

DATENVERWERTUNG AUS FORSTLICHEN PROZESSEN

Whitepaper, erstellt im Rahmen des Forschungsprojekts „CO₂For-IT“¹,

Autor: Volker Labudda, KWF

Forstliche Prozesse im engeren Sinne sind alle Prozesse, die im Zusammenhang mit der geregelten Waldbewirtschaftung stehen. Dazu gehören das Erstellen von Planungen (z.B. Forsteinrichtung, Jahres-, Hiebsplanung, Planungen der Walderschließung, des Forstschutzes, etc.), die Planung, Durchführung und Abrechnung von Maßnahmen der Walderschließung, der Bestandespflege (Kulturpflege, Jungbestandspflege, Durchforstung), der Holzbereitstellung (Auszeichnen, Fällen von Bäumen, Aufarbeiten ihres Derbholzes zu Stämmen/Stammabschnitten definierter Sortimente, Vorrücken, Rücken und Poltern, Holzverkauf, Holzabfuhr), von Schutzmaßnahmen (z.B. gegen Lawinen, Hochwasser, Waldbrand, etc.), oder der Jagd, etc..

Dazu kommen die Waldbewirtschaftung direkt/indirekt unterstützende Prozesse, sei es, dass sie erforderliche Informationen bereitstellen (z.B. Landkarten (topographisch, thematisch, z.B. Baumarten, Altersklassen, etc.), heute überwiegend digital, Datenerfassungen (Boden-, Vegetations-, Bestandes-, Standortskartierung, Erfassung von Klimadaten, hydrologischen Daten, etc.), terrestrisch, mittels Drohne, Flugzeug oder Satelliten, etc. Datenbanken, Forschung und Lehre), sei es, dass sie die technischen Voraussetzungen dafür bereitstellen, diese Informationen aufzubereiten, miteinander zu kombinieren, in geeigneter Form zu visualisieren, zu bearbeiten, zu nutzen, auszuwerten, zu übermitteln sowie die Kommunikation zu gewährleisten.

Über die gezielte Datenerfassung anlässlich verschiedener Inventuren hinaus, werden insbesondere bei der Holzbereitstellung mit modernen, computergesteuerten Forstmaschinen automatisiert Daten unterschiedlicher Kategorien erhoben (Geolokationen, Waldeigentümer, Holzdaten, Maschinendaten, etc.). Das eröffnet neue Möglichkeiten, diese zielführend zu verarbeiten und einzusetzen:

DIREKTE MESSUNG DER HOLZDATEN MIT SENSOREN AN HARVESTERAGGREGATEN

Harvesteraggregate/Prozessoren messen den Stammdurchmesser mit Sensoren in den Entastungsmessern oder Vorschubwalzen, die Länge mit einem Messrad [98]. Die Baumart wird vom Maschinenführer eingegeben. Auf Grundlage statistischer Durchschnittswerte der Stammkurven und der Rindenstärke errechnet der Bordcomputer daraus die Holzmasse [99]. Er speichert die jeweiligen Holzdaten, Maschinendaten und Geopositionen im de facto standardisierten Format StanForD [158, 159]. Harvesteraggregate sind nicht eichbar und müssen regelmäßig kalibriert werden. Aufgrund von Messungenauigkeiten und Abweichungen der unterstellten statistischen Werte von den tatsächlichen Maßen der Bäume sind die von ihnen automatisiert ermittelten Holzdaten, insbesondere die Holzmasse, nur als Schätzwerte zu betrachten [99]. Dazu weisen die vom Harvester automatisiert ermittelten Geopositionen sehr starke Schwankungen ihrer Genauigkeit auf. Zur intelligenten Prozesssteuerung der Holzernte und -logistik sowie für den Holzverkauf sind beide aber hinreichend genau. Flottenmanagementprogramme der verschiedenen Hersteller moderner Forstmaschinen nutzen dies bereits für die Holzernte und, in Verbindung mit den Maschinendaten, für die vorausschauende Wartung der Maschinen. Zur Abrechnung des gekauften Holzes können die Holzdaten dann mit den präzisen Maßen der geeichten Werkseingangsvermessung des Holzkäufers² korrigiert werden. Zusätzlich können auf ihrer Grundlage CO₂-Bilanzen bis auf Ebene der einzelnen Stämme-/Stammabschnitte erstellt und alle Prozesse/ die Holzbereitstellungskette insgesamt umfassend optimiert werden [129]. Bisher werden die vom Harvester automatisiert ermittelten Holzdaten und Geopositionen verworfen. Das Holz wird nach dem Rücken erneut manuell aufgenommen und eine Holzliste erstellt [158]. Dies ist personal- und

¹ CO₂ForIT – KWF 2030

² Sägewerk, Furnierwerk, Hersteller von Parkett, Fässern, Span- oder Faserplatten, Zellulosewerk, Papierfabrik, Hackschnitzelheizung, etc.

zeitaufwendig. Die manuelle Messung der Holzdaten ist zudem weniger genau als das Harvestermaß. Dasselbe gilt meist für die Ermittlung der Geopositionen der Polter mit dem Notebook des Revierleiters.

Von Harvestern gemessene Holzdaten und Geopositionen wurden als Referenzdaten für ALS³-basierte Waldinventuren verwendet [100]. Um aus den Stammlängen die Baumhöhen ableiten zu können werden neue Algorithmen entwickelt [101]. Diese sollen Harvester-basierte Inventuren und Analysen durch Integration mit traditionellen Inventur- und Forstwirtschaftsdaten erleichtern.

ÜBERTRAGUNG DER HOLZDATEN, EINES TEILS DER MASCHINENDATEN UND DER JEWELIGEN GEOLOKATIONEN SOWIE DEREN AGGREGATION ENTLANG DER HOLZBEREITSTELLUNGSKETTE

Die Holzbereitstellungskette umfasst den Einschlag der Bäume, ihre Aufarbeitung zu marktfähigen Sortimenten, das Rücken und Poltern des Holzes, getrennt nach Sortimenten, den Holzverkauf und die Holzabfuhr. Die vom Harvester automatisiert erfassten Holzdaten und Geolokationen, sowie die zur Berechnung der CO₂-Bilanzen erforderlichen Maschinendaten, sollen jeweils unmittelbar zum Forwarder, zum Polter, zum Holzverkauf, an den Käufer und zum Holz-LKW übertragen werden. Dabei sollen sie zu Poltern, Losen und Holzlisten aggregiert und jeweils mit ihrer neuen Geolokation verbunden werden. Gelingt es, dies alles umzusetzen, kann ihr Potential erst ausgeschöpft werden, z.B. um die gesamte Holzbereitstellungskette umfassend zu steuern und zu optimieren. Nachvollziehbare CO₂-Bilanzen ermöglichen erstmals, die Waldökologie und Nachhaltigkeit in diese umfassende Optimierung miteinzubeziehen und dies zweifelsfrei nachzuweisen. Zudem können Verwaltungsvorgänge vereinfacht und die Daten z.B. in die Naturalbuchführung eingepflegt werden, um diese immer aktuell zu halten. Auch über ein entsprechendes Fortschreiben der Forsteinrichtungswerke wird bereits nachgedacht. In Verbindung mit von den Holz-LKW automatisiert erfassten Wegedaten wird aktuell an einem System zur intelligenten Steuerung der Holzlogistik mit „grüner“ Routenwahl gearbeitet⁴.

Im Anhalt an die Konzepte von Industrie 4.0 werden aktuell die technischen Voraussetzungen geschaffen zur digitalen Vernetzung aller Stakeholder der Holzbereitstellungskette:

- Eine leistungsfähige, sichere und vertrauenswürdige Datenbasis
- Die Vernetzung der beteiligten Organisationen, Personen und Maschinen (mittels Digitaler Zwillinge (DZ)⁵ im Internet der Dinge (IoT))
- Die sichere, eindeutige und vollständige Datenübertragung (zwischen den DZ und zur Datenbasis)
- Die Aggregation der Holzdaten zu Poltern, Losen und Holzlisten
- Ihre Verknüpfung mit der jeweils veränderten Geoposition
- Sensoren auf Maschinen, Geräten (incl. der „smarten“ Motorsägen!) und ggf. an Personen:
 - Zur zweifelsfreien Detektion jedes einzelnen Stammes/Stammabschnitts/Polters Energieholz
 - Zur präzisen Ermittlung seiner jeweiligen Geoposition
 - Bei (motor-) manuellen Arbeiten zusätzlich zur Ermittlung unterschiedlicher Belastungen des arbeitenden Menschen
- Korrekturmöglichkeiten für die Maschinenführer und Änderungsmöglichkeiten für den Holzverkauf
- Erstellung von CO₂-Bilanzen insgesamt und auf Ebene der einzelnen Stämme/Stammabschnitte
- „Grüne“ Routenwahl für die Holzabfuhr mit LKW.

