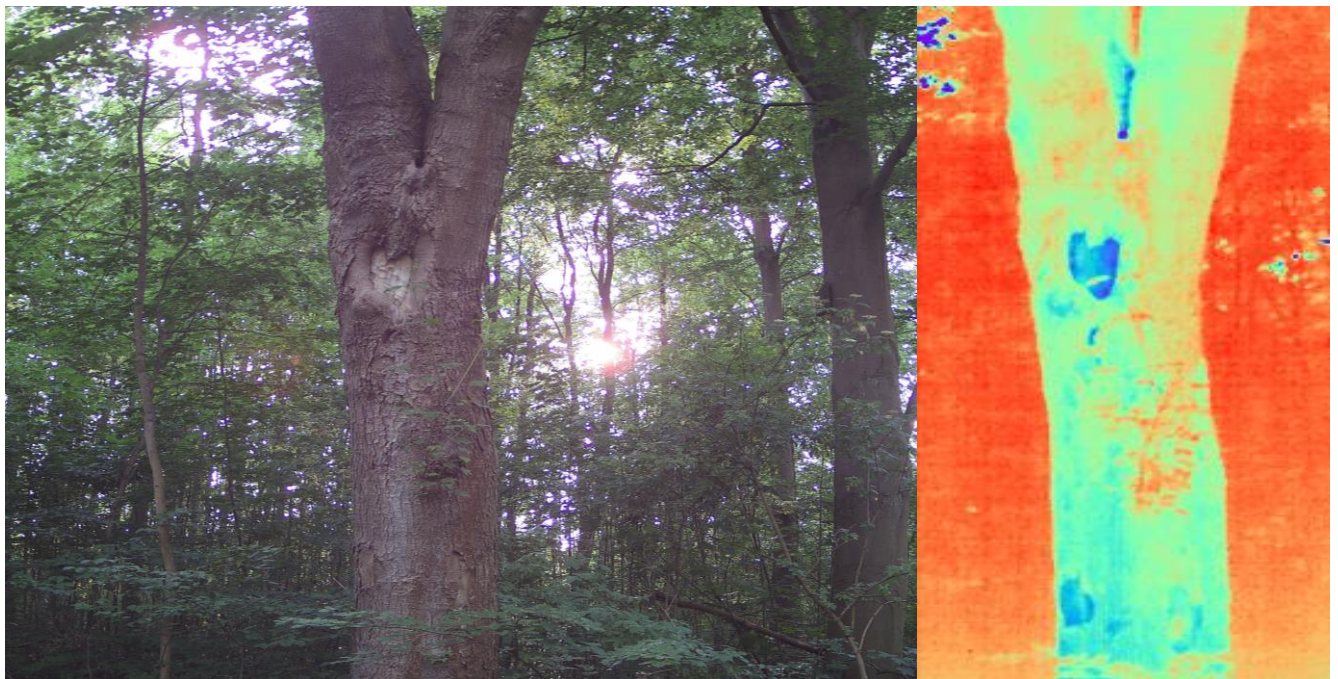


mFUND-Projekt »TherMoBaum«:
Abschlussbericht



Förderkennzeichen: 19F1134A

Projektlaufzeit: 01.11.2022 – 31.01.2024

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Koordination:

Dr. Christoph Heinze (PL)

Karsten Weiher

Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik (IGP)

In Rostock

Inhalt

1	Kurze Darstellung	5
1.1	Vorhabensvoraussetzungen	5
1.2	Planung und Ablauf	6
1.3	Stand der Technik und Forschung	7
1.4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	8
2	Eingehende Darstellung	9
2.1	Projektergebnisse	9
2.1.1	AP1: Analyse und Konzeption	9
2.1.2	AP2: Messsystem und Datenverarbeitung	12
2.1.3	AP3: Datenaufnahme	20
2.1.4	AP4: Auswertung und Validierung	27
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	27
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten	28
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	28
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	29
2.6	Erfolgte und geplante Veröffentlichung	29
2.7	Ausblick für ein Folgeprojekt	29
3	Literaturverzeichnis	31

1 Kurze Darstellung

Ziel des mFUND Projekts **Thermales Monitoring von Bäumen in Gleisnähe zur Schadstellenerkennung » TherMoBaum «** war es in einer Machbarkeitsstudie die Eignung der Thermografie zur Einschätzung der Baumgesundheit von Bäumen in der Nähe von Schieneninfrastruktur zu prüfen. Umgestürzte Bäume und herabgefallene Äste verursachen lange Ausfallzeiten, in dem sie Gleise blockieren oder Oberleitungen beschädigen. Da die deutsche Bahn (DB) über einen Baumbestand von ca. 28.000 Hektar verfügt (Deutsche Bahn 2023) bindet die Prüfung und die Pflege große Personalkapazitäten. Digitale und automatisierte Hilfsmittel zur effektiven Planung der Arbeitseinsätze sind deswegen von hoher Priorität. Die Thermografie wurde in einer Reihe wissenschaftlicher Studien als Methode vorgeschlagen, um qualitativ die Baumgesundheit zu bewerten und Schadensmerkmale zu erkennen (Pitarma et al. 2019; Vidal und Pitarma 2019; Hashim et al. 2021; Majdák et al. 2021; Bellett-Travers und Morris 2010). Da die Thermografie berührungslos, bildgebend und schnell anwendbar ist, eignet sie sich grundsätzlich als schnelles Monitoring Verfahren, mit dem der gleisnahe Baumbestand untersucht werden kann. In der Machbarkeitsstudie wurde deswegen folgende Aufgabenstellung formuliert:

1. Analyse der Anforderungen an das Messsystem für die Erkennung typischer Schadensarten
2. Aufbau eines prototypischen Messsystems, Anbringung an einem Schienenfahrzeug und Vermessung des gleisnahen Baumbestandes über eine mindestens 10 Kilometer lange Strecke
3. Untersuchung der Haupteinflussfaktoren über wiederholte Messungen
4. Erstellung eines Konzepts zur Eignung verschiedener Trägerplattformen (Z.B. Drohnen oder Straßenfahrzeuge)
5. Prüfung von Bildverarbeitungsansätzen und KI-Algorithmik zur automatisierten Datenverarbeitung und Schadstellenerkennung

1.1 Vorhabensvoraussetzungen

Die DB verfügt über ein Streckennetz von ca. 33.000 Kilometern Länge (Deutsche Bahn 2024) Ein großer Teil dieses Streckennetzes hat einen Baumbestand in unmittelbarer Nähe der Gleise. Auch wenn weniger als 1% der Verspätungen auf umgestürzte Bäume zurückzuführen sind, verursachen diese durchschnittlich 28 Minuten Verzögerung und liegen damit auf dem zweiten Platz der Ursachen nach Verspätungsminuten (Verspätungen und Störungen - was die Deutsche Bahn aufhält). Ein maßgebender Faktor sind hierbei Schäden der Oberleitung und Blockierung der Gleise durch

umstürzende Bäume und herabfallende Äste. Als Folge des Klimawandels werden Extremwetterereignisse in ihrer Häufigkeit und Schwere weiter zunehmen (Ottmar Edenhofer und Peter Hoffmann 2021), was zu einer steigenden Belastung der bestehenden Vegetation führen wird. Als Reaktion auf die Extremstürme – insbesondere im Jahr 2017 und 2018 – hat die DB ihr Vegetationsmanagement neu strukturiert und personell aufgestockt (Deutsche Bahn 2024). Aktuell werden Bäume in Gleisnähe über Satelliten, manuell vor Ort und vereinzelt aus der Luft, mit Drohnen oder Flugzeugen, überwacht. Durch satellitengestützte Fernerkundung lassen sich weiträumig Karten der Vegetation erstellen und es können Parameter wie Wuchshöhe, Baumart und Chlorophyllgehalt der Blätter bestimmt werden. Es kann jedoch nicht auf die Stabilität einzelner Bäume geschlossen werden, da die Methode nicht zur Untersuchung der Stämme und Äste geeignet ist. Deswegen erfolgt eine präzisere Untersuchung vor Ort durch geschultes Personal, welches über Sichtprüfung, Abklopfen und vereinzelt invasive Prüfung (Bohrwiderstandsmessung) die Gesundheit und Integrität einzelner Bäume bewertet. Kranke und umsturzgefährdete Bäume werden anschließend entnommen. Wegen der Größe des Waldbestandes, kann die manuelle Prüfung jedoch nur abschnittsweise durchgeführt werden. Hier ergibt sich eine Lücke im Vegetationsmanagement der DB, da eine flächige Untersuchung des Baumbestandes auf umsturzgefährdete Exemplare momentan nicht möglich ist.

1.2 Planung und Ablauf

Das Projekt war in vier Arbeitspakete (AP) unterteilt: AP1 Analyse und Konzeption, AP2 Messsystem und Datenverarbeitung, AP3 Datenaufnahme und AP 4 Auswertung und Validierung. Zusätzlich wurden Meilensteine (M) definiert für die Fertigstellung des einsatzfähigen Messsystems M1, den Abschluss der Messungen M2 und das Projektende M3. Der Inhalt der einzelnen APs und die erzielten Ergebnisse werden in Kapitel 2.1 detaillierter dargestellt.

Ursprüngliche Projektlaufzeit war 12 Monate, die aufgrund eines Krankheitsfalls und Komplikationen bei der Entwicklung des Messsystems um 3 Monate verlängert wurde (siehe untenstehenden Gant-Chart).

Arbeitspakete		2022		2023										Verl.			
		11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	
1	Analyse und Konzeption																
1.1	Analyse Anforderungen und Verwertung																
1.2	Konzeption Messsystem																
2	Messsystem und Datenverarbeitung																
2.1	Messsystem zusammenstellen und justieren																
2.2	Erprobung Auswerteverfahren																
3	Datenaufnahme																
3.1	Regelmäßige Messungen mit Handgerät																
3.2	Messungen an Teststrecke																
4	Auswertung und Validierung																
4.1	Abgleich mit manueller Prüfung																
4.2	Bewertung des Verfahrens																
Meilensteine																	
1	Einsatzfähiges Messsystem																
2	Abschluss der Messungen																
3	Projektende																

Kurze Darstellung

Abbildung 1: Ganttchart des Projekts inkl. Verlängerung

1.3 Stand der Technik und Forschung

Die standardmäßige Untersuchungsmethode für Baumgesundheit ist die visuelle Prüfung, bei der anhand von äußeren Merkmalen die Baumgesundheit beurteilt wird. Bei Verdacht auf Erkrankung oder schadhaftes Gewebe, werden weitere Messtechnologien eingesetzt, um Schäden zu bestätigen und zu quantifizieren. Ein besonderer Fokus liegt hierbei auf Detektion von äußerlich nicht sichtbarem Verfall. Hierfür gibt es eine Reihe an Technologien, wie z.B. die Bohrwiderstandsmessung, die präzise Informationen über den inneren Zustand des Baumes liefern. Allerdings benötigen alle bisher entwickelten Methoden kontakt, sind invasiv oder relativ langsam. Die Infrarot-Thermographie bietet hier eine schnelle und kontaktlose Alternative, die geeignet ist, innere und äußere Defekte zu detektieren. Das Prinzip der Methode ist, dass abgestorbenes Gewebe andere Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärme aufweisen als gesundes Gewebe. Da Bäume keine eigene Wärme produzieren, wird Wärmeenergie nur von außen eingebracht. Über den Tag heizt sich der Stamm auf, wobei Wärme von außen nach innen transportiert wird, über Nacht kehrt sich der Wärmefluss um, von innen nach außen. Ein gesunder Baum mit massivem Kernholz und intaktem Flüssigkeitstransport zeichnet sich durch einen gleichmäßigen Wärmefluss aus. Durch totes Gewebe findet dagegen kein Flüssigkeitstransport statt, der Wärmetransport ist deutlich verlangsamt, weswegen der betroffene Teil eine deutlich veränderte Wärmesignatur aufweist (Bellett-Travers und Morris 2010). In der Regel ist abgestorbenes Gewebe kälter als der restliche Baum, aber z.B. im Fall starker Erwärmung durch direkte Sonneneinstrahlung kann das tote Gewebe auch wärmer sein als intaktes Gewebe (Vidal und Pitarma 2019).

