
ANFORDERUNGSANALYSE

ROBOTERGESTÜTZTES HOLZERNTEVERFAHREN

Alexander Kaulen

Lisa Jensen

Dr. Dorothea Mayer

Dr. Florian Cordes

Prof. Dr. Christian Thiel



Deutsches
Forschungszentrum
für Künstliche
Intelligenz GmbH



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



Anforderungsanalyse

1.	Einleitung.....	3
1.1	Allgemeines	3
1.1.1	Ziel und Zweck der Anforderungsanalyse	3
1.1.2	Projektbezug	3
2.	Konzept und Rahmenbedingungen.....	4
2.1	Zielgruppe	4
2.2	Ziele und Nutzen des Anwenders.....	4
2.3	Aktueller Stand.....	4
2.4	Auswirkungen der Digitalisierung auf den arbeitenden Menschen	6
2.5	Datenschutz	6
3.	Systemvoraussetzungen	7
3.1	Umweltschutz.....	7
3.1.1	Potenziale für Einsparungen der CO2-Emissionen	8
3.2	Natürliche Einsatzumgebungen des Roboters	9
3.3	Arbeitsschutz	11
4.	Anforderungsbeschreibung	13
4.1	Arbeitsplanung	14
5.	fällmethoden, Aufgaben und Arbeitsschritte bei der Tätigkeit des Baumfällens.....	16
5.1	Motormanueller Einschlag	16
5.2	Harvestereinsatz.....	17
6.	Chancen und Risiken.....	18
6.1	Chancen	18
6.2	Risiken.....	19
7.	Beispielkonzepte.....	19
8.	Literaturverzeichnis.....	22

1. EINLEITUNG

1.1 Allgemeines

1.1.1 Ziel und Zweck der Anforderungsanalyse

Hinter dem Verbundvorhaben CALAHARI (FKZ 2220WK51A4), das vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft über seinen Projektträger, die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) sowie dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz gefördert wird, steht eine Vision für ein robotergestütztes, teilautonomes Holzernteverfahren. Zusammen mit den beteiligten Projektpartnern STIHL und Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) werden die Chancen der Robotik und Digitalisierung genutzt, um eine mehrdimensionale Lösung für den Holzeinschlag zu entwickeln.

In einem ersten Schritt gilt es eine Anforderungsdefinition und Analyse der Bedingungen beim Holzeinschlag zu erstellen, um darauf aufbauend im zweiten Schritt ein Konzeptdesign für ein Robotersystem zum teilautonomen Fällen von Bäumen inklusive Sensorik, Fäll- und Steuerungstechnik sowie Kommunikationsinfrastruktur vorzulegen. Die Synthese der Ergebnisse stellt dann erste Vorschläge für die weitere Entwicklung eines automatisierten Holzeinschlagssystems dar.

Der Digitale Zwilling und der Roboter decken die Arbeitsplanerstellung, das Aufsuchen des zu erntenden Baumes und das Fällen ab und realisieren somit eine sichere und bodenschonende Alternative zur Hochmechanisierten Holzernte.

1.1.2 Projektbezug

Die Forstwirtschaft zählt in Deutschland immer noch zu den unfallträchtigsten Sektoren. Das hängt insbesondere mit dem schwierigen Gelände - Blocküberlagerungen, herumliegenden Ästen und Baumstämmen, Sichtbehinderungen, Hangneigungen, unebenem und teilweise stark nachgebendem Untergrund – zusammen. Dazu kommt die außerordentlich hohe körperliche Beanspruchung der Forstwirte, die vermehrt zu Überbelastung und abnehmender Leistungsfähigkeit führen können. Die Bodenverwundung durch Harvester und Forwarder ist bei schlechter Witterung ebenso problematisch wie die Bodenverdichtung. Zudem birgt die Arbeit mit großen Forstmaschinen die Gefahr der Lärmbelästigung und eines diffusen Störgefühls in weiten Teilen der Bevölkerung. Ein Roboter, der aus der Ferne gesteuert wird und ein geringes Gewicht aufweist, soll diese Risikofaktoren minimieren.

2. KONZEPT UND RAHMENBEDINGUNGEN

2.1 Zielgruppe

Zielgruppe dieser Anforderungsanalyse sind neben Entwicklern alle interessierten Forstpraktiker und Auftragnehmer von Holzerntemaßnahmen - also Forstbetriebe, Waldbesitzer, Maschineneinsatzleiter und Forstunternehmer.

2.2 Ziele und Nutzen des Anwenders

Dieses Dokument stellt die Anforderungen für ein robotergestütztes System für die Holzernte dar. Es werden Grundlagen der Holzernte dargestellt, die zukünftig durch Robotik ersetzt werden sollen.

2.3 Aktueller Stand

Das Thema „Digitalisierung in der Forstwirtschaft“ bietet in vielen Bereichen interessante Aspekte. Es werden schnellere und effizientere Entscheidungen zur Realisierung einer nachhaltigen und multifunktionalen Waldbewirtschaftung getroffen. Mittlerweile gibt es Tools zum besseren Planen, Reagieren, Kommunizieren und Vermarkten durch digitale Geländemodelle, simulierte Wachstumsprozesse, Sensortechnik für die Waldzustandsmessung und dem Vernetzen von Teilnehmern in der Wertschöpfungskette. So gibt es z.B. digitale Anwendungen für das Datenmanagement vom Wald zur Industrie, Schadholz-Früherkennungssysteme und Computer Vision für die Rundholzsortierung. Jedoch sind die digitalen Lösungen bei der Holzernte noch nicht ausgeschöpft. Dies liegt an der oft unzureichenden Mobilfunknetz-Abdeckung sowie fehlenden Standards in der Forst-Holz-Kommunikation.

Die Holzernte umfasst Arbeits- und Transportschritte von der Fällung des Baumes bis zur abfuhrbereiten Lagerung am Waldweg. Beim Holzeinschlag unterscheidet man die Arbeitsverfahren manuell, motormanuell und mechanisiert oder in Kombination, zeitlich getrennt oder gekoppelt. Manuelle Verfahren, bei denen der Baum z.B. mit der Axt oder Handsäge gefällt, sind in Deutschland unbedeutend. Bei dem motormanuellen Einschlag wird neben den verschiedenen Werkzeugen vor allem eine Motorsäge oder Kleinseilwinde, aber keine Maschine, eingesetzt. Bei hochmechanisierten Verfahren wird die Holzernte ausschließlich mit Maschinen ausgeführt.

Die Holzernte

Die Wahl der Arbeitsverfahren hängt von der technischen Machbarkeit, der Arbeitssicherheit und Ergonomie, der Einsatzplanung und Organisation, vom Waldbau, dem Naturschutz und der Ökologie sowie dem Boden, der Holzverwertung und der Wirtschaftlichkeit ab (Pausch, 2007). Die technische Machbarkeit bezieht sich darauf, ob eine technische Lösung in der Lage ist, effektiv und effizient, in der Holzernte, eingesetzt zu werden. Im Rahmen der Arbeitssicherheit wird beurteilt, ob die geplante Maßnahme sicher durchgeführt werden kann. Bezüglich des Waldbaus wird eingeschätzt, ob die geplante Maßnahme Auswirkungen auf die Bestandesentwicklung, die Feinerschließung, Beschädigungen am verbleibenden Bestand und an der Verjüngung hat. Zudem muss im Rahmen des Naturschutzes auf etwaigen Schutz von Biotopen und Arten geachtet werden. Hinsichtlich des Bodenschutzes muss auf die Bodenverdichtung, Bodenerosion, Beeinträchtigung des Wasserhaushaltes sowie auf Humus- und

Nährstoffverluste geachtet werden. Schäden am Boden sind nicht ganz vermeidbar, müssen aber durch die richtige Holzerntemaßnahme auf das unvermeidbare Maß reduziert werden (Dr. Günther Linckh, 1997). Bei der Holzverwertung muss z.B. auf die Qualität der Holzsortierung, Erwartungen der Holzkunden und die Abwicklung des Holzverkaufs geachtet werden. Die Wirtschaftlichkeit hängt von den Kosten, Erlösen, der anfallenden Holzmenge sowie von der Sortierung ab.