³ Airborne Laser Scanning ALS

⁴ <https://www.kwh40.de/co2for-it/>

⁵ https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/online-fachforum-standards-und-richtlinien-fuer-digitale-zwillinge-kretschmar.pdf?__blob=publicationFile

AUSLESEN INDIVIDUELLER ID-CODES DER STAMMABSCHNITTE AN HARVESTERAGGREGATEN, PROZESSOREN UND EINHEITEN DER RÜCKEYTECHNIK

Sensoren in den Aggregaten und Maschinen erfassen Holz- und Maschinendaten sowie Geopositionen. Es wurde versucht, zusätzlich die Holzdichte [105] oder eine Kombination mehrerer Qualitätsparameter zu erfassen, daraus einen Qualitätsindex zu errechnen [106] und damit das Holz, zusätzlich zu Baumart, Güte und Dimensionen, nach seiner Eignung für definierte Verwendungen zu sortieren [65]. Um den bereitgestellten Stämmen/Stammabschnitten die von/über sie jeweils erfassten Daten korrekt zuordnen zu können, muss jeder einzelne von ihnen eindeutig identifiziert und im Verlauf der Holzbereitstellungskette mehrfach zweifelsfrei re-identifiziert werden [73]. Aktive Identifizierungstechnologien beruhen auf der Markierung des Rohholzes, passive auf verschiedenen Strukturmerkmalen des Holzes selbst [109]. In das Harvesteraggregat lassen sich kostengünstige und robuste visuelle Systeme integrieren, z. B. das Einstanzen oder Aufsprühen von Markierungen, [107, 108]. Diese sollen dann vom Forwarder, Holz-LKW und im Sägewerk automatisiert optisch ausgelesen, in individuelle ID-Codes umgewandelt, die Daten übermittelt und in der Datenbasis gespeichert werden. Für das angestrebte durchgängig automatisierte Verfahren sind aktuell noch nicht alle technischen Probleme gelöst.

RFID-TAGS ZUR IDENTIFIKATION DES RUNDHOLZES MIT SENSOREN AN DEN FORSTMASCHINEN, HOLZ-LKWS UND IM SÄGEWERK

In mehreren Forschungsprojekten wurden Harvesteraggregate mit Zusatzgeräten ausgestattet, um RFID-Tags an den Stammabschnitten anzubringen [64-85]. In einem Bergwald wurden Bäume mit RFID-Tags markiert, motor-manuell gefällt, mit Seilkran vorgerückt und mit einem Prozessor aufgearbeitet. Die RFID-Tags wurden mit Sensoren an der Laufkatze des Seilkrans und am Prozessor ausgelesen. Zusätzliche Sensoren am Prozessor erfassten automatisch die Qualität und die Holzdichte der aufgearbeiteten Stammabschnitte. Diese Daten sowie der Bezug zum ursprünglichen Baum wurden codiert, in einem neuen RFID-Tag abgelegt und dieser vom Prozessor an jedem Stammabschnitt angebracht. Mittels der zusätzlich erhobenen Daten wurden die Stammabschnitte anschließend getrennt nach ihrer vorgesehenen Verwendung gepoltiert. Das Verfahren verursachte keine höheren Erntekosten, als gewöhnliche Seilkran-Hiebe [65]. Ein praxisreifes, patentiertes Verfahren mit sich im Zellulosebrei rückstandslos auflösender Befestigung der RFID-Tags und einem System zu ihrer mehrfachen Wiederverwendung wurde von der Holzwirtschaft nicht angenommen [81-85].

Im Jahr 2024 in Österreich eingeführte Markierungsplättchen mit integriertem RFID-Tag werden aktuell eingesetzt, um eine durchgängig automatisierte Holzbereitstellungskette umzusetzen (CO2For-IT). Praxisversuche, die mit einem Sensor am Ausleger des Forwarders/Kran des Holz-LKW auszulesen, verliefen vielversprechend. Eine wissenschaftliche Veröffentlichung dazu ist in Vorbereitung.

Insgesamt sind die Verfahren mit RFID-Tags robust und zuverlässig. Noch sind die o.g. Markierungsplättchen mit integriertem RFID-Tag erheblich teurer als die üblichen Markierungsplättchen. Bei Anwendung in Masse sind marginale Kosten der Tags und eine erhebliche Effizienzsteigerung der Holzbereitstellung zu erwarten [129].

BIOMETRISCHE IDENTIFIKATION DES RUNDHOLZES MIT SENSOREN AN DEN FORSTMASCHINEN UND IM SÄGEWERK

Projekte zur Erstellung biometrischer Fingerabdrücke der Schnittflächen des Rundholzes haben vielversprechende Ergebnisse erzielt. Dazu werden diese z.B. unmittelbar nach dem Trennschnitt im Harvesteraggregat, im Polter und an der Kappsäge vor der Sortieranlage des Sägewerks aufgenommen. Die Bilder werden digital analysiert, die Ergebnisse als eindeutige Codes mit geringem Datenvolumen dargestellt. Je nach Verfahren und äußereren Bedingungen wird eine hohe bis sehr hohe Wiedererkennungsrate erreicht. [138-139] Das Problem der Degradation der Schnittflächen bei längerer Lagerung im Wald sollte durch eine feinere Steuerung der Kappsäge gelöst werden können.

NACHHALTIGE UND LEGALE HERKUNFT DES HOLZES, BLOCKCHAIN UND SMART CONTRACTS

Der Nachweis der Nachhaltigkeit und der legalen Herkunft des bereitgestellten/gehandelten Holzes erfordert Technologien zu seiner Rückverfolgung. Ein digitaler Informationsfluss, zukünftig vom Wald bis zum Endprodukt, erfordert Technologien zur Datenübertragung und Vernetzung. Ist dieser gegeben, ermöglicht er ein umfassendes Monitoring, das Erstellen von CO₂-Bilanzen und eine gesamtheitliche Optimierung aller Prozesse, verfahrenstechnisch, ökonomisch und ökologisch. Um dies auch in abgelegenen Gebieten ohne Internetverbindung und Mobilfunknetz zu erreichen, wird aktuell die Blockchain als geeignete Technologie betrachtet. Hierbei handelt es sich um ein verbundenes Datenbank- und Hauptbuch-System, das alle Transaktionen in verschlüsselten, in sich abgeschlossenen Paketen speichert. Das Aneinanderreihen dieser Pakete ergibt eine nachprüfbare Aufzeichnung [141-148]. Die Blockchain und „Smart Contracts“, ursprünglich entwickelt für Kryptowährungen, könnten die Grundlage bilden für Systeme zum überprüfbaren Nachweis der Nachhaltigkeit und der legalen Herkunft des Holzes und zur Rechtsdurchsetzung im Falle illegal geschlagenen und/oder gehandelten Holzes [141].

AKTIVITÄTSERKENNUNG AUF GRUNDLAGE DER JEWELIGEN GEOLOKATION

Die technischen Manipulationen (Fällen, Aufarbeiten) des Rohholzes sollen zukünftig durch Sensoren erfasst und aus den Maschinen- und Holzdaten der Forstmaschinen bzw. der „smartten“ Motorsäge ausgelesen werden. Zur Erfassung seiner räumlichen Manipulationen (Vorrücken, Rücken, Abfuhr) werden Technologien zu seiner Verfolgung mit Ortungssystemen auf Grundlage globaler Satellitennavigation (GNSS) kombiniert. Deren Präzision kann durch Lage- und Bewegungssensoren in den Forstmaschinen und deren Auslegern erhöht werden [154]. Derartige Ortungssysteme können nicht nur die Bewegungen von Maschinen erkennen [150-155], sondern auch sichere Arbeitsbereiche innerhalb dynamischer Umgebungen definieren. Dazu müssen sie komplexe, ortsbezogene Funktionen mehrerer, sich bewegender Ressourcen in Echtzeit erfassen, verarbeiten und visualisieren, um das Situationsbewusstsein der arbeitenden Menschen und ihre Sicherheit zu verbessern [156, 157].

