

**Sachbericht zum Verwendungsnachweis  
zum Vorhaben DiGeBaSt – Teil I - Kurzbericht**

Thema:

**Markierungsfreie Rückverfolgung des gefällten Baumstamms von der  
Ernte bis ins Sägewerk**

Zuwendungsempfänger:

**Forst Baden-Württemberg**

Förderkennzeichen:

**02WDG013A**

Laufzeit:

**01.04.2021 bis 31.06.2023**

Monat der Erstellung:

**08/2023**

Veröffentlichung am:

## **1. Aufgabenstellung**

Die Rückverfolgbarkeit von Rohstoffen zu ihrem Ursprung ist ein Grundbaustein für nachhaltige Lieferketten. Rückverfolgbarkeit beschreibt die Fähigkeit die Produktion, die Verarbeitungsschritte und die Verortung eines Gegenstandes durch registrierte Identifizierung nachzuvollziehen (Hunt, et al., 2014). In der Holzwirtschaft wird die Rückverfolgbarkeit von in die Europäische Union eingeführten Holzprodukten durch den gesetzlichen Rahmen der EU-Holzverordnung angeordnet ((EU) Nr. 995/2010). Bereits auf nationaler Ebene ist diese schwer umsetzbar aufgrund von Defiziten in der Digitalisierung der Holzernte und Bereitstellung, sowie fehlender kostengünstiger, fälschungssicherer Rückverfolgungssysteme. Zwei Grundvoraussetzung müssen für die Umsetzung eines Rückverfolgungssystems in der Holzwertschöpfungskette erfüllt werden: a) die Fähigkeit zur Wiedererkennung von Rundholz, und b) die Standardisierung des Informationsaustausches zwischen den Beteiligten der Holzwertschöpfungskette (Saikouk & Spalanzani, 2016) (Seidel, et al., 2012).

Das Projekt *DiGeBaSt* (Digitaler Fingerabdruck: Markierungsfreie Rückverfolgung vom gefällten Baumstamm bis ins Sägewerk) fokussiert sich auf Rundholz für die Sägeindustrie, insbesondere auf das Sortiment Stammholz, das im großen Maßstab geerntet und auf den Markt gebracht wird. Bislang stützt sich die Baubranche vorwiegend auf Fichtenholz, mit kleineren Anteilen an Tanne, Kiefer und weiteren Nadel- und Laubhölzern. Im Projekt wurde deshalb vorerst nur mit Fichtenholz gearbeitet.

## **2. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Die Arbeitspakete: Projektmanagement, Spezifikation der Anforderungen, Entwicklung Fingerprint-Verfahren für Baumstämme, Systemintegration in Forstmaschinen und Sägewerk, Demonstration im Feld und Wissenstransfer und Öffentlichkeitsarbeit wurden erfolgreich abgeschlossen.

Das Arbeitspaket: Digitalisierung der forstwirtschaftlichen Prozesskette wurde nicht erfolgreich abgeschlossen, da man keine Genehmigung des Softwareherstellers bekam auf die Rohdaten zuzugreifen, um die Bilddaten mit diesen zu verknüpfen. Sollte die entwickelte Technik auf den Markt kommen, muss vorher noch mit dem Hersteller in Kontakt getreten werden, um diese Problematik zu lösen.

Das Vorhaben wurde um drei Monate verlängert (bis 30.06.2023), da es am Anfang Lieferschwierigkeiten der Hardware gegeben, und sich somit der komplette Versuchsablauf nach hinten verzögert hat. Dadurch bedingt, konnte die Auswertung der Daten erst verspätet starten.

### **3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse**

Die Kommunikation der Projektpartner untereinander lief reibungslos und kollegial. Es wurden diverse Projekttreffen in digitaler Form abgehalten und ein großes Projektpartnertreffen in Präsenz im Kloster Bebenhausen, der Zentrale von ForstBW. Terminfindungen waren unkompliziert und Termine wurden eingehalten.

Die Spezifikation der Anforderungen wurde zeitnahe nach Beginn des Projektes abgeschlossen und hatte eine State-of-the-Arts-Analyse zur Folge, welche im Teil II, Eingehende Darstellung nachgelesen werden kann.

Die Entwicklung des Fingerprint-Verfahrens wurde erfolgreich abgeschlossen. Es wurden drei verschiedene Lesesystem-Typen konzipiert und aufgebaut: ein integriertes Lesesystem am Vollernter, ein Lesesystem im Sägewerk und ein handgehaltenes Lesesystem. Die Fingerprint-Smartphone-App musste verworfen werden. Unter den Lichtbedingungen im realen Umfeld war der Kontrast nicht ausreichend und die Auflösung zu gering für die Fingerprint-Identifizierung. Stattdessen wurde das handgehaltene Lesegerät entwickelt und im gesamten Projektzeitraum genutzt.

Die Systemintegration des Lesesystems in die Forstmaschine war mit einigen Anlaufschwierigkeiten verbunden, wurde jedoch erfolgreich abgeschlossen. Das Lesesystem konnte im Versuchsablauf unproblematisch und zuverlässig genutzt werden. Die Systemintegration des Lesesystems ins Sägewerk hatte gewisse Anfangsschwierigkeiten, welche bewältigt werden mussten, z. B. herumfliegende Sägespäne. Es lief am Ende jedoch reibungslos und lieferte korrekte Daten.

Die Messkampagne wurde erfolgreich abgeschlossen. Die Wiedererkennungsraten der Einzelstämme vom Vollernter zum Polter betrug 98,46%. Die Wiedererkennungsraten der Einzelstämme vom Polter zum Sägewerk betrug 100% und die Wiedererkennungsraten der Einzelstämme vom Vollernter zum Sägewerk betrug 100%.

Das Projekt wurde erfolgreich abgeschlossen und die Fingerprinttechnologie kann nachweislich auch auf die Forst- und Holzindustrie angewendet werden.

**Sachbericht zum Verwendungsnachweis**  
**zum Vorhaben DiGeBaSt – Teil II - Eingehende Darstellung**

Thema:

**Markierungsfreie Rückverfolgung des gefällten Baumstamms von der Ernte  
bis ins Sägewerk**

Zuwendungsempfänger:

**Forst Baden-Württemberg**

Förderkennzeichen:

**02WDG013A**

Laufzeit:

**01.04.2021 bis 31.06.2023**

Monat der Erstellung:

**08/2023**

Veröffentlichung am:

## Inhaltsverzeichnis

<b>I.</b>	<b>Kurzbericht .....</b>	<b>3</b>
1.	Aufgabenstellung .....	3
2.	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	3
3.	Resümee der wesentlichen Ergebnisse .....	4
a)	Arbeitspakete und Meilensteine .....	4
b)	Zusammenfassung .....	7
<b>II.</b>	<b>Ausführliche Darstellung der Ergebnisse .....</b>	<b>9</b>
1.	Erzielte Ergebnisse .....	9
	Arbeitspaket 0: Projektmanagement .....	9
	Arbeitspaket 1: Spezifikation der Anforderungen .....	9
	Arbeitspaket 2: Entwicklung Fingerprint-Verfahren für Baumstämme .....	11
	Arbeitspaket 2a: Entwicklung der Fingerprint-Lesesysteme .....	11
	Arbeitspaket 2b: Adaption des Fingerprint-Algorithmus für Baumstämme .....	16
	Arbeitspaket 2c: Weiterentwicklung des Abgleichverfahrens .....	18
	Arbeitspaket 2d: Fingerprint-Smartphone-App .....	20
	Arbeitspaket 3: Systemintegration in Forstmaschinen und Sägewerk .....	20
	Arbeitspaket 4: Digitalisierung der forstwirtschaftlichen Prozesse .....	23
	Arbeitspaket 5: Demonstration im Feld .....	23
	Arbeitspaket 5a: Vorversuche .....	23
	Arbeitspaket 5b: mechanisierte Holzernte .....	24
	Arbeitspaket 5d: Rückverfolgung im Sägewerk .....	25
	Arbeitspaket 5e: Ein-/Auslagerung im Nasslager .....	28
	Arbeitspaket 6: Wissenstransfer und Ergebnisverwertung .....	28
2.	Verwertung .....	28
a)	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen .....	29
b)	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende .....	29
c)	Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten nach Projektende .....	29
d)	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit .....	30
3.	Erkenntnisse von Dritten .....	31
4.	Veröffentlichungen .....	31
<b>III.</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>32</b>
	Literaturverzeichnis .....	32
	Tabellenverzeichnis .....	32
	Abbildungsverzeichnis .....	32

## **I. Kurzbericht**

### **1. Aufgabenstellung**

Die Rückverfolgbarkeit von Rohstoffen zu ihrem Ursprung ist ein Grundbaustein für nachhaltige Lieferketten. Rückverfolgbarkeit beschreibt die Fähigkeit die Produktion, Verarbeitungsschritte und Verortung eines Gegenstandes durch registrierte Identifizierung nachzuvollziehen (Hunt, et al., 2014). In der Holzwirtschaft wird die Rückverfolgbarkeit von in die Europäische Union eingeführten Holzprodukten durch den gesetzlichen Rahmen der EU-Holzverordnung ((EU) Nr. 995/2010). Bereits auf nationaler Ebene ist diese schwer umsetzbar durch Defizite in der Digitalisierung der Holzernte und Bereitstellung, sowie fehlende kostengünstige, fälschungssichere Rückverfolgungssysteme. Zwei Grundvoraussetzung müssen für die Umsetzung eines Rückverfolgungssystems in der Holzwertschöpfungskette erfüllt werden: a) die Fähigkeit zur Wiedererkennung von Rundholz, und b) die Standardisierung des Informationsaustausches zwischen den Beteiligten der Holzwertschöpfungskette (Saikouk & Spalanzani, 2016) (Seidel, et al., 2012).

Das Projekt *DiGeBaSt* (Digitaler Fingerabdruck: Markierungsfreie Rückverfolgung vom gefällten Baumstamm bis ins Sägewerk) fokussiert sich auf Rundholz für die Sägeindustrie, insbesondere auf das Sortiment Stammholz, das im großen Maßstab geerntet und auf den Markt gebracht wird. Bislang stützt sich die Baubranche vorwiegend auf Fichtenholz, mit kleineren Anteilen an Tanne, Kiefer und weiteren Nadel- und Laubhölzern. Im Projekt wurde deshalb vorerst nur mit Fichtenholz gearbeitet.

### **2. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Die nachfolgende Übersicht zeigt die Arbeitspakete des Gesamtvorhabens: (

Tabelle 1)

Tabelle 1: Übersicht der Arbeitspakete

	Arbeitspaket ( <i>kursiv</i> IPM-Pakete)	Personenmonate				
		ForstBW	HSM	Streit	IPM	FVA
0	Projektmanagement	4	1	1	1	2
1	Spezifikation der Anforderungen	1	1	1	3	2
2	Entwicklung Fingerprintverfahren					
2a	<i>Entwicklung der Fingerprint Lesesysteme</i>				4	2
2b	<i>Adaption Fingerprint für Baumstämme</i>				4,5	
2c	<i>Umsetzung zweistufiges Abgleichsverfahren</i>				4,5	
2d	<i>Fingerprint Smartphone App</i>	0,5			3,5	1
3	Systemintegration Forstmaschinen und Sägewerk					
3a	Adaption Sägewerk			4		1
3b	Adaption Vollernter	1	8			0,5
3c	Adaption Tragschlepper	1	4			0,5
4	Digitalisierung der forstwirtschaftlichen Prozesse	1	1	1		3
5	Demonstration im Feld					
5a	<i>Vorversuche</i>	1	2	2	1,5	2
5b	mechanisierte Holzernte	3	2		1	3
5c	manuelle Holzernte	1			1	2
5d	<i>Rückverfolgung Sägewerk</i>			2	1	1
5e	Ein-/Auslagerung im Nasslager	1			0,5	2
6	Wissenstransfer und Öffentlichkeitsarbeit	1			2	2
	<i>Summe</i>	15,5	19	11	27,5	24

### 3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

In den nachfolgenden Tabellen 2 und 3 sind die Meilensteine des Gesamtvorhabens aufgelistet, die den Teilaufgaben des Antragstellers zugeordnet sind, sowie die Meilensteine, die den Antragsteller in den allgemeinen Arbeitspaketen betreffen.

