GmbH, Suhl**

**Teilvorhaben 5: VISION & CONTROL GmbH, Suhl**

**Teilvorhaben 6: NavLog GmbH, Groß-Umstadt**

**Teilvorhaben 7: HD Vision Systems GmbH, Heidelberg**

Förderkennzeichen:

**Teilvorhaben 1: 2220NR061A**

**Teilvorhaben 2: 2220NR061B**

**Teilvorhaben 3: 2220NR061C**

**Teilvorhaben 4: 2220NR061D**

**Teilvorhaben 5: 2220NR061E**

**Teilvorhaben 6: 2220NR061F**

**Teilvorhaben 7: 2220NR061G**

Laufzeit:

**01.04.2021 bis 30.09.2024**

Monat der Erstellung:

**01/2025**

Datum der Veröffentlichung:

**04.08.2025**

Gefördert durch:



**Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft**

**aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.



# Inhaltsverzeichnis

<b>I.</b>	<b>Kurzbericht</b>	<b>1</b>
1.	Aufgabenstellung	1
2.	Planung und Ablauf des Vorhabens	1
3.	Resümee der wesentlichen Ergebnisse	4
a)	Arbeitspakete und Meilensteine	4
b)	Zusammenfassung	5
<b>II.</b>	<b>Ausführliche Darstellung der Ergebnisse</b>	<b>6</b>
1.	Erzielte Ergebnisse	6
	Arbeitspaket 1: Gesamtkonzeption des CONTURA Mess- und Auswertesystems	6
	Arbeitspaket 2: Entwicklung Planungstool	6
	Arbeitspaket 3: Entwicklung eines Parametersystems für die KI	7
	Arbeitspaket 4: Entwicklung Gesamtkonzept	8
	Arbeitspaket 5: Hardwareentwicklung 3D-Aufnahmesystem	13
	Arbeitspaket 6: Entwicklung Geräteträger	19
	Arbeitspaket 7: Entwicklung Systemkalibrierung	21
	Arbeitspaket 8: Entwicklung künstliches neuronales Netz	25
	Arbeitspaket 9: Messdatenfusion	28
	Arbeitspaket 10: Entwicklung Auswertesoftware Wegezustand	30
	Arbeitspaket 11: Entwicklung Berechnungstool Instandsetzung	35
	Arbeitspaket 12: Evaluation Gesamtdemonstrator	38
2.	Verwertung	40
a)	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen	40
b)	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	40
c)	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	40
d)	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	41
3.	Erkenntnisse von Dritten	41
4.	Veröffentlichungen	41
	<b>ANHANG</b>	<b>43</b>
	<b>Teilvorhaben 1: 2220NR061A FHE</b>	<b>43</b>
1.	<b>Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens</b>	<b>43</b>
2.	<b>Bearbeitete Arbeitspakete</b>	<b>43</b>
	Arbeitspaket 01: Gesamtkonzeption des CONTURA Mess- und Auswertesystems	43
	Arbeitspaket 02: Entwicklung Planungstool	43
	Arbeitspaket 03: Entwicklung eines Parametersystems für die KI	43
	Arbeitspaket 11: Entwicklung Berechnungstool Instandsetzung	43
	Arbeitspaket 12: Evaluation Gesamtdemonstrator	44
3.	<b>Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens</b>	<b>44</b>
	<b>Teilvorhaben 2: 2220NR061B TUI</b>	<b>45</b>
1.	<b>Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens</b>	<b>45</b>
2.	<b>Bearbeitete Arbeitspakete</b>	<b>45</b>
	Arbeitspaket 01: Gesamtkonzeption des CONTURA Mess- und Auswertesystems	45

Arbeitspaket 04: Entwicklung Gesamtsensorkonzept.....	45
Arbeitspaket 07: Entwicklung Systemkalibrierung .....	46
Arbeitspaket 09: Messdatenfusion .....	48
Arbeitspaket 12: Evaluation Gesamtdemonstrator .....	51
<b>3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....</b>	<b>53</b>
<b>Teilvorhaben 3: 2220NR061C GEO .....</b>	<b>54</b>
<b>1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens .....</b>	<b>54</b>
<b>2. Bearbeitete Arbeitspakete .....</b>	<b>54</b>
Arbeitspaket 01: Gesamtkonzeption des CONTURA Mess- und Auswertesystems .....	54
Arbeitspaket 04: Entwicklung Gesamtsensorkonzept.....	54
Arbeitspaket 07: Entwicklung Systemkalibrierung .....	55
Arbeitspaket 09: Messdatenfusion .....	59
Arbeitspaket 10: Entwicklung Auswertesoftware Wegezustand .....	61
Arbeitspaket 12: Evaluation Gesamtdemonstrator .....	64
<b>3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....</b>	<b>64</b>
<b>Teilvorhaben 4: 2220NR061D ZAT .....</b>	<b>65</b>
<b>1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens .....</b>	<b>65</b>
<b>2. Bearbeitete Arbeitspakete .....</b>	<b>65</b>
Arbeitspaket 01: Gesamtkonzeption des CONTURA Mess- und Auswertesystems .....	65
Arbeitspaket 06: Entwicklung Geräteträger.....	65
Arbeitspaket 07: Entwicklung Systemkalibrierung .....	65
Arbeitspaket 12: Evaluation Gesamtdemonstrator .....	65
<b>3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....</b>	<b>65</b>
<b>Teilvorhaben 5: 2220NR061E V&amp;C .....</b>	<b>66</b>
<b>1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens .....</b>	<b>66</b>
<b>2. Bearbeitete Arbeitspakete .....</b>	<b>66</b>
Arbeitspaket 01: Gesamtkonzeption des CONTURA Mess- und Auswertesystems .....	66
Arbeitspaket 04: Entwicklung Gesamtsensorkonzept.....	66
Arbeitspaket 05: Hardwareentwicklung 3D-Aufnahmesystem.....	71
Arbeitspaket 12: Evaluation Gesamtdemonstrator .....	76
<b>3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....</b>	<b>77</b>
<b>Teilvorhaben 6: 2220NR061F Navlog.....</b>	<b>78</b>
<b>1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens .....</b>	<b>78</b>
<b>2. Bearbeitete Arbeitspakete .....</b>	<b>78</b>
Arbeitspaket 01: Gesamtkonzeption des CONTURA Mess- und Auswertesystems .....	78
Arbeitspaket 02: Entwicklung Planungstool .....	78
Arbeitspaket 03: Entwicklung eines Parametersystems für die KI.....	78
Arbeitspaket 10: Entwicklung Auswertesoftware Wegezustand .....	78
Arbeitspaket 12: Evaluation Gesamtdemonstrator .....	79
<b>3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....</b>	<b>79</b>
<b>Teilvorhaben 7: 2220NR061G HDV .....</b>	<b>90</b>
<b>1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens .....</b>	<b>90</b>
<b>2. Bearbeitete Arbeitspakete .....</b>	<b>90</b>

Arbeitspaket 01: Gesamtkonzeption des CONTURA Mess- und Auswertesystems .....	90
Arbeitspaket 03: Entwicklung eines Parametersystems für die KI .....	90
Arbeitspaket 08: Entwicklung künstliches neuronales Netz .....	90
Arbeitspaket 10: Entwicklung Auswertesoftware Wegezustand .....	92
Arbeitspaket 12: Evaluation Gesamtdemonstrator .....	93
<b>3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....</b>	<b>93</b>



## I. Kurzbericht

### 1. Aufgabenstellung

Im Projekt CONUTRA wurde die Bearbeitung der Entwicklung eines komplexen und effizient einsetzbaren Messsystems zur vollautomatisierten Zustandserfassung von forstlichen Wegeanlagen (Fahrbahndecke und Lichtraumprofil), Zuordnung in Schadenkategorien und Ableitung notwendiger Maßnahmen einschließlich deren Kostenkalkulation umgesetzt.

### 2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Gesamtbearbeitungszeit belief sich zum Start des Projektes im Jahr 2021 auf 3 Jahre. Der Projektstart war durch einige Hindernisse geprägt, zum einen durch die damals vorherrschende COVID-19-Pandemie und zum anderen durch langwierige Personalwindung einzelner Projektpartner. Mit der Verzögerung des Projekts kam es 2023 zur Überlegung eine kostenneutrale Verlängerung anzustreben, um somit die Ziele des Projekts vollumfänglich zu erreichen. Dieser Antrag wurde genehmigt, so dass das Projektende vom 31.03.2024 auf den 30.09.2024 verschoben werden konnte. Im Nachfolgenden ist eine Tabelle zu finden, die den Projektablauf schildert.

<b>AP</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Beteiligte Partner</b>	<b>Geschätzte Dauer</b>
<b>1</b>	<b>Gesamtkonzeption des CONTURA Mess- und Auswertesystems</b>		
<b>1.1</b>	Feststellung Bedarfe, Zuständigkeiten der Arbeitsinhalte, Detailaufstellung Projektplan, individuelle Lastenhefterstellung, Ableitung eines gemeinsamen Lastenhefts	Alle Partner	<b>6,5 PM</b>
<b>2</b>	<b>Entwicklung Planungstool</b>		<b>17 PM</b>
<b>2.1</b>	Grobkonzeption System Planungstool	FHE	3 PM
<b>2.2</b>	Entwicklung Planungstool für Logistik	FHE	3 PM
<b>2.3</b>	Entwicklung Planungstool für Wegeinstandhaltungskosten	FHE	3 PM
<b>2.1</b>	Grobkonzeption System Planungstool	NavLog	3 PM
<b>2.2</b>	Entwicklung Planungstool für Teilbereich Logistik	NavLog	2 PM
<b>2.3</b>	Entwicklung Planungstool für die Wegeinstandhaltung	NavLog	3 PM
<b>3</b>	<b>Entwicklung eines Parametersystems für die KI</b>		<b>12,5 PM</b>
<b>3.1</b>	Konzeption Parametersystem	FHE	4,5 PM
<b>3.1</b>	Ableitung von Fehlerklassen für die automatische Identifikation	HD Vision	2PM
<b>3.1</b>	Klassifizierung typischer Lichtraumprofile	NavLog	3 PM
<b>3.2</b>	Klassifikation typischer Wegeprofile	NavLog	3 PM
<b>4</b>	<b>Entwicklung Gesamtsensorkonzept</b>		<b>32 PM</b>
<b>4.1</b>	Gesamtkonzeption übergeordnetes Sensorkonzept M1-M3 sowie Metadaten	TUI	0,75 PM
<b>4.2</b>	Systemkonzept für die Abtastung des Lichtraumprofils angrenzender Konturen Messbereich Konturen Messbereich M20	TUI	0,75 PM
<b>4.3</b>	Systemkonzept für die Abtastung des Lichtraumprofils Messbereich M3	TUI	0,75 PM
<b>4.4</b>	Voruntersuchungen zu charakteristischen Problemen bei der Oberflächenabtastung (Wegeprofil, M2)	TUI	2,25 PM
<b>4.5</b>	Voruntersuchungen zu charakteristischen Problemen bei der Oberflächenabtastung (Lichtraumprofil, M3)	TUI	2,25 PM

4.1	Untersuchung und Entwicklung Sensorkonzept für die bodennahe Abtastung	V&C	5PM
4.6	Umsetzung Sensorkonzept für die Lichtraumabdeckung und Seitenbereiche M2, M3	TUI	3 PM
4.1	Entwicklung Sensorkonzept für den GPS Dateneingang	GEO Net solution	5 PM
4.2	Entwicklung Beleuchtungskonzept für die Bodenabtastung	V&C	5 PM
4.7	Zusammenführung derteilsensorkonzepte und Umsetzung in einem Gesamtsensordemonstrator	TUI	2,25 PM
4.2	Gesamtsoftwarekonzept für die Erfassung, Kommunikation und Front-End Steuerung, Sensorsystem	GEO Net solution	5 PM
<b>5</b>	<b>Hardwareentwicklung 3D-Aufnahmesystem</b>		<b>23 PM</b>
5.1	Konzeption 3D-Messsystem Wegekörper M3 Fahrbahn	V&C	2 PM
5.2	Sytemlayout für die Elektronik, Optik & Datenverarbeitung des 3D-Erfassungssystem	V&C	6 PM
5.3	Aufbau und Umsetzung des Hardwaredemonstrator für die Erfassung Wegekörper M3	V&C	6 PM
5.4	Softwareschnittstellen für die Datenausgabe (Shchnittstelle zu Messdatenfusion und Konfigurations-HMI)	V&C	4 PM
5.5	Evaluation 3D Messsystem Wegekörper M3	V&C	4 PM
<b>6</b>	<b>Entwicklung Geräteträger</b>		<b>23 PM</b>
6.1	Konzept Gerätekonstrktion für Anbaumesssystem CONTURA	Zwerrenz	2 PM
6.2	Projektierung und technisches Prinzip für ein Fahrzeugadaptives CONTURA-Messsystem	Zwerrenz	5 PM
6.3	Auskonstruktion des besten technischen Prinzips	Zwerrenz	5 PM
6.4	Fertigung	Zwerrenz	2 PM
6.5	Evaluation und Optimierung	Zwerrenz	5 PM
6.6	Anpassung Geräteträger	Zwerrenz	4 PM
<b>7</b>	<b>Entwicklung Systemkalibrierung</b>		<b>14 PM</b>
7.1	Erstellung Kalibrierkonzept 3D-Erfassung	TUI	1,5 PM
7.2	Evaluation und Optimierung (Bestimmung Streuung, Gesamtverhalten nach der Kalibrierung, 3D-Erfassung)	TUI	1,5 PM
7.1	Erstellung Kalibrierkonzept GPS-Koordinaten, Inertialsysteme	GEO Net solution	2 PM
7.2	Evaluation und Optimierung (Bestimmung Streuung, Gesamtverhalten nach der Kalibrierungl, Georeferenzierung)	GEO Net solution	3 PM
7.1	Konzept und technisch Prinzip für Kalibrierkörper 3D	Zwerrenz	2 PM
7.2	Fertigung, Montage und Evaluation 3D Kalibrierkörper	Zwerrenz	4 PM
<b>8</b>	<b>Entwicklung künstliches neuronales Netz</b>		<b>25 PM</b>

8.1	Gesamtkonzeptansatz des künstlichen neuronalen Netzes	HD Vision	3 PM
8.2	Erzeugung von annotierten Testdatensätzen für das Training	HD Vision	3 PM
8.3	Entwicklung und Auswahl eines geeigneten Netzwerkmodells	HD Vision	6 PM
8.4	Algorithmus zur automatischen Ableitung von Merkmalen aus dem Gesamt-3D-Bilddatensatz	HD Vision	6 PM
8.5	Performancetest des fertigen Faltungsnetzwerkes	HD Vision	4 PM
8.6	Entwicklung einer Schnittstelle für die weitere Verarbeitung	HD Vision	3 PM
<b>9</b>	<b>Messdatenfusion</b>		<b>2PM</b>
9.1	Konzept Messdatenfusion multimodale Abtastung	TUI	4,5 PM
9.2	Umsetzung 3D Datenfusion, Wegeprofil und Lichtraumprofil	TUI	4,5 PM
9.1	Modellansatz für die Messdatenfusion von 360° 3D Daten und GIS Daten	GEO Net solution	6 PM
9.2	Übergabe Datenschnittstelle für weitere Verarbeitung	GEO Net solution	6 PM
<b>10</b>	<b>Entwicklung Auswertesoftware Wegezustand</b>		<b>28 PM</b>
10.1	Konzeption Auswertesoftware Wegezustand	GEO Net solution	3 PM
10.2	Schnittstellenentwicklung Front End für verschiedene Auswertefunktionen	GEO Net solution	3 PM
10.1	Datenmodell + Dateninterface NavLog	NavLog	11 PM
10.2	Update modul für Mehrfachbefahrungen (inkl. Historie)	NavLog	5 PM
10.1	Softwarearchitektur für die Verarbeitung der ausgewerteten Date unter forstwirtschaftlichen Aspekten	HD Vision	6 PM
<b>11</b>	<b>Entwicklung Berechnungstool Instandsetzung</b>		<b>10,5 PM</b>
11.1	Konzept Berechnungstool Instandsetzung	FHE	2,25 PM
11.2	Softwareschnittstelle für die benötigten Daten	FHE	3 PM
11.3	Entwicklung Algorithmus zur Kostenabschätzung	FHE	3 PM
11.4	Planung und Umsetzung Benutzerschnittstelle	FHE	2,25 PM
<b>12</b>	<b>Evaluation Gesamtdemonstrator</b>		<b>17,5 PM</b>
12.1	Auswahl und Evaluation von Teststrecken	FHE	2,25 PM
12.1	Optimierung und Fehlerbeseitigung multimodale 3D-Erfassung	TUI	2,25 PM
12.1	Optimierung und Fehlerbeseitigung Erkennungssystem	HD Vision	2 PM
12.1	Finale Optimierung und Fehlerbeseitigung CONTURA-Messsystem	Zwerrenz	2 PM
12.1	Optimierung und Fehlerbeseitigung 3D-Wegkörpererfassung M3	V&C	2 PM
12.1	Optimierung und Fehlerbeseitigung GPS-Referenzierung	GEO Net solution	2 PM
12.1	Optimierung und Fehlerbeseitigung Gesamtsystem	NavLog	5 PM

### 3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

#### a) Arbeitspakete und Meilensteine

Der im Antrag spezifizierte Projektplan wurde während der Bearbeitung des Projekts aktualisiert, die angegebenen Bearbeitungszeiträume sind aus dem aktualisierten Arbeitsplan entnommen. Durch die kostenneutrale Verlängerung des Projekts bis zum 30.09.2024 haben sich auch hier wieder die Bearbeitungszeiträume der letzten Arbeitspakete nachhinten geschoben.

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1 Gesamtkonzeption des CONTURA Mess- und Auswertungssystems	01/2021	In einem Kickoff-Meeting aller Projektpartner wurden die zu erreichende Ziele, sowie die forstlichen und technischen Anforderungen an das zu entwickelnde System herausgearbeitet. Bestandteil war auch die Abstimmung bezüglich der Zusammenarbeit der Projektpartner in den einzelnen Arbeitspaketen. Beim ersten Zwischenmeeting halfen die bis dahin von den Projektpartnern durchgeführten Evaluierungen von Entwicklungen und Auslotungen der Möglichkeiten bei der Konkretisierung eines optimierten Gesamtkonzeptes für das System CONTURA. Das Arbeitspaket ist abgeschlossen.
AP 2 Entwicklung Planungstool	02/2021 bis 02/2022	Die Entwicklung eines bundesweit einheitlichen Klassifizierungssystems für Wegezustände durch die FHE und NavLog konnte nach verspätetem Beginn erfolgreich umgesetzt werden. In Kooperation mit den beteiligten Landesforstverwaltungen und dem Schwesterprojekt Intelliway wurde ein System bestehend aus vier Zustandsstufen herausgearbeitet. Real auftretende Schäden wurden als Grundlage für weitere AP detektiert und zugeordnet. Mit der Prüfung des Klassifizierungssystems durch den KWF-Arbeitsausschuss Walderschließung ist das Arbeitspaket abgeschlossen.
AP 3 Entwicklung eines Parametersystems für die KI	03/2021 bis 10/2022	In Abstimmung und Zusammenarbeit mit FHE und NavLog leitete HD-Vision die Fehlerklassen für die automatische Identifikation aus Testdaten von GEO Net ab. Die Klassifikation typischer Wege- und Lichtraumprofile wurde durch die NavLog vorgenommen. Das Arbeitspaket ist abgeschlossen.
AP 4 Entwicklung Gesamtsensorkonzept	02/2021 bis 05/2022	Die einzelnen Verbundpartner konnten nach umfangreichen Voruntersuchungen die optimalen Hardwarekomponenten für das Gesamtsensorkonzept erarbeiten. Dazu zählen neben Kameras und Sensoren für die Aufnahme auch Beleuchtung und Positionierungshardware. Voruntersuchungen zur praktischen Umsetzung wurden ebenfalls vollzogen. Das Arbeitspaket ist abgeschlossen.
AP 5 Hardwareentwicklung 3D- Aufnahmesystem	12/2021 bis 10/2023	Nach umfangreichen Vorüberlegungen und Versuchen entwickelte V & C ein Systemlayout in Abstimmung mit den Verbundpartnern. Im Anschluss folgte der Aufbau des Hardwaredemonstrators inklusive Beleuchtung. Für anstehende Praxisfahrten ist die Kalibrierung vorbereitet. Das Arbeitspaket ist weitestgehend abgeschlossen.
AP 6 Entwicklung Geräteträger	02/2021 bis 04/2023	Das in Abstimmung mit der TUI, GeoNet und V&C projektierte Trägersystem ist konzipiert, gefertigt und montiert worden. Optimierungen wurden im Zuge der darauffolgenden Tests umgesetzt und eine Zulassung des Fahrzeuges mit den entsprechenden Umbauten ist erfolgt. Das Arbeitspaket ist abgeschlossen.
AP 7 Entwicklung Systemkalibrierung	07/2021 bis 10/2023	Bei diesem AP wurde durch GeoNet und die TU Ilmenau ein Kalibrierkonzept ausgearbeitet und dieses mit Festlegung einzelnen Sensoren in verschiedenen Tests verifiziert. Das Arbeitspaket ist abgeschlossen.

<b>Arbeitspakete (AP)</b> (lt. Planung im Antrag)	<b>Bearbeitungszeitraum</b> (lt. Balkenplan im Antrag)	<b>Zielerreichung</b>
AP 8 Entwicklung künstliches neuronales Netz	04/2021 bis 04/2023	Auf Grundlage der Klassifizierung und von Testdatensätzen konnte HDV ein künstlich neuronales Netz annotieren und im Hinblick auf eine hohe Erkennungsrate bei minimaler Datenqualität optimieren. Das Arbeitspaket ist abgeschlossen.
AP 9 Messdatenfusion	05/2021 bis 09/2023	Das Modell der Messdatenfusion von GEO Net wurde durch die TU Ilmenau aufgegriffen. Es diente als Grundlage für die Entwicklung eines Timing Systems, welches die Verarbeitbarkeit des bei der Befahrung akquirierten Materials sicherstellt. Eine endgültige Verifizierung des Systems ist ausstehend. Das Arbeitspaket ist weitestgehend abgeschlossen.
AP 10 Entwicklung Auswertesoftware Wegezustand	07/2021 bis 09/2024	Das Datenmodell der NavLog zur Speicherung erfasster Zustände ebenso wie die Erkennungssoftware von HD Vision ist in das bestehende System implementiert. Eine Auswertesoftware mit den erforderlichen Aspekten und die Schaffung notwendiger Schnittstellen wurde durch GEO Net realisiert. Das Front End befindet sich in der Entwicklung. Das Arbeitspaket ist abgeschlossen.
AP 11 Entwicklung Berechnungstool Instandsetzung	08/2022 bis 09/2024	Ein Berechnungstool zur Instandsetzung wurde durch die FHE in Zusammenarbeit mit dem Projekt Intellway konzeptioniert und wurde in einem Unterauftrag umgesetzt. Eine Schnittstelle in Form eines Webclients ist in Abstimmung mit der NavLog gefunden, in der dann das Tool integriert wird. Das Arbeitspaket ist abgeschlossen.
AP 12 Evaluation Gesamtdemonstrator	03/2023 bis 09/2024	Für die Evaluation wurden Teststrecken im Wald nahe Ilmenau ausgewählt. Die Funktionsfähigkeit konnte erfolgreich nachgewiesen und evaluiert werden. Das Arbeitspaket ist abgeschlossen.

<b>Meilensteine (M)</b> (lt. Planung im Antrag)	<b>Fälligkeit</b> (lt. Balkenplan im Antrag)	<b>Zielerreichung</b>
M 1 Erstellung Lastenheft	Q1/2021	Zu Beginn, im Nachgang der Kick-Off Veranstaltung, wurde ein Lastenheft auf Grundlage des Kick-Off-Resultats entwickelt. Dieses beinhaltet die forstlichen Anforderungen und unterliegt im Zusammenhang mit dem Fortschreiten der Entwicklung des Projektes einer gewissen Dynamik. Die Ableitungen, welche sich vor allem technisch aus diesem Heft ergeben, bilden die Grundlage für die Arbeit der jeweiligen Projektpartner.
M 2 3D Sensoraufnahmesystem	Q1/2022	Das Gesamtsensorkonzept ist nach weitreichenden theoretischen und praktischen Untersuchungen festgeschrieben und wurde von den jeweiligen Projektpartnern technisch umgesetzt und im Laufe des Projektes optimiert.
M 3 Fertiges Datenmodell	Q1/2024	Die Entwicklung des Datenmodells ist abgeschlossen und die dafür notwendigen Schnittstellen eingerichtet. Mit Hilfe der akquirierten Daten können qualifizierte Aussagen über Wegezustände getroffen und mit dem Berechnungstool Kosten kalkuliert werden.

## **b) Zusammenfassung**

Das Contura-Projekt ist als erfolgreich abgeschlossenes Projekt anzusehen. Trotz des pandemiebedingten Starts - welcher einige Beeinträchtigungen und Erschwernisse hinsichtlich des ursprünglichen Projektplans und dessen Umsetzung bedeutete – ist es gelungen, alle Arbeitspakete ergebnisreich abzuarbeiten und somit einen funktionsfähigen Gesamtdemonstrator umzusetzen. Es wurden sowohl alle methodischen Entwicklungsziele (Schadklassen etc.), als auch die hard- und softwareseitigen Entwicklungsziele erreicht. Die erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem Schwesterprojekt „Intellway“ gewährleistete die Synchronisation inhaltlicher Schnittmengen, wovon beide Projektergebnisse profitieren.

## II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

### 1. Erzielte Ergebnisse

Nachfolgend werden die erzielten Ergebnisse nach Arbeitspaketen unterteilten Abschnitten dargestellt.

#### Arbeitspaket 1: Gesamtkonzeption des CONTURA Mess- und Auswertesystems

Das Kick-Off-Meeting markierte den offiziellen Start der Bearbeitung für alle Projektpartner, insbesondere für die Fachhochschule Erfurt (FHE) und NavLog. In diesem Rahmen wurden die ersten Arbeitspakete erarbeitet und eine enge Abstimmung zwischen den Partnern vorgenommen, unter anderem während des Arbeitsausschusses Waldwegebau des Kuratoriums für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (KWF). Im Zuge dieser Zusammenarbeit wurde eine Kooperation zwischen Wegebauexperten, dem Projekt Intelliway und CONUTRA ins Leben gerufen, die beim KWF-Arbeitsausschuss vorgestellt wurde. Diese Initiative legte den Grundstein für weitere Kooperationen.

Im Rahmen des Intelliway-Workshops des KWF wurde die Kooperation offiziell besiegelt. In dieser Phase des Projekts trägt die Technische Universität Ilmenau (TUI) die Verantwortung für die Erfassung relevanter Merkmale des Waldweges sowie der geltenden Randbedingungen. Besonders im Fokus stehen dabei die Abmaße und die geometrische Form der Objekte sowie der Erfassungsbereiche selbst. Dies ermöglicht eine übersichtliche Auslegung der Sensorik in konzeptioneller Form.

Ein zentraler Bestandteil des Projekts war das Lastenheft, welches konkrete Invarianten und Rahmenbedingungen für alle Partner verbindlich definiert. Hierbei wurden die ersten wesentlichen konstruktiven Invarianten skizziert, die für die Erfassung von Randbedingungen und Anforderungen von Bedeutung waren. Darüber hinaus wurde ein Lösungskatalog entwickelt, der sowohl bestehende als auch neuartige Lösungen umfasst.

#### Arbeitspaket 2: Entwicklung Planungstool

Im Rahmen des KWF-Workshops wurden verschiedene Varianten der Zustandsdarstellung entwickelt, die auf die spezifischen Anforderungen der Praxis zugeschnitten sind. Einer der innovativen Ansätze ist das Farbskalenmodell, das den Detailgrad des Wegezustands in Abhängigkeit vom gewählten Maßstab widerspiegelt. Dieses Modell ermöglicht eine separate Darstellung von Weg, Graben und Lichtraumprofil, dies entspricht den Vorstellungen der Praktiker in hohem Maße. Die getrennte und feingliedrige Erfassung der Zustände der räumlichen Komponenten ist entscheidend für eine differenzierte Analyse und Bewertung. Die Darstellung erfolgt mit einer Genauigkeit von Laufmetern, womit eine präzise Dokumentation und Nachverfolgbarkeit der Zustände gewährleistet wird. Die durch die NavLog erstellten 3D-Aufnahmen ermöglichte die erstmalige Schaffung von Geländemodellen für das Projekt. Hiermit konnten Querprofile von Wegen (Spurrinnen, Neigungsverhältnisse, Schlaglöcher) sichtbar gemacht werden und dienen somit als Grundlage der vollkommen objektiven Bewertung zur Findung und Differenzierung von Schadklassen in Abhängigkeit des Verhaltens derer Funktionen und deren Ableitungen.

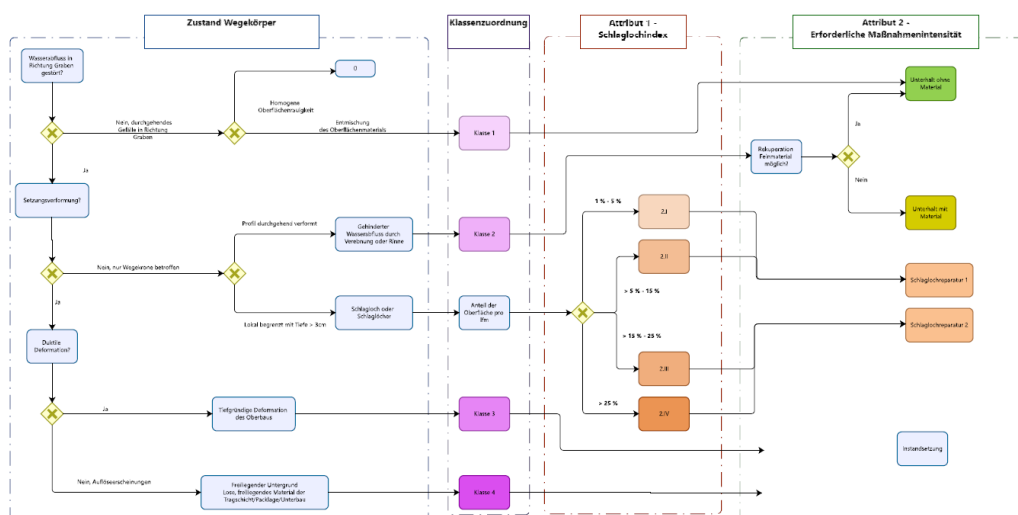


Abbildung 1: Zustandsklassen des Wegekörpers

Anhand eines in diesem Zuge entwickelten Bestimmungsschlüssels kann ein Weg klassifiziert werden (Abbildung 1). Dieser Schlüssel beinhaltet für die jeweiligen Stufen Grenzwerte und Parameter. Aufgrund ihrer punktuellen Ausformung werden Schlaglöcher separat nach einem bestimmten Index erfasst. Für alle Zustandsklassen wurden entsprechende Wegeinstandhaltungsmaßnahmen festgeschrieben, unabhängig von der Technik. Die Zustandsklassen für Gräben wurden ebenfalls evaluiert (Abbildung 2). Sofern vorhanden und

notwendig unterscheiden sich hier nur drei Zustandsstufen: funktionaler Graben, vorhandener Graben und dysfunktionaler Graben, jeweils mit den entsprechenden Grenzwerten und Parametern.

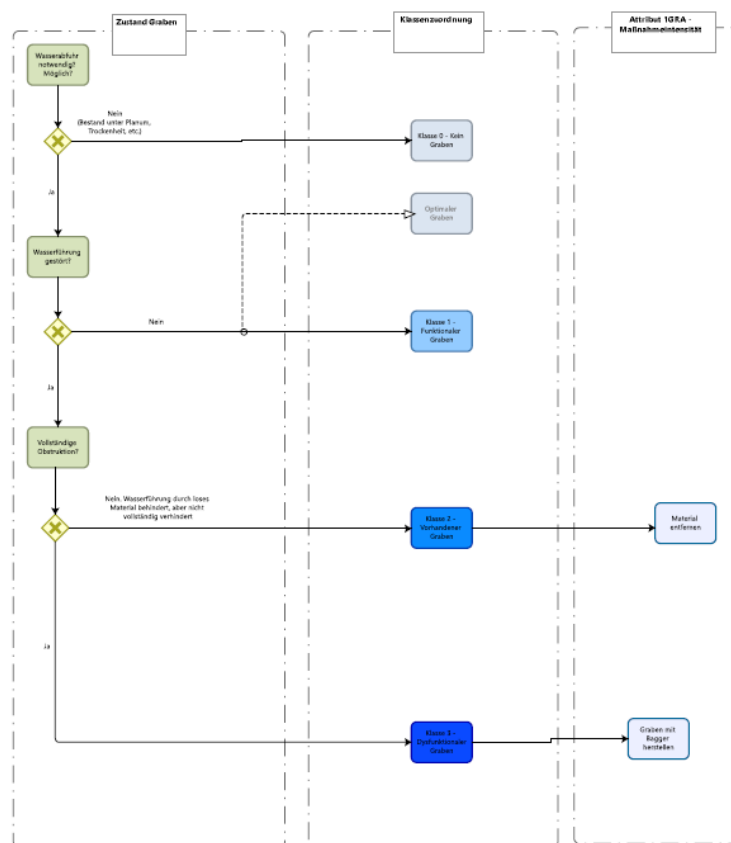


Abbildung 2: Zustandsklassen der Gräben.

Darüber hinaus legte der Workshop des KWF den Grundstein für die Erarbeitung von Grenzwerten standardisierter Schadklassen. Diese Grenzwerte sind essenziell für die objektive Bewertung des Zustands von forstlichen Verkehrswegen und tragen zur Schaffung eines einheitlichen Bewertungsrahmens bei. Die Verknüpfung dieser Zustandsdarstellungen zu einem Gesamtsystem wird durch die Festlegung von Datenständen sowie deren Erfassung und Speicherung maßgeblich beeinflusst. Die Einbindung praktischer Erfahrungen ist hierbei entscheidend, um die Relevanz und Anwendbarkeit der entwickelten Modelle sicherzustellen.

Im Zuge der Erstellung der Entscheidungsbäume für die Zustandsklassifikation und zur Schaffung eines allgemeingültigen Standards bundesweit einheitlicher Fachtermini wurde das Glossar ebenfalls mit Hilfe des KWF-Ausschusses Walderschließung und unter Mitarbeit einer wissenschaftlichen Hilfskraft umgesetzt. Das Glossar wurde in einem Unterauftrag von dem KWF umgesetzt und liegt als online Format vor.

Zusätzlich wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit an der Fachhochschule Erfurt (FHE) eine umfassende Darstellung aktueller Wegebautechniken sowie der damit verbundenen Kosten erstellt. Diese Arbeit liefert einen wichtigen Beitrag zur Kalkulation der Instandhaltungskosten im weiteren Verlauf des Projektes.

### Arbeitspaket 3: Entwicklung eines Parametersystems für die KI

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus den vorhergehenden Arbeitspaketen sowie der tatsächlich vorhandenen Wegebeschaffenheit wurde ein Bestimmungsschlüssel zur Einteilung von Schäden und Grenzwerten entwickelt. Dieser Schlüssel dient als systematische Grundlage für die Klassifizierung von Wegezuständen und ermöglicht eine differenzierte Analyse der erforderlichen Wegebaumaßnahmen.

Zur Unterstützung dieser Klassifizierung wurden Laserscans mit einem iPhone 12 durchgeführt, die es ermöglichten, vier verschiedene Schadklassen zu unterscheiden. Im Rahmen des KWF Workshops wurden ausgewählten Wege durch Fachexperten hinsichtlich ihrer Schadstufen und der erforderlichen Maßnahmen eingehend eingeschätzt. Die Ergebnisse dieser Einschätzungen wurden in Form des zuvor genannten Bestimmungsschlüssels dokumentiert.

Ein weiterer innovativer Aspekt des Projekts ist die Implementierung einer Künstlichen Intelligenz (KI), die den Bestimmungsschlüssel abgelöst hat. Diese KI soll in die Lage versetzt werden, eigenständig die Schadensklassen zu erkennen.

Dafür wurden im ersten Schritt in Abstimmung und Zusammenarbeit mit HD-Vision, FHE und NavLog auf Basis von Testmaterial, welches durch GeoNet bereitgestellt wurde, die Fehlerklassen für die automatische Identifikation abgeleitet. Die Verbundpartner trafen sich dazu in Heidelberg, um gemeinsam Schadklassen am virtuellen Objekt zu erkennen.

Weiterhin wurden Software-Tools für die Annotation der Daten erstellt. Dazu wurden in speziellen Entwicklungsumgebungen Infrastrukturen geschaffen, die das projektspezifische Datenmaterial parameterorientiert einlesen und verarbeiten kann. Anschließend wurde die Infrastruktur für das Training der neuronalen Netze beschafft und in Betrieb genommen. Im letzten Teil wurde als Entwicklungsvorbereitung die Netzwerkarchitekturen für die neuronalen Netze evaluiert und getestet.

#### **Arbeitspaket 4: Entwicklung Gesamtkonzept**

Innerhalb des Projekts wurde eine umfassende Gesamtkonzeption entwickelt, die nahtlos an das zuvor definierte Lastenheft anschloss. Die Erfassungsbereiche und Merkmale wurden simuliert, um die Auslegung und Auswahl geeigneter Teilsysteme für den Praxistest zu ermöglichen. Prinzipiell wurde die Entwicklung dabei in mehrere Stränge unterteilt. Ein Konzept – und die dafür notwendigen Voruntersuchungen – für die Abtastung des Graben- und Lichtraumprofils wurde von der TU-Ilmenau realisiert. Die TU-Ilmenau war verantwortlich für die Koordination und Zusammenführung der parallelen Entwicklungsstränge von GeoNet (Georeferenz-Sensorik) und V&C (Abtastung Wegekörper/Messbereich M1) zu einem Gesamtergebnis auf Konzeptebene. Im Folgenden sind die Entwicklungsstränge getrennt beschrieben und die Ergebnisse dargestellt.

##### Georeferenz-Sensorik

Im Folgenden wird das erarbeitete Konzept für die Georeferenz-Sensorik detailliert beschrieben. Grundsätzlich war es konzeptionell der Anspruch, dass alle Geräte autark voneinander arbeiten können. Der Ausfall eines Gerätes sollte nicht den Totalausfall des Systems nach sich ziehen. Es sollte jedoch beachtet werden, dass einzelne Komponenten die Qualität anderer beeinflussen (GNSS/IMU). Des Weiteren musste beachtet werden, dass eine Reduktion der Gerätschaften (bspw. aus Kostengründen) die Kontrolle der Ergebnisse erschweren kann. Für die Satelliten gestützte Navigation sollten mindestens zwei Systeme genutzt werden, damit etwaige Probleme eines einzelnen Systems nicht direkt das Ende der Aufzeichnungen der Daten zur Folge hätten. Ein weiterer Baustein, um vor allem der zu erwartenden Abschattung entgegenzutreten, ist der Einsatz eines Inertialsystems (IMU/INS). Um im Verbund mit der Satellitennavigation gut arbeiten zu können, wurde ein Verbund aus INS und 2-Antennensystem der Satellitennavigation gewählt, da hierdurch vom Start weg ein sehr genaues Messen der Position und der korrekten Richtung möglich ist. Hinsichtlich der Aufzeichnung der Daten gibt es mehrere Optionen betrachtet. Die einfachste Form wäre alle Daten autonom aufzuzeichnen, bspw. über Speicherkarten. Eine andere Variante ist es, einen PC als verbindendes Element zu verwenden und diesen entweder via USB-Kabel oder über ein Netzwerk mit den jeweiligen Sensoren zu koppeln. Da im vorliegenden Fall mehr als zwei Komponenten miteinander verbunden werden sollen (beide GNSS-Antennen, die IMU/INS sowie der PC), erschien ein Netzwerk als passender. Des Weiteren hat es den Vorteil, dass größere Datenströme verarbeitet werden können. Um grobe Fehler aufzudecken ist der Einsatz von modernen Odometern zu nutzen. Sollte Abschattung zu lange anhalten und der Langzeitdrift der IMU zu groß werden, würde dies hiermit zumindest festgestellt, wenn auch nicht korrigiert werden. Um den Aufbau möglicher weiterer Technik (bspw. Laserscanner, um den die Beschaffenheit vom Untergrund zu erfassen) nicht zu stark einzuschränken, sollte das Fahrzeug dies auch physisch ermöglichen. Bspw. ein Kastenwagen wie der VW Caddy oder ein SUV sollte hierfür genutzt werden können. Je nach Zustand des Geländes sollte in Betracht gezogen werden, dass Vorerkundungen mittels eines Quads oder SUV (im besten Fall mit Allradantrieb) oder ähnlichen sehr gut geländegängigen Fahrzeugen nötig sein könnten.

##### Voruntersuchungen für Konzept zur Abtastung Wegekörper

Als System für die 3D-Aufnahme wurde ein photogrammetrisches System geplant. Um hierfür zunächst die datentechnischen Eigenschaften zu evaluieren wurden mit Hilfe eines 3D-Datensatzes zunächst mehrere Verfahren anhand dieses Datensatzes evaluiert. Hintergrund der Untersuchung bildete die Frage, ist ein embedded Processing vor Ort möglich und wie sind die entsprechenden Systemanforderungen. Weiterhin sollte damit zusätzlich die Frage geklärt werden, ist ein zusätzliches Postprocessing aussichtsreich oder nicht. Dafür wurde der Berechnungsprozess in mehrere Teile zerlegt und hinsichtlich der Laufzeit untersucht. Folgende Grafik zeigt die Einzelschritte die notwendig für eine photogrammetrische Bestimmung notwendig sind (Abbildung 3 links). In einem Testlauf wurden zusätzlich die Zeiten ermittelt, die für die entsprechenden Berechnungsschritte notwendig sind. In Summe zeigt sich eine Abarbeitungszeit bei 30 Bildpaaren mit einer Größe von 1280x864px von 5s. Was letztendlich in einer maximalen Framezeit von 6 Bildern /s also 166ms pro Sequenz endet. Aus den Anforderungen von ca. 30 km/h Scangeschwindigkeit ist diese relativ kleine Bildgröße und die Framezeit nicht akzeptabel. Aus diesem Grund wurde mit einer Optimierung begonnen. Gleichzeitig ergab sich aus diesen Ergebnissen die Aussage das eine hochgenaue zeitliche Synchronisation des Bildeinzuges für die 3D-Datenqualität deutlich wichtiger erscheint, als ein 3D-Processing vor Ort. Aus

diesem Grund wird für die Umsetzung eine Art Prekalibrierungsalgorithmus (Bestimmung intrinsische und extrinsische Parameter (diese könnten sich ggf. während der Fahrt zum Einsatzort verändern) zu entwickeln sein. Um im anschließenden Postprocessing die richtige metrische Basis zu erhalten.

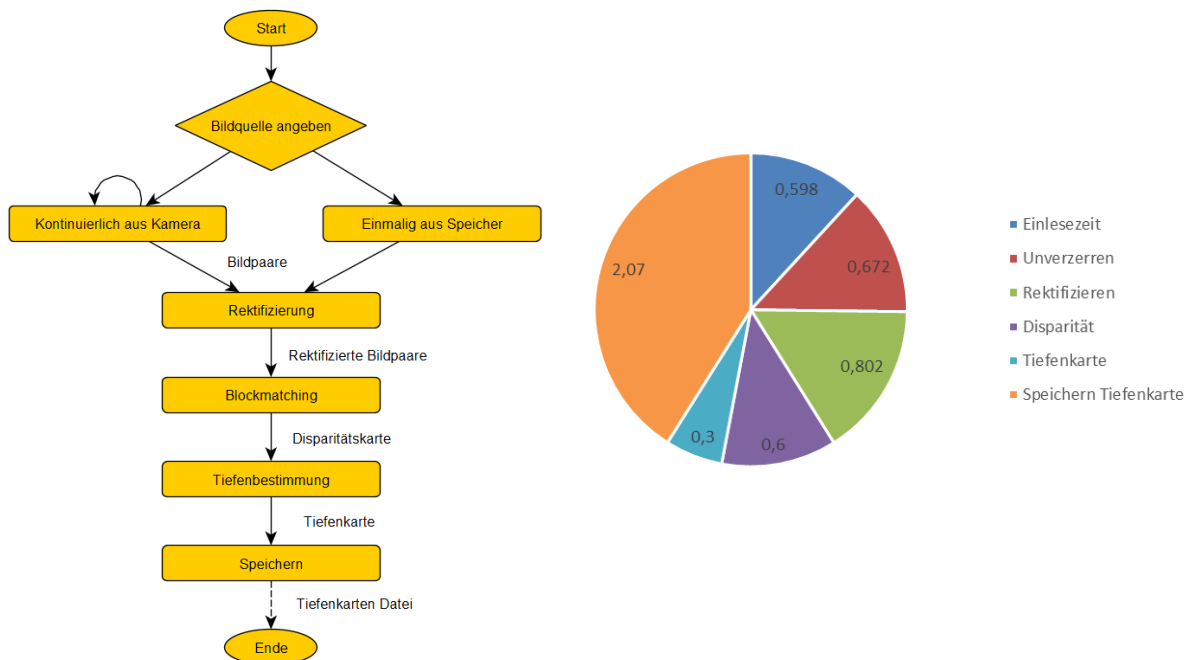


Abbildung 3: Verfahrensschritte für die Erfassung der photometrischen Wegdaten (links), Berechnungsdauer der Einzeloperationen (rechts) in Summe ergibt sich 5,042/30 Bildpaare/s

In den nächsten Schritten wurde die Nutzung von Grafikkartenunterstützung gegenüber reiner PC-basierter Algorithmen untersucht (Details dazu siehe Anhang). Letztendlich konnte nach einigen Optimierungsschritten eine 3D-Berechnungsrate von 30 3D-Bildern/s erreicht werden. Ein finales Ergebnis zu den Untersuchungen mit einem Testaufbau mit Livekameras und der Auflösung von 1920x1200px zeigt Abbildung 4.

Tiefenauflösung der OpenCV CPU und GPU  
 Stereomatcher für einen Sensor: 1920x1200;  
 Pixelgröße: 5,86  $\mu\text{m}$ . Basisabstand = 100 mm,  
 Brennweite = 6mm

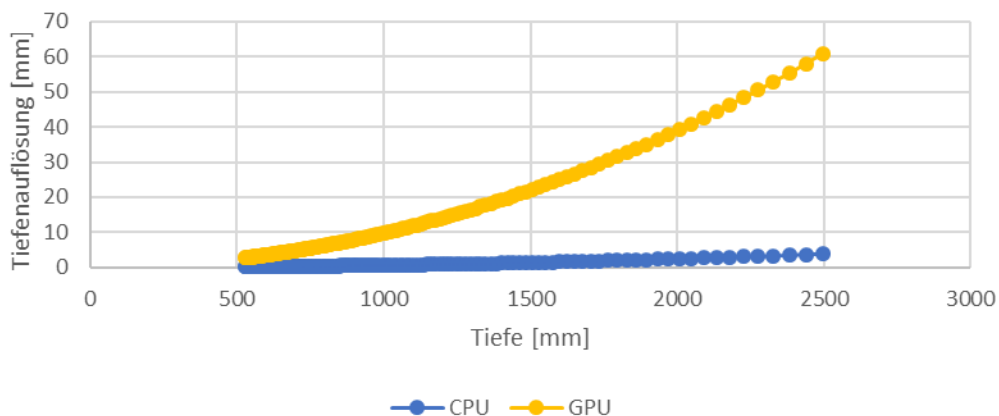


Abbildung 4: Vergleich Tiefenauflösung bei gleicher Berechnungszeit

Nach der Untersuchung der algorithmischen Basis des Systems wurde an der Konzeption des Systems mit der Zielgröße 4m Abtastbreite weitergearbeitet. Unter Berücksichtigung der erzielten Ergebnisse (siehe Anhang) wurde in die Feinplanung eines möglichen Anlagenkonzeptes gegangen, um in den folgenden Arbeitspaketen mit Testaufbauten und realen Umweltdaten zu arbeiten. Ausgearbeitet wurden zwei grundlegende Konzepte, die in der Tabelle 2 gegenübergestellt wurden. Die beiden Konzepte unterscheiden

sich hauptsächlich in der Kameraanzahl. Hintergrund der Überlegungen bildeten ökonomische Gründe, da acht kleiner Bildsensoren unter Umständen günstiger sein könnten als vier große Bildsensoren. Hinzukommt die schnellere Aufnahme­frequenz der kleineren Sensoren, was in einer schnelleren Abtastung einen Vorteil bietet. Zusätzlich wurde in Tabelle 2 auch noch eine Unterscheidung in aktive und passive Variante vorgenommen. Dies hat den Hintergrund, dass bei der passiven Variante die solare Einstrahlung der Sonne berücksichtigt wurde und bei Variante zwei eine künstliche Beleuchtung als Berechnungsgrundlage hinterlegt wurde.

Tabelle 1: Möglich Systemkonzepte für die photogrammetrische Betrachtung der Wegekronen.

Kamera-bezeichnung	Pixel-anzahl	Brennweite [mm]	Höhe	Vertikales Sichtfeld	Bildfrequenz [B/s]	Belichtungszeit [s]	Laterale Auflösung [Pixel/mm]	Tiefenauflösung [mm]	Geschwindigkeit [km/h]
Dauerbeleuchtung: Bewegungsunschärfe und maximale Beleuchtung beschränkt nutzbare Bildfrequenz der Kamera									
BFS-PGE-88S6M-C PoE	4096 x 2160	12	1830	1128,97	7,68	0,0315675	Min:1,85	0,72	30
Mako G-234B PoE	1936 x 1216	16	1800	784	11,07	0,039	1,53	0,89	30
Blitzlicht: theoretisch maximale Ausnutzung der Kamerafrequenz möglich									
BFS-PGE-88S6M-C PoE	4096 x 2160	12	1830	1128,97	14	0,0166	Min:1,85	0,72	56,9
Mako G-234B PoE	1936 x 1216	16	1800	784	41	0,01	1,53	0,89	115

Nach allen Vorüberlegungen und auch internen Absprachen wurde sich zunächst für die 4-Kameravariante entschieden. Hauptargument bildet die schmalere Bauweise und der geringere Verkabelungsaufwand. Offen ist derzeit noch die Objektivrfrage, da es sich um einen relativ großen Bildsensor handelt. Die prinzipielle Anordnung ist in der folgenden Abbildung 5 zu sehen.

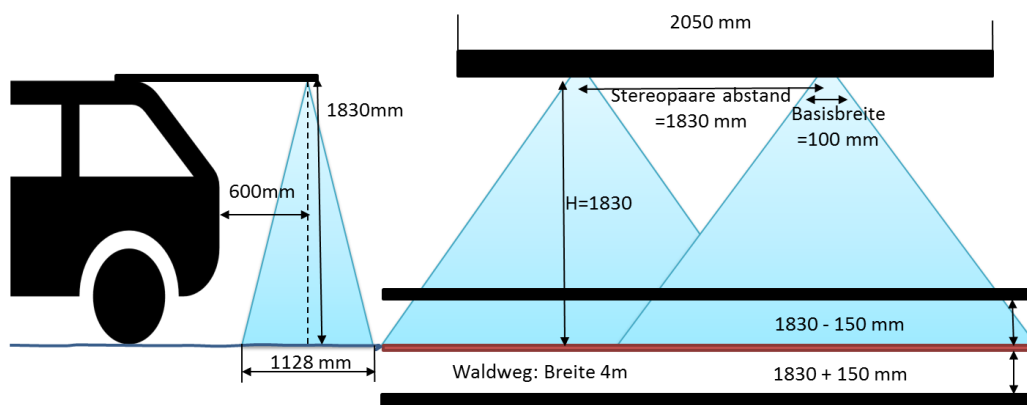


Abbildung 5: Erarbeitetes Systemkonzept für die Abtastung der Wegekronen.