Noch ungelöst ist die erhebliche Beeinträchtigung der Satellitennavigation durch Relief und Kronendach [155]. Die Genauigkeit differentiell korrigierter GNSS-Positionierung des Harvesteraggregats kann unter einem Meter liegen, aber auch über zehn Meter! Sobald dieses Problem gelöst ist, sollen Inventuren via Fernerkundung selbst eine exakte Hiebsplanung auf Einzelbaumebene und eine intelligente Gerätesteuerung ermöglichen (sic!). Forstmaschinen könnten zukünftig automatisiert auch Bestandesparameter erfassen, z.B. Vorrat, Zuwachs, Verjüngung, Bestandes- und Bodenschäden usw., jeweils vor und nach der Holzernte [158].

Bei aller Begeisterung für all die technischen Möglichkeiten, erteilt der Autor den genannten Überlegungen, das Auszeichnen oder gar „eine exakte Hiebsplanung auf Einzelbaumebene“ ausschließlich digital zu vollziehen, eine entschiedene Absage: Da es die Bestandesentwicklung über Jahrzehnte hinweg steuert, ist das Auszeichnen die zentrale waldbauliche Tätigkeit des Forstmanns. Es muss unbedingt draußen im Wald erfolgen, um dabei jeden

Zukunftsbaum und seine Bedränger einzeln ansprechen zu können! Werden die Zukunftsäume und/oder die zu entnehmenden Bäume dabei digital markiert, am besten in dem bereits zuvor erstellten Digitalen Zwilling des Bestandes, so ist das sicherlich der Königsweg.

AKTIVITÄTERKENNUNG AUF GRUNDLAGE VON TRAGBAREN SENSOREN

Beschleunigungsmesser und andere Sensoren in Smartphones, Smartwatches oder anderen mobilen und IoT-Geräten können manuell und motormanuell ausgeführte Tätigkeiten, aber auch durch diese verursachte Belastungen des arbeitenden Menschen, in Echtzeit erfassen. Beispiele für vorwiegend manuelle Arbeiten im Wald finden sich bei der Bestandesbegründung incl. Wildschutz, dem Bau von Jagdeinrichtungen, der Kultur- und Jungbestandspflege, dem Wegebau und der Wegeunterhaltung. Zusätzlich zu Verfahrenstechnik, Ökonomie und Ökologie werden durch tragbare Sensoren auch die Arbeitssicherheit und Ergonomie einer objektiven Erfassung und Optimierung zugänglich [160, 167, 168]. Ihre Daten werden wiederum sinnvoll mit Fernerkundungs- und von Maschinen erfassten Daten sowie den wechselnden Geolokationen zusammengeführt. Gestützt auf eine solide Datenbasis können exakte Modelle der (motor-) manuellen Tätigkeiten entwickelt und zur Planung, Kalkulation und zum Monitoring eingesetzt werden [161-165]. Integriert man die Aktivitätserkennung in Echtzeit der arbeitenden Menschen und der Maschinen mit ihrer Vernetzung in gemeinsamen Datenbanken, so ermöglicht dies nicht nur ein umfassendes Monitoring und eine entsprechend umfassende Optimierung, sondern auch eine wesentliche Verbesserung der Arbeitssicherheit. Bereits prototypisch umgesetzt ist z.B. die Warnung des Harvesterfahrers mit Visualisierung in Virtual Reality, wenn sich eine Person seinem Gefahrenbereich nähert, in ihn eindringt, oder sich darin befindet.

Smartphones und Smartwatches können heute RFID- und NFC-Tags auslesen, über GNSS die Geolokation bestimmen und die Daten über Apps speichern. Dies erleichtert u.a. die Verfolgung motormanuell aufgearbeiteten Rohholzes [161]. Um automatisiert erfasste Datensätze mit Hilfe der künstlichen Intelligenz auszuwerten, stehen Methoden des maschinellen Lernens wie Random Forests, künstliche neuronale Netzwerke und Deep Learning zur Verfügung. Die Nutzung der bestehenden Funknetzwerke oder neu entstehender Datensatellitennetze erweitert zukünftig den Handlungsspielraum [150-168]. Wird dabei sorgfältig auf den Schutz und die Sicherheit personenbezogener Daten geachtet, steht einer positiven Entwicklung nichts im Wege.

WISSENSLÜCKEN UND SICH ABZEICHNENDE CHANCEN

Die aktuell oder in naher Zukunft verfügbaren digitalen Technologien und Verfahren für exakte Inventuren, Planungen, (motor-) manuell ausgeführte Walddarbeiten, die lückenlose Verfolgung des Rohholzes entlang seiner gesamten Bereitstellungskette und der dazu erforderliche sichere Austausch von Daten, lassen technisch den Aufbau differenzierter, bis zu Ende gedachter Systeme zu. Diese können ohne Weiteres auf einer über die Organisationsgrenzen aller Beteiligten hinweg einheitlichen Datenbasis aufbauen. Blockchain kann es erleichtern, darin die Sicherheit und Vertrauenswürdigkeit der Datenübertragung und Datenhaltung zu garantieren [167-168]. Hindernisse, die ihre Einführung verhindern, liegen eher an den Befindlichkeiten und dem ausgeprägten gegenseitigen Misstrauen des ungemein heterogenen „Clusters Wald und Holz“.

Aktuell liegen vergleichsweise wenige Forschungsergebnisse vor zur Verbesserung der betrieblichen Effizienz und der Nachhaltigkeit durch den Einsatz digitaler Technologien in der forstlichen Praxis. Keefe et al. [3] halten eine deutliche Verlagerung der Forschung für erforderlich, von der Entwicklung und Evaluierung von Verfahren zur Datenerfassung und zur Fernerkundung hin zur Nutzung der in Inventuren und den forstlichen Prozessen selbst erfassten Daten bei ihrer Planung und Durchführung. Im Anhalt an sie schlägt der Autor folgende **Prioritäten** vor, um die Datenverwertung aus forstlichen Prozessen voranzutreiben:

- Optimierung der Waldinventuren
- Optimierung der forstlichen Planungen
- Optimierung der Holzbereitstellung.

Spezifische Vorgaben, seien sie ökologisch, waldbaulich, oder vom Holzmarkt bestimmt, erfordern eine angemessene Wahl unterschiedlicher Technologien, Verfahren oder Zeitpunkte für dieselbe Maßnahme, evtl. auch „nur“ einen anderen Verlauf der Feinerschließung. GIS bzw. GNSS kann zur Feinplanung von Rückegassen, Seiltrassen und Polterplätzen, oder zur Einrichtung intelligenter Holzlagerplätze oder Nasslager eingesetzt werden [6, 165, 170]. Sind die Bestände bereits auf Ebene des Einzelbaumes digital erfasst, so lassen sich Maßnahmen präzise planen, kalkulieren und steuern. Jeder einzelne Baum ist dann ein Referenzpunkt für die Forstmaschinen bzw. für den Forstwirt. Ist noch kein „digitaler Bestand“ erstellt, so ermöglicht die oben beschriebene automatisierte Erfassung und Übertragung der Holzdaten und Geolokationen durch Forstmaschinen, smarte Motorsägen und/oder tragbare Sensorsysteme entlang der Holzbereitstellungskette deren umfassende Überwachung, Steuerung und Optimierung, die lückenlose Verfolgung des Rohholzes und die Erstellung detaillierter CO₂-Bilanzen.

- Einbeziehung hochauflösender Karten, der Holzpreise und der Erntekosten in die Planung der Holzbereitstellung

Hochauflösende Karten vermitteln eine genaue Kenntnis der exakten Lage und Verteilung der Baumarten, ihrer Dimensionen und, mit Einschränkungen, ihrer Qualitäten. Daraus wir erhofft, ihre Sortimentsaufteilung und die voraussichtlichen Erntekosten in hinreichender Genauigkeit schätzen und ihre räumliche Ordnung und Erschließung bis hin zur Feinerschließung exakt planen zu können. In Abhängigkeit von Jahreszeit und Witterung, Markt-anforderungen, Holzpreis und der verfügbaren Arbeitskapazität kann man die Sortimentsausformung und den besten Zeitrahmen für die Holzernte und -Abfuhr festlegen. In wenig oder nicht erschlossenen Gebieten ermöglicht das konsequente Ausschöpfen dieser Informationen eine weitgehende Optimierung der Planung, des Voll-zugs und des Ertrags der Holzernte.