Fortbewegung im Bestand

In Bezug auf die konstruktiven Aspekte sind rädriige Systeme insofern zu bevorzugen, als dass sie einfacher zu konstruieren und zu steuern sind. Das sogenannte Rocker-Boogie-Chassis ist in der Raumfahrt weit verbreitet (Lindemann & Voorhees C., 2005) (Apfelbeck, Kuss, Rebele, & Michaud, 2011), stößt jedoch wie alle rädriigen Systeme bei starken Steigungen oder größeren Hindernissen an seine Grenzen. Des Weiteren sind rädriige oder kettengetriebene Systeme nachteilig zu bewerten in Bezug auf die Schäden, die sie am Waldboden verursachen, während sie aufgrund verringerten Bodendrucks Vorteile bei der Bodenverdichtung zeigen. Derzeit verfügbare Vorückemaschinen, häufig auch als Rückeraupen bezeichnet, haben Systemgewichte von mehr als einer Tonne bis zu 2,8 Tonnen (Hartkopf, 2016). Die Forstraupe "Moritz" der Firma Pflanzelt erreicht mit einem Gewicht von rund 1,4 Tonnen etwa einen Bodendruck von $0,3\text{kg/cm}^2$ und liegt damit deutlich unter dem eines Rückepferdes (Gewicht: 500 – 1300 kg; Bodendruck: $0,74 - 1,92\text{ kg/cm}^2$). Allerdings findet die Bodenverdichtung streifig statt und nicht punktuell, sodass sich im Boden ein "Verdichtungsvorhang" bildet. Und nicht zuletzt ist auf die starke oberflächliche Bodenverwundung bei Kurvenfahrten oder Drehungen auf der Stelle hinzuweisen. Lauf- oder Schreitsysteme sind in diesem Sinne besser geeignet, jedoch kinematisch deutlich komplexer. Beeindruckende Beispiele für kleinere Laufroboter, die in der Lage sind, sich im unwegsamen Gelände fortzubewegen, wurden in den vergangenen Jahren von Boston Dynamics entwickelt, z.B. (Wooden, Malchano, Blankespoor, Howardy, & Riz, 2010) (Feng, Xinjilefu, Atkeson, & Kim, 2015). Der Fokus liegt hier auf den mechatronischen und regelungstechnischen Aspekten und weniger auf der Autonomie des Systems. Der Vorteil hybrider Systeme, wie z.B. dem Schreit-Fahrrover Sherpa TT (Cordes, Kirchner, & Babu, 2018) ist die Möglichkeit zwischen verschiedenen Fortbewegungsmodi zu wechseln und sich optimal an den Untergrund anzupassen. Zudem weist der Sherpa TT ein Gewicht von rund 200 kg auf, womit er deutlich schonender bezüglich Bodenverdichtung auftritt, auch bei dynamischen Belastungen. Die Aufstandsfläche des Roboters ist durch die flexiblen Räder variabel, kann aber mit etwa 20cm (Radbreite) x ~10cm (Längsrichtung) approximiert werden. Hierdurch ergäben sich vier Auflageflächen jeweils mit einem Bodendruck von ca. 0.25 kg/cm^2 .

Orientierung im Bestand

Die autonome Navigation in unwegsamem Gelände beinhaltet neben der Kartierung der Umgebung auch die Lokalisierung, Planung von sicheren Pfaden und die zuverlässige Erkennung von Hindernissen. Insbesondere in Umgebungen mit starkem Pflanzenbewuchs ist dies eine Herausforderung (Nüchter, Lingemann, Hertzberg, & Surmann, 2007).

(Teil-)autonome robotische Systeme verfügen bereits über eine große sensorische Disposition für die Lokalisierung und weitere autonome Verhaltensweisen. Diese

Ausstattung vereinfacht auch den Schritt hin zu einer „Remote-Holzernte“, d.h. einer räumlichen Trennung von Systemen im Wald und dem menschlichem Operator.

2.4 Auswirkungen der Digitalisierung auf den arbeitenden Menschen

Im Rahmen des Projekts SmartForestry (FKZ: 2220NR254 A bis H), welches sich mit der Digitalisierung der Informationsflüsse entlang der Holzlogistikkette befasst, werden die Auswirkungen der Digitalisierung auf den arbeitenden Menschen analysiert. Die Analyse findet in Zusammenarbeit mit den KWF Arbeitsausschüssen ‚Mensch und Arbeit‘ und ‚Forstliche Bildungsstätten‘ statt.

Erste Zwischenergebnisse sind, dass es in vielen Bereichen zu Verschiebungen des Arbeitsfokus kommen wird, was wiederum Weiterbildung und Umschulung des vorhandenen Personals sowie eine Anpassung der Ausbildung zukünftiger Waldarbeitenden zur Folge haben wird. Gefahren, wie die der Überforderung von Mitarbeitenden durch die erhöhte Komplexität und Störanfälligkeit digitaler Systeme sollten mit umfangreichem technischem Support begegnet werden.

Als besondere Stärke der Forstwirtschaft wurden die engagierten und hochqualifizierten Belegschaften, sowie die Vielfältigkeit der Aufgabengebiete identifiziert. Diese Vielfältigkeit ermöglicht eine flexible Reaktion auf Veränderungen durch die Einführung digitaler Systeme. So könnten z.B. Kapazitätseinsparungen durch gesteigerte Effizienz in der Holzlogistik genutzt werden um mehr Energie auf die Waldpflege und den Naturschutz zu verwenden.

Risiken könnten durch unsachgemäße Handhabung sensibler Daten oder unzureichend geschützte Daten entstehen, welche zu finanziellen Verlusten, Wettbewerbsnachteilen oder sogar Identitätsdiebstahl führen können. Dieses Risiko wächst bei der Erhebung und dem Austausch immer größerer Datenmengen. Um diesem zu begegnen muss in Datenschutzmaßnahmen investiert werden und ein verantwortungsbewusster Umgang mit Daten eingeführt und gepflegt werden.

Chancen könnten durch bessere Verfügbarkeit verlässlicher Informationen entstehen, die einerseits bei der Planung und Durchführung Waldbaulicher Maßnahmen, andererseits bei der Öffentlichkeitsarbeit eingesetzt werden könnten, um mehr Verständnis für die Forstwirtschaft zu schaffen, um so langfristig das Image in der Bevölkerung zu verbessern. Besonders im Hinblick auf den Klimawandel und dessen Folgen für Waldökosysteme sollte die Klimaschutzwirkung der Forstwirtschaft im Fokus der Öffentlichkeitsarbeit stehen.

2.5 Datenschutz

Es hat sich eine Arbeitsgruppe aus Vertretern von Maschinenherstellern, Forstunternehmen, Forstverwaltungen, Wissenschaft und Waldbesitzenden gebildet, um ein Merkblatt mit konkreten Handlungsempfehlungen zum Thema Datenschutz für den Umgang mit Forstmaschinendaten (KWF, 2023) zu definieren.

Es gibt den forstlichen Datenstandard StandForD, über den jegliche Kommunikation mit der Maschine von der Übergabe von Arbeitsaufträgen und Sortimentvorgaben an die Maschine, über Arbeitsfortschrittmeldungen von der Maschine, bis hin zu vollständigen Produktionslisten samt GIS-Koordinate des gefällten und abgelegten Holzes definiert ist. Die Daten lassen sich in Geschäftsprozessdaten, personenbezogene Daten, Geodaten und Maschinendaten zusammenfassen. Bezüglich Datenschutz von Informationen, dürfen nicht alle Daten für die beteiligten Akteure des Holzbereitstellungsprozesses uneingeschränkt verfügbar sein.

Für den Datenschutz haben besondere Relevanz:
die Datenschutz-Grundverordnung der Europäischen Union ([DSGVO](#)),
das Bundesdatenschutzgesetz,
das Landesdatenschutzgesetz des jeweiligen Bundeslandes.

Generell sind Forstmaschinendaten als Serviceleistung zu betrachten. Von der Weitergabe von Maschinendaten sollte grundsätzlich abgesehen werden, da sie pbD und Betriebsgeheimnisse enthalten können. Es gilt, dass die Datenlieferung für die Vertragserfüllung erforderlich sein muss und in einem konkreten Vertragsgegenstand "Datenlieferung" beauftragt werden muss. Wenn möglich, sind die Daten vor der Weitergabe zu aggregieren, zu pseudonymisieren, zu bereinigen oder zu filtern, der Personenbezug ist zu entfernen und es ist darauf zu achten, dass durch Verschneidung kein Personenbezug hergestellt werden kann.