Es wurde mit Vorbetrachtungen begonnen, die auch eine aktive Beleuchtungsvariante mitberücksichtigen. Hierbei gilt es im Außenbetrieb zu ermitteln, welche Wellenlängen und welche Art der Beleuchtung zu wählen ist. So wurde weiter an der Entwicklung einer künstlichen Beleuchtung unter Berücksichtigung der Fremdlichtunterdrückung gearbeitet. Aufbauend auf diesen Untersuchungen konnte eine leistungsfähige LED beschafft werden, die ihr Intensitätsmaximum bei 940nm hat. Nach der ersten Vorevaluation wurde danach mit der Entwicklung eines Labormusters begonnen. Abbildung 6 zeigt das Labormuster, das derzeit evaluiert wird, mit ersten Ergebnissen zur Illumination. Es wird davon ausgegangen, dass drei dieser Quellen ausreichen können, um die Oberfläche der Wegekronen zu illuminieren. Interessant bei den ersten Versuchen war die gute Trennbarkeit zwischen Vegetation und Weg, was vermutlich auf die Reflektion der Vegetation zurückzuführen ist, wohingegen steinige Oberflächen durchaus gut reflektieren.



Abbildung 6: Beobachtete Szene im Laborbereich bei 940nm Beleuchtung (links), Gehäuse Testsetup (rechts).

### Voruntersuchungen für Konzept zur Abtastung Graben- und Lichtraumprofil

Innerhalb der Systemkonzeption der Sensorik für den Grabenbereich(M2) wurden die im Lastenheft definierten Bedingungen und Invarianten auf ihre physikalischen Eigenschaften näher untersucht. Das betraf vor allem Eigenschaften wie Reflexionsvermögen und spektrale Signaturen. Auf Grundlage dieser Daten konnten anschließend geeignete Teilkomponenten gegenübergestellt und für eine Auswahl bewertet werden.

Bezüglich des Systemkonzeptes für das Lichtraumprofil analog zum Grabenbereich vorgegangen. Jedoch war an dieser Stelle zusätzlich eine umfangreiche Untersuchung zu Gegenlichtsituationen und anderen Umweltbedingungen wie Nebel oder Niederschlag notwendig, da diese Effekte bei einer Messung entgegen der Sonne und durch die erhöhten Messdistanzen schwerer zum Tragen kommen.

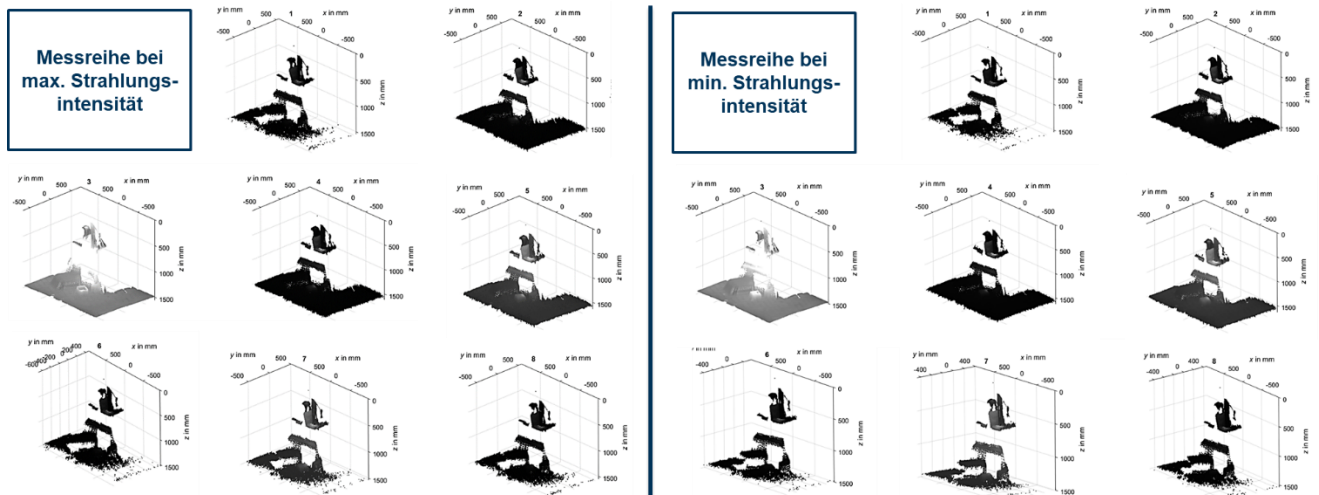


Abbildung 7: Messreihen bei unterschiedlichen Fremdlichteinflüssen (Störgrößen).

Die Voruntersuchungen bezogen sich vor allem darauf, Unzulänglichkeiten der ausgewählten Sensorsysteme unter Laborbedingungen und anschließend in einem statischen Einsatzszenario unter realen Bedingungen zu simulieren. Dadurch konnten Probleme identifiziert und bestmögliche Betriebsparameter der Sensorik ermittelt werden. Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen Voruntersuchungen eines TOF Sensors unter Störgrößeneinfluss sowie die statistische Auswertung der Messreihen. Für die Untersuchungen zu den Sensoren für das Lichtraumprofil wurde analog dazu verfahren.

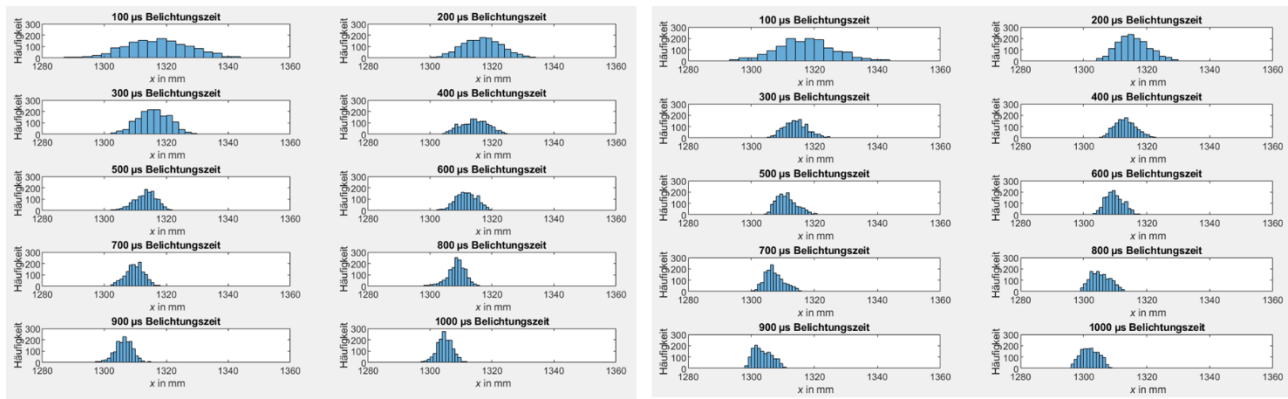


Abbildung 8: Statistische Betrachtung der Messabweichungen.

Der Gesamtdemonstrator wurde dann so konzipiert, dass eine simultane Nutzung der beiden Sensorprinzipie (Time-Of-Flight) und das 2-dimensionale LIDAR-System ermöglicht wird. Besonders bei der Zusammenstellung des doppelten TOF-Systems stellte sich heraus, dass in dem für die Kalibrierung notwendigen Überlappungsbereich mit einer gegenseitigen Beeinflussung der Messsysteme zu rechnen ist. Der Grund dafür ist prinzipbedingt, da die TOF-Systeme den Erfassungsbereich aktiv bestrahlen, wobei der zeitliche Verlauf der Bestrahlungsenergie ein für die Auswertung notwendiges Signal beinhaltet. Überlagern sich nun diese Signale aufgrund mehrerer Quellen, so ist keine Stabile Auswertung mehr möglich. In der Folge nimmt das Messrauschen zu und fehlerhafte Werte werden ausgegeben. Die Lösung des Problems besteht darin, innerhalb einer festen Taktung (Triggerung) jeder Quelle für sich ein Zeitfenster zu ermöglichen, in welchem diese so messen kann, als wäre sie ein Einzelsystem, wobei alle weiteren Quellen inaktiv sind. Dieses Prinzip lässt sich entweder softwareseitig realisieren, indem jedes System nur durch eine definierte Abfrage einen Messvorgang auslöst, oder hardwareseitig, wobei durch ein zusätzliches Signal der zeitliche Verlauf über einen Startimpuls kontrolliert wird. An diesem Punkt des Verbundvorhabens ist es noch nicht möglich, sich auf eine der beiden Verfahren festzulegen. Dementsprechend wurden beide Varianten vorbereitet und können später im simultanen Betrieb im Gesamtsystem bewertet werden. Hier ist auch zu berücksichtigen, dass im dynamischen Fall des Messvorgangs zeitliche Aspekte sehr kritisch zu bewerten sind, da dann das Messsystem gegenüber dem Messobjekt als bewegter Körper verstanden werden muss und die Ableitung der dynamischen Größen (Beschleunigung, Geschwindigkeit und Position) mittels zusätzlicher Inertialsensorik in einem Zustandsraummodell erfolgen muss. Der Demonstrator wurde schließlich so ausgelegt, dass eine Ortsveränderlichkeit gewährleistet ist und somit das System in verschiedenen Szenarien unter Laborbedingungen getestet werden kann.

### Zusammenführung der Entwicklungen zu Gesamtkonzept

Ein zentraler Aspekt dieser Konzeption war die Definition einer Datenstruktur für Metadaten, die es ermöglicht, die eingezogenen Messdaten effizient zu speichern und auszuwerten. Dies ist entscheidend für die Qualitätsbewertung in einem nachgelagerten Prozess. Für die notwendigen Metadaten wurde eine einheitliche Datenstruktur definiert, die für alle Teilsensoren verbindlich ist. Bezüglich der Verrechnung und Speicherung der Daten (Mess- und Metadaten) wurde sich in Abstimmung für die Nutzung eines PCs entschieden. Die Kommunikation der Teilsysteme sollte aufgrund der benötigten Bandbreiten und Datenmengen nach Möglichkeit einheitlich über LAN-Netzwerk erfolgen.

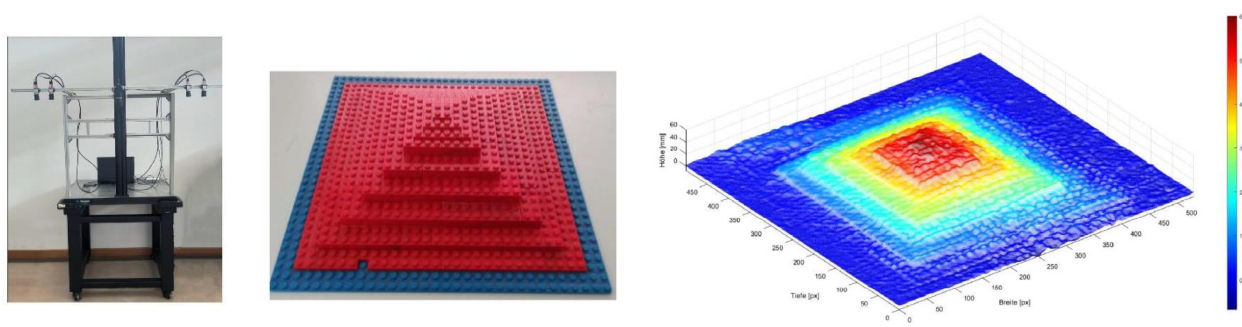
## Arbeitspaket 5: Hardwareentwicklung 3D-Aufnahmesystem

Aufbauend auf den konzeptionellen Voruntersuchungen und den möglichen Systemkonzepten wurde in AP 5 auf Basis des stereoskopischen Aufbaus weiter entwickelt. Hierfür wurde in einem Laborversuch mit Hilfe vorhandener Kamerasysteme ein Träger aufgebaut, der mit Hilfe von 4 Basler Kameras zunächst für die Untersuchungen der prinzipiellen Machbarkeit zur Verfügung stand (erste Zeile Tabelle in Abbildung 9).

Kamera-bezeichnung	Pixel-anzahl	Brennweite [mm]	Höhe	Blende	Vertikales Sichtfeld	Bildfrequenz [B/s]	Belichtungszeit [s]	Auflösung [Pixel/mm]	Konvergenzwinkel	Tiefenaufösung [mm]	Anzahl Stereopaare	Messbalken [mm]
BFS-PGE-88S6M-C PoE	4096 x 2160	12	1830	2,0	1128,98	7,68	0,0315675	Min:1,85	1,56	0,72	2	2032
Mako G-234B PoE	1936 x 1216	16	1800	2,8	784	11,07	0,039	1,53	0	0,89	4	2999

Abbildung 9: Berechnete Parameter Testsysteme stereoskopische Auswertung.

Im Folgenden sieht man den Labordemonstrator des ersten Vorversuches. Um eine gewisse Ausrichtung der Kamerasysteme zu gewährleisten, wurden Halteplatten gemäß berechnetem Konvergenzwinkel sowohl für System 1 als auch für System 2 angefertigt. Nach Verkabelung und Ausrichtung aller Systeme konnten erste 3D-Bilder erzeugt werden. Für Laborzwecke diente hierfür eine Legopyramide.



Höhengenaugigkeit über die Fläche



Abbildung 10: Laborsystem (2m Abtastbreite) links, Testtarget (mittig), rekonstruiertes 3D-Bild (rechts), Höhengenaugigkeit (unten links).

Die ersten Ergebnisse geben die theoretisch errechneten Parameter wieder. Es wird im Laborversuch eine Tiefenaufösung kleiner 10mm erreicht. Die im ersten Jahr durchgeführten Untersuchungen hinsichtlich Performance und prinzipiellen Berechnungsmodell sind in die erste Umsetzung eingeflossen.

Anschließend konnte ein erstes Systemkonzept für die Umsetzung der Elektronik und Datenverarbeitung (Abbildung 11) im Hardwaredemonstrator erarbeitet werden. In eigenen Vorversuchen zeigte sich die unbedingte Ermittlung der Beleuchtungscharakteristik auf dem Wegprofil..

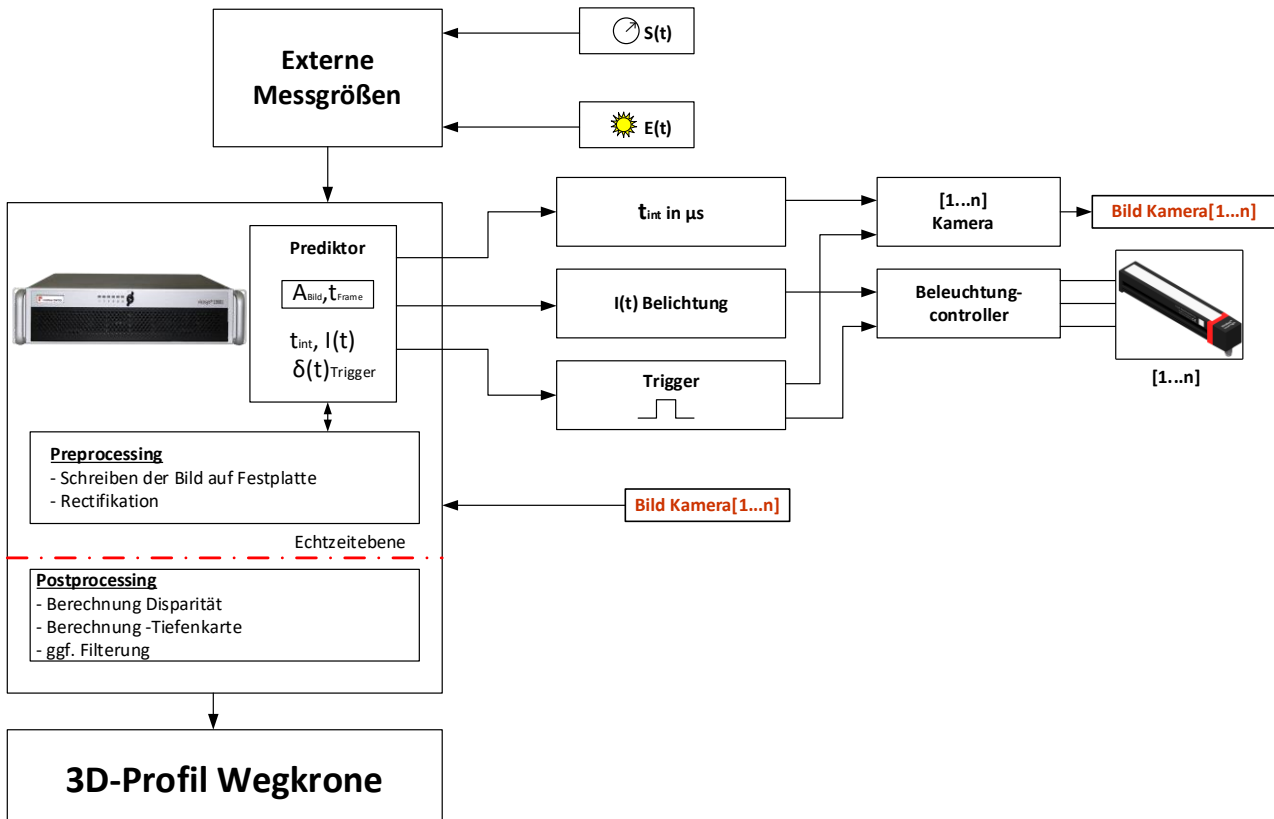


Abbildung 11: Systemlayout für die Elektronik, Optik & Datenverarbeitung Hardwaredemonstrator.

Schließlich konnten erste Untersuchungen für AP 5.3 durchgeführt werden. Hierfür wurde das Testsystem 1 behelfsweise auf ein Privatfahrzeug montiert und in ersten Szenarien getestet. Hierbei sind bereits erste Teile aus dem Konzept aus AP5.2 umgesetzt.

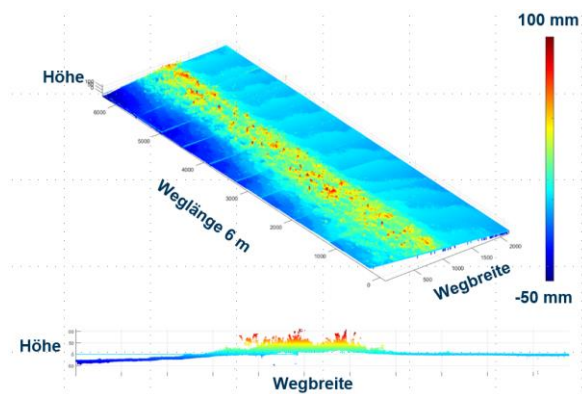


Abbildung 12: Vorversuch Hardwaredemonstrator (links), Errechnetes Profil (rechts).

Prinzipiell ist die geplante Variante einsatzfähig, die Aufnahmen wurden aktuell noch in einem Start/Stop/Betrieb aufgenommen. Selbst feine Strukturen (Gras, Steinchen etc.) können je nach Texturgüte aufgelöst werden. Im weiteren Verlauf von AP5.3 ist jetzt der Umbau auf Variante 2 Tabelle 1 geplant bei dem eine Breite von 3m komplett abgetastet werden kann. Ebenfalls sollen weitere Optimierungen aus dem entworfenen Systemmodell in den Demonstrator einfließen.

Folglich wurde weiter an der Entwicklung einer künstlichen Beleuchtung unter Berücksichtigung der Fremdlichtunterdrückung gearbeitet. Hierfür wurden die vorhergehend erstellten Beleuchtungen nochmals hinsichtlich Performance optimiert. Nach umfangreichen Versuchen quer zur Fahrtrichtung wurde aufgrund unzureichender Homogenität in der Ausleuchtung, auf eine Längsanordnung übergegangen. Der schmale spektrale Sensitivitätsbereich bei 940nm der eingesetzten Kameras kann so trotzdem optimal ausgenutzt werden, allerdings müssen so insgesamt sieben der entwickelten Leuchten eingesetzt werden. Abbildung 13 zeigt die Arbeiten beim Umbau der Beleuchtungseinrichtung am Fahrzeug.

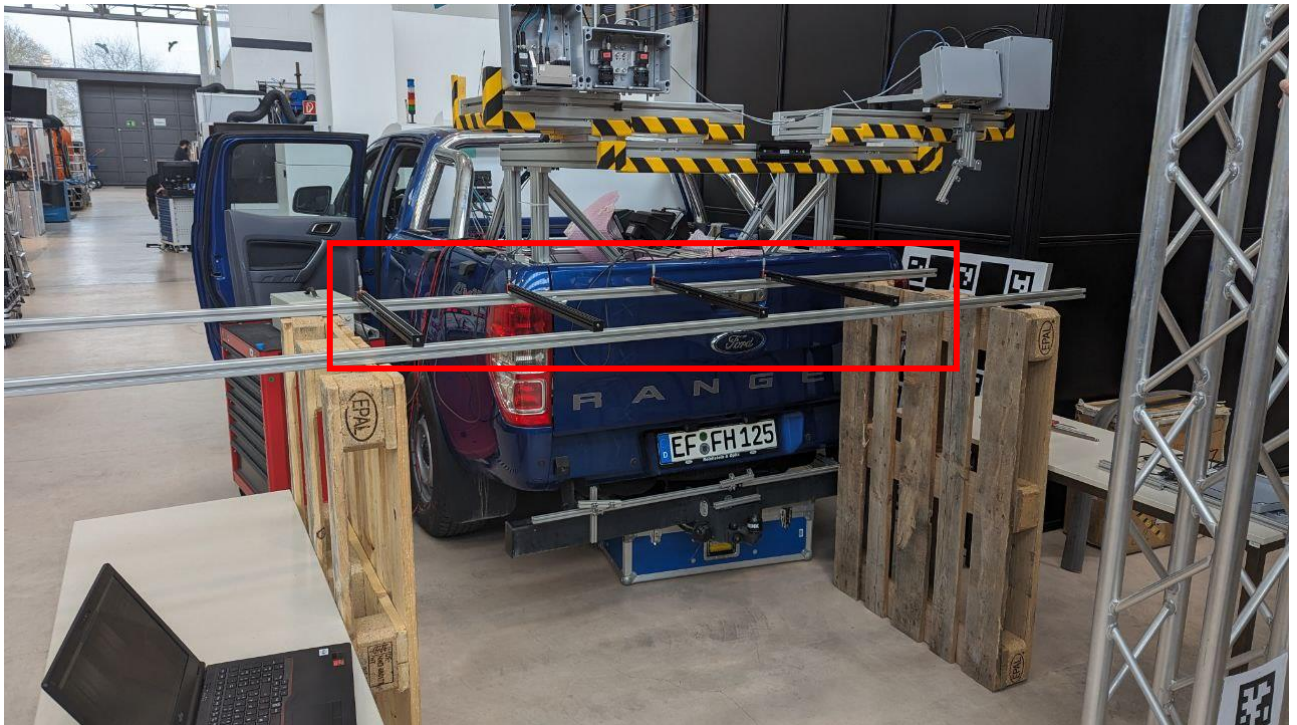


Abbildung 13: Umbau Beleuchtungseinrichtung von 4x1 quer auf 7x1 längs zur Fahrtrichtung.

Abbildung 14 zeigt den qualitativen Unterschied zwischen der Beleuchtungsanordnung quer und längs. Aktuell werden noch weitere Untersuchungen durchgeführt die ggf. die Sichtverdeckung (schwarzer Balken in Abbildung 14 rechts) umgehen indem eventuell der Abstand nochmals angepasst werden muss. Weiterhin wurde mit der Entwicklung eines speziellen Controllers begonnen der losgelöst von der Zentralsteuerung im Fahrzeug-inneren als Endstufe im hinteren Fahrzeugteil angebracht wird. Hintergrund der Überlegung ist die sehr hohe Blitzstromanforderung von ca. 10A sowie die für die Applikation hohe Anzahl an Blitzkontrollern (theoretisch 7 Stk.).



Abbildung 14: Ergebnisse Feldausleuchtung 4x1 (links), Feldausleuchtung 7x1 längs (rechts).

Neben den doch recht aufwendigen Weiterentwicklungen am Beleuchtungskonzept wurde zusätzlich in Abstimmung mit dem Projektpartner Zwerrenz an der Aufnahmevorrichtung für die Bildaufnahme gearbeitet. Die im letzten Bericht gezeigten Vorversuche mit dem Stereokamerasystem wurden in diesem Berichtsjahr auf eine solide Konstruktion gestellt. Insbesondere der Schutz vor Staub aber auch die Absicherung einer stabilen Stereobasis (geometrische Stabilität der Kameras zueinander) konnten erfolgreich umgesetzt werden. In der Abbildung 15 ist die aktuelle hardwaretechnische Umsetzung gezeigt. Aktuell wird gemeinsam mit dem Projektpartner TU-Ilmenau an der Integration in das Gesamtsystem gearbeitet.

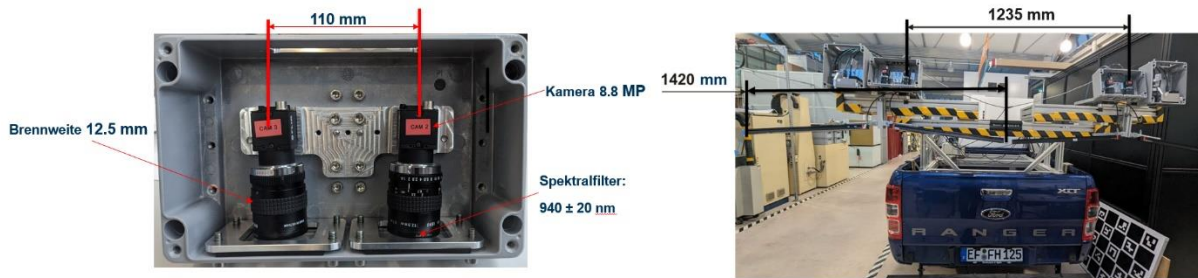


Abbildung 15: Systemtechnischer Aufbau Messsystem Wegkrone (links), Anbau des Systems am Transportfahrzeug (2x) (rechts).

Fortwährend wurde weiter an der Entwicklung einer künstlichen Beleuchtung unter Berücksichtigung der Fremdlichtunterdrückung gearbeitet. Aufgrund der im Vorberichtszeitraum erreichten Ergebnisse sowie der geometrischen Anordnung wurde eine weitere Optimierung durchgeführt. Abbildung 16 zeigt die finale Variante am Fahrzeug. Aus Gründen der Praxistauglichkeit wurde die Variante Leiterraumen verworfen.

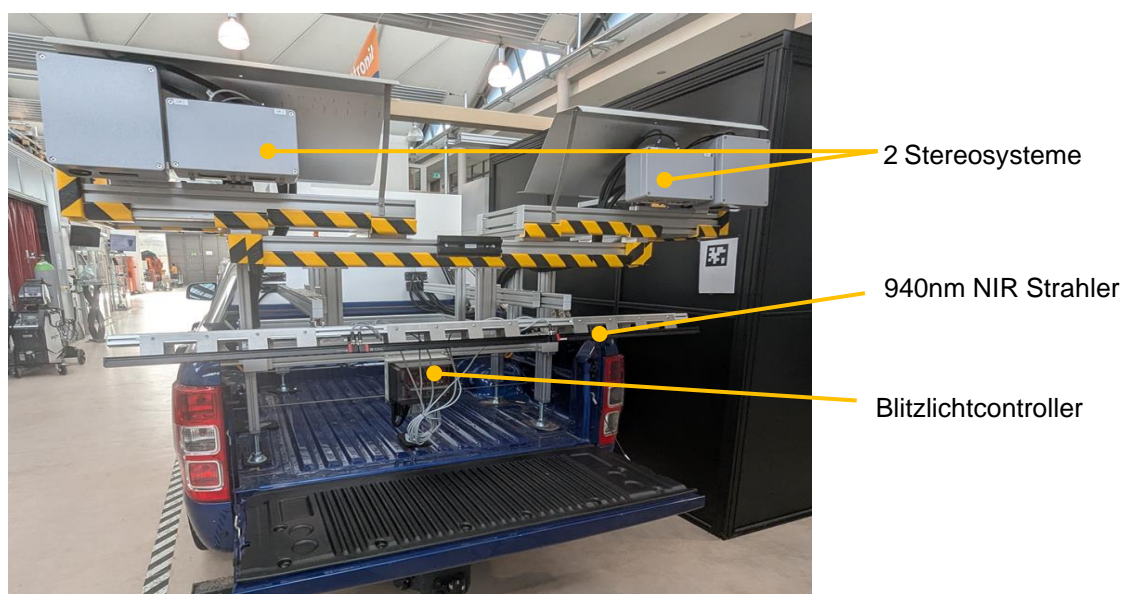


Abbildung 16: Finale Variante der Umsetzung im Teilvorhaben 5

In der Mitte der Abbildung 16 ist das Ergebnis der Spezialcontrollerentwicklung für die Lichtblitzerzeugung zu sehen. Insgesamt können hier acht Stabsegmente der NIR Strahler stromgeregelt mit 10A gespeist werden. Aufgrund der hohen EMV Belastung bei derartig hohen Stromanstiegsflanken wurde die Leistungselektronik in den hinteren Teil des Fahrzeugs gebracht um Störeffekte auf andere Geräte zu vermeiden. Angeschlossen an das zentrale Steuersystem ist der Blitzlichtcontroller zentral über eine Schnittstelle in den Innenraum von der die Parametrierung vorgenommen wird. Die Stereoaufnahmesysteme sind im oberen Teil links/rechts angebracht. Diese sind wetterfest abgeschirmt und auf die Wellenlänge der NIR Strahler abgestimmt. Aufgrund eines leichten Übersprechens, der finalen Fahrzeughöhe und anderer unvermeidbarer Hindernisse im Strahlengang der Bildaufnahme wird letztendlich eine Abtastbreite von 3m Breite mit einem Arbeitsbereich von 50cm mit einer Auflösung von 5mm erreicht. Die Datenagglomeration aller Systeme erfolgt in einem gemeinsam entwickelten proprietären Interface das in der folgenden Abbildung gezeigt ist.

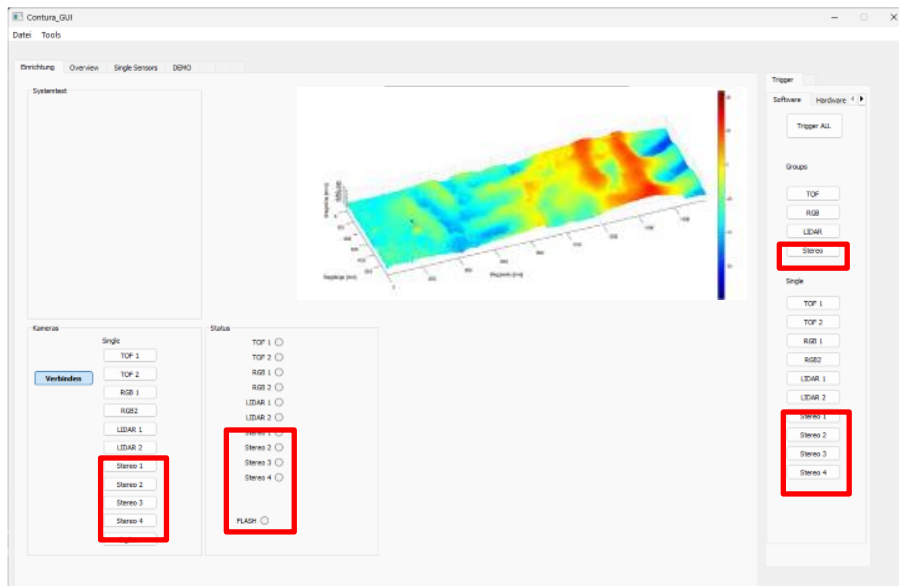


Abbildung 17: Steuerelemente Wegkronenmessung mit entwickelten 3D-Stereo.

Die roten Markierungen in der vorangegangenen Abbildung zeigen die Einstellungsmöglichkeiten des Wegkronenmesssystems im Betrieb. Ein zusätzliches Untermenü erlaubt die Konfiguration der einzelnen Sondereinstellungen. Im Mittenbereich des HMI Interface können sowohl einzelne Rohdaten als auch berechnete Tiefenkarten angezeigt werden. Aufgrund des hohen Datenaufkommens im Fahrbetrieb ist die Tiefenkartenanzeige nur begrenzt möglich. Die Berechnung der Profile erfolgt daher in einem Postprocessing.

Für die Evaluation des finalen Systems wurde erneut eine Kalibrierung des Systems im Hallenbereich der TU-Ilmenau aufgenommen. Die optimierte Variante der Beleuchtung führt gemeinsam mit einer Optimierung der Kameraparameter zu den anvisierten Zielen des Projektes. Die folgende Abbildung zeigt eine rekonstruierte 3D Abbildung aus einem Testlauf. Zur prinzipiellen Bestimmung der Präzision des Messsystemes wurde eine fest verbaute Anhängervorrichtung als Referenzmarke benutzt und geometrisch bestimmt. Im Ergebnis zeigt sich eine Unsicherheit von ca. 5mm was im Anwendungsfall der Waldwegemessung als angemessen angesehen wird.

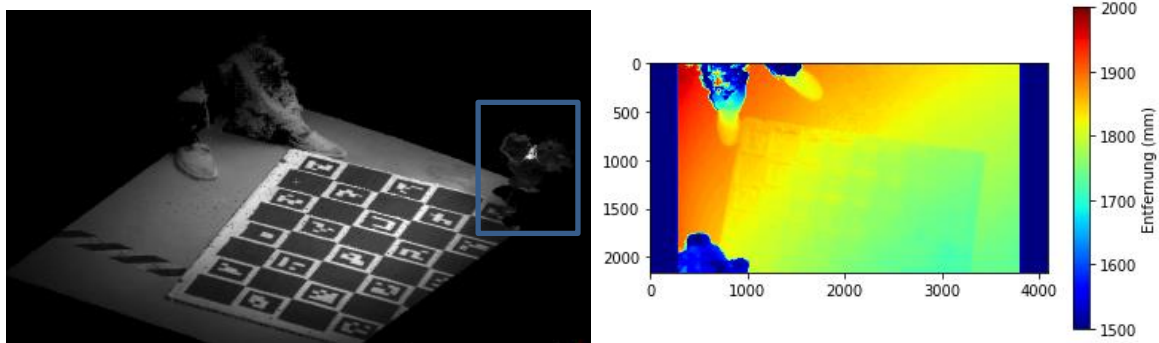


Abbildung 18: 3D-Repräsentation der Hallenbodenoberfläche, die blaue Markierung zeigt die Kugel der Anhängervorrichtung (links).

Erreicht wurden diese Ergebnisse nach mehreren Testserien die letztendlich zu einem Optimum in der Konfiguration des erarbeiteten 3D-Berechnungsmodul führten. Genutzt wird konkret ein SemiGlobal BlockMatching SGBM Mode2 (bedeutet 16 Suchrichtungen) wodurch die Abweichungen minimiert werden. Als Blockgröße wurde aus Gründen der Geschwindigkeit der Berechnung eine Blockgröße von 3x3 gewählt. Die durchgeführten Arbeiten insbesondere der langen Optimierungsphase der Beleuchtung als auch des Beleuchtungskontrollers führen zu stabilen Ergebnissen. Ebenfalls hat sich der Ansatz der infraroten Beleuchtung als wertvoll erwiesen. Abschließend wurden noch einige Versuche im Außeneinsatz durchgeführt. In der folgenden Abbildung 19 ist das Ergebnis einer markanten Stelle gezeigt.

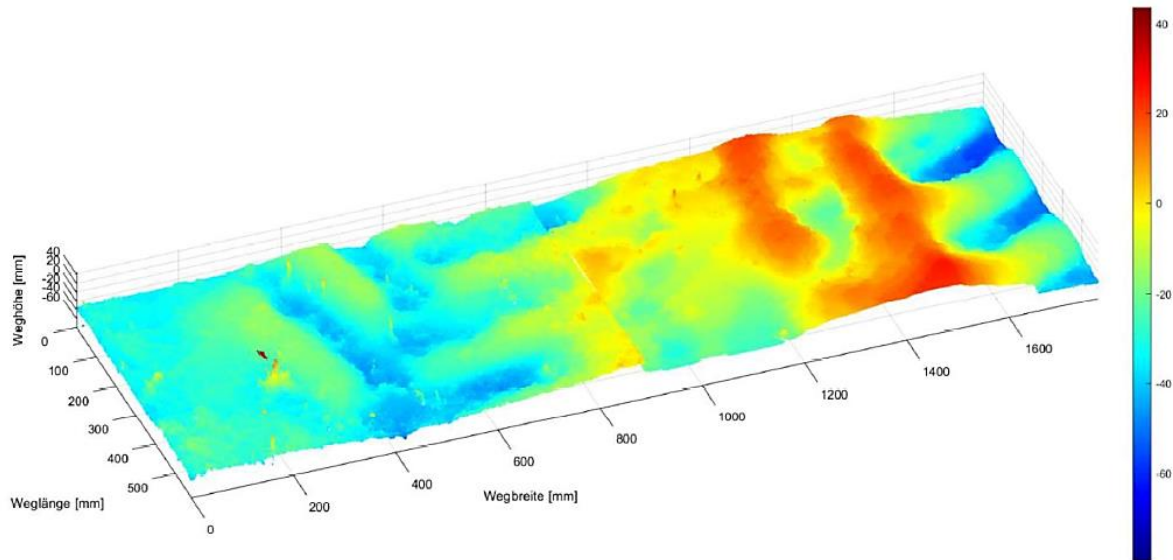


Abbildung 19: Markantes Beispielprofil in Form einer Harvesterspurausschnitt.

Die Abbildung zeigt nahezu den gesamten Höhenmessbereich. In der Breite wurden links und rechts noch Bereiche abgeschnitten. Auffällig ist eine hohe 3D-Punktedichte so dass eine stabile Weiterverarbeitung durch KI-Techniken problemlos möglich ist. Im Mittenbereich ist noch ein kleiner Versatz erkennbar der noch algorithmisch korrigiert werden muss. Insgesamt ist die Messung der Wegkronen mit dem entwickelten Prototypen letztendlich sehr gut möglich. Auf der folgenden Seite sind die wesentlichen Parameter des Systems zusammengefasst.

## Arbeitspaket 6: Entwicklung Geräteträger

Im Rahmen des Arbeitspakets wurden wesentliche Randbedingungen für die Gerätekonstruktion eines Anbausystems für Fahrzeuge erarbeitet. Zu Beginn erfolgte eine umfassende Sichtung bestehender Lösungen, gefolgt von einer gezielten Analyse der jeweiligen technischen Systeme, um adaptierbare Systeme zu abstrahieren.

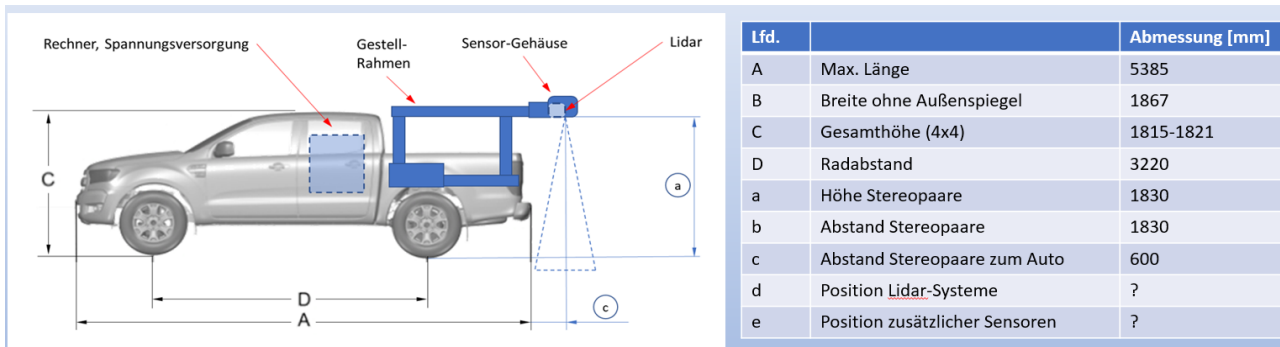


Abbildung 20: Ausschnitt aus der Erarbeitung des technischen Prinzips

Unter Berücksichtigung der gegebenen Parameter, wie Kameraposition, Flexibilität hinsichtlich Steifigkeit und Materialauswahl sowie Fahrzeugmaßen und spezifischen Vorgaben der Projektpartner, wurde das optimale technische Prinzip konstruiert. Der Geräteaufbau auf der Ladefläche des Fahrzeugs sowie die Aufnahmen für die Hardware zur Datenauswertung im Innenraum wurden vollständig entworfen. Im Anschluss an die Konstruktion wurde eine Stückliste erstellt, und es wurden Detail- sowie Baugruppenzeichnungen angefertigt. Zur Anpassung an verschiedene Fahrzeugtypen werden spezielle Klemmeinheiten eingesetzt, die eine variable Anpassung an andere Pick-up-Fahrzeuge ohne größeren Aufwand ermöglichen. Zusätzlich kommen Blechwinkel zum Einsatz, um den Geräteaufnehmer weiter abzusichern. Um die Evaluation unter realen Bedingungen durchzuführen wurden geeignete Waldwege ausgewählt. Der Umkreis von Ilmenau wurde gewählt, um Erkenntnisse direkt und zeitnah umsetzen zu können.



Abbildung 21: 3D-Darstellung des angefertigten Trägersystems auf dem Pick-Up



Abbildung 22:interne Fahrzeugkomponenten



*Abbildung 23: Montierter Geräteträger*

## Arbeitspaket 7: Entwicklung Systemkalibrierung

Im Rahmen der Entwicklung eines Kalibrierkonzepts wurde die Entwicklung nach Messprinzipen aufgeteilt. Eine Arbeitsteil beschäftigte sich mit der Kalibrierung der 3D-Sensorik zueinander. Diese besteht (als Ergebnis der vorherigen Arbeitspakete) entsprechend der Messbereiche aus mehreren Teilsystemen. Der zweite Arbeitsteil bezieht sich auf die Kalibrierung der als Gesamtsystem zu verstehenden 3D-Sensorik gegenüber der GNSS- und Inertialsensorik.

Ziel der Erstellung des Kalibrierkonzepts auf (3D-) Sensorebene war es, die antastenden Systeme auf ein gemeinsames Szenario zu referenzieren. Weiterhin ist dabei die Möglichkeit geboten, zweidimensional bildgebende Systeme- wie beispielsweise RGB Farbkameras – auf räumliche Punktwolken zu referenzieren. Durch dieses Vorgehen kann jedem bestimmbar Punkt im Raum (repräsentiert im Bezug zu 3 Basisvektoren) eine Farbinformation zugeordnet werden. Die Merkmalsdimensionen erhöhen sich dadurch erheblich, was vor allem in Hinblick auf den zu entwickelnden Filter zur Separation von Fahrbahn und Bewuchs als sehr gewinnbringend anzusehen ist (Abbildung 24).

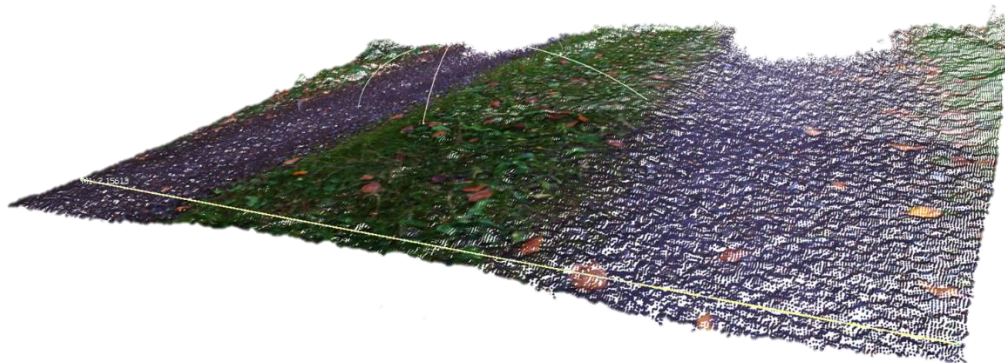


Abbildung 24: Typischer Wegekörper mit RGB- Farbinformation. .

Aufgrund der teilweise komplett verschiedenen Sensorprinzipie waren hier weitreichende systemtechnische Überlegungen und Tests erforderlich. Besonders problematisch war die Erfassung der 2D-Lidar Sensoren. Diese Systeme erfassen keine Punktwolke im eigentlichen Sinne, sondern eine scheibenartige Abtastung des Raumes in zweidimensionalen Polarkoordinaten. Für Details zu diesem Vorgehen sei auf den Anhang verwiesen.

Nachdem das Kalibrierkonzept simulativ und in realen in Einzeltests nachgewiesen werden konnte, galt es nun, dieses auf den Gesamtdemonstrator zu übertragen und anzuwenden. Hier konnte beobachtet werden, dass hinsichtlich der Relativbeziehungen den Sensoren konstruktiv nachgebessert werden muss. Für den realen Einsatz auf einem bewegten System (später Fahrzeug) ist diese Erkenntnis enorm wichtig, da selbst mit einer geringen Änderung der Relativpositionen die Referenz verloren geht und die Kalibrierung erneut durchgeführt werden muss, was sich jedoch im beabsichtigten Feldeinsatz nur schwer umsetzen lässt.

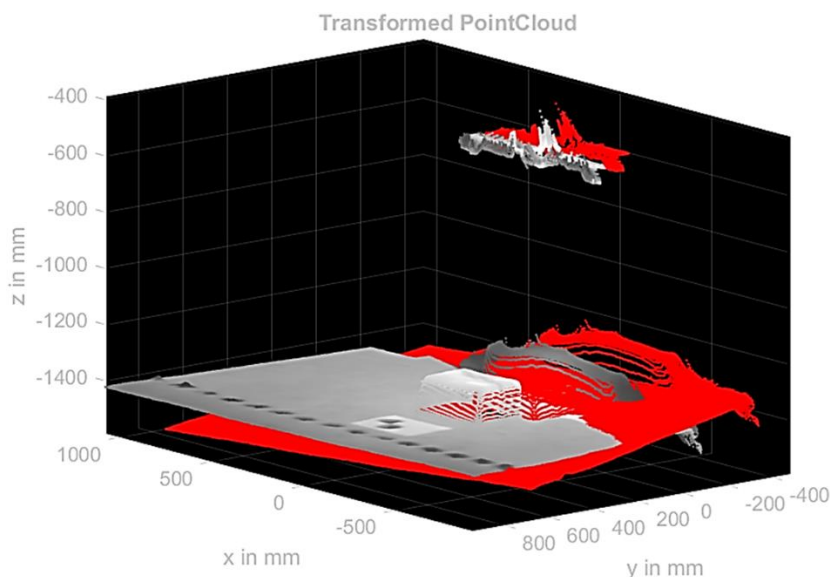


Abbildung 25: Referenzierung der 3D-Daten gegenüber den IMU- Daten.

Weiterhin wurde das Kalibrierkonzept im Allgemeinen derart validiert, dass alle Systeme zueinander referenziert werden konnten. Im nachfolgenden Schritt war es erstmals möglich, die Genauigkeiten und Streuung im referenzierten Gesamtszenario auch unter Einfluss der Störgrößen zu bestimmen. Zusätzlich mussten die Sensoren gegenüber den IMU-Daten referenziert werden. Einen Ausgleich der 3D-Daten gegenüber einem künstlichen Horizont zeigt exemplarisch Abbildung 25. Dieses Relativkoordinatensystem der 3D-Sensorik bildet die Schnittstelle zur Kalibrierung gegenüber dem IMU- und GNSS-Messsystem.

Für die Kalibrierung der GNSS und Inertialsysteme auf der flexiblen Plattform wurden Eichstrecken mit verschiedenen Einflussfaktoren (Abschattungen usw..) aufgebaut. Die kinematische Genauigkeit der Sensoren kann nunmehr mit hohen Geschwindigkeiten (bis 80 km/h) sowie unter GNSS abgeschatteten Verhältnissen (Werkhalle, Länge 22m, Höhe 5,65m und Breite 12m) getestet werden. Die Eichstrecken wurden zur Referenz mit stationären Scannern (Lagegenauigkeit der Objekte im Umfeld <2 cm) erfasst. In der Werkhalle ist ein Kalibrierplatz für zusätzliche Bilderfassungssysteme eingerichtet worden. Die Reflektoren sind mit einer Genauigkeit von <2mm eingemessen. Zusätzlich ist auf der Eichstrecke und in der Werkhalle ein Festpunktfeld erstellt worden. Dies ermöglicht beim Umbau der Sensorplattform, des Trägerfahrzeuges oder bei dem Einsatz anderer und zusätzlicher Sensoren eine hochpräzise und schnelle Einmessung der Veränderungen.



*Abbildung 26: Mess- und Kalibrierplatz GNSS und Inertialsysteme*

Testbefahrungen sind mit einem PKW (VW Caddy) durchgeführt worden. Wichtig waren am Anfang der Einsatz einer flexiblen Sensorplattform und das Sammeln von Referenzdaten für die nachgelagerten Entwicklungen der Projektpartner.



*Abbildung 27: Testfahrzeug VW Caddy*

Als problematisch könnten sich Strecken erweisen, die insgesamt in gutem Zustand sind, jedoch Abschnitte aufweisen, die stark zerstört wurden (Sturm- und Starkregenereignisse). Als perspektivischer Einsatz wurde für die Umsetzung der Prototypenentwicklung durch die FH Erfurt ein Trägerfahrzeug für die Messsysteme angeschafft, das im folgenden Bild zu sehen ist. Es handelt sich um einen Ford Ranger, der durch seine Pritsche und Geländegängigkeit bestens für die Anwendung zur Erfassung des Wegezustands in Forst und Wald bestens geeignet ist.



Abbildung 28: Trägerfahrzeug für das CONTURA-Messsystem

Zur Überprüfung der ermittelten Kalibrierung und deren Anwendung stehen zwei Eichstrecken zur Verfügung. Auf diesen Eichstrecken werden die Messergebnisse aus Inertialsystem, Bild und Scan nach der Systemkalibrierung überprüft. Alle 50 m wurden auf den Eichstrecken (links und rechts des Straßenkörpers) Festpunkte mit einer Genauigkeit von <math>< 5\text{ mm}</math> eingemessen und vermarkt. Zusätzlich wurden die Eichstrecken mit einem stationären Scanner und Nivellement aufgenommen.



Abbildung 29: Eichstrecke 1 mit markierten Objekten (links) und Punktwolke der Eichstrecke (rechts).

Bei der Systemüberprüfung wurden Scanzielmarken auf den koordinierten und höhenbestimmten Festpunkten positioniert. Die erste Eichstrecke, die vierseitige Häuserfronten mit guter Befahrbarkeit umfasst, wurde so ausgewählt, dass in bestimmten Bereichen Abschattungen des GNSS und Wechsel der Satellitenkonstellation provoziert wurden. Dadurch wurde getestet, wie das System reagiert, wenn es zu einem Wechsel der auswertbaren Satelliten kommt und auf die Trägheitssensoren umschaltet. Diese Strecke diente zudem dazu, Messergebnisse zwischen Bildern und Punktwolken zu validieren, indem markante Punkte in beiden Datensätzen ausgewertet wurden. Die kinematisch erfassten Daten wurden mit den statisch gemessenen Werten verglichen.

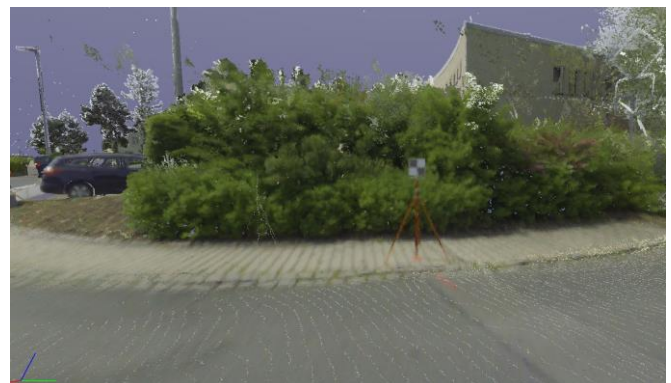


Abbildung 30: Eichstrecke 2 mit Punktwolke aus Befahrung und mit Zieltafel (links), Punktwolke aus stationärem Scan (rechts).

Die zweite Eichstrecke wurde so konzipiert, dass sie keine größeren Sichteinschränkungen aufweist und somit einen optimalen GNSS-Empfang gewährleistet. Auf den Teilstrecken befanden sich Gebäude, an denen zusätzlich feste Punkte tachymetrisch bestimmt wurden. Diese Strecke wurde mehrfach in beiden Richtungen und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten befahren, um die Punktwolken miteinander vergleichen zu können. Durch den Vergleich zweier Punktwolken sowie durch die Befahrung in entgegengesetzter Richtung

und die Mehrfachbefahrungen an den bekannten Festpunkten wurde die Ausrichtung des Scanners zur IMU während der kinematischen Erfassung überprüft und final justiert.