- Digitale Unterstützung waldbaulicher Verfahren

Im Zuge des Klimawandels sollen fremdländische Baumarten in unsere Wälder integriert werden, zu deren waldbaulicher Behandlung noch keine Erfahrungen vorliegen. Zudem sehen sich viele Länder mit vorherrschender Plantagen-Forstwirtschaft oder der großflächigen Ausbeutung weitgehend natürlicher Wälder vor die Notwendigkeit gestellt, den nach Standorten wie waldbaulichen Verfahren fein differenzierten, pfleglichen und vor allem nachhaltigen, Waldbau der DACH-Länder und deren unmittelbarer Nachbarn zu erlernen und auf ihn umzustellen. Vor allem für die Naturverjüngung von Mischbeständen, die sich bis zu sechs Jahrzehnte lang mit der Holzernte überlappt, und den Aufbau sowie die Pflege ungleichaltriger (Dauer-) Wälder erlauben es digitale Daten, die gezielte, räumliche wie zeitliche Steuerung der Anteile und der Verteilung der Baumarten vorab zu modellieren. In vom Menschen bisher wenig beeinflussten Wäldern mit hoher Baumartenvielfalt, wie z.B. in den USA, können anhand digitaler Bestandsdaten aus der Fernerkundung die zur Holzernte in Frage kommenden Baumarten auf Grundlage ihrer Geolokationen und Verteilung, Brusthöhendurchmesser, Höhe, Kronenmaße und ihres Stand-raums nun vorherbestimmt und alle Maßnahmen daran angepasst werden. Selbst ökologische Parameter wie die Topographie und die Lichtabsorption der Baumarten in Verbindung mit dem Mikroklima des Waldes können nun in Modellierungen eingehen, um sowohl „intelligente“ waldbauliche Verfahren als auch die bestmöglich daran angepassten Technologien zur Holzernte und Holzabfuhr zu berücksichtigen. Bei uns war das bisher der ökologischen und waldbaulichen Kompetenz und Erfahrung des Forsteinrichters, Forstamtsleiters und Revierleiters vorbehalten. In den o.g. Ländern blieb es i.d.R. unberücksichtigt.

Es sei erneut dringend davor gewarnt, sich von einer erheblich verbesserten Informationsgrundlage dazu verleiten zu lassen, Entscheidungsprozesse zu automatisieren. Umfangreiche, hochwertige Datensätze, Auswertungsalgorithmen und Modellierungen sind mächtige Werkzeuge und damit sehr wertvolle Entscheidungshilfen. Trotz ihrer hervorragenden Leistungsfähigkeit sind aber auch sie nur Werkzeuge. Wichtige Entscheidungen kann und muss allein der Mensch treffen. Dazu muss er ggf. all seine Kompetenzen und Erfahrungen einsetzen - und sie in aller Konsequenz verantworten!

- Maschinennavigation für eine verbesserte Automatisierung und Robotik

Bei der Erforschung von SLAM-Methoden (Simultaneous Localization and Mapping) zur Automatisierung der Maschinensteuerung und Robotik wird davon ausgegangen, dass die exakte Geoposition der Stämme zu Beginn der Arbeiten nicht bekannt ist. Die ITD-Fernerkundung (Individual Tree Detection) und das Vorliegen digitaler Karten vor Beginn der Arbeiten vereinfachen die Verarbeitung von Navigationsalgorithmen. Durch den Ortungsvorgang zur Maschinensteuerung wird es einfacher, Strukturen erkannter Bäume (durch an der Forstmaschine montierte LiDAR-, Bildverarbeitungs- oder andere Sensoren) mit einer vorhandenen Karte abzugleichen. Das verbessert die Positionsgenauigkeit des Baumes oder ist ein besserer Ersatz für die GNSS-basierte Ortung der Maschine und/oder des Aggregats. Statt sich auf weit entfernte, sich bewegende Satelliten zu verlassen, wird der Wald selbst zu einer leistungsstarken Konstellation fester Referenzpunkte, die für die Dauer der Umtriebszeit an derselben Stelle verbleiben. Statt nur Interferenzen und Mehrwegabweichungen zu verursachen, werden die Bäume so zu wertvollen Geolokalisierungspunkten zur präzisen Steuerung von Maschinen bis zu Robotern.

- Übermittlung und Korrektur des jeweiligen Standorts vom stehenden Baum bis zum Werk

Für die Aufarbeitung von Kurzholz wurde bereits RFID-Technologie in das Harvesteraggregat integriert. Ein RFID-Tag, der in Brusthöhe am stehenden Baum angebracht wurde, könnte nach der Fällung im Erdstammstück verbleiben, automatisiert ausgelesen und über die gesamte Holzbereitstellungskette hinweg verfolgt werden. Die von dem ursprünglichen Baumstamm abgetrennten Stammabschnitte werden jedoch von der im RFID-Tag am Erdstammstück gespeicherten Information abgekoppelt. Um diese Stammabschnitte verfolgen zu können, muss das Harvesteraggregat/der Prozessor zu ihrer Identifizierung beitragen. Entweder erfasst es/er dazu den biometrischen Fingerabdruck des Trennschnitts zu dem jeweils nachfolgenden Stammabschnitt, oder es/er bringt Markierungen daran an, am besten zusätzliche RFID-Tags. In beiden Fällen muss es/er diesem eine eindeutige ID, die Geoposition und die ID des ursprünglichen Baumes sowie seine eigene aktuelle Geoposition zuordnen. Das automatische Anbringen kostengünstiger Markierungen wie z.B. Barcodes, QR-Codes, oder RFID durch das Harvesteraggregat ist deshalb ein wichtiger Entwicklungsbereich [65].

Werden die Bäume erst nach dem Rücken hochmechanisiert zu Kurzholz aufgearbeitet, müssen sowohl die zum Holzrücken eingesetzte Technik als auch der Prozessor an der Anlandestation dazu in der Lage sein, die Holzdaten und die ursprünglichen Geopositionen der Ganzbäume zu erfassen. Der Prozessor muss diese Daten darüber hinaus auf alle von ihm aufgearbeiteten Stammabschnitte übertragen, jeweils durch ihre eigenen Daten ergänzen und ihnen eine neue ID zuordnen. Zur vollständigen Automatisierung und Digitalisierung sollten sowohl der Skidder, der Forwarder, oder die Laufkatze des Seilkrans, als auch der Holz-LKW und ggf. die Maschinen zu seiner Entladung am Werkseingang die ID und den Datensatz jedes einzelnen Stammabschnitts erfassen können. Dann ist jederzeit nachvollziehbar und nachweisbar, wo sich jeder einzelne Stammabschnitt im Wald, auf den Transportwegen und im Werk gerade befindet [40, 73].

- Verwaltung großer Datenmengen in abgelegenen Umgebungen

Die IDs und Daten der Stämme/Stammabschnitte, identifiziert und mehrfach re-identifiziert durch automatisiert auslesbare Technologien wie z.B. RFID, unmittelbar zwischen Maschinen zu übertragen und zur Optimierung der Betriebsabläufe oder der Effizienz der Holzbereitstellungskette in Echtzeit künstliche Intelligenz (KI) einzusetzen,

erfordert eine sehr hohe Datenspeicherungs- und Datenübertragungskapazität, Verarbeitungsleistung und Netzwerkbandbreite. Im Wald sind diese Bedingungen aktuell meist nicht gegeben. Auf großer Fläche besteht dort aktuell keinerlei Netzabdeckung für Mobilfunk oder Internet. Eine funktionale Datenübertragung machine-to-machine (M2M) in abgelegenen Wäldern und die Übertragung von Daten in Echtzeit aus dem Wald via Internet in die Datenbasis müssen noch entwickelt werden [7, 9]. Datenerfassungs- und -verarbeitungssysteme in Kanada angewandter Forsttechnik funktionieren unabhängig von proprietärer Maschinенsoftware. Ihre M2M-Internetoptionen wurden bereits untersucht [7]. Die Größe der Datensätze bereits auf Ebene der Forstmaschinen sinnvoll zu reduzieren, kann dazu beitragen, den Bedarf an Netzwerkbandbreite zu verringern [9]. Die Zuverlässigkeit verschiedener Vernetzungsoptionen in der Praxis sollte empirisch erprobt werden, um die Fähigkeiten und Grenzen der Systeme in realen Umgebungen zu ermitteln. In Deutschland reicht es vorläufig aus, wenn die Edge-Devices der Maschinen und Geräte zur Holzernte täglich ausgelesen und ihre Datensätze an die Datenbasis übermittelt werden, sobald Anbindung an das Telephonnetz besteht. Hierfür bieten sich Androids an als leistungsfähige mobile Zwischenspeicher mit Internetanbindung. Die gewünschte Datenübertragung in Echtzeit aber ist aktuell ohne eine durchgängige Internetanbindung technisch (noch) nicht realisierbar.