Instrumente für den rechtsicheren Austausch sind:

- Einwilligungserklärung des Betroffenen
- Innerbetriebliche Vereinbarung
- Anonymisierung/ Pseudonymisierung
- Gegenseitige vertragliche Vereinbarung
- Risikoanalyse

In den Verträgen sollten insbesondere die Verwendung der Daten (Zweckbindung) und Lösungsfristen festgelegt werden. Die Weitergabe von Daten an Dritte kann vertraglich ausgeschlossen und der Kreis der Empfänger vertraglich eingeschränkt werden. Darüber hinaus ist es sinnvoll, die Akteure im Hinblick auf die Risiken des Datenaustauschs, mögliche Schäden und die Schadensabschätzung zu sensibilisieren und zu schulen. Als konkrete Schutzmaßnahme empfiehlt es sich, Fahrerprofile mit einem Passwortschutz zu versehen und ein Rollen- und Rechtemanagement für Datenbanken und Flottenmanagementsysteme einzuführen.

Resümierend ist beim Umgang mit Daten im Unternehmen stets die Rechtmäßigkeit des Handelns zu beachten und in diesem Zusammenhang sensibel mit personenbezogenen Daten umzugehen, Betriebsgeheimnisse zu schützen und dies durch geeignete organisatorische Maßnahmen sicherzustellen. Das betrifft insbesondere den Umgang durch Roboter generierte Daten.

3. SYSTEMVORAUSSETZUNGEN

3.1 Umweltschutz

Grundsätzlich gelten allgemeine Prinzipien und Leitlinien, die den Einsatz von Robotern in der Holzernte auf der ganzen Bestandsfläche nachhaltig und umweltfreundlich gestalten sollen:

- Nachhaltige Forstwirtschaft: Der Einsatz sollte in Übereinstimmung mit einer nachhaltigen Bewirtschaftung erfolgen, dass die langfristige Erhaltung des Waldökosystems, die Biodiversität und den Schutz natürlicher Ressourcen berücksichtigt
- Minimierung von Umweltauswirkungen: Die Technologie des Roboters sollte so gestaltet sein, dass die Auswirkungen auf die Umwelt minimiert sind. Dies könnte

bedeuten, dass der Roboter emissionsfrei betrieben wird, geringen Energieverbrauch hat und keine schädlichen Chemikalien oder Materialien freisetzt

- Schutz von Lebensräumen: Der Einsatz von Robotern sollte darauf abzielen, natürliche Lebensräume und Nistplätze für Wildtiere zu erhalten und zu schützen
- Vermeidung von Bodenerosion: Die Roboter sollten so konstruiert sein, dass sie den Boden während des Einschlags so wenig wie möglich stören.
- Rücksichtnahme auf empfindliche Gebiete: Es sollte darauf geachtet werden, dass Roboter nicht in geschützten Gebieten oder ökologisch sensiblen Regionen eingesetzt werden.
- Regelmäßige Überprüfung und Anpassung: Die Umweltauswirkungen des Roboters sollten regelmäßig überprüft und das System gegebenenfalls verbessert werden.

Die Einhaltung dieser Prinzipien kann je nach Einsatzort, Umgebung und Technologie variieren. Es ist daher wichtig, die spezifischen Richtlinien und Vorschriften der betreffenden Behörden und Verbände zu beachten.

3.1.1 Potenziale für Einsparungen der CO₂-Emissionen

Im Folgenden wird dargelegt, wie die CO₂ Emissionen reduziert werden können und wie viele Emissionen in der hochmechanisierten Holzbereitstellung deutschlandweit anfallen.

Klein et al. (2016) haben für die hochmechanisierte Holzernte einen durchschnittlichen CO₂ Ausstoß von 5,7 kg CO₂ Äquivalente nicht-nachhaltiger Quellen pro m³ bereitgestelltem Holz identifiziert. Diese Emissionen gehen auf die Arbeiten von Harvester, Forwarder und die Beladung des Holz-LKWs zurück. Für den Transport von Holz zum Sägewerk fallen zusätzlich etwa 7 kg CO₂ Äquivalente an über alle Sortimente und alle mit dem LKW gefahrenen Strecken an. Die Untersuchungen gelten für das Land Bayern.

Kühmeier et al. (2022) betrachteten ebenfalls die hochmechanisierte Holzbereitstellung und kalkultierten für Österreich etwa 26 kg CO₂ Äquivalente nicht-nachhaltiger Quellen pro m³ bereitgestelltem Holz. Eingeschlossen sind Harvester, Forwarder und Holzlogistik. Wenngleich lediglich 3,4 kg auf den Harvestereinsatz entfallen und 3,7 kg auf den Forwardereinsatz.

Betrachtet man die internationale Literatur, liegen die Emissionen für Harvester und Forwarder jeweils zwischen 1-5 kg CO₂ Äquivalente nicht-nachhaltiger Quellen pro m³ bereitgestelltem Holz.

Die Abweichung resultiert aus einer Reihe an Faktoren, die auf die Emissionen einwirken, so z.B.:

- Bestandesverhältnisse
- Eingriffsstärke
- Wetter
- Wahl des Verfahrens, Wahl der Maschinen
- Qualität der Hiebsvorbereitungen, Infrastruktur
- Leistungen des Maschinenführer
- Anfallende Sortimente, Baumarten

Möglichkeiten der Reduzierung der Emissionen:

- Auslastung der Dieselmotoren
- Thermostativ fans, die ständig unter Volllast laufen, möglichst nicht verwenden
- Lichter nur nutzen, wenn es unbedingt notwendig ist
- Vermeidung von Standzeiten im Leerlauf und Leerfahrten
- Verschmutzungen an Radiator und Ölkühler regelmäßig entfernen

- Wahl von high flotation tires
- Ausbildung der Fahrer zum sparsamen Fahren
- Möglichst frühe Überführung auf die Bahn
- Leistung und Größe der Betriebsmittel an die Aufgabe anpassen
- Alternative Betriebsstoffe (Bio-Diesel)
- Integrierte auf einander abgestimmte Systeme

Der wohl entschiedenste Faktor ist die Wahl des Holzernteverfahrens. Kühmeier et al. (2022) analysierten verschiedene Holzernteverfahren bezüglich ihrer CO₂ Emissionen. Sie fanden heraus, dass die Kombination aus Motorsäge, Schlepper mit Seilwinde/Rückeschild die geringsten Emissionen verursachte (2,3 kg). Die meisten Emissionen (8,17 kg) verursachten cut to length (CTL) Verfahren mit Harvester und Forwarder, inklusive Traktionshilfswinde. Das ist auf die Größe und das Gewicht der Maschinen zurückzuführen. Je kleiner also die einzusetzenden Maschinen, desto geringer der Ausstoß von CO₂.

Der Einsatz von kleinen Robotiksystemen ist also vielversprechend um den CO₂ Ausstoß während der Holzernte signifikant zu reduzieren. In der folgenden Beispielrechnung ist das Einsparungspotential in der hochmechanisierten Holzernte dargelegt, ersetzte man Harvester und Forwarder durch kleinere Robotik Systeme.

Beispielrechnung:

Laut Klein et al. (2016) fallen über alle Sortimente in der hochmechanisierten Holzernte (Harvester, Forwarder + Beladung des LKW) 5,7 kg Co₂ Äquivalente pro m³ im Durchschnitt an.

75% des Nadelholzes wird hochmechanisiert geerntet. 30% des Laubholzes wird hochmechanisiert geerntet.

Laut [BMEL-Statistik: Holzmarkt](#) fielen 2022 12.499 Mio m³ Laubholz an und 66.187 Mio m³ Nadelholz an.

Das ergibt theoretische Emissionen für die hochmechanisierte Holzernte

für Laubholz **21.463 t CO₂**

für Nadelholz **284.141 t CO₂**

3.2 Natürliche Einsatzumgebungen des Roboters

Der Boden spielt eine entscheidende Rolle in den Waldökosystemen, da er die Nährstoff-, Wasser- und Sauerstoffversorgung sicherstellt. Die Bodenstruktur ist das Ergebnis vergangener und gegenwärtiger Prozesse und Kräfte, die auf den Boden eingewirkt haben (Beekman, 1987) und wird durch chemische und physikalische sowie durch Humusbildung ständig umgestaltet. Eine große Rolle spielt der Faktor Mensch, der durch die mechanisierte Holzernte eine hohe Produktivität bewirkt, jedoch die Waldböden durch schwere Maschinen schädigen kann. Bereits Krafteinwirkungen von geringem Ausmaß können die Eigenstabilität beschädigen und somit die Funktionserfüllung des Bodens beeinträchtigen (Schäffer, 2012).