Mit den eingesetzten Sensoren wurde eine hohe und ausreichende Genauigkeit bei der Georeferenzierung erreicht. Die Beispieldaten wurden mit GNSS und Inertialsystem aufgenommen und im Postprocessing im qualitätsgeprüft und verbessert. Ausfälle und Ungenauigkeiten der GNSS Systeme konnten mit dem Inertialsystem korrigiert werden. Zusätzlich befanden sich auf der flexiblen Plattform zur Erstdatengewinnung acht Industriekameras und drei Scanner. Diese dienten zur Datengewinnung für die Erprobung nachgelagerter Entwicklungen der Projektpartner. Die Daten wurden den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

## Arbeitspaket 8: Entwicklung künstliches neuronales Netz

In Bezug auf die Erstellung der neuronalen Netzen wurden verschiedene Untersuchungen vorgenommen. Diese beinhalten die Analyse von 2D und 3D Daten, die Bearbeitung von strukturierten Höhenkarten und die Bearbeitung von unstrukturierten Punktwolken. Dabei konnten die folgenden Erkenntnisse erzielt werden:

1. *2D-Daten gegenüber 3D-Daten:* Die Arbeit mit 2D-Daten ist oft einfacher, da sie weniger Dimensionen umfasst und visuell auf eine klare Art und Weise dargestellt werden kann. Viele analytische und Visualisierungstechniken sind für 2D-Daten gut etabliert. Für Aufgaben, die speziell 3D-Informationen erfordern, wie zum Beispiel Computergrafik, virtuelle Realität oder bestimmte wissenschaftliche Simulationen, kann die Arbeit mit 3D-Daten jedoch notwendig und angemessen sein. Es ist wichtig zu beachten, dass Fortschritte in Technologie und Tools die Arbeit mit 3D-Daten kontinuierlich verbessern.

2. *Strukturierte Daten gegenüber unstrukturierten Daten:* Strukturierte Daten, die in einem vordefinierten Format mit einem klaren Schema organisiert sind, können einfacher zu handhaben sein, da sie einen konsistenten Rahmen für Analyse und Manipulation bieten. Strukturierte Daten finden sich häufig in relationalen Datenbanken, Tabellenkalkulationen oder CSV-Dateien. Auf der anderen Seite fehlt unstrukturierten Daten, wie zum Beispiel Textdokumenten, Bildern, Tonaufnahmen oder Videos, eine vordefinierte Struktur und sie stellen zusätzliche Herausforderungen in Bezug auf Interpretation und Analyse dar. Unstrukturierte Daten enthalten jedoch oft wertvolle Informationen, die durch Techniken wie Natural Language Processing, Computer Vision oder Audioanalyse extrahiert werden können.

Machine Learning-Modelle können darauf trainiert werden, unstrukturierte Daten zu verstehen, wobei jedoch möglicherweise mehr Vorverarbeitung und Feature Engineering erforderlich sind.

3. *Testen der Inferenz anhand von Höhenkarten:* Höhenkarten werden typischerweise in der Computergrafik verwendet und stellen ein 2D-Bild dar, das Höheninformationen codiert. Sie können für Aufgaben wie Geländemodellierung, Texturzuordnung oder Erzeugung von 3D-Darstellungen nützlich sein. Das Testen der Inferenz anhand von Höhenkarten würde das Anwenden von Algorithmen oder Modellen beinhalten, um Merkmale basierend auf den Höhenwerten vorherzusagen oder zu analysieren. Die Komplexität und Geschwindigkeit dieses Prozesses hängen von der spezifischen Inferenzaufgabe, dem verwendeten Algorithmus sowie der Größe und Auflösung der Höhenkarten ab.

Zusammenfassend hängt die Leichtigkeit und Geschwindigkeit der Arbeit mit verschiedenen Arten von Daten von verschiedenen Faktoren ab, einschließlich der spezifischen Aufgabe, der verfügbaren Tools und der Expertise der beteiligten Personen. Im Rahmen dieses Projektes haben wir uns für die Arbeit mit strukturierten Höhenkarten entschieden. Exemplarisch seien hier ein paar Höhenkarten gezeigt:

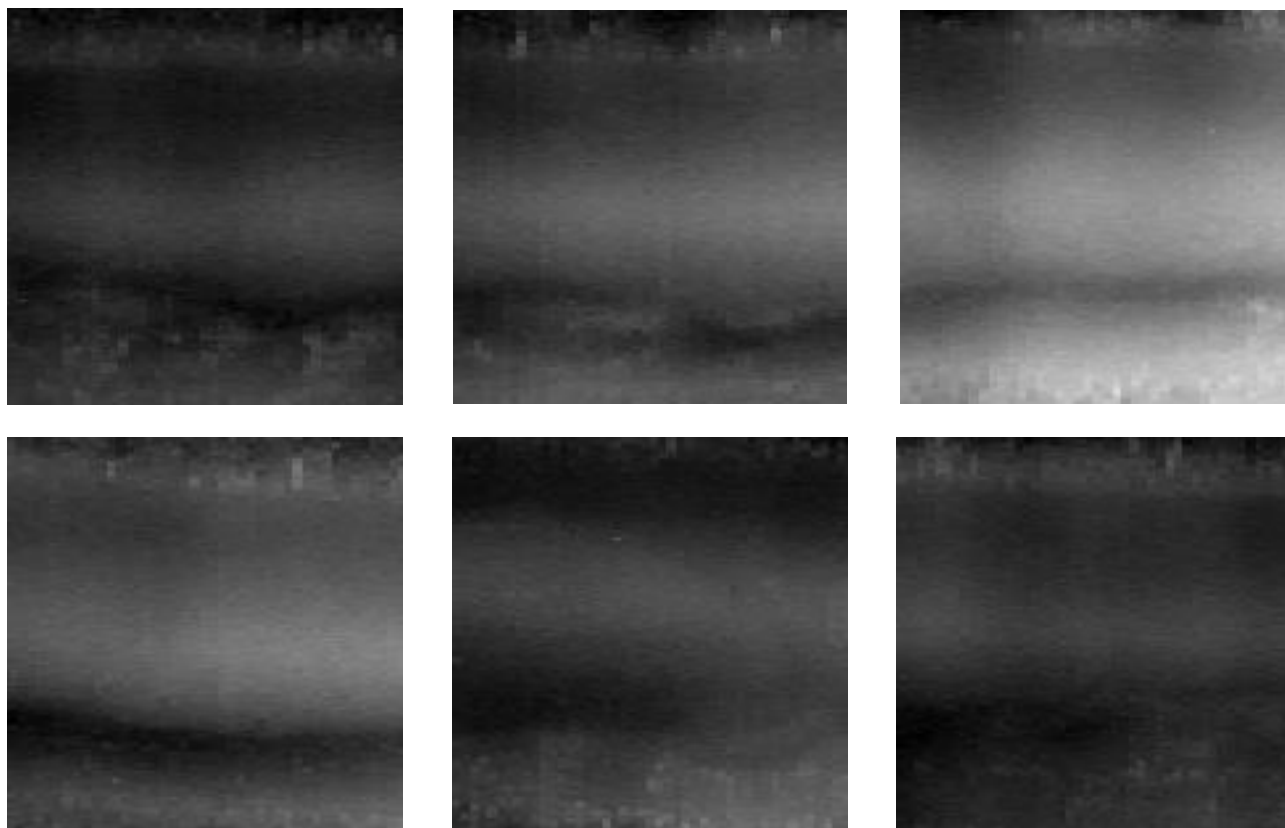


Abbildung 31: Beispiele von Höhenkarten

Für die Vorverarbeitung, bzw. Segmentierung wurden die folgenden Segmentationsparameter gewählt:

Segmentbreite: 4 m

Segmentlänge: 6 m

Segmenttiefe: 40 cm

Bildparameter:

Auflösung: 150 x 150

Interpolation: Nächster Nachbar

Anhand dieser Daten wurde ein künstliches neuronales Netz als Klassifikator erstellt.

Daten wurden von den Projektpartnern annotiert und mit diesen Daten wurde der Klassifikator trainiert. Die folgenden Schadstufen/Schadphänomene sollten untersucht werden:

#### Schadphänomene:

<b>Merkmal</b>	<b>Anzahl Beispiele</b>
Auswaschung	7
Schlagloch	36
Setzungsverformung	115
Spurrinne	19
Starke Deformation	58
Tiefgründige Verformung des Oberbaus	19
Starke Deformation	58
Tiefgründige Verformung des Oberbaus	12
Verflachung	424
freiliegender Untergrund	70

Genauigkeit auf 20 % der Daten: >90 %

#### Schadstufen:

<b>Merkmal / Klasse</b>	<b>Anzahl Beispiele</b>
Klasse 1	19
Klasse 2	425
Klasse 3	122
Klasse 4	121
Klasse 2.I	2
Klasse 2.II	18
Klasse 2.III	11
Klasse 2.IV	7

Genauigkeit auf 20 % der Daten: >80 %

Abschließend konnte eine sehr gute Erkennungsrate auf diesen sehr herausfordernden Datensatz erzielt werden.

Um mit diesen Daten möglichst effizient arbeiten zu können, und in Hinblick auf das Gesamtergebnis wurde eine Schnittstelle für die weitere Verarbeitung entwickelt. Diese wurde mit den Projektpartnern abgestimmt, bzw. mit deren Input erarbeitet. Ziel der Schnittstelle war der Einzug von Daten einerseits und die Ausgabe der Ergebnisse andererseits, so dass diese Ergebnisse weiterverarbeitet werden können. Die Python-basierten Schnittstelle zahlt eng mit dem von GeoNet entwickelten Objektmodell. Ein von HD-Vision entworfener Einlese-Algorithmus arbeitet mit dem innerhalb des Projektes entwickelten Datenstandard für die Rohdatendatenverarbeitung.

## Arbeitspaket 9: Messdatenfusion

Analog zu der Systemkalibrierung (AP7) gliedert sich auch dieses Arbeitspaket in zwei Entwicklungsprozesse. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass sich die Fusion der Messdaten hauptsächlich auf die Kalibrierung stützt. Die fusionierten Messdaten des Abtastsystems (M1 bis M3) als Relativkoordinatensystem müssen anschließend mit den Georeferenzen fusioniert werden.

Prinzipbedingt sind für die unterschiedlichen Erfassungsbereiche M1 – M3 verschiedene Sensoren und Messprinzipie notwendig. Aus dieser Tatsache ergeben sich eine Vielzahl an Problemstellungen. unterschiedliche Systeme unterschiedliche Parameter vorweisen - unmittelbare Problemstellungen. Die ersten Problemstellungen, welche auf konzeptioneller Ebene gelöst werden muss, sind die sich unterscheidenden Erfassungsbereiche. Soll ein zusammenhängendes und lückenloses räumliches Abbild eines Waldweges erfasst werden, so müssen die (verschiedenen) Erfassungsbereiche der Sensoren zeitlich derart verkettet werden, dass das Auslösen eines Erfassungsvorganges („Triggerung“) so exakt wie möglich mit der Momentangeschwindigkeit des Fahrzeugs synchronisiert ist. Abbildung 32 stellt eine Fahrt zwischen zwei Positionen des Fahrzeugs als Zeitdiagramm dar. Die verschiedenen Auslösezeitpunkte der Teilsysteme sind darin schematisch sequentiell quantisiert.

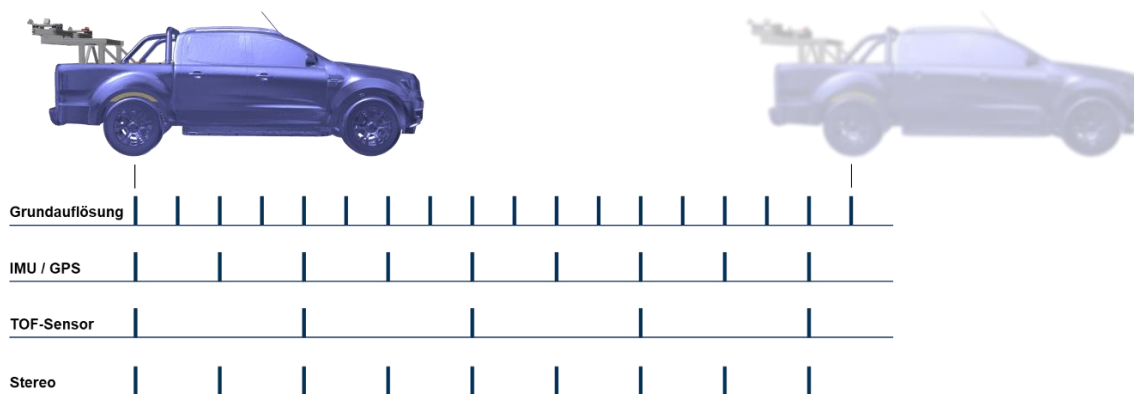


Abbildung 32: Timing Diagramm für eine bewegte Erfassung.

Die Fusion der multimodalen Daten basiert nun auf drei wesentlichen Schritten. Der erste Schritt fusioniert die Daten im Sinne einer statischen Szene anhand der Kalibrierdaten. Dabei sind besonders geometrische Operationen wie Translation und Rotation der Einzelszenen zueinander erforderlich, sodass eine registrierte Gesamtszene erzeugt werden kann. Die für die geometrischen Szenen erforderlichen „Verschiebungsparameter“ erhält man aus dem Kalibriervorgang im statischen Fall. Dieses Vorgehen erfordert eine absolut starre Relativlage der Systeme zueinander, was aber in den konstruktiven Bestandteilen anderer Arbeitspakete hinreichend gut gelöst wurde. Überführt man nun das statische Szenario in ein bewegtes, so sind die Kalibrierparameter weiterhin relevant, um die geschwindigkeitsabhängigen Auslösezeiten (Trigger-Zeitpunkte) der Einzelsysteme zu bestimmen. Denn aus den möglichen Sichtbereichen und den vorher definierten Überdeckungsbereichen lassen sich anhand der Verschiebungsparameter innerhalb eines Zustandsraummodells notwendige Triggerzeitpunkte für die individuelle Erfassung der Teilsysteme ableiten. Ein entsprechender Algorithmus wurde in eine Software überführt. Für eine detaillierte Beschreibung sei auch an dieser Stelle auf den Anhang verwiesen.

Während der Befahrung mit dem o.g. 3D-Erfassungssystem wird eine Trajektorie aufgezeichnet, die dokumentiert, wo sich das System zu welchem Zeitpunkt befand und welche Orientierung es im dreidimensionalen Raum hatte. Für die Erfassung dieser Trajektorie kommen verschiedene GNSS-Systeme zum Einsatz, die zur präzisen Verortung dienen. Ergänzend wird ein Inertialsystem verwendet, das die Ausrichtung des MMS im Raum erfasst. Diese Kombination ermöglicht es, sowohl die Position als auch die Lage des MMS in einer sehr dichten zeitlichen Auflösung zu bestimmen. Diese Schnittstelle bildet nun die abgeschlossene Fusion der Geo-Referenzsensorik und der Abtastsensorik für den Waldwegbereich (M1 bis M3).

Ein eigener Zeitserver für das (gesamte) MMS spielt eine entscheidende Rolle in diesem Prozess. Alle anderen Sensoren können sich auf dieses Zeitsystem der Trajektorie beziehen, was sicherstellt, dass alle Sensordaten mit einem einheitlichen zeitlichen Bezug abgespeichert werden. Diese Vorgehensweise bildete die Grundlage dafür, weitere projektspezifische Sensoren in das System einzubinden und deren Daten mit geografischem Bezug auszuwerten.

Die Integration dieser Technologien und Methoden ermöglicht nicht nur eine präzise Erfassung von Geodaten, sondern auch eine umfassende Analyse und Auswertung der gesammelten Informationen. Durch die Synchronisation aller Sensoren auf eine gemeinsame Zeitachse wird sichergestellt, dass alle Daten konsistent sind und somit qualitativ hochwertige Ergebnisse liefern können.

Die Befahrungsdaten vom MMS werden in einer hierarchischen Struktur abgelegt. Sie werden in Straßen/Wege und zugehörige Abschnitte unterteilt. Unterhalb der Abschnitte werden die Richtung und Gegenrichtung historisiert abgelegt. D.h. innerhalb eines Befahrungsprojektes können auch Nachbefahrungen von Abschnitten verwaltet werden. Das gibt die Möglichkeit, Strecken zeitlich zu vergleichen (z.B. nach durchgeführten Wegearbeiten). Je Kamera des MMS gibt es ein Unterverzeichnis, mit einem Bild-Container. Die 3D-Daten sind unterteilt in \*.rku-Datei (Trajektorie) und \*.laz-Dateien (Punktwolke). Um die Anforderungen der Arbeitsplätze gering zu halten, werden die Punktwolke-Daten aufgeteilt in mehrere Teile (z.B. in Blöcke von ca. 10.000.000 Punkten). Sie können aber auch als Ganzes ausgegeben werden.

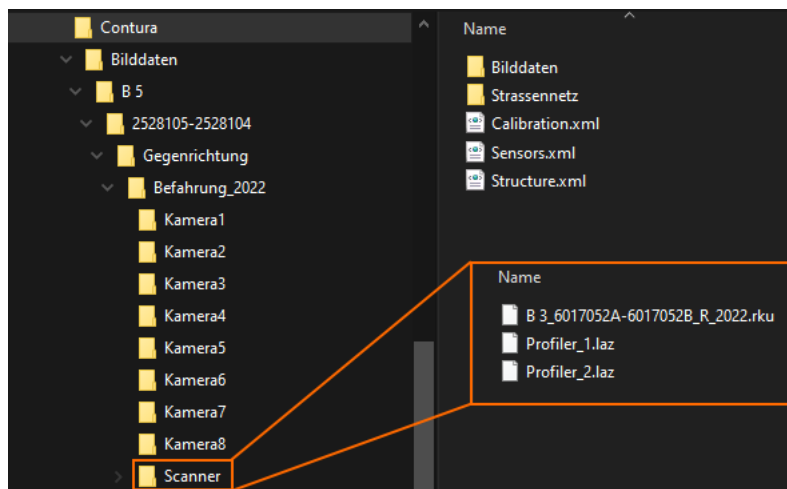


Abbildung 33: Struktur der MMS-Daten

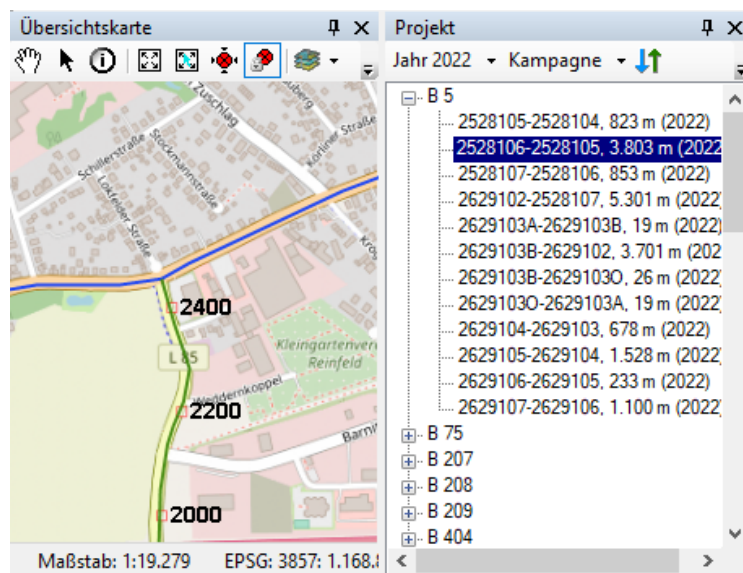


Abbildung 34: Projektanzeige als Karte und Straßenabschnittsliste

Für einen geografischen Überblick der befahrenen Strecken ist im Ordner „Strassennetz“ ein Shape-Layer hinterlegt. Dieser wird im Betrachter dargestellt ebenso wie die Straßenabschnittsliste (aus der Steuerdatei Structure.xml).

## Arbeitspaket 10: Entwicklung Auswertesoftware Wegezustand

Die Auswertesoftware entstand in enger Zusammenarbeit mit den Partnern. Es wurde im ersten Schritt eine objektbasierte Algorithmenstruktur entworfen. So war es möglich, die von HD-Vision und NavLog entwickelten Methoden bausteinartig in die Gesamtsoftware zu implementieren. Das Klassenmodell beinhaltet alle im Projekt entwickelten Datenstrukturen und Methoden. Es bildet somit das Zusammenspiel der Teilentwicklungen inklusive der Datenstränge informatisch ab. Von GeoNet wurde zusätzlich ein Modul entwickelt, das die personenbezogenen Daten automatisiert unkenntlich macht. Für die Klassendiagramme etc. sei auf den Anhang verwiesen.

Im Folgenden sind die speziellen Datenmodelle für den Waldweg als Objekt sowie die letztendliche Repräsentation für den Nutzer beschrieben.

Nach Abschluss der Bedarfserhebung wurde unter dem Arbeitstitel ShapeForst 4.0 ein konzeptuelles Datenmodell in Anlehnung an das bestehende Pragmatische ShapeForst entwickelt und um die neuen Erfordernisse ergänzt. Nach einer Vorstellung des neuen Konzeptes im Forstlichen Beirat der NavLog (20.10.2022 in Gotha) wurde der innovative Charakter sehr gelobt, jedoch auch Zweifel an der Fähigkeit zur Bereitstellung der, dem neuen Modell entsprechenden, Daten durch die Lieferanten geäußert. Somit wurde an diesem Punkt entschieden, dass jegliche Entwicklung in Form eines parallelen Prototypensystems, speziell für das Projekt CONTURA, stattfinden muss und bestehende Strukturen der NavLog dabei unberührt bleiben.

Das neu entwickelte Datenmodell umfasst eine Vielzahl von Tabellen zur Aufnahme von Wegeinformationen. In diesem Bericht werden nur die unten explizit erläutert, welche für das Projekt CONTURA dediziert sind. Die verwendeten Klassifizierungen entsprechen dem mit dem KWF gemeinsam erarbeiteten Schlüssel zur Zustandsbeurteilung der Fahrraumkomponenten.

Es handelt sich dabei um folgende Tabellen und Attribute:

### Tabelle CONDITION

Fahrbahnzustände können in vier Klassen im Feld CONDITION gespeichert werden. Das Feld POTHOLE kann vier Werte aufnehmen, welche jeweils den prozentualen Anteil der durch Schlaglöcher beschädigten Fahrbahnoberfläche klassifiziert wiedergeben. Das Datum und die Uhrzeit der Aufnahme ist zwingend anzugeben, wenn ein Zustand für den Wegeabschnitt gespeichert wird. Nach dem aktuellen Entwurf setzt eine Angabe in POTHOLE zwingend CONDITION = 2 voraus. Aktuell wird POTHOLE mit römischen Zahlen angegeben.

Attribut	Typ	Pflicht	Inhalt
RID	FK	Ja	ID des betroffenen Weges
FMEAS	Int	Ja	Metrische Angabe Startpunkt
TMEAS	Int	Ja	Metrische Angabe Endpunkt
POTHOLE	Text	Nein	Schlaglochklasse
CONDITION	Int	Nein	Zustandsklasse
DATE_TIME	Datetime	Nein	Datum und Uhrzeit zum Zeitpunkt der Aufnahme

### Mögliche Werte Feld POTHOLE

Wert	
Null	Keine Angabe
I	1 % - 5 % beschädigte Fahrbahnoberfläche des Wegeabschnittes
II	> 5 % - 15 % beschädigte Fahrbahnoberfläche des Wegeabschnittes
III	> 15 % - 25 % beschädigte Fahrbahnoberfläche des Wegeabschnittes
IV	> 25 % beschädigte Fahrbahnoberfläche des Wegeabschnittes

### Mögliche Werte Feld CONDITION

Wert	
Null	Keine Daten
1	Ungestörte Wasserableitung, Entmischung Oberflächenmaterial nach Fahrbewegungen
2	Gehinderter Wasserabfluss durch Ausbildung von Ebenen oder Rinnen
3	Duktile Setzungsverformung: Tiefgründige Deformation des Oberbaus; Z.B. Verdrückung

4	Setzungsverformung mit Auflöseerscheinungen: Z.B. Freiliegender Untergrund; Loses, freiliegendes Material der Tragschicht/Packlage/Unterbau
---	---

#### Tabelle CLEARWIDTH

Die geringste Breite des Lichtraumes ab Banketten in Meter.

Wildcards: Falls eine CLEARWIDTH > 6 Meter vorhanden ist, kann auch 99 gesetzt werden. Bei einer als gesichert einschränkend zu beurteilenden Breite: -99.

Attribut	Typ	Pflicht	Inhalt
RID	FK	Ja	ID des betroffenen Weges
FMEAS	Int	Ja	Metrische Angabe Startpunkt
TMEAS	Int	Ja	Metrische Angabe Endpunkt
CLEARWIDTH	Float	Nein	Lichte Breite neben Fahrbahn in Meter oder -99 für Einschränkung, 99 für keine Einschränkung

#### Tabelle CLEARHEIGHT

Die Höhe des Lichtraumes oberhalb der Fahrbahnoberfläche in Meter.

Wildcards: Falls der Bereich oberhalb der Fahrbahn vollständig frei ist oder als frei beurteilt wurde, kann 99 gesetzt werden. Bei einer als gesichert einschränkend zu beurteilenden Höhe: -99.

Attribut	Typ	Pflicht	Inhalt
RID	FK	Ja	ID des betroffenen Weges
FMEAS	Int	Ja	Metrische Angabe Startpunkt
TMEAS	Int	Ja	Metrische Angabe Endpunkt
CLEARWIDTH	Float	Nein	Lichte Höhe über Fahrbahn in Meter oder -99 für Einschränkung, 99 für keine Einschränkung

#### Tabelle LANEWIDTH

Breite der Fahrbahn in Meter. Für den Prototyp des Messsystems CONTURA wird als Fahrbahnbreite ungeachtet der Realität eine Breite von 3,5 m angenommen.

Attribut	Typ	Pflicht	Inhalt
RID	FK	Ja	ID des betroffenen Weges
FMEAS	Int	Ja	Metrische Angabe Startpunkt
TMEAS	Int	Ja	Metrische Angabe Endpunkt
LANEWIDTH	Float	Nein	Angabe in Meter

#### Tabelle R\_DRAINAGE

Grabenzustände können für in Digitalisierichtung rechts angegeben werden.

Attribut	Typ	Pflicht	Inhalt
RID	FK	Ja	ID des betroffenen Weges
FMEAS	Int	Ja	Metrische Angabe Startpunkt
TMEAS	Int	Ja	Metrische Angabe Endpunkt
R_CLASS	Int	Nein	Angabe Null (0), 1, 2, 3

#### Tabelle L\_DRAINAGE

Grabenzustände können für in Digitalisierichtung links angegeben werden.

Attribut	Typ	Pflicht	Inhalt
RID	FK	Ja	ID des betroffenen Weges
FMEAS	Int	Ja	Metrische Angabe Startpunkt
TMEAS	Int	Ja	Metrische Angabe Endpunkt
L_CLASS	Int	Nein	Angabe Null (0), 1, 2, 3



```

CREATE OR REPLACE FUNCTION public.process_way_audit()
  RETURNS trigger
  LANGUAGE 'plpgsql'
  COST 100
  VOLATILE NOT LEAKPROOF
AS $BODY$
BEGIN
    IF (TG_OP = 'DELETE') THEN
        INSERT INTO way_lc SELECT nextval('way_lc_gid_seq'::regclass), 'D', now(), user,
OLD.*;
        RETURN OLD;
    ELSIF (TG_OP = 'UPDATE') THEN
        INSERT INTO way_lc SELECT nextval('way_lc_gid_seq'::regclass), 'U', now(), user,
OLD.*;
        RETURN NEW;
    ELSIF (TG_OP = 'INSERT') THEN
        INSERT INTO way_lc SELECT nextval('way_lc_gid_seq'::regclass), 'I', now(), user,
NEW.*;
        RETURN NEW;
    END IF;
    RETURN NULL; -- result is ignored since this is an AFTER trigger
END;
$BODY$;

```

Abbildung 36: SQL Statement für einen Trigger der alle Änderungen in einer Historie der Wegegeometrien füllt.

Zeitpunkte von Neuanlagen werden automatisch beim Erstellen eines Features in der CONTURA-Datenbank generiert. Die Historie umfasst Zeitstempel in dem Moment der Manipulation von Daten (Updates, Löschungen, Neuanlagen) und den zuvor vorhandenen Zustand des Objektes inklusiver aller Attribute und der Geometrie. Abbildung 37 zeigt einen Auszug der Tabelle mit der Wegehistorie in der Datenbank.

gid	operation	stamp	userid	pkrid	oid	fid	geom_time	deadend	geom
[PK] bigint	character	timestamp without time zone	text	bigint	integer	integer	timestamp without time zone	integer	geometry
5	9 I	2023-05-09 09:49:28.765927	navlog	115	2	[null]	2023-05-09 09:47:51	[null]	0102000060E8640
6	10 U	2023-05-09 14:58:57.331301	navlog	115	2	[null]	2023-05-09 09:47:51	[null]	0102000060E8640
7	11 U	2023-05-09 15:09:38.267733	navlog	115	2	[null]	2023-05-09 09:47:51	[null]	0102000060E8640

Abbildung 37: Auszug der Tabelle „way\_lc“ in der CONTURA-Datenbank, welche sämtliche Zustände von Objekten vor deren Veränderung beinhaltet (nach rechts nicht abschließend dargestellt).

Die Historie wird in der Anwendung ebenfalls grafisch dargestellt. Abbildung 38 zeigt den Zustand der Daten zum aktuellen Zeitpunkt, Abbildung 39 enthält in halbtransparenter Farbgebung alle Objekte die in irgendeiner Form verändert worden sind. Eine Rollbackfunktion, welche es ermöglicht vorherige Zustände wiederherzustellen, war für das Prototypsystem nicht erforderlich und wurde während der Projektlaufzeit noch nicht umgesetzt.

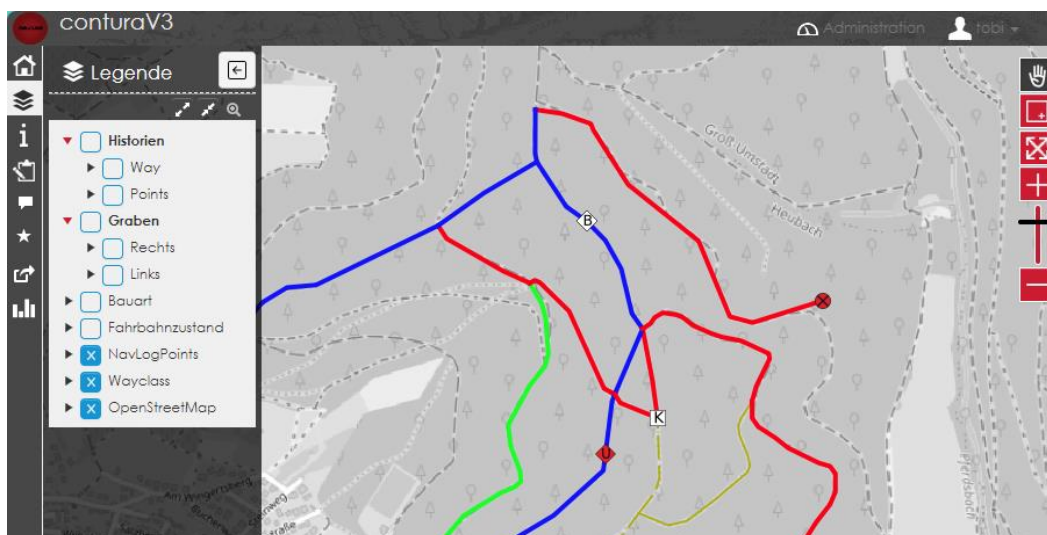


Abbildung 38: Darstellung des aktuellen Datenbestandes in der Webanwendung nach Datenveränderung.



Abbildung 39: Darstellung der Historie in der Webanwendung. Alle sichtbaren Objekte wurden entweder geometrisch oder attributiv manipuliert, oder gelöscht.

## Arbeitspaket 11: Entwicklung Berechnungstool Instandsetzung

Aus den Testdatensätzen von GEO Net wurden umfangreich verschiedene Zustandsklassen in vielfältigen Ausprägungen extrahiert und evaluiert. Die Zuordnung der Instandhaltungskosten erfolgte ebenfalls. Das Kalkulationstool dazu wurde im Zuge einer Ausschreibung umgesetzt.

WegeID		Abstand von	Abstand bis	Schadphänomen	Schadstufe
<b>Teil 1</b>					
1234096	1234091	284,9	293,7	Regelprofil	1
1234096	1234091	305,5	358,4	Regelprofil	1
1234096	1234091	390,7	411,2	Regelprofil	1
1234107	1234106	44,3	60,9	Schlagloch	2.III
1234107	1234106	120,7	152,6	Schlagloch	2.IV
1234107	1234106	172	174	Schlagloch	2.III
1234107	1234106	356	366	Schlagloch	2.III
1234109	1234107	49,4	62,3	Schlagloch	2.II
1234115	1234116	23,5	62	Regelprofil	1
1234115	1234116	76,8	153,6	Regeprofil	1

Abbildung 40: Beispiel Evaluation von Zustandsklassen

Die kartografische Benutzerschnittstelle ist definiert, Adaptionen hinsichtlich des Datenstandards und der Darstellung sind vollzogen und die Schnittstellen für erweiterte Funktionen festgelegt.

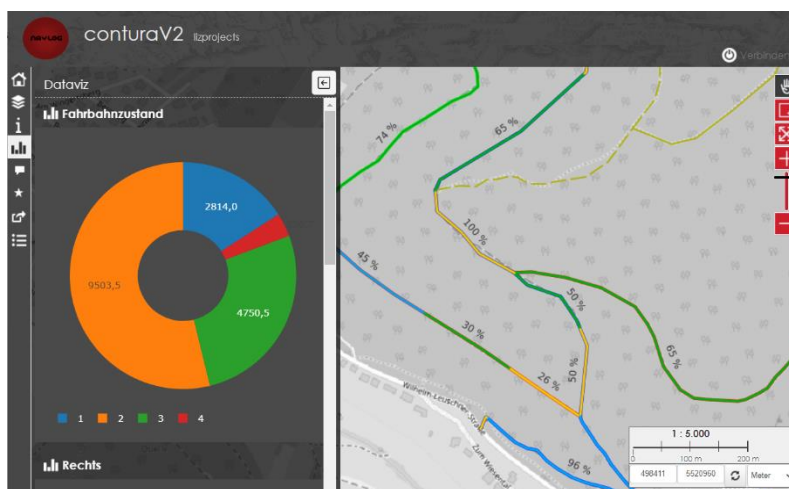


Abbildung 41: Kartografische Benutzerschnittstelle

Für die Entwicklung der Benutzerschnittstelle wurde festgelegt, dass sich der Projektpartner NavLog um die Erledigung und die Vergabe von Unteraufträgen kümmert. Aus diesem Grund erfolgte eine Mittelumwidmung von der FH Erfurt zur NavLog. Leider konnte kein Unterauftrag vergeben werden. Aus diesem Grund hat die NavLog aus ihren eigenen Mitteln die Erfüllung des Arbeitspakets geleistet.

Das Kalkulationstool generiert eine Einschätzung der Kosten für die Instandsetzung der Wald- und Forstwege generieren. Die Umsetzung erfolgte durch das KWF. In den folgenden Abbildungen ist dieses Kalkulationstool veranschaulicht.

## Wegebau und Instandsetzung kalkulieren

### - InstaWEG

Mit unserem neuen Kalkulationstool können Sie einfach und zielsicher zu erwartende Wegebau- und Instandsetzungskosten kalkulieren.

Die Anwendung wendet die neuen Wegezustandsklassen an (siehe Merkblatt).

Es handelt sich dabei um eine Vorkalkulation, die Ihnen eine erste Orientierung geben soll.

Entsprechend einer Wegezustandsklasse 1-4 werden unterschiedliche Wegepflege-, Instandhaltungs- oder Instandsetzungsmaßnahmen erforderlich. Für diese Maßnahmen werden jeweils unterschiedliche Geräte und Maschinen benötigt. Die Vorgehensweisen in verschiedenen Ländern oder Regionen unterscheiden sich mitunter erheblich. Das Standardverfahren gibt es nicht, da die Verantwortlichen für Wegebau das für die geologischen und topographischen Gegebenheiten geeignete Verfahren auswählen müssen.



#### Technische Fragen:

Bei Fragen rund um die App wenden Sie sich bitte an:

#### Alexander Kaulen

+49 (0)6078 785-27

Alexander.kaulen@kwf-online.de

Spremlinger Straße 1  
64823 Groß-Umstadt

Das Kalkulationstool wurde im Auftrag der Fachhochschule Erfurt im Rahmen des Verbundvorhabens Contura erstellt.

Das Vorhaben Contura wird gefördert vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft über seinen Projektträger FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

(Förderkennzeichen 2220NR061A-F)



Abbildung 42: Kalkulationstool – InstaWEG

Auf der Internetseite <https://kwf2020.kwf-online.de/instaweg/> kann das Kalkulationstool abgerufen werden (Passwort: IWA-2024). Hier ist zum einen die App zu finden und zum anderen ein Merkblatt Wegezustände sowie Hinweise zur Nutzung der App verlinkt (Abbildung 42).

**Wegstück 1**

Wegezustandsklasse  Länge des Wegstücks [m]

**Kosten für die Geräte**

R2-Gerät [€/lfm]	Schlepperanbaugerät [€/lfm]	Grader [€/lfm]
<input type="text" value="0,15"/>	<input type="text" value="0,15"/>	<input type="text" value="0,25"/>
Zusätzliches Gerät [€/lfm]	Zusätzliches Gerät [€/lfm]	Zusätzliches Gerät [€/lfm]
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

**Sonstige Kosten**

Materialbedarf [t/lfm]	Materialkosten [€/t]	Fixkosten [€]
<input type="text" value="0,1"/>	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="0"/>

Abbildung 43: Dateneingabe–Wegezustandsklassen 1-3

**Wegstück 1**

Länge des Wegstücks [m]

**Kosten für die Geräte**

Grader [€/lfm]	Radbagger [€/lfm]	Muldenkipper [€/lfm]
<input type="text" value="0,5"/>	<input type="text" value="0,8"/>	<input type="text" value="20"/>
Anbau Plattenverdichter [€/lfm]	Radlader [€/lfm]	Walzenzug [€/lfm]
<input type="text" value="0,9"/>	<input type="text" value="0,5"/>	<input type="text" value="0,3"/>
Zusätzliches Gerät [€/lfm]	Zusätzliches Gerät [€/lfm]	Zusätzliches Gerät [€/lfm]
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

**Sonstige Kosten**

Materialbedarf [t/lfm]	Materialkosten [€/t]	Fixkosten [€]
<input type="text" value="1,5"/>	<input type="text" value="18"/>	<input type="text" value="600"/>

**Zusätzliche Maschinen**

- Maschine Hinzufügen
- Wegstück Hinzufügen

Abbildung 44: Dateneingabe–Wegezustandsklasse 4

Das Kalkulationstool zur Berechnung von Wegebau- und Instandsetzungskosten für Wald- und Forstwege bietet eine benutzerfreundliche Oberfläche mit zwei separaten Dateneingaben. Die erste Eingabemaske ist für die Wegezustandsklassen 1 bis 3 vorgesehen (Abbildung 43), die sich auf die Kosten der Instandsetzung bestehender Wege beziehen. Hier müssen Nutzer zunächst die Wegezustandsklasse sowie die Länge des Wegstücks in Metern eingeben. Basierend auf diesen Angaben werden die anderen Felder automatisch ausgefüllt. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, diese vorgegebenen Werte manuell anzupassen, da es sich bei den vorgegebenen Werten um branchenübliche Standardwerte handelt, die regional variieren können.

In dieser Eingabemaske werden die angezeigten Kosten in zwei Kategorien unterteilt: Geräte- und sonstige Kosten. Letztere umfassen Materialbedarf, Materialkosten sowie Fixkosten. Zudem können Nutzer weitere Wegstücke hinzufügen, um eine umfassende Kostenschätzung zu erhalten.

Die zweite Dateneingabe ist für Wegezustandsklasse 4 gedacht (Abbildung 44), die den Neubau von Wegen betrifft, da diese Klasse nicht mehr instand gesetzt werden kann. Hier gibt es nur ein Feld zur Eingabe der Länge des betroffenen Wegstücks, während die Zustandsklasse vorgegeben ist. Im Vergleich zur ersten Eingabemaske stehen hier mehr Kostenfelder für Geräte zur Verfügung, da beim Neubau zusätzliche Ressourcen erforderlich sind. Außerdem können Nutzer neben einem neuen Wegstück auch eine zusätzliche Maschine hinzufügen.

Beide Eingabemasken werden durch einen Klick auf "Berechnen" bestätigt. Anschließend erhält der Nutzer zwei Hauptresultate: eines für die Instandsetzungskosten (Wegezustandsklassen 1-3) und eines für die Neubaugkosten (Wegezustandsklasse 4). Am Ende der Seite haben Nutzer die Möglichkeit, alle eingegebenen Instandsetzungs- und Neubaugkosten nach bestimmten Kriterien gefiltert anzuzeigen. Diese Filter können individuell angepasst werden, um eine gezielte Analyse der Kosten zu ermöglichen.

## Arbeitspaket 12: Evaluation Gesamtdemonstrator

Für die Evaluierung eines CONTURA-Messsystems wurde die Findung geeigneter Teststrecken als ein entscheidender Schritt identifiziert. Das ausgewählte Testgebiet befindet sich im Thüringer Forstamt Gehren, das aufgrund seiner geographischen Lage in der Nähe der Technischen Universität Ilmenau ausgewählt wurde. Diese Nähe ist von besonderer Bedeutung, da hier die meisten Anpassungen und Optimierungen am System vorgenommen wurden. Die Wahl des Testgebiets im Thüringer Forstamt Gehren bietet mehrere Vorteile. Zum einen ermöglicht die abwechslungsreiche Landschaft mit unterschiedlichen Vegetationsformen und Geländestrukturen eine umfassende Erprobung des Sensor-Systems unter realistischen Bedingungen. Zum anderen erleichtert die räumliche Nähe zur Technischen Universität den Austausch zwischen Entwicklung und Testfahrten, das eine schnelle Reaktion auf auftretende Herausforderungen während der Tests ermöglicht. Durch die Anwendung dieses Kriterienkatalogs wird sichergestellt, dass die gewählten Teststrecken sowohl den wissenschaftlichen Anforderungen als auch den praktischen Bedürfnissen des Projekts gerecht werden. Dies bildet die Grundlage für eine fundierte Evaluierung des Systems und dessen Leistungsfähigkeit in unterschiedlichen Umgebungen.

Auf Basis der Ergebnisse der vorhergehenden Arbeitspakete konnte die Fusion der multimodalen 3D-Daten erfolgreich durchgeführt werden. Anfängliche Probleme, die zu groben Versätzen und Inkonsistenzen führten, konnten behoben werden. Dazu wurde eine Wichtung im Verrechnungsalgorithmus implementiert, welche proportional vom Abweichungsmaß (Differenz geschätzte Trajektorie und Punktwolke) einen gewichteten Mittelwert bildet.

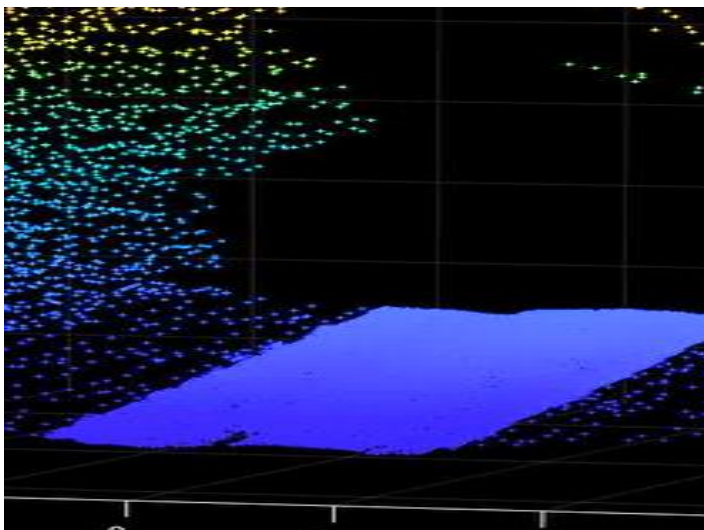


Abbildung 45: Fusionierte Messdaten aller 3 Messbereiche

Abbildung 45 zeigt ein Ergebnis der metrischen Abstandsdaten eines Wegeabschnitts über alle 3 Messbereiche. Es ist klar zu erkennen, dass die Daten des Lichtraumprofils mit einer geringeren Ortsauflösung vorliegen. Das steht aber nicht im Konflikt mit der Anforderung, „Einragungen“ in das Lichtraumprofil zuverlässig zu identifizieren. Für diesen Zweck ist die Auflösung sowohl in Querrichtung zur Bewegung, als auch in lateraler Richtung als hinreichend anzusehen.

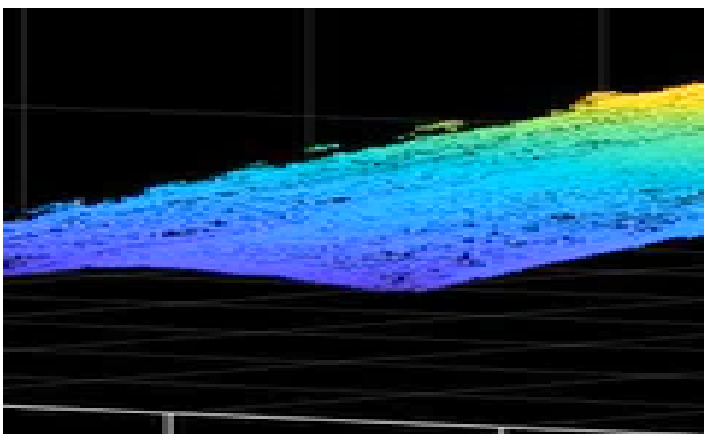
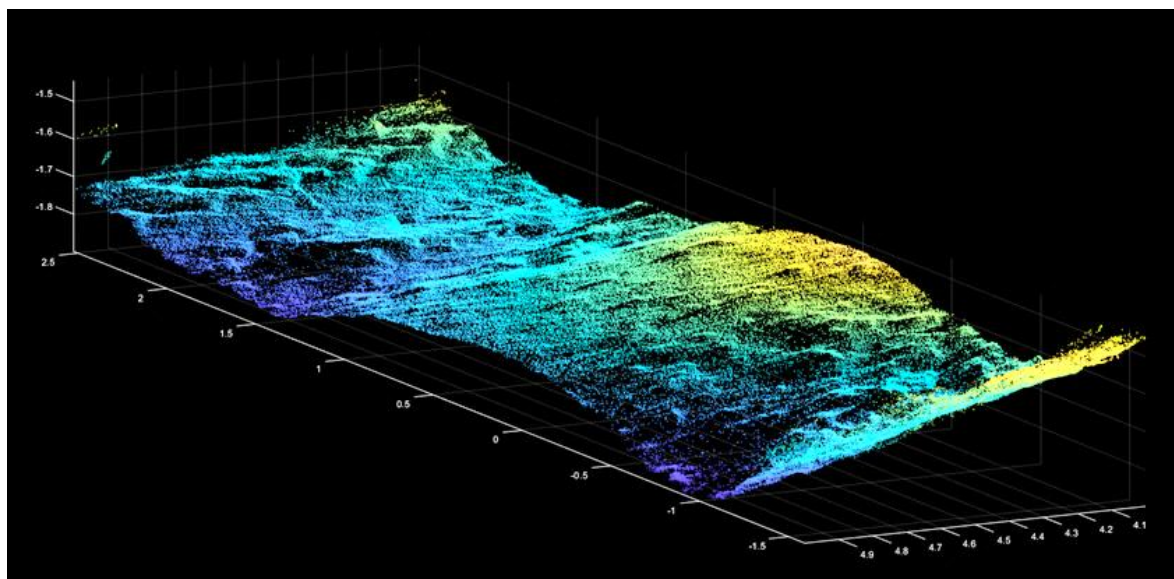


Abbildung 46: Ausrichtung des Wegeprofils gegenüber dem künstlichen Horizont.

In Abbildung 46 ist der Bezug des Wegekörpers gegenüber dem künstlichen Horizont dargestellt. Die Falschfarbendarstellung ist nach Höhenniveau kodiert. Prinzipiell werden die Rohdaten durch ein

nachgelagertes Berechnungsverfahren (Postprocessing) fusioniert. Untersuchungen und Abschätzungen haben ergeben, dass eine Datenverarbeitung während der Befahrung sich zu aufwendig bezüglich Rechen- und Energieressourcen darstellt.



*Abbildung 47: Hochaufgelöste Detailansicht des Wegekörpers zur Schadmerkmalsbestimmung.*

Eine Detailansicht zur Identifikation von Schadmerkmalen im Wegekörper ist in Abbildung 47 gegeben. Es muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass die Ergebnisse zur Identifikation von Schadmerkmalen durchaus geeignet sind. Dennoch weisen einige Abschnitte sporadische Inkonsistenzen bei der Verrechnung der Geometriedaten auf. Diese äußern sich überwiegend als Fehlstellen oder als Überlappung. An dieser Stelle besteht durchaus weiterer Optimierungsbedarf. Es besteht zudem die Möglichkeit, diese Problemstellen manuell nachzubearbeiten.

Während Evaluationen auf Teststrecke in der letzten Projektphase und innerhalb dieses Arbeitspakets wurde gemeinsam mit Vertretern der FNR ein Beitrag für die Filmreihe „Forst Erklärt“ erstellt. Dabei wurde der Funktionsprototyp detailliert erklärt und vorgeführt. Gleiches gilt für die Auswertesoftware und Datenrepräsentation.

## **2. Verwertung**

### **a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen.**

Von Seiten der Projektpartner wurden bisher keine Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen gemacht oder in Anspruch genommen. Die von den jeweiligen Verbundpartnern erstellten Konzepte und Systeme besitzen noch nicht die entsprechende Reife für die Geltendmachung von Schutzrechten oder Verwertungsmöglichkeiten. Alle genutzten Ressourcen obliegen dem Eigentum bzw. unterliegen dem Recht des jeweiligen Verbundpartners und werden untereinander mit Beachtung der Rechte und Pflichten aus dem Kooperationsvertrag nur für dem Projekt dienliche Zwecke ausgetauscht.

Aus der Bearbeitung der projektspezifischen Themenstellungen gingen wichtige Impulse für eine vorgenommene Erfindungsmeldung der TU-Ilmenau hervor. Teilaspekte der Erfindungsmeldung basieren auf weiterführenden Erkenntnissen, die unabhängig von der Projektbearbeitung weiterverfolgt wurden

### **b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende**

Die wirtschaftlichen Chancen des Vorhabens liegen in einer zukunftsorientierten und forstfachlich qualifizierten Waldbewirtschaftung, die eine gesteigerte gesellschaftliche Akzeptanz mit sich bringt. Durch die hohe Systemeffizienz und Wirtschaftlichkeit des CONTURA-Systems zur Erfassung und Beurteilung des Zustands von Waldwegen können sowohl im Privatwald als auch in kommunalen und staatlichen Forstbetrieben wichtige Grundlagen für automatisierte Entscheidungsunterstützung geschaffen werden. Diese basiert auf hochentwickelten und innovativen Prognosewerkzeugen, die derzeit einer breiten Nutzergruppe nicht oder nur eingeschränkt zur Verfügung stehen.

Der wirtschaftliche Vorteil des Projekts manifestiert sich klar in einer langfristigen Zielorientierung sowie der Optimierung der Maßnahmendurchführung im Rahmen eines nachhaltigen Waldwegemanagements. Besonders im Klein- und Kleinstprivatwald führt dies zu einer „In-Wert-Setzung“ vorhandener nachwachsender Ressourcen, die andernfalls nur eingeschränkt oder gar nicht marktverfügbar wären.