#### a) Arbeitspakete und Meilensteine



*Tabelle 2: Zielerreichungsstand der Arbeitspakete*

<b>Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)</b>	<b>Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)</b>	<b>Ziel erreichung</b>
AP 0 Projektmanagement	04/2021 bis 06/2023	abgeschlossen
AP 1 Spezifikation der Anforderungen	04/2021 bis 12/2022	abgeschlossen
AP 2 Entwicklung Fingerprint-Verfahren für Baumstämme	06/2021 bis 09/2022	abgeschlossen
AP 3 Systemintegration in Forstmaschinen und Sägewerk	10/2021 bis 06/2022	abgeschlossen
AP 4 Digitalisierung der forstwirtschaftlichen Prozesskette	06/2021 bis 09/2021	Nicht abgeschlossen
AP 5 Demonstration im Feld	11/2022 bis 01/2023	abgeschlossen
AP 6 Wissenstransfer und Öffentlichkeitsarbeit	04/2021 bis 05/2023	abgeschlossen

Tabelle 3: Zielerreichung der Meilensteinplanung

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M0_1 Projektaufaktttreffen	04/2021	erledigt
M0_2 Projekttreffen	09/2021	erledigt
M0_3 Projekttreffen	03/2022	erledigt
M0_4 Projekttreffen	09/2022	erledigt
M0_5 Projektabschluss	03/2023 verlängert bis 06/2023	erledigt
M1_1 Prozessanalyse durchgeführt	09/2021	erledigt
M1_2 Anforderungen an Technik sind definiert	09/2021	erledigt
M2a_1 Realisierungsvorhaben liegen vor	03/2022	erledigt
M2a_2 Lesesysteme für Sägewerk einsatzbereit	09/2022	erledigt
M2a_3 Lesesysteme sind aufgebaut	09/2022	erledigt
M2b_1 Laboraufbau für Testaufnahmen existiert	09/2022	erledigt
M2b_2 Baumstammspezifische Features ausgewählt	09/2022	erledigt
M2b_3 Baumstamm-ID liegt vor	09/2022	erledigt
M2c_1 Konzept zum Abgleich der Baumstamm-ID liegt vor	09/2022	erledigt
M2c_2 Abgleichsverfahren Baumstamm-ID abgeschlossen	09/2022	erledigt
M2d_1 Erste Version Fingerprint App liegt vor	02/2022	Ersetzt durch handgehaltenes Lesesystem (s. AP 2a)
M2d_2 Fingerprint App bereit für den Praxiseinsatz		
M3a_1 System ist an Vollernter adaptiert	04/2022	erledigt
M3b_1 System ist an Tragschlepper adaptiert	05/2022	nicht umgesetzt; dafür zweites System im Säge- werk implemen- tiert (s. AP 2a)
M3c_1 System ist in Sägewerk adaptiert	06/2022	erledigt
M4_1 Spezifikationen Digitaler Zwilling sind identifiziert	09/2021	erledigt
M5a_1 Anforderungen an Versuchsbedingungen sind definiert	02/2022	erledigt
M5a_2 Vorversuche im Labor sind erfolgt	05/2022	erledigt
M5a_3 Vorversuche im Feld sind erfolgt	08/2022	erledigt
M5b_1 Versuchsbestände sind ausgewählt		

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M5b_2 Versuche sind durchgeführt	08/2022	erledigt
M5c_1 Versuchsbestände sind ausgewählt	11/2022	erledigt
M5c_2 Versuche sind durchgeführt	10/2022	erledigt
M5d_1 Identifikation im Sägewerk einsatzbereit	12/2022	erledigt
M5d_2 Identifikation im Sägewerk abgeschlossen	09/2022	erledigt
M5e_1 Einlagerung im Nasslager ist erfolgt	01/2023	erledigt
M5e_2 Auslagerung aus Nasslager ist erfolgt	03/2022	erledigt
	03/2023	erledigt
M6_1 Vorversuche sind ausgewertet	08/2022	erledigt
M6_2 Feldversuche sind ausgewertet	01/2023	erledigt
M6_3 Ergebnisse sind publiziert	03/2023	erledigt

## b) Zusammenfassung

Die Kommunikation der Projektpartner untereinander lief reibungslos und kollegial. Es wurden diverse Projekttreffen in digitaler Form abgehalten und ein großes Projektpartnertreffen in Präsenz im Kloster Bebenhausen, der Zentrale von ForstBW. Terminfindungen waren unkompliziert und Termine wurden eingehalten.

Die Spezifikation der Anforderungen wurde zeitnahe nach Beginn des Projektes abgeschlossen und hatte eine State-of-the-Arts-Analyse zur Folge, welche im Teil II, Eingehende Darstellung nachgelesen werden kann.

Die Entwicklung des Fingerprint-Verfahrens wurde erfolgreich abgeschlossen. Es wurden drei verschiedene Lesesystem-Typen konzipiert und aufgebaut: ein integriertes Lesesystem am Vollernter, ein Lesesystem im Sägewerk und ein handgehaltenes Lesesystem. Die Fingerprint-Smartphone-App musste verworfen werden. Unter den Lichtbedingungen im realen Umfeld war der Kontrast nicht ausreichend und die Auflösung zu gering für die Fingerprint-Identifizierung. Stattdessen wurde das handgehaltene Lesegerät entwickelt und im gesamten Projektzeitraum genutzt.

Die Systemintegration des Lesesystems in die Forstmaschine war mit einigen Anlaufschwierigkeiten verbunden, wurde jedoch erfolgreich abgeschlossen. Das Lesesystems konnte im Versuchsaufbau unproblematisch und zuverlässig genutzt werden. Die Systemintegration des Lesesystems ins Sägewerk hatte gewisse Anfangsschwierigkeiten, welche bewältigt werden mussten, z. B. herumfliegende Sägespäne. Es lief am Ende jedoch reibungslos und lieferte korrekte Daten.

Die Messkampagne wurde erfolgreich abgeschlossen. Die Wiedererkennungsraten der Einzelstämme vom Vollernter zum Polter betrug 98,46%. Die Wiedererkennungsraten der Einzelstämme

vom Polter zum Sägewerk betrug 100% und die Wiedererkennungsrates der Einzelstämme vom Vollernter zum Sägewerk betrug 100%.

Das Projekt wurde erfolgreich abgeschlossen und die Fingerprunttechnologie kann nachweislich auch auf die Forst- und Holzindustrie angewendet werden.

## **II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse**

### **1. Erzielte Ergebnisse**

#### **Arbeitspaket 0: Projektmanagement**

Das Projekt wurde von ForstBW, mit Unterstützung der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg koordiniert. Des Weiteren übernahm ForstBW die überwiegende Kommunikation mit dem Projektträger.

Projekttreffen aller Projektpartner fanden am 18.02.2022, am 13.05.2022 und am 21.12.2022 statt.

Zum großen Projekttreffen aller Projektpartner traf man sich am 21.12.2022 in der Zentrale von ForstBW, in Tübingen.

Diverse Projekttreffen einzelner Partner untereinander (nicht im kompletten Projektpartnerverbund) fanden am 11.05.2022, am 14.07.2022 und am 10.10.22 statt.

Die Zusammenarbeit der Projektpartner lief reibungslos, respektvoll, kommunikativ. Absprachen wurden eingehalten. Kontakte auf kurzem Weg per Telefon waren an der Tagesordnung und wurden häufig genutzt. Die Terminfindung für Gespräche in größerem Rahmen erfolgte schnell und das die Projektpartner erschienen wie vereinbart. Mitarbeitende von FVA, Fraunhofer IPM und ForstBW saßen zusammen in mehreren GreenTech-Workshops.

ForstBW organisierte die internen Treffen der Projektpartner, ob in Präsenz oder digital, und übernahm die Kommunikation unter den Projektpartnern. SocialMediaBeiträge wurden von Seiten ForstBW für das DigitalGreenTechTeam vorbereitet und wurden dann über DGT gepostet.

#### **Arbeitspaket 1: Spezifikation der Anforderungen**

In diesem Arbeitspaket wurden die forstspezifischen Anforderungen an ein Wiedererkennungssystem für den Praxiseinsatz ausgearbeitet, sowie die technischen Voraussetzungen beschrieben, um eine passende Bildgebung zu gewährleisten.

Um den dafür notwendigen Aspekten gerecht zu werden (verfügbare Technologien und ihre Anwendungsbereiche, Stand der Forschung zu biometrischen Rückverfolgungssystemen und den logistischen Anforderungen), wurde im Vorfeld eine State-of-the-Art-Analyse durchgeführt und die Anforderungen für den praktischen Einsatz herausgefiltert.

##### *Teilaufgabe 2.1: State-of-the-Art-Analyse verfügbarer Technologien, Standards, Normen und Anforderungen*

Eine Liste etablierter Technologien zur Rundholz-Rückverfolgung wurde aus dem Ergebnis der Literaturrecherche und aus der Expertise der Projektpartner zusammengestellt. Weltweit sind

bereits unterschiedliche Rückverfolgungstechnologien für Rundholz in Anwendung bzw. in Entwicklung. Die meisten Verfahren zur Wiedererkennung einzelner Baumstämme werden jedoch aufgrund der zeit- und kostenintensiven Methoden nur für wertvolles Edelholz oder im Rahmen von Stichprobentests eingesetzt.

*Tabelle 4: Derzeitiger Stand der Technik zur Wiedererkennung/Rückverfolgung von Stämmen*

<b>Thema</b>	<b>Theoretisches Wissen</b>	<b>Umsetzung vom Wald bis ins Sägewerk</b>
Sprayfarbe zur Markierung	+ einfach anwendbar - es muss auf die Marke geachtet werden, da manche Produkte Treibhausgase enthalten	+ großflächige Sortierung ganzer Polter nach Sortimenten, Besitzern und Käufern - keine Rückverfolgungsmethode - fälschbar
Nummerierungsplättchen	+ wird für wertvolle Hölzer angewandt - Plastikmüll im Wald, wenn Plättchen abfallen	+ recht fälschungssicher, da Blättchen mit Firmennamen gekennzeichnet werden können - können bei Manipulierung des Holzes und beim Transport abfallen
RFID-Tag	+ Technologie ist verfügbar und wird in anderen Branchen vielseitig eingesetzt - hohe Stückzahlkosten	+ genaue Wiederfindung einzelner getaggtter Baumstämme - nicht weit verbreitet aufgrund der hohen Stückzahlkosten und vergleichbar großem Aufwand der Tag-Anbringung
DNA-Analyse (Genetischer Fingerabdruck)	+ Rückverfolgbarkeit der geographischen Herkunft ohne vorherige Markierung - Referenz-Proben aus allen Beständen notwendig	+ wird in den Tropen für Edelhölzer und zur Verifizierung der Herkunft eingesetzt, (illegaler Holzeinschlag) - zeit- und kostenaufwendig und somit nur für Stichproben anwendbar - kein Einzelbaumstamm-Kontrollmechanismus
Nachverfolgbarkeit von Stämmen und Brettern in der Produktion	- Potential ist noch nicht bekannt	+ in manchen Sägewerken bereits installiert - individuelle Rückverfolgbarkeit benötigt teure Röntgenscanner sowie Scanner für Schnittholz - nicht geeignet für kleinere Sägewerke

#### *Gesetzlicher Rahmen und Initiativen zum Rundholz-Tracking*

- FLEGT-Aktionsplan (FLEGT = Forest Law Enforcement, Governance and Trade) 2003
- EU-Holzhandelsverordnung (EUTR = European Timber Regulation) Nr. 955/2010
- Holzhandels-Sicherungs-Gesetzes (HolzSiG)

„Zur Bekämpfung des illegalen Holzeinschlags und des Handels mit Holzprodukten illegaler Herkunft wurde 2003 der FLEGT-Aktionsplan (FLEGT = Forest Law Enforcement, Governance and Trade) von der Europäischen Union (EU) beschlossen. Zur Umsetzung des Aktionsplans wurde die Europäische Holzhandelsverordnung (Verordnung (EU) Nr. 955/2010, kurz EUTR) 2010 erlassen, die das Inverkehrbringen von Holz und Holzserzeugnissen aus illegalem Einschlag in den EU-Binnenmarkt verbietet. Die EUTR ist am 3. März 2013 in Kraft getreten und wird in Deutschland durch das Holzhandels-Sicherungs-Gesetz (kurz HolzSiG) in nationales Recht umgesetzt.“ (Köthke, 2023) Mit der Technologie des Projektes könnte die Forstwirtschaft und die Sägeindustrie sicher gehen, dass nur heimisches Holz bzw. Holz aus gesicherten Herkünften genutzt wird.