ZUSAMMENFASSUNG

Es stehen zunehmend neue Werkzeuge aus Fernerkundung, EDV und KI für die Planung, Steuerung und das Monitoring des Waldmanagements zur Verfügung. Der Schwerpunkt der Forschung und Entwicklung sollte daher von Vorhersagealgorithmen und der Bewertung und Validierung von Fernerkundungsprodukten auf die sinnvolle Verknüpfung und operative Anwendung der erfassten Daten verlagert werden. Ob Forstwirtschaft, die Gewinnung von Trinkwasser, Umweltschutz, oder der Schutz vor Naturgefahren, auch diesbezüglich sitzen wir alle im gleichen Boot - und bekommen eine Chance mehr, uns konstruktiv miteinander zu vernetzen.

Die Kartierung individueller Bestände mittels ITD-Fernerkundung (Individual Tree Detection) erfasst die Geopositionen und Stammvolumina der stehenden Bäume bis hin zu Sortimenten. Für abgelegene Gebiete erschließen sich dadurch neue Möglichkeiten zur differenzierten Planung, Durchführung und Kontrolle waldbaulicher Maßnahmen, der Walderschließung, der Holzernte incl. ihrer Ernteeinheiten und der Holzabfuhr. Fernerkundung kann mittels Satelliten, Flugzeugen, Drohnen und/oder terrestrisch (ortsfest, auf Fahrzeugen, Maschinen und Geräten, tragbar oder „handheld“) erfolgen. Neben Kameras verschiedener Spektralbereiche stehen Radar, LiDAR, Temperatur-, Feuchtigkeits-, akustische und andere Sensoren zur Verfügung. Ausgewertet werden sie durch ausgeklügelte photogrammetrische Verfahren und Algorithmen. Die Ergebnisse können je nach Zweck und Zielgruppe in vielfacher Weise bildlich, graphisch, tabellarisch, in Texten oder mittels Virtual Reality dargestellt werden. Kombiniert man Aufnahmen desselben Gebietes/Bestandes mit unterschiedlichen Trägersystemen und/oder Sensortechniken, kann man die Auflösung/Präzision/Qualität der gewünschten Informationen gezielt steigern. Zur vollständigen Aufnahme z.B. der Brusthöhendurchmesser, Baumhöhen, Stamm- und Kronenvolumina aller Einzelbäume eines Bestandes bietet es sich bisher an, ihn sowohl terrestrisch, als auch mit einer Drohne mit LiDAR zu erfassen und die segmentierten Punktfolgen jeweils pro Einzelbaum miteinander zu verschneiden. Ganz neu steht eine Drohne zur Verfügung, die autonom im Bestand unterhalb des Kronendachs fliegen und diesen mit LiDAR erfassen kann. Aktuell (01.2026) steht dazu noch keine wissenschaftliche Veröffentlichung zur Verfügung.

Um eine durchgängige Verfolgbarkeit und Rückverfolgbarkeit jedes einzelnen Stammes/Stammabschnitts zu gewährleisten, müssen diese eindeutig identifiziert und entlang der gesamten Holzbereitstellungskette mehrfach zweifelsfrei re-identifiziert werden können. Die Markierung mit passiven RFID-Tags in einer robusten Hülle ist geeignet, um auslesbare Daten über einzelne Bäume/Stämme/Stammabschnitte längerfristig zu speichern. Forschungsprojekte versuchen die RFID-Tags nun automatisiert anzubringen und/oder auszulesen und ggf. um neue Daten zu ergänzen. Unterschiedliche Markierungen und der biometrische Fingerabdruck der Schnittflächen des Rohholzes sind weitere anwendbare Technologien zu seiner Verfolgung und Rückverfolgung.

Die Blockchain als verteilter, verifizierbarer Mechanismus bietet sich an zur Organisation des Datenraums, zur Überprüfung der Holzbereitstellungskette und für Zertifizierungen im Forst, Holzhandel und der Holzwirtschaft. Systeme zur Erkennung menschlicher wie maschineller Aktivitäten, z.B. im sicherheitsrelevanten Umfeld einer Forstmaschine, ggf. gekoppelt mit RFID oder anderen Scan- und Identifizierungsmethoden, erhöhen nicht nur signifikant die Arbeitssicherheit, sondern ermöglichen auch die Verfolgung einzelner Forstprodukte über die gesamte Holzbereitstellungskette hinweg, vom geernteten Baum bis zum Werkseingang.

Viele Komponenten, die erforderlich sind, um die Informationen und Assets der Forstwirtschaft digital miteinander zu vernetzen, sind bereits vorhanden und erprobt, wenn auch in unterschiedlicher Qualität. Um das sich aus der digitalen Vernetzung ergebende Potential tatsächlich heben zu können, gilt es nun, noch bestehende Lücken zu schließen, die Vernetzung technisch zu ermöglichen und tatsächlich in die Praxis umzusetzen.

LITERATURVERZEICHNIS

Das Literaturverzeichnis ist geordnet: 1. nach Themen, 2. nach dem Jahr der Veröffentlichung, 3. alphabetisch.

Aktuelle Arbeiten von besonderem Interesse wurden hervorgehoben als:

- Sehr wichtig
- Wichtig

- 1.● Wang, Y.; Hyppä, J.; Liang, X.; Kaartinen, H.; Yu, X.; Lindberg, E. et al. (2016)
International benchmarking of the individual tree detection methods for modeling 3-D canopy structure for silviculture and forest ecology using airborne laser scanning.
IEEE Trans Geosci Remote Sensing 2016; 54:5011–27.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2543225>
Diese Arbeit fasst die Genauigkeit verschiedener ITD-Methoden unter einer Vielzahl von Bedingungen zusammen.
This paper summarizes the accuracy of different ITD methods across a wide range of conditions.
2. Liang, X.; Hyppä, J.; Kaartinen, H.; Lehtomäki, M.; Pyörälä, J.; Pfeifer, N. et al. (2018)
International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories.
ISPRS J Photogramm Remote Sensing 2018; 144:137–79.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.06.021>.
3. Keefe, R.F.; Zimbelman, E.G.; Picchi, G. (2022)
Use of Individual Tree and Product Level Data to Improve Operational Forestry
Current Forestry Reports (2022) 8:148–165. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-022-00160-3>.
- 4.● Picchi, G. (2020)
Marking standing trees with RFID tags.
Forests. 2020; 11:150. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11020150>.
Diese Arbeit enthält eine Untersuchung der Leistung von RFID-Tags, nachdem sie an Bäumen angebracht und über einen längeren Zeitraum der Witterung ausgesetzt waren.
This paper provides an evaluation of the performance of RFID tags after being attached to trees and exposed to weather over time.
5. Feng, Y.; Audy, J-F. (2020)
Forestry 4.0: A framework for the forest supply chain toward Industry 4.0.
Gest Prod. 2020; 27: e5677. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-530X5677-20>.
- 6.● Picchio, R.; Proto, A.R.; Civitarese, V.; di Marzio, N.; Latterini, F. (2019)
Recent contributions of some fields of the electronics in development of forest operations technologies.
Electronics. 2019; 8:1465. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics8121465>.
Diese Arbeit bietet einen schönen, zusammenfassenden Überblick über eine Vielzahl aktueller elektronischer Sensoren, die in Forstbetrieben eingesetzt werden.
This paper provides a nice, summary review of a variety of current electronic sensors that are being used in forest operations.
7. Gingras, J-F.; Charette, F. (2017)
FPIInnovations' Forestry 4.0 initiative.
Proceedings of the 2017 Council on Forest Engineering Annual Meeting [Internet].
Bangor, ME, USA; 2017 [cited 250214]. Available:
http://cofe.org/files/2017_Proceedings/FPIInnovations/Gingras/Charette/Forestry4.0/forCOFE/2017.pdf. https://cofe.org/2017-conference-proceedings/pdfs/COFE_2017
8. Brown, M.; Ghaffarian, M.R.; Berry, M.; Acuna, M.; Strandgard, M.; Mitchell, R. (2020)
The progression of forest operations technology and innovation.
Aust For. 2020; 83:1–3. DOI: <https://doi.org/10.1080/00049158.2020.1723044>.
- 9.● Keefe, R.F.; Wempe, A.M.; Becker, R.M.; Zimbelman, E.G.; Nagler, E.S.; Gilbert, S.L. et al. (2019)
Positioning methods and the use of location and activity data in forests.
Forests. 2019; 10:458. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10050458>.
Diese Arbeit bietet eine allgemeine Zusammenfassung der Echtzeit-Ortung und der tragbaren und mobilen Technologien zur Unterstützung von Big-Data-Anwendungen für einzelne Bäume und Produkte in der intelligenten und präzisen Forstwirtschaft.
This paper provides a general summary of real-time positioning and wearable and mobile technologies to support individual tree and product big data applications in smart and precision forestry.

