

# Ergebnisse der weiterführenden Analyse zur Einsetzbarkeit von automatisierten Systemen in der Holzernte (AP3)

zum Vorhaben

CALAHARI- CALamity Adapted HARvesting Innovation

Zuwendungsempfänger:

**Teilvorhaben 1: Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e. V. (KWF)**

**Teilvorhaben 2: Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH (DFKI)**

**Teilvorhaben 3: ANDREAS STIHL AG & Co. KG**

Förderkennzeichen:

**Teilvorhaben 1: KWF- Anforderungen, Analysen und Wissenstransfer für die Robotik in der Forstwirtschaft ( 2220K51A4)**

**Teilvorhaben 2: DFKI- Maschinenkonzept für die Robotik in der Forstwirtschaft (2220WK51B4)**

**Teilvorhaben 3: STIHL- Navigation und Orientierung für die Robotik in der Forstwirtschaft (2220WK51C4)**

Laufzeit:

**01.11.2022 bis 31.10.2023**

Monat der Erstellung: **10/2023**



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit  
und Verbraucherschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

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

**Ziel** dieses Arbeitspaketes war, die Anwendung weiterer Hard- und Software aus externen Projekten und Entwicklungen zu prüfen. Durch die Erfahrungen der Konzeptstudie, ebenso wie die Ergebnisse der Gespräche, sollte die langfristige Vision eines teilautonomen, KI-gestützten verbundenen Holzertesystems definiert werden.

Durch den Wissensaustausch mit verschiedenen Experten, die am Workshop teilnahmen, Versicherungen und Unternehmern sowie durch die Erkenntnisse aus dem ersten Arbeitspaket wurden vier Konzepte für ein Holzertesystem entwickelt:

1. Automatisierter Harvester
2. Kleinroboter mit modularen Werkzeugen
3. Mehrere kleine Roboter mit unterschiedlichen Fähigkeiten
4. Luft Roboter/ Drohne

Anhand einer Bewertungsmatrix entschied sich das Projektkonsortium für das 3. Konzept, welches in einem Folgeprojekt umgesetzt werden soll.

Gemittelt:	Waldschutz	Arbeitschutz	Modularität	Umweltschutz	Konzeptreife	Gebrauchsfähigkeit	Fähigkeit	Erweiterbarkeit	Einsatzbereiche	
Gewichtung	1	1	0,5	1	0,7	0,5	0,3	0,2	0,8	total rating
automatisierter Harvester	2,11	5,78	4,11	3,33	4,56	6,22	7,44	4,22	4,89	26,57
aus der Luft (Drohne)	9,78	7,78	3,78	5,33	3,67	9,44	5,00	3,89	7,89	40,66
kleines Roboter-System	7,33	8,33	7,22	6,56	6,44	6,67	6,33	6,11	6,44	41,96
mehrere kleine Systeme	7,56	8,67	9,22	6,78	5,44	6,56	8,44	8,22	7,33	44,74

Das Konzept besteht aus zwei wesentlichen Komponenten. Zum einen wird ein digitaler Zwilling des Waldes erstellt und zum anderen ein Prototyp, der den Fällvorgang teilautonom durchführt. Ziel ist die Entwicklung eines teilautonomen Fällsystems, das eine sichere, bodenschonende und nachhaltige Holzerte ermöglicht. Wir schaffen die Grundlagen für die weitere Digitalisierung der Prozesskette, der Waldzustandserhebung, Arbeitsplanung und des Einschlags. Die an den Klimawandel angepasste Waldbewirtschaftung bekommt damit dringend benötigte Impulse zur Steigerung der Energie- und Kosteneffizienz sowie zur Ressourcenschonung. Kern des Vorhabens sind eine virtuelle 3D-Repräsentation des Baumbestandes, der sogenannte digitale Zwilling des Waldes, sowie seine Verknüpfung mit modernen Robotik- und KI-Technologien zur Steuerung des teilautonomen Holzeinschlags. Der zu entwickelnde Prototyp begegnet den Herausforderungen der Arbeitssicherheit, indem er in lebensgefährlichen Bestandssituationen eingesetzt werden kann, ohne dass sich der Forstwirt im Gefahrenbereich aufhalten muss.

### Digitaler Zwilling des umliegenden Bestandes

Für den Roboter wird ein digitaler Zwilling benötigt, um die gesammelten GIS-Daten (Waldgebiete, Flurstücke, Bestände, Geologie), Infrastrukturdaten (Rettungspunkte, Infrastrukturpunkte, Wegenetze) und einen detaillierten Arbeitsplan aller laufenden und geplanten Arbeiten darzustellen.