Vorwiegend kommen in Deutschland terrestrische Böden (s. Abb. 1) vor, deren Entwicklung überwiegend durch Regenwasser beeinflusst ist, das im Boden versickert und in den Poren transportiert wird. Die Einteilung fußt auf dem zentralen Einfluss des

Wassers auf die Entwicklung des Bodens (s. Abb 2). Typisch für terrestrische Böden sind Schwarzerden und Braunerden. Neben diesen Böden gibt es noch die semiterrestrischen Böden, die durch das Grundwasser beeinflusst werden. Zu den semiterrestrischen Böden gehören Auenböden an Bachläufen und in Flusstälern, die teilweise oder zu bestimmten Zeiten von Wasser bedeckt sind.

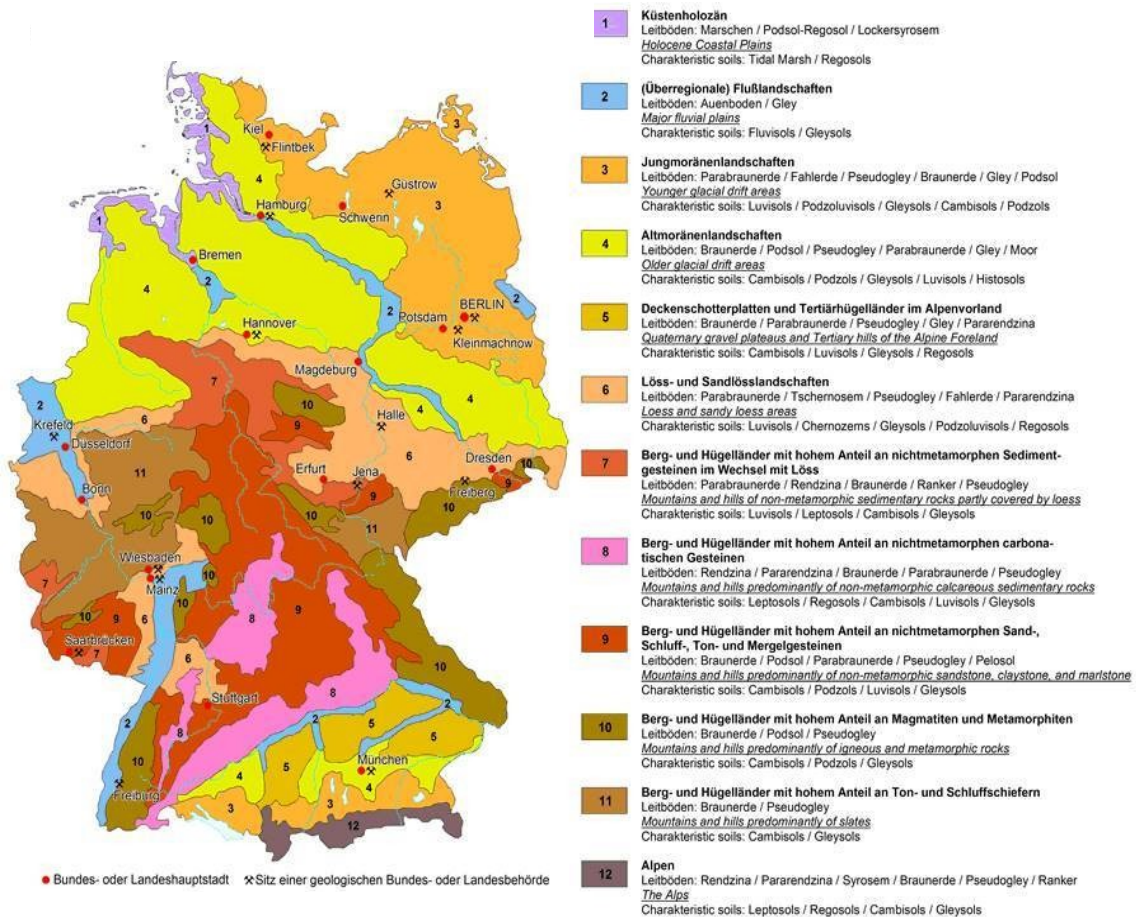


Abbildung 1 Bodenregionen in der Bundesrepublik Deutschland (Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

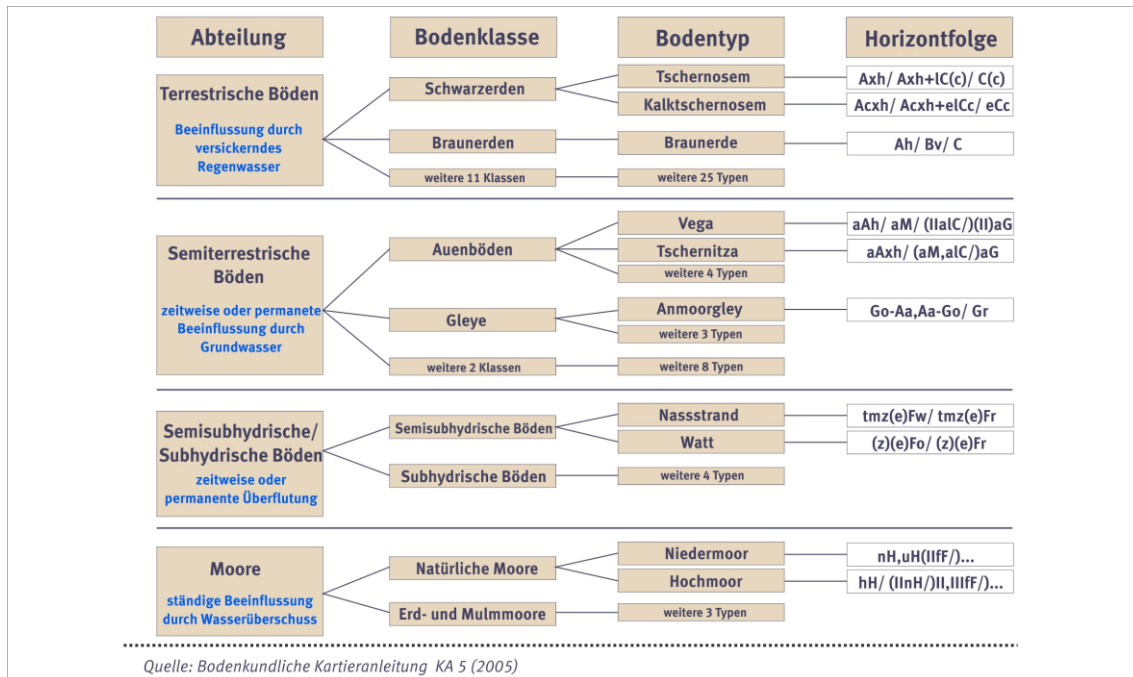


Abbildung 2 Bodensystematik in Deutschland (Quelle: S. Marahrens/ Umweltbundesamt)

Die Gefahr einer Bodenverformung hängt von der Bodenart, der Hangneigung und vom Wassergehalt ab. Es gibt vier Hauptbodenarten: Die Sandböden, die Tonböden, die Schluffböden und die Lehmböden. Grobkörnige und/ oder stark skeletthaltige Böden haben ein geringes Risiko zur Verformung. Böden, die feinkorndominiert und in deren Abhängigkeit eine hohe Bodenfeuchte aufweisen, besitzen ein hohes Risiko zur Verformung. Mit zunehmender Hangneigung erhöht sich der Schlupf und das Ausbrechen des Bodens, was mit einem erhöhten Erosionsrisiko einhergeht (Kremer, Wolf, Matthies 2012).

Risiken, die durch den Einsatz von Maschinenbefahrung entstehen:

- Schäden am Bestand sowie der übrigen Vegetation mit der Folge verminderter Wertleistung und Stabilität
- Störungen des Bodengefüges mit der Folge von Zuwachseinbußen und verminderter Bodenfunktionstätigkeit
- Nährstoffentzug mit der Folge abnehmender Bodenfruchtbarkeit (v.a. bei Ketten- und Bändereinsatz)
- Störungen der ökosystemaren Stabilität durch biologische Invasion standortstypischer Arten

Durch den Einsatz von Robotern, die ein leichteres Gewicht als klassische Forstmaschinen und vorzugsweise Ketten- bzw. Raupenantrieb haben, wird der Boden mehr geschont und ggf. Zugang zu Arealen ermöglicht, die sonst nicht zugänglich sind.