#### *Teilaufgabe 2.2: Forstspezifische Anforderungen an das Rückverfolgungssystem (FVA)*

- Aufnahmebedingungen: wechselnde Lichtverhältnisse
- Positionierung: Abstand / Winkel
- Kompatibilität der Aufnahmen mit den verschiedenen Lesesystemen
- Im Echtbetrieb ist keine Zeitverzögerung tolerierbar
- Bewegungsunschärfe vermeiden
- Robustes Lesesystem
- Geringer Bedienungsaufwand ohne Fachkenntnis
- Schnittflächenveränderungen mit der Zeit aufgrund von Witterungseinflüssen

### **Arbeitspaket 2: Entwicklung Fingerprint-Verfahren für Baumstämme**

Arbeitspaket 2 diente der Entwicklung des Verfahrens zur markierungsfreien Identifikation von Stirnflächen von Baumstämmen. Dazu gehörten die Konzeption und der Aufbau der Lesesysteme (AP 2a), die Adaption des bestehenden Fingerprint-Verfahrens an Holzoberflächen (AP 2b) sowie die Entwicklung eines zweistufigen Abgleichverfahrens (AP 2c). *IPM*

#### **Arbeitspaket 2a: Entwicklung der Fingerprint-Lesesysteme**

Im Rahmen des Projekts wurden drei verschiedene Lesesystem-Typen konzipiert und aufgebaut, die im Folgenden erläutert werden.

##### Entwicklung des integrierten Lesesystems am Vollernter

Die Konstruktion des im Vollernter integrierten Lesesystems wurde in enger Abstimmung mit dem Projektpartner Firma HSM geführt. Favorisiert und umgesetzt wurde die Lösung, bei der das Lesesystem auf einen Schwenkarm montiert ist, dessen Drehachse identisch mit der des Sägeblatts ist, Abbildung 1. Das Lesesystem verlängert so das Aggregat des Vollernters.

Abbildung 2 zeigt die Konstruktion des Lesesystems. Das Gehäuse ist eine Stahlschweißkonstruktion mit ca. 10 mm starker Wandung. Die Kamera (Typ Manta Mako G-811 mit Ricoh-Objektiv FL-BC1618-9M) wurde mit Blickrichtung entlang der Längsseite des Messarms eingebaut und wird

über einen Umlenkspiegel auf die Stirnfläche gerichtet. Dadurch minimiert sich die Aufbauhöhe und somit die Verlängerung des Aggregats. Zur Belichtung wurde ein LED-Ring des Typs IIMag Lumimax CRC100FL-W verbaut.

Der Abstand von Kamera zur Stirnfläche beträgt 230 mm. Die bildseitige Pixelauflösung der Aufnahme beträgt 110  $\mu\text{m}$ .

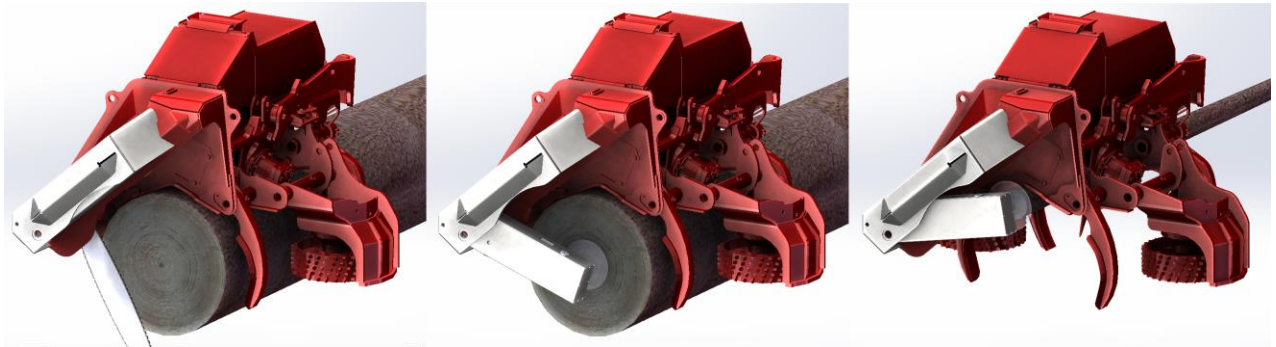


Abbildung 1: Das Konzept der Erzeugung der Stirnflächenaufnahmen am Vollernter. Die Drehachse des Lesesystems ist identisch mit der des Sägeblatts des Vollernter-Aggregats.

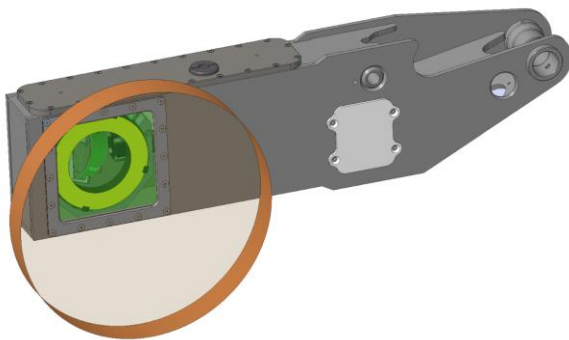


Abbildung 2: Das integrierte Lesesystem am Vollernter. Links die Konstruktionszeichnung, die die Vorderseite mit Sichtfenster der Kamera zeigt. Rechts das am Aggregat montierte Lesesystem mit Blick auf dessen Rückseite.

Ergänzend zum Lesesystem wurde ein Programm zur Steuerung der Kamera entwickelt. Dieses läuft auf einem Windows-PC, der Schnittstellen zum CAN-Bus-System des Vollernters und zur Kamera selbst hat. Das Signal, das das Ausschwenken des Lesesystems auslöst, wird über den CAN-Bus abgefangen. Im Anschluss wird das Signal zur Bildaufnahme an die Kamera gesendet. Die Parametrisierung für die Bildaufnahme kann in der Software vorgenommen werden.

Diskutiert wurde mit HSM ebenfalls die Möglichkeit, den Umfang des jeweils verarbeiteten Baumstamms über die Sensorik des Vollernters zu ermitteln und so den korrekten Ausschwenkwinkel des Lesesystems zu bestimmen. Das Vorgehen stellte sich als zu aufwändig heraus. Stattdessen wurde eine einfachere Lösung verwendet: Über das Programm zur Kamerasteuerung kann eine Anzahl von Aufnahmen und deren Intervalle festgelegt werden. Auf diese Weise werden für jede Stirnfläche mehrere Aufnahmen erzeugt, von denen die mit der geeignetsten Positionierung weiterverwendet wird.



Neben dem eigentlichen Lesesystem wurde ein weiteres, leeres Gehäuse gefertigt, das HSM vor der Montage für Vorbereitungen am Aggregat zur Verfügung gestellt wurde. Die Montage des Messkopfs wurde in einem zweitägigen Termin im Oktober 2022 bei der Firma HSM in Wolfegg durchgeführt (AP 3b).

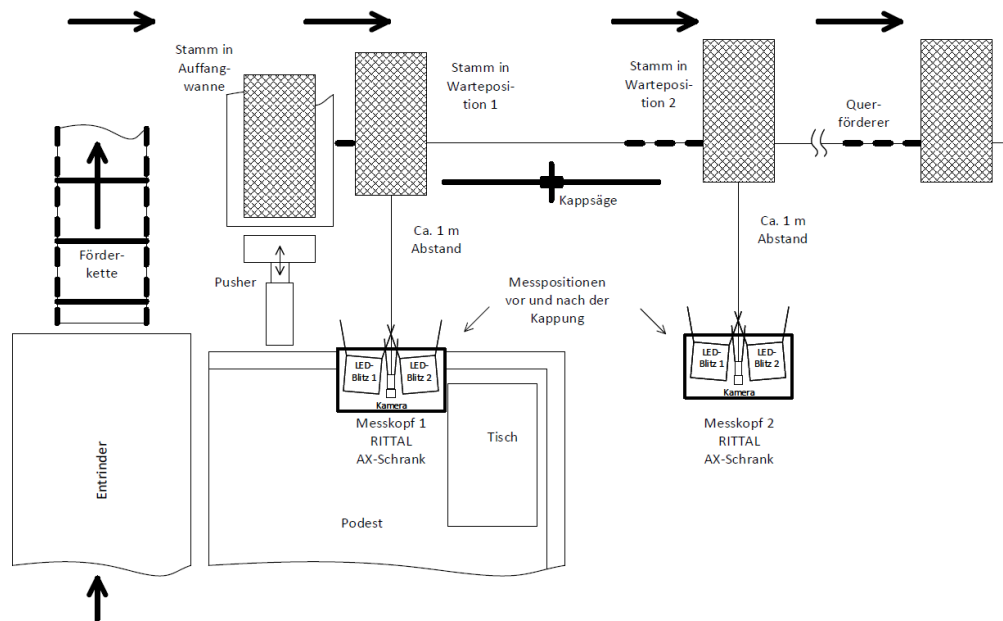
Das hier gefertigte Lesesystem hat sich während des Projekts als zuverlässig und zweckdienlich erwiesen und die gewünschten Ergebnisse geliefert. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass ein Vollernter-Lesesystem, das unter Produktionsbedingungen eingesetzt werden soll, hinsichtlich seiner Handhabbarkeit einiger Verbesserungen bedarf (siehe Verwertung).

#### Entwicklung des Lesesystems im Sägewerk

Die Konstruktion der Lesesysteme für den Einsatz im Sägewerk erfolgte nach Besichtigung der Gegebenheiten vor Ort (AP 5a). Zur Positionierung des Lesesystems entschied man sich für den Rundholzplatz, an dem der Verarbeitungsprozess für angeliefertes Holz einer bestimmten Länge beginnt. Im ersten Schritt erfolgt das Entrinden des Wurzelanlaufs des Baumstamms. Anschließend wird der Baumstamm an einer Kappsäge entlanggeführt, die eine ca. 10 cm starke Scheibe des Stamms abtrennt. Ursprünglich und laut Vorhabensbeschreibung war die Entwicklung eines einzelnen Lesesystems für das Sägewerk geplant. Um neben der Rückverfolgbarkeit der Stirnflächen auch die Veränderungen dieser durch den Kappschnitt untersuchen zu können, wurde beschlossen, ein zweites Lesesystem unmittelbar nach der Kappsäge anzubringen. Abbildung 3 stellt eine Skizze des Rundholzplatzes und der Anordnung der Kameras dar. Die beiden installierten Lesesysteme bestehen aus den folgenden Komponenten:

- Einem Rittal-AX-Wandschrank
- Zwei Blitzern des Typs Smart Vision XR-256-530-14 (rot, mit  $\pm 14^\circ$  Abstrahlwinkel)
- Einer Kamera des Typs AVT Manta G-2460B mit Ricoh-Objektiv FL-BC1618-9M
- Einer Lichtschranke Sick WTT12L-B2531

Der Abstand zwischen den Kameras und den aufzunehmenden Stirnflächen beträgt jeweils ungefähr einen Meter. Die Pixel-Auflösung beträgt  $158\text{ }\mu\text{m}$  vor der Kappsäge beziehungsweise  $182\text{ }\mu\text{m}$  nach der Kappsäge.



Messanordnung-im-Sägewerk.pdf 20.01.2022 M. Seib

**Abbildung 3:** Die Anordnung der Lesesysteme im Sägewerk. Die Baumstämme kommen am Entrinder (links) an und werden anschließend auf einen Querrörderer gelegt. Hier wird der Baumstamm durch einen Pusher nach hinten gedrückt, sodass alle Stirnflächen denselben Abstand zur ersten Kamera haben.

Beide Lesesysteme wurden jeweils mit einem Rechner verbunden. Die Bedienung der Kameras erfolgte über die Kamera-Software AVT Vimba Viewer. Zudem waren beide Rechner per TeamViewer erreichbar, sodass Messreihen auch per Fernwartung gestartet werden konnten.

Das Auslösen der Kameras über die in den Lesesystemen verbauten Lichtschranken stellte sich in ersten Versuchen als ungeeignet heraus. Unter anderem lösten herumfliegende Sägespäne Falschmessungen aus. Infolgedessen wurden an der Unterseite des Querrörderers für beide Lesesysteme je ein Drehschalter angebracht, die von den zur Baumstammführung angebrachten Mitnehmern ausgelöst werden.

Montage und Justierung der Lesesysteme fanden in mehreren Terminen zwischen Februar und Oktober 2022 statt (AP 3a). Abbildung 4 zeigt das montierte zweite Lesesystem.