Drohnen bieten ein enormes Potenzial für die Erfassung hochauflösender Daten und ermöglichen innovative Anwendungen im Bereich des Waldmanagements und -monitorings. Die Verwendung von Drohnentechnologie mit diversen optischen Sensoren stellt eine kostengünstige, flexible und effiziente Methode zur Datenerfassung dar. UAVs ermöglichen eine detaillierte und geometrisch hochauflösende Datenerhebung des Waldbestands. Insbesondere die Verwendung von Real-Time Kinematic (RTK)-Drohnen ermöglicht eine präzise Positionsbestimmung in Echtzeit und bietet dadurch qualitativ hochwertige Daten für forstwissenschaftliche Anwendungen. Diese Fähigkeiten eröffnen neue Möglichkeiten zur Bewertung und Analyse von Waldressourcen, die zuvor zeitaufwendig, kostspielig oder sogar unmöglich waren. Optische Drohnen-Daten können per Structure from Motion (SfM) zu Datenprodukten wie 3D-Punktwolken, Orthomosaiken und Höhenmodellen prozessiert werden. Die SfM-Methodik nutzt mehrere Bilder, die aus unterschiedlichen Perspektiven eines bestimmten Gebietes aufgenommen wurden, um dreidimensionale Modelle zu erstellen. Durch die Überlappung von Bildern können Punkte identifiziert und in verschiedenen Bildern zueinander in Beziehung gesetzt werden. Diese Merkmale werden dann verwendet, um die Kamerapositionen und -orientierungen zu definieren und so die 3D-Geometrie des abgebildeten Geländes zu erstellen. Der Vorteil dieser Technik liegt in

ihrer Fähigkeit, sowohl geometrische als auch spektrale Datensätze zu liefern, die als Eingabedaten für verschiedene Algorithmen zur Extraktion von Waldparametern verwendet werden können.

Ein wichtiger Prozess in dieser Phase ist die topographische Normalisierung. Insbesondere in Waldgebieten, die sich über unebenes Gelände erstrecken, können unterschiedliche Geländeneigungen zu Verzerrungen in der Darstellung von Objekten führen. Durch die Normalisierung der Daten werden die 3D-Daten als Höhe über dem jeweiligen Bodenpunkt wiedergegeben, es lassen sich so einheitlich über den gesamten Waldbestand unabhängig des jeweiligen Reliefs Informationen ableiten, wie z.B. die Baumhöhe der Einzelbäume. Durch die Normalisierung kann der Waldbestand außerdem in unterschiedliche Höhenstufen eingeteilt und eine vertikale Datenselektion angewandt werden. In einem Waldgebiet können Drohnenbilder Informationen aus verschiedenen vertikalen Ebenen liefern, von der Baumkrone bis zum Waldboden. Die vertikale Datenselektion ermöglicht es, bestimmte Ebenen für die Analyse zu isolieren. So kann man sich beispielsweise auf die Baumkronenebene konzentrieren, um Informationen über die Baumhöhe und -dichte zu extrahieren, oder auf die Bodenebene, um den Zustand des Waldbodens zu analysieren.