3.3 Arbeitsschutz

Ein Hauptziel bei einem Einsatz eines Roboters bei der Holzernte ist die Sicherstellung eines sicheren Arbeitsumfeldes für alle beteiligten Waldarbeiter und Ernteroboter, während gleichzeitig die Sicherheit von Waldbesuchenden und die Erhaltung der natürlichen Umwelt gewährleistet wird.

Die Forstwirtschaft gehört aufgrund ihrer Arbeitsbedingungen zu den unfallträchtigen Branchen. Meldepflichtige Unfälle sind jene, die eine Arbeitsunfähigkeit von mehr als drei Tagen oder den Tod zur Folge haben. Im Jahr 2022 wurden 45 Arbeitsunfälle im Bereich der Holzernte gemeldet (s. Abb. 3).

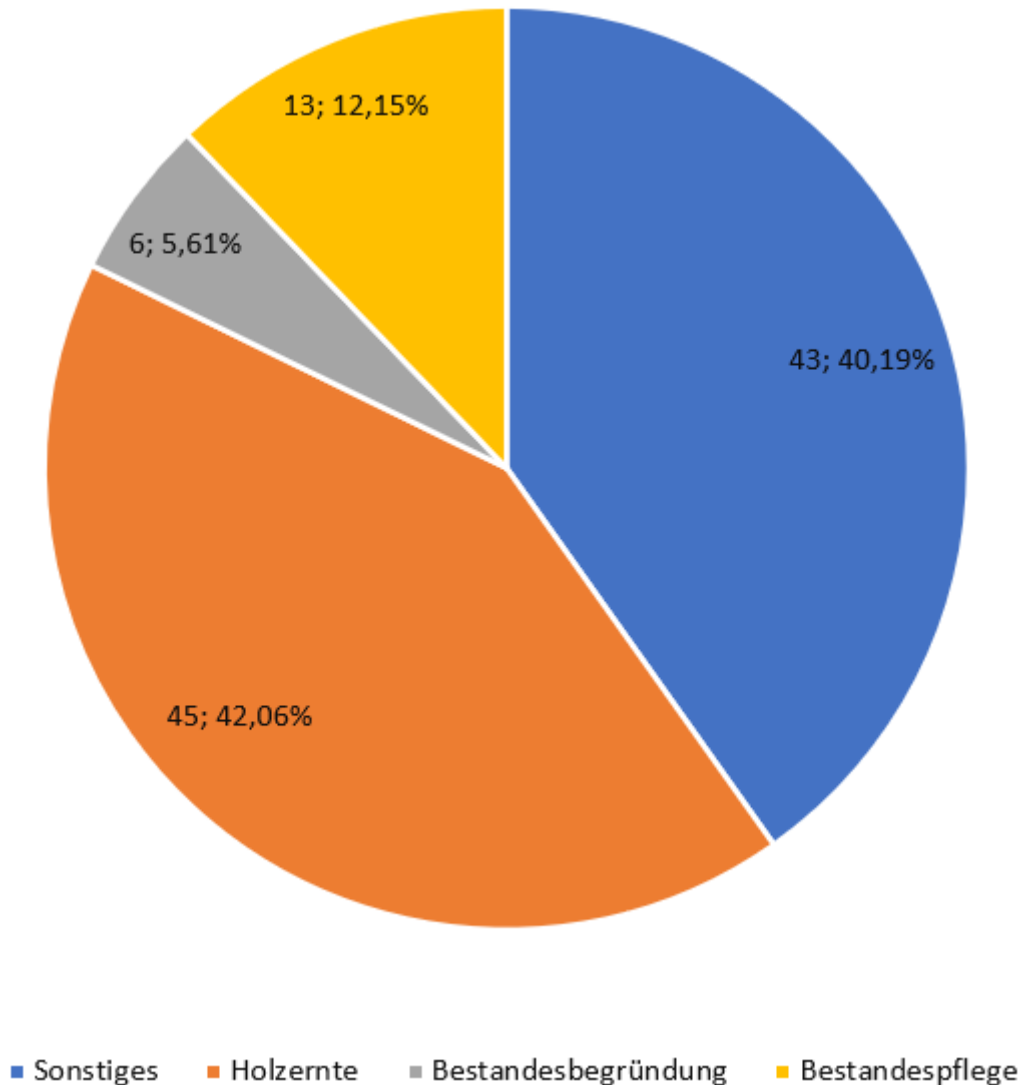


Abbildung 3 Arbeitsunfälle in den Arbeitsbereichen 2022 in Deutschland (Quelle: <https://unfallzahlen.kwf-online.de/>)

Dabei wurden 6,67 % beim Baumaufsuchen, 15,56 % beim Fällen und 2,22 % beim Zufallbringen dokumentiert. Die Unfallhäufigkeit zum Abstand unter 5 m zum Baum lag bei 37,78 % und zwischen 5 – 10 m zum Baum bei 51,11 %. Hinzu kommen durch die immer häufigen auftretenden hohen Temperaturen während der Sommermonate und die außerordentliche körperliche Aktivität der Forstwirte enorme Kreislaufbelastungen (Leo A. Smith, 1985) , die vermehrt zu Hitzestress und abnehmender Leistungsfähigkeit führen können. Bei dem Einsatz eines Roboters bei der Holzernte liegt der Vorteil in der Ergonomie und der Reduktion des Unfallrisikos, da der Operator sich nicht im Risikobereich aufhält. Dabei spielen auch die Meldungen an den Operator, sobald sich unbekannte Objekte im Sicherheitsbereich befinden, eine kontinuierliche Umfeld- Überwachung (Ergänzung mit Drohnen zur Hiebsort-Absperrung und -überwachung), eine automatische Warnung und Information an den Waldbesuchenden nach entsprechender Erkennung und ein Arbeits-Stop bei Störungen mit Notfallprotokollen bzw. unbekannten Situationen eine signifikante Rolle. Um

neben unbekannten Objekten auch die Maschine bei einem Unfall zu sichern, ist es ebenfalls wichtig, dass der Roboter eine robuste, geschlossene Bauweise aufweist und bei Störungen zur Auffindung bzw. als Information für Bergungs- oder Reparatursystemen die letzte Position an den Operator sendet. Dies umfasst die Entwicklung und Implementierung von Geofencing-Lösungen zur Festlegung von Sicherheitszonen und zur Warnung von Forstarbeitenden und Besuchenden bei Verlassen oder Betreten dieser Zonen. Durch den Einsatz von Drohnen zur Überwachung der Sicherheitszonen und zur schnellen Lokalisierung von Personen im Wald wird die allgemeine Sicherheit im Arbeitsbereich verbessert. Weitere Möglichkeiten sind die Nutzung von Drohnen zur Umfeldüberwachung, Geofencing-basierte Cell-Broadcasts oder App-basierte Informationssysteme. Zudem können Notfallpläne und Rettungsketten im digitalen Zwilling des Waldes hinterlegt werden, einschließlich der theoretischen Datenübermittlung an die Leitstellen der Rettungsdienste und Feuerwehr. Zusammen ermöglichen diese Maßnahmen einen guten Ausbau des Arbeitsschutzes und tragen zur Vermeidung von Unfällen und Gefahrensituationen bei. Als Input für das System können zum Beispiel die Liste der öffentlich bekannten und markierten Rettungspunkte, die geplanten und aktuell durchgeführten Arbeiten sowie relevante Infrastruktur-Punkte dienen.

4. ANFORDERUNGSBESCHREIBUNG

Die Holzernte mit einem robotergestützten System umfasst mehrere Arbeitsvorgänge, die im folgenden Kapitel erläutert werden.

Für die Software ist es nötig, einen digitalen Zwilling des Waldes anhand vorhandener Drohnen- und Sensordaten zu entwickeln, der durch Daten von Laufrobotern ergänzt wird und eine Künstliche Intelligenz (KI) trainiert. Ein digitaler Zwilling des Waldes ist eine virtuelle Darstellung eines realen Waldgebietes, die auf digitalen Daten und Modellen basiert. Dabei werden Informationen über die Struktur, den Zustand und andere relevante Merkmale des Waldes dargestellt. Anhand der Informationen soll es möglich sein, Daten zu analysieren und Simulationen durchzuführen. Die Erstellung des digitalen Zwillings soll die Sammlung verschiedener Datenquellen, wie beispielsweise geografische Informationen, topografische Daten, Satellitenbilder, Luftbilder, LiDAR-Daten oder Daten aus terrestrischen Sensoren beinhalten, die den Wald in einer virtuellen Umgebung repräsentiert. Der Digitale Zwilling ermöglicht es, verschiedene Szenarien und potenzielle Auswirkungen zu bewerten und kann somit bei der Planung und Entscheidungsfindung die Holzernte unterstützen.

