

Ergebnisse der Konzeptentwicklung (AP2)

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: **9/2023**



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.

Inhalt

1. Aufgabenstellung.....	1
2. Vorgehensweise	1
3.1. Entscheidungsmatrix	1
3. Konzeptideen.....	2
4.1. Digitaler Waldzwilling.....	2
4.2. Konzept: Automatisierter (teil-/autonomer) Harvester	3
4.3. Konzept: Kleinroboter mit modularen Werkzeugen	4
4.4. Konzept: Mehrere kleine Roboter mit unterschiedlichen Fähigkeiten	4
4.5. Konzept: Luftgestützte Roboter	5
4. technische Grundvoraussetzung und Ausstattung des Fällroboters	5
5.1. Mechatronisches Design	5
5.2. Robotische Experimente	7
5.3. Konzept Kommunikationsinfrastruktur	8
5.4. Konzept zur Steuerungstechnik.....	9
5.5. Sensorik Konzept	11
5. Ergebnisse Arbeitspaket 2	12

1. Aufgabenstellung

Verantwortlich DFKI und STIHL

Es gibt verschiedene Methoden der Holzernte. Eine gängige Art ist der Einsatz eines Harvesters in Kombination mit einem Forwarder. Bei einem Harvester handelt es sich um eine schwere Maschine mit einem langen Arm, an dem ein Aggregat zum Holzeinschlag montiert ist. Die Harvester haben ein Gewicht von ca. 20 Tonnen und werden von einer/einem HarvesterfahrerIn gefahren. Die Vorteile bei diesem Verfahren sind die Ergonomie der Maschinenführer und die Effizienz in der Holzernte. Allerdings bestehen bei diesem Verfahren auch Nachteile wie die Bodenverdichtung und der Dieserverbrauch. Auch ist die Arbeit mit schweren Maschinen wie einem Harvester sehr gefährlich. Daher wurde in der Projektstudie Calahari ein bzw. mehrere Konzepte zur Verbesserung der Bodenverdichtung, der Arbeitssicherheit und der Effizienz entwickelt.

Zur Bearbeitung des Arbeitspakets 2 wurden zunächst auf Grundlage der Anforderungen aus Arbeitspaket 1 (AP1) Konzepte entwickelt. Das Ziel der Konzeptentwicklung ist es, das am besten geeignete Konzept für die automatisierte Holzernte zu identifizieren, das sowohl den Anforderungen der Prüfumgebung als auch den Zielen des Projekts gerecht wird. Die entwickelten Konzepte werden anschließend im Arbeitspaket 3 (AP3) anhand einer Entscheidungsmatrix bewertet und das vielversprechendste Konzept für die weitere Umsetzung ausgewählt.

2. Vorgehensweise

Um Konzepte zu entwickeln, wurde zunächst eine umfassende Sammlung von Ideen durchgeführt. Diese Ideen wurden auf der Grundlage der vielfältigen Expertisen des Konsortiums generiert. Dabei wurden die Anforderungen aus AP1 berücksichtigt und die Ideen und Vorstellungen entsprechend weiterentwickelt und angepasst. Zusätzlich flossen die Ergebnisse aus dem Workshop sowie den ExpertenInneninterviews in den Entwicklungsprozess ein.

Auf Basis dieser Ideensammlung wurden schließlich vier vielversprechende Konzeptideen ausgewählt. Dabei wurde die Entwicklung eines Digitalen Zwillings „Wald“ als eine besonders wichtige Grundlage identifiziert. Dieser Digitale Zwilling dient als virtuelles Abbild des realen Waldes und ermöglicht eine präzise Analyse und Simulation verschiedener Szenarien. Die reale Interaktion erfolgt auf Grundlage der aus dem Digitalen Zwilling ermittelten Strategien.

Um die Konzeptideen objektiv zu bewerten, wird eine Entscheidungsmatrix erstellt, die von Expertinnen und Experten gewichtet wird. In dieser Matrix werden die einzelnen Konzeptideen anhand vordefinierter Kriterien bewertet. Die Auswertung der Entscheidungsmatrix findet im Rahmen von AP3 statt, wobei die Ergebnisse als Grundlage für die Auswahl des vielversprechendsten Konzepts dienen. Dieses ausgewählte Konzept wird dann in den weiteren Entwicklungsprozess überführt, um seine Umsetzbarkeit und Wirksamkeit eingehend zu prüfen.

2.1. Entscheidungsmatrix

Bei der Entscheidungsmatrix handelt es sich um eine bewährte Methode, die in Projektstudien verwendet wird, um die beste Alternative aus einer Reihe von Optionen zu identifizieren. Sie ermöglicht eine systematische Bewertung und Auswahl basierend auf vordefinierten Kriterien. Die Entscheidungsmatrix wird in Form einer Tabelle erstellt, in der die verschiedenen Entscheidungsoptionen und die relevanten Kriterien aufgeführt sind.

In diesem speziellen Fall der Projektstudie werden die entwickelten Konzeptideen als Entscheidungsoptionen in die Matrix aufgenommen. Die Kriterien, anhand derer die Konzepte bewertet werden, sind die zuvor in AP1 definierten Anforderungen. Diese Anforderungen dienen als Leitfaden und stellen sicher, dass die Konzepte den projektbezogenen Bedürfnissen und Zielen entsprechen.

Durch die Anwendung der Entscheidungsmatrix erhalten die Projektbeteiligten eine transparente und strukturierte Methode, um die Konzeptideen objektiv zu bewerten und letztendlich diejenige Alternative auszuwählen, die am besten den definierten Anforderungen entspricht.

Die Entscheidungsmatrix, die in dieser Studie angewendet wird, beinhaltet vier Entscheidungsoptionen. Die vier Entscheidungsoptionen sind die Konzepte, die in dieser Studie anhand der Anforderungen und der ExpertInneninterviews, sowie des Workshops ermittelt und ausgearbeitet wurden. Die vier Entscheidungsoptionen sind Konzept 1: automatisierter Harvester, Konzept 2: Kleinroboter mit modularen Werkzeugen, Konzept 3: mehrere kleine Roboter mit unterschiedlichen Fähigkeiten und Konzept 4: Luftgestützte Roboter. Die Konzepte werden in den folgenden Kapiteln definiert.