Auch interne Defekte, wie Hohlstellen, die unter einer gesunden äußeren Hülle liegen, können sich im Wärmebild abzeichnen, da die Fähigkeit Wärme im Inneren zu speichern und zu leiten verringert ist. Untersuchungen zum

Zusammenhang zwischen radialer Dicke und der äußeren Temperatur von Bäumen zeigen, dass bei ausgeformten Hohlstellen ein deutlicher Zusammenhang gefunden werden kann (Burcham et al. 2012). In (Pitarma et al. 2019) werden zwei unterschiedliche Baumexemplare mit IRT untersucht, bei einem wird eine große innere Hohlstelle entdeckt und durch Fällen des Baumes bestätigt. Die Autoren beurteilen IRT als effiziente Methode für eine qualitative Erstuntersuchung von Bäumen.

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projekts wurde mit verschiedenen Stellen zusammengearbeitet, wissenschaftlicher Austausch betrieben und Kontakt zu Anwendern aus der Wirtschaft hergestellt. Zunächst sei der Kontakt zur MaLoWa Bahnwerkstatt erwähnt, die als Unterauftragnehmer den Zugang zu einer Bahnstrecke organisierten, ein Schienenfahrzeug mit Lokführer zur Verfügung gestellt und an der Anbringung des Messsystems mitgearbeitet haben. Die MaLoWa hat außerdem wichtige Beratung geleistet für die Konzeption des Messsystems.

Die DB konnte mit Expertengesprächen in der Projektfindung wichtige Anreize und Ideen aus der Anwenderperspektive geben. Mit einem Letter of Interest hat die DB ihr Interesse an den Projektergebnissen gezeigt.

Das Rostocker Stadtforstamt hat während der Projektlaufzeit geholfen, indem gemeinsame Waldbegehungen durchgeführt wurden. So konnten weitere Anwenderperspektiven eingeholt werden und Bäume für regelmäßige Kontrollen mit dem Handmesssystem identifiziert werden.

Im Rahmen der Auftakt- und Abschlussveranstaltungen kam es zu wissenschaftlichem Austausch mit Vertretern verwandter mFUND Projekte und Vertretern aus Wissenschaft und Industrie. Beispielhaft seien hier erwähnt: Die Firma Quantum-Systems vom mFUND Projekt FreeRail, das Deutsche Zentrum für Schienenverkehrsforschung im Rahmen des mFUND Projekts Railvitalitree, Professor Steffen Rust, Experte für Baumpflege und Baumkontrolle der HAWK Göttingen und die Firma Dronegy als Drohnen dienstleister und -entwickler.

Während der Projektlaufzeit wurde außerdem an Vernetzungs- und Begleitforschungsveranstaltungen zum mFUND teilgenommen.

2.1 Projektergebnisse

Die Projektmittel wurden entsprechend den APs zweckdienlich und sparsam verwendet. Im Folgenden wird ein Überblick über die erfolgten Arbeiten und erzielten Ergebnisse der einzelnen APs gegeben.

2.1.1 AP1: Analyse und Konzeption

Ziel des AP 1 war es ein Konzept zur Umsetzung und Verwertung des Messsystems zu erstellen. Dafür wurden zunächst die technischen Anforderungen an das Messsystem spezifiziert. Als Kernanforderungen an das Messsystem wurde eine hohe thermale Sensitivität und eine hohe Framerate bei der Bildaufnahme identifiziert. Der Grund für die hohe thermale Sensitivität sind die geringen Temperaturunterschiede im Untersuchungsobjekt Baum. In den Referenzarbeiten (Vidal und Pitarma 2019; Pitarma et al. 2019; Burcham et al. 2012) haben sich Schadstellen an Bäumen nur mit wenigen Grad Differenz abgezeichnet. Moderne thermale Kameras haben Sensitivitäten von 100 mK bis unter 15 mK. Dabei erfordern die genauesten Sensoren jedoch Kühlung, was die Handhabung der Kamera deutlich erschwert. Für die vorliegende Aufgabe wurde eine Sensitivität von 50 mK oder weniger als ausreichend identifiziert. In diesem Genauigkeitsbereich können ungekühlte Mikrobolometersensoren verwendet werden, was die Handhabung des Messsystems deutlich vereinfacht.

Die Framerate ist bedeutend, um die Bildabdeckung bei einer gegebenen Geschwindigkeit zu bestimmen. Das Konzept der Bildaufnahme ist seitlich aus dem Schienenfahrzeug zu Messen, siehe Abbildung 2. Dabei verschiebt sich der aufgenommene Bildbereich zwischen zwei Frames in Abhängigkeit der Entfernung des Messobjekts, der Geschwindigkeit des Zuges und dem Öffnungswinkel der Kamera. Als Formel ergibt sich für die Bildüberlagerung B in Prozent $B = \frac{b_0 - d}{b_0}$, wobei b_0 der Bildweite entspricht und d die Entfernung ist, die sich das Messsystem zwischen zwei Aufnahmen bewegt. Für die Entfernung zum

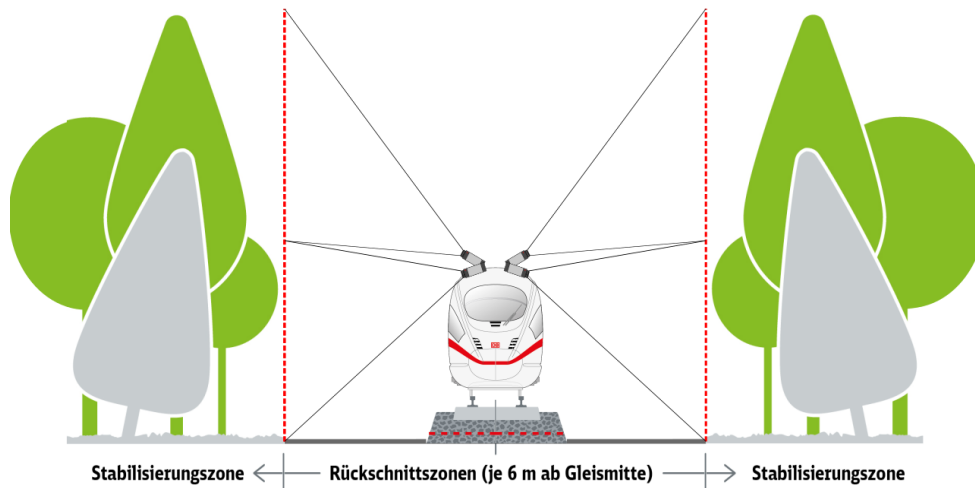


Abbildung 2:
Konzeptionelle Darstellung
des Messsystems

nächsten Messobjekt seien 6 Meter angenommen, was dem Bereich der Rückschnittzone entspricht. Als Kameraöffnungswinkel sei ein Standard Öffnungswinkel von 50° angenommen, was einem Bildfeld von 5,6 Metern entspricht. Dann muss für eine Bildüberlagerung von 90 % - Ein geeigneter Überlappungswert für photogrammetrische Bildverarbeitung – alle 0,56 Meter ein Bild aufgenommen werden. Die erforderliche Framerate f und Geschwindigkeit v skalieren linear nach $d = \frac{v}{f}$. Für eine Geschwindigkeit von 100 km/h (27,8 m/s) ergibt sich dadurch eine Framerate von 50 Hz. Moderne Hochgeschwindigkeitszüge erreichen bis zu 300 km/h was mit einer Framerate von 150 Hz in den Bereich der High Speed Kameras grenzt. Allerdings ist die Anwendung vom Hochgeschwindigkeitszug aus ein unwahrscheinliches Nutzungsszenario und wahlweise kann neben der Framerate auch der Kameraöffnungswinkel erweitert werden. Wahrscheinlicher ist die Anbringung an einem Regionalzug oder einem Wartungszug die Höchstgeschwindigkeiten bis 160 km/h erreichen, so dass bei einem Weitwinkelobjektiv eine Kamera mit einer Framerate von 60 Hz geeignet ist. Für die Testmessungen innerhalb der Machbarkeitsstudie waren die Anforderungen an die Framerate geringer, da die Geschwindigkeit auf der Teststrecke deutlich reduziert werden konnte.

Zusätzlich muss jedoch beachtet werden, dass die Wärmemessung auf der Abkühlung und Erwärmung der Sensorelemente beruht. Mikrobolometer ändern ihren elektrischen Widerstand temperaturabhängig, woraus sich letztlich der Messwert ergibt. Da der physikalische Vorgang des Abkühlens und Erwärmens der Sensorschicht eine gewisse Zeit benötigt, liefern moderne ungekühlte Wärmebildkameras nur bis etwa 30 Hz zuverlässige Messwerte. Bei höheren Wiederholraten und schnellen Temperaturänderungen kann es zu einem Nachleuchten oder Verwischen kommen. Für den Einsatz auf mobilen Trägerplattformen begrenzt dies die möglichen Bewegungsgeschwindigkeiten. Dafür sei hier eine Rechnung zum entstehenden motion blur (Bewegungsunschärfe) dargestellt. Im Anwendungsfall bewegt sich die Kamera seitlich zu den aufgenommenen Objekten oder äquivalent bewegen sich die Objekte parallel zur Kamera. Wenn die Objekte sich während der

Belichtungszeit einer Aufnahme mehr als ein pixel weit bewegen ist von einem signifikanten motion blur auszugehen. Zur Abschätzung kann folgende Rechnung aufgestellt werden: die sampling distance sd bei einem Abstand a beträgt $sd = 2 \tan(\alpha/2) * a / p$, wobei α der Öffnungswinkel ist und p die Pixeldichte, jeweils in horizontaler Ausrichtung. Die Distanz, die sich die fotografierten Objekte während einer Aufnahme bewegen ist $d = v/t$. Für $sd \leq d$ ergibt sich ein signifikanter motion blur. Konkrete Werte für diese Rechnung werden in Abschnitt 2.1.2 vorgestellt.

Für die Messungen waren zwei Ansätze geplant: Messungen mit einem Handkameranystem, um Daten einzelner Baumexemplare wiederholt aufzunehmen und wichtige Einflussfaktoren zu ermitteln und Messungen mit einem Messsystem vom Schienenfahrzeug aus, um großflächige Messdaten aufzunehmen. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie war nicht vorgesehen neue Thermalkameras anzuschaffen, sondern am IGP vorhandene Kameratechnik zu nutzen. Entsprechend den definierten Anforderungen wurden zwei Thermalkameras ausgewählt. Die FLIR ThermaCam P25 Handkamera für die wiederholten Messungen in Rostock und die FLIR Duo Pro R Drohnen Kamera für die Anbringung am Zug. Während erster Probemessungen mit dem Handkameranystem konnte jedoch schnell festgestellt werden, dass dieses nicht über die benötigte Sensitivität verfügt, um Schadstellen an Bäumen zu erfassen (Sensitivität der ThermaCam beträgt 80 mK). Deswegen wurde entschieden die FLIR Duo Pro R ebenfalls als Handkamera zu verwenden, um sich die bessere Sensitivität von 50 mK zunutze zu machen. Hierfür war jedoch zusätzlicher Entwicklungsaufwand notwendig, da die Kamera nicht über notwendige Zusätze, wie einen handlichen Griff, ein Display und eine interne Stromversorgung, verfügte. Die Konstruktion der Halterung wird in Abschnitt 2.1.2 beschrieben.