Die Ableitung eines Waldboden-RGB-Orthomosaiks ist ein weiterer Prozess, der in dieser Phase durchgeführt werden kann. Ein RGB-Orthomosaik ist ein farbiges Rasterbild, das aus Drohnenbildern abgeleitet wird. Durch die Fokussierung auf den Waldboden kann ein solches Raster nützliche Informationen über den Zustand und die Eigenschaften des Waldbodens liefern, wie beispielsweise die Bodenbedeckung und -struktur, die Präsenz von Unterholz oder die Verteilung von Totholz. Diese Prozessierungsmethoden sind entscheidend, um die hohe Menge an Daten, die durch drohnengestützte Erfassungen generiert werden, in wertvolle Informationen umzuwandeln, die für die forstwissenschaftliche Forschung und Praxis genutzt werden können. Dies geschieht automatisiert durch zuvor erstellte Workflows. Durch die Integration dieser Methoden in den Datenverarbeitungsworkflow können hochwertige Analysen und Interpretationen der Waldgebiete erreicht werden. Dadurch werden projektrelevante forstliche Parameter wie Totholz, Stammfußkoordinaten, Baumhöhen, Mikrorelief des Waldbodens, Stammdurchmesser, Baumarten, Kronengeometrie abgeleitet. Außerdem werden damit administrative und infrastrukturelle GIS-Daten zusammengestellt wie die Liste aller öffentlich bekannter und markierter Rettungspunkte und Infrastrukturpunkte, Wegenetze, Positionen der relevanten Flächen (Lagerflächen, Abstellflächen) und Arbeitsaufgaben (Liste geplante und derzeit durchgeführte Arbeiten (Gebiet, Baum Arbeitende, Maschinen)) dargestellt. Insgesamt tragen diese Parameter entscheidend zum Verständnis der Struktur, Funktion und Dynamik von Waldökosystemen bei. Sie sind von zentraler Bedeutung für das Management und die Erhaltung von Wäldern in einem ökologisch nachhaltigen und ökonomisch effizienten Ansatz. Durch die Kombination von UAV-Datenerfassung und fortschrittlichen Datenverarbeitungsmethoden können detaillierte und präzise Informationen über den Waldzustand erzielt werden. Diese Methoden bieten einen innovativen Ansatz für die Erfassung und Analyse von Waldparametern auf einer viel detaillierteren und genaueren Ebene als traditionelle Methoden.

Für den Prototypen kann der Kompaktgeräteträger "Moritz" der Firma Pfanzelt als mobile Basis für das Robotersystem genutzt. Dazu soll diese umgebaut werden und eine Vorrichtung für den autonomen Holzeinschlag, sowie die Integration geeigneter Sensorik für die autonome Steuerung des Roboters (z.B. Geschwindigkeitssensoren für den Raupenantrieb, Laserscanner für die autonome Navigation, IMU für die Lagebestimmung an steilen Hängen, ...) integriert werden. Des Weiteren werden zusätzliche Peripheriegeräte eingeplant, z.B. Rechner, Kommunikations-Infrastruktur, Funk-Notaus, etc. Zuletzt wird das mechatronische Design (Mechanik/CAD und Elektronik) vorgenommen.

Simulationsumgebungen zum Testen von High-Level Software-Komponenten zur Steuerung des Robotersystems werden geschaffen. Dazu wird zunächst ein 3D Modell des Robotersystems in einem geeigneten Format erzeugt (z.B. URDF) und in eine Simulationsumgebung integriert (z.B. Gazebo). Dies beinhaltet die mobile Plattform, die Vorrichtung zum autonomen Holzeinschlag (Armkinematik), sowie die relevanten Sensoren des Robotersystems. Anschließend werden Schnittstellen zur Steuerung des Robotersystems in der Simulation entwickelt. Zuletzt wird ein vereinfachter Bestand modelliert um Autonomiefunktionen, z.B. die autonome Navigation, testen zu können. Eine Abwägung ist hierbei zu treffen zwischen dem notwendigen Detailgrad der Simulation, um eine möglichst realistische Testumgebung zu erzeugen, und der erforderlichen Rechenleistung. Auch die realitätsnahe Simulation von Ketten- und Raupenantrieben muss implementiert werden, da die üblichen Robotersimulationen dies aktuell nicht unterstützen.

Anhand der Odometrie und externen Sensorik des Roboters wird ein Verfahren zur globalen Schätzung von Position und Orientierung des Roboters in der virtuellen 3D Repräsentation (digitaler Zwilling) des

Bestandes implementiert. Unter Zuhilfenahme dieser Schätzung, sowie der externen Sensorik des Robotersystems (z.B. Laserscanner, IMU) werden Verfahren zur autonomen Pfadplanung und -verfolgung im Bestand entwickelt. Die Verfahren werden zunächst in der Simulation und später dann in der realen Laborumgebung am DFKI und im Bestand getestet.

### **Ergebnis**

Die Ergebnisse der weiterführenden Analyse gehen in einer detaillierten Planung auf, wie ein oben beschriebenes System realisiert werden kann. Dazu wurde eine Verbundvorhabensbeschreibung beim Projektträger eingereicht, bestehend aus dem KWF, dem DLR, der Pfanzelt GmbH und dem DFKI. Ziel des Verbundvorhabens ist es, den Kompaktgeräteträger „Moritz“ so umzubauen, dass er sich autonom im Bestand bewegen kann, den zu fällenden Baum autonom ansteuert und ein Anbaugerät konzipiert wird, mit dem der Baum teilautonom gefällt werden kann.