Die Kriterien in der Entscheidungsmatrix wurden anhand der Anforderungen definiert. Die Kriterien sind: Waldschutz, Arbeitsschutz, Modularität, Umweltschutz, Komplexität, Geländegängigkeit, Fähigkeit, Erweiterbarkeit und Einsatzbereiche. Der Waldschutz ist der Schutz des Waldes sowie die Bodenverdichtung. Dabei ist es wichtig, den Wald als Lebens- und Wirtschaftsraum zu erhalten und mögliche Gefahren frühzeitig entgegenzuwirken. Der Arbeitsschutz ist der Schutz des Menschen vor unfallträchtiger Arbeit. Hierbei ist es wichtig, dass Maßnahmen ergriffen werden, um die Mitarbeiterin/ den Mitarbeiter vor Gefahren zu schützen. Die Modularität ist die Möglichkeit, Werkzeuge an dem Roboter auszutauschen. Somit ist es möglich, dass ein Robotersystem mehrere Aufgaben ausüben kann. Allerdings muss der Roboter eine entsprechende Software besitzen. Der Umweltschutz ist die Gesamtheit aller Maßnahmen zum Schutz der natürlichen Umwelt. Zu diesem gehören unter anderem die Lautstärke, die Abgase, Emissionsschutz, Pflanzenschutz etc. Die Komplexität ist die Steuerung/Fehleranfälligkeit der Roboter/ Systeme. Die Geländegängigkeit beschreibt die Fähigkeit des Roboters, den Wald zu befahren. Dabei muss der Roboter Hindernisse umfahren und überfahren können. Zudem kann der Boden aufgrund von Wetterbedingungen eine unterschiedliche Beschaffenheit haben. Die Fähigkeit beschreibt, welche Aufgaben das System meistern kann. Die grundlegende Aufgabe, die das System erfüllen muss, ist das Fällen von Bäumen. Allerdings könnte ein System konzipiert werden, welches weitere Aufgaben, wie den Abtransport des gefällten Baumes, erfüllen kann. Die Erweiterbarkeit ist die Erweiterbarkeit für neue und zukünftige Funktionen. Die Einsatzbereiche sind die Fähigkeit der Roboter, in unterschiedlichen Waldarten zu arbeiten.

Die Kriterien sind nach ihrer Bedeutung gewichtet. Im Folgenden ist die Entscheidungsmatrix dargestellt.

	Waldschutz	Arbeitsschutz	Modularität	Umweltschutz	Komplexität	Geländegängigkeit	Fähigkeit	Erweiterbarkeit	Einsatzbereiche	
Gewichtung	1	1	0,5	1	0,7	0,5	0,3	0,2	0,8	total rating
automatisierter Harvester										0
Aus der Luft (Drohne)										0
kleines Roboter-System										0
mehrere kleine Systeme										0

Tabelle 1 Entscheidungsmatrix

Im Folgenden werden die drei Konzeptideen und die Entwicklung eines digitalen Zwillinges definiert und beschrieben.

3. Konzeptideen

In diesem Kapitel werden der digitale Waldzwillling und die vier Konzepte zur Holzernte definiert.

3.1. Digitaler Waldzwillling

Der "Digitale Zwillling des Waldes" soll alle relevanten Daten in einem Dienst bündeln und zugreifbar halten. Hierbei kann man unterschiedliche Daten definieren:

- Eingabedaten (Rohdaten)
- Abgeleitete Daten

Abgeleitete Daten: sind solche Daten, die von Diensten des Zwilling aus den existierenden Daten im Zwilling berechnet werden können, z.B. ein Baumregister mit Stammpositionen und Durchmesser. Berechnet auf Basis einer 3D Karte des Waldes, oder einer Befahrbarkeitskarte für ein bestimmtes Fahrzeug oder Roboter. Auf Basis der Befahrbarkeitskarte kann wiederum eine Pfadplanung durchgeführt werden.

Eingabedaten sind existierende Kartenprodukte, die in den Zwilling eingespielt werden können, z.B. existierende Karten, Punktwolken von einzelnen Bäumen oder Annotationen zu Bäumen (Besonderheiten, Art, Bedränger). Da nicht davon auszugehen ist, dass die Systeme eine ständige Internetverbindung zum digitalen Zwilling möglich sind, können diese die für ihre Aufgaben relevanten Karten und Daten herunterladen. Zum Beispiel das oben erwähnte Baumregister mit Stammpositionen kann z.B. für die Lokalisierung eines autonomen Systems genutzt werden, falls dieses in der Lage ist, auf Basis seiner Sensorik ebenfalls Baumstämme zu erkennen. Hierfür muss es Importschnittstellen und -software geben, die es erlauben, die Eingabedaten in den digitalen Zwilling einzulesen. Daten mit großer geographischer Ausdehnung müssen aufgearbeitet werden, um die Möglichkeit zu bieten, diese nur teilweise in der weiterverarbeitenden Software zu nutzen. Es ist davon auszugehen, dass Karten auf der Eingabeseite eine große Dateigröße haben, bis zu einer Größe, in der die mobilen Systeme nicht komplett verarbeitet werden können. Daher ist es notwendig für diese spezialisierten Karten zu berechnen, die auf die Aufgabe zugeschnitten sind. Für die Navigation würde z.B. eine Befahrbarkeitskarte ausreichen, so dass kein komplettes 3D Modell des Arbeitsbereiches nötig ist. Zusätzlich kann der Digitale Zwilling dafür genutzt werden, den aktuellen Stand der Arbeiten darzustellen, wenn die Systeme (zumindest zeitweise) ihre Position und aktuelle Aufgabe an den digitalen Zwilling senden.

3.2. Konzept: Automatisierter (teil-/autonomer) Harvester

Der vollautomatisierte Harvester ist eine strikte Durchautomatisierung und Integration robotischer Teil-Komponenten in einen kommerziellen Harvester. Er plant, navigiert und fährt selbständig zu seinen Einsatzorten. Der Harvester identifiziert und bewertet die durch den Anwender markierten Bäume und führt selbstständig eine genaue und sichere Fällung durch. Alle zusätzlichen aktiven Elemente werden an eine Bus-Steuerung angelegt und der Harvester erhält eine Sensor-Ausstattung, die es ihm bei einer guten Datenlage ermöglicht, alle notwendigen Umweltdaten für seine Mission zu ermitteln. Ebenso bietet sich hier die sensorielle Erfassung der Operatoren Interaktion mit dem Harvester im Vorfeld z.B. über Augmented Reality, Eye-Tracking und die digitale Eingabeüberwachung an. Die als Low-Level Komponenten bezeichneten Aktuatoren und Sensoren werden in einem Low-Level-Control System zusammengeführt, was die Grundlage der Ansteuerung und möglicher erweiterter Assistenzsysteme bildet. Ein zweites leistungsstarkes System übernimmt die High-Level Planung und Steuerung des Harvesters. Der Harvester ist als aktiver Agent in den Digitalen Zwilling des Forststücks eingebunden und erhält täglich die für ihn abgestimmten Einsatzdaten. Das System arbeitet, wenn möglich online, ist aber in der Lage, mit den übertragenen Daten auch offline, ohne Mobilfunkanbindung, zu arbeiten. Die bei der Durchführung der Arbeiten ermittelten Leistungsdaten werden nach der Rückkehr in die Maschinenstation gesammelt in den Digitalen Zwilling eingespeist. Entscheidungen der Onboard-Algorithmen könnten bei genügend Rechenleistung live gegen die Entscheidungen der menschlichen Operatoren abgeglichen werden und dazu beitragen, diese Algorithmen evolutionär zu verbessern. Der Harvester kann primär auf Plantagen eingesetzt werden und daher viel Fläche bearbeiten, stößt aber langfristig an seine physikalischen Grenzen was Gewicht und Reichweite angeht. Er ist im Bezug, auf den in Zukunft, bevorzugt geplanten, klimastabilen Mischwald nur bedingt zukunftsfähig, da er nicht in der Lage ist sich bodenschonend durch diesen zu bewegen, um einzelne Baum-Individuen separat zu entnehmen. Die auf dem Harvester entwickelten Assistenzsysteme, Autonomiefunktionen und Algorithmen sind im digitalen Zwilling verankert und können zu einem späteren Zeitpunkt, modular auf andere Systeme übertragen werden, wie z.B. Forwarder, Drohnen oder Erkundungsroboter (Scout-Systeme).