In der Projektplanung wurden Messungen mit einem handgeführten und mit einem an einem Schienenfahrzeug installierten Wärmebildgerät vorgesehen, die dann während des Vorhabens auch realisiert wurden. Die dabei gewonnenen Erfahrungen wurden in die durchgeführten Analysen zu alternativen Trägerplattformen integriert. Hierbei hat sich herausgestellt, dass eine mobile Datenerfassung mit Wärmebildgeräten auf in Bewegung befindlichen Trägerplattformen prinzipiell gut durchführbar ist. Für den mobilen Einsatz im Vegetationsmanagement auf unterschiedlichen Trägerplattformen sind praktisch nur die bereits oben erwähnten ungekühlten Kamerasysteme geeignet. Durch die damit erreichbare kompakte Bauform, das geringe Gewicht und geringen Energiebedarf, gibt es kameraseitig fast keine Einschränkung bei der Wahl einer Trägerplattform.

Eine naheliegende Alternative zum Schienenfahrzeug ist die Anwendung von Straßenfahrzeugen zur Vegetationsinspektion. Die Anforderungen bei der Anwendung der Wärmebildtechnik auf der Straße sind vergleichbar mit der Schiene. Fahrgeschwindigkeiten sind in Abhängigkeit vom Abstand Fahrzeug-

Vegetation, Öffnungswinkel und der möglichen Bildwiederholrate zu wählen. Zusätzlich hat jedoch die Beschaffenheit des Straßenbelags infolge der induzierten Schwingungen Auswirkungen auf die Bildqualität. In Abhängigkeit der zu erwartenden Schwingungen (Amplitude und Frequenz) sollte eine elastische Aufhängung mit starker Dämpfung eingeplant werden. Hierbei ist zu beachten, dass das so aufgebaute System wiederum schwingfähig ist, und die zu erwartende externe Anregung nicht mit einer Eigenfrequenz des Systems zusammenfällt.

Moderne Drohnen sind häufig bereits mit Wärmebildkameras ausgestattet, die die erforderliche Temporauflösung von 50 mK erreichen, oder können entsprechend nachgerüstet werden. Perspektivisch ist ein Drohneneinsatz aufgrund der begrenzten Flugzeit insbesondere zur gezielten Inspektion ausgewählter Gleisabschnitte geeignet. Vorteilhaft bei einer solchen Befliegung ist, dass der Abstand und der Blickwinkel zum Baumbestand flexibel gewählt werden können. Beispielsweise können Nahaufnahmen oder mehrere Aufnahmewinkel genutzt werden, um unsichere Befunde zu verifizieren. Zusätzlich ist der Aufnahmezeitpunkt flexibler wählbar als beim Einsatz auf einem Schienenfahrzeug. Dies ist insbesondere in Hinblick auf die Wetterabhängigkeit der Wärmebildtechnik von Bedeutung, siehe auch die folgenden Absätze und Abschnitt 2.1.3.

Während der Projektlaufzeit wurden Anwender aus der Baumpfleger und dem Vegetationsmanagement der DB zu möglichen Trägerplattformen befragt. Hierbei hat sich herausgestellt, dass die Inspektionsarbeiten wesentlich von einem kontaktlosen und schnellen Bewertungssystem für den inneren Zustand von Bäumen profitieren würde, das ein Baumpfleger bei sich tragen kann. Für einen breiten Einsatz eines handgeführten thermalen Inspektionssystems müsste dieses eine anwendungsspezifische Vorverarbeitung und Erstbewertung besitzen, da eine Interpretation der Bilddaten stark von Umgebungsbedingungen abhängt. Obwohl es bereits Smartphones mit integrierten Wärmebildkameras und entsprechende Dongle/Aufsätze gibt, sind diese aktuell nicht für die untersuchte Anwendung geeignet, da die Temporauflösung nicht ausreichend ist.

2.1.2 AP2: Messsystem und Datenverarbeitung

Entwicklung der Messsysteme

Anhand der Anforderungen, die in AP 1 definiert wurden, wurde die FLIR Duo Pro R als beste verfügbare thermale Kamera identifiziert. Durch das duale Kamerasystem mit integrierter thermal und infrarot Kamera wird der Entwicklungsaufwand insbesondere für das Messsystem am Schienenfahrzeug deutlich reduziert. Untenstehend sind die Spezifikationen der FLIR Duo Pro R aufgelistet:

Thermische Kamera

Sensortyp	Ungekühltes Mikrobolometer
Spektralband	7,5 – 13,5 μm
Auflösung	640 x 512, 45° x 37°
Sensitivität	50 mK
Framerate	30 Hz

Eingehende Darstellung

Tabelle 1:
Spezifikationen der Infrarot
Kamera des Kamerasystems
FLIR Duo Pro R

RGB Kamera

Sensortyp	CMOS
Auflösung	4000 x 3000, 56° x 45°

Tabelle 2:
Spezifikationen der Infrarot
Kamera des Kamerasystems
FLIR Duo Pro R

Die Halterung zum Einsatz der Dou Pro R als Handkamera wurde 3D-gedruckt und als Display wurde ein Smartphone verwendet, dass über eine Capture-Card die Videoausgabe der Kamera streamt. Für die Stromversorgung wurde in der Kamerahalterung ein Fach für einen kleinen Lithium-Ionen Akku integriert. Dadurch konnte die Kamera auch mit einer Hand bedient werden und die Messungen in Rostock konnten wie geplant erfolgen.



Abbildung 3:
Handkameranystem mit 3D-
gedruckter Halterung

Für die Messungen aus dem Zug wurde ein Kamerasystem konzipiert, dass seitlich zur Fahrtrichtung die gleisnahe Vegetation erfasst. Dafür wurde

zunächst mit der MaLoWa GmbH ein geeignetes Schienenfahrzeug identifiziert. Eingehende Darstellung

Die MaLoWa GmbH ist als Bahnwerkstatt auf die Reparatur älterer und historischer Züge spezialisiert mit Diesel- oder Kohleantrieb. Für die Messfahrt wurde ein Esslinger Triebwagen verwendet der mit einem Dieselantrieb eine Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h erreicht (siehe Abbildung 4). Da Fensterscheiben undurchlässig für Infrarotstrahlung sind wurde zunächst über eine Anbringung der Messsystems auf der Kupplung des Zuges diskutiert. Im Gegensatz zu modernen Modellen verfügt der verwendete Triebwagen allerdings über klappbare Fenster, bei denen die obere Hälfte des Fensters geöffnet werden kann. Dadurch konnte das Messsystem auf dem heruntergeklappten Fenster angebracht werden, was die Kabelführung und Kontrolle während der Fahrt erheblich erleichtert hat. Da die Duo Pro R über eine visuelle und eine infrarote Kamera verfügt, mussten keine zusätzlichen Sensoren mehr verwendet werden. Die Duo Pro R verfügt ebenfalls über einen Anschluss für eine GPS-Antenne, so dass während der Fahrt die Position aufgezeichnet werden konnte. Um das Bild während der Fahrt zu stabilisieren wurde eine zweistufige Federung konzipiert (siehe Abbildung 4). Die Federung basierend auf Stahldrähten ist weich eingestellt, mit einem langen Federweg und hat die Aufgabe Erschütterungen abzdämpfen. Die Schaumstoffpolster sollen hochfrequente Vibrationen während der Fahrt abdämpfen. Das Kamerasystem mit Federung wurde auf einer Trägerplatte angebracht, die mit 4 Stützen am heruntergelassenen Fenster befestigt wurde.

Ein signifikanter Faktor bei der Aufnahme während der Fahrt sind die Bildüberlappung und der entstehende motion blur. Diese sollen deswegen für das Kamerasystem und die erwarteten Geschwindigkeit berechnet werden. In Abschnitt 2.1.1 werden die Formeln zur Berechnung der Bildüberlagerung vorgestellt. Mit dem horizontalen Öffnungswinkel der Thermalkamera von 45° ergibt sich eine Bildweite b von 5 Metern bei einer Distanz von 6 Metern. Als Fahrtgeschwindigkeit seien 10 km/h angenommen, da die Geschwindigkeit während der Messfahrt deutlich reduziert werden kann. Dadurch ergibt sich für eine Framerate von 30 Hz eine Bildüberlappung von B von 98%. Weiterhin sei der motion blur abgeschätzt. Dafür werden in die Formeln aus Abschnitt 2.1.1 die Werte $a = 6$ Meter und $p = 640$ Pixel eingesetzt, bei einem Öffnungswinkel α von 45° . Es ergibt sich eine sampling distance von 7,8 mm bei 6 Metern Entfernung. Für die Belichtungszeit eines Mikrobolometers können 10 ms angenommen werden (Teledyne Flir 2016) und die Fahrtgeschwindigkeit ist wiederum 10 km/h. Dadurch ergibt sich für die relative Bewegung der aufgenommenen Szene während einer Belichtungszeit 0,28 mm was deutlich kleiner ist als 7,8 mm. Somit ist von einem geringen Einfluss von motion blur auf die Aufnahmequalität auszugehen.



Eingehende Darstellung

Abbildung 4:
Handkamarasystem mit 3D-
gedruckter Halterung

Datenverarbeitung

Die Datenverarbeitung lässt sich in folgende Schritte aufteilen:

1. Umwandlung des Temperaturfeldes in ein Graustufenbild
2. Auswahl des relevanten Bildbereiches
3. Nachverarbeitung mit Bildfiltern
4. Detektion von Fehlstellen

Die thermalen Bilddaten werden ohne Kompression als 14-bit tiff-Dateien gespeichert und die visuellen Bilder als JPG-Datei mit niedriger Kompression. Die tiff-Dateien enthalten die rohen Temperaturfelder, die von der Kamera gemessen wurden. Diese können anhand der Formel $T = x * 0,4 - 273,15$ in Grad Celsius umgerechnet werden. Zur Darstellung in einem Farbbild muss anschließend ein Temperaturbereich ausgewählt werden und die Temperaturwerte dementsprechend in Bildintensitäten umgerechnet werden. Der Temperaturbereich kann der minimalen und maximalen Temperatur im Bild entsprechen. Ein besserer Kontrast kann jedoch erreicht werden, indem der Temperaturbereich gezielt eingestellt wird. Für die Bildverarbeitung in der Machbarkeitsstudie wurde der Temperaturbereich manuell ausgewählt. Um in aufbauenden Projekten größere Datenmengen automatisiert zu verarbeiten, könnte ein Segmentierungsalgorithmus die relevanten Bildregionen erkennen und eine geeignete Skalierung für jede Region auswählen.