Ein entscheidender Aspekt ist, dass es für die durch das System CONUTRA abgedeckten Aufgaben keine vergleichbaren Systeme gibt. Dies verschafft dem Projekt einen einzigartigen Wettbewerbsvorteil und eröffnet neue Möglichkeiten für eine effiziente Waldbewirtschaftung. Die Implementierung dieses Systems wird nicht nur die Ressourcennutzung optimieren, sondern auch dazu beitragen, den Wert von Wäldern zu steigern und deren nachhaltige Nutzung zu fördern.

Insgesamt bietet das Vorhaben somit nicht nur ökologische Vorteile, sondern auch signifikante wirtschaftliche Perspektiven für alle Beteiligten in der Forstwirtschaft.

### **c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende**

Das vorliegende Projekt zur Entwicklung eines optisch basierten Systems zur qualitativen und quantitativen Zustandserfassung von Waldwegen verspricht signifikante wissenschaftliche und technische Fortschritte in der forstwirtschaftlichen sowie potenziell landwirtschaftlichen Praxis. Die Implementierung dieses Systems wird eine Vielzahl von Verbesserungen in den Abläufen, Verfahren und Prozessen ermöglichen, die sich in mehreren Nutzenkategorien konkretisieren lassen.

Ein zentrales Merkmal des neuen Systems ist die automatisierte Erfassung des Zustands verschiedener Wegeklassen, von LKW-fähigen Wegen bis hin zu naturgebundenen Maschinenwegen. Diese präzise Datenerfassung ermöglicht eine standardisierte Bewertung nach Schadklassen, welche die Grundlage für eine automatisierte Technologieauswahl für notwendige Unterhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen bildet. Darüber hinaus wird das System in der Lage sein, Kostenkalkulationen für Pflege- und Instandsetzungsmaßnahmen über verschiedene perspektivische Zeithorizonte hinweg durchzuführen. Dies führt zu einer verbesserten Kostenkalkulation und einer fundierteren Rentabilitätsbetrachtung im Betrieb.

Die Reduzierung der Fehlerquote bei Ertragsplanungen ist ein weiterer wesentlicher Vorteil, da genaue lokale Zuordnungen von Zustandsdaten und Wegequalitäten ermöglicht werden. Dies unterstützt nicht nur die angepasste Zugangs- und Streckenplanung bei der Holzernte, sondern auch die Auswahl des optimalen Ernteverfahrens. Langfristig wird das System dazu beitragen, Instandhaltungsmaßnahmen strategisch zu priorisieren und diese in die Betriebsplanung zu integrieren.

Ein zusätzliches Augenmerk liegt auf der synergetischen Datennutzung für multifunktionale Auswertungstools, die auch landwirtschaftliche und touristische Zwecke bedienen können. Im Bereich der Feinerschließung werden spezifische Anforderungen wie die Erfassung der verursachten Profiltiefe sowie die Dokumentation von Schäden während der Maßnahmen adressiert. Diese Aspekte schaffen eine klare Grundlage für eventuelle Diskussionen über Ausgleichs- oder Ersatzleistungen und gewährleisten eine gute Wiederauffindbarkeit für Mehrfachnutzungen.

Technologisch eröffnet das Projekt durch die Digitalisierung der Daten gänzlich neue Möglichkeiten im Ablauf der Prozesse sowie innovative Marktapplikationen. Die präzise Erfassung des Wegesystems erlaubt

beispielsweise die Integration in ein bundesweites Wegekataster oder die Entwicklung einer automatisierten Pflege- und Instandhaltungsplanung mit zeitlich getakteten Vorschlägen an die jeweiligen Forstbetriebe. Die synergetische Zusammenarbeit mit dem beantragten Vorhaben InteliWAY könnte zudem eine besondere Innovationsstufe für Deutschland und interessierte Nachbarländer generieren.

Die Simulationsfähigkeit von Prozessen mithilfe digitaler Zwillinge stellt einen weiteren technologischen Fortschritt dar. Für die gerätetechnische sowie algorithmusgestützte Umsetzung sind mehrere Ziele definiert: Dazu gehören ein robustes Sensorsystem zur vollflächigen Erfassung von Boden- und Lichtraumprofilen sowie deren Georeferenzierung, die Entwicklung hybrider 3D-Sensoren mit Echtzeit-Profilerfassung, sowie automatische Trainingssysteme zur Klassifikation von Wegschäden und notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Projekt nicht nur erhebliche Effizienzgewinne in der forstwirtschaftlichen Praxis verspricht, sondern auch einen bedeutenden Beitrag zur Digitalisierung und Automatisierung in diesem Sektor leisten kann. Die Kombination aus innovativer Technologie, präziser Datenerfassung und intelligenten Algorithmen positioniert das Projekt als wegweisend für zukünftige Entwicklungen in der Forstwirtschaft und darüber hinaus.

#### **d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit des Projekts ist ein entscheidender Faktor für dessen langfristigen Erfolg und Nachhaltigkeit.

##### Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit:

Das Projekt CONTURA zur Entwicklung eines optisch basierten Systems zur qualitativen und quantitativen Zustandserfassung von Waldwegen basiert auf den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen in den Bereichen Geoinformatik, Sensorik und Datenanalyse. Die Integration innovativer Technologien, wie z.B. hybrider 3D-Sensoren und adaptiver neuronaler Netzwerke, ermöglicht eine präzise Erfassung und Analyse von Waldwegzuständen. Diese wissenschaftlichen Grundlagen schaffen die Möglichkeit, das System kontinuierlich weiterzuentwickeln und an neue Forschungsergebnisse anzupassen.

Darüber hinaus fördert das Projekt die Zusammenarbeit mit akademischen Institutionen und Forschungseinrichtungen, was zu einem Wissensaustausch führt, der sowohl die wissenschaftliche als auch die praktische Anwendung des Systems bereichert. Die Ergebnisse können in Fachpublikationen veröffentlicht werden, was nicht nur zur Sichtbarkeit des Projekts beiträgt, sondern auch neue Forschungsfragen aufwirft und zukünftige Studien anregt.

##### Wirtschaftliche Anschlussfähigkeit:

Die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit des Vorhabens zeigt sich in seiner Fähigkeit, sich nahtlos in bestehende Marktstrukturen einzufügen und neue Geschäftsmöglichkeiten zu schaffen. Durch die Bereitstellung eines einzigartigen Systems zur Waldwegzustandserfassung wird eine Lücke im Markt geschlossen, da vergleichbare Systeme derzeit nicht existieren. Dies eröffnet Potenziale für kommerzielle Anwendungen in der Forstwirtschaft sowie in angrenzenden Sektoren wie Landwirtschaft und Tourismus.

Das System kann als Grundlage für verschiedene Dienstleistungen dienen, darunter Beratung, Schulung und Wartung, was zusätzliche Einnahmequellen generiert. Zudem ermöglicht die Automatisierung von Entscheidungsprozessen eine Effizienzsteigerung bei der Waldbewirtschaftung, was zu Kostensenkungen und einer verbesserten Rentabilität führt.

Ein weiterer Aspekt der wirtschaftlichen Anschlussfähigkeit ist die Möglichkeit der Skalierbarkeit des Systems. Es kann leicht an unterschiedliche Betriebsgrößen angepasst werden – von kleinen Privatwäldern bis hin zu großen kommunalen oder staatlichen Forstbetrieben – wodurch es für eine breite Nutzergruppe attraktiv wird.

### **3. Erkenntnisse von Dritten**

Während der Bearbeitung des Vorhabens wurden die Inhalte mit dem Schwesterprojekt „Intelliway“ synchronisiert und harmonisiert. Ein weiteres Vorhaben mit inhaltlichen Schnittmengen ist nicht bekannt.

### **4. Veröffentlichungen**

Im Rahmen des Projektes entstanden die folgenden Veröffentlichungen:

- Beitrag auf der 18. KFW-Tagung, Schwarzenborn; 19. Bis 22. Juni 2024
- Beitrag 34. Weihenstephaner Forsttag „Spannungsfeld Forstweg“; 08.11.2024
- Beitrag Abschlusskolloquium Intelliway; 14.11.2024
- Beitrag Forst Erklärt: „Forstwege automatisch erfassen - Das Projekt Contura“
- Gundermann, S.M. (2023), Auswertung multimodaler Messdaten eines sensorbasierten Wegerfassungssystems mit den Werkzeugen der Qualitätssicherung, Ilmenau.

- Illmann, R., Rosenberger, M. and Notni, G. (2022), Overview of the state of the art in the digitization of drivable forestry roads. In Dhar, N.K., Dutta, A.K. and Babu, S.R. (Eds.), Image Sensing Technologies: Materials, Devices, Systems, and Applications IX: 3-7 April 2022, Orlando, Florida, United States 6-12 June 2022, online, 4/3/2022 - 6/13/2022, Orlando, United States, SPIE, Bellingham, Washington, USA, p. 16.
- Liu, C. (2024), Prädiktive Beleuchtungssteuerung für die dreidimensionale Erfassung von Forstwegen auf Basis des Stereo Imaging, Ilmenau.
- Petrich, L. (2024), Erprobung und Beschreibung geeigneter VIS und NIR Spektralbereiche für die bildgestützte 3D-Messtechnik im Outdoor-Bereich, Ilmenau.
- Richter, M. (2022), Aufbau eines 3D-Analysesystems für die Messung von Forstwegen (Wegekörperoberfläche), Ilmenau.
- Richter, M., Rosenberger, M., Meister, J., Illmann, R. and Notni, G. (2023), A review of different multispectral indices for monitoring plant health in mid-mountain sites. In Dhar, N.K., Dutta, A.K. and Babu, S.R. (Eds.), Image Sensing Technologies: Materials, Devices, Systems, and Applications X: 1-3 May 2023, Orlando, Florida, United States, 4/30/2023 - 5/5/2023, Orlando, United States, SPIE, Bellingham, Washington, USA, p. 39.

# ANHANG

## Teilvorhaben 1: 2220NR061A FHE

### 1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Teilvorhaben ist für die Koordination des Verbundvorhabens verantwortlich. Weiterhin wird hier die wissenschaftliche Voraussetzung für die Einbindung des Messsystems in die forstliche Produktionsplanung umgesetzt. Zusätzlich ist die Erstellung eines Planungstools für Logistik und Wegeinstandhaltung sowie die nachgelagerte Kostenschätzung, Praxistests auf ausgewählten Teststrecken sowie der Wissenstransfer für die forstliche Fachwelt sind Gegenstand des Teilvorhabens.

### 2. Bearbeitete Arbeitspakete

#### **Arbeitspaket 01: Gesamtkonzeption des CONTURA Mess- und Auswertesystems**

Ein Kickoff-Meeting in Ilmenau am 9.11.2021 markiert den Start der Bearbeitung des Verbundvorhabens. Hier erfolgte neben einem Erfahrungsaustausch der Dialog über technische und praktische Spezifikationen, sowie die Klärung des weiteren Vorgehens und die Abstimmung der einzelnen Partner untereinander zu den gemeinsam zu bearbeitenden Arbeitspaketen. Aufgrund der gemeinsamen Erarbeitung ihrer ersten drei Arbeitspakete sprachen sich die FH Erfurt und die NavLog GmbH bezüglich ihrer Zusammenarbeit erstmals zum KWF-Arbeitsausschuss Waldwegebau am 11./12.11.2021 und im Detail in einem Web-Meeting am 14.12.2021 ab. Im Arbeitsausschuss wurde eine Kooperation zwischen den Wegebauexperten, dem Projekt Intelliway und CONTURA beschlossen. Ein Workshop unter der Leitung des KWF zum fachlichen Austausch zwischen Wegebauexperten und Messtechnikern, sowohl online als auch vor Ort, brachte für beide Projekte einen hohen Erkenntnisgewinn und bestätigte das grundlegende Interesse beteiligter Forstbetriebe an einem solchen System.

#### **Arbeitspaket 02: Entwicklung Planungstool**

Im Zuge des KWF-Workshops wurden verschiedene Varianten der Zustandsdarstellung eruiert. Ein Farbskalenmodell, welches je nach Maßstab der Betrachtung den Detailgrad des Wegezustandes widerspiegelt und Weg, Graben und Lichtraumprofil separat darstellt, entspricht in hohem Maße den Vorstellungen der Praktiker. Wie die gestalterische Umsetzung letztendlich erfolgt, wird der weitere Entwicklungsprozess zeigen. Die Darstellung erfolgt bis auf einen Laufmeter genau. Für die Erarbeitung von Grenzwerten standardisierter Schadklassen ist im Zuge des Workshops ebenfalls ein Grundstein gelegt worden. Die Verknüpfung zu einem Gesamtsystem wird in Bezug auf Festlegung von Datenstandards, -erfassung und -speicherung von den Praktikern entscheidend beeinflusst. Entscheidungsbäume und Bewertungsmatrizen bilden dafür eine Grundlage. Zur Schaffung eines allgemeingültigen Systems bildet die Findung bundesweit einheitlicher Fachtermini eine wichtige Grundlage. Hierzu entwickelt die Fachhochschule Erfurt ein Glossar.

Die Bachelorarbeit eines Studenten der Fachhochschule Erfurt liefert eine umfangreiche Darstellung aktueller Wegebauertechnik und dazugehörige Kosten. Vorgaben hinsichtlich Gestaltung und Umfang der Arbeit erfolgten durch den Projektkoordinator. Die Arbeit liefert einen Teil der Grundlage für die Kalkulation der Instandhaltungskosten im weiteren Verlauf des Arbeitspaketes. Bei der Befahrung durch die Firma Geo NET solution im Vorfeld des ersten Zwischenmeetings konnte umfangreiches Bildmaterial zur Analyse von Wegeschäden gewonnen werden. Eine Analyse dieser Daten zur Klassifizierung von Wegeschäden steht an.

#### **Arbeitspaket 03: Entwicklung eines Parametersystems für die KI**

Bei der Bearbeitung der Arbeitspakete 2.1 – 2.3 im Zusammenhang mit den damit verbundenen Treffen von Wegebauexperten, CONTURA- und Intelliway-Projektbeteiligten wurden Erkenntnisse zu den Anforderungen des Gesamtsystems gesammelt. Eine vierstufige Schadklassifizierung bildet die Grundlage zur Einteilung der Schäden. Entsprechend den tatsächlich vorhandenen Wegebeschaffenheiten und den daraus erforderlichen Wegebaumaßnahmen konnte ein Bestimmungsschlüssel zur Einteilung der Schäden hergeleitet und Grenzwerte geschaffen werden. Der Aufbau eines künstlich intelligenten Ersatzes dieses Schlüssels ist der nächste Schritt im AP.

#### **Arbeitspaket 11: Entwicklung Berechnungstool Instandsetzung**

Ein Berechnungstool zur Instandsetzung wurde durch die FHE konzeptioniert. Es erfolgte die Vergabe von Unteraufträgen, das Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e. V (KWF) wurde als Unterauftragnehmer gefunden. Die Ergebnisse sind im Abschnitt „Arbeitspaket 11: Entwicklung Berechnungstool Instandsetzung“ beschrieben.

## Arbeitspaket 12: Evaluation Gesamtdemonstrator

Für die Befahrung wurde eine Teststrecke nahe Ilmenau ausgewählt. Da sich die primäre Entwicklung des Forschungsfahrzeugs an der TU Ilmenau befindet, hat sich der Standort der Teststrecke im Wald nahe Ilmenau im Gehrender Forstamt als praktikabel herausgestellt.

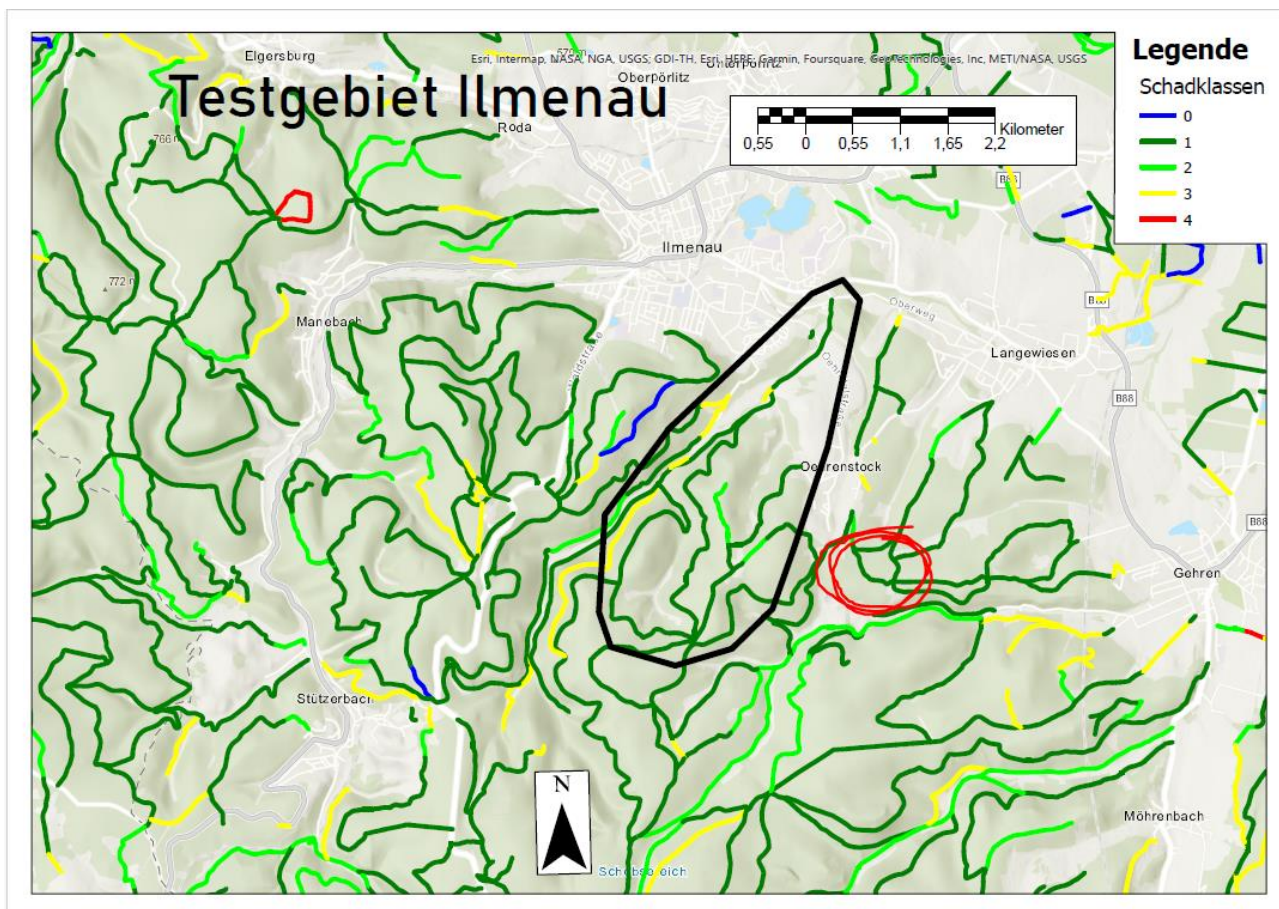


Abbildung 48: Teststrecke (roter Einkreisung)

### 3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Als wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens können die Koordinierung des Gesamtprojekts sowie die Entwicklung eines Bewertungsschlüssels für Wegeschadklassen. Weiterhin entstand in Zusammenarbeit mit dem KWF ein Glossar, das als allgemeingültiges System für die Findung bundesweit einheitlicher Fachtermini eine wichtige Grundlage bildet.

Außerdem wurde ein Kalkulationstool in Auftrag gegeben, das eine Einschätzung der Kosten für die Instandsetzung der Wald- und Forstwege generieren soll. Die Umsetzung erfolgte durch das KWF. Die Funktionsweise wurde im Abschnitt "Arbeitspaket 11: Entwicklung Berechnungstool Instandsetzung" beschrieben.

## Teilvorhaben 2: 2220NR061BI

### 1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Teilvorhaben 2 setzt sich mit der multimodalen Erfassung der relevanten Merkmale innerhalb der Erfassungsbereiche auseinander. Hierfür sind verschiedene Ansätze zu testen und entsprechend in das Gesamtsystem zu integrieren. Übergeordnet wird im geplanten Vorhaben die Gesamterfassungsarchitektur der multimodalen 3D-Erfassung über alle Messbereiche konzipiert und mit den Partnern abgestimmt. Das Ziel ist eine referenzierte Übergabe des 3D- Gesamtprofils an die nachgelagerte Verarbeitung.

### 2. Bearbeitete Arbeitspakete

#### Arbeitspaket 01: Gesamtkonzeption des CONTURA Mess- und Auswertesystems

Das Arbeitspaket 1 war im Rahmen des Verbundes von allen Partnern gemeinschaftlich zu erarbeiten. Dabei wurden Bedarfe festgelegt, ein detaillierter Projektplan zu definieren und konkrete Arbeitsinhalte sowie die damit verbundenen Zuständigkeiten abgestimmt. Als Ergebnis stand ein Lastenheft, welches konkrete Invarianten und Rahmenbedingungen für alle Partner verbindlich definiert. Die Bedeutung bezüglich des Teilvorhabens 2 lag konkret darin, die für die Erfassung relevanten Merkmale des Waldweges und die geltenden Randbedingungen abzustecken. Besonders betrifft das Abmaße und geometrische Form der Objekte und der Erfassungsbereiche selbst, sodass eine überschlägige Auslegung der Sensorik in konzeptioneller Form erfolgen konnte.

#### Arbeitspaket 04: Entwicklung Gesamtsensorkonzept

Eine Gesamtkonzeption konnte nahtlos an die Definition des Lastenhefts angeschlossen werden. Erfassungsbereiche und Merkmale wurden simuliert, wodurch die Auslegung und Auswahl geeigneter Teilsysteme für einen Praxistest erfolgen konnte. Hinsichtlich der Metadaten wurde eine Datenstruktur definiert, die Speicherung und Auswertung der eingezogenen Messdaten zur Qualitätsbewertung in einem nachgelagerten Prozess ermöglicht. Die TU-Ilmenau hatte zudem die Aufgabe der Koordination und Zusammenführung der parallelen Entwicklungsstränge von GeoNet (GNSS-Sensorik) und V&C (Abtastung Wegekörper/Messbereich M1) zu einem Gesamtergebnis auf Konzeptebene.

Innerhalb der Systemkonzeption der Sensorik für den Grabenbereich (M2) wurden die im Lastenheft definierten Bedingungen und Invarianten auf ihre physikalischen Eigenschaften näher untersucht. Das betraf vor allem Eigenschaften wie Reflexionsvermögen und spektrale Signaturen. Auf Grundlage dieser Daten konnten anschließend geeignete Teilkomponenten gegenübergestellt und für eine Auswahl bewertet werden.

Bezüglich des Systemkonzeptes für das Lichtraumprofil analog zum Grabenbereich vorgegangen. Jedoch war an dieser Stelle zusätzlich eine umfangreiche Untersuchung zu Gegenlichtsituationen und anderen Umweltbedingungen wie Nebel oder Niederschlag notwendig, da diese Effekte bei einer Messung entgegen der Sonne und durch die erhöhten Messdistanzen schwerer zum Tragen kommen.

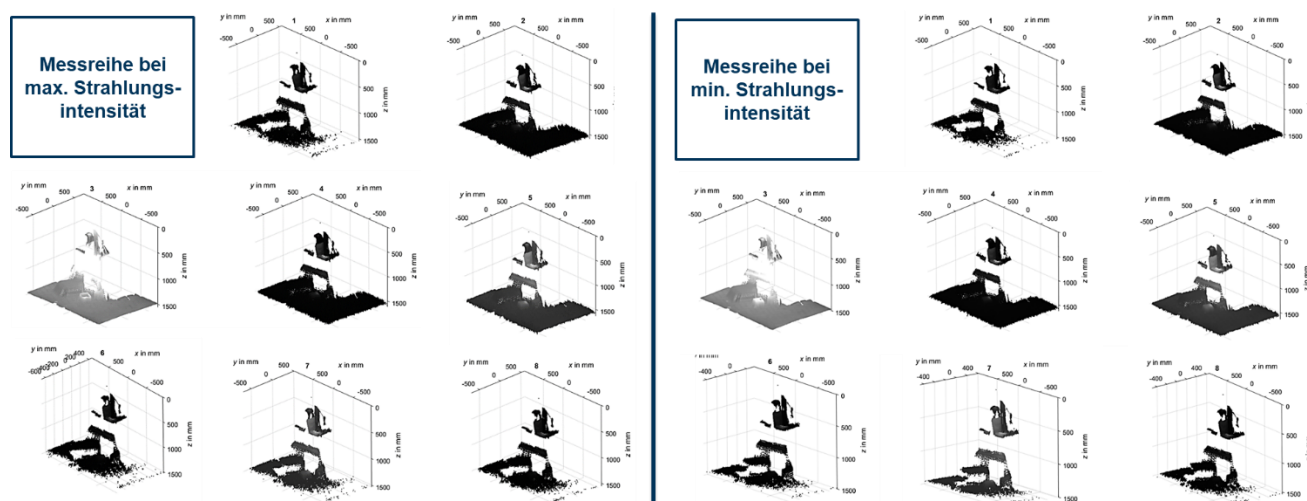


Abbildung 49: Messreihen bei unterschiedlichen Fremdlichteinflüssen (Störgrößen).

Die Voruntersuchungen bezogen sich vor allem darauf, Unzulänglichkeiten der ausgewählten Sensorsysteme unter Laborbedingungen und anschließend in einem statischen Einsatzszenario unter realen Bedingungen zu simulieren. Dadurch konnten Probleme identifiziert und bestmögliche Betriebsparameter der Sensorik ermittelt werden. Abbildung 49 und Abbildung 50 zeigen Voruntersuchungen eines TOF Sensors unter

Störgrößeneinfluss sowie die statistische Auswertung der Messreihen. Für die Untersuchungen zu den Sensoren für das Lichtraumprofil wurde analog dazu verfahren.

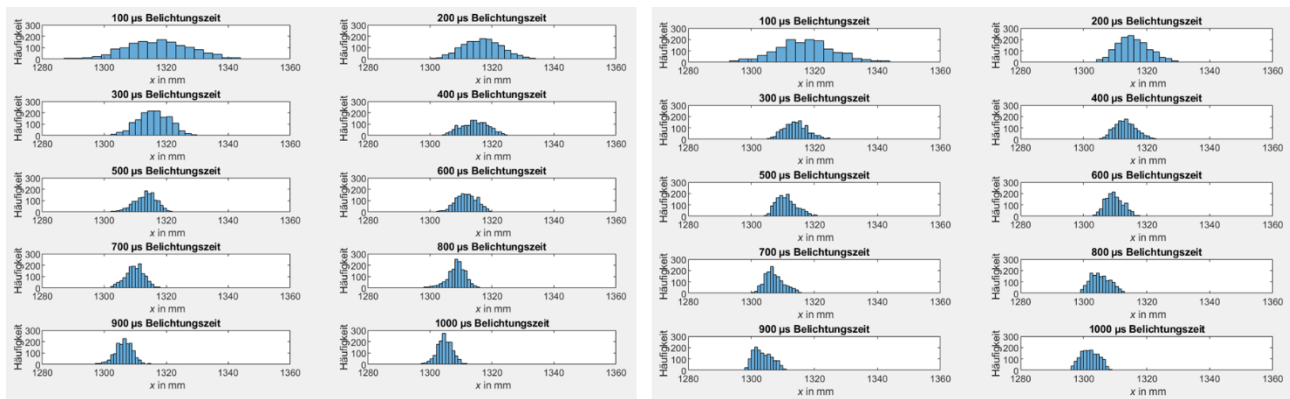


Abbildung 50: Statistische Betrachtung der Messabweichungen.

Der Gesamtdemonstrator wurde dann so konzipiert, dass eine simultane Nutzung der beiden Sensorprinzipie (Time-Of-Flight) und das 2-dimensionale LIDAR-System ermöglicht wird. Besonders bei der Zusammenstellung des doppelten TOF-Systems stellte sich heraus, dass in dem für die Kalibrierung notwendigen Überlappungsbereich mit einer gegenseitigen Beeinflussung der Messsysteme zu rechnen ist. Der Grund dafür ist prinzipbedingt, da die TOF-Systeme den Erfassungsbereich aktiv bestrahlen, wobei der zeitliche Verlauf der Bestrahlungsenergie ein für die Auswertung notwendiges Signal beinhaltet. Überlagern sich nun diese Signale aufgrund mehrerer Quellen, so ist keine Stabile Auswertung mehr möglich. In der Folge nimmt das Messrauschen zu und fehlerhafte Werte werden ausgegeben. Die Lösung des Problems besteht darin, innerhalb einer festen Taktung (Triggerung) jeder Quelle für sich ein Zeitfenster zu ermöglichen, in welchem diese so messen kann, als wäre sie ein Einzelsystem, wobei alle weiteren Quellen inaktiv sind. Dieses Prinzip lässt sich entweder softwareseitig realisieren, indem jedes System nur durch eine definierte Abfrage einen Messvorgang auslöst, oder hardwareseitig, wobei durch ein zusätzliches Signal der zeitliche Verlauf über einen Startimpuls kontrolliert wird. An diesem Punkt des Verbundvorhabens ist es noch nicht möglich, sich auf eine der beiden Verfahren festzulegen. Dementsprechend wurden beide Varianten vorbereitet und können später im simultanen Betrieb im Gesamtsystem bewertet werden. Hier ist auch zu berücksichtigen, dass im dynamischen Fall des Messvorgangs zeitliche Aspekte sehr kritisch zu bewerten sind, da dann das Messsystem gegenüber dem Messobjekt als bewegter Körper verstanden werden muss und die Ableitung der dynamischen Größen (Beschleunigung, Geschwindigkeit und Position) mittels zusätzlicher Inertialsensorik in einem Zustandsraummodell erfolgen muss. Der Demonstrator wurde schließlich so ausgelegt, dass eine Ortsveränderlichkeit gewährleistet ist und somit das System in verschiedenen Szenarien unter Laborbedingungen getestet werden kann.

### Arbeitspaket 07: Entwicklung Systemkalibrierung

Ziel der Erstellung des Kalibrierkonzepts auf Sensorebene war es, die antastenden Systeme auf ein gemeinsames Szenario zu referenzieren. Weiterhin ist dabei die Möglichkeit geboten, zweidimensional bildgebende Systeme- wie beispielsweise RGB Farbkameras – auf räumliche Punktwolken zu referenzieren. Durch dieses Vorgehen kann jedem bestimmbar Punkt im Raum (repräsentiert im Bezug zu 3 Basisvektoren) eine Farbinformation zugeordnet werden. Die Merkmalsdimensionen erhöhen sich dadurch erheblich, was vor allem in Hinblick auf den zu entwickelnden Filter zur Separation von Fahrbahn und Bewuchs als sehr gewinnbringend anzusehen ist (Abbildung 51).

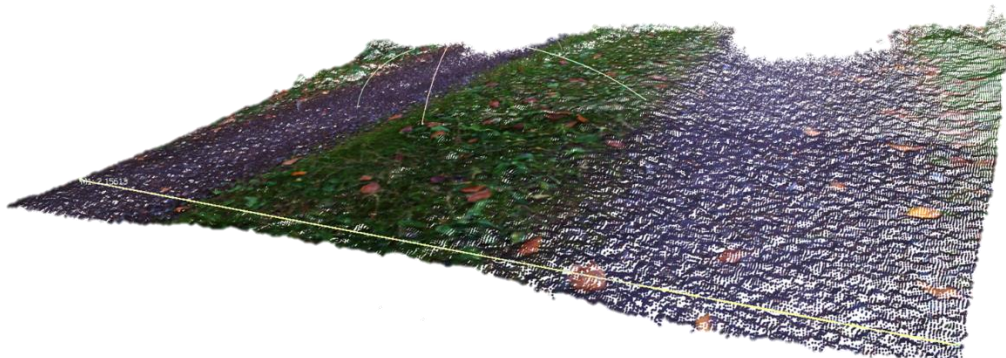


Abbildung 51: Typischer Wegekörper mit RGB-Farbinformation. .

Aufgrund der teilweise komplett verschiedenen Sensorprinzipie waren hier weitreichende systemtechnische Überlegungen und Tests erforderlich. Die Lösung des Problems besteht letztendlich darin, ein Kalibrierobjekt zu nutzen, welches die Referenzinformationen für ein Szenario sowohl als 2D, als auch 3D beinhaltet (3D-Schachbrett). Besonders problematisch war die Erfassung der 2D-Lidar Sensoren. Diese Systeme erfassen keine Punktwolke im eigentlichen Sinne, sondern eine scheibenartige Abtastung des Raumes in zweidimensionalen Polarkoordinaten. Um diesen Umstand während des Kalibriervorgangs zu beherrschen, wird eine zusätzliche 2D-Kamera eingesetzt, welche mit einem schmalbandigen Spektralfilter versehen ist, der auf die Wellenlänge des emittierenden Lasers (850nm) abgestimmt ist. Somit wird der Kontrast des im Raum rotierenden Punktes des LIDAR-systems gegenüber der Umgebung deutlich erhöht. Wird nun zusätzlich die Integrationszeit der Kamera stark erhöht, so erscheint der rotierende Punkt letztendlich als stehende Linie und kann durch einen Kantenantastalgorithmus im Bild bestimmt werden. Die Neigung der „Scheibe“ im Raum wird mittels Lichtschnittprinzip (Triangulation) am Kalibrierobjekt erfasst. Gemeinsam mit den durch das Kalibrierobjekt bestimmbar extrinsischen Parametern der beobachtenden Kamera sind nun alle notwendigen Informationen im richtigen Bezug zueinander vorhanden, wodurch jedes Sensorsystem und dessen Koordinatenursprung für sich beschrieben werden kann. Diese Methodik bildet die theoretische Grundlage für die Kalibrierung (Abbildung 54).

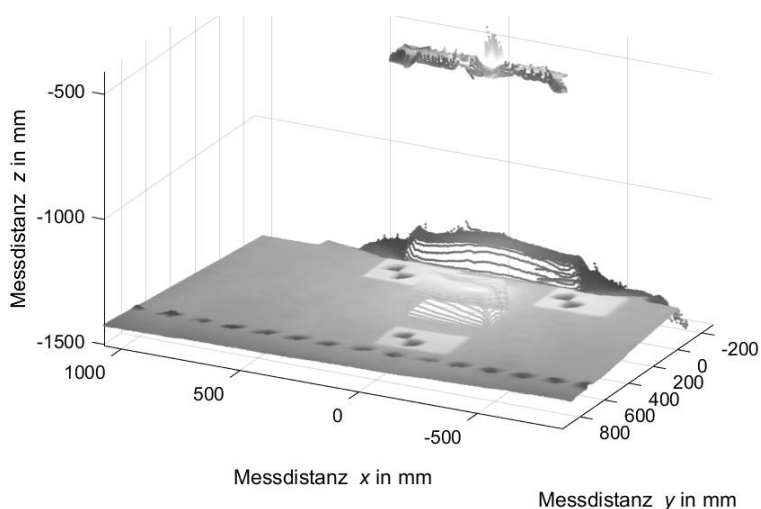
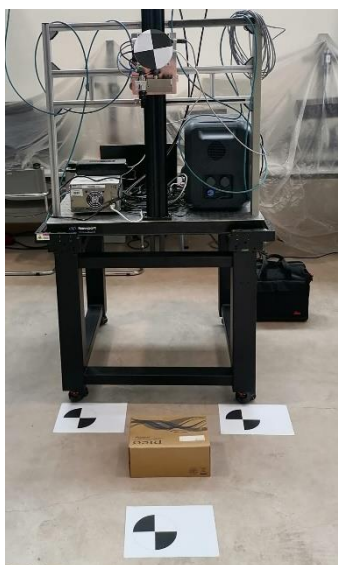


Abbildung 52: Kalibrieraufbau TOF (links) und TOF 3D-Daten (rechts).

Nachdem das Kalibrierkonzept simulativ und in realen in Einzeltests nachgewiesen werden konnte, galt es nun, dieses auf den Gesamtdemonstrator zu übertragen und anzuwenden. Hier konnte beobachtet werden, dass hinsichtlich der Relativbeziehungen den Sensoren konstruktiv nachgebessert werden muss. Für den realen Einsatz auf einem bewegten System (später Fahrzeug) ist diese Erkenntnis enorm wichtig, da selbst mit einer geringen Änderung der Relativpositionen die Referenz verloren geht und die Kalibrierung erneut durchgeführt werden muss, was sich jedoch im beabsichtigten Feldeinsatz nur schwer umsetzen lässt. Weiterhin wurde das Kalibrierkonzept im Allgemeinen derart validiert, dass alle Systeme zueinander referenziert werden konnten. Im nachfolgenden Schritt war es erstmals möglich, die Genauigkeiten und Streuung im referenzierten Gesamtszenario auch unter Einfluss der Störgrößen zu bestimmen. Dazu wurde der Gesamtdemonstrator im Außenbereich und unter wechselnden Umweltbedingungen (vor allem unterschiedliche Sonneneinstrahlung auf die Szene) einer Langzeituntersuchung ausgesetzt. Mittels der daraus resultierenden Ergebnisse war – basierend auf einem Versuchsplan – eine optimale Besetzung der Parameterwerte - und somit eine Minimierung der Streuung - möglich.

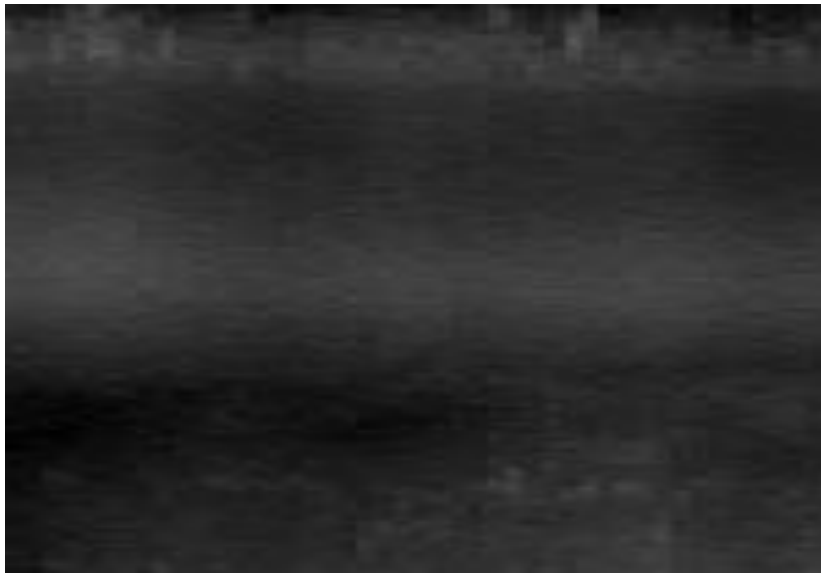


Abbildung 53: Referenzierung der 3D-Daten gegenüber den IMU- Daten.

Zusätzlich mussten die Sensoren gegenüber den IMU-Daten referenziert werden. Einen Ausgleich der 3D-Daten gegenüber einem künstlichen Horizont zeigt exemplarisch Abbildung 53.

### Arbeitspaket 09: Messdatenfusion

#### AP 9.1 Konzept Messdatenfusion multimodale Abtastung M1 - M3

Prinzipbedingt sind für die unterschiedlichen Erfassungsbereiche M1 – M3 verschiedene Sensoren und Messprinzipie notwendig. Aus dieser Tatsache ergeben sich eine Vielzahl an Problemstellungen. Die Erfassungsbereiche im räumlichen Sinne sind grundlegend verschieden und nicht perfekt zueinander ausgerichtet. Innerhalb der vorherigen Arbeitspakete konnte die Problemstellung der räumlichen (geometrischen) Synchronisierung durch umfassende Kalibriervorgänge gelöst werden. Die daraus ableitbaren Parameter dienen der nachträglichen Verrechnung der Teilszenen zu einer Gesamtszene (Registrierung). Für eine statische, ortsunveränderliche Aufnahme ist dieser Ansatz ausreichend und bildet ein stabiles Fundament für die Fusion der multimodalen Daten. Für die Erfassung eines Weges anhand einer Befahrung ist jedoch ein dynamisches Szenario zu betrachten. Auch hier ergeben sich aus der bereits beschriebenen Tatsache - dass unterschiedliche Systeme unterschiedliche Parameter vorweisen - unmittelbare Problemstellungen.

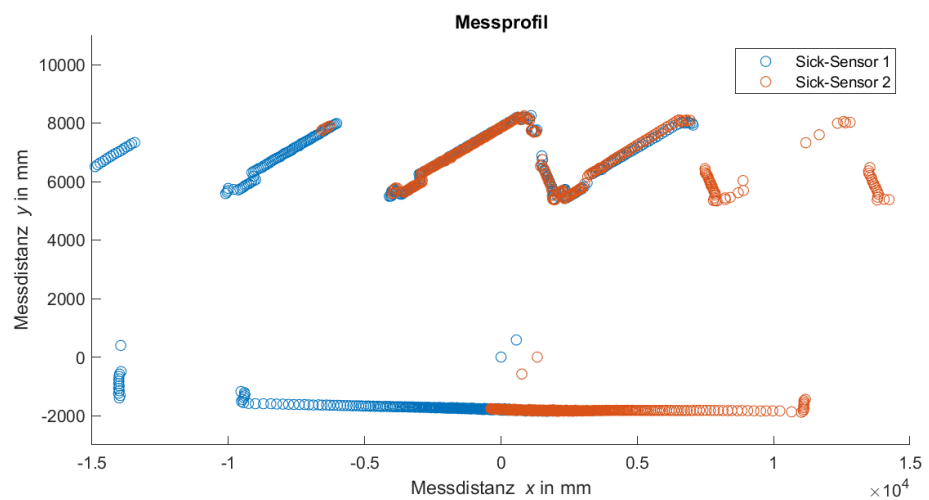


Abbildung 54: Kalibrieraufbau 2D-Lidar (links) und Referenzierte Messdaten zweier Systeme (rechts).

Die ersten Problemstellungen, welche auf konzeptioneller Ebene gelöst werden muss, sind die sich unterscheidenden Erfassungsbereiche. Soll ein zusammenhängendes und lückenloses räumliches Abbild eines Waldweges erfasst werden, so müssen die (verschiedenen) Erfassungsbereiche der Sensoren zeitlich derart verkettet werden, dass das Auslösen eines Erfassungsvorganges („Triggerung“) so exakt wie möglich mit der Momentangeschwindigkeit des Fahrzeugs synchronisiert ist. Gleiches gilt für die Erfassung der Inertialdaten, woraus die Momentangeschwindigkeit und die inhärente Momentanposition des Fahrzeugs berechnet werden muss. Gekoppelt an eine mögliche Grundauflösung des Systems muss also der Erfassungsvorgang zeitlich diskret und räumlich quantisiert werden. Abbildung 55 stellt eine Fahrt zwischen zwei Positionen des Fahrzeugs als Zeitdiagramm dar. Die verschiedenen Auslösezeitpunkte der Teilsysteme sind darin schematisch sequentiell quantisiert.

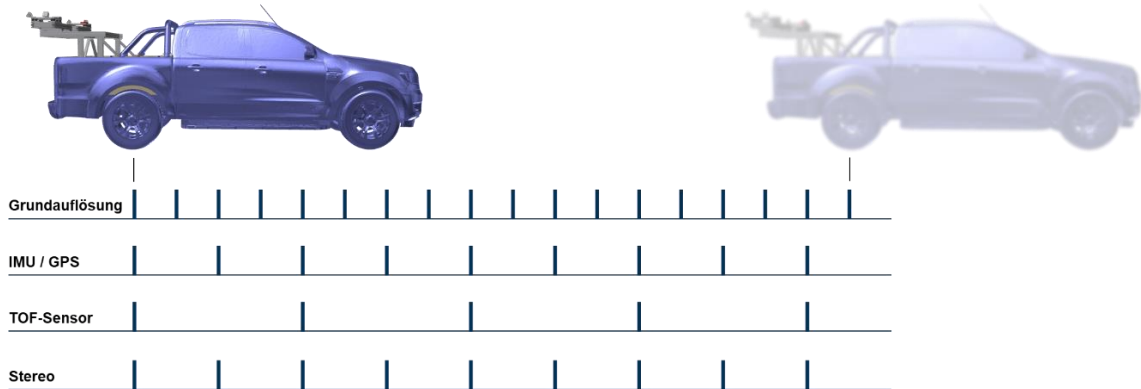


Abbildung 55: Timing Diagramm für eine bewegte Erfassung.

Eine exakte Synchronisation der Sequenzen würde ein lückenloses und überlappungsfreies Abbild der Befahrung ergeben. Dieser Idealzustand ist jedoch in der Realität nicht zu erreichen. Kleinste Geschwindigkeitsänderungen und Störgrößeneinflüsse würden zu nicht deterministischen Datenlücken oder geometrischen Überlappungen führen. Für die exakte Verkettung der Daten wäre zudem die Kenntnis über den eindeutigen Zustand (Position und Geschwindigkeit) des Fahrzeugs bzw. Messsystems notwendig, welcher jedoch nur geschätzt werden kann.

Ein erster pragmatischer Ansatz besteht darin, eine kontrollierte Überlappung zuzulassen und eine Überabtastung herbeizuführen. Daraus ergibt sich außerdem der Vorteil, dass innerhalb der überlappenden (3D-) Daten nach Ähnlichkeiten gesucht werden können, wodurch wiederum ein weiterer Parameter für die Zustandsschätzung gewinnbringend zur Verfügung steht.

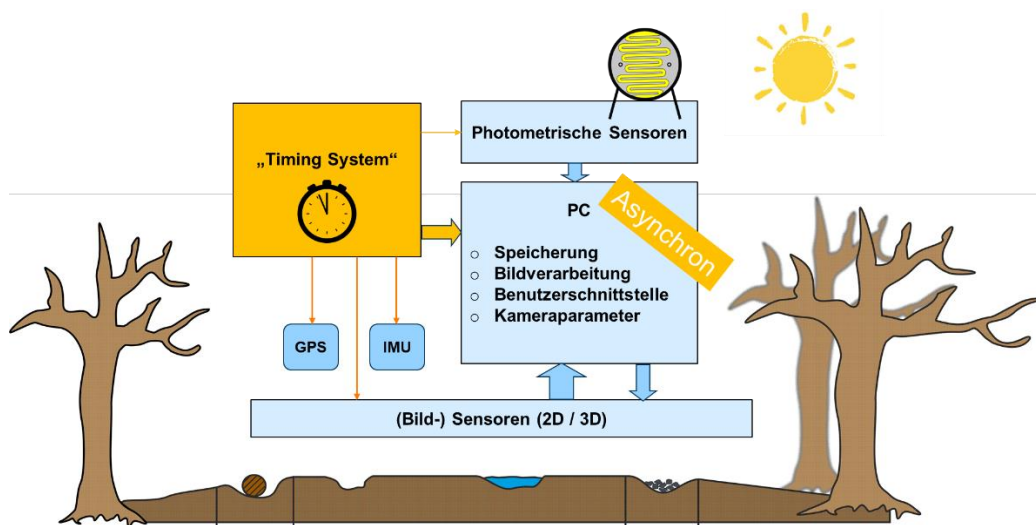


Abbildung 56: Schematische Darstellung der Zusammenhänge zwischen Startimpuls und dem Datentransport einer ausgelösten Messung.

Weiterhin ist von Bedeutung, dass ein Triggersignal zwar aus elektronischer Sicht den Messvorgang eines Teilsystems mit einer vernachlässigbaren Latenz initiieren kann, die Verfügbarkeit der Daten am Speichersystem aber durch nicht deterministische Totzeiten verzögert vorliegen. Gründe dafür sind

latenzbehaftete Auslesevorgänge am Sensor selbst oder der Einfluss serieller Datenübertragung, Protokolle etc. Mit anderen Worten ist eine absolut synchrone Speicherung und Verortung der Informationen technisch nicht möglich. Zu den multimodalen Informationen gehören neben den schon beschriebenen 3D bzw. 2D Bilddaten und Inertialdaten auch photometrische Daten, welche der Optimierung der Betriebsparameter der Teilsysteme für eine möglichst störungsfreie und stabile Messung dienen. Abbildung 56 stellt die Zusammenhänge schematisch dar. Das „Timing-System“ löst durch einen gezielten Impuls (Triggersignal) die jeweils (momentane) Messung aus. Der PC als Verarbeitungssystem ist folglich als asynchroner „Datenempfänger“ anzusehen.

Die konzeptionelle Lösung des Problems besteht nun darin, dass das Timing-System dem PC selbst auch die Information zukommen lässt; Sprich, zu welchem Zeitpunkt des Grundauflösungstaktes welcher Sensor ausgelöst wurde. Die Notwendigkeit, wann welcher Sensor ausgelöst werden muss, wird innerhalb des Timing Systems selbst berechnet. Auf Basis dieser Informationen ist es weitestgehend unerheblich, wann genau die Messdaten der Teilsysteme am Verarbeitungssystem antreffen, da durch den generierten Zeitstempel des Timing-Systems die exakte Fusion der Daten nachträglich erfolgen kann.

Wie in den vorherigen Arbeitspaketen konzeptionell erarbeitet wurde, basiert die Fusion der multimodalen Daten auf drei wesentlichen Schritten. Der erste Schritt fusioniert die Daten im Sinne einer statischen Szene anhand der Kalibrierdaten. Dabei sind besonders geometrische Operationen wie Translation und Rotation der Einzelszenen zueinander erforderlich, sodass eine registrierte Gesamtszene erzeugt werden kann. Die für die geometrischen Szenen erforderlichen „Verschiebungsparameter“ erhält man aus dem Kalibriervorgang im statischen Fall. Dieses Vorgehen erfordert eine absolut starre Relativlage der Systeme zueinander, was aber in den konstruktiven Bestandteilen anderer Arbeitspakete hinreichend gut gelöst wurde. Überführt man nun das statische Szenario in ein bewegtes, so sind die Kalibrierparameter weiterhin relevant, um die geschwindigkeitsabhängigen Auslösezeiten (Trigger-Zeitpunkte) der Einzelsysteme zu bestimmen. Denn aus den möglichen Sichtbereichen und den vorher definierten Überdeckungsbereichen lassen sich anhand der Verschiebungsparameter innerhalb eines Zustandsraummodells notwendige Triggerzeitpunkte für die individuelle Erfassung der Teilsysteme ableiten. Ein entsprechender Algorithmus wurde in eine Software überführt.

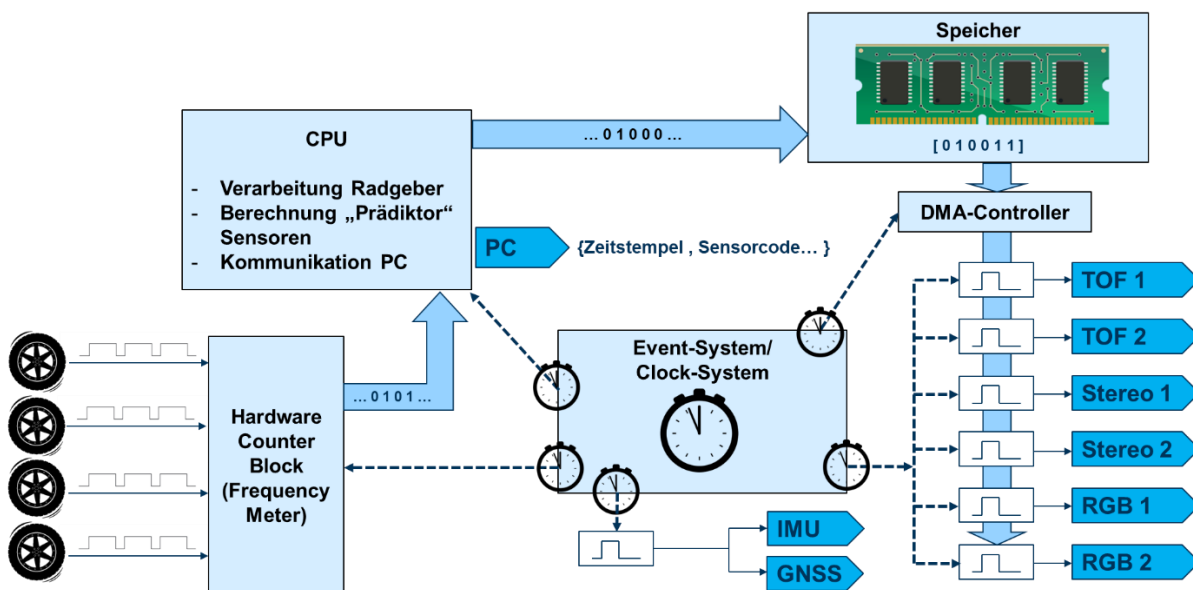


Abbildung 57: Blockdiagramm des Systemmodells für das Timing System.