3.3. Konzept: Kleinroboter mit modularen Werkzeugen

Das autonome Fällen von Bäumen ist eine komplexe Aufgabe mit vielen Teilaufgaben. Zu diesen Teilaufgaben gehören die Erstellung einer Umgebungskarte, die Auswahl des Baums, das korrekte Ansprechen des Baums, die Navigation zum Baum und das Fällen des Baums. Das Fällen eines Baumes selbst besteht aus mehreren Teilaufgaben wie Schneiden, Keile setzen usw., die mit verschiedenen Werkzeugen ausgeführt werden. In diesem Konzept wird eine einzige mobile Roboterplattform mit einem daran befestigten Manipulator verwendet. Sie verfügt über mehrere austauschbaren Werkzeuge, so dass eine geplante Abfolge verschiedener Aktionen durch den Austausch der Werkzeuge ausgeführt werden kann. Die Ausführung dieser Aktionen wird mit Hilfe einer Vielzahl von Sensoren kontinuierlich überwacht und bewertet. Darüber hinaus wird eine Reihe von Sensoren hinzugefügt, um den Zustand des Systems genau und zuverlässig einzuschätzen.

Der Roboter besteht aus drei Grundkomponenten: der mobilen Basis, dem Manipulator und den Werkzeugen. Die mobile Basis ist die Komponente, die für die Bewegung des Roboters auf dem Boden verantwortlich ist. Der Antriebsmechanismus kann auf Ketten oder Rädern basieren. Er kann durch einen Verbrennungsmotor oder elektrisch angetrieben werden. Die Plattform sollte in der Lage sein, autonom zu navigieren, indem sie eine 3D-Karte der Umgebung erstellt, die Durchfahrbarkeitskarte berechnet, einen kollisionsfreien Weg berechnet und diesem Weg folgt. Hydraulisch angetriebene Aktuatoren sind aufgrund ihrer Leistung und Robustheit besser geeignet.

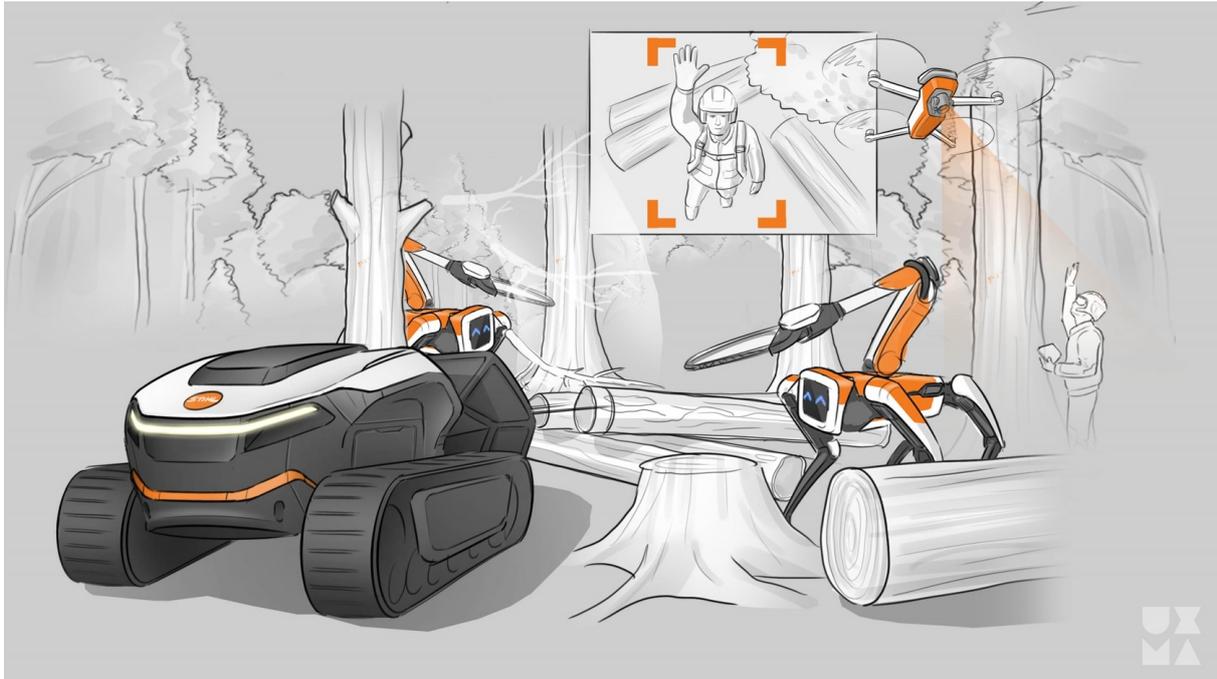
Die zweite Grundkomponente, der Manipulator, hat den Zweck, verschiedene Werkzeuge zu greifen und sie zu manipulieren, um verschiedene Aufgaben zu erfüllen. Auch hier wären hydraulische Manipulatoren am besten geeignet. Verschiedene Werkzeuge mit einer gemeinsamen Schnittstelle zum Manipulator sind ebenfalls erforderlich. Zum Fällen von Bäumen sind Keile und Kettensägen erforderlich. Der Roboter sollte in der Lage sein, Werkzeuge zu manipulieren, zu wechseln und richtig einzusetzen, um die Bäume erfolgreich zu fällen.

Auch wenn ein vollständig autonomes System angestrebt wird, ist auch eine Teilautonomie mit Fernsteuerung möglich. Der Roboter könnte mit Hilfe von Rückmeldungen der Sensoren ferngesteuert werden, wobei zur Vereinfachung der Bedienung Assistenzfunktionen eingesetzt werden könnten. Zu den Assistenzfunktionen könnten die automatische Aufnahme und Platzierung von Werkzeugen, die Kollisionsvermeidung usw. gehören.