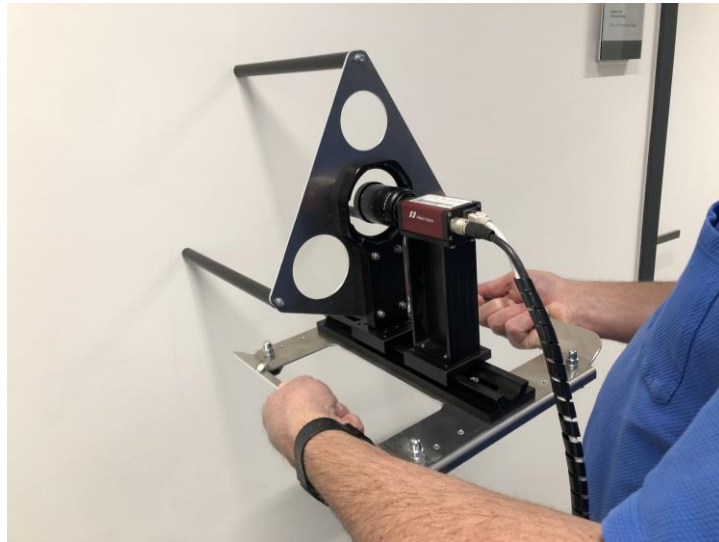
*Abbildung 4: Das Lesesystem an der zweiten Position im Sägewerk nach der Kappsäge. Links die Vorderseite des Aufbaus. Zu sehen sind zwei LED-Blitzer und das Objektiv der Kamera. Rechts die Rückseite des Aufbaus.*

#### Entwicklung des handgehaltenen Lesesystems

Im Rahmen von AP 2d wurde die Rückverfolgung von Stirnflächen mit einer Smartphone-Optik untersucht. Es stellte sich heraus, dass dies grundsätzlich möglich ist. Als deutlich bessere Lösung zur mobilen Identifizierung erwies sich der Aufbau eines handgehaltenen Lesesystems. Bei diesem erfolgt die Belichtung über ein LED-Ringlicht, wodurch die Aufnahmequalität deutlich robuster gegenüber wechselnden Lichtverhältnissen ist, als sie es bei einer Smartphone-Lösung gewesen wäre.

Für das handgehaltene Lesesystem wurde eine Kamera vom Typ AVT Manta G-1236 mit einem Ricoh-Objekt FL-BC 1618-9M verwendet. Das Lesesystem wurde mit drei Abstandsstäben versehen, sodass der Arbeitsabstand gleichbleibend eingehalten werden kann. Die bildseitige Pixelauflösung beträgt 123  $\mu\text{m}$ . Zur Belichtung wurde der oben angesprochene LED-Ring verwendet.

Abbildung 5 zeigt das handgehaltene Lesesystem. Die Bedienung der Kamera erfolgt über einen daran angeschlossenen PC und die Kamera-Software AVT Vimba Viewer.



*Abbildung 5: Das handgehaltene Lesesystem zum Erzeugen von Aufnahmen gepolterter Baumstämme.*

In Abbildung 6 sind exemplarische Aufnahmen einer einzelnen Stirnfläche mit den drei Lesesystemen gezeigt. Die Abbildungsmaßstäbe der Aufnahmen unterscheiden sich deutlich. Die Positionierung der Markröhre bei der Vollernter-Aufnahme befindet sich nicht in der Mitte des Bildes, was daran liegt, dass die Baumstämme unterschiedliche Durchmesser aufweisen und die Kamera aufgrund der provisorischen Automatisierung der Bilder nicht immer in der gleichen Position aufnimmt.

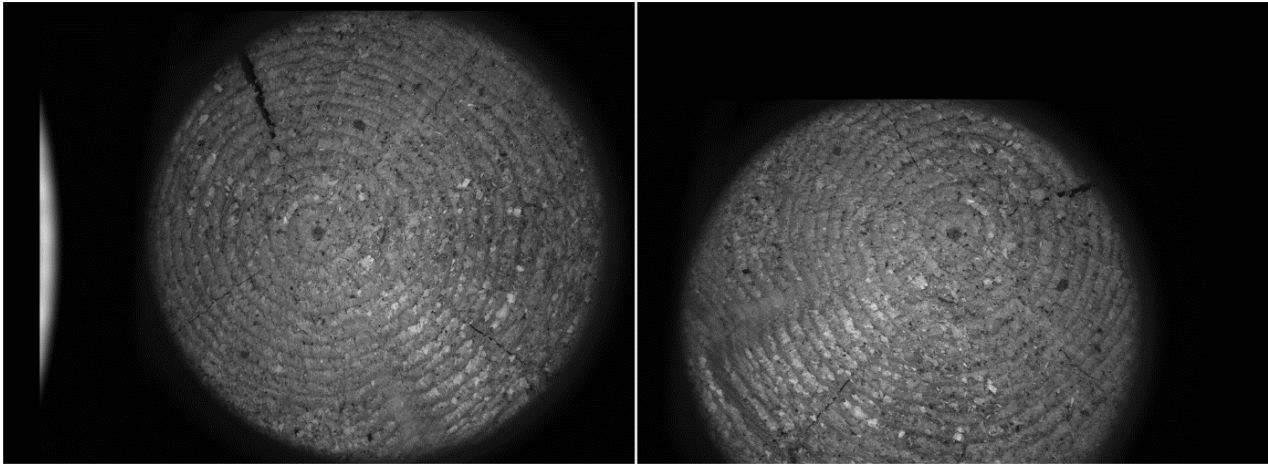
*IPM*



*Abbildung 6: Exemplarische Aufnahmen derselben Baumstamm-Stirnfläche im Vergleich der drei Lesesysteme. Von links nach rechts: Vollernter (Pixelauflösung 110  $\mu\text{m}$ ), Polter (123  $\mu\text{m}$ ), Sägewerk (158  $\mu\text{m}$ ).*

## **Arbeitspaket 2b: Adaption des Fingerprint-Algorithmus für Baumstämme**

Erste Untersuchungen zur generellen Tauglichkeit des bestehenden Fingerprint-Algorithmus zur Rückverfolgung von Baumstamm-Stirnflächen wurden im ersten Projektzwischenbericht für das Jahr 2021 dargestellt. In zwei Durchgängen wurden jeweils 28 Stirnflächen aufgenommen, wobei die Ausrichtungen aller Stirnflächen zwischen den Durchgängen geändert wurde. Die Aufnahmen erfolgten unter Laborbedingungen. Die Markröhren der Stirnflächen wurden anschließend in jeder Aufnahme in die Bildmitte transformiert. Abbildung 7 zeigt diese Transformation am Beispiel einer Stirnfläche.



*Abbildung 7: Zwei Aufnahmen derselben Stirnfläche nach manueller Transformation der Markröhre. Links Durchgang 1, rechts Durchgang 2. Die Aufnahmen wurden unter Laborbedingungen mit einem provisorischen Kamera-Aufbau erzeugt.*

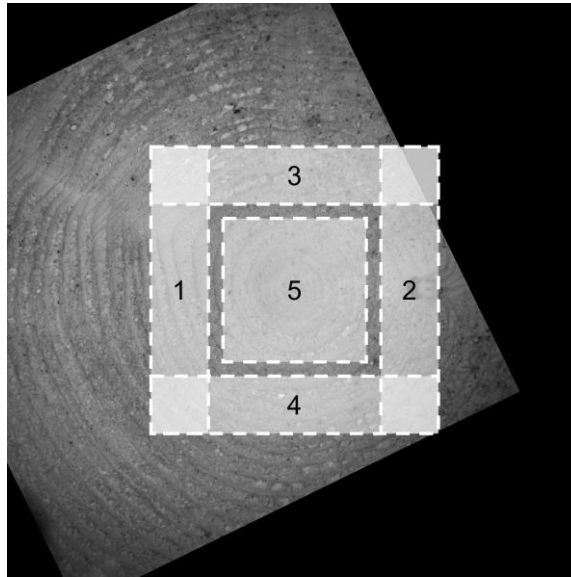
Mit dem ersten Aufnahmedurchgang wurde eine Referenzdatenbank erzeugt, in der jede der 28 Stirnflächen als ein Datenbankeintrag mit je einem Fingerprint repräsentiert wurde.

Zur Identifizierung wurden die Aufnahmen aus dem zweiten Aufnahmedurchgang verwendet. Da sich die Ausrichtungen der Stirnflächen in diesem Durchgang von denen im ersten Durchgang unterschieden, wurden für jede Aufnahme mehrere Fingerprints in 3°-Rotationsschritten (Rotationsvariation) um die Bildmitte beziehungsweise um die Markröhre erzeugt. Beim Vergleich der Fingerprints einer Aufnahme des zweiten Durchgangs mit einem Referenzdatenbankeintrag wird die Fingerprint-Kombination gewählt, die die höchste Übereinstimmung hat. Diese wird als Ähnlichkeit der zu identifizierenden Stirnfläche mit dem jeweiligen Referenzdatenbankeintrag angenommen. Auf diese Art wurden die zu identifizierenden Stirnflächen jeweils mit allen 28 Referenzdatenbankeinträgen verglichen.

Alle 28 Stirnflächen konnten mit sicheren Wiedererkennungswerten ihren Aufnahmen aus dem ersten Durchgang zugeordnet werden. Die Untersuchung zeigte, dass sich der Fingerprint-Algorithmus grundsätzlich eignet, die Stirnflächen einander zuzuordnen. Die Methode stützt sich dabei weniger auf für den Menschen gut unterscheidbare Merkmale wie Jahresringe, Risse, Astansätze oder großflächige Verschmutzungen. Stattdessen sind Mikrostrukturen wie Holzfasern, Späne oder kleine Schmutzpartikel ausschlaggebend für die Identifizierung.

Für den Einsatz unter Realbedingungen musste das Fingerprint-Verfahren dahingehend angepasst werden, robuster gegen Veränderungen der Oberfläche zu sein, die sich aus Transport und Lagerung der Baumstämme ergeben. Die Strategie, einen einzelnen Fingerprint-Bereich der Stirnfläche zu erzeugen, ist nicht zielführend, den unvorhersehbaren Veränderungen der Stirnfläche zu begegnen. Stattdessen wurden pro Aufnahme mehrere Fingerprints in kleineren Bildbereichen (Region of Interest, ROI) generiert. Die Idee dahinter ist, dass es mindestens eine ROI gibt, die unverändert ist. Beim Vergleich zweier Stirnflächen wird die ROI verwendet, deren Fingerprints die

höchste Ähnlichkeit zueinander aufweisen. Dieser Ansatz lässt sich ebenfalls mit dem oben beschriebenen Ansatz der Rotationsvariation kombinieren. Abbildung 8 zeigt die beispielhafte Aufteilung einer Stirnflächenaufnahme in fünf separate ROIs. *IPM*



*Abbildung 8: Beispiel einer Stirnflächenaufnahme und deren Aufteilung in fünf ROIs, in denen die Fingerprints berechnet werden.*

### **Arbeitspaket 2c: Weiterentwicklung des Abgleichverfahrens**

Aufgrund der Ungenauigkeit der Transformation der Stirnflächen anhand ihrer Markröhren, wird neben der Rotationsvariation für jeden Rotationsschritt eine weitere Variation in x/y-Richtung für das Fingerprint-Verfahren benötigt. Dadurch erhöht sich der Rechenaufwand für die Identifizierung einer Stirnfläche.

Um die Identifizierung einer Stirnfläche zu beschleunigen, wurde ein Convolutional Neural Network (CNN) entwickelt, das geeignete Stirnflächenkandidaten vorselektiert, die dann zum Feinabgleich per Fingerprint verwendet werden. Dadurch müssen beim Fingerprint-Abgleich deutlich weniger Stirnflächen in Betracht gezogen werden, was die Abgleichdauer reduziert.

Die Schwellwerte der Erkennungssicherheit des Fingerprint-Abgleichs wurden so gewählt, dass erst ab einer Kandidatenanzahl im hohen sechsstelligen Bereich eine Verwechslung durch einen zufällig ähnlichen Kandidaten theoretisch möglich werden könnte. Da sich durch die Vorselektion per CNN die Anzahl der am Fingerprint-Abgleich beteiligten Kandidaten auf eine allerhöchstens zweistellige Anzahl reduziert, wird die Möglichkeit einer solchen Verwechslung quasi ausgeschlossen.

Bei dem erarbeiteten CNN handelt es sich um ein Siamese Neural Network, das auf der Architektur des Inception-V3-Netzwerks, einem Klassifizierungsnetzwerk, basiert. Die Architektur wurde um zwei weitere Schichten ergänzt, wobei die letzte dieser beiden Schichten einen Feature-Vektor mit 128 Fließkommawerten erzeugt. Die vortrainierten Gewichtungen des Klassifizierungsnetzwerks wurden übernommen. Die beiden hinzugefügten Schichten wurde mit Paaren vorverarbeiteter

Stirnflächenaufnahmen trainiert. Dabei wurde dem Netzwerk mitgeteilt, ob es jeweils Aufnahmen derselben Stirnfläche oder unterschiedlicher Stirnflächen sieht. Auf diese Weise erzeugt das Netzwerk für zwei unterschiedliche Aufnahmen derselben Stirnfläche ähnliche Feature-Vektoren mit geringer Distanz zueinander. Abbildung 9 zeigt ein Trainingsbeispiel des Netzwerks mit stark vereinfachter Darstellung der Netzwerk-Architektur.