10. • Talbot, B.; Pierzchała, M.; Astrup, R. (2017) Applications of remote and proximal sensing for improved precision in forest operations. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2017; 38: 327–36. Available: <https://crojfe.com/archive/volume-38-no.2/applications-of-remote-and-proximal-sensing-for-improved-precision-in-forest-operations/>. Diese Arbeit gibt einen Überblick über die Technologien der Fern- und Naherkundung sowie über aktuelle Anwendungen zur Verbesserung der Präzision bei Forstarbeiten. This paper provides a summary of remote and proximal sensing technologies and reviews current applications for improving precision in forest operations.
11. Torresan, C.; Benito-Garzón, M.; O’Grady, M.; Robson, T.M.; Picchi, G.; Panzacchi, P. et al. (2021) A new generation of sensors and monitoring tools to support climate-smart forestry practices. *Can J For Res* [Internet]. 2021 [cited 250214]; DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0295>.
12. Hyppä, J.; Yu, X.; Hyppä, H.; Vastaranta, M.; Holopainen, M.; Kukko, A. et al. (2012) Advances in forest inventory using airborne laser scanning. *Remote Sensing* 2012; 4: 1190–207. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs4051190>.
13. Luo, L.; Zhai, Q.; Su, Y.; Ma, Q.; Kelly, M.; Guo, Q. (2018) Simple method for direct crown base height estimation of individual conifer trees using airborne LiDAR data. *Opt Express*. 2018; 26: A562–78. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.26.00A562>.
14. Ferraz, A.; Saatchi, S.; Mallet, C.; Jacquemoud, S.; Gonçalves, G.; Silva, C.A. et al. (2016) Airborne lidar estimation of aboveground forest biomass in the absence of field inventory. *Remote Sensing* 2016; 8: 653. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8080653>.
15. Kato, A.; Moskal, L.M.; Schiess, P.; Swanson, M.E.; Calhoun, D.; Stuetzle, W. (2009) Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne lidar data. *Remote Sens Environ*. 2009; 113: 1148–62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.02.010>.
16. Contreras, M.A.; Chung, W. (2013) Developing a computerized approach for optimizing individual tree removal to efficiently reduce crown fire potential. *For Ecol Manag*. 2013; 289: 219–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.09.038>.
17. Du Toit, F.; Coops, N.C.; Goodbody, T.R.H.; Stoehr, M.; El-Kassaby, Y.A. (2021) Deriving internal crown geometric features of Douglas-fir from airborne laser scanning in a realized-gain trial. *For Int Journal of Forestry Research* 2021; 94: 442–54. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa046>.
18. Trochta, J.; Krůček, M.; Vrška, T.; Král, K. (2017) 3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR. *PLoS One*. 2017; 12: e0176871. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176871>.
19. • Calders, K.; Adams, J.; Armston, J.; Bartholomeus, H.; Bauwens, S.; Bentley, L.P. et al. (2020) Terrestrial laser scanning in forest ecology: Expanding the horizon. *Remote Sens Environ*. 2020; 251: 112102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112102>. Diese Arbeit beschreibt aktuelle Fortschritte in der terrestrischen Erfassung von Beständen mit LiDAR und deren Auswertung und erörtert unterschiedliche Anwendungen dieser Daten in der Forstvermessung und -verwaltung. This paper describes recent advances in TLS technology and data processing and discusses a variety of applications of TLS ITD data in forest measurement and management.
20. Lecigne, B.; Delagrange, S.; Taugourdeau, O. (2021) Annual shoot segmentation and physiological age classification from TLS data in trees with acrotonic growth. *Forests*. 2021; 12: 391. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12040391>.
21. Xi, Z.; Hopkinson, C.; Chasmer, L. (2018) Filtering stems and branches from terrestrial laser scanning point clouds using deep 3-D fully convolutional networks. *Remote Sensing* 2018; 10: 1215. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10081215>.
22. Halupka, K.; Garnavi, R.; Moore, S. (2029) Deep semantic instance segmentation of tree-like structures using synthetic data. Proceedings of the 2019 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). Waikoloa, HI, USA: IEEE; 2019. p. 1713–22. DOI: <https://doi.org/10.1109/WACV.2019.00187>.

23. • Kellner, J.R.; Armston, J.; Birrer, M.; Cushman, K.C.; Duncanson, L.; Eck, C. et al. (2019) New opportunities for forest remote sensing through ultra-high-density drone lidar. *Surv Geophys.* 2019; 40: 959–77. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09529-9>.
Diese Arbeit bietet eine eingehende Beschreibung der technischen Überlegungen zur Fernerkundung mit Drohnen, stellt eine Fallstudie zur Veranschaulichung des Potenzials von Drohnen-Lidar vor und fasst vielversprechende Möglichkeiten für die drohnengestützte Fernerkundung von Wäldern zusammen.
This paper provides a thorough description of the technical considerations for drone remote sensing, presents a case study illustrating the potential for drone lidar, and summarizes promising opportunities for drone-based forest remote sensing.
24. Fernández-Álvarez, M.; Armesto, J.; Picos, J. (2019) LiDAR-based wildfire prevention in WUI: The automatic detection, measurement and evaluation of forest fuels. *Forests.* 2019; 10: 148. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10020148>.
25. Dash, J.P.; Watt, M.S.; Paul, T.S.H.; Morgenroth, J.; Pearse, G.D. (2019) Early detection of invasive exotic trees using UAV and manned aircraft multispectral and LiDAR data. *Remote Sensing.* 2019; 11: 1812. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11151812>.
26. Puliti, S.; Breidenbach, J.; Astrup, R. (2020) Estimation of forest growing stock volume with UAV laser scanning data: Can it be done without field data? *Remote Sensing* 2020; 12: 1245. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12081245>.
27. Hyppä, E.; Hyppä, J.; Hakala, T.; Kukko, A.; Wulder, M.A.; White, J.C. et al. (2020) Under-canopy UAV laser scanning for accurate forest field measurements. *ISPRS J Photogramm Remote Sensing* 2020; 164: 41–60.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.03.021>.
28. • Igihaut, J.; Cabo, C.; Puliti, S.; Piermattei, L.; O'Connor, J.; Rosette, J. (2019) Structure from Motion photogrammetry in forestry: A review. *Curr For Rep.* 2019; 5: 155–68. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725019-00094-3>.
In dieser Arbeit werden die technischen Prinzipien des SfM vorgestellt und die Anwendungen des SfM in der Forstwirtschaft sowohl aus der Luft als auch auf dem Boden untersucht.
This paper presents the technical principals of SfM and reviews both the aerial and terrestrial applications of SfM in forestry.
29. Hartley, R.J.L.; Leonardo, E.M.; Massam, P.; Watt, M.S.; Estarija, H.J.; Wright, L. et al. (2020) An assessment of high-density UAV point clouds for the measurement of young forestry trials. *Remote Sensing* 2020; 12: 4039. <https://doi.org/10.3390/rs12244039>.
30. Marzulli, M.I.; Raumonen, P.; Greco, R.; Persia, M.; Tartarino, P. (2020) Estimating tree stem diameters and volume from smartphone photogrammetric point clouds. *For Int Journal of Forestry Research* 2020; 93: 411–29. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz067>.
31. Tang, J.; Chen, Y.; Kukko, A.; Kaartinen, H.; Jaakkola, A.; Khoramshahi, E. et al. (2015) SLAM-aided stem mapping for forest inventory with small-footprint mobile LiDAR. *Forests.* 2015; 6:4588606. DOI: <https://doi.org/10.3390/f6124390>.
32. Nevalainen, P.; Li, Q.; Melkas, T.; Riekki, K.; Westerlund, T.; Heikkonen, J. (2020) Navigation and mapping in forest environment using sparse point clouds. *Remote Sensing* 2020; 12:4088. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12244088>.
33. Aalmo, G.O.; Kerstens, P.J.; Belbo, H.; Bogetoft, P.; Talbot, B.; Strange, N. (2021) Efficiency drivers in harvesting operations in mixed Boreal Stands: A Norwegian case study. *International Journal of Forest Engineering* 32(supl): 74-86.
DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2020.1778980>.
34. • Müller, F.; Jaeger, D.; Hanewinkel, M. (2019) Digitization in wood supply – A review on how Industry 4.0 will change the forest value chain. *Comput Electron Agric.* 2019; 162: 206–18. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.002>.
Diese Arbeit bietet eine nützliche aktuelle Zusammenfassung der Konzepte der Forstwirtschaft 4.0 und ihrer Auswirkungen auf die betrieblichen Lieferketten der Forstwirtschaft.
This paper provides a useful recent summary of Forestry 4.0 concepts and their implications for operational forestry supply chains.