3.4. Konzept: Mehrere kleine Roboter mit unterschiedlichen Fähigkeiten

In diesem Konzept werden die einzelnen Fähigkeiten, die für die Gesamtaufgabe nötig sind, auf einzelne, spezialisierte Systeme verteilt. Es gibt also mehrere Roboter zur Baumbewertung, zum Baumfällen, zum Rücken, etc. anstatt aller benötigten Funktionen in einem System zu vereinen. Dieser Roboterschwarm würde es ermöglichen, die Fähigkeiten gezielter einzusetzen und auch die Systeme im Einzelnen leichter zu gestalten, als wenn alle Funktionen in einem Roboter vereint sind. So kann z.B. der Roboter, der zur Bewertung genutzt wird, deutlich leichter und auch elektrisch ausgeführt werden, da dieser keine großen Kräfte anwenden muss. Diese spezialisierten Roboter würden sich also insgesamt weniger durch den Wald bewegen und gerade die zurückgelegten Wege schwereren Systeme minimieren. Der Nachteil hierbei ist, dass die Komplexität des Gesamtsystems deutlich erhöht ist. Alle Einzelsysteme werden ihre Aufgaben parallel verüben und somit müssen auch alle einzeln auf ihre Aufgaben vorbereitet werden müssen (Akkus laden, tanken, an den Einsatzort bringen, Aufgaben setzen, etc.). Zudem ist der Wartungsaufwand ebenfalls deutlich erhöht, da jeder Robotertyp unterschiedlich ist und auch andere Anforderungen und Einsatzdauern hat. Andererseits können diese spezialisierten Roboter effizienter arbeiten, da eine Fähigkeit, z.B. das Fällen, verfügbar bleibt, während andere Aufgaben durch andere Systeme wahrgenommen werden müssen. So kann der Fällroboter direkt die nächsten Bäume fällen, während mehrere Rücken-Roboter den Abtransport gleichzeitig

durchführen.



3.5. Konzept: Luftgestützte Roboter

Bei dem Konzept Luftgestützter Roboter erfolgt die Baumfällung durch robotisch erweiterte Luftfahrzeuge. Hierbei fliegt eine Drohne oder ein Hubschrauber über den Wald und das Fällwerkzeug wird von oben auf den Zielbaum heruntergefahren. Bei dem Fällwerkzeug handelt es sich um eine Vorrichtung, die den Baumstamm greifen und sägen kann. Als Werkzeug kann hierbei auch ein Harvesteraggregat eingesetzt werden. Das Werkzeug wird mit einem Seil bis zum Baumstamm heruntergefahren. Der Baum wird gefällt und mit Hilfe des Seils nach oben aus dem Wald geflogen. Dabei können zwei Vorgehensweisen verfolgt werden. Bei der ersten Vorgehensweise kann der Baum beim Herunterlassen des Seils entastet werden und zuletzt gefällt und abgetragen werden. Bei der zweiten Vorgehensweise wird der Baum nur gefällt und die Entastung erfolgt nach dem Abtransport des Baumes. Bei diesem Konzept spielt das Flugsystem keine Rolle. Dieser muss nur die Lasten des Erntewerkzeugs und des Baumes tragen können.

Der Vorteil bei diesem Konzept ist, dass die Bodenverdichtung komplett vermieden wird. Da die Holzernte und der Abtransport aus der Luft erfolgt, gibt es keine schädlichen Bodenverdichtungen. Des Weiteren müssen sich keine Personen im direkten Gefahrenbereich des Baumes aufhalten.

Die Kehrseite der Baumernte aus der Luft ist ein hoher Energiebedarf und damit hohe Kosten. Es müssen große Flugsysteme eingesetzt werden, um die hohen Lasten des Werkzeugs und des Baumes zu tragen. Ebenso kann bei diesem System immer nur ein Baum nach dem Anderen gefällt und abtransportiert werden.

4. technische Grundvoraussetzung und Ausstattung des Fällroboters

Die vier Konzepte müssen einige technische Grundvoraussetzungen erfüllen und benötigen eine angepasste Ausstattung. Im Folgenden werden diese definiert. Die technischen Grundvoraussetzungen und benötigten Ausstattungen des Fällroboters wurden auf Grundlage der Expertise des DFKIs definiert.

4.1. Mechatronisches Design

Bei der Konstruktion der Forst-Roboter muss, atypisch zum klassischen Forstmaschinenbau, mehr auf Leichtbau geachtet werden, da es den Boden schont und ggf. dem Roboter Zugang zu Arealen

ermöglicht, die sonst für Maschinen nicht zugänglich sind. Ein spezialisiertes System kann im Vergleich zu einem "Alleskönner" deutlich an Gewicht einsparen und erzielt wesentlich höherer Effizienzen. Zeitgleich muss das System robust genug sein, um den rauen Forstbedingungen Stand zu halten. In möglichen Unterbereichen wie z.B. Energiespeicher, Sensorik, Kommunikation oder Steuereinheiten, wäre es nützlich eine Modularität anzustreben. Ebenso sollte die Konstruktion wartungs- und reparaturfreundlich ausgelegt sein, da einem Teil- oder Totalausfall eines Systems im Wald eine hohe Flexibilität voraussetzt.

Vorzugsweise werden für alle Schwarmteilnehmer, die mechanische Arbeiten verrichten sollen, auf Ketten- bzw. Raupenantriebe gesetzt, die die Bodenverdichtung minimieren. Explorations- oder Vermessungstätigkeiten können von Drohnen oder leichten Laufrobotern übernommen werden. Drohnen werden hier aber langfristig höhere Erfassungsgeschwindigkeiten erzielen und in der Anschaffung und Wartung günstiger sein.

Das mechatronische Designprinzip sieht pro Roboter eine Power Unit und dezentrale hydraulische oder mechanische Aktuatoren vor. Vorzugsweise sind die Power Units Akkupacks, Alternativen sind Generatoren oder Brennstoffzellen. In Abgrenzung zu Kleinrobotern mit modularen Werkzeugen wird keine zentrale Zapfwelle angestrebt, sondern es erfolgt eine Betriebspunkts-optimierte elektromechanische Auslegung.

Das Energiemanagement spielt eine entscheidende Rolle bei autonomen mobilen Robotern, da es direkte Auswirkungen auf ihre Leistungsfähigkeit, Betriebsdauer und Effizienz hat. In der Regel ist es ein komplexes Zusammenspiel aus Hardware, Software und Umgebungsbedingungen. Effizientes Energiemanagement ermöglicht es den Robotern, ihre Aufgaben länger und effektiver auszuführen und trägt zur nachhaltigen Ressourcennutzung bei. Die Wahl der Energiequelle ist ein grundlegender Schritt, der auch die Rahmenbedingung des Walds mit abbilden muss. Autonome Roboter können Akkumulatoren oder Verbrenner nutzen, Solarzellen würden wir für den Anwendungsfall ausschließen. Um den Energieverbrauch zu optimieren, ist eine effiziente Gestaltung sowohl der Hardwarekomponenten (wie Motoren, Sensoren und Prozessoren) als auch der Softwarealgorithmen von entscheidender Bedeutung. Intelligente Bewegungsplanung kann unnötige Bewegungen vermeiden und so den Energieverbrauch reduzieren. Ebenso ist das Management der Sensorik wichtig, indem beispielsweise Abtastraten angepasst oder Sensoren bedarfsgerecht ein- und ausgeschaltet werden. Energiesparmodi sind ebenfalls bedeutend. In Ruhephasen werden nicht benötigte Komponenten abgeschaltet oder in den Energiesparmodus versetzt. Diese Phasen können eine Betriebsdauer maximieren. Adaptive Algorithmen können die verbleibende Energiemenge berücksichtigen und Aufgaben priorisieren. So werden wichtige Aufgaben mit höchster Priorität erledigt, während weniger wichtige verschoben oder reduziert werden, um Energie zu sparen. Die Umgebungsbedingungen, wie Temperatur und Gelände, können den Energieverbrauch beeinflussen. Extreme Temperaturen können die Batterieleistung beeinträchtigen, während das Gelände den Energieaufwand für die Fortbewegung erhöhen kann.