Im Gegensatz zum Fingerprint und bedingt durch die Verwendung eines Klassifizierungsnetzwerks als Bestandteil des CNNs beeinflussen vor allem Merkmale den Feature-Vektor, die je nach Stirnfläche in unterschiedlicher Ausprägung und Anzahl vorhanden sein können. Dies können beispielsweise die Größe und Anzahl von Astansätzen oder die Form der Jahresringstruktur sein.

Die Identifizierung einer unbekannten Baumstamm-Stirnfläche innerhalb einer Datenbank bereits erfasster Stirnflächen erfolgt in einem zweistufigen Verfahren:

1. Es erfolgt eine Vorselektion von zehn ähnlichen Kandidaten. Dazu werden die durch das CNN erzeugten Feature-Vektoren der zur identifizierenden Stirnfläche mit den Feature-Vektoren der in der Datenbank befindlichen Objekte verglichen. Es wird eine Rotationsvariation, ähnlich der in AP 2b beschriebenen, verwendet, um die Kandidaten mit der besten Übereinstimmung zur gesuchten Stirnfläche zu ermitteln und in die Vorselektion zu übernehmen.
2. Die Fingerprints der zu identifizierenden Stirnfläche werden mit den Fingerprints der in der Datenbank befindlichen Fingerprint-Einträge abgeglichen. Das Ergebnis des Fingerprintabgleichs ist gleichzeitig die identifizierte Stirnfläche. Damit das Ergebnis eines Abgleichs als sicher gilt, müssen zwei statistische Schwellwerte (Sicherheitswerte 1 und 2) überschritten werden. *IPM*



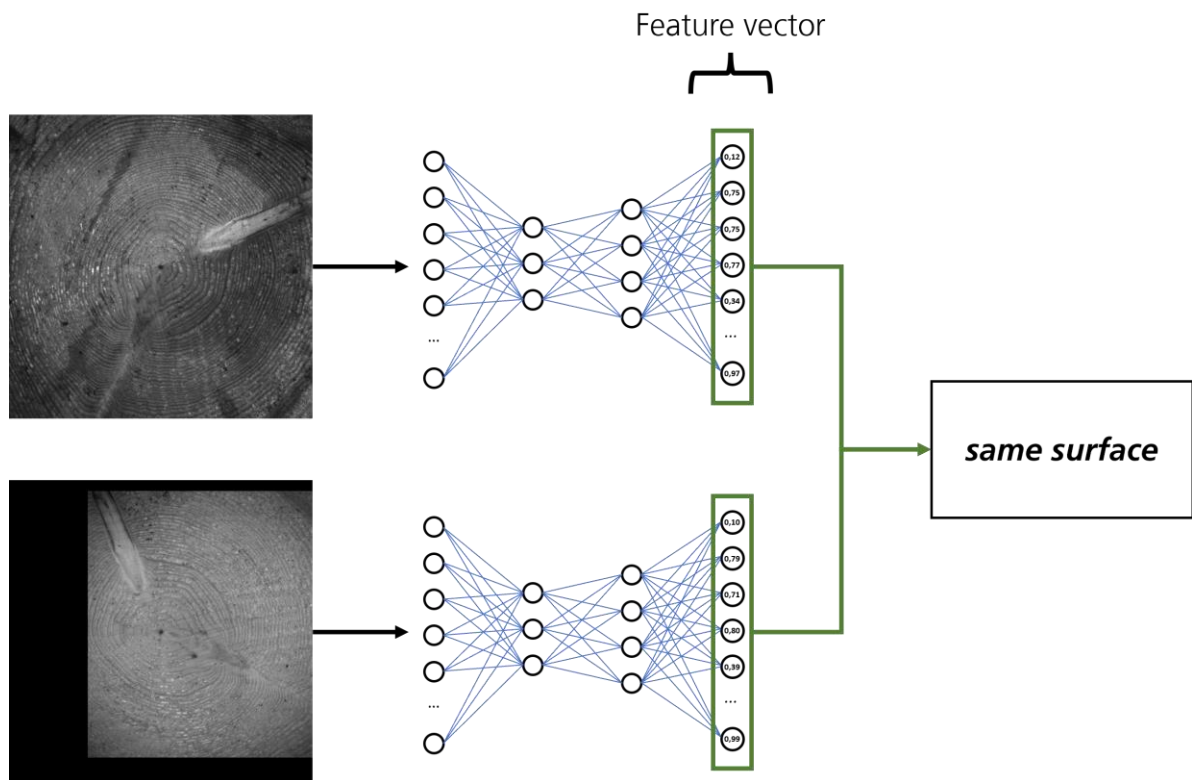


Abbildung 9: Ein Trainingsbeispiel des CNNs. Ein Aufnahmepaar, das dieselbe Stirnfläche zeigt und mit „same surface“ gelabelt ist, wird in das Netzwerk gegeben. Die letzte Ebene stellt den 128 Werte-langen Feature-Vektor dar. Die beiden Feature-Vektoren ähneln sich in diesem Fall, beziehungsweise haben eine geringe euklidische Distanz zueinander.

### Arbeitspaket 2d: Fingerprint-Smartphone-App

Bei Testaufnahmen von Stirnflächen mit dem Smartphone stellte sich heraus, dass die Smartphone-Kamera in der Lage ist, Bilder mit ausreichend Kontrast und Auflösung für die Fingerprint-Identifizierung zu erzeugen. Allerdings lässt sich mittels Smartphone das Umgebungslicht ohne Zusatzbeleuchtung nicht vollständig unterdrücken. So kommt hier ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor hinzu.

Um die Rückverfolgung mittels eines handgeführten Lesesystems zu untersuchen, wurde daher beschlossen, ein weiteres Lesesystem aufzubauen (siehe AP 2a). *IPM*

### Arbeitspaket 3: Systemintegration in Forstmaschinen und Sägewerk

Hierbei wurde die technische Integration des Fingerprint-Demonstrator-Lesesystems in die relevante Forstmaschine sowie auf den Rundholzplatz des Sägewerkes geplant. *ForstBW*

### Arbeitspaket 3a: Adaption Sägewerk

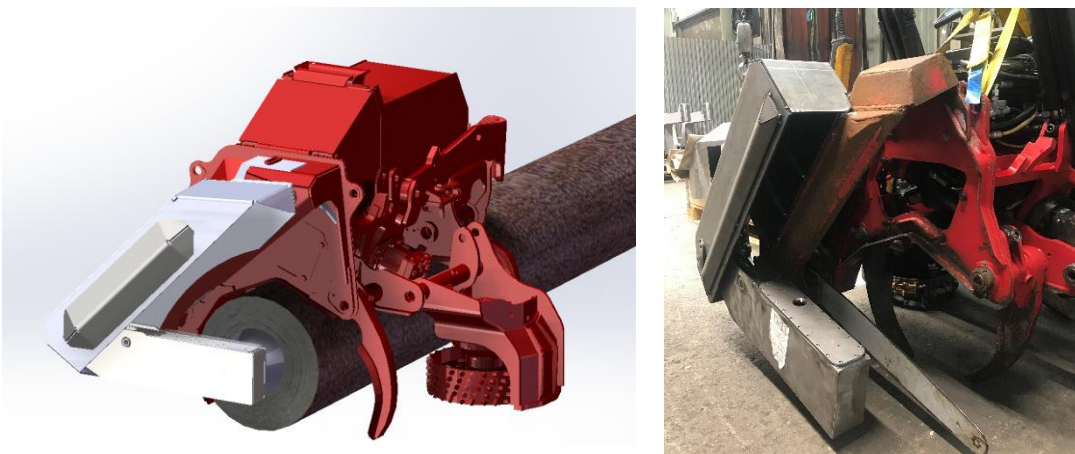
Technische Integration der entsprechenden Kameratechnik von IPM nach entsprechender Anbringung von Halterungen am Rundholzplatz im Sägewerk der Firma STREIT. Anbringung eines Lichtschrankensystems zur passgenauen Auslösung der Kameras für die Aufnahmen der



Stammquerschnitte. Vorbereitende Probeaufnahmen zur Justierung und optimalen Positionierung der Kameras. Implementierung eines externen Serversystems zur Datenspeicherung durch die EDV - Abteilung im Sägewerk STREIT. Zunächst Versuchsaufnahmen aus dem laufenden Betrieb des Sägewerk STREIT, um die Einstellung von Kameras und technischen Equipment für die Bildaufnahmen der Stammquerschnitte zu optimieren. Rundholzabfuhr der von der FVA / IPM / ForstBW präparierten Stammabschnitte aus dem Wald durch die für Rundholztransporte spezialisierte Spedition MAIER. Zur zeitlichen Optimierung erfolgte zunächst eine Ablage in entsprechend vorbereiteten Zwischenboxen. Spätere Aufgabe der präparierten Stammabschnitte am Rundholzplatz wieder durch die Spedition MAIER mit gleichzeitiger Erfassung / Identifikation der im Wald angebrachten Stammnummern durch die Mitarbeiter von FVA / IPM / ForstBW. Daran anschließende Aufnahme der Stammquerschnitte bzw. Erhebung der dazu gehörenden Vermessungsdaten durch die Kameras von IPM bzw. der Vermessungstechnik im Sägewerk STREIT. *Streit*

### **Arbeitspaket 3b: Fingerprint Systemintegration in die Forstmaschine**

Die Systemintegration der Kameratechnik in die Forstmaschine umfasste die Adaption des Vollernters, spezifisch des Harvesterkopfes, wozu das System sowohl hardwareseitig am Harvesterkopf als auch softwareseitig in Kopf und Vollernter integriert werden muss. Hierzu wurde zuerst eine Auslegung und Berechnung der Kamerabahn vorgenommen, um durch das Schwenken des Kameraauslegers nach einem Schnitt eine möglichst geringe Abweichung des Blickkegel-Mittelpunkt vom jeweiligen Stammmittelpunkt zu erreichen, vgl. Abbildung 10. Das Gehäuse wurde nach den Fertigungszeichnungen gefertigt. Dies wurde als Schweißkonstruktion ausgeführt, um hier möglichst zeiteffizient fertigen zu können.



*Abbildung 10: Kamerasystem im CAD am PC und in der Fertigung*

Im Anschluss wurde die Verschlauchung mit Hydraulikschläuchen vorgenommen sowie das neue Steuergerät des Kopfes im Kopf montiert. An dieses wurden die neu montierte Verkabelung zu den Sensoren und Aktoren angeschlossen. Durch eine hydraulische Lösung konnte die Aus- und

Einfahrtgeschwindigkeit des Kameraarms variabel eingestellt werden, wodurch auch harte Stöße beim Einfahren vermieden wurden.

Es wurde ein Datenkabel von der Harvesterkabine zum Kameramodul über den Kran verlegt. Hierzu wurde ein spezielles Hybridkabel verwendet, in welches direkt die Stromversorgung, Masse und Ethernet integriert ist. V.a. letzteres bedeutete einen enormen Aufwand in der Verkabelung und Inbetriebnahme, da derart sensible Datenkabel spezielle Steckverbindungen für den sehr rauen forstlichen Einsatz erfordern. Aus diesem Grund sollte dieses Konzept zukünftig optimiert werden.

Die Software des Harvesterkopfes wurde auf den neuen, von HSM modifizierten und um neue Sensoren erweiterten Harvesterkopf angepasst, damit die vom Harvesterkopf-Hersteller nicht vorhergesehene Funktionen in den Harvesterkopf und dessen Hydrauliksystem integriert werden konnten.