Der erste Kernaspekt ist der "digitalen Zwillings des Waldes", d.h. einer digitalen Repräsentation eines realen Waldgebietes, welche auf digitalen 3D-Daten von Flugdrohnen und Modellen basiert. Dabei werden Informationen über die Struktur, den Zustand und andere relevante Merkmale des Waldes dargestellt. Mit Hilfe des digitalen Zwillings soll es möglich sein, Daten zu analysieren, Simulationen durchzuführen und Prognosen zu erstellen. Zur Erstellung des digitalen Zwillings sollen die Sammlung verschiedener Datenquellen, wie beispielsweise geografische Informationen, topografische Daten, Satellitenbilder, Luftbilder, LiDAR-Daten oder Daten aus terrestrischen Sensoren zusammengeführt und in einer virtuellen Umgebung dargestellt werden. Der Digitale Zwilling ermöglicht es, verschiedene Szenarien und potenzielle Auswirkungen zu bewerten und kann somit die Forstleute bei der Planung und Entscheidungsfindung unterstützen.

Der zweite Kernaspekt ist die Entwicklung eines teilautonomen Fällsystems, welches basierend auf den Daten des digitalen Zwillings des Waldes, den Holzeinschlag autonom

plant und durchführt. Als Basis dient eine existierende Forstraupen, welche zu diesem Zweck mit einem Fällmechanismus und zusätzlicher Sensorik ausgestattet wird, so dass sie autonom im Bestand navigieren kann. Die autonome Navigation in der unstrukturierten Umgebung des Waldes (undurchsichtiges Gebüsch, unebenes Gelände, Hindernisse, ...) stellt eine große Herausforderung für die Robotik dar. Durch die detailgenauen Informationen aus dem digitalen Zwilling des Waldes sollen Routen vorab optimal geplant und mit Hilfe von lokalen 3D-Navigationsverfahren abgefahren werden.

4.1 Arbeitsplanung

Mithilfe des digitalen Zwillings sollen bestehende Algorithmen optimiert und neue Ansätze entwickelt werden. Diese Algorithmen dienen der automatisierten Ableitung von folgenden Waldparametern: Stammfußkoordinate, Baumart, Brusthöhendurchmesser (BHD), Baumhöhe. Informationen zu diesen Parametern werden als aufbereitete Geodaten (Raster & Polygon) bereitgestellt und können somit für eine gezielte Planung des Holzeinschlags genutzt werden.

Der Einsatz von Drohnen, auch bekannt als unbemannte Luftfahrzeuge (Unmanned Aerial Vehicles, UAVs), hat verschiedene Branchen transformiert, und der Bereich der Forstwirtschaft bildet dabei keine Ausnahme. 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.

Je nach Ziel kann die Datenerfassung während des Winter- und/oder Sommerhalbjahres erfolgen und beinhaltet in der Regel eine spezifische Flugroute und bestimmte Auswahl an Kameraparametern, um die bestmögliche Abdeckung und Bildüberlappung zu gewährleisten, und so ein detailliertes digitales Abbild des Waldbestands zu erschaffen.

Nach der Generierung der 3D-Daten, Orthomosaik und Höhenmodelle aus den Drohnen Daten beginnt die Phase der Weiterverarbeitung der Datenprodukte. In dieser Phase werden fortgeschrittene Algorithmen und Analysetechniken eingesetzt, um aus den rohen Datenprodukten Informationen von praktischem Nutzen zu extrahieren.

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.

Elemente des Digitalen Zwillings

Totholz: Totholz spielt eine entscheidende Rolle im Waldökosystem und trägt zur Biodiversität bei. Es bietet Lebensraum für eine Vielzahl von Organismen, einschließlich Pilzen, Insekten und Vögeln. Totholz dient auch als Kohlenstoffspeicher, was für die Regulierung des Klimas von Bedeutung ist. Eine genaue Erfassung von Beständen hilft bei der ökologischen Bewertung eines Waldes und ermöglicht eine bessere Verwaltung

der Biodiversität und Kohlenstoffbilanz. Totholz kann zudem ein großer Einflussfaktor hinsichtlich der Brandlast sein. Schließlich stellt liegendes Totholz ein Hindernis am Boden dar, das im Rahmen der Waldbewirtschaftung berücksichtigt werden muss. Mit der dichten Punktwolke, die aus der UAV-SfM-Methode resultiert, kann Totholz effektiv identifiziert und räumlich kartiert werden. Hierfür können unterschiedliche Klassifizierungsalgorithmen, z.B. aus dem Bereich des maschinellen Lernens, zum Einsatz kommen, welche innerhalb der zuvor erstellten Datenprodukte Totholz detektieren.

Stammfußkoordinaten: Die präzisen Positionen von Baumstämmen sind wesentliche Informationen für das Waldinventar und die Forstplanung. Durch die Dichteanalyse der Punktwolke und die Segmentierung der Bäume können die genauen Koordinaten der Stammfüße bestimmt werden. Durch genaue Koordinaten können individuelle Bäume überwacht, der Gesundheitszustand beurteilt und Managementmaßnahmen effektiver geplant werden.

Baumhöhe: Die Baumhöhe ist ein wesentlicher Parameter zur Bestimmung des Volumens und der Biomasse eines Baumes und damit der Holzmenge, die ein Wald liefern kann. Sie ist auch ein wichtiger Indikator für das Wachstum und die Vitalität eines Baumes. Die Höhe eines Baumes kann durch Vergleich unterschiedlicher Höhenmodelle bestimmt werden. Sie ergibt sich aus der Differenz des Canopy Height Models, welche die Höhen des Oberstands wiedergibt, und des Digitalen Geländemodells (DGM), welches die Höheninformation des Waldbodens beinhaltet.

Mikrorelief des Waldbodens: Das Mikrorelief des Waldbodens ist ein wichtiger Faktor für die Hydrologie und Bodenerosion. Es beeinflusst Wasserflüsse und hat somit Auswirkungen auf die Baumstandorte und das Baumwachstum. Informationen über das Mikrorelief helfen geeignete Forstmanagementstrategien zu planen. Außerdem ist es entscheidend für die Navigation entlang des Waldbodens und zur Ausweisung bestimmter Gefahrenstellen. Mit hochauflösenden DGMs kann das Mikrorelief genau abgebildet werden.

Stammdurchmesser: Der Stammdurchmesser ist ein entscheidender Parameter zur Berechnung des Baumvolumens, was für die ökonomische Bewertung eines Waldes und die Planung der Holzernte essentiell ist. Obwohl der Stammdurchmesser in dichten Waldbeständen nicht direkt aus UAV-Daten abgeleitet werden kann, können Näherungswerte durch Modellierung mit anderen Parametern wie Baumhöhe und Kronenbreite erzielt werden.

Baumart: Die Kenntnis der Baumart ist von großer Bedeutung für die Forstwirtschaft, da verschiedene Arten unterschiedliche ökologische und ökonomische Werte haben. Sie sind wichtig für die Biodiversität, das Mikroklima, den Boden und das Wasser und beeinflussen die Menge und Qualität des produzierten Holzes. Die Baumart kann durch spektrale und texturale Merkmale in den Orthomosaiken bestimmt werden. Maschinelles Lernen und objektorientierte Bildklassifizierungsalgorithmen können verwendet werden, um verschiedene Baumarten zu identifizieren.

Kronengeometrie: Die Form und Größe der Baumkronen sind wichtig für die Beurteilung der Gesundheit und Vitalität eines Baumes. Sie beeinflussen die Lichtverfügbarkeit, den Wettbewerb zwischen den Bäumen und die Struktur des gesamten Waldökosystems. Die Form und Größe der Baumkronen können durch Segmentierung der Punktwolke und der Orthomosaiken ermittelt werden. Hierzu werden Algorithmen verwendet, die die Punkte

identifizieren, die zur Krone jedes einzelnen Baumes gehören. Anschließend werden geometrische Analysen durchgeführt, um die Form und Größe der Baumkronen zu bestimmen.

5. FÄLLMETHODEN, AUFGABEN UND ARBEITSSCHRITTE BEI DER TÄTIGKEIT DES BAUMFÄLLENS

Ein Baum wird nur dann sicher gefällt, wenn der Forstwirt die präzise Richtung des Fällens, den Zeitpunkt des Fällens und den Zeitpunkt, an dem sich der Baum vom Wurzelstock löst, bestimmt. Sicherheitsrisiken, Fällrichtung und Fällmethoden werden bei der Baumansprache definiert.