Je nach Art der Energiequelle müssen autonome Roboter regelmäßig aufgeladen oder nachgetankt werden. Daher ist eine strategische Planung notwendig, um sicherzustellen, dass der Roboter rechtzeitig wieder einsatzbereit ist.

Der Roboter benötigt leistungsstarke Rechenressourcen, um die Sensordaten zu verarbeiten. Dies kann einen leistungsfähigen Prozessor und Grafikprozessor erfordern, um die Echtzeitverarbeitung, Systemsteuerung auf der unteren Kontrollebene sowie die High-Level KI Algorithmen zu gewährleisten. Zudem muss der Roboter Schnittstellen haben, um ggf. mit anderen Schwarmmitgliedern oder dem Leitstand kommunizieren zu können. Kommunikationsschnittstellen zu einer zentralen Steuerung können in der Regel kabelgebunden oder kabellos erfolgen, bei dieser Anwendung ist eine kabellose Lösung umzusetzen.

Der Roboter-Schwarm besteht aus einer oder mehreren Drohnen, einem Fällroboter und ggf. weiterer Roboter, die jeweils die Aufgaben Entasten und Rücken umsetzen.

Die Drohnen werden zur Baumannsprache und zur Umfeldüberwachung eingesetzt. Durch die Bildaufnahme über die Drohnen können digitale Karten generiert werden, die von den Lauf-Robotern zur Orientierung genutzt werden.

Der Fällroboter steuert den zu fällenden Baum an. Dabei muss der Roboter den unebenen Wald befahren, Hindernisse erkennen und ausweichen und den Baum ansteuern. Schließlich wird der Baum vom Fällroboter gefällt.

Falls der Fällroboter nicht die Zusatzaufgaben wie Entasten und Rücken durchführen kann, wird dies von einem oder zwei weiteren Robotern umgesetzt, oder, solange solche Robotersysteme noch nicht verfügbar sind, von einem menschlichen Forstarbeiter, ggf mit Hilfe entsprechender maschineller Hilfe durchgeführt

4.2. Robotische Experimente

In den folgenden drei Abschnitten werden Konzepte aufgezeigt, die sich aus aktuellen Erprobungen robotischer Systeme ableiten ließen. Es wurden Outdoor-Experimente mit verschiedenen Robotern, in unterschiedlichen Umgebungen und zu unterschiedlichen Uhrzeiten durchgeführt (siehe folgende Abbildungen). Die unterschiedlichen Uhrzeiten lassen Rückschlüsse auf die eingesetzten Sensoren bei unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen zu, die es im Wald ebenfalls geben wird. Es wurde absichtlich kein Laborgelände oder ein ebenes Außengelände gewählt, um die unebenen Untergrundbedingungen, die im Wald herrschen, möglichst abbilden zu können. Die unterschiedlichen Systeme wurden betrachtet, damit ein allgemeingültiger Ansatz gefunden und abgebildet werden kann. Auf den folgenden Bildern sind die Systeme Arter (im Bild zu sehen u.a. in Reihe eins) und Sherpa (Reihe drei, linkes Bild) zu sehen. Beide Roboter wurden während der Experimente entweder ferngesteuert oder sind autonom unterwegs. Die von den Systemen kommenden Daten werden in den jeweilig genutzten Leitstand übertragen. Ist die Kontrolle mittels Fernsteuerung erfolgt, hatte der Operator in der Regel keine direkte Sichtlinie auf die Systeme, sondern saß in einem entfernten Raum bzw. einem mobilen Leitstand. Dieser ist auf dem Bild zweite Reihe rechts zu sehen. Eine Bildübertragung fand statt, was für die Fernsteuerung ausreichen musste (siehe zweite Reihe, zweites Bild). In der unteren Reihe sind Beispiele für die Kontrolle bzw. Steuerung angegeben. Das erste Bild zeigt den geplanten und den tatsächlich gefahrenen Pfad von einem Roboter. Das rechte Bild zeigt die Menüauswahl von einem Multi-Roboter-System, wobei mittels Mausklick in die Karte beispielsweise Wegpunkte angegeben werden können, zu denen der Roboter dann den Weg plant und nach erfolgreicher Planung auch ausführt.