Die Realisierung des Timing-Systems wurde auf einem eingebetteten, microcontrollerbasierten System umgesetzt, welches zudem auf einer sehr hohen Integrationsstufe über ausreichend Peripherie verfügt. Abbildung 57 zeigt den Aufbau des Systemmodells als Blockdiagramm mit allen relevanten Ein- und Ausgangssignalen.

Eine weitere Besonderheit dieses Systems ist die Fähigkeit, zeitliche exakte Impulse innerhalb des Systems über ein intelligentes „Eventsystem“ zu konfigurieren und direkt mit physischen Ausgängen zu verknüpfen. Diese Verknüpfungen sind zudem unmittelbar in Hardwareform auf dem Halbleiterchip vorhanden, was bedeutet, dass in dem Übertragungsweg keine weitere Recheneinheit eingebunden ist. So besteht die Möglichkeit, eine mehrkanalige Zeitsignalausgabe mit nahezu keiner zeitlichen Drift („Jitter“) der Impulssignale

umzusetzen. Im Ergebnis kann für jeden der Einzelsensoren ein Zeitsignal zum Starten der Messung ausgegeben werden, welches absolut synchron zu einem Systemgrundtakt arbeitet. Da die Signalgeneratoren auch in Impulsbeginn und Dauer frei konfiguriert werden können, ist eine Variation der Zeitpunkte stets möglich. Die Parameter (Startzeitpunkt bzw. Flanke im Bezug zum Grundtakt) sind in direkt in einem fest allokiertem Speicherbereich hinterlegt und können jederzeit von der CPU, die unabhängig von dem Event-System arbeitet, aktualisiert werden. Mit anderen Worten arbeiten die Signalgeneratoren also so lang kontinuierlich mit den hinterlegten Parametern, bis die CPU im System eine neue Zeitfolge berechnet hat und die Werte im Speicher überschreibt. Berechnet die CPU eine neue Sequenz (Zeitmuster) zur Verteilung der Triggerimpulse im Bezug zum Grundtakt, wird neben dem Überschreiben der Parameter im Speicher auch ein neuer Zeitstempelcode an das dedizierte Speichersystem (PC) übermittelt. Anhand dieses Codes sind die asynchron, aber sequenziell eintreffenden Messdaten im Nachhinein wieder exakt auf die reale Ursprungszeit quantisierbar.

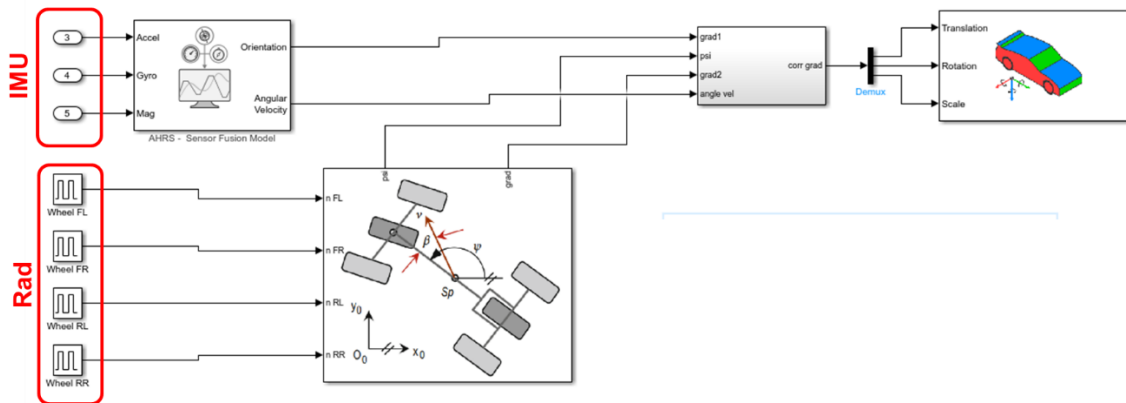


Abbildung 58: Systemmodell zur Schätzung der Momentanposition.

Wie bereits erwähnt übernimmt die CPU im eingebetteten System auch die Neuberechnung der Zeitwerte. Dazu werden neben odometrischen Messungen (Auslesen der Drehzahlen der einzelnen Räder) auch Trägheitsnavigationsdaten und satellitengestützte Navigationsdaten (GNSS) miteinander verrechnet. Abbildung 58 zeigt ein Modell, das die Fahrzeugdynamik auswertet und die momentanen Positions- und Geschwindigkeitsdaten schätzt. Das Modell wurde in einen Quellcode überführt und auf dem eingebetteten System implementiert. Anhand dieser Daten, die dann direkt der CPU vorliegen, werden die zeitlichen Sequenzen der Trigger-Signale berechnet und – wie oben beschrieben – im Speicher hinterlegt. Neben der Übertragung des Zeitmusters an den PC werden auch die geschätzten Positions- und Geschwindigkeitsdaten sowie die vom GNSS-System ausgelesenen Georeferenzdaten übermittelt. Dadurch wird es im Nachgang möglich, durch Koppelnavigation die Trajektorie des Fahrzeugs (3D-Bahnkurve im Raum) zu rekonstruieren.

Letztendlich liegen also die Erfassungsbereiche M1-M3 in metrische Punktwolken digitalisiert vor und können anhand der dynamischen Informationen zu einem georeferenzierten Gesamtbild verkettet und registriert werden.

## Arbeitspaket 12: Evaluation Gesamtdemonstrator

Auf Basis der Ergebnisse der vorhergehenden Arbeitspakete konnte die Fusion der multimodalen 3D-Daten erfolgreich durchgeführt werden. Anfängliche Probleme, die zu groben Versätzen und Inkonsistenzen führten, konnten behoben werden. Dazu wurde eine Wichtung im Verrechnungsalgorithmus implementiert, welche proportional vom Abweichungsmaß (Differenz geschätzte Trajektorie und Punktwolke) einen gewichteten Mittelwert bildet. Abbildung 59 zeigt ein Ergebnis der metrischen Abstandsdaten eines Wegeabschnitts über alle 3 Messbereiche. Es ist klar zu erkennen, dass die Daten des Lichtraumprofils mit einer geringeren Ortsauflösung vorliegen. Das steht aber nicht im Konflikt mit der Anforderung, „Einragungen“ in das Lichtraumprofil zuverlässig zu identifizieren. Für diesen Zweck ist die Auflösung sowohl in Querrichtung zur Bewegung, als auch in lateraler Richtung als hinreichend anzusehen. In Abbildung 60 ist der Bezug des Wegekörpers gegenüber dem künstlichen Horizont dargestellt. Die Falschfarbendarstellung ist nach Höhenniveau kodiert. Prinzipiell werden die Rohdaten durch ein nachgelagertes Berechnungsverfahren (Postprocessing) fusioniert. Untersuchungen und Abschätzungen haben ergeben, dass eine Datenverarbeitung während der Befahrung sich zu aufwendig bezüglich Rechen- und Energieressourcen darstellt.

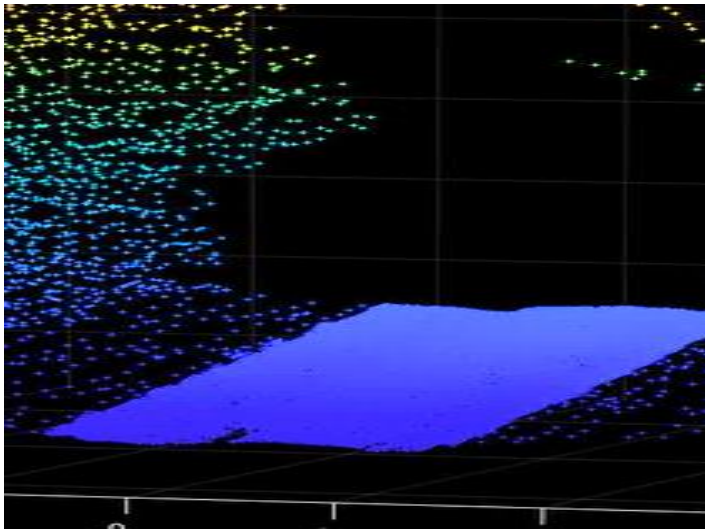


Abbildung 59: Fusionierte Messdaten aller 3 Messbereiche

Eine Detailansicht zur Identifikation von Schadmerkmalen im Wegekörper ist in *Abbildung 61* gegeben. Es muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass die Ergebnisse zur Identifikation von Schadmerkmalen durchaus geeignet sind. Dennoch weisen einige Abschnitte sporadische Inkonsistenzen bei der Verrechnung der Geometriedaten auf. Diese äußern sich überwiegend als Fehlstellen oder als Überlappung. An dieser Stelle besteht durchaus weiterer Optimierungsbedarf. Es besteht zudem die Möglichkeit, diese Problemstellen manuell nachzubearbeiten.

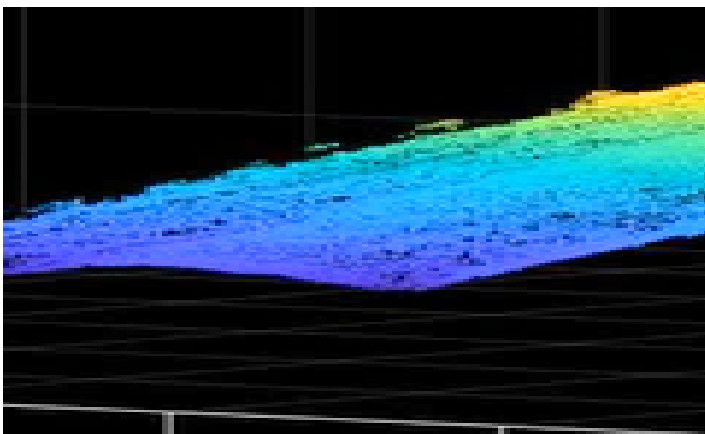


Abbildung 60: Ausrichtung des Wegeprofils gegenüber dem künstlichen Horizont.

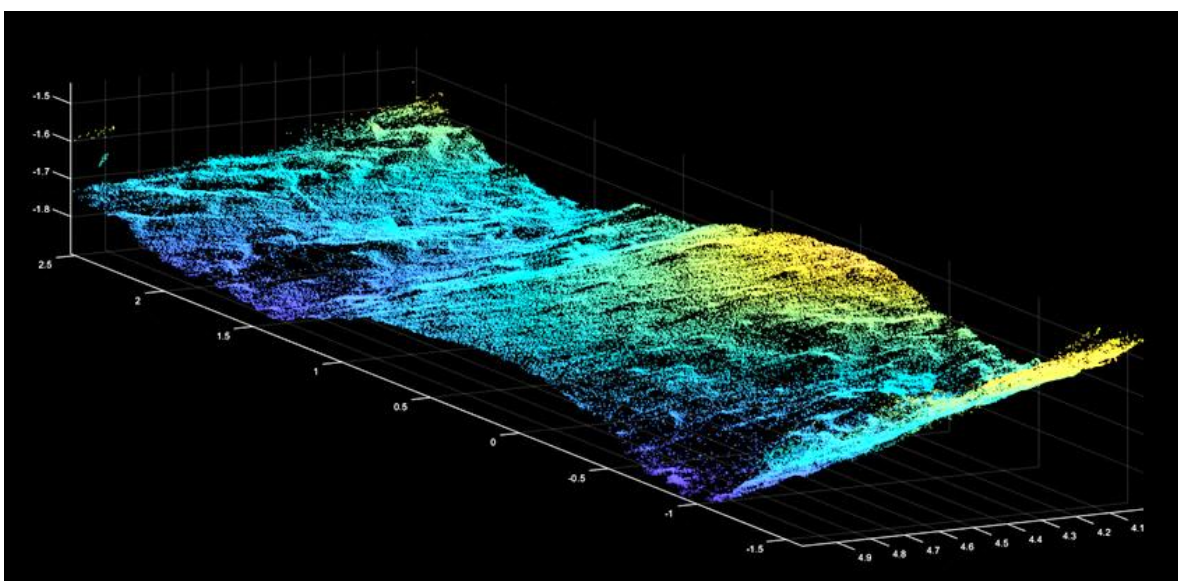


Abbildung 61: Hochaufgelöste Detailansicht des Wegekörpers zur Schadmerkmalsbestimmung.

### **3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

Wesentliches Ergebnis des Teilvorhabens war die Entwicklung der Sensorik zur Erfassung der Grabenbereiche und des Lichtraumprofils. Dazu wurden unterschiedliche Messprinzipie evaluiert und hinsichtlich der Anwendungsszenarien bewertet.

Bezüglich des Gesamtprojekts entstand ein vollständiges Systemkonzept für ein funktionierendes Sensorsystem im Prototypenstadium. Weiterhin sind die physikalischen Eigenschaften der Objekte und Störgrößen innerhalb der Messbereiche grundlegend untersucht. Die größten Schwachstellen vereinzelter Konzepte und Komponenten wurden aufgefunden gemacht und zu erwartende Probleme für notwendige Änderungen bzw. Verbesserungen abgeschätzt. Entscheidende Faktoren waren dabei die Einflüsse von Störgrößen wie Gegenlichtsituationen oder starke Vibrationen. Es erfolgten umfangreiche Untersuchungen zur Ermittlung der Korrelationen zwischen Störgrößen und Betriebsparameter der Systeme (z.B. Belichtungszeiten). Dazu wurden die Störgrößen in kontrollierten Testumgebungen erfasst und die anschließende statistische Betrachtung bildeten die Grundlage für eine echtzeitfähige Betriebsparameterregelung während der Befahrung, wodurch letztendlich stabile und robuste Messdaten gewonnen werden können. Weiterhin wurde für die Gesamterfassungsarchitektur ein zentrales Trigger-System realisiert. Das System ist in der Lage, geschwindigkeits- und positionsabhängig Auslösezeitpunkte für jeden einzelnen Sensor und die aktive Bestrahlung zu berechnen. Ebenso wird für den diskreten Zeitabschnitt ein eindeutiges Muster kodiert, wodurch im nachträglichen Verrechnungsprozess die Fusion der multimodalen Daten erfolgen kann. Diese Entwicklungen wurden im realen Betrieb verifiziert und sich ergebende Problemstellungen identifiziert. Folglich notwendige Optimierungsmaßnahmen wurden auf ein Minimum reduziert und die Funktionsfähigkeit konnte letztendlich nachgewiesen werden, weshalb die abgesteckten Projektziele als erreicht betrachtet werden können.

## **Teilvorhaben 3: 2220NR061C**

### **1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens**

Gegenstand des Vorhabens CONTURA ist u.a. die Entwicklung eines komplexen und effizient einsetzbaren Systems zur vollautomatischen Zustandserfassung von forstlichen Wegeanlagen (Fahrbahndecke und Lichtraumprofil). Eine Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit des virtuellen Abbildes ist die Genauigkeit des zu entwickelnden Erfassungssystems. Denn nur so kann sichergestellt werden, dass die erhobenen Daten tatsächlich zusammenpassen. Teil der Entwicklung eines Gesamtsystems ist dabei auch die geografische Lokalisierung über GNSS. Gerade in Waldgebieten ist mit Einschränkungen des GNSS-Empfangs zu rechnen. Daher soll untersucht werden, welcher GNSS-Empfang (verschieden Systeme) für diese Bedingungen am geeignetsten ist. Auch die Anzahl von GNSS-Empfangssystemen und die Stützung durch ein Inertialsystem (IMU) ist dabei in Betracht zu ziehen. Es soll ein Sensor-konzept entwickelt werden, das eine sichere Georeferenzierung mit einer hohen Genauigkeit gewährleistet. Zum Gesamtsensor-konzept gehört auch die Anordnung der weiteren für das Vorhaben notwendigen Sensoren der anderen Teilvorhaben. Dazu muss ein Sensor- und Geräteträgersystem inkl. Stromversorgungs- und Datenübertragungskonzept entwickelt werden. Der Gesamttablauf von der örtlichen sicheren Datenaufzeichnung, der Verpixelung personenbezogener Daten, der automatisierten Übernahme der Daten im Büro, das Postprocessing der Sensordaten bis zur Bereitstellung der Daten im festzulegenden Datenformat soll erarbeitet werden. Aus dem Modellansatz soll eine Qualitätssicherung für die Einhaltung der Genauigkeitsanforderungen der Lagegenauigkeit der erfassten Daten erstellt werden inkl. Einrichtung Kalibrierplatz und praktischer Erprobung. Dazu werden die entsprechenden Testfahrten durchgeführt. Im Bedarfsfall ist die ursprüngliche Konzeption anzupassen. Aus dem Positionierungssystem (GNSS+IMU) kann jeder Position eines jeden Sensors eine geografische 3DKoordinate zugeordnet werden. Hierfür soll eine Modellierung der Anordnung aller Sensoren in das GIS-System erfolgen. Der Modellansatz ist gemeinsam mit den Projektpartnern zu verifizieren. Damit die erfassten Daten weiterverarbeitet und ausgewertet werden können, ist ein mit den Auswerteprogrammen kompatibles Format (Schnittstellenformat) mit den Projektpartnern zu entwickeln bzw. abzustimmen. Bei der Konzeption der Auswertesoftware für den Wegezustand sollen die Projektpartner anhand der umfangreichen Erfahrungen im Bereich der Wegezustandserfassung unterstützt werden. Für die Entwicklung einer Auswertesoftware ist die Entwicklung eines Zustandsmodells notwendig. Damit die Auswertesoftware Ergebnisse generieren kann, sind die entsprechenden Übergabepunkte der Sensor- und Inputdaten zu definieren. Das erfolgt in enger Abstimmung mit den beteiligten Projektpartnern. Schlussendlich erfolgt die Evaluierung aller bisherigen Projektergebnisse. Notwendige Korrekturen und Optimierungen werden in Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern vorgenommen.

### **2. Bearbeitete Arbeitspakete**

#### **Arbeitspaket 01: Gesamtkonzeption des CONTURA Mess- und Auswertesystems**

In einem Kickoff-Meeting aller Projektpartner wurden die zu erreichenden Ziele, sowie die forstlichen und technischen Anforderungen an das zu entwickelnde System herausgearbeitet. Bestandteil war auch die Abstimmung bezüglich der Zusammenarbeit der Projektpartner in den einzelnen Arbeitspaketen. Beim ersten Zwischenmeeting halfen die bis dahin von den Projektpartnern durchgeführten Evaluierungen von Entwicklungen und Auslotungen der Möglichkeiten bei der Konkretisierung eines optimierten Gesamtkonzeptes für das System CONTURA.

#### **Arbeitspaket 04: Entwicklung Gesamtsensor-konzept**

Grundsätzlich ist es der Anspruch, dass alle Geräte autark voneinander arbeiten können. Der Ausfall eines Gerätes sollte nicht den Totalausfall des Systems nach sich ziehen. Es sollte jedoch beachtet werden, dass einzelne Komponenten die Qualität anderer beeinflussen (GNSS/IMU). Des Weiteren muss beachtet werden, dass eine Reduktion der Gerätschaften (bspw. aus Kostengründen) die Kontrolle der Ergebnisse erschweren kann. Für die Satelliten gestützte Navigation sollten mindestens zwei Systeme genutzt werden, damit etwaige Probleme eines einzelnen Systems nicht direkt das Ende der Aufzeichnungen der Daten zur Folge hätten. Hierfür empfehlen sich GPS und GLONASS, als langwierig erprobte Systeme. Da mit großer Abschätzung zu rechnen ist, ist die Erweiterung um BEIDOU und GALILEO zu empfehlen. Ein weiterer Baustein, um vor allem der zu erwartenden Abschätzung entgegen zu treten, ist der Einsatz eines Inertialsystems (IMU/INS). Um im Verbund mit der Satellitennavigation gut arbeiten zu können, sollte ein Verbund aus INS und 2-Antennensystem der Satellitennavigation gewählt werden, da hierdurch vom Start weg ein sehr genaues Messen der Position und der korrekten Richtung möglich ist.

Hinsichtlich der Aufzeichnung der Daten gibt es mehrere Optionen. Die einfachste Form wäre alle Daten autonom aufzuzeichnen, bspw. über Speicherkarten. Eine andere Variante ist es, einen PC als verbindendes Element zu verwenden und diesen entweder via USB-Kabel oder über ein Netzwerk mit den jeweiligen Sensoren zu koppeln. Da im vorliegenden Fall mehr als zwei Komponenten miteinander verbunden werden sollen (beide GNSS-Antennen, die IMU/INS sowie der PC), erscheint ein Netzwerk als passender. Des Weiteren hat es den Vorteil, dass größere Datenströme verarbeitet werden können.

Um grobe Fehler aufzudecken ist der Einsatz von modernen Odometern zu nutzen. Sollte Abschattung zu lange anhalten und der Langzeitdrift der IMU zu groß werden, würde dies hiermit zumindest festgestellt, wenn auch nicht korrigiert werden.

Um den Aufbau möglicher weiterer Technik (bspw. Laserscanner, um den die Beschaffenheit vom Untergrund zu erfassen) nicht zu stark einzuschränken, sollte das Fahrzeug dies auch physisch ermöglichen. Bspw. ein Kastenwagen wie der VW Caddy oder ein SUV sollte hierfür genutzt werden können. Je nach Zustand des Geländes sollte in Betracht gezogen werden, dass Vorerkundungen mittels eines Quads oder SUV (im besten Fall mit Allradantrieb) oder ähnlichen sehr gut geländegängigen Fahrzeugen nötig sein könnten.

### **Arbeitspaket 07: Entwicklung Systemkalibrierung**

Für Erprobung und Verifizierung der Kalibrierung wurde ein Mess- und Kalibrierplatz entwickelt. Für die Kalibrierung der GNSS und Inertialsysteme auf der flexiblen Plattform wurden Eichstrecken mit verschiedenen Einflussfaktoren (Abschattungen u.s.w.) aufgebaut. Die kinematische Genauigkeit der Sensoren kann nunmehr mit hohen Geschwindigkeiten (bis 80 km/h) sowie unter GNSS abgeschatteten Verhältnissen (Werkhalle) getestet werden. Die Eichstrecken wurden zur Referenz mit stationären Scannern (Lagegenauigkeit der Objekte im Umfeld <2cm) erfasst. In der Werkhalle ist ein Kalibrierplatz für zusätzliche Bilderfassungssysteme eingerichtet worden. Die Reflektoren sind mit einer Genauigkeit von <2mm eingemessen. Zusätzlich ist auf der Eichstrecke und in der Werkhalle ein Festpunktfeld erstellt worden. Dies ermöglicht beim Umbau der Sensorplattform, des Trägerfahrzeuges oder bei dem Einsatz anderer und zusätzlicher Sensoren eine hochpräzise und schnelle Einmessung der Veränderungen.



*Abbildung 62: Testfahrzeug (links) am Kalibrierplatz (rechts).*

Erste Testbefahrungen sind mit einem PKW (VW-Caddy) durchgeführt worden. Wichtig waren am Anfang der Einsatz einer flexiblen Sensorplattform und das Sammeln von Referenzdaten für die nachgelagerten Entwicklungen der Projektpartner. Als problematisch könnten sich Strecken erweisen, die insgesamt in gutem Zustand sind, jedoch Abschnitte aufweisen, die stark zerstört wurden (Sturm- und Starkregenereignisse). Als perspektivischer Einsatz ist ein SUV vorteilhaft und auch geplant. Referenztestfahrten wurden im Steigerwald Erfurt durchgeführt, der vergleichbar waldwirtschaftlich genutzt wird.

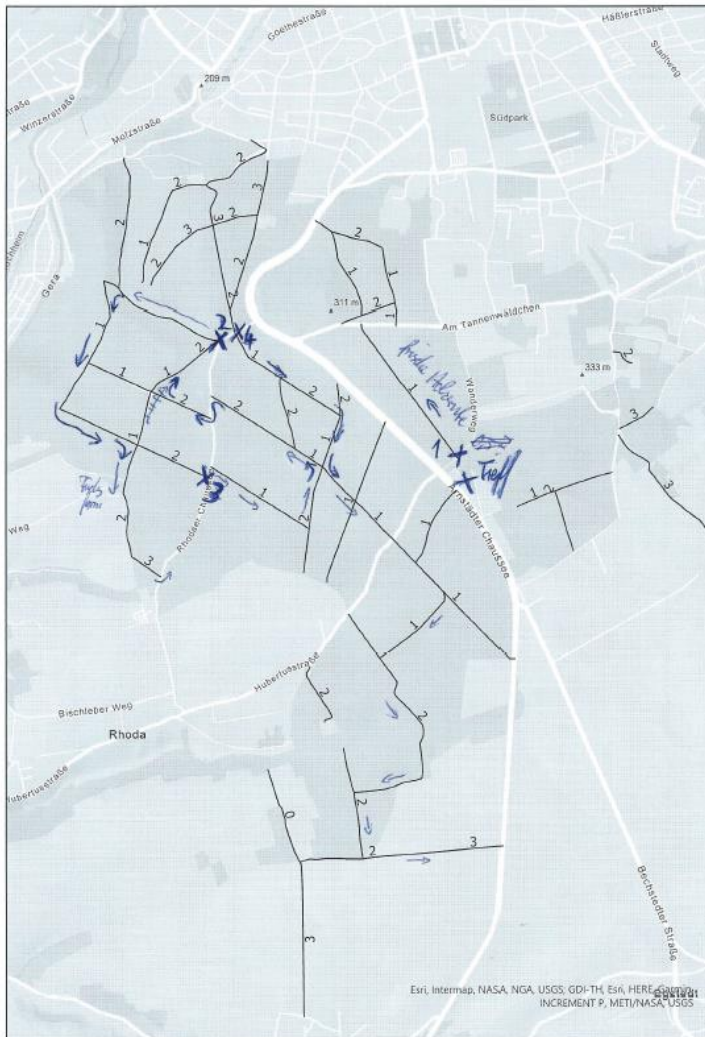


Abbildung 63: Lagekarte der Testbefahrungen.

Mit den eingesetzten Sensoren wurde eine hohe und ausreichende Genauigkeit bei der Georeferenzierung erreicht. Die Beispieldaten wurden mit GNSS und Inertialsystem aufgenommen und im Postprocessing im qualitätsgeprüft und verbessert. Ausfälle und Ungenauigkeiten der GNSS Systeme konnten mit dem Inertialsystem korrigiert werden. Zusätzlich befanden sich auf der flexiblen Plattform zur Erstdatengewinnung 8 Industriekameras und 3 Scanner. Diese dienen zur Datengewinnung für die Erprobung nachgelagerter Entwicklungen der Projektpartner. Die Daten wurden den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

Nachdem die GNSS-Systeme hinreichend genau verifiziert waren, wurde mit der Entwicklung der Kalibrierung im Multisensorbereich begonnen. Nachdem die inneren Orientierungen jeder einzelnen Kamera an einem speziellen Messplatz bestimmt wurde, konnte das Gesamtsystem in der Eichhalle kalibriert werden. Dazu werden in der Eichhalle an verschiedenen Standorten Bilder und gleichzeitig Scandaten aufgenommen. Fotogrammetrisch wird über die Positionen der Marken in den Bildern die äußere Orientierung der Kameras berechnet. Mit beiden Parametersätzen ist es dann möglich, Messwerte direkt aus dem Bild abzuleiten und zu verorten.



Abbildung 64: Punktwolke des Testfahrzeugs mit komplettem Aufbau.

Das komplette Fahrzeug wurde zur Bestimmung der Hebelarme mit einem stationären Scanner vermessen (Abbildung 64). Aus der entstandenen Punktwolke werden die Hebelarme zu den Kameras, der GNSS-Antennen und zum Inertialsystem bestimmt. Diese Hebelarme (Richtungsvektoren) sind essentiell für die Eingangsparameter des Postprocessing notwendig. Mit der präzisen Bestimmung der Hebelarme (<5mm Genauigkeit und <0,1Grad) werden die Voraussetzung einer hochgenauen Trajektorie geschaffen.

### **Systemkalibrierung in der Eichhalle**

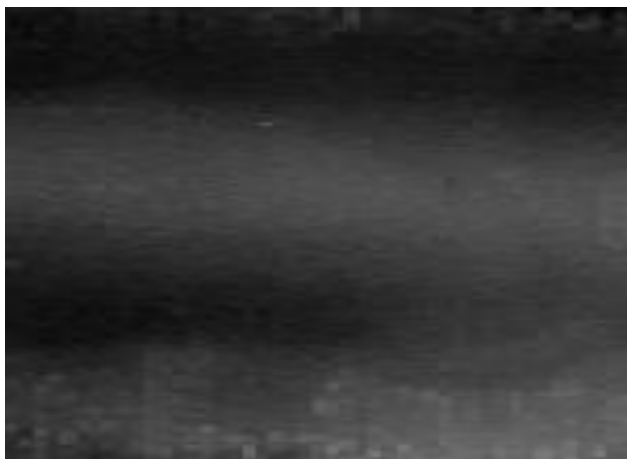
Für die Systemkalibrierung wurde der vorher Entwickelte Kalibrierplatz und die Eichhalle genutzt. Die Eichhalle (Länge 22m, Höhe 5,65m und Breite 12m) ist mit genau eingemessenen Markierungen auf dem Boden, an den Wänden sowie an der Decke bestückt. Diese werden von allen Sensoren überwiegend gleichzeitig erkannt. Mittels Tachymetrie und zusätzlichem statischen Laserscanning wurde die Halle eingescannt und in ein globales Koordinatensystem transformiert. Die mittels Tachymetrie und Punktwolke gemessenen Referenzpunkte (Scanreflektionstafeln) haben eine Genauigkeit von <1 mm. Sie dienen als Grundlage der Kalibrierung des Gesamtsystems.



*Abbildung 65: Eichhalle mit befestigten Messmarken (links) und mit hochgenau eingemessenen Kalibriermarken (rechts).*

Mit dem Mobile Laser System werden mehrere Scans in der Eichhalle erzeugt. In einer Software werden die Scans mit Hilfe der Messmarken auf die statisch eingemessene Punktwolke der Halle abgeglichen und eine Kalibrierung des Scanners berechnet. Diese Kalibrierung wird kann für jeden Scannertyp im eingesetzten Systemaufbau durchgeführt werden.

Zur Evaluation der ermittelten Kalibrierung und deren Anwendung stehen zwei Eichstrecken zur Verfügung. Auf diesen Eichstrecken werden die Messergebnisse aus Inertialsystem, Bild und Scan nach der Systemkalibrierung überprüft. Alle 50 m wurden auf den Eichstrecken (links und rechts des Straßenkörpers) Festpunkte mit einer Genauigkeit von <5mm eingemessen und vermarktet. Zusätzlich wurden die Eichstrecken mit einem stationären Scanner und Nivellement aufgenommen. Auf den koordinaten- und höhenbestimmten Festpunkten werden bei der Systemüberprüfung Scanzielmarken positioniert.



*Abbildung 66: Eichstrecke 1 mit markierten Objekten (links) und Punktwolke der Eichstrecke (rechts).*

Die Eichstrecke 1 (vierseitige Häuserfronten mit naher Befahrbarkeit) ist so gewählt, dass in einigen Bereichen Abschattungen des GNSS und Wechsel der Satellitenkonstellation erzwungen werden. So wird überprüft, wie das System reagiert, wenn es zum Wechsel von auswertbaren Satelliten kommt und das System auf die Trägheitssensoren umschaltet. Diese Strecke wird zudem dazu genutzt Messergebnisse zwischen Bildern und Punktwolke zu überprüfen. Dazu werden markante Punkte in Bild und Scan ausgewertet. Die kinematisch erzeugten Daten werden mit den statisch gemessenen überprüft.

Die Eichstrecke 2 wurde so gewählt, dass keine größeren Sichteinschränkungen und damit ein optimaler GNSS-Empfang gewährleistet werden kann. Auf Teilstrecken befinden sich Gebäude, an denen zusätzlich feste Punkte tachymetrisch bestimmt wurden. Die Strecke wurde mehrfach in beiden Richtungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten befahren, so dass die Punktwolken miteinander verglichen werden können. Durch den Vergleich zweier Punktwolken, Befahrung in entgegengesetzter Richtung sowie der Mehrfachbefahrungen und den bekannten Festpunkten wird die Ausrichtung des Scanners zur IMU in der kinematischen Erfassung überprüft und endgültig ausgeglichen. Auch senkrecht liegende Punkte mit unterschiedlichen Abständen zur Messachse an Fassaden werden zur Überprüfung der Scanner-Genauigkeit genutzt. Es liegen nach diesem Kalibrierungsprozess relative Genauigkeiten  $<10\text{mm}$  und absolute Genauigkeiten in Lage und Höhe  $<20\text{mm}$  vor.

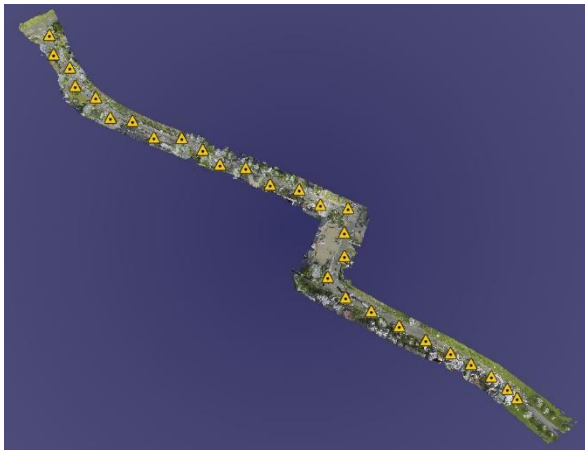


Abbildung 67: Eichstrecke 2 in der Übersicht mit stationärem Scanner (links) und Punktwolke zur Einmessung (rechts).



Abbildung 68: Eichstrecke 2; Stationäres Scannen und Einmessung (links) und Messfahrzeug (rechts).



Abbildung 69: Eichstrecke 2 mit Punktwolke aus Befahrung und mit Zieltafel (links), Punktwolke aus stationärem Scan (rechts).

Die hochpräzise Einmessung und Kalibrierung der Sensoren des Testfahrzeuges, die Einrichtung einer Eichhalle sowie die Einmessung der Teststrecken waren Voraussetzung, um weitere Sensorik des Forschungsprojektes auf dem Testfahrzeug aufzunehmen und unter verschiedenen Bedingungen und Einflussfaktoren zu testen. Eine Genauigkeitsüberprüfung der Ergebnisse der zusätzlichen Sensoren ist nunmehr möglich.

Die Testbefahrungen sind, analog zur Vorgehensweise mit den GNSS-Systemen, mit einem PKW (VW-Caddy) durchgeführt worden. Wichtig waren am Anfang der Einsatz einer flexiblen Sensorplattform und das Sammeln von Referenzdaten für die nachgelagerten Entwicklungen der Projektpartner.



*Abbildung 70: Testfahrzeug mit Sensoraufbau.*

Als problematisch könnten sich Strecken erweisen, die insgesamt in gutem Zustand sind, jedoch Abschnitte aufweisen, die stark zerstört wurden (Sturm- und Starkregenereignisse). Als perspektivischer Einsatz ist ein SUV vorteilhaft und auch geplant.

## **Arbeitspaket 09: Messdatenfusion**

### ***Modellansatz für die Messdatenfusion von 360° 3D Daten und GIS Daten***

Ziel der Entwicklung im CONTURA-Projekt beim Mobile-Mapping-Systems (MMS) war es, mit verschiedenen Sensoren (Kameras, IMU und Laser-Scanner) die Realität im 3D georeferenziert und hoch genau abzubilden. Dies wurde realisiert, um weitere Sensoren einzubinden und diese auf ihre absoluten geografischen Lagebezug überprüfen zu können. Um das zu gewährleisten, muss bereits bei der Aufnahme der Daten sichergestellt werden, dass alle Sensoren eine gemeinsame Zeitachse verwenden oder mit einem einheitlichen Trigger-System über diese Zeitachse verbunden sind, damit im Nachhinein alle einzelnen Daten miteinander gesichert verknüpft werden können.

Des Weiteren muss bekannt sein, wie die Sensoren zueinander angeordnet und ausgerichtet sind. Dazu wurde das Gesamtsystem auf einem speziellen Messplatz hochgenau eingemessen (siehe Punkt Eichhalle).

Während der Befahrung mit dem MMS wird eine Trajektorie aufgezeichnet, mit der festgehalten wird, wo sich das MMS zu welchem Zeitpunkt befunden hat und welche Orientierung es im 3D-Raum hatte. Für die Trajektorie werden verschiedene GNSS-Systeme zur Verortung genutzt sowie ein Inertialsystem, welches die Ausrichtung im Raum wiedergibt. Somit ist die Position und Lage des MMS in einer sehr dichten zeitlichen Auflösung bekannt.

Damit sich alle anderen Sensoren, auf dieses Zeitsystem der Trajektorie beziehen können, ist für das MMS ein eigener Zeitserver entwickelt worden, der ebenfalls durch das GNSS-System gestützt wird. Alle Sensordaten werden also mit gleichem zeitlichem Bezug abgespeichert. Dies bildet die Voraussetzung, um weitere projektspezifische Sensoren in das System einzubinden zu können und deren Daten mit geographischen Bezug auszuwerten.

Für die Berechnung der Punktwolke des Laser-Scanners mit absoluten Koordinaten ist es wichtig, den genauen Aufbau des MMS zu kennen. Im speziellen sind das die Lage des Scanners in Bezug zur IMU (Hebelarme) sowie die Verdrehungen um alle drei Achsen im Raum. Da zu jedem gescannten Punkt auch die Zeit bekannt ist, kann mit Hilfe der Trajektorie eine absolute Koordinate berechnet werden. Somit entsteht eine Punktwolke, in der mit absoluten Koordinaten gemessen und digitalisiert werden kann.

Bei den Kameras ist neben den Hebelarmen und der Verdrehung (äußere Orientierung) gegenüber der IMU auch die innere Orientierung wichtig. Sie gibt an, wie der geometrische Abbildungsfehler, die Verzeichnung der einzelnen Kamera ist. Durch die rechnerische Berücksichtigung kann man die Verzeichnung zurückrechnen und erhält bei Messungen im Bild genauere Ergebnisse.

Bei Berücksichtigung all dieser Parameter lassen sich auch die Scandaten mit den Bilddaten verknüpfen. So kann z.B. beim Messen im Bild ein Sehstrahl berechnet werden, der direkt mit der Punktwolke verschnitten wird umso eine Koordinate direkt im Bild zu ermitteln.

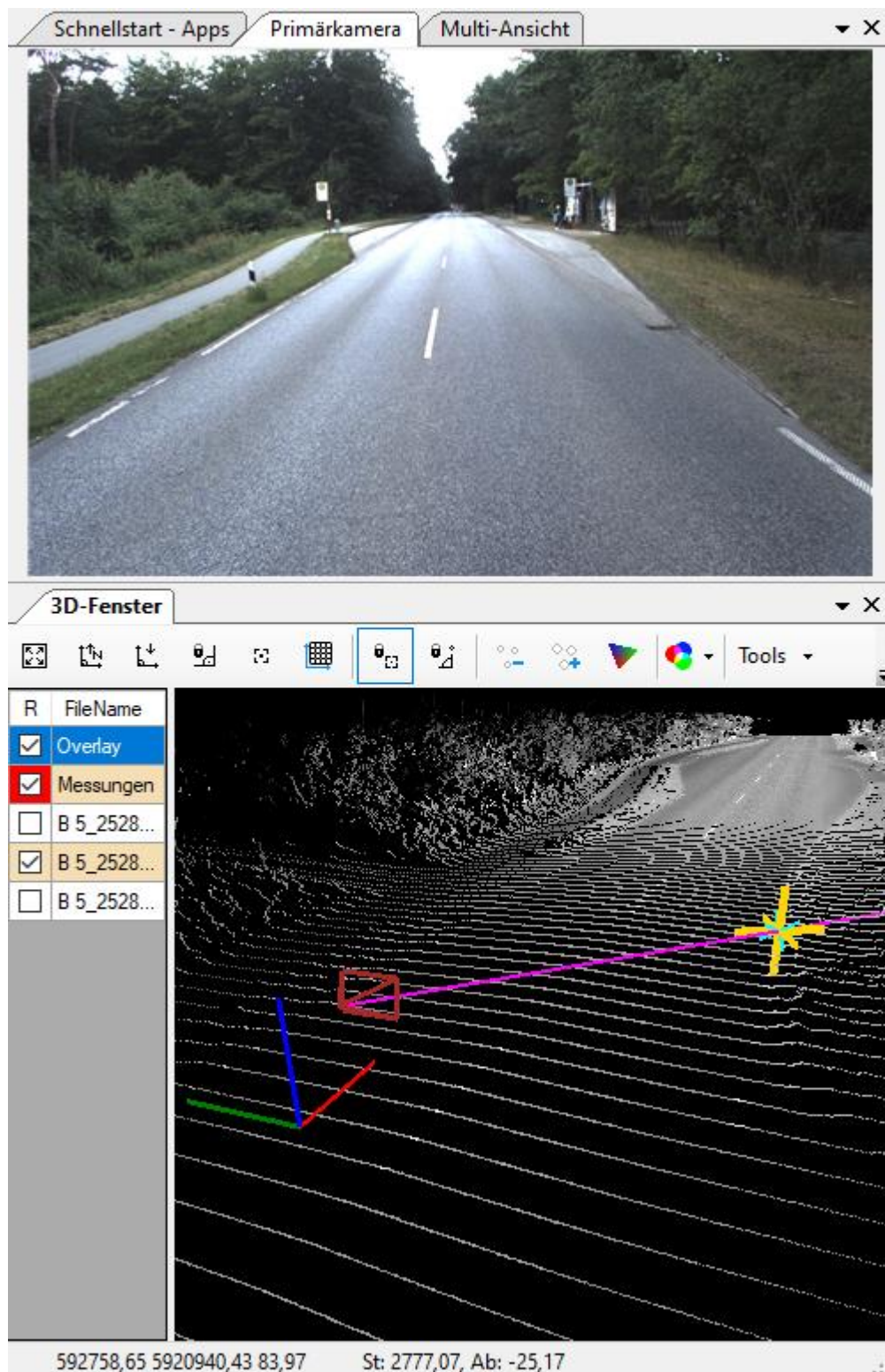


Abbildung 71: Einblendung einer Kamera und des Sehstrahls aus dem Befahrungsbild, Verknüpfung Bild mit Punktwolke, Koordinatenbezug im Bild

### Übergabe Datenschnittstelle für weitere Verarbeitung

Die Befahrungsdaten vom MMS werden in einer hierarchischen Struktur abgelegt. Sie werden in Straßen/Wege und zugehörige Abschnitte unterteilt. Unterhalb der Abschnitte werden die Richtung und Gegenrichtung historisiert abgelegt. D.h. innerhalb eines Befahrungsprojektes können auch Nachbefahrungen

von Abschnitten verwaltet werden. Das gibt die Möglichkeit, Strecken zeitlich zu vergleichen (z.B. nach durchgeführten Wegearbeiten). Je Kamera des MMS gibt es ein Unterverzeichnis, mit einem Bild-Container. Die 3D-Daten sind unterteilt in \*.rku-Datei (Trajektorie) und \*.laz-Dateien (Punktwolke). Um die Anforderungen der Arbeitsplätze, gering zu halten, werden die Punktwolke-Daten aufgeteilt in mehrere Teile (z.B. in Blöcke von ca. 10.000.000 Punkten). Sie können aber auch als Ganzes ausgegeben werden.

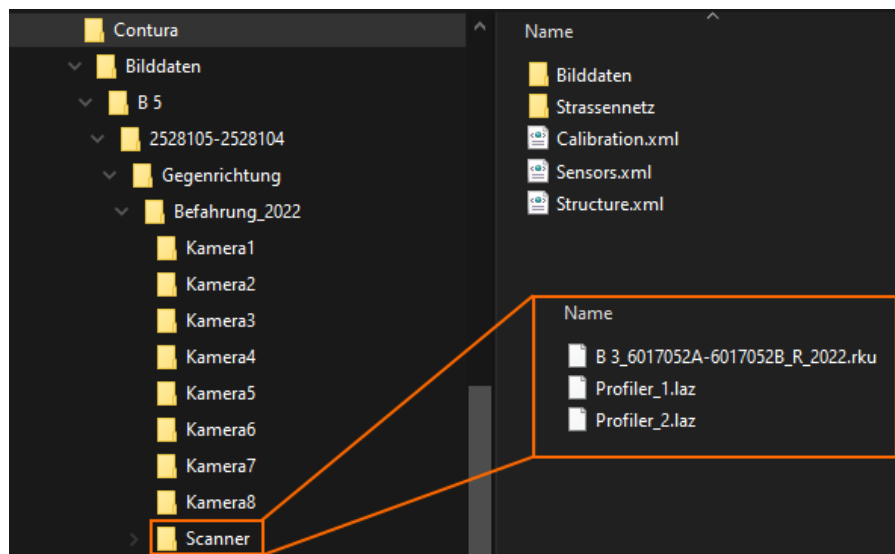


Abbildung 72: Struktur der MMS-Daten.

Für einen geografischen Überblick der befahrenen Strecken ist im Ordner „Strassennetz“ ein Shape-Layer hinterlegt. Dieser wird im Betrachter dargestellt ebenso wie die Straßenabschnittsliste (aus der Steuerdatei Structure.xml).

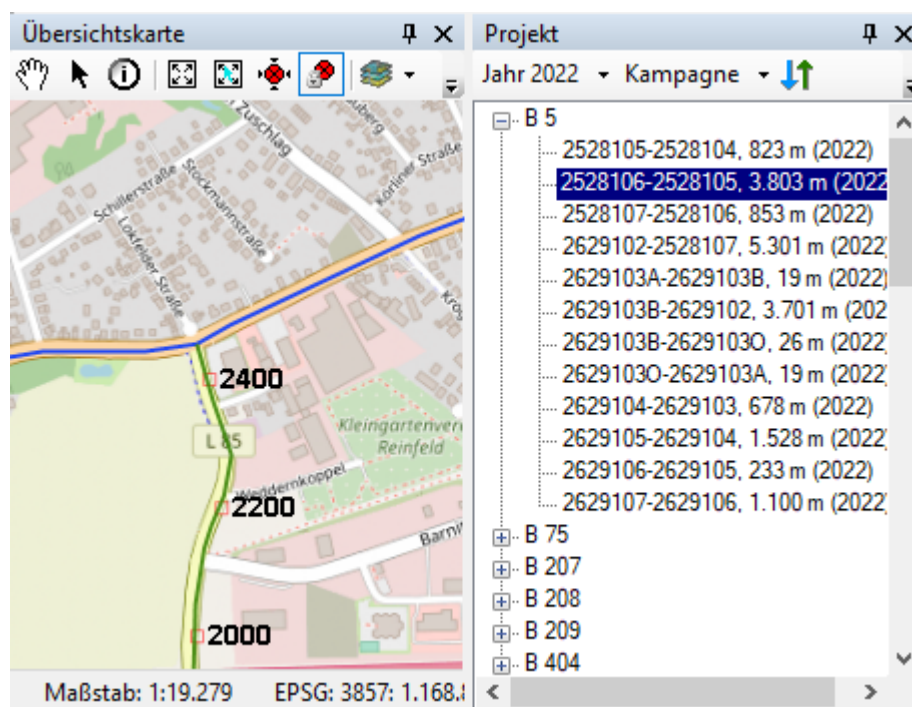


Abbildung 73: Projektanzeige als Karte und Straßenabschnittsliste.

### Arbeitspaket 10: Entwicklung Auswertesoftware Wegezustand

Für die Auswertesoftware wurde eine objektbasierte Algorithmenstruktur erstellt. Innerhalb derer sind alle relevanten Datenstrukturen als Attribute, und alle Berechnungsvorgänge als Methoden beschrieben. Dieses Vorgehen erlaubt es, die unter den Projektpartnern verteilten softwareseitigen Entwicklungsarbeiten unabhängig voneinander durchzuführen. Im Falle einer Änderung der Algorithmen etc. müssen nur die

jeweiligen Klassen angepasst werden - die Übergabewerte und Vererbungen bleiben dabei identisch. Nach verschiedenen Systemtests und Benchmarks wurde innerhalb des Verbundes beschlossen, alle Berechnungen, die außerhalb des tatsächlichen Messprozesse stattfinden können (offline), auch tatsächlich nach dem Prozess zu berechnen. Für die objektorientierte Beschreibung, insbesondere der Speicherverwaltung und Datenstrukturen, sind diese Deklarationen essenziell. Zu den offline ausgelagerten Methoden gehört unter anderem auch die Korrektur der Trajektorie aus den Inertialdatenmessungen (Fusion von Trägheits- und Satellitendaten) und die Rekonstruktion der Geo-Referenzdaten. Anhand dieser (korrigierten) Trajektorie werden die Teilszenen der multimodalen Punktwolkenmessung verkettet und referenziert.

Für die Auswertesoftware wurde ein erstes Klassenmodell entworfen, welches objektorientiert allen Anforderungen an die Auswertesoftware gerecht werden kann (Abbildung 74). Das erste als Klasse definierte Objekt ist der Messdatensatz <mds\_contura> als Rohdatenbeschreibung. Diese Rohdatenbeschreibung bezieht sich ausschließlich auf die offline vorgehaltenen Daten und dienen der nachgelagerten Bearbeitung. Gewissermaßen beschreibt also die Klasse <mds\_contura> auch alle während der Messungen (Messfahrt) weggespeicherten Daten. Innerhalb der Rohdatenbeschreibung befinden sich die folgend beschriebenen Bestandteile. Die Methode Registrierung bzw. Verortung der Daten verkettet die 3D Messzenen zu einem zusammenhängenden metrischen 3D-Abbild des Waldweges. Weiterhin dient eine implementierte Methode zur Nachführung und Korrektur der Trajektorie aus den kinematischen Messdaten. Zusätzlich werden die weiteren multimodalen Messdaten (Spektraldaten etc.) darauf registriert und verortet. All diese Vorgänge stützen sich auf die während der Erfassung auf der eingebetteten Hardware kalkulierten Timing-Sequenzen, die ebenfalls als Datenstruktur vorliegen. Die erkannten Markenpositionen von ortsunveränderlichen Referenzmarken auf den Teststrecken werden mit einer von GeoNet entwickelten Methode aus dem registrierten multimodalen Messdatensatz extrahiert. Diese bestimmten Koordinaten gelten überwiegend der späteren Genauigkeitsbewertung. Mittels einer weiteren essenziellen Methode lassen sich die multimodalen Daten komprimieren und reduzieren. Eine Reduktion kann z.B. dadurch erreicht werden, dass Daten der Bildsensoren, welche aufgrund deren höheren Auflösungen nicht vollständig Punkten der Punktwolken zugeordnet werden können, reduziert werden. Es zeigte sich bei Testberechnungen, dass eine Reduktion der Datenmengen auf ein Wesentliches unabdingbar für eine effiziente Weiterverarbeitung ist. Nicht zuletzt kann die „Treffericherheit“ und Trainingszeit eines neuronalen Netzes durch eine vernünftige Vorverarbeitung begünstigt werden.