Zusätzlich wurde die Software der HSM-Maschinensteuerung modifiziert, um die Kamera anzu steuern. Zeitgleich ist damit ein Triggersignal für die Auswertung der Kamerabilder gegeben, da dieses Signal bei Verwendung der Kamera mit einem Zeitstempel versehen aufgezeichnet werden kann. Abbildung 11 zeigt das am Harvester montierte System. *HSM*



*Abbildung 11: Am Harvester montierter Harvesterkopf mit Kameraarm*

### **Arbeitspaket 3c: Adaption Tragschlepper**

Die Adaption des Kamerasystems in einen Tragschlepper (AP3c) wurde im Konsortium verworfen. Da die Baustämme mit einem Tragschlepper auf verschiedene Seiten (dick- und dünnendig) manipuliert werden, konnte man hierbei nicht von einer sicheren Wiedererkennung ausgehen. *ForstBW*

#### **Arbeitspaket 4: Digitalisierung der forstwirtschaftlichen Prozesse**

Die ursprünglich geplante Zusammenführung der Daten aller Projektpartner erschien aus analysetechnischen Gesichtspunkten nicht zielführend, da die Wiedererkennungssoftware bis Projektende noch weiterentwickelt wurde und noch nicht in eine Ziel-IT-Infrastruktur eingebettet werden konnte. Die Zusammenführung der Einzelstammbasierten Daten aus der Vollernter-Software und dem Vermessungssystem des Sägewerks mit den Fingerprint-Informationen wurde jedoch exemplarisch durchgespielt. Die Schnittstelle zur Vollernter-Software kann zu diesem Zeitpunkt jedoch noch nicht gewährleistet werden, weshalb der Zugriff auf die Vollernter-Maschinendaten (im StandforD-Format) in Echtzeit nicht möglich ist. *FVA*

#### **Arbeitspaket 5: Demonstration im Feld**

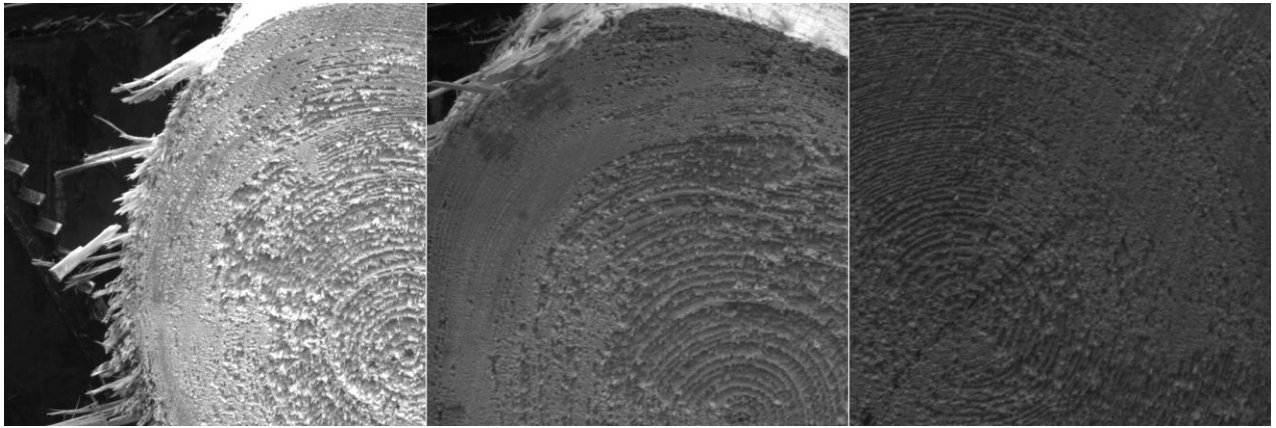
An diesem Arbeitspaket waren alle Projektpartner beteiligt. Hierbei wurde die komplette Wertschöpfungskette von der Ernte der Bäume mit einem Vollernter, über die Polterung mit einem Tragschlepper, den Transport mit einem Holztransporter und die Einlieferung und optische Wiedererkennung im Sägewerk abgebildet. Es wurden wie geplant optische Aufnahmen mit dem Harvesterkopf direkt bei der Ernte, mit dem Handlesegerät am Polter und mit den Kameras am Rundholzplatz durchgeführt. *ForstBW*

#### **Arbeitspaket 5a: Vorversuche**

In Vorbereitung der produktionsbegleitenden Messkampagne („Hirschkopf-Messkampagne“) im November 2022 und der Entwicklung des Abgleichverfahrens fanden verschiedene Vorversuche statt. Eine erste Messkampagne im Sägewerk Streit wurde im Juli 2021 durchgeführt. Dabei wurden Aufnahmen an drei Stationen durchgeführt:

- Eine Aufnahme unmittelbar nach der Entrindung bevor der Kappschnitt am Stammende erfolgt
- Eine Aufnahme unmittelbar nach dem Kappschnitt
- Eine Aufnahme auf dem Längsförderer zur Vermessungsstation

Alle Aufnahmen wurden zur Auslegung und Validierung des angestrebten Ansatzes verwendet. Es stellte sich dabei heraus, dass ein exaktes Auslösen der Kameras sowie eine gegenüber äußeren Einflüssen robuste Belichtung notwendig sind. Die Erkenntnisse aus den Vorversuchen flossen in die Entwicklung der Lesesysteme (AP 2a) ein.



*Abbildung 12: Beispielaufnahmen von drei verschiedenen Stirnflächen mit den provisorischen Sägewerk-Lesesystemen aus dem Juli 2021. Die Aufnahmen erfolgten nach dem Kappschnitt. Obwohl die Stirnflächen frisch geschnitten sind, schwankt die Helligkeit der Aufnahmen stark, was daran liegt, dass das Umgebungslicht einen zu starken Einfluss hatte. Das Auslösen der Kameras erfolgte manuell, was dazu führte, dass die Positionierung der Stirnflächen unzureichend ist.*

Die Vorversuche für die Entwicklung des Vollernter-Lesesystems und des handgehaltenen Lesesystems erfolgten hauptsächlich unter Laborbedingungen. Das Vollernter-Lesesystem konnte im Labor vollständig aufgebaut werden, um probeweise Aufnahmen von Stirnflächen durchzuführen. Das Vorgehen ermöglichte die Justierung des Systems, bevor die Montage am Vollernter-Aggregat erfolgte (AP 3b). *IPM*

#### **Arbeitspaket 5b: mechanisierte Holzernte**

ForstBW hat den Waldstandort und das entsprechende Material, gefällte Bäume (Fichten) zur Verfügung gestellt. Anders als im Projektantrag beschrieben, wurden bereits gefällte Bäume fotografiert, markiert und abtransportiert. Die ausgewählte Harvestermaschine von ForstBW war unterdimensioniert für die ausgewählten Bäume. Zusammen mit dem integrierten Kamerasystem am Vollernterkopf war der Arm zu schwer um die ausgewählten Bäume direkt mit dem Harvester zu ernten, von daher wurden diese vorweg von ForstBW eigenen Waldarbeitern gefällt. *ForstBW*

Nach der Erstinbetriebnahme des Harvesteraggregates wurden umfangreiche Vorversuche durch HSM durchgeführt, um die volle Funktionsfähigkeit des Systems zu testen und zu gewährleisten. Hierzu wurden in einer Laborumgebung die Basiseinstellungen des Harvesterkopfes vorgenommen. Anschließend wurden durch das Fraunhofer IPM erste Justierungen von Parametern zur Bildaufnahme vorgenommen. Abbildung 13 zeigt die Laborumgebung im Vorversuch.



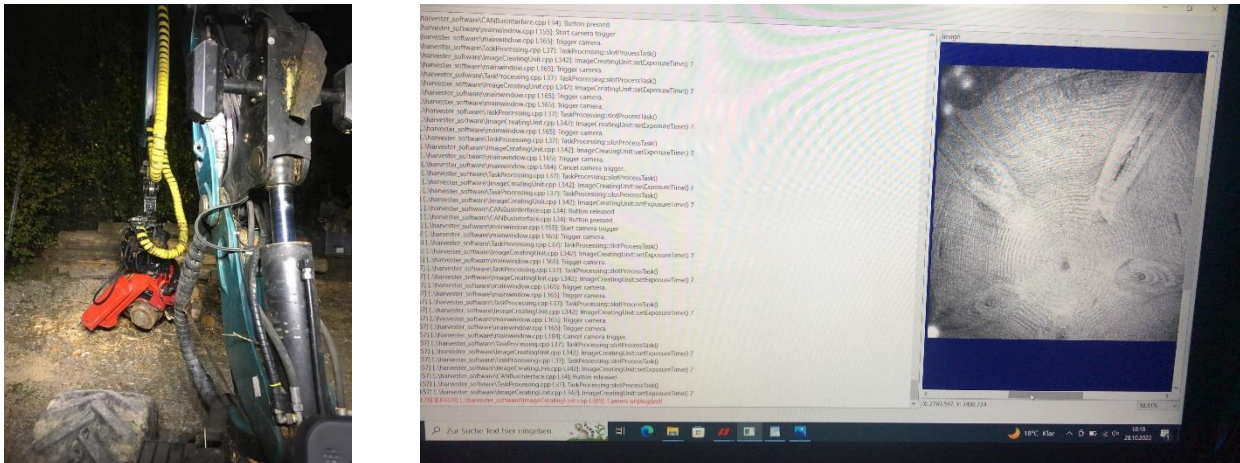


Abbildung 13: Vorversuche unter Laborbedingungen bei HSM

Nach der Inbetriebnahme des Kopfes im Forst und den dafür notwendigen Kalibrierungseinstellungen für die korrekte Länge und Durchmesser der Stammabschnitte konnte der Versuch gestartet werden. Hierdurch wurde sichergestellt, dass das eingeschnittene Holz einer Verarbeitung im Sägewerk zugeführt werden konnte. *IPM*

### Arbeitspaket 5c: manuelle Holzernte

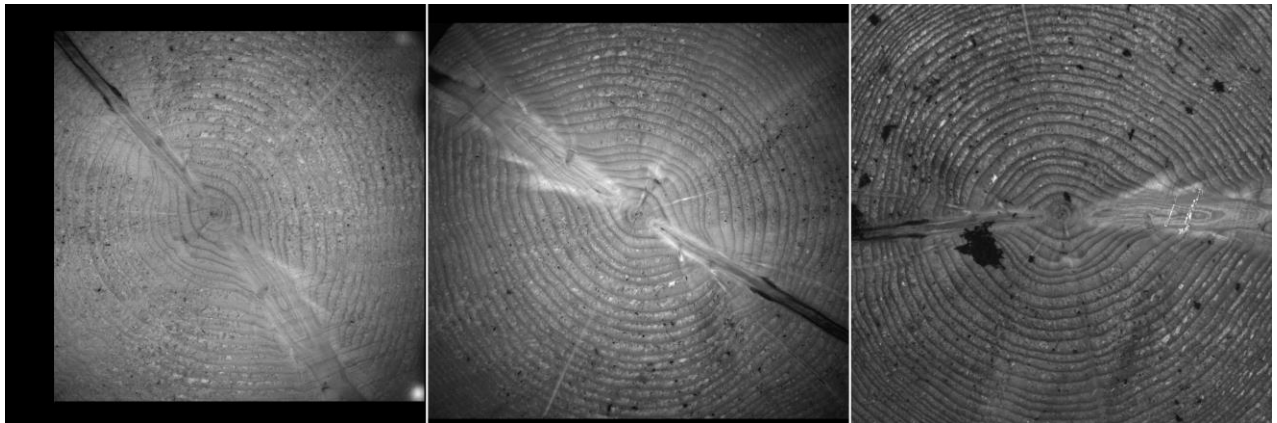
Dieses Arbeitspaket wurde im Konsortium verworfen, da eine Appanwendung für das Smartphone nicht möglich war. Während der Aufnahmen wurde das handgehaltene Lesegerät genutzt, welches an einen Laptop und einen Generator angeschlossen werden musste, dies kann man den Waldarbeitern nicht zumuten. Sobald es möglich ist, die Anwendung über ein Smartphone zu nutzen, ist es durchaus denkbar, dass in Zukunft jeder Forstwirt zusätzlich eine fotooptische Aufnahme seines gefällten Baumstammes macht. *ForstBW*

### Arbeitspaket 5d: Rückverfolgung im Sägewerk

Für die Untersuchung der Rückverfolgbarkeit der Stirnflächen wurden die in der Hirschkopf-Messkampagne erzeugten Datensätze verwendet. Die Wiedererkennung wurde in den drei möglichen Schritten der Produktionskette ausgewertet. Dabei ist der Schritt von Vollernter zu Sägewerk der schwierigste, da zwischen diesen beiden Stationen die größtmögliche Beeinflussung durch Transport und Lagerung auf das Holz wirkt.

Da die Aufnahmen mit drei unterschiedlichen Lesesystemen erzeugt wurden, mussten die Aufnahmen einander angeglichen werden. Dazu wurden alle Aufnahmen mit einer Annotation der Markröhre versehen und diese in die Bildmitte verschoben. Für eine Automatisierung des Verfahrens muss dieser Schritt automatisiert erfolgen. Die Unterschiede der Abbildungsmaßstäbe der drei Systeme wurde durch Skalierung der Aufnahmen ausgeglichen. Die Rotation der Stirnflächen wurde nicht (manuell) angepasst, sodass die in AP 2b und 2c beschriebene Rotationsvariation

angewendet werden musste. Abbildung 14 zeigt die vorverarbeiteten Aufnahmen der in Abbildung 6 dargestellten Stirnfläche an den drei Stationen Vollernter, Polter und Sägewerk.