Anschließend werden Nachverarbeitungsalgorithmen eingesetzt, um Bildrauschen und andere Störeffekte zu verringern und relevante Merkmale im Bild zu betonen. In der Bearbeitung der aufgenommenen Daten wurde z.B. festgestellt, dass es Pixelfehler an festen Positionen gibt, was auf einzelne defekte Pixel im Sensor schließen lässt. Diese Pixelfehler konnten in der Nachbearbeitung behoben werden, indem der Medianwert der benachbarten Pixel angenommen wird. Ein weiterer Störeffekt, der teilweise in der Nachbearbeitung behoben werden konnte, ist eine Vignettierung des Kamerabildes. Dies bezeichnet ein Abnehmen der gemessenen Temperaturwerte zum Bildrand hin, das nicht dem tatsächlichen Temperaturwerten entspricht und durch die optischen Elemente in der Kamera entsteht. Die Kamera kalibriert sich in im Abstand weniger Minuten regelmäßig

selbst, um den Einfluss der internen Temperatur auf das gemessene externe Temperaturfeld auszugleichen. Dadurch ist es allerdings nicht möglich die beobachtete Vignettierung durch einmalige Kalibrierungsmessungen auszugleichen, da mit sich mit jeder internen Kalibrierung auch die Vignettierung verändert. Für die aufgenommenen Videos konnte der Effekt jedoch deutlich verringert werden durch Subtrahieren des pixelweisen Mittelwerts und addieren des Gesamtmittelwerts (siehe Abbildung 5). Als Formel ausgedrückt entspricht das bearbeitete Video damit $V' = V - \langle V \rangle_f + \langle V \rangle$, wobei das V drei Dimensionen hat: zwei räumliche Dimensionen x, y und die zeitliche Dimension ausgedrückt über die Videoframes f . Der pixelweise Mittelwert $\langle V \rangle_f$ wird über die f -Dimension gemittelt und ist entsprechend 2-dimensional, während der Gesamtmittelwert $\langle V \rangle$ über alle Dimensionen errechnet wird und deswegen skalar ist.

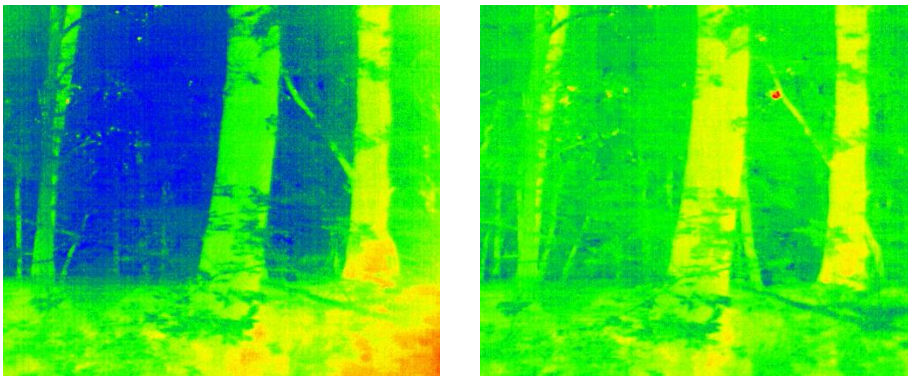


Abbildung 5:
Linkes Bild ohne Nachverarbeitung mit starker Vignettierung, Rechtes Bild mit Nachbearbeitung zur Reduktion des Vignettierungseffekts.

Das Bildrauschen, das in Abbildung 5 zu sehen ist, kann durch Glättungsfilter reduziert werden, allerdings gehen dabei auch relevante Informationen verloren, so dass weitestgehend auf den Einsatz von Glättungsfiltern verzichtet wurde.

Für die Detektion von Fehlstellen sollte ein Anomalie-Erkennungsansatz erprobt werden. Dafür muss zunächst kurz auf die Auswirkung von Schadstellen und Krankheiten auf die Wärmesignatur von Bäumen eingegangen werden. Ein Baum produziert keine signifikante eigene Wärme, ist als biologisches System aber bestrebt eine möglichst konstante Temperatur zu erhalten. Dies kann z.B. durch Flüssigkeitstransport und Verdunstung erfolgen. Ein Baum, der Wasserstress ausgesetzt ist oder dessen Leitungsgewebe beschädigt ist, wird seine Temperatur schlechter regulieren können und deswegen im Vergleich zu anderen Baumexemplaren eine höhere oder niedrigere Temperatur aufweisen, je nach Tageszeit. Diese Abweichung der Norm kann als Anomalie im Vergleich mit räumlich nahestehenden Bäumen aufgezeigt werden, die ähnlichen Umweltbedingungen ausgesetzt sind. Diese Art der vergleichenden Anomalie Erkennung (im Folgenden globale Anomalie Erkennung genannt) ist also auf nahestehende Baumexemplare derselben Art angewiesen. Wenn genug Daten vorliegen können auch quantitative Schlüsse gezogen werden, von Bäumen derselben Art, die ähnlichen Bedingungen ausgesetzt waren. So zeigt z.B. eine Studie zur Untersuchung von Borkenkäferbefall bei Fichten, dass befallene

Fichten am Waldrand im Schnitt eine deutlich erhöhte Stammtemperatur auf der Sonnenzugewandten Seite aufweisen (Majdák et al. 2021).

Die zweite Art der Anomalie Erkennung (im folgenden lokale Anomalie Erkennung) ist innerhalb eines Baumexemplares. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Schadstelle sich lokal auf die Wärmesignatur auswirkt und dadurch ein abweichendes Muster zu gesunden Bäumen erzeugt. Dabei kann der Baum als Ganzes weiterhin gesund sein, aber die lokale Fehlstelle weist darauf hin, dass die langfristige Gesundheit und Stabilität des Baumes gefährdet ist. Beispiele für lokale Fehlstellen sind z.B. Oberflächenverletzungen der Rinde und einzelne abgestorbene Äste. Auch größere innere Hohlstellen können sich auf die lokale Wärmesignatur auswirken, wobei in diesem Fall weitere Studien für ein umfassendes Bild benötigt werden (Burcham et al. 2012; Pitarma et al. 2019).

In der Machbarkeitsstudien wurde die Erkennung von Schadstellen qualitativ an Hand der Messdaten durchgeführt. Für eine automatisierte Fehlstellenerkennung in möglichen Folgeprojekten sollen hier verschiedene Ansätze zur Anomalie Erkennung vorgestellt werden. In (Majdák et al. 2021) werden auf festgelegten Stammhöhen 20 mal 20 cm große Plots vermessen und die mittlere Temperatur berechnet. Als Auswertehöhe werden der Stammansatz (ca. 0m), 1,3 m, 4 m und die Krone vermessen. Durch das Auswählen von definierten Plots für die Auswertung können Störeinflüsse reduziert werden, allerdings werden auch relevante Informationen ignoriert. Gleiches gilt für die Reduktion der Daten auf den Mittelwert. In (Hashim et al. 2021) wird ein Bild auf einer Höhe von 1 Meter mit einer Distanz von einem 1 Meter aufgenommen. In der Nachverarbeitung wird der gesamte sichtbare Stammbereich manuell ausgeschnitten und für diese Region of Interest (ROI) werden statistische Parameter berechnet, wie die mittlere Temperatur, minimale und maximale Temperatur, sowie die Standardabweichung. Zur Auswertung der Daten werden statistische Modelle und klassische ML-Ansätze verwendet.

Insgesamt zeigt die Studienlage, dass einfache statistische Kenngrößen für eine Klassifizierung geeignet sind, allerdings sind diese nur für spezialisierte Aufgabenstellungen geeignet und müssen für andere Baumarten oder Krankheitsbilder neu gelernt werden. Deswegen werden im folgenden Abschnitt tiefe neuronale Netze für die Anomalie Erkennung diskutiert.

Analyse und Erprobung geeigneter KI-Algorithmen

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie sollten außerdem geeignete KI-Algorithmen für die Automatisierung der Datenverarbeitungsschritte und der Fehlstellendetektion geprüft werden. Im Bereich der Bildverarbeitung haben sich tiefe neuronale Netzwerke als leistungsfähigster KI-Ansatz erwiesen, vorausgesetzt es stehen genug Daten für das Training bereit. Im Bereich des

überwachten Lernens werden verschiedene Zielstellungen unterschieden. Unter anderem die Bildklassifizierung, die Objekterkennung und die Instanz-Segmentierung. Ansätze der Objekterkennung und Segmentierung eignen sich, um einzelne Bäume in den Daten zu erkennen und als ROI auszuwählen. Trainingsdaten verschiedener Baumexemplare können einfach gesammelt werden und fertige Trainingsdaten sind bereits im Internet vorhanden, wobei ein Großteil der vorhandenen Literatur zur Baumsegmentierung sich mit der Auswertung von Drohnenaufnahmen aus der Vogelperspektive beschäftigt. Für die Erkennung von Bäumen aus Bodenperspektive ist die Anzahl an Vorarbeiten deutlich geringer.

Aktueller State-of-the-Art der Objekt-Erkennung sind die Mask-RCNN Architektur (He et al. 2017) und die YOLO-Architektur (You only look once: Unified, real-time object detection 2016) . Der Mask-RCNN-Algorithmus ist ein zweistufiger Algorithmus zur Instanz-Segmentierung, bei dem zunächst mögliche Objektereignisse von einem Region-Proposal-Network vorgeschlagen werden und im zweiten Schritt für jede Region eine Objektklasse, -position und -maskierung gewählt werden. Regionen, für die keine eindeutige Klasse bestimmt werden kann oder die zu stark überlagern mit Regionen derselben Klasse werden aussortiert. Der YOLO-Algorithmus ist einstufig, es werden relevante Bildregionen und Klassen in einem Durchlauf bestimmt. Dadurch ist der Algorithmus performanter und schneller als Mask-RCNN, allerdings auch etwas weniger präzise. Beide Netzwerk-Architekturen verfügen über sogenannte Feature Extractor, die in der Regel große convolutional neural networks sind (CNN). Der Feature Extractor extrahiert Bildmerkmale aus dem Bild, die den nachgeschalteten Netzwerkteilen als Eingabe dienen. Standard für eine auf Genauigkeit optimierte Architektur ist ein Resnet50 oder Resnet101 (He et al. 2016). In den letzten Jahren wurden auch auf der Transformer-Architektur basierende Ansätze erforscht, die geringfügig bessere Genauigkeit liefern gegenüber CNNs, sich aber noch nicht in der Anwendung gegenüber den gut erforschten CNNs durchgesetzt haben.

Ein bewährter Ansatz, für das Training eines Objekterkennungsnetzwerkes ist einen vortrainierten Feature Extractor zu verwenden, der auf einer sehr allgemeinen Klassifizierungsaufgabe trainiert wurde, z.B. Imagenet (Deng et al. 2009) Durch das Nutzen eines vortrainierten Feature Extractors lassen sich bessere Ergebnisse erzielen und die benötigte Menge an Trainingsdaten ist deutlich geringer, als wenn das Netzwerk von Grund auf trainiert wird (Huh et al. 2016).