5.1 Motormanueller Einschlag

1. Aufsuchen des zu fällenden Baumes
2. Baumansprache

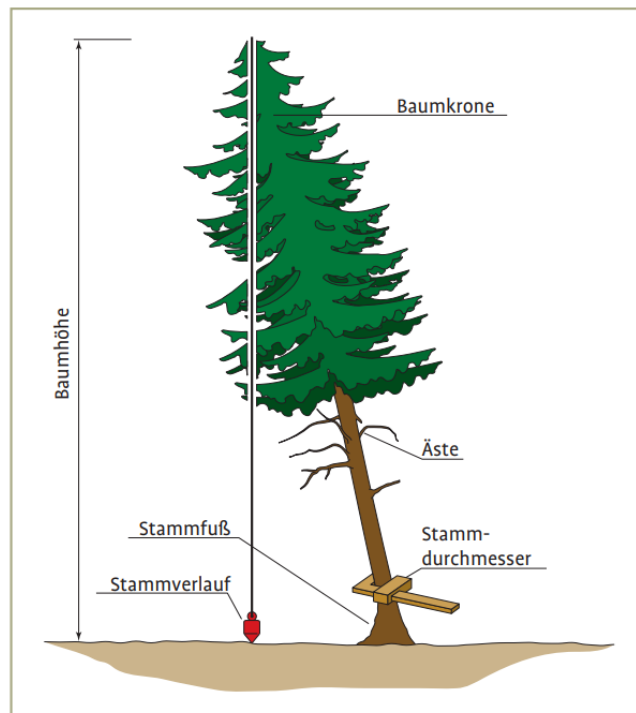


Abbildung 4 Kriterien bei der Ansprache eines Baumes (Quelle: Der Forstwirt/ Die Forstwirtin)

- a. Baumhöhe
 - Fall- bzw. Gefahrenbereich
 - Aufschlagstelle der Krone, Absperrmaßnahmen auf Straßen und Wegen
 - Mögliche Gefahren für Leitungen, Bahnlinien, Fahrzeuge oder Gebäude
- b. Baumkrone
 - Schwerpunkt
 - Zwiesel
 - Dürr oder begrünt
 - Abgebrochen

Anforderungsanalyse

- Lücken
- c. Stammverlauf
 - Schwerpunkt des stehenden Baumes
 - Krumm, schräg
- d. Stammfuß und Schaft, Gesundheitszustand
 - Wurzelanläufe, Wurzeleinwüchse
 - Beschädigungen, Fäule
- e. Stammdurchmesser
 - Dicke
- f. Äste
 - Trockenäste
- g. Nachbarbäume, Umgebung
 - Ineinander hängende Bäume
 - Stehendes Totholz
 - Hindernisse
 - Rückweiche
- 3. Bestimmung der Fällrichtung
- 4. Beschneiden der Wurzelanläufe
- 5. Anlage des Fallkerbs
- 6. Überprüfen der Fällrichtung
- 7. Splintschnitte
- 8. Sicherheitskontrolle
- 9. Fällschnitt, Keilen

5.2 Harvestereinsatz

Beim Einsatz eines Harvesters beim Holzeinschlag werden das Fällen, Entasten, Einschneiden und Vorrücken mechanisiert durchgeführt. Der Einsatz erfolgt grundsätzlich von der Rückegasse aus und die Sortimente werden an der Rückegasse abgelegt.

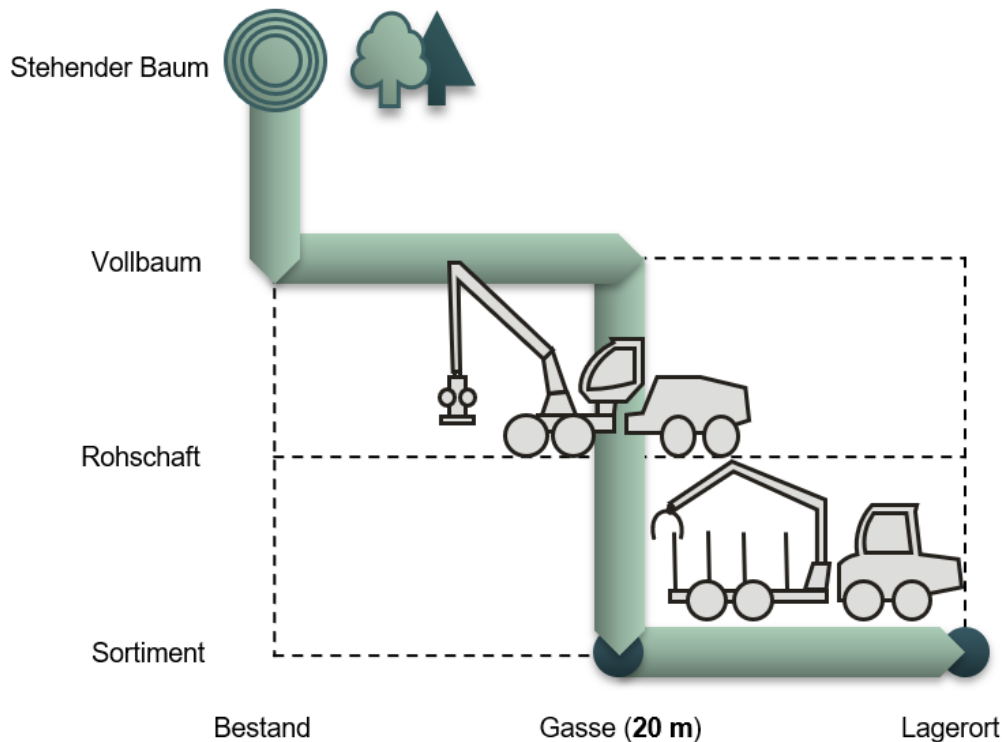


Abbildung 5 Funktiogramm: Vollmechanisiertes Verfahren, Fällen und Aufarbeiten mit Vollernter, Rücken mit Forwarder (Quelle: KWF)

1. Positionieren des Aggregats am Baum, Abtrennen des Baumes vom Stock und Zufallbringen (Baumfällung)
2. Vorrücken, Entasten und Zopfen des Baumes, Reisig wird vor der Maschine abgelegt, dabei Vermessen des Baumes (Durchmesser und Länge, Volumen wird berechnet)
3. Ablegen der erzeugten Rohholzsortimente an der Arbeitsgasse

6. CHANCEN UND RISIKEN

6.1 Chancen

Durch den hohen Technisierungsgrad sind die Unfallzahlen in den letzten Jahren gesunken, dennoch zeigen die Unfallzahlen, wie gefährlich die Arbeit bei der Holzernte ist. Im Jahr 2021 wurden 4.048 Unfälle gemeldet, davon endeten 26 tödlich (SVLFG, 2022). Mittels des Einsatzes eines Roboters bei der Holzernte werden das höchste Unfallrisiko, von Baumteilen wie Stämmen oder Ästen getroffen zu werden gesenkt. Zudem kann der Einsatz eines Roboters dem Fachkräftemangel in Deutschland entgegengewirkt werden (Andreas Peichl, 2022). Ein Operator könnte mehrere Roboter, die sich auf der Fläche befinden, gleichzeitig bedienen. Autonome Systeme können Holzerntemaßnahmen effizienter durchführen, da sie kontinuierlich und ermüdungsfrei, unabhängig von Tageslicht und Wetterbedingungen arbeiten, was zu einer Steigerung der Produktivität führt. Mit dem Einsatz von Sensoren und Algorithmen können die besten Schneidetechniken und Arbeitswege berechnet werden, um den Holzernteprozess zu präzisieren und optimieren. Durch die Integration von Echtzeitdaten in den digitalen Zwilling kann der Wald kontinuierlich überwacht werden, um Veränderungen in der Vegetation, Waldbrände, Schädlingsbefall oder andere

ökologische Bedrohungen frühzeitig zu erkennen. Dies ermöglicht eine rechtzeitige Reaktion und Maßnahmen, um den Waldschutz zu verbessern, um somit zur Entwicklung nachhaltiger Waldbewirtschaftungsstrategien beizutragen. Ein digitaler Zwilling des Waldes kann als Bildungs- und Kommunikationswerkzeug dienen, um Interessengruppen, Entscheidungsträger und die breite Öffentlichkeit über die Bedeutung und den Zustand des Waldes zu informieren. Durch visuelle Darstellungen können komplexe Informationen leichter vermittelt werden.