*Abbildung 14: Die vorverarbeiteten Aufnahmen einer Stirnfläche der Hirschkopf-Messkampagne. Die Skalierung wurde angeglichen und die Markröhre jeweils in die Bildmitte transformiert. Helligkeit, Bildausschnitte und Orientierung der Stirnflächen variieren.*

Das in AP 2c erarbeitete zweistufige Abgleichverfahren wurde eingesetzt, um die Wiedererkennungsraten zu ermitteln. Im Rahmen der Hirschkopf-Messkampagne wurden Aufnahmen von insgesamt 659 Stirnflächen erhoben. Davon mussten 20 Stirnflächen aussortiert werden, bei den aufgrund logistischer und/oder technischer Probleme nicht an allen drei Stationen je eine Aufnahme erzeugt werden konnte. Die Aufteilung der 639 zur Verfügung stehenden Stirnflächen in CNN-Trainingsdaten und Testdaten erfolgte so, dass 65 Stirnflächen für den Test zur Verfügung standen.

Bei drei möglichen Vergleichen ergaben sich insgesamt 195 Identifizierungen von Stirnflächen. Lediglich eine Identifizierung beim Schritt Vollernter zu Polter schlug fehl. Grund hierfür war, dass die gesuchte Schnittfläche bei der Vorselektion durch das CNN nicht mit in den Fingerprint-Abgleich übernommen wurde.

*Tabelle 5: Die Ergebnisse der drei möglichen Vergleiche der Hirschkopf-Messkampagne. Lediglich beim Abgleich zwischen Polter und Vollernter trat eine Nicht-Erkennung auf. Zu Falsch-Erkennungen kam es bei keinem der drei Vergleiche.*

Station 1	Station 2	Nicht-Erkennungen	Falsch-Erkennungen	Wiedererkennungsraten
Vollernter	Polter	1	0	98,46%
Polter	Sägewerk	0	0	100%
Vollernter	Sägewerk	0	0	100%

Bei 171 der 195 Identifizierungen wurde die gesuchte Stirnfläche durch das CNN im ersten Schritt der Identifizierung als bester Kandidat, also an Position 1, ermittelt. Bei 23 weiteren befand sich die gesuchte Stirnfläche unter den ersten zehn Kandidaten und wurde vom Fingerprint Algorithmus

korrekt erkannt. Einer Stirnfläche wurde der Index 11 zugeordnet, sodass diese nicht in die Vorselektion kam. Daraus resultierte die einzige Nicht-Erkennung. Abbildung 15 zeigt ein Histogramm der Indizes der jeweils gesuchten Stirnflächen innerhalb der CNN-Vorselektionen.

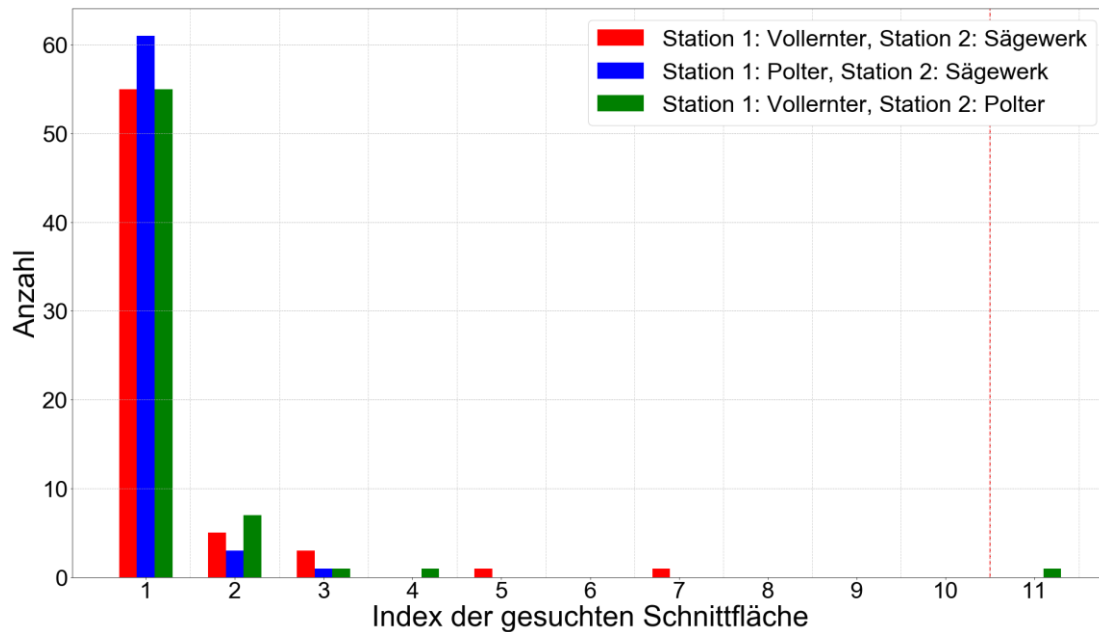


Abbildung 15: Das Histogramm der Indizes der gesuchten Stirnflächen innerhalb der CNN-Vorselektion. Index 1 bedeutet, dass das CNN die gesuchte Stirnfläche bereits als den besten Kandidaten erkannte. Dies traf in 171 von 195 Fällen zu. Ein Kandidat erreichte nur Index 11 und kam daher nicht in die Vorselektion.

Im zweiten Schritt der Identifizierung, dem Fingerprint-Abgleich, werden zwei Sicherheitswerte verwendet. Der zweite Sicherheitswert wird verwendet, um Verwechslungen mit einer der gesuchten Stirnfläche ähnlichen Stirnfläche auszuschließen. In Abbildung 16 ist das Histogramm der Sicherheitswert-2-Ergebnisse der Fingerprint-Abgleiche zu sehen, wobei lediglich die oben erwähnte Nicht-Erkennung unterhalb des Schwellwerts liegt. *IPM*

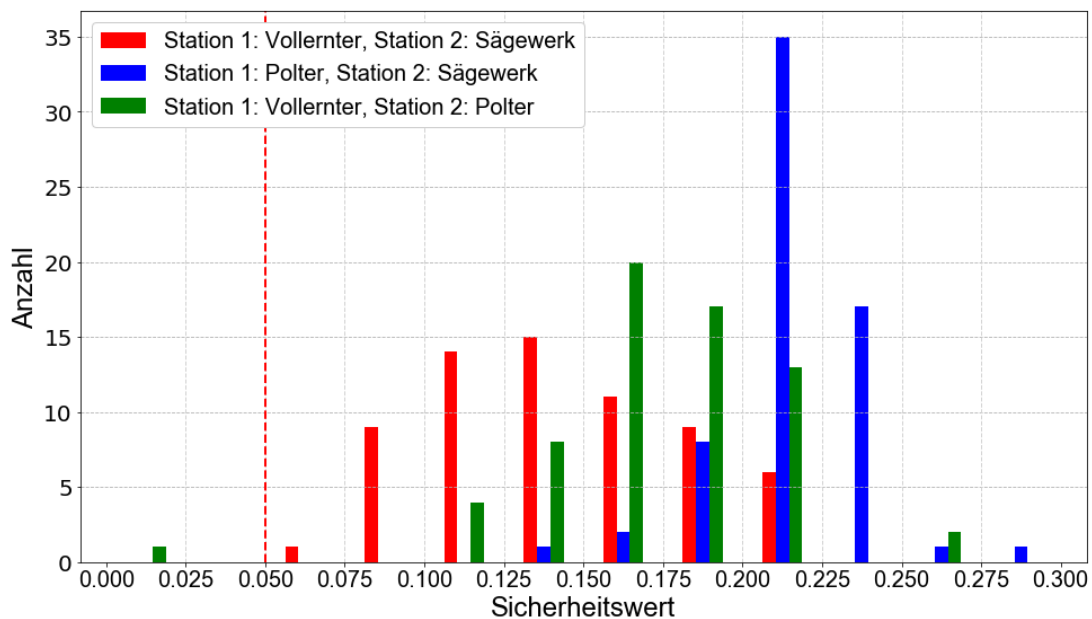


Abbildung 16: Das Histogramm zeigt die Sicherheitswert-2-Ergebnisse der Fingerprint-Abgleiche. Der Schwellwert liegt bei 0,05. Dieser wurde in 194 von 195 Fällen überschritten. Dabei trat keine Falsch-Erkennung auf. Im einzigen Fall, in dem der Sicherheitswert 2 unter 0,05 lag, handelte es sich um den Abgleich, bei dem die gesuchte Stirnfläche nicht in die CNN-Vorselektion aufgenommen wurde.

### Arbeitspaket 5e: Ein-/Auslagerung im Nasslager

Es wurden wiederholt fotografische Aufnahmen von 101 Stämmen im Nasslager Schrofel von ForstBW bei Bayersbronn durch die FVA und ForstBW durchgeführt. Ab April 2022 wurde das Holz im Nasslager Schrofel eingelagert und beregnet. Die FVA und ForstBW haben im zweiwöchentlichen Rhythmus Fotos von jedem einzelnen Stamm in zwei verschiedenen Ansichten aufgenommen. Die FVA hat im Anschluss die Markröhre in jedem einzelnen Bild markiert und an IPM weitergeleitet, um dort die Software zu trainieren. Im November 2022 wurde das Holz aus dem Nasslager ins Sägewerk Streit transportiert, um dort die abschließenden Fotoaufnahmen durchzuführen. Die Fotoaufnahmen wurden im selben Zug durchgeführt wie die Aufnahmen aus dem großen Versuchsablauf.

### Arbeitspaket 6: Wissenstransfer und Ergebnisverwertung

Aus dem Projekt heraus erfolgte Dissemination und Publikation von Ergebnissen:

- Darstellung des Projekts auf <https://www.fva-bw.de/top-meta-navigation/fachabteilungen/waldnutzung/digebast>
- Mündliche Präsentation des Projekts innerhalb der Kolloquien-Reihe der FVA als Wissenstransfer für die Forstpraxis auf <https://www.fva-bw.de/themen/wissenstransfer/fva-kolloquien>
- Mündliche Präsentation auf der Digital Green Tech Konferenz 2022 in Göttingen: <https://www.youtube.com/watch?v=tE-l1iDeNTA>



- Mündliche Präsentation des Projektstands auf der FORMEC 2022. Abstract zu finden im Book of Abstracts and Proceedings, S. 136 <https://www.formec.org/proceedings/oregon-usa-proceedings-2022.html>

Des Weiteren wurde das Projekt vom Ökoinstitut Freiburg ausgewählt, um eine umfassende Nachhaltigkeitsanalyse zu erstellen. Federführend war hier die FVA mit Zuarbeit von ForstBW. Die Nachhaltigkeitsanalyse liegt zum aktuellen Zeitpunkt vor und kann beim Ökoinstitut angefragt werden. *ForstBW*

## **2. Verwertung**

Im Rahmen des Projekts DiGeBaSt wurden Lösungsansätze erarbeitet, die markierungsfreie, automatisierte Rückverfolgung von Baumstamm-Stirnflächen entlang der Produktionskette realisieren. Es wurden drei unterschiedliche Lesesysteme konzipiert und jeweils als Prototyp umgesetzt. Im Rahmen von drei Messkampagnen wurden Bilddaten in größerem Umfang erzeugt: Im Nasslager, von der Ernte bis ins Sägewerk und bei der Lagerung über einen Monat hinweg. Basierend auf dem bereits existierenden regelbasierten Verfahren zur Bauteilidentifizierung „Track & Trace Fingerprint“ wurde ein zweistufiges Abgleichverfahren zur Identifizierung von Baumstamm-Stirnflächen erarbeitet und erfolgreich getestet. *IPM*

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

Die grundsätzliche Idee, Objekte aufgrund von Mikrostrukturmerkmalen zu identifizieren ist nicht mehr patentierbar. Das im Rahmen des Projektes entwickelte Verfahren verletzt kein Patent Dritter. Während des Projektes wurden relevante Patentanmeldungen immer wieder überprüft. Beispielsweise wurde durch die Firma Tracy of Sweden ein sehr spezielles Verfahren angemeldet (EP4037883), dass der Verwertung des sehr allgemeinen DiGeBaSt-Ansatzes jedoch nicht entgegensteht. *IPM*