35. Taylor, R.; Davis, C.; Brandt, J.; Parker, M.; Stäuble, T.; Said, Z. (2020) The rise of big data and supporting technologies in keeping watch on the world's forests. *Int For Rev.* 2020; 22:129–41. DOI: <https://doi.org/10.1505/146554820829523880>.
36. Billingsley, J.; Visala, A.; Dunn, M. (2008) Robotics in agriculture and forestry. In: Siciliano B, Khatib O, editors. *Springer Handbook of Robotics*. Berlin: Springer-Verlag; 2008. p. 1065–77. DOI: [10.1007/978-3-540-30301-5_47](https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_47).
37. Miettinen, M.; Kulovesi, J.; Kalmari, J.; Visala, A. (2010) New measurement concept for forest harvester head. In: Howard A, Iagnemma K, Kelly A, editors. *Field and service robotics*. Berlin: Springer; 2010. p. 35–44. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-13408-1_4.
38. Rodrigues, C.K.; da Silva, L.E.; Pereira, A.L.N.; Sampietro, J.A. (2019) Effect of individual tree volume on operational performance of harvester processor. *Floresta*. 2019; 49:345–52. DOI: <https://doi.org/10.5380/rf.v49i2.58233>.
39. Oliveira, L.F.P.; Moreira, A.P.; Silva, M.F. (2021) Advances in forest robotics: A state-of-the-art survey. *Robotics*. 2021; 10:53. DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics10020053>.
40. Dykstra, D.P.; Kuru, G.; Taylor, R.; Nussbaum, R.; Magrath, W.; Story, J. (2002) Technologies for wood tracking: Verifying and monitoring the chain of custody and legal compliance in the timber industry [Internet]. Washington, DC, USA: World Bank/WWF Alliance for Forest Conservation and Sustainable Use; 2002 p. 88. Available: <http://awsassets.panda.org/downloads/woodtrackingreportfinal.pdf>.
41. Paluš, H.; Parobek, J.; Vlosky, R.P.; Motik, D.; Oblak, L.; Jošt, M. et al. (2018) The status of chain-of-custody certification in the countries of Central and South Europe. *Eur J Wood Prod.* 2018; 76:699–710. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1261-0>.
42. Dormontt, E.; Lowe, A. (2019) Developing DNA-based chain of custody systems for legally-sourced teak [Internet]. Canberra, Australia: Australian Centre for International Agricultural Research; 2019 p. 28. Report No.: FR2019-98. Available: https://aciar.gov.au/sites/default/files/project-page-docs/final_report_fst-2016-025.pdf.
43. Lohmann, U. (1999). Holzhandbuch (5th ed.). DRW-Verlag.
44. Wagenführ, R.; Wagenführ, A. (2022). Holzatlas (7th ed.). Hanser Verlag.
45. Speidel, G. (1952). Das Stückmassgesetz und seine Bedeutung für den internationalen Leistungsvergleich bei der Forstarbeit.
46. Morat, J.; Forbrig, A.; Graupner, J. (1998). Holzernteverfahren – Vergleichende Erhebung und Beurteilung der Holzernteverfahren in der Bundesrepublik Deutschland. KWF e.V.: KWF-Bericht 25.
47. Klugmann, K. (2006). Laufzeiten und Kosten der Motorsäge in der Holzernte. Ergebnisse einer deutschlandweiten Praxisuntersuchung. (39/2006). KWF e.V..
48. Purfürst, T.; Erler, J. (2007). Der Einfluss des Harvesterfahrers auf die Produktivität. *Forsttechnische Informationen*, 5/2007, 51–52, KWF e.V..
49. Weise, G., & Rosenbach, D. (2011). Kraftstoffverbrauch von Forstmaschinen senken. *Forsttechnische Informationen* 1+2/2011, 7–10, KWF e.V..
50. Rosenbach, D. (2012). Forstmaschinen effizient betreiben. *Forsttechnische Informationen*, 11+12/2012, 5–6, KWF e.V..
51. Hiesl, P. (2013) Productivity standards for whole-tree and cut-to-length harvesting systems in Maine [Phd, University of Maine]. Available: <https://digitalcommons.library.umaine.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3289&context=etd>.

52. HELLA KGaA Hueck & Co. (2014). Kraftstoffverbrauch von Forstmaschinen – Kosten und Umweltrelevanz. *Forsttechnische Informationen* 05+06/2024, 11, KWF e.V..
53. Hoffmann, S. (2014). Energieeffizienz forstlicher Arbeiten. *Forsttechnische Informationen*, 03+04/204(3+4/2014), 13–19, KWF e.V..
54. Savvidis, D. (2014). Presentation of vehicle energy consumption calculation Tool (VECTO). *DC Clima*, Transport and Ozone, Unit, 2.
55. Ghaffariany, M. R.; Apolit, R.; Kuehmaier, M. (2015). Analysis and control of fuel consumption rates of harvesting systems: A review of international studies. *Industry Bulletin*, 15, 1–4.
56. Wagner, T. (2017). Neue Wege der Ressourcenschonung beim Forstmaschineneinsatz zum Wohle der Umwelt und der Ökonomie. 02/2017, 10.
57. Prinz, R.; Spinelli, R.; Magagnotti, N.; Routa, J.; Asikainen, A. (2018). Modifying the settings of CTL timber harvesting machines to reduce fuel consumption and CO₂ emissions. *Journal of Cleaner Production*, 197, 208–217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.210>.
58. Jeswani, H. K.; Chilvers, A.; Azapagic, A. (2020). Environmental sustainability of biofuels: A review. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 476(2243), 20200351. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0351>.
59. Ottaviani Aalmo, G.; Kerstens, P.J.; Belbo, H.; Bogetoft, P.; Talbot, B.; Strange, N. (2021). Efficiency drivers in harvesting operations in mixed Boreal stands: A Norwegian case study. *International Journal of Forest Engineering*, 32(sup1), 74–86. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2020.1778980>.
60. Rogovskii, I.; Voinash, S.; Sokolova, V.; Krivonogova, A. (2021). Research on fuel consumption for different values of capacity factor of engine of combine harvester. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 666(3), 032093.
61. Haavikko, H.; Kärhä, K.; Poikela, A.; Korvenranta, M.; Palander, T. (2022). Fuel Consumption, Greenhouse Gas Emissions, and Energy Efficiency of Wood-Harvesting Operations: A Case Study of Stora Enso in Finland. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 43(1), 79–97. DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2022.1101>
62. Weise, G. (2022). Kraftstoffverbrauch und Leistung von Forstmaschinen im Licht der KWF-Gebrauchswertprüfungen. *Forsttechnische Informationen* 05/2022, 12–17, KWF e.V..
63. Kärhä, K.; Eliasson, L.; Kühmaier, M.; Spinelli, R. (2024). Fuel Consumption and CO₂ Emissions in Fully Mechanized Cut-to-Length (CTL) Harvesting Operations of Industrial Roundwood: A Review. *Current Forestry Reports*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-024-00219-3>.
64. Quino, J.; Maja, J.M.; Robbins, J.; Fernandez, R.T.; Owen, J.S.; Chappell, M. (2021) RFID and drones: The next generation of plant inventory. *AgriEngineering*. 2021; 3:168–81. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering3020011>.
65. • Picchi, G.; Sandak, J.; Grigolato, S.; Panzacchi, P.; Tognetti, R. (2021) Smart harvest operations and timber processing for improved forest management. In: Tognetti R, Smith M, Panzacchi P, editors. *Climate-Smart Forestry in Mountain Regions*. Springer; 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-80767-2_9.
- Einsatz von RFID-Tags plus Sensoren am Prozessor bei Holzernte im Bergwald**
66. Le, V.; Lemmer, U.; Mackensen, E. (2020) Analysis of miniaturized printed flexible RFID/NFC antennas using different carrier substrates. *IEEE J Radio Freq Identif*. 2020; 4:428–37. DOI: <https://doi.org/10.1109/JRFID.2020.3001336>.
67. Kaakkurivaara, T.; Kaakkurivaara, N. (2019) Comparison of radio frequency identification tag housings in a tropical forestry work environment. *Aust For*. 2019; 82:181–8. DOI: <https://doi.org/10.1080/00049158.2019.1678797>.