Zur Erkennung von Fehlstellen eignen sich grundsätzlich auf Ansätze aus der Objekterkennung oder Instanz-Segmentierung. Allerdings ist es sehr aufwendig ausreichend Trainingsdaten für einen überwachten Lernansatz zu sammeln. Deswegen bieten sich für die Fehlstellenerkennung Ansätze des unüberwachten Lernens und der Anomalie Erkennung an. Dabei wird das neuronale Netzwerk nur mit Bildern gesunder Bäume trainiert und die signifikanten Abweichungen vom normalen Zustand werden als Anomalie

erkannt. Beispiele für unüberwachte Lernalgorithmen sind Autoencoder oder Student-Teacher Ansätze (Liu et al. 2024). Eine zentrale Herausforderung für die Erkennung von Fehlstellen in Infrarotbildern ist die Unterscheidung zwischen relevanten Fehlermerkmalen und nicht relevanten Störeinflüssen. Einige Beispiele werden in Abschnitt 2.1.3 gezeigt. Direkte Sonneneinstrahlung, Feuchtigkeit, Rindenbeschaffenheit und Efeubewuchs können einen großen Einfluss auf das Infrarotbild haben. Der Algorithmus zur Fehlstellenerkennung muss robust gegenüber diesen Störeinflüssen sein, so dass eine einfache Anomalie Erkennung nicht ausreichend ist. Möglich wäre z.B. eine Verknüpfung mit den visuellen Daten, um sicherzustellen, dass Veränderungen im Infrarotbild nicht auf eine der zuvor erwähnten Störeinflüsse zurückgehen.

Um die Eignung von KI-Ansätzen zu überprüfen wurde ein Objekterkennungsnetzwerk auf einem öffentlich verfügbaren Datensatz trainiert. Dafür wurde der Datensatz aus (Wang et al. 2022) verwendet, in dem chinesische Stadtbäume detektiert werden und ein Faster-RCNN Netzwerk trainiert. Das Faster-RCNN Netzwerk ist ein Teilstück der Mask-RCNN Architektur das keinen Segmentierungsteil enthält. Es wurde gewählt, da der öffentlich verfügbare Datensatz nur Objekt Boxen (bounding boxes) enthält, aber keine Segmentierungsmasken. Als Feature Extractor wurde ein Resnet50 gewählt das auf Imagenet vortrainiert wurde und die restliche Implementierung entspricht dem Stand des Modelles *FasterRCNN_ResNet50_FPN* aus torchvision 0.17 der Python Bibliothek Pytorch. Der Datensatz enthält 1700 Bilder mit je einem oder mehreren Bäumen. Die Ergebnisse der Objekterkennung sind in Abbildung 6 zu sehen



Abbildung 6:
Trainiertes Objekterkennungsmodell mit dem Datensatz aus (Wang et al. 2022). Links sind die Bounding Boxen auf einem Bild des Test Datensatzes zu sehen. Rechts sind die Masken, die mit dem SAM-Modell erstellt wurden zu sehen.

Da neben der Erkennung einzelner Baumexemplare die Segmentierung ein entscheidender Teil der Datenverarbeitung ist wurde außerdem ein experimenteller Weg zur Erstellung von Objektmaskierungen erprobt. Dafür wurden einem allgemeinen Segmentierungsmodell namens segment anything (SAM) die bounding boxes des Faster-RCNN und das Originalbild als Eingabe bereitgestellt, um daraus passende Instanz Segmentierungen zu erstellen. Für Details zu segment anything verweisen wir auf die entsprechende Publikation (Kirillov et al. 2023). Beispiele aus dem Trainingsdatensatz sind in Abbildung 6

zu sehen. Sowohl die erstellten Bounding Boxen, als auch die Segmentierungsmasken sind von hoher Qualität. Bemerkenswert an diesem Ansatz ist, dass das Segmentierungsnetzwerk nicht speziell für diese Anwendung trainiert wurde und trotzdem in den meisten Fällen sehr präzise Segmentierungsmasken erstellt.

Neben der Anwendung auf den Testdatensatz aus (Wang et al. 2022), wurde außerdem die Qualität der Baumerkennung auf den Daten aus AP3 getestet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt.

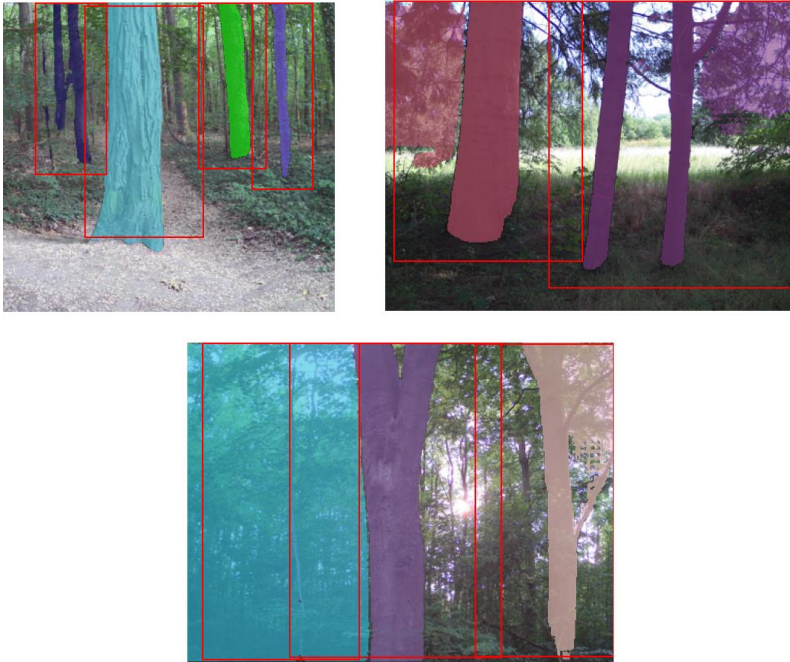


Abbildung 7:
Trainiertes
Objekterkennungsmodell
angewandt auf Messdaten
aus dem TherMoBaum Projekt

Zu sehen ist, dass die Stämme im Allgemeinen gut erkannt und segmentiert werden. Allerdings ist auch zu sehen, dass teilweise 2 Stämme als ein Baum erkannt werden oder fälschlicherweise der Hintergrund als Objekt erkannt wird. Teilweise ist dies sicherlich dem Unterschied zwischen Trainingsdatensatz und den Anwendungsdaten geschuldet. Die gesammelten Daten sind im Vergleich zu den Trainingsdaten direkt im Wald aufgenommen mit deutlich dichter Vegetation. Außerdem sind auf den Bildern nur Ausschnitte der Bäume mit Fokus auf den Stamm zu sehen. Dies erschwert die genaue Objekterkennung, da im Trainingsdatensatz in der Regel der ganze Baum auf dem Bild zu sehen ist. Insgesamt sind die Erkennungsergebnisse für den limitierten Rahmen innerhalb der Machbarkeitsstudie zufriedenstellend. Für ein Folgeprojekt wäre es empfehlenswert einen eignen Datensatz zu sammeln der näher an den Anwendungsdaten liegt. Zusammen mit einer weiteren entwickelten Modellarchitektur können sehr gute Ergebnisse der Baumsegmentierung erwartet werden.

2.1.3 AP3: Datenaufnahme

Für die Datenaufnahme waren zwei Formate vorgesehen: wiederholte Messungen mit dem Handmesssystem in Raum Rostock und zwei Messfahrten in Zusammenarbeit mit der MaLoWa GmbH. Ziel der Messungen mit dem Handmessgerät war es wiederholte Messungen einzelner Baumexemplare aufzunehmen und somit den Einfluss von Wettereigenschaften, Tageszeiten und weiteren Einflussfaktoren zu bestimmen.

Das Rostocker Stadtamt konnte als assoziierter Partner für das Projekt gewonnen werden und hat bei mehreren Waldbesichtigungen schadhafte Baumexemplare und relevante Schadmerkmale ausgewiesen. Die Messungen mit dem Handmessgerät haben im Zeitraum April bis August 2023 im Rostocker Stadtforst zwischen dem Tannenweg und der Satower Straße stattgefunden (siehe Abbildung 8). Aufgenommen wurden verschiedene Arten, um ein möglichst breites Anwendungsspektrum zu erfassen. Unter anderem wurden Exemplare der gemeinen Fichte (*Picea abies*), Gewöhnliche Robinie (*Robinia pseudoacacia*), Rotbuche (*Fagus sylvatica*), Stieleiche (*Quercus robur*) und Berg-Ahorn (*Acer pseudoplatanus*) untersucht.



Abbildung 8:
Karte der Handmessungen im Rostocker Stadtwald. Rot eingezeichnet sind Bereiche in den Messungen erfolgt sind.

In der Fachliteratur wird als Messzeitraum morgens oder abends empfohlen, da dies die Zeiträume sind an denen eine längere Phase mit Energieeintrag (tagsüber) oder Energieabgabe (nachts) vorrangig ist. Deswegen wurden Messungen morgens im Zeitraum von 8 Uhr bis 10 Uhr durchgeführt und abends von 18 Uhr bis 20 Uhr. Für die Wettereigenschaften werden klare sonnige Tage oder bewölkte trockene Tage empfohlen, während Regen und feuchte Bedingungen die Messungen negativ beeinflussen. Weiterhin sollte überprüft werden, wie die Jahreszeit und die damit verbundene Temperatur sich auf die Messung auswirkt.

Für den Unterschied zwischen Messungen morgens und abends, haben sich grundsätzlich beide Zeitpunkte als geeignet erwiesen, wobei qualitativ die

Messung abends zu bevorzugen sind. Insgesamt ist zu beobachten, dass Bäume und Äste mit einem geringeren Durchmesser sich tagsüber stärker aufheizen als Bäume mit einem größeren Durchmesser (siehe Abbildung 9). Hier ist zu sehen, dass die kleineren Bäume im Hintergrund deutlich kühler sind als die Eiche im Vordergrund, was bei der Messung morgens nicht der Fall ist.

Eingehende Darstellung

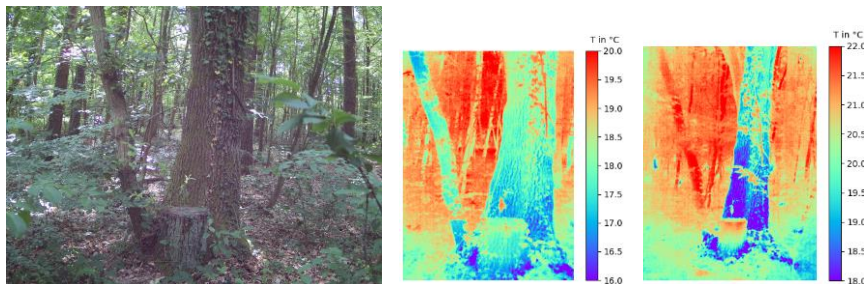


Abbildung 9:
Zwei Messungen einer Stieleiche morgens und abends. Links ist das Visuelle Bild von 9:38. In der Mitte das Infrarotbild von 9:38 und rechts das Infrarotbild von 19:13. Alle Messungen sind am 22.06.23 aufgenommen worden.

Die besten Ergebnisse der Messungen konnten bei warmem und sonnigem Wetter erzielt werden, allerdings muss auf den Einfluss direkter Sonneneinstrahlung geachtet werden, da insbesondere ein Wechselspiel aus Sonne und Schatten die Messergebnisse stark verzerren kann (siehe Abbildung 10). Hier wurde derselbe Bergahorn einmal morgens um 9:30 aufgenommen und einmal abends um 19:05. Bei der Aufnahme am Morgen war der Ahorn direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt, wodurch die gemessene Temperatur deutlich erhöht wird. In der Messung abends mit leichtem Gegenlicht ist dieser Störeffekt nicht zu sehen.