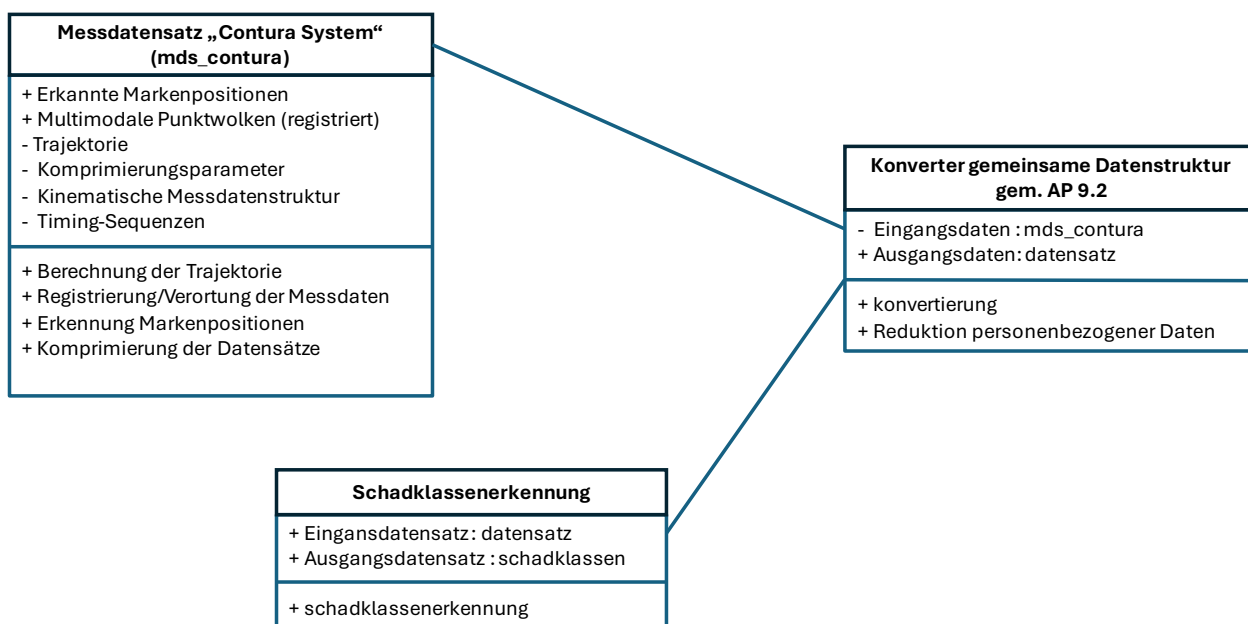


Abbildung 74: Klassenmodell der Auswertesoftware

Eine weitere deklarierte Klasse ist ein „Konverter“, der die multimodalen „Messdatensätze“ des <mds\_contura> als Struktur mit Rohdatenbeschreibung in die gemeinsame entwickelte Datenstruktur gemäß des Arbeitspaketes 9.2 konvertiert. Das geschieht vor allem aus dem Grund, weil die ersten Trainingsdatensätze (allerdings nur auf Geometrie-Basis) aus Versuchsaufnahmen mit einem GeoNet eigenen System zur Straßenerfassung durchgeführt wurden (AP9.1). Somit kann die in vorherigen Arbeitspaketen erzeugte und übergebene Struktur (AP9.1 und 9.2) beibehalten werden. Die Methode zur Reduktion personenbezogener Daten wurde auf bereits existierenden Algorithmen von GeoNet aufgebaut. Diese funktioniert sehr effizient und zuverlässig auf die Datensätze, welche in der Beschreibung des GeoNet-

Formats vorliegen. So ist sichergestellt, dass beispielsweise erfasste Kennzeichen von Forstfahrzeugen unkenntlich gemacht werden. Ein gängiges Verfahren dafür ist das sogenannte „Verpixeln“.

Die letztendliche Auswertung des Wegzustandes <Schadklassenerkennung> ist eine separate Klasse. Darin sind die vom Projektpartner HD-Vision entwickelten Algorithmen hinterlegt. Anhand eines als Methode in der Klasse implementierten neuronalen Netzes werden die Schadklasse erkannt. Funktionsargument für diese Methode ist ein multimodaler Datensatz <datensatz>, indem alle Sensordaten bereits fusioniert sind. Ausgabedatensatz ist eine georeferenzierte Beschreibung der Schadklassen als Datenstruktur <schadklassen>. Es ist gegebenenfalls vorgesehen, diese Strukturen in weiteren Entwicklungsschritten zu überarbeiten. Hier zeigt sich aber der effiziente und sinnvolle Ansatz der objektorientierten Programmierung. Innerhalb der algorithmischen Beschreibung müssen dafür lediglich die Prototypen der Klassen angepasst werden. Letztendlich beschreibt dieses Objekt das Zustandsmodell.

Die Schnittstellenentwicklung für ein Front End erfolgte durch die Ergänzung des (in Abbildung 74 visualisierten) Klassendiagramms um die in Abbildung 75 grau dargestellten Bestandteile zu einem erweiterten Klassendiagramm. Das entwickelte „Frontend“ hat prinzipiell mehrerer Funktionen inne. Zum einen dient es dazu, das Speichern der während des Messprozesses erzeugten Daten fehlerfrei und ohne Redundanzprobleme zu ermöglichen. So dürfen vor allem während des Speicherns keine Zugriffe seitens der Methoden anderer Objekte erfolgen. Es muss zudem genügend Speicher allokiert werden. In Abstimmung mit den nachgelagerten Prozessen der Partner NavLog und FHE ermöglicht es ein zuverlässiges Vorhalten und Abrufen der Daten. Algorithmisch wurde das Front End als Methode selbst deklariert.

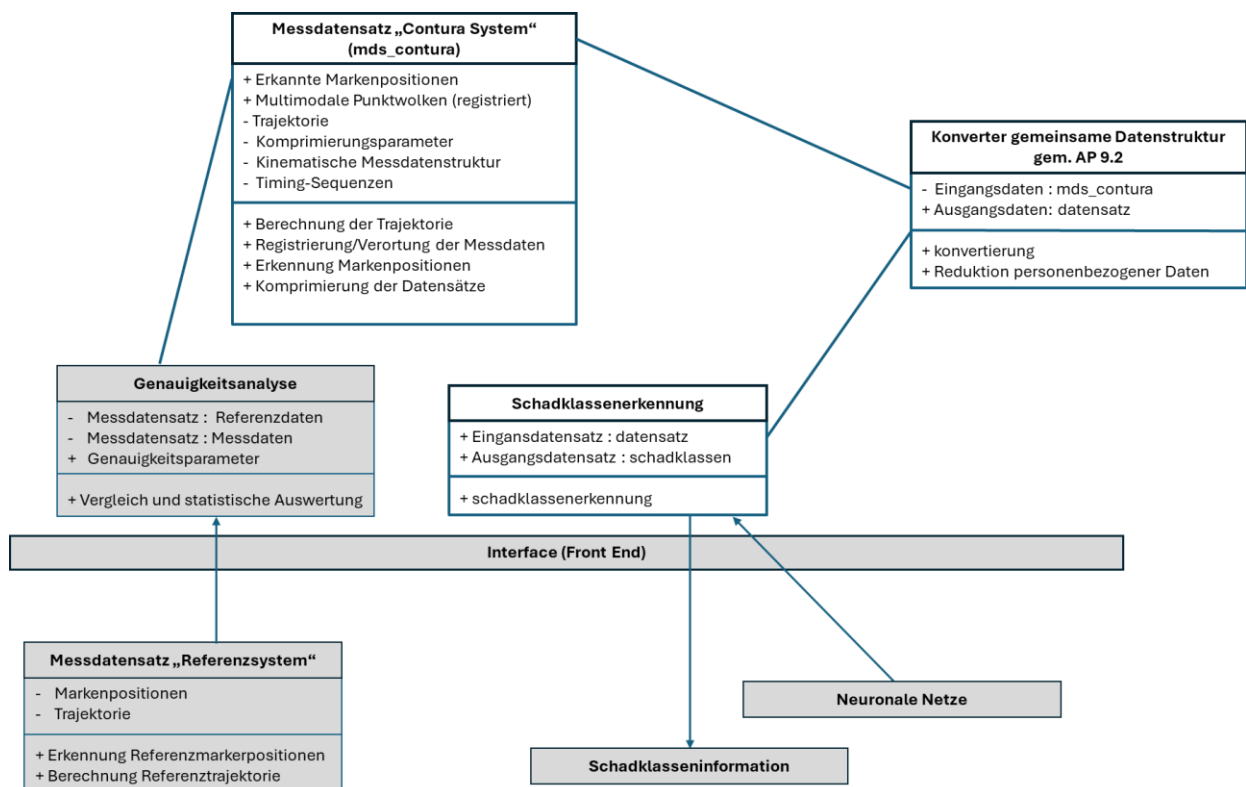


Abbildung 75: Erweitertes Klassenmodell

Weiterhin wurde das ursprüngliche Klassenmodell um die Genauigkeitsanalyse erweitert. Aus dieser Klasse können Aussagen bestimmt werden, die eine statistische Analyse zulassen. So können Abweichungen im Sinne von Streuungsparametern (Varianzen etc.) gegenüber einem Referenzdatensatz quantitativ ermittelt und beschrieben werden. Der Referenzdatensatz kann von einem weiteren Fahrzeug oder einem statischen, unbewegten System mit sehr hoher Genauigkeit erzeugt werden. Das statische System kann nach dem „Stop-And-Go“ Verfahren sequenziell einen Streckenabschnitt erfassen. Das bedeutet, dass das System nach einer abgeschlossenen Messung an der nächsten Position aufgestellt wird, während der Messung selbst aber ruht. Dieses Verfahren ist selbstverständlich mit deutlich höherem Zeitaufwand verbunden, erzeugt aber sehr genaue Referenzdaten. Bezüglich eines weiteren Fahrzeugs kann die Genauigkeitsbewertung auf dem Verfahren basieren, dass das Contura System auf die Gleiche Art und Weise wie ein hochgenaueres GeoNet-System für die Straßenerkennung nach dem in den vorherigen Arbeitspaketen entwickelten Kalibrierprozeduren zu kalibrieren. Der Vergleich beider Systeme auf einer Teststrecke lässt ebenso eine Aussage zur Genauigkeit zu. Nicht zuletzt ist sogar ein Dreiecksverfahren möglich, um drei (oder mehrere) kinematisch bewegte Messsysteme vergleichbar zu machen. Die letzte Funktion des Front Ends besteht darin, einen Austausch der neuronalen Netze zuzulassen. So können die Netze in separaten Prozessen des

überwachten Lernens (oder anderen Verfahren) an neuen Trainingsdatensätzen trainiert werden und schließlich in die Verarbeitungsstruktur eingebettet werden.

### **Arbeitspaket 12: Evaluation Gesamtdemonstrator**

Aufgrund erster valider und ausreichend vorhandener Messdaten konnten erste Nachoptimierungen an den Prozessen für die Georeferenzdatenberechnung und der Referenzierung vorgenommen werden. Es zeichnete sich jedoch ab, dass innerhalb der Projektverlängerungshase noch Handlungsbedarf bestand. Dementsprechend wurden Nachoptimierungen vorgenommen, die softwareseitige und methodische Aspekte betrafen.

### **3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

Die wesentlichen Entwicklungsergebnisse sind folgend zusammenfasst.

#### Gesamtsensorkonzept, Implementierung und Validierung GNSS- Sensorsystem:

Für die Georeferenz-Sensorik wurden verschiedene Konzepte erstellt. Dabei wurde zudem stets auf praktikable und wirtschaftliche Lösungen hingearbeitet. Als Ergebnis an dieses stelle steht ein bewertetes Konzept und eine Methodik, dieses zu validieren

#### Entwicklung eines hochgenauen MMS-Kalibrierkonzepts:

Das entwickelte Kalibrierkonzept für das Gesamtsystem (Georeferenz-Sensorik und Waldwege-Sensorik kombiniert) ist entscheidend für die Funktionsfähigkeit und die Verlässlichkeit der erhobenen Daten. Die Aspekte eine späteren Qualitätssicherung der erhobenen Daten wurden kontinuierlich berücksichtigt. Als praktisches Ergebnis steht hier ein realisierter Kalibrierplatz, mit welchem die Methodik evaluiert und bewertet werden kann.

#### Evaluierung der Kalibrierkonzepte:

Die Evaluation der Konzepte erfolgte zum einen durch Nutzung des entwickelten Kalibrierstandes, als auch den dynamischen Test auf speziell konzipierten Eichstrecken.

#### Messdatenfusion von 3D- und GIS-Daten:

Prinzipiell basiert die Messdatenfusion auf den Ergebnissen der Kalibrierkonzepte und deren Bewertung. Die Fusion von Georeferenz-Sensorik und Erfassungs-Sensorik konnte erfolgreich umgesetzt werden. Weiterhin wurde die Schnittstelle zur Übergabe der Mess- und Metadaten an die finale Auswertesoftware realisiert.

#### Entwicklung Auswertesoftware:

Die Auswertesoftware entstand in enger Zusammenarbeit mit den Partnern. Es wurde im ersten Schritt eine objektbasierte Algorithmenstruktur entworfen. So war es möglich, die von HD-Vision und NavLog entwickelten Methoden bausteinartig in die Gesamtsoftware zu implementieren. Das Klassenmodell beinhaltet alle im Projekt entwickelten Datenstrukturen und Methoden. Es bildet somit das Zusammenspiel der Teilentwicklungen inklusive der Datenstränge informatisch ab. Von GeoNet wurde zusätzlich ein Modul entwickelt, das die personenbezogenen Daten automatisiert unkenntlich macht.

## **Teilvorhaben 4: 2220NR061D**

### **1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens**

Gegenstand des genannten Teilvorhabens ist die Entwicklung eines robusten Geräteträgers sowie den Ausbau des Messfahrzeugs. Dabei stehen Resistenz gegenüber äußeren Einflüssen wie Feuchte, Schmutz, Temperatur sowie mechanische Festigkeit im Vordergrund. Als Systemintegrator ist es Aufgabe die einzelnen Lösungen aus dem Sensorikbereich zu einem monolithischen System zusammenzuführen.

### **2. Bearbeitete Arbeitspakete**

#### **Arbeitspaket 01: Gesamtkonzeption des CONTURA Mess- und Auswertesystems**

Für alle Partner einheitlich stand im Arbeitspaket 1.1 die Festlegung der Bedarfe, Zuständigkeiten, Arbeitsinhalte, die Detailaufstellung eines Projektplanes sowie die Ausarbeitung eines Lastenhefts an. Bezüglich des Teilvorhabens 4 war dieser Projektabschnitt von besonderer Bedeutung, da so erste wesentliche konstruktive Invarianten skizziert werden konnten.

#### **Arbeitspaket 06: Entwicklung Geräteträger**

Hinsichtlich konzeptioneller Vorarbeit wurden im Rahmen des Arbeitspakets 6.1 wesentliche Randbedingungen für eine Gerätekonstruktion als Anbausystem eines Fahrzeugs gesichtet. Dazu wurde eine Sichtung bestehender Lösungen vorgenommen, woraufhin adaptierbare Systeme durch eine gezielte Analyse des jeweiligen technischen Systems abstrahiert wurden.

Die Projektierung und die Ausarbeitung eines technischen Prinzips für die für das CONTURA-Messsystem stellt hinsichtlich der systemtechnischen Konzeptionierung des Geräteträgers die Grundlage für alle weiteren Entwicklungsstufen dar. Systembedingt ist dieser Schritt, gerade mechanischer Natur, hochdynamisch. Notwendige physikalische Größen wie Abmaße, Belastungen, Aufbau und Anordnungen sind zum Zeitpunkt des vorliegenden Berichts noch parametrisiert und stark abhängig von den verwendeten Sensorsystemen.

In Absprache mit den Projektpartnern und unter Berücksichtigung der gegebenen Parameter durch Kameraposition, Flexibilität bzgl. Steifigkeit und Materialauswahl, Fahrzeugmaßen und Vorgaben der Projektpartner wurde das beste technische Prinzip auskonstruiert. Sowohl der Geräteaufbau auf der Ladefläche als auch die Aufnahmen für die Hardware zur Auswertung der Daten im Innenraum ist vollständig konstruiert. Daraufhin wurde eine Stückliste erzeugt, Detailzeichnungen erstellt sowie Baugruppenzeichnungen. Die benötigten Komponenten wurden an den Einkauf bzw. die interne und externe Fertigung übergeben und sind zum Großteil bereits geliefert.

Die Montage und der Einbau des Trägersystems sind erfolgt. Auch die fahrzeuginternen Komponenten wurden im Innenraum des Fahrzeugs adäquat gesichert. Eine Abnahme durch die DEKRA ist erfolgt.

Die bisherigen Erprobungen waren in Bezug auf das Trägersystem zufriedenstellend, sodass eine konzeptionelle Optimierung aufgrund der Integration derameratechnik etc. nicht notwendig war. Kleinere Optimierungen wurden erarbeitet und umgesetzt, z.B. die Befestigung des Trägersystems am Fahrzeugrahmen

#### **Arbeitspaket 07: Entwicklung Systemkalibrierung**

Die Erarbeitung des technischen Prinzips für einen Kalibrierkörper ist erfolgt. Anstelle eines Kalibrierkörpers hat man sich für eine Kalibriertafel entschieden. Diese wurde hergestellt und für Testzwecke geliefert.

#### **Arbeitspaket 12: Evaluation Gesamtdemonstrator**

Nach Auswertungen der Feldversuche werden Optimierungspotenziale aufgezeigt und bewertet.

### **3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

Als wesentliches Ergebnis des Teilvorhabens ist - neben dem entstandenen Lastenheft und die Erfassung von Randbedingungen bzw. Anforderungen - eine hohe konzeptionelle Vielfalt an Varianten zu verzeichnen. Es wurden sowohl bestehende Lösungen in Betracht gezogen als auch neuartige Lösungen parametrisierbar und somit adaptiv entwickelt. Es entstand somit eine Art Lösungskatalog, innerhalb dessen verschiedene Teilvarianten variiert, bewertet und anschließend kombiniert werden können. Einzelne Lösungen wurden für ein Prototypenstadium auskonstruiert und umgesetzt, wodurch diese wiederum in realen Testszenarien validiert werden können und dadurch zum Teil überhaupt erst bewertbar werden.

## **Teilvorhaben 5: 2220NR061E**

### **1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens**

Das Teilvorhaben 5 beschäftigte sich im vorliegenden Projekt mit der 3D-Erfassung des Wegekörpers (Fahrbahn) auf Basis von Bildverarbeitungstechnologien. Insbesondere die Erfassung der natürlichen Oberflächen unter verschiedenen Umwelteinflüssen stellte einen hohen Forschungs- und Entwicklungsaufwand dar. Hierfür sollten geeignete Methoden und Technologien untersucht und anschließend in einem Versuchsmuster zusammenfließen. Die Erfassung der Oberfläche von bis zu 4 m Breite machte eine Kaskadierung mehrerer Sensorsysteme in einem Gesamtsystem erforderlich, das ebenfalls Entwicklungsgegenstand im Forschungsprojekt war. Neben der Systemauslegung des 3D-Bildaufnahmekanals war geplant, neueste Rechentechnologien für eine hochdynamische Berechnung der 3D-Daten einzusetzen. Für diesen Zweck wurden verschiedene Architekturen geprüft und ein ressourceneffizienter Softwareentwurf durchgeführt. Mit Abschluss der Laborphase wurden gemeinsam mit den Projektpartnern geeignete Feldtests durchgeführt, um das System zu evaluieren. In einer letzten Optimierungsphase wurde versucht, mögliche Systemschwächen zu beseitigen um weitere Feldtests nach Projektende durchzuführen.

### **2. Bearbeitete Arbeitspakete**

#### **Arbeitspaket 01: Gesamtkonzeption des CONTURA Mess- und Auswertesystems**

In einem Kickoff-Meeting aller Projektpartner wurden die zu erreichenden Ziele, sowie die forstlichen und technischen Anforderungen an das zu entwickelnde System herausgearbeitet. Bestandteil war auch die Abstimmung bezüglich der Zusammenarbeit der Projektpartner in den einzelnen Arbeitspaketen. Beim ersten Zwischenmeeting halfen die bis dahin von den Projektpartnern durchgeführten Evaluierungen von Entwicklungen und Auslotungen der Möglichkeiten bei der Konkretisierung eines optimierten Gesamtkonzeptes für das System CONTURA.

Insbesondere für die Abstimmung des Lastenheftes wurden in mehreren Besprechungsrunden die für die bodennahe Abtastung notwendigen Parameter diskutiert. Die wichtigsten Zielparameter bildeten dabei die Messbreite der Wegkrone und die ungefähre Anbringhöhe des sowie die Fahrgeschwindigkeit des Messbalkens.

#### **Arbeitspaket 04: Entwicklung Gesamtsensorkonzept**

In Arbeitspaket 4.1 V&C wurden theoretische Untersuchungen hinsichtlich der Möglichkeiten der 3D-Abtastung untersucht. Begonnen wurde hierbei mit der 3D-Berechnung der Daten auf Basis von Ground Truth Datensätzen. Ziel war es die Rechenbudgets der Einzelinstanzen zu evaluieren und diese in den Systementwurf mit einfließen zu lassen. Weiterhin wurde mit den Zielgrößen aus AP 1.1 V&C Abschätzungen zu möglichen Geometrien durchgeführt und ein optimiertes System am Statusmeeting am 28.04.2022 den Projektpartnern vorgestellt. Als nächste Arbeiten ist der Aufbau des Systems geplant, um eine entsprechende Evaluierung im Testgebiet durchzuführen. Zu Beginn von Arbeitspaket (4.2 V&C) wurde eine theoretische Betrachtung der realen Bedingungen im Anwendungsfall untersucht und diskutiert. Auf Basis der speziellen Eigenschaften im Außenbereich wurden grundlegende Möglichkeiten für eine optimale Messbeleuchtung diskutiert.

Als System für die 3D-Aufnahme wurde ein photogrammetrisches System geplant. Um hierfür zunächst die datentechnischen Eigenschaften zu evaluieren wurden mit Hilfe eines 3D-Datensatzes zunächst mehrere Verfahren anhand dieses Datensatzes evaluiert. Hintergrund der Untersuchung bildete die Frage, ist ein embedded Processing vor Ort möglich und wie sind die entsprechenden Systemanforderungen. Weiterhin sollte damit zusätzlich die Frage geklärt werden, ist ein zusätzliches Postprocessing aussichtsreich oder nicht. Dafür wurde der Berechnungsprozess in mehrere Teile zerlegt und hinsichtlich der Laufzeit untersucht. Folgende Grafik zeigt die Einzelschritte die notwendig für eine photogrammetrische Bestimmung notwendig sind (Abbildung 76 links). In einem Testlauf wurden zusätzlich die Zeiten ermittelt, die für die entsprechenden Berechnungsschritte notwendig sind. In Summe zeigt sich eine Abarbeitungszeit bei 30 Bildpaaren mit einer Größe von 1280x864px von 5s. Was letztendlich in einer maximalen Framezeit von 6 Bildern /s also 166ms pro Sequenz endet. Aus den Anforderungen von ca. 30 km/h Scangeschwindigkeit ist diese relativ kleine Bildgröße und die Framezeit nicht akzeptabel. Aus diesem Grund wurde mit einer Optimierung begonnen. Gleichzeitig ergab sich aus diesen Ergebnissen die Aussage das eine hochgenaue zeitliche Synchronisation des Bildeinzuges für die 3D-Datenqualität deutlich wichtiger erscheint, als ein 3D-Processing vor Ort. Aus diesem Grund wird für die Umsetzung eine Art Prekalibrierungsalgorithmus (Bestimmung intrinsische und extrinsische Parameter (diese könnten sich ggf. während der Fahrt zum Einsatzort verändern)) zu entwickeln sein. Um im anschließenden Postprocessing die richtige metrische Basis zu erhalten.

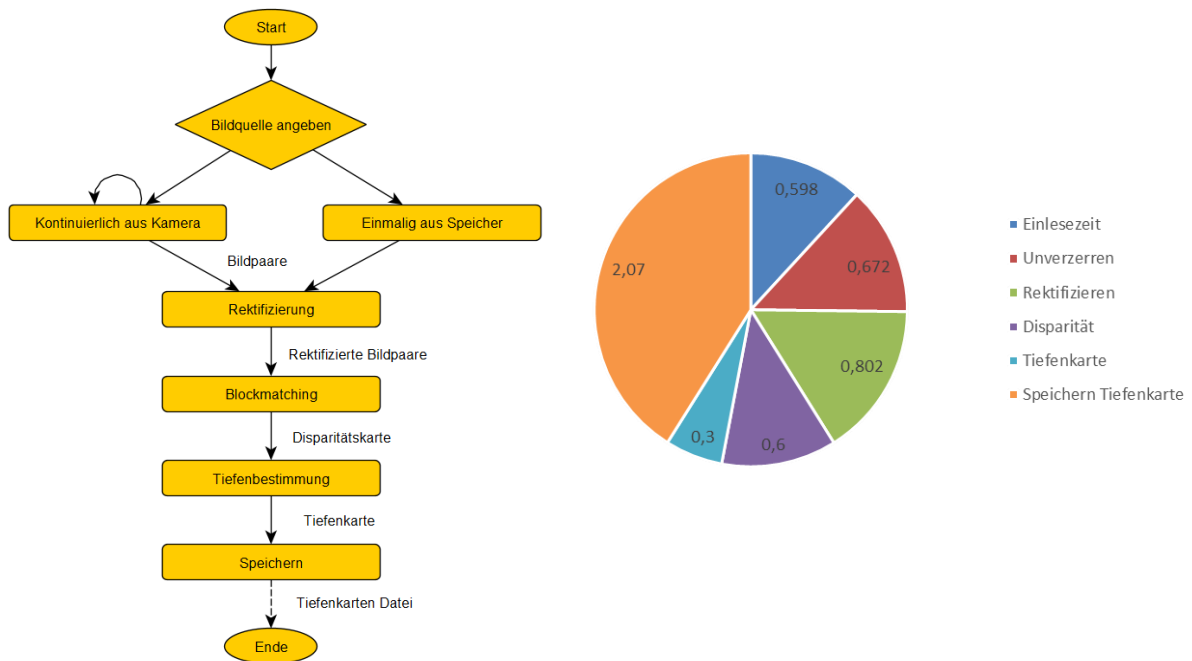


Abbildung 76: Verfahrensschritte für die Erfassung der photometrischen Wegdaten (links), Berechnungsdauer der Einzeloperationen (rechts) in Summe ergibt sich 5,042/30 Bildpaare/s

Zusätzlich wurde evaluiert inwieweit die Bildgröße in Abhängigkeit des Matchingalgorithmus (vergleicht beide Teilbilder und sucht nach homologen Punkten, SAD (Sum of absolute Differences, SGBM Semi Global Blockmatching (iterativer Prozess, sehr rechenzeitaufwendig)) skaliert. Darüber hinaus wurde bei diesem Versuch auch eine Grafikkartenunterstützung mit in Betracht gezogen. Die Ergebnisse zeigt die nächste Abbildung 77.

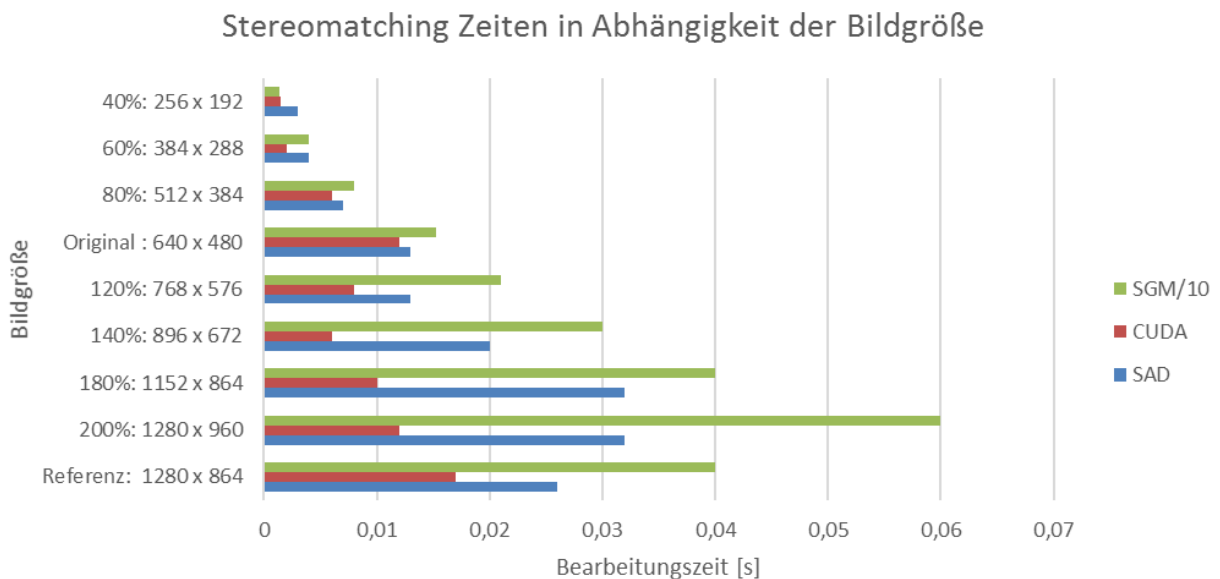


Abbildung 77: Ergebnisse der Untersuchung der Rechenzeit verschiedener Blockmatcher und CUDA-Unterstützung

Grundlage für die Berechnung bildete ein Standardrechner mit Multithreading und GPU Unterstützung. Auffällig ist der große Zeitbedarf für das SGBM und die nahezu Halbierung der Rechenzeit beim SAD-Matching unter Benutzung von CUDA Kernen. Nichtsdestotrotz wird für das weitere Vorgehen aufgrund der besseren Datengüte das SGBM weiter favorisiert. Am Ende konnte nach einigen Optimierungsschritten letztendlich eine 3D-Berechnungsrate von 30 3D-Bildern/s erreicht werden. Ein finales Ergebnis zeigt ein Testaufbau mit Livekameras mit der Auflösung von 1920x1200px auf der nächsten Abbildung 78. Auffällig bei der Einbindung der CUDA-Unterstützung war das die Berechnung nur pixelgenau erfolgt. Eine Implementierung eines Subpixeling in einer CUDA Umgebung wurde verzichtet vielmehr wurde die Entscheidung ein Datenpostprocessing durchzuführen, untermauert.

Tiefenauflösung der OpenCV CPU und GPU  
 Stereomatcher für einen Sensor: 1920x1200;  
 Pixelgröße: 5,86  $\mu\text{m}$ . Basisabstand = 100 mm,  
 Brennweite = 6mm

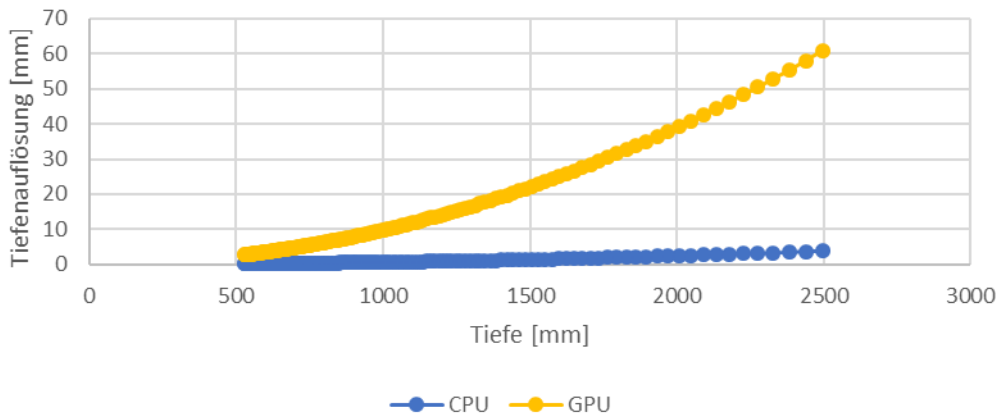


Abbildung 78: Vergleich Tiefenauflösung bei gleicher Berechnungszeit

Nach der Untersuchung der algorithmischen Basis des Systems wurde an der Konzeption des Systems mit der Zielgröße 4m Abtastbreite weitergearbeitet. Neben Untersuchungen, die hier nicht näher ausgeführt werden, bildeten die geometrische Definition Anordnung der Kameras und die Auswahl der optischen Komponenten den zweiten großen Arbeitspunkt. Folgende Grafik zeigt das Ergebnis der Untersuchung. Eine konvergente Anordnung ist der parallelen Anordnung im vorliegenden Fall vorzuziehen, da deutlich weniger Disparitätspixel benötigt werden. Die Anzahl der Disparitätspixel stellt ein Gütekriterium dar. Je mehr Disparitätspixel benötigt werden desto größer muss der Sensor gewählt werden, zusätzlich entsteht ein Randbereich (in Höhe der Disparitätspixel der nicht genutzt werden kann).

Benötigter Disparitätssuchbereich bei konvergenter und paralleler Auslegung für  $B=60$ ,  $f=8$ , Pixelgröße 3,45  $\mu\text{m}$  und Sensor 1900x1200

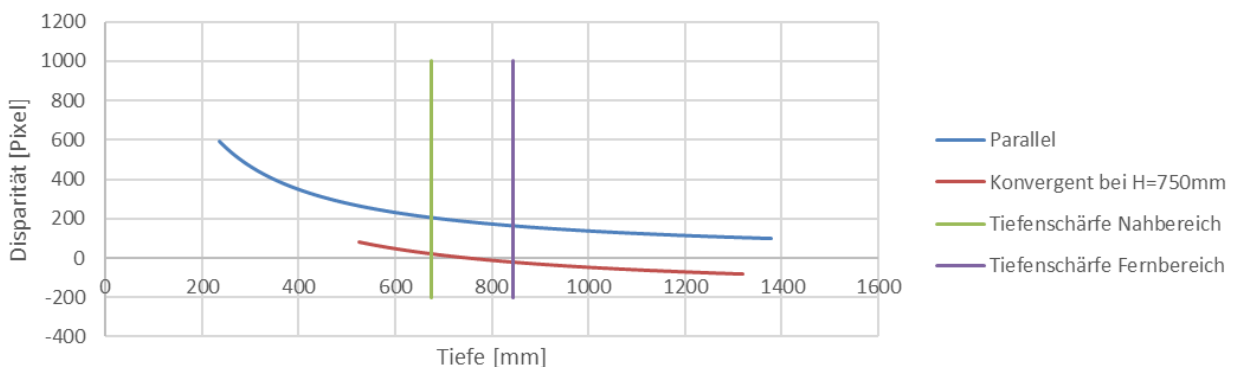


Abbildung 79: Unterschiede Disparitätssuchbereich (Disparitätspixel) im Vergleich

Unter Berücksichtigung der hier genannten Ergebnisse wurde in die Feinplanung eines möglichen Anlagenkonzeptes gegangen, um in den folgenden Arbeitspaketen mit Testaufbauten und realen Umweltdaten zu arbeiten. Ausgearbeitet wurden zwei grundlegende Konzepte, die in der Tabelle 2 gegenübergestellt wurden. Die beiden Konzepte unterscheiden sich hauptsächlich in der Kameraanzahl. Hintergrund der Überlegungen bildeten ökonomische Gründe, da acht kleiner Bildsensoren unter Umständen günstiger sein könnten als vier große Bildsensoren. Hinzukommt die schnellere Aufnahmezeit der kleineren Sensoren, was in einer schnelleren Abtastung einen Vorteil bietet. Zusätzlich wurde in Tabelle 2 auch noch eine Unterscheidung in aktive und passive Variante vorgenommen. Dies hat den Hintergrund, dass bei der passiven Variante die solare Einstrahlung der Sonne berücksichtigt wurde und bei Variante zwei eine künstliche Beleuchtung als Berechnungsgrundlage hinterlegt wurde.

Tabelle 2: Möglich Systemkonzepte für die photogrammetrische Betrachtung der Wegekrone.

Kamera-bezeichnung	Pixel-anzahl	Brennweite [mm]	Höhe	Vertikales Sichtfeld	Bildfrequenz [B/s]	Belichtungszeit [s]	Laterale Auflösung [Pixel /mm]	Tiefenauflösung [mm]	Geschwindigkeit [km/h]
Dauerbeleuchtung: Bewegungsunschärfe und maximale Beleuchtung beschränkt nutzbare Bildfrequenz der Kamera									
BFS-PGE-88S6M-C PoE	4096 x 2160	12	1830	1128,97	7,68	0,0315675	Min:1,85	0,72	30
Mako G-234B PoE	1936 x 1216	16	1800	784	11,07	0,039	1,53	0,89	30
Blitzlicht: theoretisch maximale Ausnutzung der Kamerafrequenz möglich									
BFS-PGE-88S6M-C PoE	4096 x 2160	12	1830	1128,97	14	0,0166	Min:1,85	0,72	56,9
Mako G-234B PoE	1936 x 1216	16	1800	784	41	0,01	1,53	0,89	115

Nach allen Vorüberlegungen und auch internen Absprachen wurde sich zunächst für die 4-Kameravariante entschieden. Hauptargument bildet die schmalere Bauweise und der geringere Verkabelungsaufwand. Offen ist derzeit noch die Objektivfrage, da es sich um einen relativ großen Bildsensor handelt. Die prinzipielle Anordnung ist in der folgenden Abbildung 80 zu sehen.

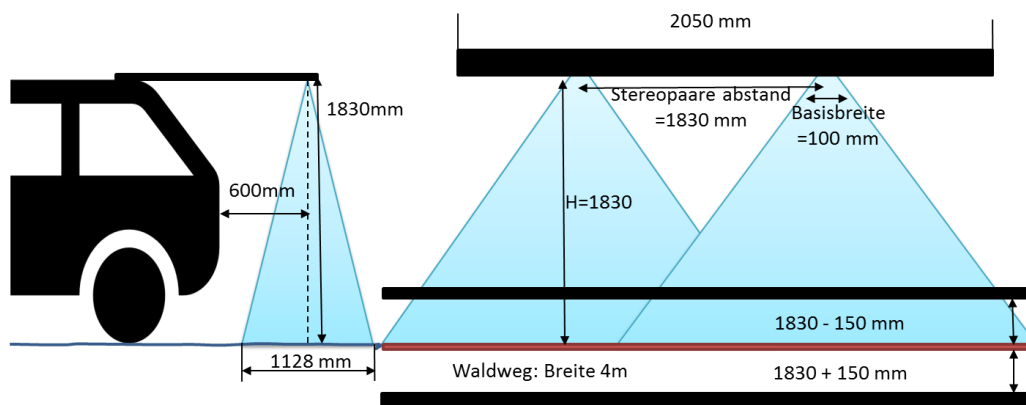


Abbildung 80: Erarbeitetes Systemkonzept für die Abtastung der Wegekrone.

Im Arbeitspaket 4.2 V&C wurde mit Vorbetrachtungen begonnen, die auch die in Tabelle 2 vorgestellten aktiven Beleuchtungsvariante mitberücksichtigen. Hierbei gilt es im Außenbetrieb zu ermitteln, welche Wellenlängen und welche Art der Beleuchtung zu wählen ist. Hierfür wurde das atmosphärische Fenster der Sonne näher betrachtet. Es zeigt sich eine mögliche Dämpfungslücke bei 970nm und bei 836nm. Hier wird eine verminderte Strahlungsleistung aufgrund der Wasserbestandteile in der Atmosphäre erwartet. Hintergrund dieser Überlegungen ist die Reduktion von Fremdlicht bei der Abtastung und ggf. eine Erhöhung der Textureigenschaften durch strukturierte Beleuchtungsmuster.

Folglich wurde weiter an der Entwicklung einer künstlichen Beleuchtung unter Berücksichtigung der Fremdlichtunterdrückung gearbeitet. In der folgenden Grafik sind Ergebnisse aus Testmessungen des letzten Sommers auf einem typischen Waldweg zu sehen. Hauptziel der Untersuchungen bildete hierbei die Ausnutzung von Silizium basierten Sensoren, deren Empfindlichkeit bei ca. 1064nm endet. Ideal wäre der Einsatz von IndiumGaliumArsenid (InGaAs) Sensoren, mit deren Empfindlichkeit auch das atmosphärische Fenster bei 1450 nm ausnutzbar wäre. Die folgende Abbildung 81 zeigt spektrale Testmessungen auf einem Waldstück im Thüringer Wald mit unterschiedlichen Untergründen. Die verringerte Strahlungsemission der Sonne bei den geplanten Nahinfrarotbereich im Bereich um 970nm ist klar erkennbar.

## Reflektierte spektrale Bestrahlungsstärke des Waldweges unter Nadelbäumen

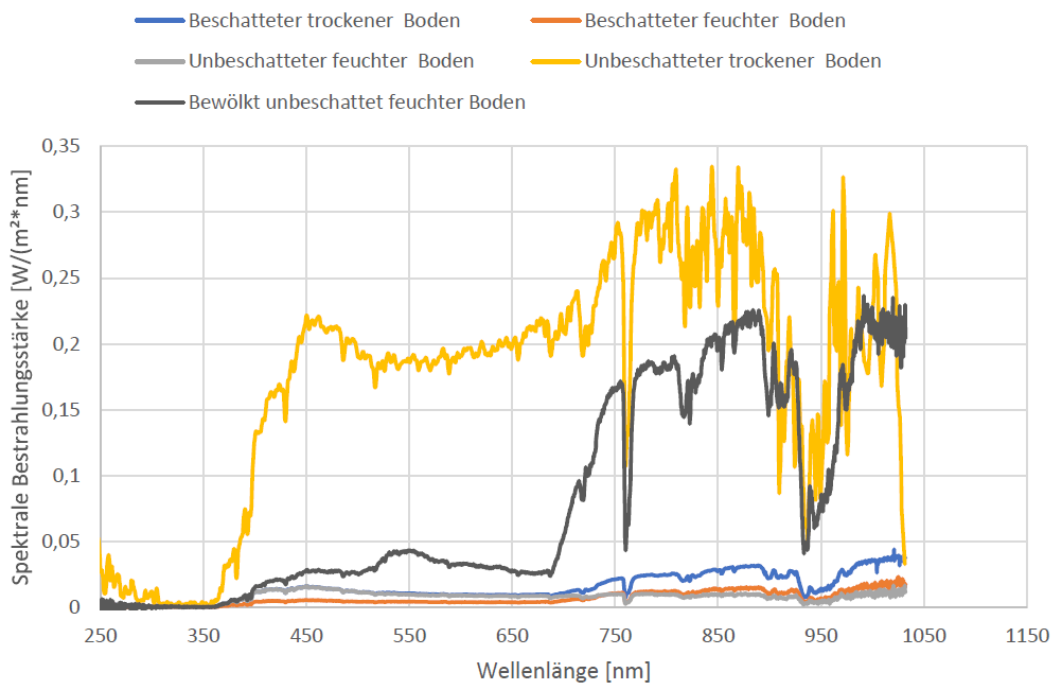


Abbildung 81: Testmessungen des atmosphärischen Fensters im Empfindlichkeitsbereich von Silizium auf unterschiedlichen Untergründen im Wald.

Aufbauend auf diesen Untersuchungen konnte eine leistungsfähige LED beschafft werden, die ihr Intensitätsmaximum bei 940nm hat. Nach der ersten Vorevaluation wurde danach mit der Entwicklung eines Labormusters begonnen. Abbildung 82 zeigt das Labormuster, das derzeit evaluiert wird, mit ersten Ergebnissen zur Illumination. Es wird davon ausgegangen, dass drei dieser Quellen ausreichen können, um die Oberfläche der Wegkrone zu illuminieren. Interessant bei den ersten Versuchen war die gute Trennbarkeit zwischen Vegetation und Weg, was vermutlich auf die Reflektion der Vegetation zurückzuführen ist, wohingegen steinige Oberflächen durchaus gut reflektieren.



Abbildung 82: Beobachtete Szene im Laborbereich bei 940nm Beleuchtung (links), Gehäuse Testsetup (rechts).

## Arbeitspaket 05: Hardwareentwicklung 3D-Aufnahmesystem

Aufbauend auf den konzeptionellen Voruntersuchungen und den möglichen Systemkonzepten wurde in AP 5 auf Basis des stereoskopischen Aufbaus weiter gearbeitet. Hierfür wurde in einem Laborversuch mit Hilfe vorhandener Kamerasysteme ein Träger aufgebaut, der mit Hilfe von 4 Basler Kameras zunächst für die Untersuchungen der prinzipiellen Machbarkeit zur Verfügung stand (erste Zeile Tabelle in Abbildung 83).

Kamera-bezeichnung	Pixel-anzahl	Brennweite [mm]	Höhe	Blende	Vertikales Sichtfeld	Bildfrequenz [B/s]	Belichtungszeit [s]	Auflösung [Pixel/mm]	Konvergenzwinkel	Tiefenaufösung [mm]	Anzahl Stereopaare	Messbalken [mm]
BFS-PGE-88S6M-C PoE	4096 x 2160	12	1830	2,0	1128,98	7,68	0,0315675	Min:1,85	1,56	0,72	2	2032
Mako G-234B PoE	1936 x 1216	16	1800	2,8	784	11,07	0,039	1,53	0	0,89	4	2999

Abbildung 83: Berechnete Parameter Testsysteme stereoskopische Auswertung.

Im Folgenden sieht man den Labordemonstrator des ersten Vorversuches. Um eine gewisse Ausrichtung der Kamerasysteme zu gewährleisten, wurden Halteplatten gemäß berechnetem Konvergenzwinkel sowohl für System 1 (Abbildung 83) als auch für System 2 (Abbildung 83) angefertigt. Nach Verkabelung und Ausrichtung aller Systeme konnten erste 3D-Bilder erzeugt werden. Für Laborzwecke diente hierfür eine Legopyramide.

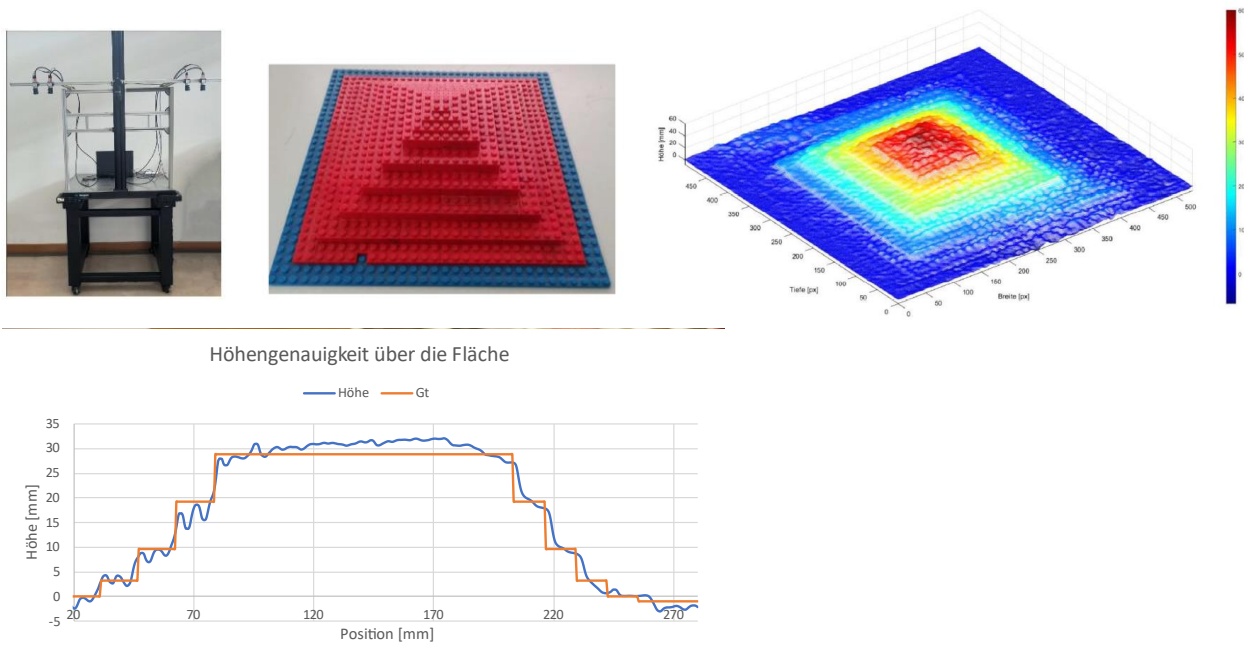


Abbildung 84: Laborsystem (2m Abtastbreite) links, Testtarget (mittig), rekonstruiertes 3D-Bild (rechts), Höhengenaugigkeit (unten links).

Die ersten Ergebnisse geben die theoretisch errechneten Parameter wieder. Es wird im Laborversuch eine Tiefenaufösung kleiner 10mm erreicht. Die im ersten Jahr durchgeführten Untersuchungen hinsichtlich Performance und prinzipiellen Berechnungsmodell sind in die erste Umsetzung eingeflossen.

Anschließend konnte ein erstes Systemkonzept für die Umsetzung der Elektronik und Datenverarbeitung (Abbildung 85) im Hardwaredemonstrator erarbeitet werden. In eigenen Vorversuchen zeigte sich die unbedingte Ermittlung der Beleuchtungscharakteristik auf dem Wegprofil. Um eine optimale Ausleuchtung in Abhängigkeit von solarer Einstrahlung herzustellen, muss die Bestrahlungsstärke  $E(t)$  simultan gemessen werden.

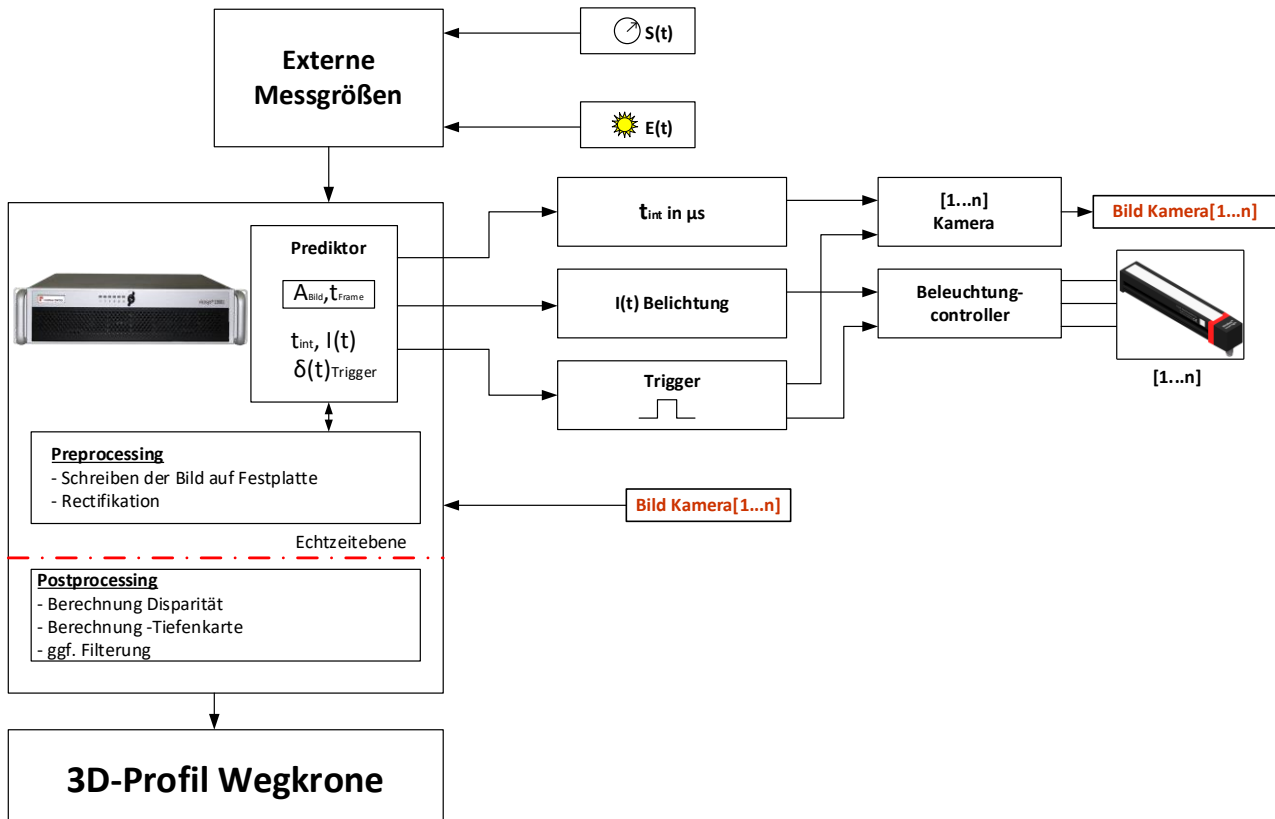


Abbildung 85: Systemlayout für die Elektronik, Optik & Datenverarbeitung Hardwaredemonstrator.

Diese sowie die Geschwindigkeits-/Wegdaten bilden die Eingangsgröße für eine prediktive Beleuchtungsregelung. Als Sensor für die Erfassung der solaren Einstrahlung ist aktuell eine RGB-Kamera im Gespräch, die in Fahrtrichtung die Fläche vor dem Fahrzeug abtastet und entsprechend eine orts aufgelöste Intensitätsverteilung liefern kann. Je nach Fahrzeuglänge soll dann automatisch ein Offset eingestellt werden, so dass die 3D-Kamerasysteme und der Beleuchtungskontroller optimal gesteuert werden. Das synchron ausgelesene Wegkronenbild 2D wird dann in einem Preprocessing unter Ausnutzung der erstellten Systemberechnungsmodelle in eine rektifizierte Zwischendarstellung umgerechnet. Im Anschluss daran werden die 3D-Daten in einem Postprocessingschritt, der nicht mehr echtzeitfähig ist, errechnet.