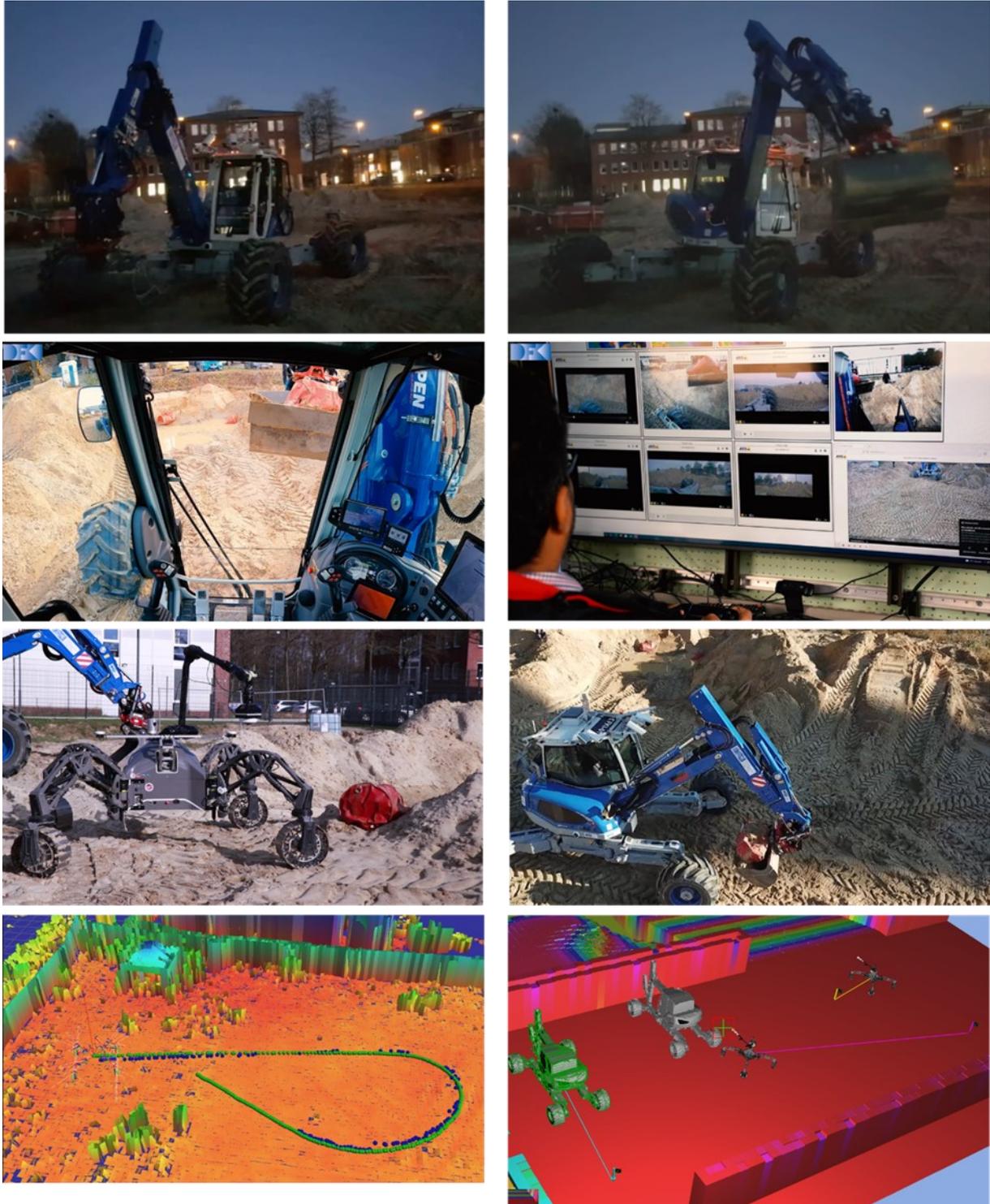


Abbildung 1 DFKI-Systeme im experimentellen Einsatz

Reihe 1: links und rechts: Arter im experimentellen Versuch bei Nacht (Test unterschiedliche Beleuchtungsbedingungen)

Reihe 2: links: Innenansicht Arter; rechts: Leitstand, aus dem die Systeme überwacht und gesteuert werden können

Reihe 3: links: Sherpa beim experimentellen Versuchen; rechts: Arter beim experimentellen Versuch (beide Versuche am Tag)

Reihe 4: Kontrolle und Steuerung, links: geplanter und tatsächlich gefahrener Pfad, rechts: Menüauswahl Multi-Roboter-System

4.3. Konzept Kommunikationsinfrastruktur

Es gibt verschiedene Kommunikationswege, die in der Robotik eingesetzt werden, um Daten und Befehle zwischen den verschiedenen Komponenten, Sensoren, Aktuatoren und der zentralen

Steuerung auszutauschen. Die Wahl des richtigen Kommunikationsweges hängt von Faktoren wie Übertragungsgeschwindigkeit, Reichweite, Sicherheit, Zuverlässigkeit und den spezifischen Anforderungen der Robotik-Anwendung ab. Es ist wichtig, dass die Kommunikation zuverlässig und sicher ist, um eine reibungslose und effiziente Steuerung und Interaktion von Robotern zu gewährleisten. Auf kabelgebundene Verbindungen wie Ethernet, CAN-Bus etc. geht der Text im Folgenden nicht ein, da sie nicht für die Fernsteuerung der Systeme zur Holzernte im Wald praktikabel sind und somit nicht zum Einsatz kommen werden. Drahtlose Verbindungen werden bevorzugt, um semiautonome oder autonome Roboter bei ihrer Tätigkeit überwachen zu können und im Zweifelsfall einen menschlichen Bediener einschreiten zu lassen. Eine weit verbreitete Technik ist WLAN (Wireless Local Area Network), welches oft verwendet wird, um Roboter und Steuerungen drahtlos miteinander zu verbinden. Es ermöglicht eine flexible Kommunikation und ist in vielen Anwendungen weit verbreitet. Daher ist die Technologie größtenteils recht robust, die Infrastruktur muss aber in Umgebungen wie dem Wald durch zusätzliche Geräte erst geschaffen werden.

Im Gegensatz zu Bluetooth, welches häufig für drahtlose Kurzstreckenkommunikation zwischen Roboter und mobilen Geräten eingesetzt wird, kann WLAN auch größere Strecken abdecken. Moderne Wi-Fi-Standards wie Wi-Fi 6 (802.11ax) bieten eine hohe Bandbreite und unterstützen Geschwindigkeiten von mehreren Gigabit pro Sekunde. Radiofrequenz (RF)-Kommunikation kann ebenfalls verwendet werden, um Daten über größere Entfernungen zu übertragen und eignet sich für mobile Roboter oder Robotersysteme in weitläufigen Umgebungen, wenn keine großen Datenmengen übertragen werden müssen, zum Beispiel zur Positionsmeldung der autonomen Systeme an den digitalen Zwilling.

Je nach Verfügbarkeit kann auch eine Kommunikation über Mobilfunknetze wie 4G oder 5G genutzt werden, um die Roboter bei ihren Arbeiten im Wald zu steuern und zu überwachen. 5G ist der neueste Mobilfunkstandard und bietet eine erheblich höhere Bandbreite und Geschwindigkeiten im Vergleich zu früheren Generationen. 5G kann Datenraten von mehreren Gigabit pro Sekunde erreichen.

Auch Satellitenkommunikationssysteme wurden bereits vom DFKI RIC verwendet. Bei Feldtests mit zwei Robotern in der Wüste von Utah (USA) wurden die eingesetzten Roboter aus Bremen gesteuert. Für die Darstellung der aktuellen Lage im Leitstand in Bremen und zur Übersendung von Kontrollkommandos wurde eine Satellitenverbindung genutzt, die es erlaubte, die Daten um die halbe Welt zu schicken. Satellitenkommunikation kann hohe Bandbreiten unterstützen und wird in Bereichen eingesetzt, in denen terrestrische Verbindungen nicht verfügbar oder praktikabel sind, können aber hohe Latenzen aufweisen, so dass Daten erst nach mehreren Sekunden beim Empfänger eintreffen.

Point-to-Point-Richtfunkverbindungen werden oft in Situationen eingesetzt, in denen eine direkte Verbindung zwischen zwei Punkten mit hoher Bandbreite benötigt wird. Dies wäre in diesem Fall der Leitstand und ein Relais in der Nähe des Roboterteams.

Generell kann man zwischen unterschiedlichen Daten unterscheiden, zum einen benötigt man Live-Daten, die der Überwachung der Systeme dienen und zu jedem Zeitpunkt verfügbar sein sollen, zum anderen gibt es Daten, die nur für spätere Auswertungen benötigt werden. Letztere können zunächst lokal auf dem Roboter gesammelt werden und nach dem Einsatz in den digitalen Zwilling übernommen werden, wenn z.B. eine Kabelverbindung möglich ist.

4.4. Konzept zur Steuerungstechnik

Ein Leitstand für Roboter ist eine zentrale Kontrollplattform, die speziell dafür entwickelt wurde, einen oder mehrere Roboter effizient zu überwachen, zu steuern und zu koordinieren. Er fungiert als zentrale Schaltstelle aller angeschlossenen Roboter in Echtzeit. Am DFKI existieren verschiedene Roboter-Kontroll-Leitstände, die für unterschiedliche Systeme und Aufgaben verwendet werden.