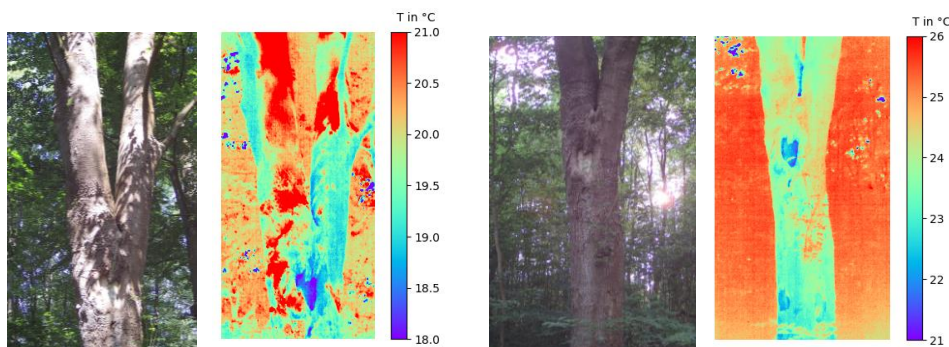


Abbildung 10:
Zwei Aufnahmen eines Berg-Ahorn morgens und abends. Die direkte Sonneneinstrahlung wirkt als starker Störeffekt. Die Linke Abbildung wurde um 9:30 aufgenommen und die Rechte um 19:05. Beide Bilder sind am 22.06.2023 aufgenommen worden

Der Bergahorn in Abbildung 10 ist außerdem ein Beispiel für Fehlstellen, die mit der Thermografie detektiert werden können. Zum einen weist der Baum eine oberflächliche Verletzung der Rinde auf, die sich als deutlich kälterer Bereich abzeichnet. Außerdem ist der kodominante V-Gabelung (V-Zwiesel) als deutlich kälterer Bereich zu sehen. Dies deutet auf einen Wassereinschluss und vermodertes Holz hin. Da der V-Zwiesel an sich schon eine ungünstige Wuchsform darstellt, erhöht das Vorhandensein von Feuchtigkeit und faulenden Gewebe weiterhin die Gefahr eines Abbruchs. Die Experten des Rostocker Stadtforstamts haben die Relevanz dieser Fehlstelle bestätigt. In verkehrsnaher Position müsste dieser Baum gefällt werden. Diese Arten an Fehlstellen sind zwei Beispiele für lokale Fehlstellen, da sie lokal kältere Bereiche in einem ansonsten gesunden Baum darstellen.

Weitere Beispiele für Bäume mit Fehlstellen sind in Abbildung 11. In der linken Abbildung sind zwei Fichten nebeneinander zu sehen. Der linke Baum ist abgestorben während der rechte gesund ist. Die beiden Bäume sind durch ihre Position ähnlichen äußeren Bedingungen ausgesetzt, aber der abgestorbene Baum weist eine erhöhte Temperatur von ca. 3° Celsius auf. Dies ist ein Beispiel für eine globale Anomalie, da der abgestorbene Baum eine global erhöhte Temperatur aufweist im Vergleich zu ähnlichen Bäumen.

In der rechten Abbildung ist eine Robinie zu sehen mit einer oberflächlichen Verletzung an der Stammbasis und Stammfäule, die in dieser Verletzung zu sehen ist. Die Robinie weist einen typischen Temperaturverlauf auf, bei dem die Stammbasis kälter ist und der Stamm nach oben hin wärmer wird. Außerdem entstehen durch die Rauheit der Rinde größere Unterschiede in der Oberflächentemperatur. Die oberflächliche Verletzung zeigt sich wieder als kälterer Bereich im Infrarotbild, allerdings ist die Ausprägung nicht so deutlich verglichen mit der oberflächlichen Verletzung des Bergahorns. Es ist außerdem nicht ersichtlich, dass die Stammfäule einen weitergehenden Einfluss auf die Wärmesignatur der Robinie hat. Dies kann mehrere Ursachen haben: Die Stammfäule hat nur ein geringes Ausmaß, die eingebrachte Wärmemenge ist nicht ausreichend, um einen signifikanten Unterschied der Wärmesignatur zu sehen oder die Isolationswirkung der äußeren Schicht ist zu groß. Weitere Untersuchungen mit *ground truth*-Daten sind notwendig, um die Ursache zu ermitteln.

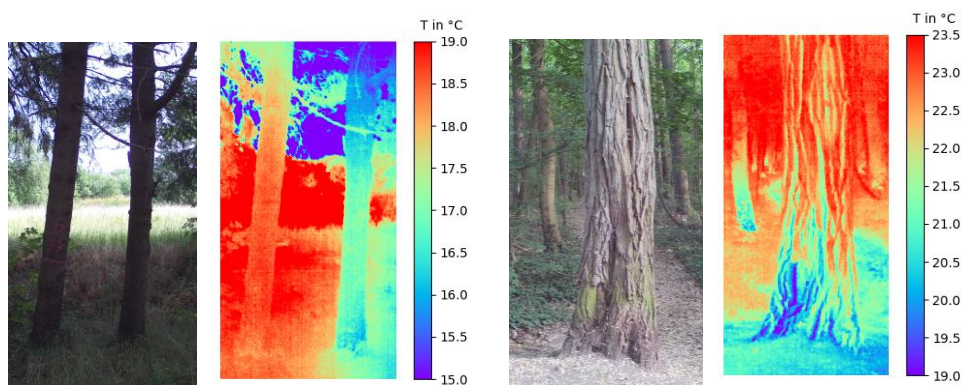


Abbildung 11: Links: zwei Fichten von denen die linke abgestorben und die rechte gesund ist. Rechts: Eine Robinie mit oberflächlicher Verletzung und Stammfäule. Beide Bilder wurden

Messungen vom Schienenfahrzeug aus

Als zweite Messmodalität waren Messungen mit einem Schienenfahrzeug der MaLoWa GmbH vorgesehen. Die MaLoWa verfügt über den Zugang zu einer 20 km langen Strecke, zwischen Klostermansfeld und Wippra. Die Strecke ist bis Vatterode (bei 7,7 km) von landwirtschaftlich genutzter Fläche mit geringem Baumbestand umgeben. Von Vatterode bis Wippra verläuft die Strecke durch ein Gebiet mit sehr dichtem Baumbestand – Wälder, Dörfer und extensiv bewirtschaftete Wiesen (siehe Abbildung 12).

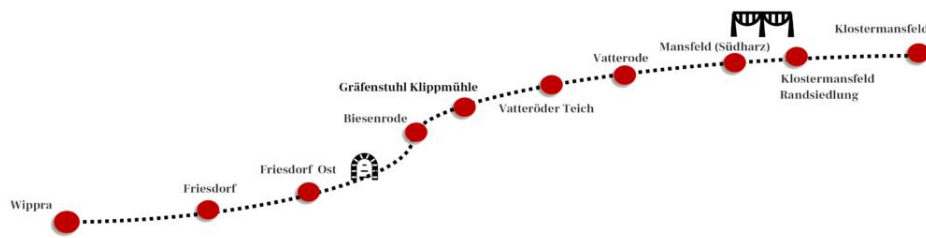


Abbildung 12:
Streckenverlauf der
Wipperliese Strecke in der
südöstlichen Harzregion.

Die eingleisige Strecke wird nur für einen touristischen Gelegenheitsverkehr genutzt und eignet sich deswegen gut für zeitaufwendige Messfahrten. Ab dem 01.01.2023 wechselte allerdings die Betreiberfirma von der Kreisbahn Mansfelder Land GmbH zur Cargo Logistik Rail Service GmbH (North Data). Dadurch wurde der Zugang der MaLoWa GmbH zur Strecke deutlich erschwert – vormals waren Geschäftsführer der MaLoWa und Kreisbahn dieselbe Person. Durch den höheren bürokratischen Aufwand der Streckenbuchung, konnte mit den vorhandenen Mitteln im Projekt nur eine Messfahrt durchgeführt werden. Es wurde deswegen entschieden diese im Sommer durchzuführen, in dem warme Temperaturen die besten Bedingungen ermöglichen. Die Messfahrt fand am 16. August 2023 von 17 bis 20 Uhr statt. Die Wetterbedingungen waren sonnig mit vereinzelter Bewölkung bei 18 bis 20 °C. Am Vormittag wurde das Messsystem am Zug angebracht und erste Probemessungen auf dem Gelände der MaLoWa vorgenommen. Die Messung erfolgte anschließend abends. Zunächst wurde die Strecke von Klostermansfeld bis Wippra in normaler Reisegeschwindigkeit abgefahren (im Schnitt 50 km/h) und Messungen aufgenommen. Anschließend wurde der Bereich von Wippra bis Vatterode in langsamer Geschwindigkeit vermessen (im Schnitt 10 km/h).

Es wurden thermale und visuelle Videos aufgenommen mit einer framerate von 29.7 Hz thermal und 30 Hz visuell (maximale Aufnahmegeschwindigkeiten der Kamera). Die visuellen Videos decken jeweils einen Zeitraum 3 Minuten ab, während die infraroten Videos in 1 Minuten Abschnitte aufgeteilt sind. Die Infrarotvideos wurden in Falschfarben zur Darstellung der Temperatur umgewandelt und anschließend mit den visuellen Videoaufnahmen verknüpft. Aufgrund der geringfügig unterschiedlichen framerate mussten die Videos beim Zusammenfügen manuell angepasst werden. Für eine genauere Beschreibung der Verarbeitung der thermalen Daten, siehe Abschnitt 2.1.2 Datenverarbeitung. Die Daten umfassen insgesamt 50 Gb und wurden auf die Mobiltheke hochgeladen. Beispielhaft werden hier einige Ausschnitte der Aufnahmen gezeigt (siehe Abbildung 13 - 15).

Eingehende Darstellung

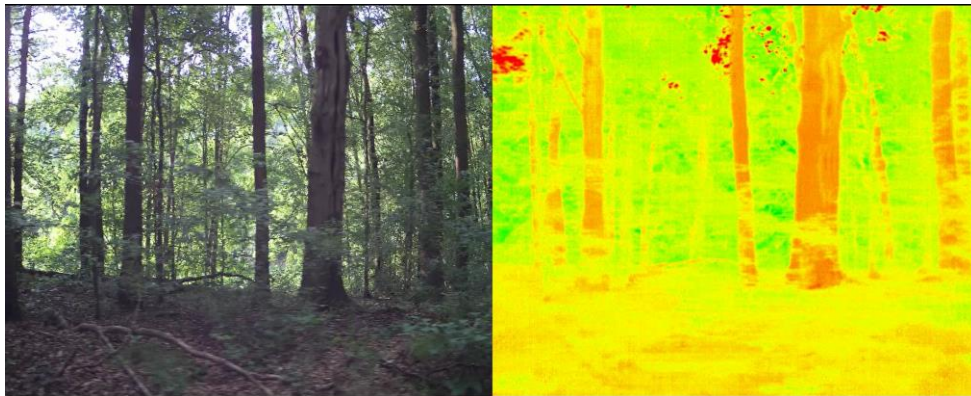
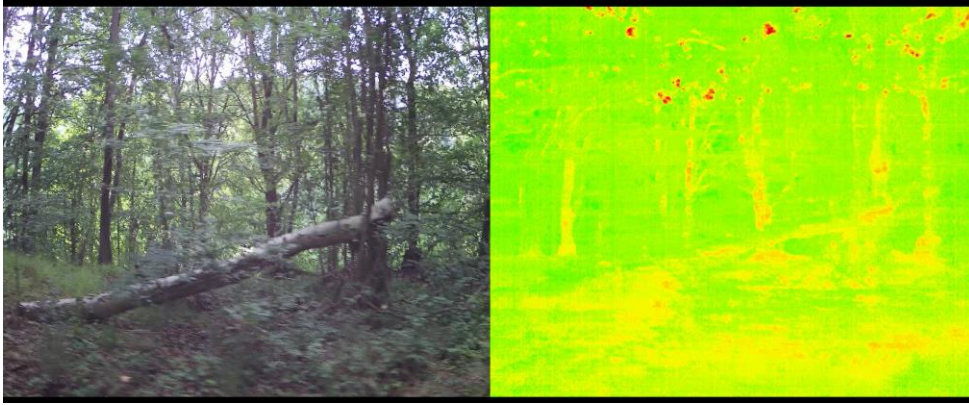


Abbildung 13:
Ausschnitt der
Messergebnisse aus der
Messfahrt. Zu sehen ist eine
Ansicht in einen Wald mit
einer schadhafte Buche.