Schließlich konnten erste Untersuchungen für AP 5.3 durchgeführt werden. Hierfür wurde das Testsystem 1 behelfsweise auf ein Privatfahrzeug montiert und in ersten Szenarien getestet. Hierbei sind bereits erste Teile aus dem Konzept aus AP5.2 umgesetzt.

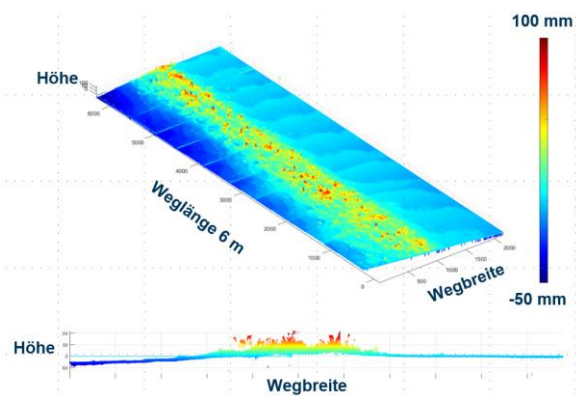


Abbildung 86: Vorversuch Hardwaredemonstrator (links), Errechnetes Profil (rechts).

Prinzipiell ist die geplante Variante einsatzfähig, die Aufnahmen wurden aktuell noch in einem Start/Stop/Betrieb aufgenommen. Selbst feine Strukturen (Gras, Steinchen etc.) können je nach Texturgüte aufgelöst werden. Im weiteren Verlauf von AP5.3 ist jetzt der Umbau auf Variante 2 Tabelle 1 geplant bei dem eine Breite von 3m komplett abgetastet werden kann. Ebenfalls sollen weitere Optimierungen aus dem entworfenen Systemmodell in den Demonstrator einfließen.

Folglich wurde weiter an der Entwicklung einer künstlichen Beleuchtung unter Berücksichtigung der Fremdlichtunterdrückung gearbeitet. Hierfür wurden die vorhergehend erstellten Beleuchtungen nochmals hinsichtlich Performance optimiert. Nach umfangreichen Versuchen quer zur Fahrtrichtung wurde aufgrund unzureichender Homogenität in der Ausleuchtung, auf eine Längsanordnung übergegangen. Der schmale spektrale Sensitivitätsbereich bei 940nm der eingesetzten Kameras kann so trotzdem optimal ausgenutzt werden, allerdings müssen so insgesamt sieben der entwickelten Leuchten eingesetzt werden. Abbildung 87 zeigt die Arbeiten beim Umbau der Beleuchtungseinrichtung am Fahrzeug.

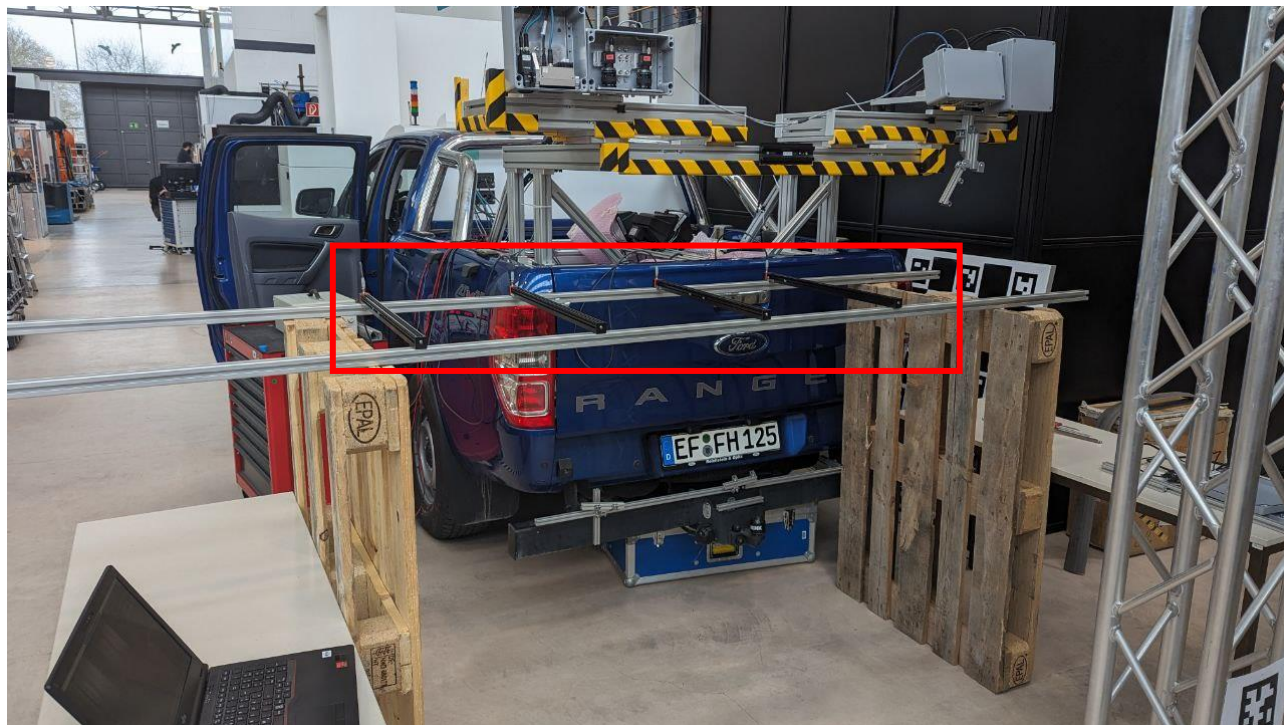


Abbildung 87: Umbau Beleuchtungseinrichtung von 4x1 quer auf 7x1 längs zur Fahrtrichtung.

Abbildung 88 zeigt den qualitativen Unterschied zwischen der Beleuchtungsanordnung quer und längs. Aktuell werden noch weitere Untersuchungen durchgeführt die ggf. die Sichtverdeckung (schwarzer Balken in Abbildung 88 rechts) umgehen indem eventuell der Abstand nochmals angepasst werden muss. Weiterhin wurde mit der Entwicklung eines speziellen Controllers begonnen der losgelöst von der Zentralsteuerung im Fahrzeug-inneren als Endstufe im hinteren Fahrzeugteil angebracht wird. Hintergrund der Überlegung ist die sehr hohe Blitzstromanforderung von ca. 10A sowie die für die Applikation hohe Anzahl an Blitzcontrollern (theoretisch 7 Stk.).



Abbildung 88: Ergebnisse Feldausleuchtung 4x1 (links), Feldausleuchtung 7x1 längs (rechts).

Neben den doch recht aufwendigen Weiterentwicklungen am Beleuchtungskonzept wurde zusätzlich in Abstimmung mit dem Projektpartner Zwerrenz an der Aufnahmevorrichtung für die Bildaufnahme gearbeitet. Die im letzten Bericht gezeigten Vorversuche mit dem Stereokamerasystem wurden in diesem Berichtsjahr auf eine solide Konstruktion gestellt. Insbesondere der Schutz vor Staub aber auch die Absicherung einer stabilen Stereobasis (geometrische Stabilität der Kameras zueinander) konnten erfolgreich umgesetzt werden.

In der Abbildung 89 ist die aktuelle hardwaretechnische Umsetzung gezeigt. Aktuell wird gemeinsam mit dem Projektpartner TU-Ilmenau an der Integration in das Gesamtsystem gearbeitet.

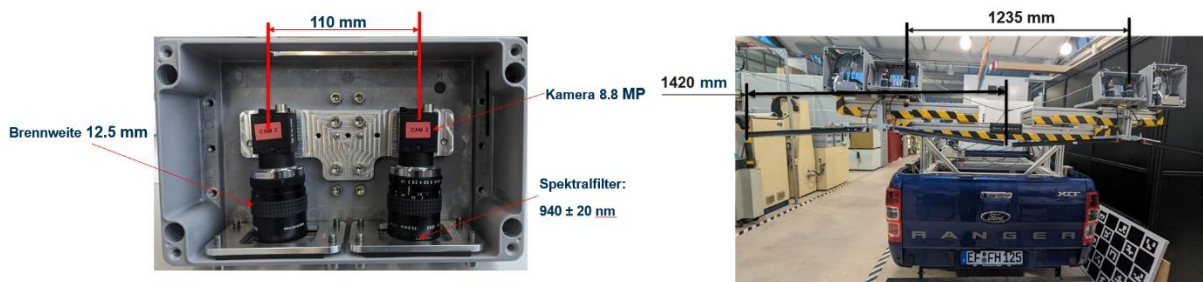


Abbildung 89: Systemtechnischer Aufbau Messsystem Wegkrone (links), Anbau des Systems am Transportfahrzeug (2x) (rechts).

Für die Evaluation des finalen Systems wurde mit der Kalibrierung des Systems im Hallenbereich der TU-Ilmenau begonnen. Hierfür wurde ein Testtarget mit Charucomarkern angefertigt und versucht, zunächst eine Kalibrierung des Systems durchzuführen. Prinzipiell funktionieren die Systeme. Es hat sich jedoch gezeigt, dass das gefertigte Kalibriertarget starke Reflektionen erzeugt, die zudem schädlich für den 3D-Matching Algorithmus sind. Dennoch konnte mit der Schiefstellung des Targets eine erste Kalibrierung am Fahrzeug durchgeführt werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 90 dargestellt.

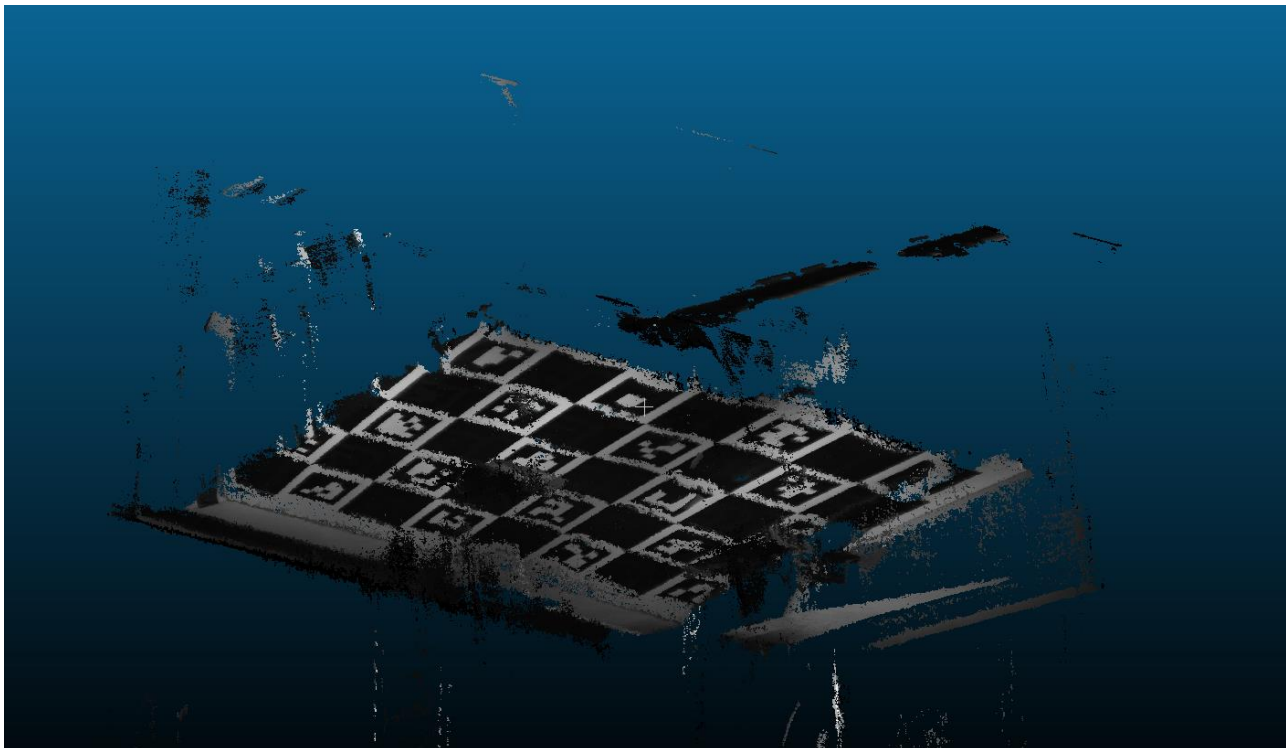


Abbildung 90: Auswertung Kalibrierung mit Charuco-Testmuster am Versuchsfahrzeug

Prinzipiell funktionieren die gewählten Verfahren. Zur Kalibrierung wird zukünftig ein entspiegeltes Target eingesetzt werden, wodurch sich zum einen die Stabilität der Kalibrierung und zum anderen die Anzahl der Artefakte verbessern sollten.

Fortwährend wurde weiter an der Entwicklung einer künstlichen Beleuchtung unter Berücksichtigung der Fremdlichtunterdrückung gearbeitet. Aufgrund der im Vorberichtszeitraum erreichten Ergebnisse sowie der geometrischen Anordnung wurde eine weitere Optimierung durchgeführt. Abbildung 91 zeigt die finale Variante am Fahrzeug. Aus Gründen der Praxistauglichkeit wurde die Variante Leiterraum verworfen.

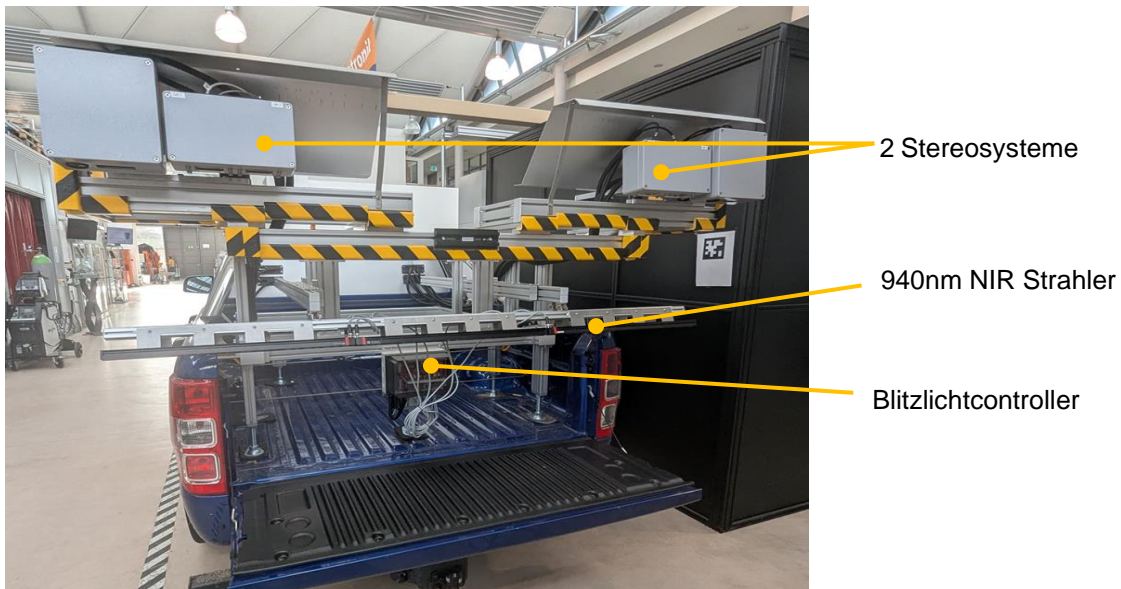


Abbildung 91: Finale Variante der Umsetzung im Teilvorhaben 5

In der Mitte der Abbildung 91 ist das Ergebnis der Spezialcontrollerentwicklung für die Lichtblitzerzeugung zu sehen. Insgesamt können hier acht Stabsegmente der NIR Strahler stromgeregelt mit 10A gespeist werden. Aufgrund der hohen EMV Belastung bei derartig hohen Stromanstiegsflanken wurde die Leistungselektronik in den hinteren Teil des Fahrzeugs gebracht um Störeffekte auf andere Geräte zu vermeiden. Angeschlossen an das zentrale Steuersystem ist der Blitzlichtcontroller zentral über eine Schnittstelle in den Innenraum von der die Parametrierung vorgenommen wird. Die Stereoaufnahmesysteme sind im oberen Teil links/rechts (siehe Abbildung 91) angebracht. Diese sind wetterfest abgeschirmt und auf die Wellenlänge der NIR Strahler abgestimmt. Aufgrund eines leichten Übersprechens, der finalen Fahrzeughöhe und anderer unvermeidbarer Hindernisse im Strahlengang der Bildaufnahme wird letztendlich eine Abtastbreite von 3m Breite mit einem Arbeitsbereich von 50cm mit einer Auflösung von 5mm erreicht. Die Datenagglomeration aller Systeme erfolgt in einem gemeinsam entwickelten proprietären Interface das in der folgenden Abbildung gezeigt ist.

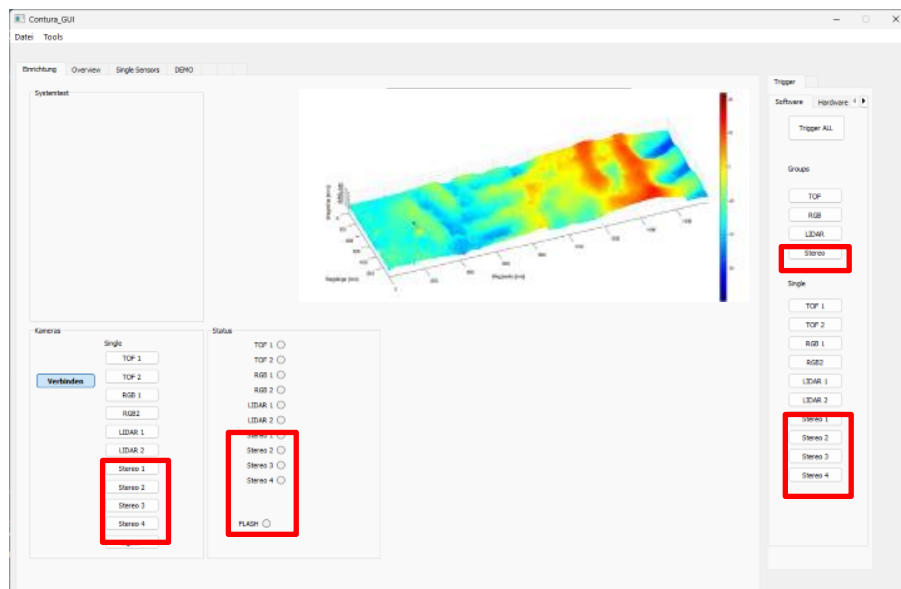


Abbildung 92: Steuerelemente Wegkronenmessung mit entwickelten 3D-Stereo.

Die roten Markierungen in der vorangegangenen Abbildung zeigen die Einstellungsmöglichkeiten des Wegkronenmesssystems im Betrieb. Ein zusätzliches Untermenü erlaubt die Konfiguration der einzelnen Sondereinstellungen. Im Mittenbereich des HMI Interface können sowohl einzelne Rohdaten als auch berechnete Tiefenkarten angezeigt werden. Aufgrund des hohen Datenaufkommens im Fahrbetrieb ist die Tiefenkartenanzeige nur begrenzt möglich. Die Berechnung der Profile erfolgt daher in einem Postprocessing.

Für die Evaluation des finalen Systems wurde erneut eine Kalibrierung des Systems im Hallenbereich der TU-Ilmenau aufgenommen. Die optimierte Variante der Beleuchtung Abbildung 93 führt gemeinsam mit einer

Optimierung der Kameraparameter zu den anvisierten Zielen des Projektes. Die folgende Abbildung zeigt eine rekonstruierte 3D Abbildung aus einem Testlauf. Zur prinzipiellen Bestimmung der Präzision des Messsystemes wurde eine fest verbaute Anhängervorrichtung als Referenzmarke benutzt und geometrisch bestimmt. Im Ergebnis zeigt sich eine Unsicherheit von ca. 5mm was im Anwendungsfall der Waldwegemessung als angemessen angesehen wird.

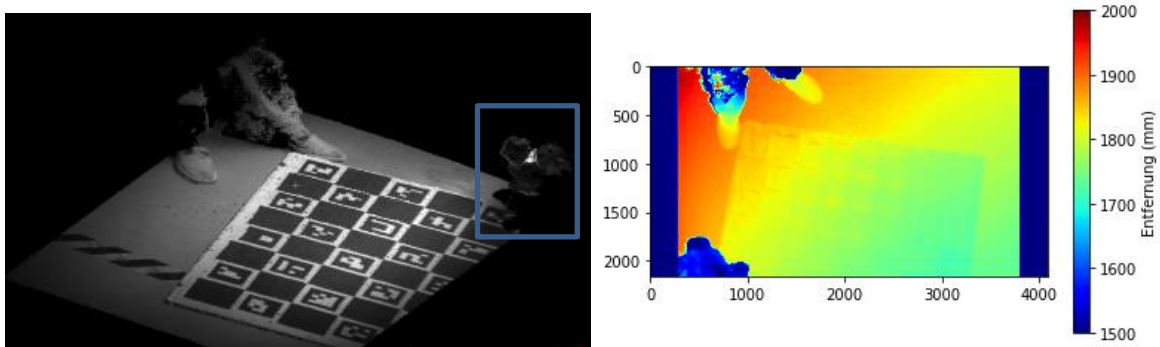


Abbildung 93: 3D-Repräsentation der Hallenbodenoberfläche, die blaue Markierung zeigt die Kugel der Anhängervorrichtung (links).

Erreicht wurden diese Ergebnisse nach mehreren Testserien die letztendlich zu einem Optimum in der Konfiguration des erarbeiteten 3D-Berechnungsmodul führten. Genutzt wird konkret ein SemiGlobal BlockMatching SGBM Mode2 (bedeutet 16 Suchrichtungen) wodurch die Abweichungen minimiert werden. Als Blockgröße wurde aus Gründen der Geschwindigkeit der Berechnung eine Blockgröße von 3x3 gewählt. Die durchgeführten Arbeiten insbesondere der langen Optimierungsphase der Beleuchtung als auch des Beleuchtungskontrollers führen zu stabilen Ergebnissen. Ebenfalls hat sich der Ansatz der infraroten Beleuchtung als wertvoll erwiesen. Abschließend wurden noch einige Versuche im Außeneinsatz durchgeführt. In der folgenden Abbildung 94 ist das Ergebnis einer markanten Stelle gezeigt.

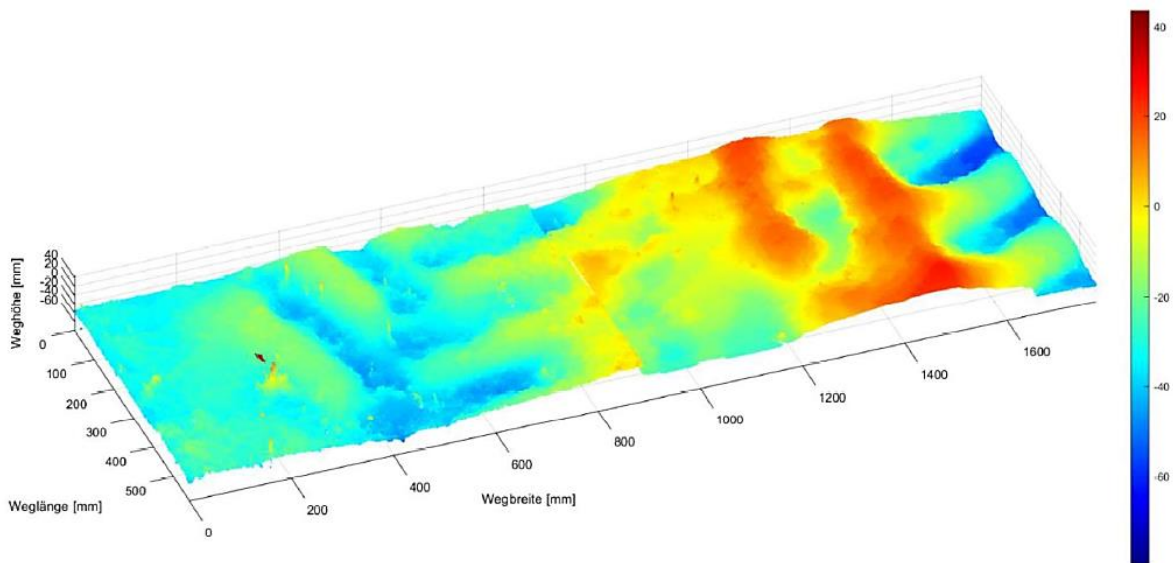


Abbildung 94: Markantes Beispielprofil in Form einer Harvesterspur Ausschnitt.

Die Abbildung zeigt nahezu den gesamten Höhenmessbereich. In der Breite wurden links und rechts noch Bereiche abgeschnitten. Auffällig ist eine hohe 3D-Punktedichte so das eine stabile Weiterverarbeitung durch KI-Techniken problemlos möglich ist. Im Mittenbereich ist noch ein kleiner Versatz erkennbar der noch algorithmisch korrigiert werden muss. Insgesamt ist die Messung der Wegkrone mit dem entwickelten Prototypen letztendlich sehr gut möglich. Auf der folgenden Seite sind die wesentlichen Parameter des Systems zusammengefasst.

## Arbeitspaket 12: Evaluation Gesamtdemonstrator

Die Evaluation des Gesamtdemonstrators erfolgte gemeinschaftlich mit den Projektpartnern.

### 3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Teilvorhaben 5 bearbeitete die 3D-Erfassung des Wegekörpers (Fahrbahn) auf Basis von Bildverarbeitungstechnologien. Insbesondere die Erfassung der natürlichen Oberflächen unter verschiedenen Umwelteinflüssen stellten einen hohen Forschungs- und Entwicklungsaufwand dar. Um die Komplexität der robusten 3D-Erfassung in stark veränderlichen Szenen (Sonneneinstrahlung, Schlagschatten..) zu minimieren, wurde nach Methoden gesucht, die die Außenfaktoren etwas bedämpfen. Hierfür wurde im Rahmen des Projektes eine spezielle Abstimmung aller Aufnahmekomponenten hinsichtlich des atmosphärischen Fensters der Sonne vorgenommen. Diese spezielle spektrale Eingrenzung empfiehlt sich vor allem in speziellen Absorptionsbanden von Wasser. Untersucht wurde im Projekt konkret die Absorptionslinie um 975nm und 1450nm. Aufgrund der hohen Systemkosten basierend auf InGaAs-Bildsensoren wurde das System für 975 nm konzipiert, da so größere Bildsensoren für deutlich geringere Kosten zum Einsatz kommen können. Die Größe der Bildsensoren spielt hierbei insbesondere in der Erfassungsbreite eine entscheidende Rolle. Auf Basis dieser Voruntersuchungen wurde ein spezielles Kameraaufnahmesystem entwickelt und prototypisch umgesetzt, das mit speziellen Spektralfiltern und Objektiven in ein wetterfestes Gehäuse integriert ist (Siehe Zwischenberichte und Endbericht). Neben der Untersuchung der Aufnahmesysteme wurden Untersuchungen auch im Bereich der Bestrahlungstechnologien durchgeführt, um eine gute Ausleuchtung der Abtastfläche zu erreichen. Hierfür wurden verschiedene geometrische Anordnungen untersucht und letztendlich eine optimale Anordnung aus 8 Strahlern umgesetzt. Die Strahler selbst wurden ebenfalls im Projekt entwickelt und als Prototypen hergestellt. Für die aufgebaute Bestrahlungstechnik ist es ebenfalls notwendig gewesen, eine geeignete Ansteuerung zu entwickeln. Hierfür wurde ein spezieller Controller entwickelt der acht Strahler gleichzeitig ansteuern kann und pro Kanal bis zu 10A Blitzstrom zur Verfügung stellt. Insbesondere die hohe Stromanstiegsgeschwindigkeit und die achtfach-Ansteuerung sind aktuell ein Alleinstellungsmerkmal der durchgeführten Entwicklung. Nach dem Abschluss der Erforschung und Umsetzung der Systemtechnik wurden Technologien untersucht und entwickelt, die eine hohe Punktedichte in den zu berechnenden 3D-Bildern sicherstellt. Hierfür wurden sowohl Untersuchungen hinsichtlich der Parallelisierbarkeit als auch der Blockgrößen und Blockmatching-Verfahren durchgeführt. Am Ende konnte ein semiglobales Blockmatching mit der Boxgröße3 als optimale Variante entwickelt werden. Aufgrund des hohen Datenaufkommens beim Fahrbetrieb wird ein Postprocessing-Verfahren für die 3D-Profilberechnung als sinnvoll erachtet.

Insgesamt wurden im Teilprojekt alle Teilziele erreicht und im Rahmen eines Demonstrators umgesetzt. Die folgende Tabelle fasst nochmal die wichtigsten Parameter zusammen.

#### Übersicht relevanter Parameter des 3D-Messsystems für die Erfassung des Wegekörpers

Komponenten 3D-Messsystem Wegkrone	Parameter
Beleuchtung	8x Wellenlänge 940nm
Blitzlichtcontroller	8 kanalig 10A/Kanal minimale Belichtungszeit 1µs
Kamerasystem	2x2 8.8 MP Kamera mit erhöhter Empfindlichkeit 940nm
Optik	Spezialobjektiv mit Spektralfilter 975nm
3D-Berechnung	SGBM 3x3 Box mit 16-fach Direktion
Messbreite	3m
Messbereich	+/- 0,25m
Empirische Messunsicherheit	5mm

Neben den hier dargestellten Ergebnissen konnten während der Bearbeitung zwei Bachelorarbeiten und eine Masterarbeit gemeinsam mit der TU-Ilmenau betreut werden. Diese Form der Ergebnisse ist ebenso wertvoll für das Unternehmen, da so Humankapital für die Region erzeugt werden konnte

## **Teilvorhaben 6: 2220NR061F**

### **1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens**

Ziel des Teilvorhabens ist die Entwicklung einer digitalen Dokumentation der erhobenen Wegezustände, Mitwirken bei der Erstellung einer Schadensklassifizierung, Qualitätskontrolle generierter Daten und Einbinden dieser in bestehende NavLog-Systeme.

### **2. Bearbeitete Arbeitspakete**

#### **Arbeitspaket 01: Gesamtkonzeption des CONTURA Mess- und Auswertesystems**

Initiierungsprozess wurde durch Kickoff-Veranstaltung an der TU Ilmenau am 09.11.2021 erfolgreich durchlaufen. Es erfolgte ein Austausch über bisherige Erfahrungen, gängige Praktiken und technischen Spezifikationen sowie eine Abstimmung zwischen den Akteuren bezüglich der gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen den AP. Eine intensive Abstimmung für die gemeinsamen AP der FHE und NavLog erfolgte bilateral, insbesondere im Webmeeting am 14.12.21 und im Rahmen der Jahressitzung des KWF Arbeitsausschuss Waldwegebau am 11./12.11.21 im Harz. Zuständigkeiten wurden fixiert und Ziele terminiert. Zudem wurde das Projekt vor dem Arbeitsausschuss vorgestellt und der Grundstein zur weiteren Kooperation gelegt. Diese wurde im Intelliway-Workshop des KWF am 12./13.01.2022 begonnen, bei welchem ein erster Austausch zwischen Praktikern des Waldwegebbaus und Messtechnikern des Projektes CONTURA einen deutlichen Erkenntnisgewinn gegenüber den benötigten Grundlagen und -auslegungen erbrachte.

#### **Arbeitspaket 02: Entwicklung Planungstool**

Der oben genannte Workshop bot zudem die erste Gelegenheit, die Praktikabilität von Vorüberlegungen über Darstellungsvarianten mit einer potentiellen Nutzergruppe abzuprüfen. Wesentlich von Bedeutung ist die Abstimmung auf getrennte, feingliedrige Erfassung von Zuständen der räumlichen Komponenten (Weg/Graben/Lichtraumprofil) mit farblichen Skalen. Dabei könnte eine Darstellung von Graben- und Lichtraumprofilstatus als mehrfache Ringpuffer um die Wegegeometrie erfolgen. Die Darstellung des Wegezustandes soll bei größerem Maßstab weniger feingliedrig zusammenfassend dargestellt werden. Es ist noch offen, wie dies statistisch sinnvoll umzusetzen ist. Denkbar ist zum Beispiel die Nutzung von Modus oder Median der vorhandenen Klassen innerhalb eines Abschnittes. Die ermittelten Ansprüche der Praktiker an das Gesamtsystem bestimmen die Festlegungen hinsichtlich des Datenstandards, der Datenerfassung und deren Speicherung (AP 10). Dies betrifft insbesondere Schlaglöcher, die nicht als gesonderte Punktobjekte, sondern in Form eines linearen Abschnittes mit eigener Klassenstufe gespeichert werden müssen.

#### **Arbeitspaket 03: Entwicklung eines Parametersystems für die KI**

Es erfolgte eine Einarbeitung in methodische Richtlinien über den ländlichen Wegebau und die umfassende Recherche bisher bestehender Methoden zur klassifizierten Beurteilung der Fahrraumkomponenten. Hier wurde sehr eng mit dem FNR geförderten Projekt Intelliway – Teilvorhaben 5, bearbeitet vom Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V., und dem KWF Arbeitsausschuss Waldwegebau zusammengearbeitet. Laserscans von verschiedenen Wegezuständen wurden mit einem projektfinanzierten Iphone 12 aufgenommen und daraus im Anschluss Profilschnitte entlang der Wegeachse erstellt. Dabei konnten 4 verschiedene Schadklassen voneinander abgetrennt werden. Im Rahmen eines Workshops wurden diese Wege durch Fachexperten vor Ort hinsichtlich der Schadstufe und der erforderlichen Maßnahme eingeschätzt. Diese Erkenntnisse wurden in Form eines Bestimmungsschlüssels systematisch festgehalten, welcher zur Herleitung einer entsprechenden Zustandsklasse dient. In diesem Projekt wird eine KI den Bestimmungsschlüssel ersetzen und eigenständig die Klassen erkennen, welche nun das Fundament für das digitale Abbild des Waldweges in den Planungstools (AP 2) darstellen. Aus den Darlegungen des Expertenkreises über die Beurteilung des Lichtraumprofils wurde eine Systematik abgeleitet. Diese ist bisher noch nicht in Form einer datentechnischen Umsetzung abschließend fixiert.

#### **Arbeitspaket 10: Entwicklung Auswertesoftware Wegezustand**

Erkenntnisse aus AP 2 und AP 3 dienten zur Skizzierung der Grundzüge eines geeigneten Datenmodells, welches das lineare Referenzieren von Zustandsdaten erlaubt. Dies erfordert eine intensive Umstrukturierung des bestehenden Systems und auch der bisherigen datentechnischen Festlegungen. Im weiteren Projektverlauf wird dies die größte Aufmerksamkeit erfordern.

Mit Projektstand zum Ende des vergangenen Berichtszeitraumes wurden Grundlagen zur Definition eines geeigneten Datenmodells vorgenommen und unter dem unter dem Arbeitstitel *ShapeForst 4.0* als Entwurf einer offiziellen Weiterentwicklung festgehalten. In Folge einer ersten Abstimmung im forstlichen Beirat der NavLog am 20.10.2022, welchem Lieferanten von Waldwegedaten aus allen Bundesländern angehörig sind, wurde durch die NavLog eine von den Datenlieferanten unabhängige Weiterentwicklung bestehender Standards und Systeme speziell im Rahmen des Projektes CONTURA beschlossen. *ShapeForst 4.0* wurde somit zum Arbeitstitel eines Konzeptes zur Erstellung eines Prototypensystems und somit freier überarbeitet,

umstrukturiert und neu ausgelegt. Die darin befindlichen Inhalte verfestigten sich durch einen iterativen Prozess aus der praktischen Umsetzung bei der Datenbankentwicklung sowie des Benutzerinterface innerhalb eines dafür ausgelegten Testsettings und dem Rückfluss der praktischen Erkenntnisse in diese Dokumentation. In diesem Zuge wurde die bis dato verwendete lokale Testumgebung durch eine speziell aufgebaute Serverinfrastruktur ersetzt, die einen geschützten Onlinezugriff per Datenbankverbindungen und auf einen HTTP-basierenden Webclient bietet. Der Aufbau dieser Infrastruktur erfolgte auf einer durch das Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. bereitgestellten Hardware. Die bereits auf der ursprünglichen Testdatenbank prototypisch konfigurierte PostgREST-Schnittstelle, wurde für den verschlüsselten und gesicherteren Empfang und Abruf von Daten zwischen externen Ressourcen und der Serverinstanz weiterentwickelt. Ebenso die Historienfunktion, die alle geometrischen Änderungen und Löschungen innerhalb des Wegenetzes und aller Punktobjekte protokolliert.

### **Arbeitspaket 12: Evaluation Gesamtdemonstrator**

Während einer erneuten Zusammenkunft des forstlichen Beirates am 05.12.2023 wurde die Erfassung und Weitergabe von Wegezustandswerten erneut thematisiert und diskutiert. Zwischenzeitlich wurde ein ursprünglich von der NavLog entwickelter Entwurf zur standardisierten Datenhaltung von Dritten unabhängig abgewandelt. Für interne Systeme der NavLog sind diese Vorgaben keine praktikable Lösung, weshalb angestrebt wird unterschiedliche externe Quelldaten durch die Programmierung eine Datenimportkonvertierung entsprechend zu homogenisieren. Festlegungen der NavLog wurde aus dem Entwurf des *ShapeForst 4.0* herausgelöst und in einer eigenen, neuen Spezifikation *Erweiterung Format ShapeForst - Monitoring und Instandhaltung der Wegeinfrastruktur (ShapeForst MI – Version 0.1)* fortgeführt. Eine Umsetzung in Form eines Live-Systems wird nun angestrebt.

### **3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

Ein Initiierungsprozess wurde im Rahmen einer Kickoff-Veranstaltung an der TU Ilmenau am 09.11.2021 erfolgreich durchlaufen. Es erfolgte ein Austausch über bisherige Erfahrungen, gängige Praktiken und technischen Spezifikationen sowie eine Abstimmung zwischen den Akteuren bezüglich der gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen den AP. Eine intensive Abstimmung für die gemeinsamen AP der FHE und NavLog erfolgte bilateral, insbesondere im Webmeeting am 14.12.21 und im Rahmen der Jahressitzung des KWF Arbeitsausschuss Waldwegebau am 11./12.11.21 im Harz. Zuständigkeiten wurden fixiert und Ziele terminiert. Zudem wurde das Projekt vor dem Arbeitsausschuss vorgestellt und der Grundstein zur weiteren Kooperation gelegt. Diese wurde in einem Workshop des Projektes Intelliway im Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (KWF) in Groß-Umstadt am 12./13.01.2022 aufgenommen. Diese Fachveranstaltung bildete den Rahmen für einen ersten Austausch zwischen Praktikern des Waldwegebbaus mit den Messtechnikern des Projektes CONTURA und mündete in einem deutlichen Erkenntnisgewinn über die benötigten Grundlagen und -auslegungen des zu entwickelnden Gesamtsystem bezüglich der erforderlichen Eigenschaften des Fahrzeugaufbaus, der benötigten Sensorik und der zur Prozessierung erforderlichen Hardware.

Das Projekt CONTURA setzte die ersten Grundgedanken und Vorstellungen des Workshops um, welche die Basis zur weiteren Entwicklung bildeten. Die NavLog übernahm die Koordination der Zusammenarbeit mit dem KWF zur Festlegung von Zustandsklassen von Fahrbahn, Gräben sowie Lichtraumprofil und erarbeitete daraufhin ein entsprechendes Datenschema, welches erstmalig zur Generierung von Datensätzen für die digitale Dokumentation genutzt wurde. Die gemeinsame Arbeit mündete in der Veröffentlichung durch das KWF in Form des Merkblattes Nr. 26 über die Einstufung von Waldwegezuständen. Diese ist unter [www.kwf-online.de](http://www.kwf-online.de) unter Broschüren kostenfrei und für jedermann zugänglich. Als wesentliches Ergebnis wurden 4 Zustandsstufen der Fahrbahn bzw. des Wegekörpers von einander abgegrenzt, sowie ein Schlaglochindex bestimmt. Dieser gilt nur für die Wegezustandsstufe 2 und beinhaltet 4 Intensitäten. Wegezustand 1 erlaubt keine Schlaglöcher, Wegezustandsstufe 3 unterliegt bereits solch intensiven Verschleißerscheinungen, dass eine alleinige Schlaglochreparatur bereits als obsolet anzusehen ist. Diese Intensitätsstufen wurden im Projekt CONTURA angewendet. Im späteren Projektverlauf wurde im Rahmen einer Sitzung des KWF-Arbeitsausschusses für Waldwegebau entschieden, dass eine räumlich zugeordnete Erfassung nicht erforderlich sei und stattdessen Wegezustandsklassen mit einer maximalen Anzahl von erlaubten Schlaglöchern zu spezifizieren sind. Die NavLog hält an der Möglichkeit fest, Schlaglöcher erfassen zu können und hat diese auch im Entwurf einer Ergänzungsspezifikation „Shape<sup>Forst</sup> – Monitoring und Instandhaltung der Wegeinfrastruktur“ („Shape<sup>Forst</sup> MI“) festgehalten, da dies für eine Kostenkalkulation und insbesondere der Festlegung präventiver Unterhaltsmaßnahmen unverzichtbare Informationen sind. Auch wird die NavLog nicht auf die erweiterte Erfassung der zugrundeliegenden Bauart des Weges verzichten, ohne welche ebenfalls keine fundierte Maßnahmenplanung möglich ist.

Zur Evaluation der konzeptionellen Festlegung wurde eine Testumgebung eingerichtet und eine Weboberfläche bereitgestellt, die eine entsprechende Visualisierung von erstellten Testdaten ermöglichte. Dazu wurde es jedoch ebenfalls erforderlich, entsprechend des zuvor in AP 10.1 erarbeiteten Datenmodells eine prototypische Datenbank zu programmieren. Zur Umsetzung dieses Vorhabens wurde ein Webserver durch das KWF bereitgestellt, auf welchem durch die NavLog eigens für das Projekt CONTURA eine

vollständige Infrastruktur aufgebaut wurde, welche von den bestehenden NavLog-Systemen entkoppelt und grundsätzlich neu gedacht wurde. Dabei konnten bedeutenden Erkenntnisse über Nutzung von neuartiger und kostenfreier Software für den Betrieb gewonnen werden.

Ziel war es ein Werkzeug zur weiteren Nutzung der durch das System CONTURA erhobenen Daten bereitzustellen, welches dazu dient Entscheidungsprozesse in den Bereichen Logistik und Wegeinstandhaltung zu unterstützen. Dies wurde in Form einer kartographischen Anwendung erreicht, in welcher mit Hilfe ergänzender statistischer Diagramme Informationen über die Fahrbahnbedingungen abgerufen werden konnten. Der innerhalb des AP 1.1 durchgeführte Workshop bot zudem die Gelegenheit, die Praktikabilität von Vorüberlegungen über Darstellungsvarianten gegenüber einer potentiellen Nutzergruppe abzuprüfen. Von wesentlicher Bedeutung wurde die getrennte, feingliedrige Erfassung von Zuständen der räumlichen Komponenten (Weg/Graben/Lichttraumprofil) und deren Darstellung anhand farblicher Skalen erachtet. Diese gliedern sich entsprechend der im KWF-Merkblatt Nr. 26 zur Waldwegzustandsklassifizierung festgelegten Zustands- und Schadklassen von Waldwegen resp. Gräben. Zusammenhängende Waldwegeteile einer Zustandsklasse werden zusammengefasst dargestellt und deren Anteil an der Gesamtstrecke eines Weges numerisch aufgezeigt (Abbildung 95).

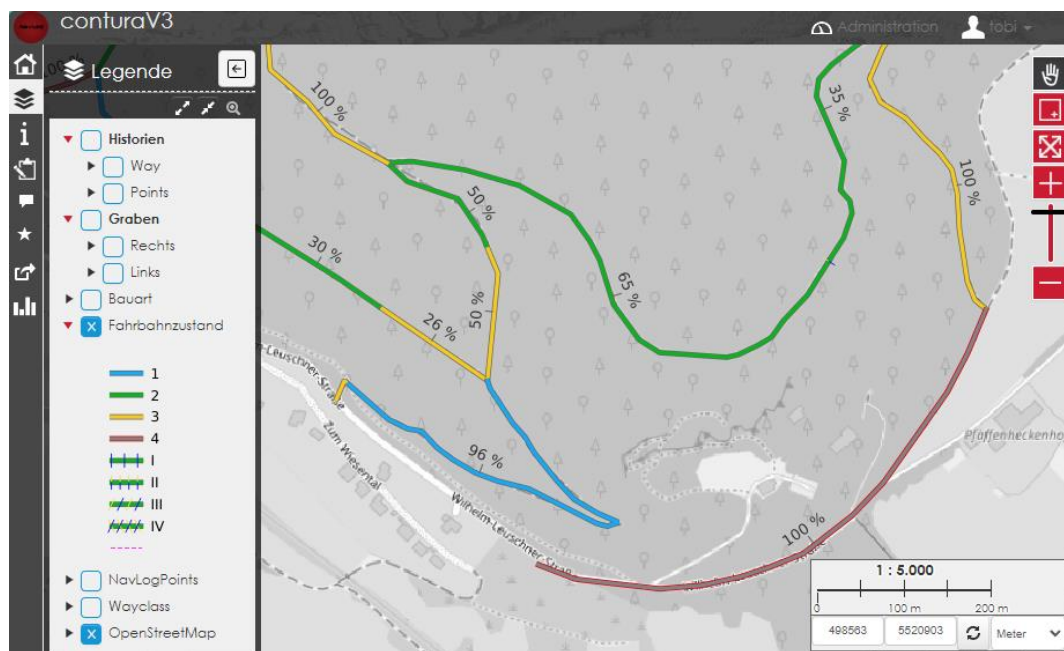


Abbildung 95: Wegezustände werden kartographisch klassifiziert dargestellt. Einer Klasse zugeordnete und räumlich zusammenhängende Abschnitte werden zusammengefasst und mit deren Anteil an der Gesamtlänge des Weges beschriftet.

Die verwendete Farbgebung ist nicht standardisiert. Folgende Werte wurden durch das Projektkonsortium und konsultierte Praktiker als konnotativ bewertet und unter dem Gesichtspunkt der Barrierefreiheit evaluiert und festgelegt:

Tabelle 3: Verwendete Farben und deren RGB-Werte nach Wegezustandsklassen.

Zustand	Linie	RGB	Rand	RGB
1		27/167/239		164/164/164
2		16/178/35		164/164/164
3		243/202/40		164/164/164
4		131/131/131		198/36/44

Zur Entscheidungsfindung und Information der Fahrbahnzustände innerhalb des Untersuchungsgebietes ist eine deskriptive Statistik erforderlich, welche in Form verschiedener Diagramme realisiert wurde. Die insgesamt vorkommenden Lauflänge der Wege im Forstbetrieb nach Zustandsklasse und die Verteilung der Abschnittlängen innerhalb einer Zustandsklasse sowie deren Anzahl, sind die wichtigsten Fragen die sich an ein Monitoringwerkzeug stellen und werden durch Kuchendiagramme (Abbildung 96) und Boxplots (Abbildung 97) beantwortet.

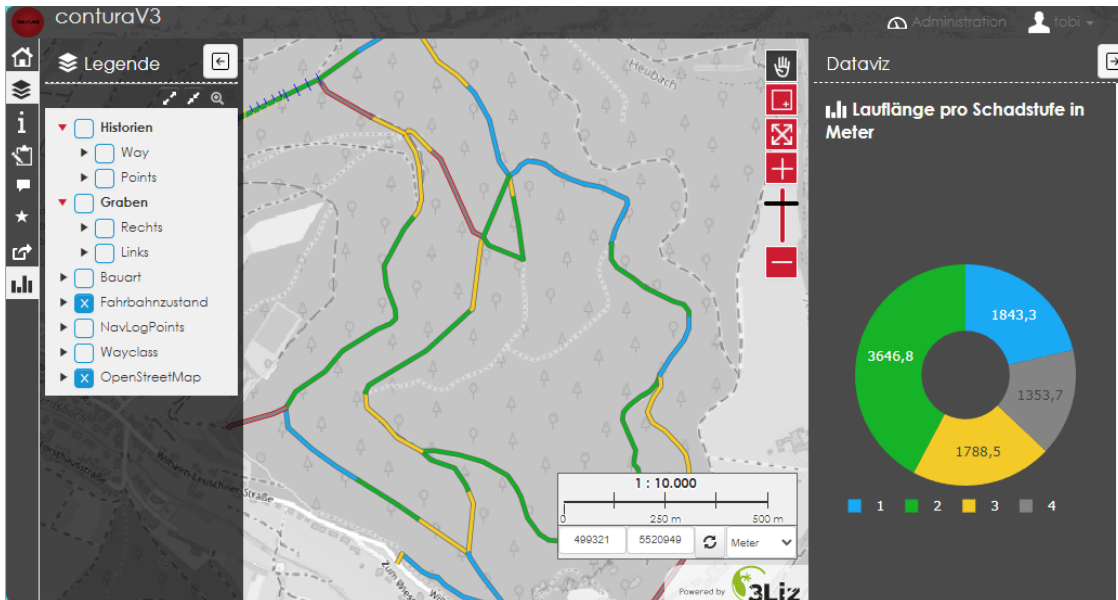


Abbildung 96: Die Frage nach der Lauflänge je Zustandsklasse ist eine der wichtigsten im Forstbetrieb

Die Befahrbarkeit von Forstwegen ist bereits durch die NavLog-Wegeklassen festgelegt. Im Rahmen des Projektes wurde durch Expertenbefragungen evaluiert, ob die Entscheidung zur Befahrung zum Zweck des Holztransportes zusätzlich anhand des Wegezustandes beurteilt werden soll. Dieses Vorgehen wurde abgelehnt, da Routenalgorithmus die Nutzung von Sekundärserschließung vorziehen würden, wenn der Zustand der Primärserschließung schlecht ist. Dies spricht jedoch gegen den Grundsatz des Waldwegebaus, welche von einer Konzentration des Hauptverkehrsstromes auf zentrale Verbindungen ausgeht und diese entsprechend der zu erwartenden Belastung physisch stärker auslegt und dort Mittel investiert.

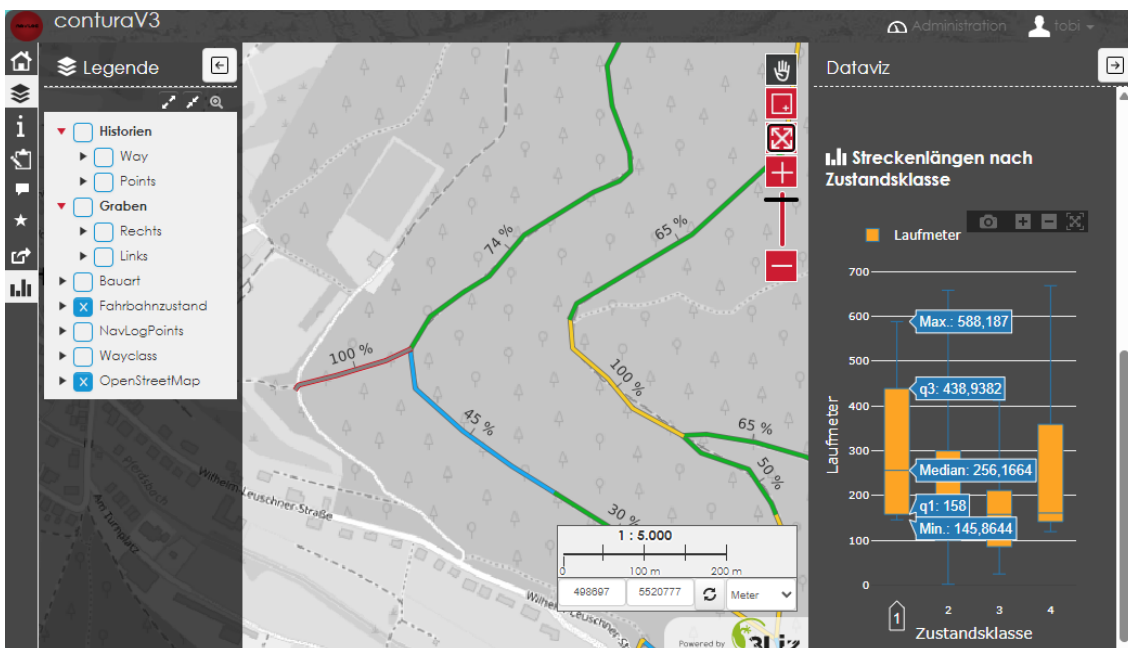


Abbildung 97: Statistische Diagramme geben Auskunft darüber, wie lange die Wegabschnitte einer Zustandsklasse im Forstbetrieb sind. In dieser Abbildung erfolgt dies anhand eines Boxplots.