6.2 Risiken

Im Vergleich zur Landwirtschaft oder der Industrie ist das Gelände im Wald unwegsamer und undefinierter. Dies stellt eine große Hürde bei der Planung von Robotik-Anwendungen dar. Es gibt keine homogenen Bereiche wie große flache Felder oder klar definierte Arbeitsbereiche wie in Fabriken, in denen der Roboter ungestört arbeiten kann, sondern aufgrund des zufälligen Baumwachstums sind keine zwei Bereiche gleich. Da ein Großteil der Waldflächen in den Bergen an steilen Hängen wächst, stellt der Hang eine ebenso große Herausforderung für die Maschinen dar. Da das Naturprodukt Holz nicht immer die gleiche Struktur, geschweige denn die gleiche Wuchsform aufweist, basieren sowohl der Fällprozess als auch die anschließende Aufarbeitung auf nicht konstanten Parametern und Umwelteinflüssen. Die Entscheidung, in welche Richtung ein Baum gefällt werden soll, ist daher eine komplexe Aufgabe.

7. BEISPIELKONZEPTE

Konzept 1: automatisierter Harvester

Der automatisierte Harvester ist eine strikte Durchautomatisierung und Integration robotischer Teil-Komponenten in einen kommerziellen Harvester. Alle aktiven Elemente werden, wenn nicht schon erfolgt, an eine Bus-Steuerung angelegt und der Harvester erhält eine Sensor-Ausstattung, die es im Optimalfall ermöglicht, alle notwendigen Umweltdaten für seine Mission zu ermitteln. Ebenso bietet sich hier die sensorielle Erfassung der Operatoren Interaktion mit dem Harvester im Vorfeld 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 Bestandes 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 gematcht 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 und ist im Bezug, auf den bevorzugten mehrschichtigen Mischwald nur bedingt zukunftsfähig. 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 oder Drohnen.

Konzept 2: Kleinroboter mit modularen Werkzeugen

Das autonome Fällen von Bäumen ist ein komplexer Aufgabenbereich mit vielen Teilaufgaben. Zu diesen Teilaufgaben gehören die Erstellung einer Umgebungskarte, die Auswahl 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 außerdem 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.

Konzept 3: Mehrere kleine Roboter mit unterschiedlichen Fähigkeiten

In diesem Konzept werden die Fähigkeiten, die für die Gesamtaufgabe nötig sind, auf einzelne, spezialisierte Systeme verteilt. Es gibt also einen oder mehrere Roboter zur Baumbewertung, zum Baum fällen, 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 die zurückgelegten Wege schwererer 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 wahrgenommen werden müssen. So

kann der Fäll-Roboter direkt an die nächsten Bäume fahren, während mehrere Rücke-Roboter den Abtransport gleichzeitig durchführen.

Konzept 4: Luft Roboter/ Drohne

Bei dem Konzept Luft erfolgt die Baumfällung aus der Luft. Hierbei fliegt eine Drohne oder ein Hubschrauber über den Wald und das Fällwerkzeug wird von oben heruntergefahren. Bei dem Fällwerkzeug handelt es sich um eine Vorrichtung, die den Baumstamm greifen und sägen kann. Als Werkzeug kann hierbei auch ein Harvesteraggregat zur Holzernte eingesetzt werden. Das Werkzeug wird mit einem stabilen Seil bis zum Baumstamm heruntergefahren. Der Baum wird gefällt und mit Hilfe des Seils nach oben entnommen. 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 den Baum tragen können.

Der Vorteil bei diesem Konzept ist, dass die Bodenverdichtung vermieden wird. Da die Baumernte aus der Luft stattfindet, fährt kein Fahrzeug durch den Wald.

Allerdings ist die Baumernte aus der Luft mit hohen Kosten verbunden. Auch müssen große Flugsysteme eingesetzt werden, um die hohe Last des Werkzeugs und des Baumes zu tragen. Dabei muss der gefällte Baum erst abtransportiert werden, bevor der nächste Baum geerntet werden kann.

Digitaler Zwilling

Der "Digitale Zwilling 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 Zwillings 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 haben, können diese die für ihre Aufgaben relevanten Karten und Daten herunterladen. Zum Beispiel kann das oben erwähnte Baumregister mit Stammpositionen 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, die die mobilen Systeme nicht komplett verarbeitet werden können. Daher ist es notwendig für diese spezialisierte 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.

8. LITERATURVERZEICHNIS

- Andreas Peichl, S. S. (10 2022). Fachkräftemangel in Deutschland und Europa. *ifo Schnelldienst*, S. 75.
- Apfelbeck, M., Kuss, S., Rebele, B., & Michaud, S. (2011). ExoMars Phase B2 Breadboard Locomotion Sub-System TestCampaign. *11th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation*.
- Berendt, F., Tolosana, E., Hoffmann, S., Alonso, P., & Schweier, J. (2020). Harvester productivity in inclined terrain with extended machine. *Sustainability*.
- Böttcher, F. (2021). *Analyse der prozessabhängigen Kosten der mechanisierten Buchenaufarbeitung*. Göttingen, Georg-August Universität.
- Cordes, F., Kirchner, F., & Babu, A. (2018). Design and field testing of a rover with an actively articulated suspension system in a Mars analog terrain. *Journal of Field Robotics*, 1149-1181.
- Daniel Klein, C. W.-B. (01. 01 2016). Environmental impacts of various biomass supply chains for the provision of raw wood in Bavaria, Germany, with focus on climate change,. *Science of The Total Environment*, S. 45-60. Von Environmental impacts of various biomass supply chains for the provision of raw wood in Bavaria, Germany, with focus on climate change,,: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715305908> abgerufen
- DIN ISO 6814:2016-08, Forstmaschinen_ - Mobile und selbstfahrende Maschinen_ - Begriffe und Klassifizierung (ISO_6814:2009). (kein Datum).
- Dr. Günther Linckh, D. H. (1997). *Nachhaltige Land- und Forstwirtschaft*.
- Erler, J. (kein Datum). Forsttechnik: Verfahrensbewertung.
- Erler, J., Knobloch, C., Faber, R., Grüll, M., & Nimz, R. (kein Datum). *Forsttechnische Grundlagen, Technikmanagement in Der Forstwirtschaft*.
- KWF (2023)**. *Maschinendaten- Handlungsempfehlungen zum Datenschutz*.
- Feng, S., Xinjilefu, X., Atkeson, C., & Kim, J. (2015). Optimization based controller design and implementation for the Atlas robot in the DARPA Robotics Challenge Finals. *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, (S. pp. 1028-1035). Seoul.
- Hartkopf, A. (2016). Welche Forstraupen für welche Arbeit? *Forst & Technik*, 22-25.
- Kühmeier, M., & Kanzian, C. (2022). Greenhouse Gas Emissions of the Forest Supply Chain in Austria in the Year 2018. *Sustainability*.
- Leo A. Smith, G. D. (1985). Heart-rate response to forest harvesting work in the south-eastern United States during summer. *Ergonomics*.
- Lindemann, R., & Voorhees, C. (2005). Mars Exploration Rover mobility assembly design, test and performance. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*.
- Nüchter, A., Lingemann, K., Hertzberg, J., & Surmann, H. (2007). 6D SLAM - 3D mapping outdoor environments. *Journal of Field Robotics*, 699–722.
- Pausch, R. (2007). Wer die Wahl hat, hat die Qual. *LWF aktuell*, S. 17,18,19.
- Purfürst, T., & Erler, J. (2011). The human influence on productivity in harvester operations. *International Journal of Forest Engineering*, S. 15–22.
- SVLFG. (22. 07 2022). <https://www.svlfg.de>. Von <https://www.svlfg.de/pm-unfallzahlen-waldarbeit-2021> abgerufen

Teresa de la Fuente, D. A.-G. (2017). Cradle-to-gate life cycle assessment of forest supply chains: Comparison of Canadian and Swedish case studies. *Journal of Cleaner Production*, S. 866-881.

KWF (2023). <https://unfallzahlen.kwf-online.de/>.

Willems, S. (2015). *Zur Abschätzung der Holzernte-Produktivität bei Optimierung von Bereitstellungsverfahren für Sortimente aus Laubholzkronen*. Cuvillier Verlag.

Wooden, D., Malchano, M., Blankespoor, K., Howardy, A., & Riz, A. (2010). Autonomous navigation for BigDog. *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (S. pp. 4736-4741). Anchorage.