Durch die Temperaturmittelung zur Reduzierung des Vignettierungseffekts, beschrieben in Abschnitt 2.1.2, wurden die original Temperaturwerte mit relativen Temperaturwerten ersetzt. Diese sind in Abbildung 13 auf der rechten Seite durch falschfarbenen illustriert, wobei in diesem Fall eine invertierte Farbskala mit kälteren Werten als Rot und wärmeren Werten als grün bis blau gewählt wurde. In Abbildung 13 ist ein dichter Baumbestand eines gleisnahen Waldes zu sehen im Streckenabschnitt Friesdorf bis Friesdorf Ost. In der Mitte ist eine große Rotbuche mit einer länglichen Verletzung der Rinde zu sehen. Die Rindenwulst an der Verletzung zeichnet sich als kälterer Bereich ab. In Abbildung 14 wird ein weiterer Blick in einen Wald gezeigt auf dem eine umgestürzte und abgestorbene Birke (*Betula pendula*) zu sehen ist. Durch den größeren Anteil von Unterholz ist die Sicht in dieser Aufnahme erschwert, der abgestorbene Birkenstamm weist sich jedoch durch eine höhere Temperatur als die Stämme der umgebenden Bäume aus.



Eingehende Darstellung

Abbildung 14:
Ausschnitt der
Messergebnisse aus der
Messfahrt. Im Zentrum der
Aufnahme ist eine
abgestorbene Birke

In Abbildung 15 wird eine Aufnahme aus erhöhter Position (Die Bahnstrecke verläuft an einem Hang) gezeigt mit einem Berg-Ahorn im Vordergrund und einer Wiese und Straße im Hintergrund. Der linke Teil des Baumes weist eine deutlich geringere Temperatur im Vergleich zu den rechten kleineren Ästen auf, verursacht durch die geringere Wärmekapazität im Vergleich zum Baumteil mit höherem Stammumfang. Die Straße im Hintergrund, die auf den visuellen Aufnahmen nur undeutlich zu sehen ist, zeichnet sich durch ihre deutlich erhöhte Temperatur aus.

Insgesamt weisen die Aufnahmen während der Fahrt einen deutlich geringeren Detailgrad auf als die Aufnahmen mit dem Handgerät, obwohl dasselbe Kamerasystem verwendet wurde. Motion Blur durch die Fahrtgeschwindigkeit kann als Ursache ausgeschlossen werden, wie die Berechnungen in Abschnitt 2.1.2 zeigen. Eine mögliche Ursache ist die Vibration des Zuges. Diese waren unerwartet stark und konnten durch die entwickelte Federung nicht vollständig

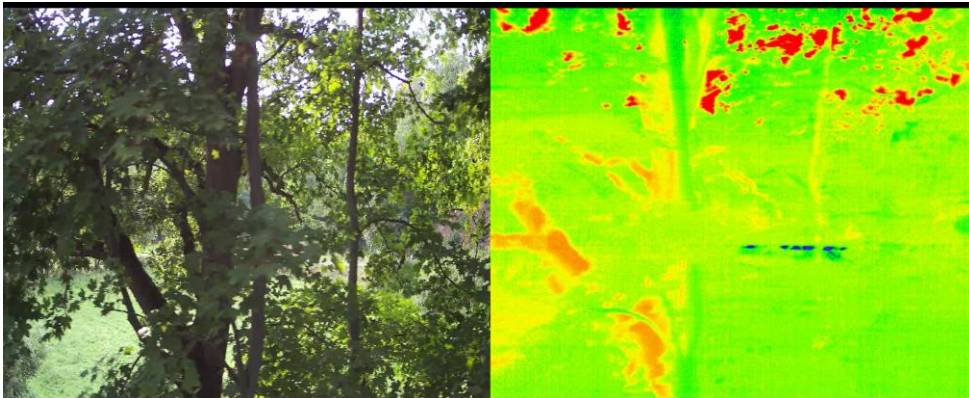


Abbildung 15:
Ausschnitt der
Messergebnisse aus der
Messfahrt. Die Aufnahme
wurde an einem Hang
gemacht und zeigt einen
Berg-Ahorn

kompensiert werden. Eine weitere Ursache könnte die Trägheit der Mikrobolometer sein. Wie in (Teledyne Flir 2016) dargestellt nähern sich diese asymptotisch der realen Temperatur an. Bei dem schnellen Szenenwechsel in der Videoaufnahme führt dies möglicherweise zu einer geringeren Sensitivität als die angegebenen 50 mK.

2.1.4 AP4: Auswertung und Validierung

Zur Validierung der Messergebnisse wurden wegen der höheren Datenqualität die Aufnahmen mit dem Handgerät in Rostock herangezogen und mit der Beurteilung der Experten des Rostocker Stadtforstamts verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass äußere Verletzungen der Rinde sich deutlich in den Infrarotaufnahmen abbilden. Auch Schadstellen mit feuchtem oder faulem Holz sind auf dem Infrarotbild sehr gut zu sehen, wie in Abbildung 10 und 11 zu sehen. Abgestorbene Bereiche können sich je nach Tageszeit und Wetterbedingungen als kälterer oder wärmerer Bereich abzeichnen. Keine positiven Befunde konnten zur Früherkennung von Borkenkäferbefall gemacht werden. Bei den Bäumen, die uns als befallen ausgewiesen wurden, wurde kein erhöhte Temperatur oder andere Abweichungen der Wärmesignatur gemessen. Auch für die Erkennung von nicht sichtbaren Fehlstellen wie Hohlstellen und Stammfäule konnten keine eindeutigen Belege gefunden werden. Da keine Baumfällungen vorgenommen wurden, ist es schwierig hier eine Aussage zu treffen. Für Untersuchungen in Folgeprojekten wäre es empfehlenswert vergleichende Messmethoden wie Ultraschall Tomographie einzusetzen und Ground Truth Informationen durch Baumfällungen zu erhalten.

Weiterhin sollte eine abschließende Beurteilung der Thermografie für den Einsatz von mobilen Trägersystemen erfolgen. Grundsätzlich sind Thermografie Kameras gut für den Einsatz auf mobilen Trägersystemen wie Drohnen oder Fahrzeugen geeignet und werden bereits in viele Szenarien, wie der Erkennung von Bränden aus der Luft, eingesetzt. Allerdings haben die Messungen gezeigt, dass die Detailschärfe bei bewegten Aufnahmen absinken kann. Hinsichtlich der Aufnahmegeschwindigkeit muss außerdem auf die Einschränkungen ungekühlter Thermografie Kameras mit Mikrobolometern geachtet werden. Diese erreichen nicht mehr als 30 Hz, für Highspeed Aufnahmen müssen dementsprechend gekühlte Thermografie Kameras verwendet werden, die schwerer und deutlich kostspieliger sind als ungekühlte Thermografie Kameras.

Der Einsatz von Computer Vision- und KI-Algorithmen hat sich als sehr vielversprechend gezeigt. Die Erkennung und Segmentierung einzelner Baumexemplare hat bereits positive Ergebnisse gezeigt. Auch die Erkennung von Fehlstellen in visuellen- und infrarot Aufnahmen mit KI-Verfahren wird positiv bewertet. Allerdings werden hier noch größere Aufwände zum Sammeln Trainings- und Validierungsdaten erwartet.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Verwendungsnachweis wurde vorgelegt. Alle Mittel wurden mit geringfügigen Abweichungen wie geplant ausgegeben. Dabei wurde auf einen zweckentsprechenden und sparsamen Einsatz der Mittel geachtet. Durch Änderungen im Streckenzugang bei der MaLoWa GmbH konnte mit den verfügbaren Mitteln nur eine Messfahrt durchgeführt werden, was allerdings ausreichend war, um die Vorhabensziele zu erfüllen.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Alle geleisteten Arbeiten waren für den Projekterfolg notwendig und angemessen. Teilweise gingen die erfolgten Arbeiten über das im Projekt geforderte hinaus, wie im Falle der erfolgreichen Umsetzung von KI-Algorithmen zur Baumerkennung. Die nicht eingeplanten Arbeiten zur Entwicklung des Handkameranagements waren notwendig, um die benötigte Sensitivität bei den Messungen zu erreichen. Diese Arbeiten haben unter anderem zu einer Verlängerung des Projekts geführt, die aber kostenneutral geblieben ist.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Projekt liefert wichtige Erkenntnisse und Grundlagen für den Einsatz von Thermografie Kamerasystemen von bewegten Trägerplattformen und das mobile Baumgesundheitsmonitoring. Wie in AP 1 dargestellt kann der ursprüngliche Messansatz gut auf Inspektionsanwendungen auf der Straße oder aus der Luft übertragen werden. Die Ergebnisse zum Einsatz von KI-Algorithmen in der Baumerkennung und Fehlstellendetektion können für ein breites Spektrum an Aufgaben aus der Baumpflege eingesetzt werden. Denkbare Ansätze sind beispielweise die Vermessung des Baumbestandes zur forstlichen Inventur oder die Erkennung visueller Krankheitsmerkmale.

Von den Ergebnissen der Infrarot Messungen können Forschungsarbeiten profitieren, die sich auf die Erkennung einzelner Baumkrankheiten über Thermografie fokussieren, da im Projekt ein breites Spektrum an Baumarten und Krankheitsbildern erfasst wurde. Dafür stehen auf der Mobiltheke, die Messdaten der Zugfahrt und mit dem Handmessgerät öffentlich zur Verfügung.

Im Laufe des Forschungsprojekts konnte am Fraunhofer IGP wertvolle Kompetenzen zur Thermografie, zum Einsatz mobiler Messsysteme und der Bauminspektion aufgebaut werden, die für den im Aufbau befindlichen Forschungsbereich Smart Farming von besonderer Bedeutung sind.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Machbarkeitsstudie wird ein Folgeprojekt der Förderklasse 2 im mFUND angestrebt, in die Verknüpfung von

Fernerkundungsdaten und bodennahen Messdaten und die Anwendung auf der Straße stärker fokussiert werden sollen.

Eingehende Darstellung

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Die Thematik des automatisierten und intelligenten Vegetationsmonitoring ist aktuell von großer Bedeutung, was durch verwandte Forschungsprojekte bestätigt wird. Beispielhaft seien hier das mFUND Projekt RailVitaliTree (Sonja Szymczak 2023) des Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung und TreeDigitalTwins (Jürgen Döllner und Jan-Peter Mund 2023) der Universität Potsdam genannt. Im Projekt RailVitaliTree sollen die trockenheitsbedingten Risiken entlang von Schienenwegen mit Fernerkundung und Dendroökologie erfasst werden. Als Ergebnis soll ein anwenderorientierter Baumvitalitätsmonitor kritische Bereiche anzeigen. In einem Folgeprojekt könnte geprüft werden, ob kritische Bereiche des Vitalitätsmonitors sich auch in den Ergebnissen des Messsystems widerspiegeln.