Für jegliche Planung von Instandsetzungsmaßnahmen ist das Wissen über die Bauart fundamental. Das System CONTURA unterscheidet in die mit versiegelter Oberfläche versehenen Wege in Asphalt und Betonplatten bzw. in bindemittelfreie Wege. Diese werden zusätzlich nach deren Deckmaterial differenziert (Schotter oder Feinschicht). Entsprechend Tabelle 4 wird die NavLog in Zukunft eine Unterteilung in folgende Bauarten in ihren Standard aufnehmen.

Tabelle 4: Übersicht der Wegebauarten. Diese werden nach Abschluss des Projektes im NavLog-System erfasst werden können.

#	Bauart
1	1 Bindemittelfrei
2	Hydraulisch gebundene Tragdeckschicht/Deckschicht (Zement o.Ä.)
3	Asphaltdeckschicht
4	Befestigungen mit Pflastern aus Beton
5	Befestigungen mit Platten aus Beton
6	Betondecke
7	Naturfest

Die Darstellung des Grabenstatus wurde ohne räumliche Überlagerung mit den Wegen ermöglicht, damit dem Betrachter diese Information in Ergänzung zu den Wegezuständen präsentiert wird, was zur Beurteilung einer Gesamtsituation dienlich ist und Maßnahmen kombiniert planbar werden. Dieser Anspruch wird mit einer Visualisierung als Ringpuffer um die Wegegeometrie erfüllt (Abbildung 98).

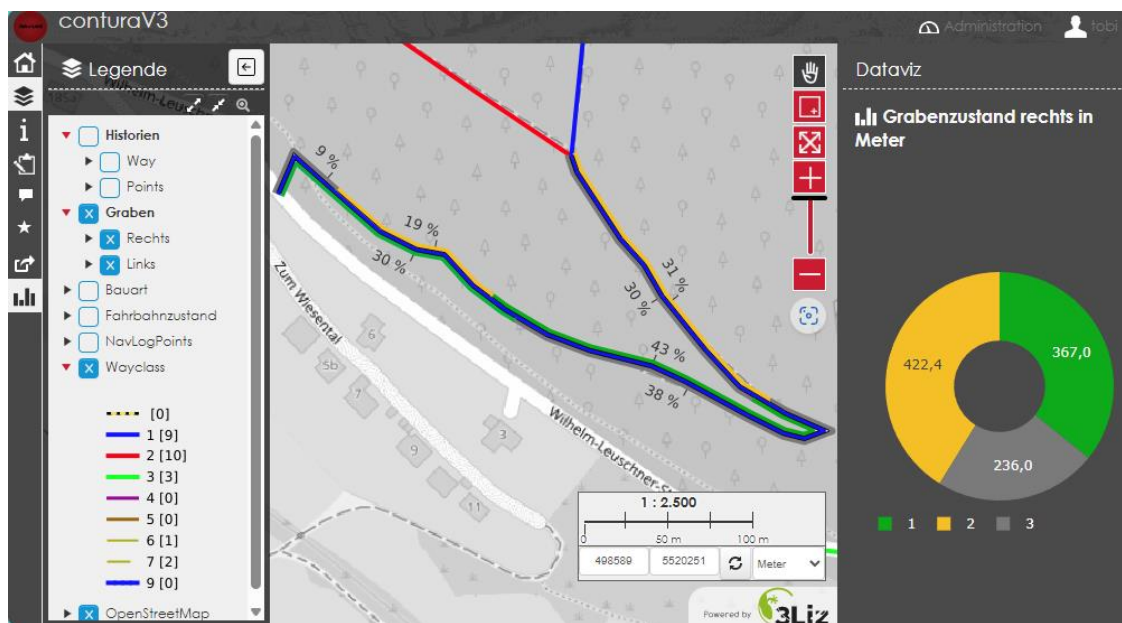


Abbildung 98: Grabenzustände werden ebenfalls in den Klassen des KWF-Standards angezeigt und deren Anteil an der Gesamtlänge des Weges aufgezeigt. In dieser Abbildung sind die eigentlichen Wege in den Farben der NavLog-Wegeklassen dargestellt (Wegeklasse 1 in blau). Einer dieser Wege besitzt Grabenzustandswerte rechts und links, welche begleitend aufgezeigt werden. So ist es möglich statt der Wegeklasse z.B. die Bauart oder den Zustand darzustellen.

Die ermittelten Ansprüche der Praktiker des Waldwegebaus an das Gesamtsystem bestimmten die Festlegungen hinsichtlich des Datenstandards, der Datenerfassung und deren Speicherung, wie sie für das AP 10 festzulegen waren. Insbesondere betraf dies Schlaglöcher, welche nicht als gesonderte Punktobjekte, sondern in Form eines linearen Abschnittes mit eigener Klassenstufe gespeichert werden. Dies ermöglicht es, Schlaglochfelder als betroffenen Wegeabschnitt aufzunehmen (Abbildung 99).



Abbildung 99: Von Schlaglöchern betroffene Wegeabschnitte werden entsprechend der Intensität mit unterschiedlichen Schraffuren gekennzeichnet.

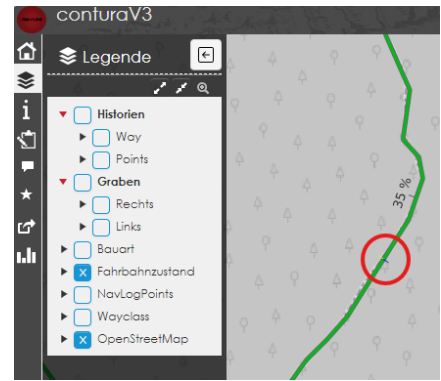


Abbildung 100: Einzelne Schlaglöcher werden durch Spikes in der Karte symbolisiert (s. roter Kreis).

Das Auftreten eines einzelnen Schlagloches wurde als Wegabschnitt mit einer Länge von einem Meter in den Daten abgelegt und durch ein Spike entlang des Wegeverlaufs dargestellt (Abbildung 100). Dies ermöglicht die Steuerung gezielter Einzelmaßnahmen zur Instandsetzung.

Jegliche im Projekt genutzte Software (Betriebssystem, Datenbank, Webserver, Webclient, Desktop-GIS) ist kostenfrei nutzbar. Die Software Webclientanwendung Lizmap des französischen Anbieters 3Liz wurde als Basis zur weiteren Entwicklung genutzt, da Open-Source die Möglichkeit zur individuellen Weiterentwicklung eröffnete, welche auch mit Sicht auf spezielle Funktionen zur Kostenberechnung der Wegeinstandhaltung als großer Vorteil angesehen wurde. Leider konnte die angedachte Softwareerweiterung zur Kostenkalkulation aus personellen und organisatorischen Gründen innerhalb der Projektlaufzeit nicht wie geplant umgesetzt werden.

Die AP 3.1 und AP 3.2 wurden im PM vorgezogen, da diese die Bestimmung grundlegender Festlegungen zum Inhalt hatten, welche Voraussetzung für sämtliche Projektaufgaben waren. Dies betraf ganz wesentlich eine Definition von Zustandsbeschreibungen und Schadklassen der zu beurteilenden Wegebauwerke, Gräben und den Fahrraum einschränkende Vegetation.

Eine Klassifikation typischer Lichtraumprofile konnte nicht allgemeingültig festgehalten werden. Durch Literaturrecherchen und Experteninterviews wurde Fachwissen konzentriert um Messwerte des Systems CONTURA einer plausiblen Systematik einzuordnen. Nach Evaluation innerhalb des Expertenkreises wurde zur Beurteilung des Lichtraumprofils auf Klassen verzichtet und die folgende Systematik etabliert.

Das System ist in der Lage Distanzen zu umgebenden Objekten zu messen. Diese Messwerte können einerseits für die Limitierung einer schadenfreien Fahrt ausgewertet werden oder zur Bestimmung eines Status der Pflegebedürftigkeit. Grundsätzlich müssen Messwerte räumlich separiert werden, da sich Einschränkungen zur Befahrung als auch die Maßnahmen zur Pflege danach unterscheiden, ob sich das Hindernis neben oder über der Fahrbahn befinden. Aus diesem Grund wurde ein Korridor festgelegt, welcher der Breite der Fahrbahn entspricht. In diesem werden ausschließlich Höhenwerte über der Oberfläche gemessen (roter Bereich in Abbildung 102). In Relation zur Fahrbahnkante werden die Abstände von Objekten bis in eine Höhe von 4,50m Höhe bestimmt (roter Bereich in Abbildung 101). Falls dieses in die Fahrbahn ragt, ist die Distanz negativ. Alle Messwerte werden mit Dezimetergenauigkeit bestimmt bzw. auf diese gerundet abgelegt. Die Kenntnis über die Höhe der Objekte ist grundlegend um eine Entscheidung hinsichtlich des erforderlichen Pflegeverfahrens zu treffen und dessen Kosten zur Durchführung zu kalkulieren – z.B. Hochentaster vs. Mulcher. Neben Messwerten ist die Angabe von Wildcards (99, -99) möglich um pauschale Uneingeschränktheit (99 - „unendlich“) oder Eingeschränktheit (-99, falls Schätzung statt Messwert) anzugeben.

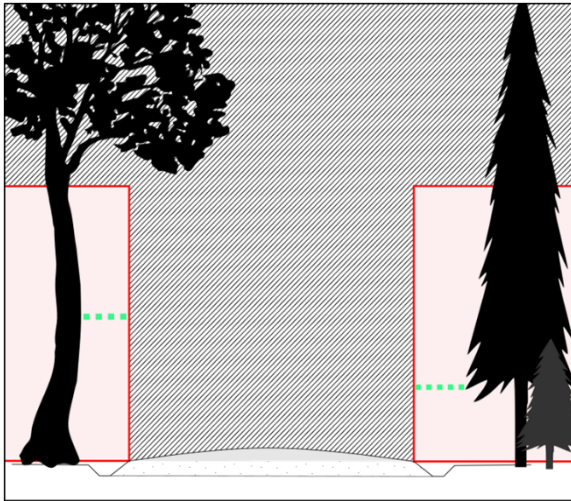


Abbildung 101: Lichte Breite beinhaltet die geringste Distanz zu einem Objekt relativ zur Fahrbahnkante. Es wird nicht zwischen links und rechts unterschieden.

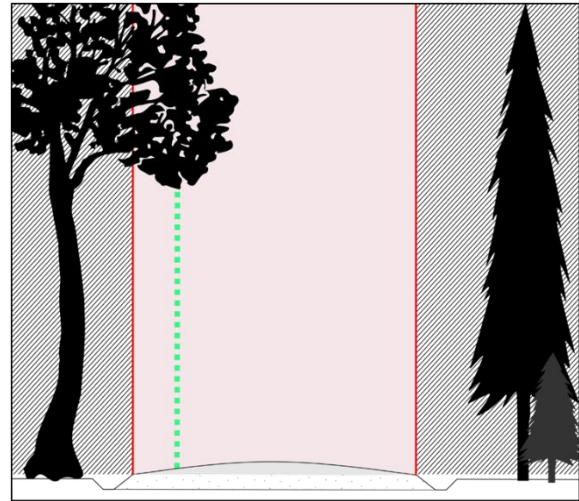


Abbildung 102: Lichte Höhe entspricht der kürzesten Distanz zu einem Objekt über der Fahrbahn.

Es erfolgte eine Einarbeitung in methodische Richtlinien über den ländlichen Wegebau und die umfassende Recherche bisher bestehender Methoden zur klassifizierten Beurteilung der Fahrraumkomponenten. Hier wurde sehr eng mit dem FNR geförderten Projekt Intelliway – Teilvorhaben 5, bearbeitet vom Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V., und dem KWF Arbeitsausschuss Waldwegebau zusammengearbeitet. Die NavLog fertigte Laserscans von verschiedenen Wegezuständen mit einem projektfinanzierten Iphone 12 und der Software Metascan an, aus welchen im Anschluss zuerst Oberflächenmodelle und aus diesen Profilschnitte entlang der Wegeachse abgeleitet wurden. Um die Orte der Aufnahmen und Metadaten festzuhalten, wurde eine einfache mobiles GIS-Anwendung erstellt. Ziel war es, diese Fundstellen mit dem System CONTURA im Projektverlauf erneut zu erfassen sowie die vorgefundenen Verschleißstadien durch den Arbeitsausschuss für Waldwegebau bewerten zu lassen. Abbildung 103 zeigt ein Beispiel die Programmansicht in Fugroviewer. Oben ist das Wegprofil an der Stelle des Schlaglochs (an der Schnittebene in hellblau unten rechts) ersichtlich.

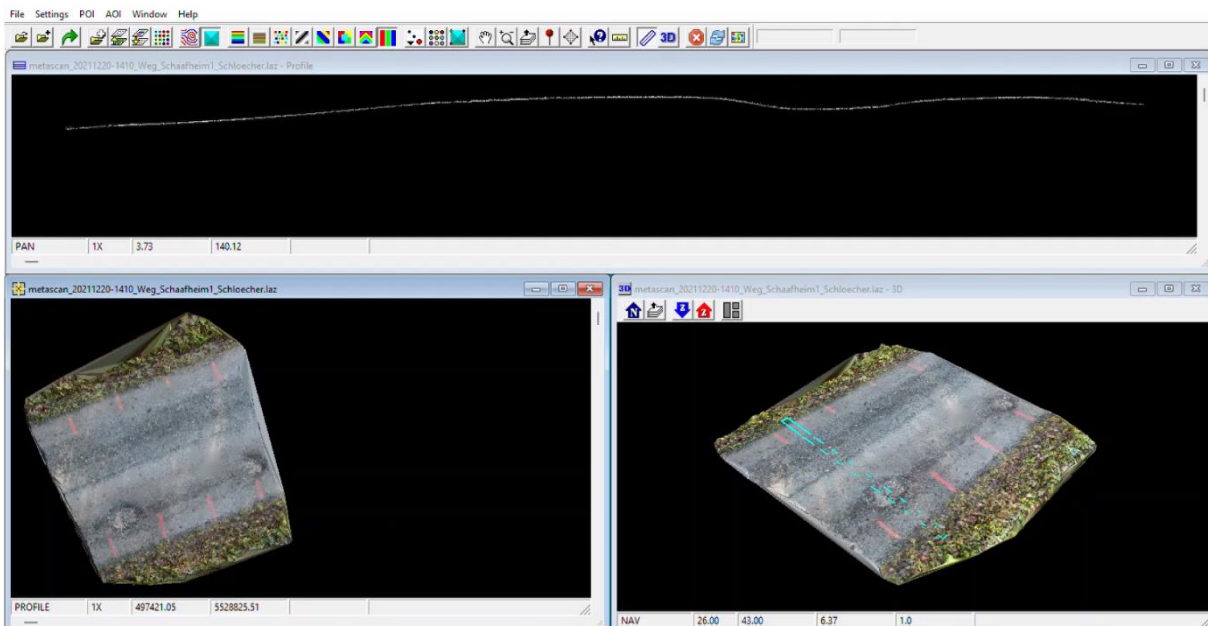


Abbildung 103: Aus Laserscanpunktwolken wurden Oberflächenmodelle gefertigt und aus diesen Schnittprofile erstellt.

An dieser Stelle kam es zur Erkenntnis, dass die ursprüngliche Idee der Bewertung von Profilschnitten nicht ausreichend ist um im Projekt CONTURA die Fahrbahnbeschaffenheit hinlänglich genau zu bestimmen. Abbildung 104 zeigt einen Profilschnitt über 50 cm entlang des Weges und verdeutlicht, dass eine Abgrenzung eines Schlaglochs (ein eigentlich als diskret empfundenes Objekt) von einer Spurrinne nur dann gelingen kann, wenn das weitere Oberflächenverhalten in axiale Richtung berücksichtigt wird.

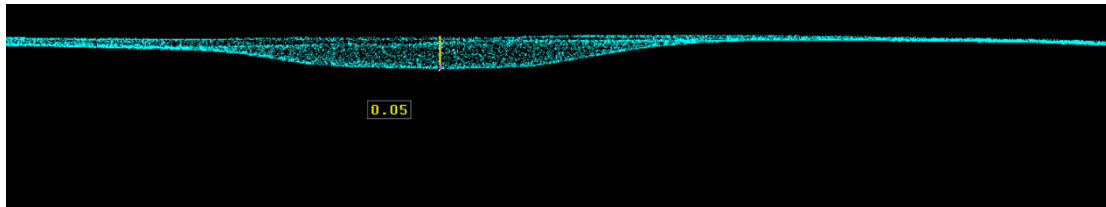


Abbildung 104: Punktwolke eines Schlaglochs mit Tiefenmessung (5 cm) in der Software Fugroviever.

Somit wurde erkannt, dass Oberflächen statt Profilschnitte von der zu entwickelnden KI bewertet werden müssen.

Hauptaugenmerk bei der Analyse der erstellten LiDARscans lag jedoch auf kontinuierlichen Deformationen der Fahrbahn, die sich auch im Profilschnitt abzeichnen. Zu diesem Zweck wurden Wege mit verschiedenen Schadmustern vermessen, gescannt und deren Schnittprofile verglichen. Es musste festgestellt werden, dass Verflachungen der Oberfläche und Ausbildung von Ebenen Verschleißzustände charakterisieren (Abbildung 105).

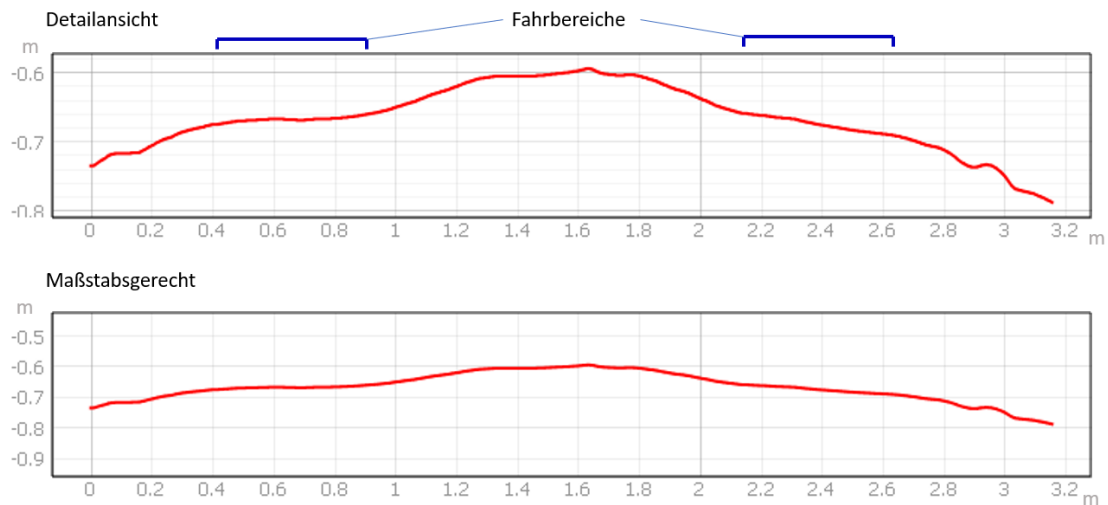


Abbildung 105 - Profilschnitte eines gewöhnlichen Forstweges mit erkennbar befahrenen Spuren. Unten: Maßstabsgerechte Darstellung. Oben mit vertikaler Überhöhung zur Verdeutlichung der ausgebildeten Ebene bzw. der Verflachung.

Bedeutenden Wegeschäden weisen tiefgründige Deformationen des Unterbaus auf, weshalb ein Normprofil nicht mehr vorhanden ist. Aber auch hier gilt, dass eine punktuelle Messung allein keine gesicherte Aussage ermöglicht.

Total kaputter Weg (Hanglage mit Blick ins Tal)

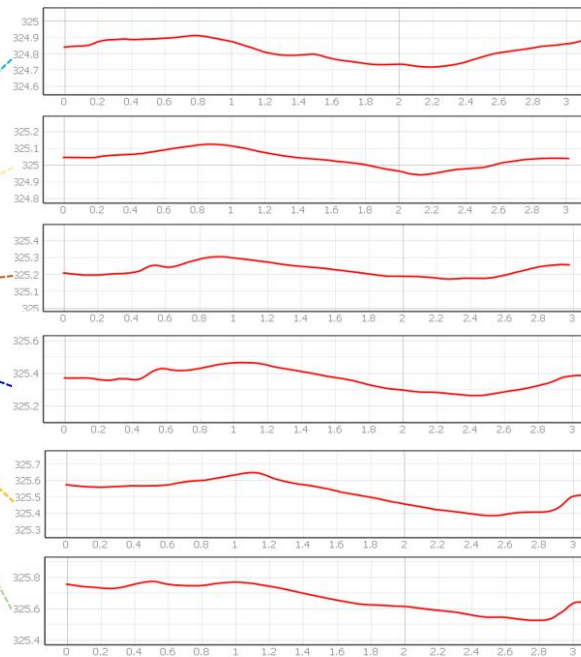


Abbildung 106: Ein Weg wurde mit LiDAR gescannt und anschließend in regelmäßigen Abständen geschnitten. Es ist in jedem Profilschnitt eine Deformation deutlich erkennbar. Ein Normprofil ist nicht erkennbar. Höhenunterschiede von bis zu 30 cm sprechen eindeutig für einen stark geschädigten Unterbau und einer Auflösung des Wegekörpers.

Anhang einer Vielzahl von Erhebungen konnten vier verschiedene Schadklassen voneinander abgetrennt werden. Im Rahmen eines Workshops wurden diese Wege durch Fachexperten vor Ort hinsichtlich der Schadstufe und der erforderlichen Maßnahme eingeschätzt. Diese Erkenntnisse wurden in Form eines Bestimmungsschlüssels systematisch festgehalten, welcher zur Herleitung einer entsprechenden Zustandsklasse dient. Dieser ist ebenfalls im KWF Merkblatte Nr. 26 über die Einstufung von Waldwegzuständen ersichtlich.

Für das Projekt CONTURA stellte dies jedoch nur eine Grundlage zur weiteren Entwicklung dar, da die Anwendung des Bestimmungsschlüssels durch die Nutzung einer künstlichen Intelligenz obsolet gemacht werden sollte. Die eigenständige Zustandsklassifizierung durch KI bildet das Fundament für ein digitales Abbild des Waldweges in den Planungstools (AP 2).

Die NavLog beurteilte bedeutende Mengen der von Geo Net bereitgestellten Fahraufnahmen im Wald (Video/LiDAR, 176 GB) hinsichtlich der vorhandenen Zustandsklassen der Waldwege. Bei dieser Arbeit wurde die Schwierigkeit der gutachterlichen Einordnung von Wegzuständen, insbesondere bei einer reinen Beurteilung von Aufnahmen am Monitor, schnell deutlich. Aus diesem Grund wurde im Rahmen eines Projektmeetings (27.10.22) erstmals das Einrichten von festgelegten Teststrecken mit möglichst normativen Eigenschaften angesprochen. Im darauffolgenden Treffen am 26.01.2023 wurde beschlossen dieses Ziel zu verfolgen, da dies auch Vorteile zur Kalibrierung messtechnischer Einrichtungen bietet.

Nach Beendigung der Datenannotation wurden die Aufnahmen an HD Vision zur Durchführung eines ersten KI-Trainings übergeben, bei welchem eine Beurteilung am Monitor ausreichend gut möglich war.

Die in CONTURA erhobenen Fahrraumereigenschaften sollten die Datenbasis des bestehenden NavLog-Waldwegenetzes anreichern und erweitern. Die digitale Repräsentation von Forstwegen erfolgte zuvor als Single Line Features und gemäß den allgemein erforderlichen topologischen Grundregeln für Netzwerke, jedoch wurden diese attributiv segmentiert gespeichert. Eine Vielzahl der im ShapeForst (Datenmodell der NavLog) festgelegten Wegeparameter können eine geometrische Teilung erforderlich machen. Der häufigste Fall der zu einer geometrischen Trennung eines Vektors führt, ist der Wechsel der zu speichernden Wegeklasse im Verlauf eines Weges. Innerhalb des Projektes CONTURA wurde es erforderlich die Spezifikation zur Erfassung von Wegeparametern abzuändern. Dazu war es mindestens erforderlich Wegezustandsstufen, Maße der lichten Höhe/Breite und Kennzahlen über Entwässerungsgräben abzuspeichern. Diese Parameter ändern sich entlang eines Weges häufig, weshalb eine Repräsentation dieser in Form einer Zerteilung der Wegegeometrie nicht sinnvoll ist. Um diese neuen Informationen sinnvoll ablegen zu können war es notwendig eine vollständig neue Datenbank zu entwickeln, welche sämtliche Tabellenwerte linear metergenau auf ein Wegenetz referenziert speichert. Dieses sollte überwiegend statisch vorliegen und topologischen Regeln exakt folgen. Gegenüber der bisherigen Datenhaltung unterscheidet sich dies insbesondere darin, dass Wegeabschnitte dadurch definiert sind, dass deren Enden jeweils an entweder keinen Weg oder mindestens zwei Wegen anschließen. Das hat zur Folge, dass alle Attribute, welche sich entlang eines Weges ändern könnten, in separaten, die Wegeobjekte referenzierenden Tabellen abzulegen

sind. Nach der Umsetzung einer ersten prototypischen Datenbank wurde auffällig, dass es aus praktischen Gründen eine Ausnahme geben muss, wenn ein Weg als Stichweg endet und in einen Maschinenweg oder eine Rückegasse übergeht. In diesem Fall werden nach Wegeklassen getrennte Linienvektorgeometrien abgelegt, da CONTURA nur Zustandsparameter im Bereich von Fahrstraßen aufnimmt.

Nach Abschluss der Bedarfserhebung wurde unter dem Arbeitstitel ShapeForst 4.0 ein konzeptuelles Datenmodell in Anlehnung an das bestehende Pragmatische ShapeForst entwickelt und um die neuen Erfordernisse ergänzt. Nach einer Vorstellung des neuen Konzeptes im Forstlichen Beirat der NavLog (20.10.2022 in Gotha) wurde der innovative Charakter sehr gelobt, jedoch auch Zweifel an der Fähigkeit zur Bereitstellung der, dem neuen Modell entsprechenden, Daten durch die Lieferanten geäußert. Somit wurde an diesem Punkt entschieden, dass jegliche Entwicklung in Form eines parallelen Prototypensystems, speziell für das Projekt CONTURA, stattfinden muss und bestehende Strukturen der NavLog dabei unberührt bleiben.

Das neu entwickelte Datenmodell umfasst eine Vielzahl von Tabellen zur Aufnahme von Wegeinformationen. In diesem Bericht werden nur die unten explizit erläutert, welche für das Projekt CONTURA dediziert sind. Die verwendeten Klassifizierungen entsprechen dem mit dem KWF gemeinsam erarbeiteten Schlüssel zur Zustandsbeurteilung der Fahrraumkomponenten. Es handelt sich dabei um Tabellen und Attribute, die bereits im Arbeitspaket 9: Messdatenfusion beschrieben wurden.

Es wurde ein lokaler Testserver eingerichtet. Das erweiterte Datenmodell wurde anschließend in Form einer relationalen Datenbank in PostgreSQL mit PostGIS-Extension umgesetzt. Die Tabellen und Beziehungen sind in vereinfachter Form in Abbildung 107 skizziert. In diesem Bericht sind insbesondere die dort wiederzufindenden o.g. Tabellen zu erwähnen, welche sich alle in einer 1:n-Beziehung mit einem Weg (WAY) befinden. In der Datenbank wurden zusätzliche Views einprogrammiert, die Ableitungen aus den Tabellen bereitstellen. Darunter bisher eine Berechnung gebrochener Wegegeometrien basierend auf den kilometrierten Wegezustandsparametern der Tabelle CONDITION sowie basierend auf den Grabeninformationen rechts und links der Wege.

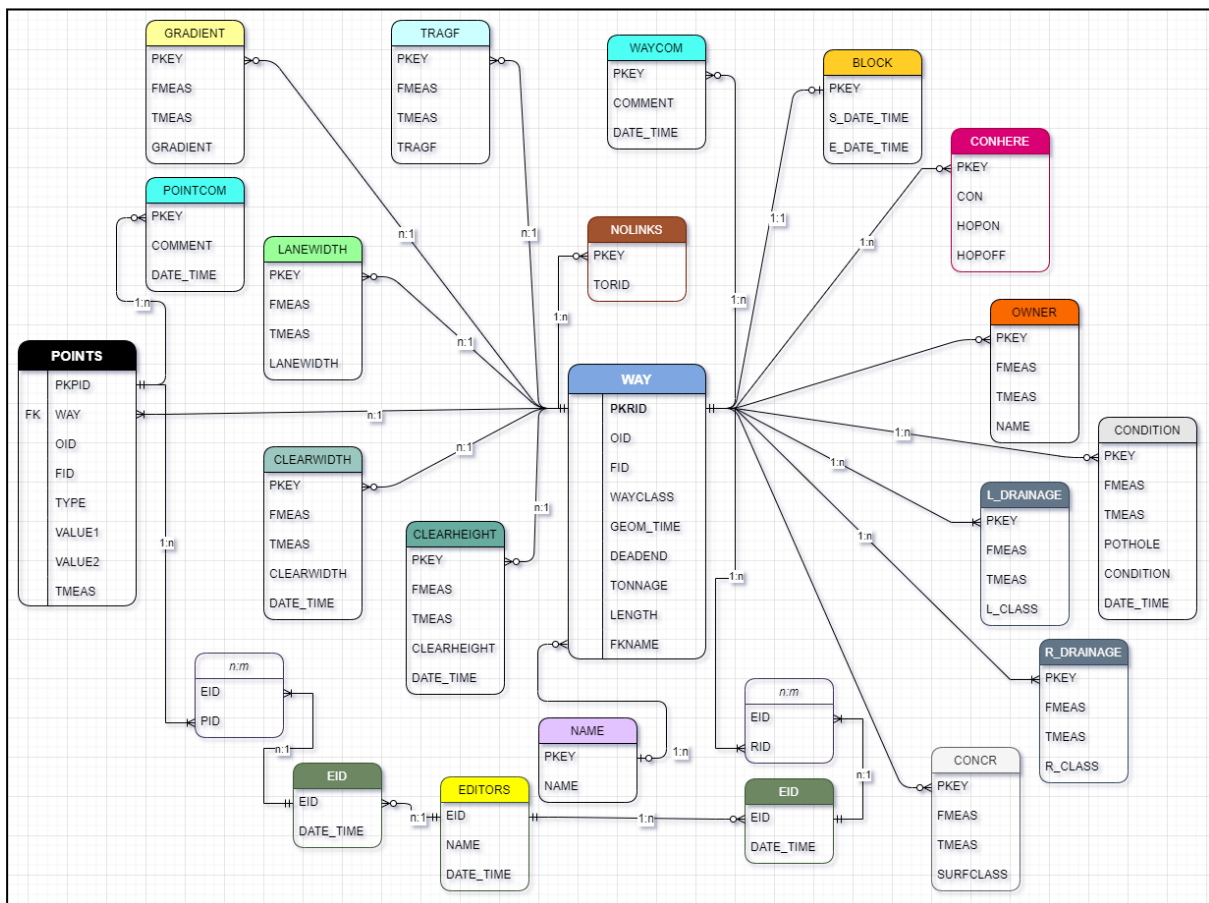


Abbildung 107: Entity-Relationship-Model der programmierten Datenbank

Die Datenakquise und deren fortlaufenden Aktualisierungen erfolgt in bisherigen Systemen der NavLog entweder durch Editierung in der Datenbank per Client-Anwendung oder in Form von Datenlieferungen aus den Datenbanken der Urheber. Diese exportieren deren Daten gem. ShapeForst entweder über eine Schnittstelle zur NavLog-Datenbank oder stellen diese als Shapefile bereit. Zukünftig ist die Möglichkeit zum Datenaustausch über eine REST-Schnittstelle erforderlich, welche von eigenen Entwicklungen (Messfahrzeug bzw. Ergebnis aus Postprocessing) aus dem Projekt CONTURA und Systemen der Datenlieferanten in

einfacher und standardisierter Weise genutzt werden kann. Die Testdatenbank wurde prototypisch um die Softwarekomponente PostgREST erweitert und anschließend eine speziell eingerichtete Serverinfrastruktur aufgebaut, die einen geschützten Onlinezugriff per Datenbankverbindungen und einen auf HTTP-basierenden Webclient bietet. Der Aufbau dieser Infrastruktur erfolgte auf einer durch das Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. bereitgestellten Hardware. Die bereits auf der ursprünglichen Testdatenbank prototypisch konfigurierte PostgREST-Schnittstelle, wurde für den verschlüsselten und gesicherteren Empfang und Abruf von Daten zwischen externen Ressourcen und der Serverinstanz weiterentwickelt.

Es wurde eine Historienfunktion in der Datenbank programmiert, die alle geometrischen Änderungen und Löschungen innerhalb des Wegenetzes (Abbildung 36) und aller Punktobjekte (POINTS) automatisch speichert und vorhält.

```
CREATE OR REPLACE FUNCTION public.process_way_audit()
  RETURNS trigger
  LANGUAGE 'plpgsql'
  COST 100
  VOLATILE NOT LEAKPROOF
AS $BODY$
BEGIN
    IF (TG_OP = 'DELETE') THEN
        INSERT INTO way_lc SELECT nextval('way_lc_gid_seq'::regclass), 'D', now(), user,
OLD.*;
        RETURN OLD;
    ELSIF (TG_OP = 'UPDATE') THEN
        INSERT INTO way_lc SELECT nextval('way_lc_gid_seq'::regclass), 'U', now(), user,
OLD.*;
        RETURN NEW;
    ELSIF (TG_OP = 'INSERT') THEN
        INSERT INTO way_lc SELECT nextval('way_lc_gid_seq'::regclass), 'I', now(), user,
NEW.*;
        RETURN NEW;
    END IF;
    RETURN NULL; -- result is ignored since this is an AFTER trigger
END;
$BODY$;
```

Abbildung 108 - SQL Statement für einen Trigger der alle Änderungen in einer Historie der Wegegeometrien füllt.

Zeitpunkte von Neuanlagen werden automatisch beim Erstellen eines Features in der CONTURA-Datenbank generiert. Die Historie umfasst Zeitstempel in dem Moment der Manipulation von Daten (Updates, Löschungen, Neuanlagen) und den zuvor vorhandenen Zustand des Objektes inklusiver aller Attribute und der Geometrie. Abbildung 37 zeigt einen Auszug der Tabelle mit der Wegehistorie in der Datenbank.

gid	operation	stamp	userid	pkrid	oid	fid	geom_time	deadend	geom
[PK] bigint	character	timestamp without time zone	text	bigint	integer	integer	timestamp without time zone	integer	geometry
5	I	2023-05-09 09:49:28.765927	navlog	115	2	[null]	2023-05-09 09:47:51	[null]	0102000060E8640
6	U	2023-05-09 14:58:57.331301	navlog	115	2	[null]	2023-05-09 09:47:51	[null]	0102000060E8640
7	U	2023-05-09 15:09:38.267733	navlog	115	2	[null]	2023-05-09 09:47:51	[null]	0102000060E8640

Abbildung 109 - Auszug der Tabelle „way\_lc“ in der CONTURA-Datenbank, welche sämtliche Zustände von Objekten vor deren Veränderung beinhaltet (nach rechts nicht abschließend dargestellt).

Die Historie wird in der Anwendung ebenfalls grafisch dargestellt. Abbildung 38 zeigt den Zustand der Daten zum aktuellen Zeitpunkt, Abbildung 39 enthält in halbtransparenter Farbgebung alle Objekte die in irgendeiner Form verändert worden sind. Eine Rollbackfunktion, welche es ermöglicht vorherige Zustände wiederherzustellen, war für das Prototypsystem nicht erforderlich und wurde während der Projektlaufzeit noch nicht umgesetzt.

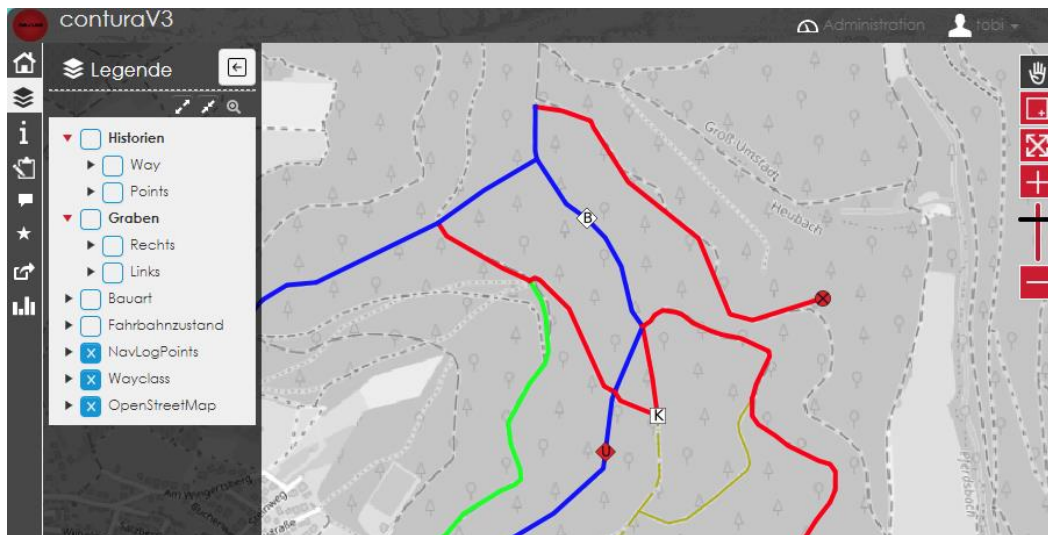


Abbildung 110 - Darstellung des aktuellen Datenbestandes in der Webanwendung nach Datenveränderung.



Abbildung 111 - Darstellung der Historie in der Webanwendung. Alle sichtbaren Objekte wurden entweder geometrisch oder attributiv manipuliert, oder gelöscht.

Nach der Evaluation des Testsystems wurde eine neue Spezifikation „Erweiterung Format Shape<sup>Forst</sup> - Monitoring und Instandhaltung der Wegeinfrastruktur (Shape<sup>Forst</sup> MI – Version 0.1) erstellt resp. in einem iterativen Prozess konkretisiert und nachgeschärft, welche nun alle im Projekt CONTURA erlangten Erkenntnisse aufgreift. Diese ist nun eine Arbeitsgrundlage zur externen Umsetzung eines völlig neu ausgelegten Live-Systems.

## Teilvorhaben 7: 2220NR061G

### 1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Eine zentrale Rolle kommt in dem Projekt der Datenverarbeitung zu. Nachdem die unterschiedlichen Sensordaten akquiriert wurden, müssen aus diesen die forstwirtschaftlich relevanten Parameter bestimmt werden. Die relevanten Parameter sind primär der Wegekörper (Kronenbreite) mit Fahrbahn und Seitenstreifen, die sich seitlich anschließenden und Wasser ableitenden Grabensysteme, die Bewuchs tragenden Seitenbereiche (z.B. Böschungen) sowie das gesamte für die Wegebenutzung relevante Lichtraumprofil.

Um diese herausfordernde Aufgabe robust und dem späteren Einsatzzweck gerecht werdend zu können, wird in diesem Teilvorhaben ein adaptives neuronales Netzwerk für die schnelle Merkmalsdetektion auf den verschiedenen Daten und für die schnell automatische Maßnahmenableitung für die Wegeinstandhaltung entwickelt werden. Teilaspekte hiervon sind der Gesamtkonzeptansatz des künstlichen neuronalen Netzes, Erzeugung von annotierten Testdatensätzen für das Training, Entwicklung und Auswahl eines geeigneten Netzwerkmodells, Entwicklung eines Algorithmus zur automatischen Ableitung von Merkmalen aus dem Gesamt-3D-Bilddatensatz, Performancetest, Schnittstellenentwicklung und die Entwicklung der Softwarearchitektur für die Verarbeitung der ausgewerteten Daten unter forstwirtschaftlichen Aspekten. Für die Erstellung des Demonstrators werden die Ergebnisse im Verbund iteriert und optimiert werden.

### 2. Bearbeitete Arbeitspakete

#### Arbeitspaket 01: Gesamtkonzeption des CONTURA Mess- und Auswertesystems

In einem Kickoff-Meeting aller Projektpartner wurden die zu erreichenden Ziele, sowie die forstlichen und technischen Anforderungen an das zu entwickelnde System herausgearbeitet. Bestandteil war auch die Abstimmung bezüglich der Zusammenarbeit der Projektpartner in den einzelnen Arbeitspaketen. Beim ersten Zwischenmeeting halfen die bis dahin von den Projektpartnern durchgeführten Evaluierungen von Entwicklungen und Auslotungen der Möglichkeiten bei der Konkretisierung eines optimierten Gesamtkonzeptes für das System CONTURA.

#### Arbeitspaket 03: Entwicklung eines Parametersystems für die KI

In Abstimmung und Zusammenarbeit mit FHE und NavLog auf Basis von Testmaterial, welches durch GeoNet bereitgestellt wurde, leitete HD-Vision die Fehlerklassen für die automatische Identifikation ab. Die Verbundpartner trafen sich dazu in Heidelberg, um gemeinsam Schadklassen am virtuellen Objekt zu erkennen.

Weiterhin wurden Software-Tools für die Annotation der Daten erstellt. Dazu wurden in speziellen Entwicklungsumgebungen Infrastrukturen geschaffen, die das projektspezifische Datenmaterial parameterorientiert einlesen und verarbeiten kann. Anschließend wurde die Infrastruktur für das Training der neuronalen Netze wurde beschafft und in Betrieb genommen. Im letzten Teil wurde als Entwicklungsvorbereitung die Netzwerkarchitekturen für die neuronalen Netze evaluiert und getestet.

#### Arbeitspaket 08: Entwicklung künstliches neuronales Netz

In Bezug auf die Erstellung der neuronalen Netzen wurden verschiedene Untersuchungen vorgenommen. Diese beinhalten die Analyse von 2D und 3D Daten, die Bearbeitung von strukturierten Höhenkarten und die Bearbeitung von unstrukturierten Punktwolken. Dabei konnten die folgenden Erkenntnisse erzielt werden:

##### 1. 2D-Daten gegenüber 3D-Daten:

Die Arbeit mit 2D-Daten ist oft einfacher, da sie weniger Dimensionen umfasst und visuell auf eine klare Art und Weise dargestellt werden kann. Viele analytische und Visualisierungstechniken sind für 2D-Daten gut etabliert. Für Aufgaben, die speziell 3D-Informationen erfordern, wie zum Beispiel Computergrafik, virtuelle Realität oder bestimmte wissenschaftliche Simulationen, kann die Arbeit mit 3D-Daten jedoch notwendig und angemessen sein. Es ist wichtig zu beachten, dass Fortschritte in Technologie und Tools die Arbeit mit 3D-Daten kontinuierlich verbessern.

##### 2. Strukturierte Daten gegenüber unstrukturierten Daten:

Strukturierte Daten, die in einem vordefinierten Format mit einem klaren Schema organisiert sind, können einfacher zu handhaben sein, da sie einen konsistenten Rahmen für Analyse und Manipulation bieten. Strukturierte Daten finden sich häufig in relationalen Datenbanken, Tabellenkalkulationen oder CSV-Dateien. Auf der anderen Seite fehlt unstrukturierten Daten, wie zum Beispiel Textdokumenten, Bildern, Tonaufnahmen oder Videos, eine vordefinierte Struktur und sie stellen zusätzliche Herausforderungen in Bezug auf Interpretation und Analyse dar. Unstrukturierte Daten enthalten jedoch oft wertvolle Informationen, die durch Techniken wie Natural Language Processing, Computer Vision oder Audioanalyse extrahiert werden können. Machine Learning-Modelle können darauf trainiert werden,

unstrukturierte Daten zu verstehen, wobei jedoch möglicherweise mehr Vorverarbeitung und Feature Engineering erforderlich sind..

### 3. Testen der Inferenz anhand von Höhenkarten:

Höhenkarten werden typischerweise in der Computergrafik verwendet und stellen ein 2D-Bild dar, das Höheninformationen codiert. Sie können für Aufgaben wie Geländemodellierung, Texturzuordnung oder Erzeugung von 3D-Darstellungen nützlich sein. Das Testen der Inferenz anhand von Höhenkarten würde das Anwenden von Algorithmen oder Modellen beinhalten, um Merkmale basierend auf den Höhenwerten vorherzusagen oder zu analysieren. Die Komplexität und Geschwindigkeit dieses Prozesses hängen von der spezifischen Inferenzaufgabe, dem verwendeten Algorithmus sowie der Größe und Auflösung der Höhenkarten ab.

Zusammenfassend hängt die Leichtigkeit und Geschwindigkeit der Arbeit mit verschiedenen Arten von Daten von verschiedenen Faktoren ab, einschließlich der spezifischen Aufgabe, der verfügbaren Tools und der Expertise der beteiligten Personen. Im Rahmen dieses Projektes haben wir uns für die Arbeit mit strukturierten Höhenkarten entschieden. Exemplarisch seien in Abbildung 112 ein paar Höhenkarten gezeigt.

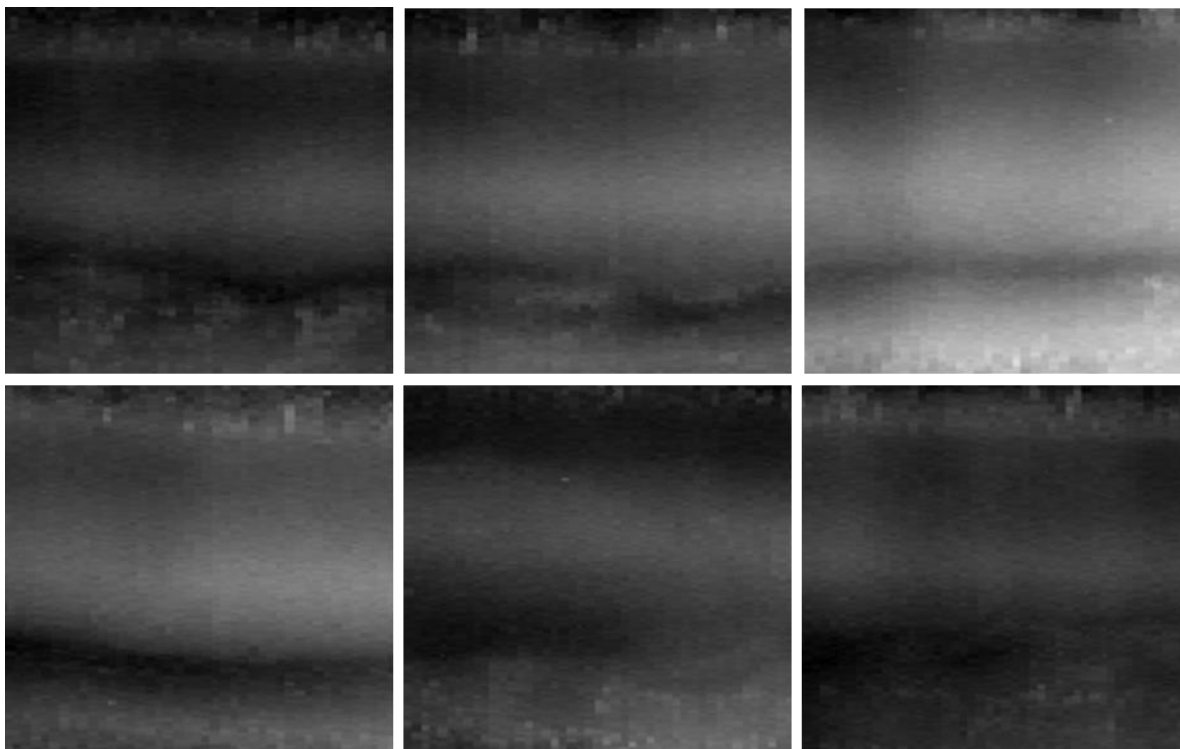


Abbildung 112: Texturen für Inferenztests

Für die Vorverarbeitung, bzw. Segmentierung wurden die folgenden Parameter gewählt:

- Segmentationsparameter:
- Segmentbreite: 4 m
- Segmentlänge: 6 m
- Segmenttiefe: 40 cm
- Bildparameter Auflösung: 150 x 150
- Interpolation: Nächster Nachbar

Anhand dieser Daten wurde ein künstliches neuronales Netz als Klassifikator erstellt. Daten wurden von den Projektpartnern annotierter und mit diesen Daten wurde der Klassifikator trainiert. Die folgenden Schadstufen/Schadphänomene sollten untersucht werden:

#### Schadphänomene:

Merkmal	Anzahl Beispiele
Auswaschung	7

Schlagloch	36
Setzungsverformung	115
Spurrinne	19
Starke Deformation	58
Tiefgründige Verformung des Oberbaus	19
Starke Deformation	58
Tiefgründige Verformung des Oberbaus	12
Verflachung	424
freiliegender Untergrund	70

Genauigkeit auf 20 % der Daten: > 90 %

#### Schadstufen:

Merkmal / Klasse	Anzahl Beispiele
Klasse 1	19
Klasse 2	425
Klasse 3	122
Klasse 4	121
Klasse 2.I	2
Klasse 2.II	18
Klasse 2.III	11
Klasse 2.IV	7

Genauigkeit auf 20 % der Daten: > 80 %

Abschließend konnte eine sehr gute Erkennungsrate auf diesen sehr herausfordernden Datensatz erzielt werden.

#### Arbeitspaket 10: Entwicklung Auswertesoftware Wegezustand

Um mit diesen Daten möglichst effizient arbeiten zu können, und in Hinblick auf das Gesamtergebnis wurde eine Schnittstelle für die weitere Verarbeitung entwickelt. Diese wurde mit den Projektpartnern abgestimmt, bzw. mit deren Input erarbeitet. Ziel der Schnittstelle war der Einzug von Daten einerseits und die Ausgabe der Ergebnisse andererseits, so dass diese Ergebnisse weiterverarbeitet werden können.

Die Python-basierten Schnittstelle zahlt eng mit dem von GeoNet entwickelten Objektmodell. Ein von HD-Vision entworfener Einlese-Algorithmus arbeitet mit dem innerhalb des Projektes entwickelten Datenstandard für die Rohdatendatenverarbeitung.

## **Arbeitspaket 12: Evaluation Gesamtdemonstrator**

Arbeiten zur Evaluation der Ergebnisse wurden im Projektverbund gemeinsam durchgeführt.

### **3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

#### Erarbeitung relevanter Parameter:

Nach der Bereitstellung von Basismessdaten wurden gemeinsam mit den Partnern die forstwirtschaftlich relevanten Parameter bestimmt und in Datenmodelle überführt. Trainingsdaten wurden annotiert und zu Basis-Trainingsdatensätzen aufbereitet.

#### Infrastruktur zur Datenverarbeitung:

Für die letztendliche Datenverarbeitung mussten Methoden und Attribute auf konzeptebene abstrahiert werden. Nach der Implementierung in ein objektorientiertes Softwareframework wurden „Frontend“ und „Backend“ für die Dateneingabe und Ergebnisausgabe definiert und umgesetzt. An dieser Stelle wurde gemeinsam mit den Partnern gearbeitet, um den Austausch der Daten und Datenstrukturen fehlerfrei zu ermöglichen.

#### Adaptives neuronales Netz:

Letztendlich wurde ein adaptives neuronales Netzwerk für die schnelle Merkmalsdetektion auf den Messdaten und zur schnellen automatischen Maßnahmenableitung entwickelt. Zur Evaluierung wurden zudem Performancetests durchgeführt. Die Schnittstellenentwicklung und die Entwicklung der Softwarearchitektur wurde erfolgreich abgeschlossen und die Software als Baustein für die Gesamtauswertung zur Verfügung gestellt.