Die Funktionen eines Leitstands für Roboter sind vielfältig. Je nach Ausführung, ob nun ein kleiner und mobiler Leitstand oder ein stationärer, ändern sich auch die Darstellungsweisen und die Möglichkeiten, die Kontrolle über die Roboter zu übernehmen.

Eine stabile Kommunikationsstruktur zwischen den sich im Wald befindlichen Systemen und dem Leitstand vorausgesetzt, bietet der Leitstand den Bedienern grundlegend eine Übersicht über den aktuellen Status aller Roboter. Dies umfasst Informationen wie die Position der Roboter, ihre

Geschwindigkeit, ggf. Sensorwerte, Batterieladestand, laufende Aufträge und eventuelle Fehlermeldungen. Diese Echtzeitinformationen ermöglichen es, den Zustand der Roboter zu überwachen und schnell auf eventuelle Probleme zu reagieren, dies ist auch mit geringer Bandbreite der Kommunikation möglich.

Zusätzlich zur Überwachung ermöglicht der Leitstand die Fernsteuerung der Roboter. Dies bedeutet, dass Bediener die Möglichkeit haben, die Roboter aus der Ferne zu steuern und ihre Bewegungen, Aktionen und Arbeitsabläufe anzupassen, falls erforderlich. Dies ist besonders nützlich für autonome oder teilautonome Roboter, die in dynamischen Umgebungen arbeiten und möglicherweise Anpassungen an ihre Aufgaben erfordern. Hierbei ist es möglich, auf einer hohen Kontrollebene zu agieren und beispielsweise die Fällreihenfolge neu zu planen, aber auch auf Systemebene einzugreifen und ggf. die Steuerung des Systems zur Baumfällung zu übernehmen, um eine ferngesteuerte und nicht mehr automatisierte Fällung durchzuführen. Zur Übernahme der Steuerung des Roboters durch den Bediener ist eine latenzarme Übertragung mit hoher Bandbreite der Sensordaten insbesondere der Kamerabilder wichtig, für z.B. eine Aktualisierung des Ablaufplans reichen auch geringe Bandbreiten.

Sicherheit ist ein weiterer wichtiger Aspekt des Leitstands. Er kann Sicherheitsfunktionen enthalten, um Gefahrensituationen zu erkennen und entsprechende Notfallmaßnahmen einzuleiten. Zum Beispiel kann der Roboter stoppen oder Alarme auslösen, wenn Sicherheitsrisiken erkannt werden. Abhängig von der Art des erkannten Risikos (unklare Situation, Gefährdung von Menschen) kann eine Wiederaufnahme des autonomen Betriebs vom Leitstand aus erfolgen oder muss am Roboter selbst vorgenommen werden.

Wird vermehrt in robotischen Teams gearbeitet, sind Funktionen zur Planung und Koordination der Roboteraktivitäten ab einer bestimmten Komplexität unerlässlich. Mittels dieser Funktionen kann sichergestellt werden, dass die Roboter sich nicht gegenseitig behindern oder kollidieren und dass ihre Bewegungen und Aktionen synchronisiert sind. Gerade beim Baumfällen ist es wichtig, dass in Richtung der Fällung keine weiteren Systeme stehen, die ansonsten unter dem Baum begraben werden können. Neben der Koordination kann Software für das Auftragsmanagement generiert werden. Im Leitstand können Aufträge verwaltet, Prioritäten festgelegt und dem Roboterteam effizient zugeordnet werden. Dies stellt sicher, dass die Roboter ihre Aufgaben mit optimalem Timing und maximaler Effizienz ausführen.

Ist eine dauerhafte Aufzeichnung der intrinsischen Daten der Roboter aktiv, wird zwar ggf. viel Speicherplatz benötigt. Es hat allerdings den Vorteil, dass bestenfalls im Leitstand umfangreiche Daten über die Leistung der Roboter gesammelt werden. Dies ermöglicht es im Nachgang, Trends beispielsweise bezüglich von Abnutzungserscheinungen zu erkennen, die eine Optimierung von Wartungsintervallen nach sich zieht. Diese Daten können z.B. bei Wartungen vom Roboter ausgelesen werden und müssen nicht zwangsweise schnurlos übermittelt werden.

Je fortgeschrittener der Leitstand, desto besser kann sich der Bedienende mittels Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR) in die Roboterkontrolle begeben. AR und VR sind zwei verwandte Technologien, die die Art und Weise, wie mit der digitalen und physischen Welt interagiert wird, verändern. Obwohl sie unterschiedliche Konzepte darstellen, teilen sie dennoch das Ziel, die menschliche Erfahrung zu erweitern und neue Möglichkeiten der Interaktion zu schaffen.

AR ist eine Technologie, die digitale Informationen oder virtuelle Objekte in die physische Welt einbettet. Mit Hilfe von AR können Benutzer ihre natürliche Umgebung sehen, bzw. die Umwelt/den Wald aus der Sicht des Roboters sehen, welche mittels Kamerabilder in den Leitstand übertragen wird, und gleichzeitig zusätzliche Informationen, Grafiken oder virtuelle Objekte überlagert auf ihrem Blickfeld erhalten. AR kann bei der Interaktion mit komplexen Robotersystemen, gerade wenn sie im Team agieren, nützlich sein. Durch die Einblendung von Anweisungen samt deren Reihenfolgen, Schritt-für-Schritt-Bewegungen der einzelnen Teammitglieder oder virtuellen Kontrollpanelen in das Blickfeld des Benutzers kann die Bedienung von Robotern vereinfacht werden. AR kann auch in mobilen Anwendungen eingesetzt und mittels AR-Brillen erlebt werden.

VR hingegen erzeugt eine komplett virtuelle Umgebung, in die der Benutzer eintauchen kann und die Kontrolle über einen Roboter übernehmen, der sich an einem anderen physischen Ort befindet. Durch das Tragen einer VR-Brille und manchmal auch von Datenhandschuhen oder anderen Eingabegeräten kann der Benutzer das Gefühl haben, in den Wald einzutauchen und sich darin frei zu bewegen. Die VR-Technologie schirmt die physische Welt des Benutzers vollständig ab, so dass er/sie sich nur in der

künstlichen VR-Wald-Umgebung befindet. Hier ist es in der Regel so, dass es sich um feste, stationäre Leitstände handelt, die entsprechend darauf ausgelegt sind, dass sich die Bediener entsprechend in der Welt bewegen können.

Die technische Umsetzung des Leitstandes kann auch in Form von grafischen Benutzeroberflächen (GUIs) auf Tablets oder in Form von Web-Applikationen als eine Art Dashboard erfolgen, dies erfolgt dann bei einem reduzierten Funktionsumfang.