Das Projekt TreeDigitalTwin ist interessant da hier auf den Einsatz von 3D Punktwolken und die Verwendung von KI-Verfahren gesetzt wird. Ziel ist es einen digitalen Zwilling für einen Baum oder Forstbestand zu erstellen, in dem zeitliche und räumliche Informationen zu einer 4D Punktwolke verknüpft werden und der Anwender:in als Werkzeug zur Visualisierung und Entscheidungshilfe dienen.

2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichung

Im Laufe des Projekts bestand Kontakt zu verschiedenen Stellen aus der Forschung und der Anwendung. Darunter Forschenden des mFUND und der Universität Göttingen und mit Baumpflegeexperten der deutschen Bahn und des Stadtforstamts Rostock.

Im Rahmen des Forschungsbereichs Smart Farming wurde das TherMoBaum Projekt bei Vernetzungstreffen zwischen dem Fraunhofer IGD und dem IGP präsentiert. Außerdem wird die Machbarkeitsstudie im Jahresabschlussbericht des IGP für das Jahr 2024 beschrieben.

Als wissenschaftliche Veröffentlichung ist ein Beitrag im scopus gelisteten gis.Science Journal für Geoinformatik geplant in der Ausgabe 04/2024.

Als Beitrag auf Konferenzen und Präsenzveranstaltungen wird das TherMoBaum Projekt unter anderem auf folgenden Veranstaltungen präsentiert:

- 3D-Nordost Konferenz 26.11./27.11.2024
- Oldenburger 3D Tage 2025

2.7 Ausblick für ein Folgeprojekt

Die Machbarkeitsstudie TherMoBaum hat umfangreiche Vorarbeiten geleistet für mögliche Folgeprojekte und auch Problemstellungen aufgezeigt in der Entwicklung von mobilen Monitoringsystemen für die Baumgesundheit. Diese Erkenntnisse sollen in Folgeprojekten ausgebaut und weiterentwickelt werden. Dabei soll die Anwendung von der Schiene auf die Straße erweitert werden. Der Zugang zur Schiene und die Anforderungen beim Einsatz an einem Schienenfahrzeug haben sich in der Machbarkeitsstudie als limitierender Faktor gezeigt. Durch die Anbringung des Messsystems an einem Straßenfahrzeug können potenziell deutlich häufiger Messungen aufgenommen werden, was die Entwicklungsarbeit beschleunigt. Außerdem erschließt sich dadurch ein neues Anwendungsfeld mit sehr großem Umfang.

Als weitere interessante Entwicklungsrichtung bietet sich die Fusion von Fernerkundungs- und bodengestützten Messdaten an. Durch eine hochpräzise Referenzierung der Messdaten aus unterschiedlicher Perspektive können Bäume ganzheitlich abgebildet werden. Fehlstellen am Stamm und den Hauptästen können effektiv aus der Bodenperspektive erfasst werden, während die Luftperspektive eine Erfassung der Kronenbelaubung und bessere Übersicht zum Baumbestand ermöglicht.

Zur Datenerfassung bietet sich für ein Folgeprojekt ein größerer Fokus auf visuelle Bildaufnahmen an. In der Machbarkeitsstudie hat sich gezeigt, dass viele äußerliche Fehlstellen, die im Infrarotbild erkannt werden, auch visuell sichtbar sind. Als Erweiterung der bestehenden Datenverarbeitung können automatisierte Verarbeitungsansätze entwickelt werden, um ungünstige Wuchsformen wie V-Gabelungen automatisch zu erkennen, die die langfristige Stabilität des Baumes gefährden. Gerade die erforschten KI-Ansätze liefern hier vielversprechende Methoden zur automatisierten Erkennung. Diese weitere Bewertungsebene, zusätzlich zu den erkannten Schäden, schafft eine Grundlage, die auch prädikative Beurteilungen ermöglicht.

Obwohl eine Vielzahl von Schäden optisch detektiert werden können, bleibt die Problemstellung der verdeckten Fehlstellen erhalten. Daher ist in einem Folgeprojekt der Einsatz thermographischer Messtechnik insbesondere für diese Aufgabe zu untersuchen. Speziell die Verwendung von gekühlter Messhardware mit höherer Sensitivität bietet hier großes Potenzial. Für die weitere Erforschung der Thermografie zur Schadstellenerkennung bietet es sich außerdem an, fokussierter auf spezifische Schadensausprägungen und Baumarten zu schauen. Die Erkennung von Borkenkäferbefall bei Fichten wäre als Beispiel von hoher Relevanz zu nennen oder die Erkennung des Brandkrustenpilzes bei Buchen. Das Bereitstellen von Ground Truth Daten durch Baumfällungen und Vergleichsmessungen sollte in einem Folgeprojekt angestrebt werden.

3 Literaturverzeichnis

Bellett-Travers, Marcus; Morris, Steven (2010): THE RELATIONSHIP BETWEEN SURFACE TEMPERATURE AND RADIAL WOOD THICKNESS OF TWELVE TREES HARVESTED IN NOTTINGHAMSHIRE. In: *Arboricultural Journal* 33 (1), S. 15–26. DOI: 10.1080/03071375.2010.9747589.

Burcham, Daniel; Leong, Eng-Choon; Fong, Yok-King; Tan, Puay-Yok (2012): An Evaluation of Internal Defects and Their Effect on Trunk Surface Temperature in *Casuarina equisetifolia* L. (Casuarinaceae). In: *AUF* 38 (6), S. 277–286. DOI: 10.48044/jauf.2012.037.

Deng, Jia; Dong, Wei; Socher, Richard; Li, Li-Jia; Kai Li; Li Fei-Fei (2009): ImageNet: A large-scale hierarchical image database. In: 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition: IEEE.

Deutsche Bahn (2023): Unberuehrter Wald. Online verfügbar unter <https://nachhaltigkeit.deutschebahn.com/de/massnahmen/unberuehrter-wald>, zuletzt geprüft am 30.01.2024.

Deutsche Bahn (2024): Grün an der Bahn - Wie die DB Bäume und Sträucher an ihren Strecken pflegt. Erweitertes Vegetationsmanagement sorgt für mehr Sturmsicherheit. Online verfügbar unter https://www.deutschebahn.com/de/presse/suche_Medienpakete/medienpaket_vegetationsmanagement-6854346, zuletzt geprüft am 30.01.2024.

Hashim, Izrahayu Che; Shariff, Abdul Rashid Mohamed; Bejo, Siti Khairunniza; Muharam, Farrah Melissa; Ahmad, Khairulmazmi (2021): Classification of Non-Infected and Infected with Basal Stem Rot Disease Using Thermal Images and Imbalanced Data Approach. In: *Agronomy* 11 (12), S. 2373. DOI: 10.3390/agronomy11122373.

He, Kaiming; Gkioxari, Georgia; Dollar, Piotr; Girshick, Ross (2017): Mask R-CNN. In: Mask R-CNN. Unter Mitarbeit von Kaiming He, Georgia Gkioxari, Piotr Dollar und Ross Girshick. 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV): IEEE.

He, Kaiming; Zhang, Xiangyu; Ren, Shaoqing; Sun, Jian (2016): Deep Residual Learning for Image Recognition. In: 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR): IEEE.

Huh, Minyoung; Agrawal, Pulkit; Efros, Alexei A. (2016): What makes ImageNet good for transfer learning?

Jürgen Döllner; Jan-Peter Mund (2023): Tree Digital Twins. KI-basierte Verfahren zur Analyse von 4D-Punktwolken zum Aufbau Digitaler Zwillinge am Beispiel von Vegetationsbeständen, zuletzt geprüft am 30.01.2024.

Kirillov, Alexander; Mintun, Eric; Ravi, Nikhila; Mao, Hanzi; Rolland, Chloe; Gustafson, Laura et al. (2023): Segment Anything. In: 2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV): IEEE.

Liu, Jiaqi; Xie, Guoyang; Wang, Jinbao; Li, Shangnian; Wang, Chengjie; Zheng, Feng; Jin, Yaochu (2024): Deep Industrial Image Anomaly Detection: A Survey. In: *Mach. Intell. Res.* 21 (1), S. 104–135. DOI: 10.1007/s11633-023-1459-z.

Majdák, A.; Jakuš, R.; Blaženec, M. (2021): Determination of differences in temperature regimes on healthy and bark-beetle colonised spruce trees using a handheld thermal camera. In: *iForest* 14 (3), Artikel 3531, S. 203–211. DOI: 10.3832/ifor3531-014.

North Data: Kreisbahn Mansfelder Land GmbH, Hettstedt. Online verfügbar unter <https://www.northdata.de/Kreisbahn+Mansfelder+Land+GmbH,+Hettstedt/Am+tsgericht+Stendal+HRB+208943>, zuletzt geprüft am 30.01.2024.

Ottmar Edenhofer; Peter Hoffmann (2021): Analyse des Klimawandels für die Deutsche Bahn: Studie zur räumlichen Ausprägung in Deutschland. Online verfügbar unter https://www.deutschebahn.com/resource/blob/6860338/5b885297f5d854d53bae429c05de3908/20210618_PIK-Studie-Slides-data.pdf, zuletzt geprüft am 30.01.2024.

Pitarma, Rui; Crisóstomo, João; Ferreira, Maria Eduarda (2019): Contribution to Trees Health Assessment Using Infrared Thermography. In: *Agriculture* 9 (8), S. 171. DOI: 10.3390/agriculture9080171.

Sonja Szymczak (2023): Baumvitalitätsmonitoring und Modellierung trockenheitsbedingter Risiken entlang von Schienenwegen mit Fernerkundung und Dendroökologie – RailVitaliTree. Online verfügbar unter <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/railvitalitree.html>, zuletzt geprüft am 30.01.2024.

Teledyne Flir (2016): High-Speed-Wärmebildkameras - Geschwindigkeit zählt. Online verfügbar unter <https://www.flir.de/discover/rd-science/high-speed-thermal-cameras--the-need-for-speed/>, zuletzt aktualisiert am 29.02.2016, zuletzt geprüft am 30.01.2024.

Verspätungen und Störungen - was die Deutsche Bahn aufhält. In: *Rheinische Post* 2012. Online verfügbar unter <https://rp-online.de/wirtschaft/unternehmen/verspaetungen-und-stoerungen->, zuletzt geprüft am 20.03.2022.

Vidal, Daniele; Pitarma, Rui (2019): Infrared Thermography Applied to Tree Health Assessment: A Review. In: *Agriculture* 9 (7), S. 156. DOI: 10.3390/agriculture9070156.

Wang, Yongzhen; Yan, Xuefeng; Bao, Hexiang; Chen, Yiping; Gong, Lina; Wei, Mingqiang; Li, Jonathan (2022): Detecting Occluded and Dense Trees in Urban Terrestrial Views With a High-Quality Tree Detection Dataset. In: *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 60, S. 1–12. DOI: 10.1109/tgrs.2022.3184300.

You only look once: Unified, real-time object detection (2016). Online verfügbar unter https://www.cv-foundation.org/openaccess/content_cvpr_2016/html/redmon_you_only_look_cvpr_2016_paper.html.