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

Sollte der Prototyp des Harvesterkopfes und der Technologie in Serie hergestellt werden und eine Richtlinie zur Rückverfolgung der Lieferkette im Forst erfolgen, wäre ForstBW gut aufgestellt innerhalb kürzester Zeit auf die Veränderungen zu reagieren. Sollten zusätzlich Privatwaldbesitzende rechtlich herangezogen werden, wenn die Technik nicht eingesetzt wird, kann die Mobilisierung von Holz im Privatwald einen großen Sprung machen und Deutschland ein höheres Holzaufkommen generieren. Solange kein gesetzlicher Rahmen absehbar ist, ist es für ForstBW nicht ersichtlich, dass die Technik zum Einsatz kommen wird. *ForstBW*

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

Das angestrebte Ziel den TRL für die markierungsfreie Identifikation von Rundholz von 4 auf 6 zu verbessern, wurde erreicht. Die Entwicklung der Lesesysteme am Harvester-Messkopf, im

Sägewerk und für den handgehaltenen Betrieb sowie die Weiterentwicklung der Fingerprint Technologie konnten im Konsortium erfolgreich abgeschlossen werden. Auf dieser Grundlage bewertet Fraunhofer IPM die wissenschaftlich/technischen Erfolgsaussichten als sehr gut. Als öffentlichkeitswirksame Arbeiten wurde eine erste Publikation verfasst und diverse Vorträge gehalten (siehe Arbeitspaket 6). Eine weitere Publikation ist in Planung. Anfragen interessierter Forscher kamen beispielsweise durch das Konsortium des EU-Projektes ChampI4.0ns zur Nutzung der wissenschaftlich/technischen Erkenntnisse. Im Rahmen des Projektes wurden weiterhin mehrere Studierende am Fraunhofer IPM in das Projekt zur praxisnahen, wissenschaftlichen Ausbildung mit einbezogen, beispielsweise bei der Datenerhebung, der -annotation und -verarbeitung. Die entsprechenden Inhalte des Projektes werden auch im Rahmen von Vorlesungen zu Themen der optischen Messtechnik des Fraunhofer IPM verwendet. *IPM*

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

Aufgrund der positiven Projektergebnisse ist davon auszugehen, dass die Anschlussfähigkeit der Ergebnisse gegeben ist. Fraunhofer IPM hat das Multi-ROI Fingerprint Verfahren bereits in bilateralen Projekten mit der Stahlindustrie weiterentwickelt und angewendet.

Die weitere Erforschung der Technologie und der Transfer in andere Applikationen der Holzindustrie können aufbauend auf den Ergebnissen (Hard- und Software) durchgeführt werden. Als Applikationsbeispiele sind hier andere Holzsorten, das motormanuelle Ernten oder die Verfolgung im Sägewerk denkbar.

Um das Verfahren für die Holzindustrie weiter in Richtung Serienreife voranzutreiben, können nun verschiedene Aspekte adressiert werden. Fraunhofer IPM wird hierfür als Entwicklungspartner zur Verfügung stehen.

Zur einfachen Adaptierbarkeit an weitere Vollerntertypen können der Automatisierungsgrad, die mechanischen Schnittstellen und die konstruktive Auslegung des Vollernter-Lesesystems weiterentwickelt werden. Hierbei ist es als Nebeneffekt denkbar, dass die aufgenommenen Live-Bilder dem Fahrer eine zusätzliche Arbeitserleichterung bieten.

Die Erforschung und Weiterentwicklung des Verfahrens hin zu einer nutzbaren Software lassen sich nun ebenfalls angehen. Schwerpunkte werden hier die Reduktion der Rechenzeit und des Speicherbedarfs sowie die automatisierte Markröhrenfindung sein. Erste Versuche mit einem Markröhren-CNN wurden hierzu noch im Rahmen des Projektes unternommen, auf denen sich aufbauen lässt.

Aufgrund der erprobten, modularen Funktionsweise des Fingerprintverfahrens sind existierende Schnittstellen zu Datenbanksystemen leicht auf die Bedürfnisse der Holzindustrie anpassbar. Somit kann allen interessierten Teilnehmern grundsätzlich ein Zugang zur Rückverfolgung angeboten werden. Die Entwicklung eines entsprechenden cloudbasierten Systems erscheint daher nun der logische nächste Schritt. *IPM*

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse und der entwickelte Demonstrator dienen als Grundlage für die Umsetzung der Digitalisierung in der Forstwirtschaft und für aufbauende wissenschaftliche Arbeiten. Das entwickelte Verfahren (Hard- und Software, aber auch Konzepte und Schnittstellenbeschreibungen) dient als modulare Vorlage, die in der gesamten Forstwirtschaft aufgegriffen und verwertet werden kann. Für die HSM als Maschinenhersteller kann sich bei entsprechender Akzeptanz des im Projekt entwickelten Systems in der Forstwirtschaft ein erster Schritt in ein Geschäftsfeld für digitalisierte Forstmaschinen eröffnen. Kurz- oder mittelfristig ist hierbei allerdings nicht mit kostendeckenden Erträgen zu rechnen.

Zudem zeigte sich, dass die Integration des Kameraarmes hin zu einem serienfähigen Produkt direkt vom Hersteller des Harvesterkopfes erfolgen müsste, um hier allen Ansprüchen hinsichtlich Bauraum, Berücksichtigung aller Normen (Arbeitssicherheit) und Handling in der Holzernte genüge zu leisten. Dies ist für HSM als Maschinenhersteller, bei welchem der Harvesterkopf ein reines Zukaufteil ist, nicht möglich. *HSM*

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

Bei Beendigung des Projektes waren den Projektpartnern keine Erkenntnisse von Dritten bekannt.

### **4. Veröffentlichungen**

- Darstellung des Projekts auf <https://www.fva-bw.de/top-meta-navigation/fachabteilungen/waldnutzung/digebast>
- Mündliche Präsentation des Projektstands auf der FORMEC 2022. Abstract zu finden im Book of Abstracts and Proceedings, S. 136 <https://www.formec.org/proceedings/oregon-usa-proceedings-2022.html> *ForstBW*

### III. Literatur

#### Literaturverzeichnis

- Erik Johansson, D. J. J. S. M. F., 2013. Automated knot detection for high speed computed tomography on *Pinus sylvestris* L. and *Picea abies* (L.) Karst. using ellipse fitting in concentric surfaces. *Computers and Electronics in Agriculture*, Issue 96.
- Hunt, M., Mirwoski, L., Smith, A. & Turner, P., 2014. A Review of Systems & Technologies for Timber Traceability.
- Köthke, M., 2023. Thünen-Institut. [Online]  
Available at: <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/waldwirtschaft/projekte-liste/die-eu-holzhandelsverordnung-und-ihre-folgen>  
[Zugriff am 24 08 2023].
- Saikouk, T. & Spalanzani, A., 2016. Review, typology and evaluation of traceability technologies: case of the French forest supply chain. *Supply Chain Forum: An International Journal*, Band 1, pp. 39-53.
- Schraml, R., Charwat-Pessler, J., Petutschnigg, A. & Uhl, A., 2015. Towards the applicability of biometric wood log traceability using digital log end images. *Computers and Electronics in Agriculture*, pp. 112-122.
- Schraml, R., Petutschnigg, A. & Uhl, A., 2015. Validation and reliability of the discriminative power of geometric wood log end features. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 10 12, pp. 3665-3669.
- Seidel, F., Fripp, E., Adams, A. & Denty, I., 2012. Tracking sustainability: review of electronic and semi-electronic timber tracking technologies. p. 60.

#### Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1: Übersicht der Arbeitspakete 4
- Tabelle 2: Zielerreichungsstand der Arbeitspakete 5
- Tabelle 3: Zielerreichung der Meilensteinplanung 6
- Tabelle 4: Derzeitiger Stand der Technik zur Wiedererkennung/Rückverfolgung von Stämmen 10
- Tabelle 5: Die Ergebnisse der drei möglichen Vergleiche der Hirschkopf-Messkampagne. Lediglich beim Abgleich zwischen Polter und Vollernter trat eine Nicht-Erkennung auf. Zu Falsch-Erkennungen kam es bei keinem der drei Vergleiche. 26

#### Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Das Konzept der Erzeugung der Stirnflächenaufnahmen am Vollernter. Die Drehachse des Lesesystems ist identisch mit der des Sägeblatts des Vollernter-Aggregats. 12

- Abbildung 2: Das integrierte Lesesystem am Vollernter. Links die Konstruktionszeichnung, die die Vorderseite mit Sichtfenster der Kamera zeigt. Rechts das am Aggregat montierte Lesesystem mit Blick auf dessen Rückseite. 12
- Abbildung 3: Die Anordnung der Lesesysteme im Sägewerk. Die Baumstämme kommen am Entrinder (links) an und werden anschließend auf einen Querförderer gelegt. Hier wird der Baumstamm durch einen Pusher nach hinten gedrückt, sodass alle Stirnflächen denselben Abstand zur ersten Kamera haben. 14
- Abbildung 4: Das Lesesystem an der zweiten Position im Sägewerk nach der Kappsäge. Links die Vorderseite des Aufbaus. Zu sehen sind zwei LED-Blitzer und das Objektiv der Kamera. Rechts die Rückseite des Aufbaus. 15
- Abbildung 5: Das handgehaltene Lesesystem zum Erzeugen von Aufnahmen gepolterter Baumstämme. 16
- Abbildung 6: Exemplarische Aufnahmen derselben Baumstamm-Stirnfläche im Vergleich der drei Lesesysteme. Von links nach rechts: Vollernter (Pixelauflösung 110  $\mu\text{m}$ ), Polter (123  $\mu\text{m}$ ), Sägewerk (158  $\mu\text{m}$ ). 16
- Abbildung 7: Zwei Aufnahmen derselben Stirnfläche nach manueller Transformation der Markröhre. Links Durchgang 1, rechts Durchgang 2. Die Aufnahmen wurden unter Laborbedingungen mit einem provisorischen Kamera-Aufbau erzeugt. 17
- Abbildung 8: Beispiel einer Stirnflächenaufnahme und deren Aufteilung in fünf ROIs, in denen die Fingerprints berechnet werden. 18
- Abbildung 9: Ein Trainingsbeispiel des CNNs. Ein Aufnahmepaar, das dieselbe Stirnfläche zeigt und mit „same surface“ gelabelt ist, wird in das Netzwerk gegeben. Die letzte Ebene stellt den 128 Werte-langen Feature-Vektor dar. Die beiden Feature-Vektoren ähneln sich in diesem Fall, beziehungsweise haben eine geringe euklidische Distanz zueinander. 20
- Abbildung 10: Kamerasystem im CAD am PC und in der Fertigung 21
- Abbildung 11: Am Harvester montierter Harvesterkopf mit Kameraarm 22
- Abbildung 12: Beispielaufnahmen von drei verschiedenen Stirnflächen mit den provisorischen Sägewerk-Lesesystemen aus dem Juli 2021. Die Aufnahmen erfolgten nach dem Kappschnitt. Obwohl die Stirnflächen frisch geschnitten sind, schwankt die Helligkeit der Aufnahmen stark, was daran liegt, dass das Umgebungslicht einen zu starken Einfluss hatte. Das Auslösen der Kameras erfolgte manuell, was dazu führte, dass die Positionierung der Stirnflächen unzureichend ist. 24
- Abbildung 13: Vorversuche unter Laborbedingungen bei HSM 25
- Abbildung 14: Die vorverarbeiteten Aufnahmen einer Stirnfläche der Hirschkopf-Messkampagne. Die Skalierung wurde angeglichen und die Markröhre jeweils in die Bildmitte transformiert. Helligkeit, Bildausschnitte und Orientierung der Stirnflächen variieren. 26
- Abbildung 15: Das Histogramm der Indizes der gesuchten Stirnflächen innerhalb der CNN-Vorselektion. Index 1 bedeutet, dass das CNN die gesuchte Stirnfläche bereits als den besten Kandidaten erkannte. Dies traf in 171 von 195 Fällen zu. Ein Kandidat erreichte nur Index 11 und kam daher nicht in die Vorselektion. 27

- Abbildung 16: Das Histogramm zeigt die Sicherheitswert-2-Ergebnisse der Fingerprint-Abgleiche. Der Schwellwert liegt bei 0,05. Dieser wurde in 194 von 195 Fällen überschritten. Dabei trat keine Falsch-Erkennung auf. Im einzigen Fall, in dem der Sicherheitswert 2 unter 0,05 lag, handelte es sich um den Abgleich, bei dem die gesuchte Stirnfläche nicht in die CNN-Vorselektion aufgenommen wurde. 27