4.5. Sensorik Konzept

Eine der Kernaufgaben wird sein, dass die einzelnen Teammitglieder des heterogenen Roboterschwarms sich im Wald „zurechtfinden“ können. Dazu gehören teils komplexe Leistungen wie Lokalisierung, Wegplanung, Hindernisvermeidung oder die Pfadverfolgung, die durch die Roboter zu bewältigen sind. Es wird eine Reihe von sensorischen Ausstattungen benötigt, die es den Systemen ermöglichen, Informationen über die Umgebung zu erfassen und zu verarbeiten. Die genaue Sensorausstattung hängt von der spezifischen Anwendung und den Fähigkeiten des Roboters ab. Aufgrund der Erfahrungen, die das DFKI beim Einsatz von Robotern in unstrukturierten Umgebungen hat, sind die folgend aufgeführten Sensoren als sinnvolle Basis zu sehen. Auch der Wald ist eine unstrukturierte Umgebung, bei der es nicht ausreichend ist, mit 2D Karten zu arbeiten. Die Höhenunterschiede im Gelände, sei es durch Bodenbeschaffenheit oder durch andere Hindernisse wie Äste, Baumstämme, Sträucher etc. sind relevante Informationen, die die Bodenfahrzeuge benötigen, um sich sicher im Wald bewegen zu können. Der Abschnitt beginnt mit Sensoren, die primär um den (internen) Zustand der Roboter abbilden, die mit Rädern oder Kettenantrieb unterwegs sind, und endet mit Sensoren, die Aufschlüsse über die Umgebung zulassen. Auf Fluggeräte zur schnellen Kartierung des Waldes geht der Abschnitt nicht ein.

Encoder werden an den Rädern oder Gelenken des Roboters platziert und messen die Anzahl der zurückgelegten Umdrehungen. Sie ermöglichen eine präzise Schätzung der zurückgelegten Strecken und Geschwindigkeiten, erlauben das Erreichen gewünschter Posen etc.

Die ausführenden hydraulischen oder elektrischen Mechaniken brauchen eine Zustandsüberwachung auf ihre Stellwege und Kräfte bzw. Drücke. Hierbei ist eine bereits integrierte Sensorlösung in den Zylindern einer nachträglich aufgebrauchten Sensorik, der Robustheit halber, vorzuziehen.

Kraftmessdosen werden in vielen Anwendungen eingesetzt, bei denen die Kraftmessung und -kontrolle wichtig sind. Sie können sowohl in statischen als auch in dynamischen Umgebungen verwendet werden. In der Robotik werden Kraftmessdosen oft verwendet, um die Wechselwirkung zwischen dem Roboter und seiner Umgebung zu messen. Dies ermöglicht es Robotern, empfindliche Objekte zu handhaben, adaptive Bewegungen auszuführen und sicher mit Menschen zu interagieren. Für den Fällroboter empfiehlt sich beispielsweise, eine Kraftmessdose zu verwenden, die sowohl Zug- als auch Druckkräfte messen kann.

Inertiale Messeinheiten (IMU) bestehen aus Beschleunigungssensoren und Gyroskopen, die Bewegung und Orientierung des Roboters in Bezug auf die Gravitation und Rotation erfassen. Sie helfen bei der Schätzung der Roboterpose und können z.B. für die Odometrie verwendet werden. Des Weiteren werden sie dafür eingesetzt, die Stabilität des Roboters zu erhöhen, da schnell eventuelle Schräglagen gemessen werden können.

Ultraschallsensoren senden Schallwellen aus und messen die Zeit, die benötigt wird, um die reflektierten Wellen zurückzuerhalten. Sie eignen sich gut für die Nahbereichserkennung von Hindernissen.

Lidar (Light Detection and Ranging) -Sensoren senden Laserimpulse aus und messen die Zeit, die benötigt wird, um die reflektierten Impulse zurückzuerhalten. Dadurch können sie die Entfernungen zu Objekten in der Umgebung des Roboters bestimmen und ein detailliertes 3D-Bild der Umgebung erstellen. Diese Bilder sind in der Regel nicht ideal, wenn es darum geht, von einem Menschen interpretiert zu werden.

Daher kommen auch noch Kameras zum Einsatz, die für visuelle Erkennung und Wahrnehmung eingesetzt werden. Computer Vision-Algorithmen können Informationen aus Bildern und Videos extrahieren, um Objekte, Hindernisse und Landmarken zu identifizieren, die für die Lokalisierung und

Navigation nützlich sind. Zusätzlich erlauben sie eine Steuerung des robotischen Systems durch menschliche Bediener, sollte dies notwendig sein.

Die erfassten Daten müssen dann von Algorithmen, beispielsweise einem SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) oder Pfadverfolgung verarbeitet werden, um dem Roboter zu ermöglichen, sich in seiner Umgebung zu orientieren und seine Bewegungen entsprechend zu planen und durchzuführen. Auch bietet es sich an, die Lokalisierung über die bekannten Baumbestandsdaten, die Odometrie des Systems sowie einen 3D-Laserscanner /LIDAR zu realisieren. Die genannten Sensoren arbeiten oft in Kombination, beispielsweise um eine zuverlässige Lokalisierung und Wegplanung, Kollisionsvermeidung, oder das Ansetzen des Schnittwerkzeugs an den Baum zu ermöglichen. Alle Sensoren, die dem Roboter Informationen über seine Umgebung und darin befindliche Objekte liefern, und im SLAM Verfahren genutzt werden, sollten auch übertragbar sein, um ihre Daten in einem AR/VR Leitstand darstellen zu können.

Grundsätzlich muss das Sensorkonzept

- Die Erfassung der für die eigentliche Aufgabe notwendigen Daten z.B. Form eines Baums und
- Die Erfassung des Umfelds, insbesondere Erkennung von Gefährdungen von Lebewesen

erlauben. Bei Gefährdungen im direkten Umfeld des Roboters muss dieser eigenständig reagieren können und auch eine Rückmeldung (z.B. optisch) über seinen Zustand geben. Idealerweise überlappen sich die Erfassungsbereiche der einzelnen Roboter und werden im Leitstand zentral ausgewertet, so dass allen Schwarmteilnehmern die Informationen aller anderen vorliegen.

5. Ergebnisse Arbeitspaket 2

In diesem Bericht wurde das Arbeitspaket 2 des Vorhabens Calahari beschrieben. Ziel dieses Arbeitspakets war es Konzepte zur Holzernte der Zukunft auszuarbeiten und zu definieren.

In diesem Arbeitspaket wurden auf Grundlage der Anforderungen vier Konzepte entwickelt. Als wesentliche Grundlage der Konzepte wird ein Digitaler Waldzwilling benötigt.

Weiterhin wurden die technische Grundvoraussetzung und die technische Ausstattung, die der Fällroboter benötigt, definiert.

Die Ergebnisse aus Arbeitspaket 2 werden in einer weiterführenden Analyse genutzt, um ein geeignetes Konzept zu wählen. Als Entscheidungsgrundlage wird die in diesem Bericht definierte Entscheidungsmatrix herangezogen.