68. Kaakkurivaara, N. (2019) Possibilities of using barcode and RFID technology in Thai timber industry. *Maejo Int J Sci Technol.* 2019; 13:29–41. Available: mijst.mju.ac.th/Vol13/29-41.pdf.
69. Zhai, C.; Landers, A.; Zhang, B. (2018) An RFID-based solution for monitoring sprayer movement in an orchard/vineyard. *Precis Agric.* 2018; 19:477–96. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9531-8>.
70. • Pichler, G.; Poveda Lopez, J.A.; Picchi, G.; Nolan, E.; Kastner, M.; Stampfer, K. et al. (2017) Comparison of remote sensing based RFID and standard tree marking for timber harvesting. *Comput Electron Agric.* 2017; 140:214–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.030>.
Dieser Artikel stellt beispielhaft die Verbindung einer 3D-Kartierung des Bestandes mit der Markierung einzelner Bäume mit RFID-Tags zur Produktrückverfolgung vor.
This paper provides a joint example of 3D stand mapping coupled with RFID marking of individual trees for product tracing.
71. Marczewski, T.; Ma, Y.; Sun, W. (2016) Evaluation of RFID tags to permanently mark trees in natural populations. *Front Plant Sci.* 2016; 7:1342. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01342>.
72. • Picchi, G.; Kühmaier, M.; Marqués, J.de D.D. (2015) Survival test of RFID UHF tags in timber harvesting operations. *Croatian Journal of Forest Engineering* 2015; 36:165–174. Available: https://www.researchgate.net/publication/283765535_Survival_test_of_RFID_UHF_tags_in_timber_harvesting_operations
73. Tzoulis, I.K.; Andreopoulou, Z.S.; Voulgaridis, E. (2014) Wood tracking information systems to confront illegal logging. *J Agric Informatics.* 2014; 5:9–17. DOI: <https://doi.org/10.17700/jai.2014.5.1.130>.
74. Häkli, J.; Sirkka, A.; Jaakkola, K.; Puntanen, V.; Nummila, K. (2013) Challenges and possibilities of RFID in the forest industry. In: Reaz MBI, editor. Radio Frequency Identification from System to Applications [Internet]. Rijeka, Croatia: InTechOpen; 2013 [cited 250421]. p. 301–24. <https://doi.org/10.5772/54205>.
75. Virtanen, J.; Virkki, J.; Ukkonen, L.; Sydänheimo, L. (2012) Inkjet-printed UHF RFID tags on renewable materials. *Adv Internet Things.* 2012; 2:23699. DOI: <https://doi.org/10.4236/ait.2012.24010>.
76. • Björk, A.; Erlandsson, M.; Häkli, J.; Jaakkola, K.; Nilsson, Å.; Nummila, K. et al. (2011) Monitoring environmental performance of the forestry supply chain using RFID. *Comput Ind.* 2011; 62:83041. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2011.08.001>.
Diese frühe Arbeit bietet einen guten konzeptionellen Überblick über das Potential der Nutzung von RFID in der Bereitstellungskette.
This early paper provides a good conceptual overview of the potential for using RFID in the supply chain.
77. Ruiz-Garcia, L.; Lunadei, L. (2011) The role of RFID in agriculture: Applications, limitations and challenges. *Comput Electron Agric.* 2011; 79:42–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.08.010>.
78. Kaul, C. (2010) Auto-ID in the timber supply chain - identifying single logs using RFID tags. Proceedings of FORMEC 2010 - Forest Engineering: Meeting the Needs of the Society and the Environment [Internet]. Padova, Italy; 2010 [cited 250421]. Available: <https://www.formec.org/images/proceedings/2010/Ab038.pdf>.
79. Barge, P.; Gay, P.; Piccarolo, P.; Tortia, C. (2010) RFID tracking of potted plants from nursery to distribution. Proceedings of the International Conference Ragusa SHWA2010 [Internet]. Ragusa Ibla, Italy; 2010 [cited 250214]. p. 541–8. Available: [http://www.ragusashwa.it/CD_2010/lavori/TOPIC5/orale/RFIDtrackingplants\[1\].pdf](http://www.ragusashwa.it/CD_2010/lavori/TOPIC5/orale/RFIDtrackingplants[1].pdf).
80. Mohamed, N.; Garoot, A.H.; Hazza, Z.M. (2009) A case study on impacts of RFID adoption in tree inventory management. Proceedings of the 2009 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology. Beijing: IEEE; 2009. p. 624–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCSIT.2009.5234874>.
81. FVA Baden-Württemberg und Fraunhofer IZM: Projekt "RFID in der Holzlogistik"
Available: [RFID in der Holzlogistik - Fraunhofer IZM](RFID_in_der_Holzlogistik_Fraunhofer_IQM).

82. Holzmann, M. (2009)
 Die Auswirkungen des Einsatzes der RFID-Technologie zur Rundholzkennzeichnung auf die Prozessabläufe der Logistikkette Wald-Werk Fallstudie am Beispiel zweier Rundholzbereitstellungsvarianten eines mittelständischen Sägewerks.
 Dissertation an der Universität Freiburg.
 Available: <https://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/dissts/Freiburg/Holzmann2009.pdf>.
83. Sauter, U.H.; Holzmann, M. (2008)
 BMF-Verbundprojekt Starkholz, Aktivierung von Wertschöpfungspotentialen zur nachhaltigen Nutzung und Verwendung von Nadel- und Laubstarkholz
 Available: <https://edocs.tib.eu/files/e01fb09/607464089.pdf>.
84. Föller, J. (2006) Tags verfolgen Baumstämme
Logistik heute, Nr .4/2006.
85. Holzmann, M.; Verhoff, S.; Sauter, u.H. (2006)
 Ein innovatives Verfahren zur Rundholzkennzeichnung, Der Freiburger Transponderzyklus AFZ - *Der Wald*, Nr. 13/2006, S. 716-721.
86. Stage, A.R. (1973)
 Prognosis model for stand development.
 Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture.
87. Wykoff, W.R. (1990)
 A basal area increment model for individual conifers in the northern Rocky Mountains.
Forest Science 1990; 36:1077104. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestscience/36.4.1077>.
88. Hamidi, S.K.; Weiskittel, A.; Bayat, M.; Fallah, A. (2021)
 Development of individual tree growth and yield model across multiple contrasting species using nonparametric and parametric methods in the Hyrcanian forests of northern Iran.
Eur Journal of Forestry Research 2021; 140:421–34. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01340-1>.
89. Guerra-Hernández, J.; González-Ferreiro, E.; Monleón, V.J.; Faias, S.P.; Tomé, M.; Díaz-Varela, R.A. (2017) Use of multi-temporal UAV-derived imagery for estimating individual tree growth in *Pinus pinea* stands.
Forests. 2017; 8:300. DOI: <https://doi.org/10.3390/f8080300>.
90. Kuehne, C.; Weiskittel, A.R.; Waskiewicz, J. (2019)
 Comparing performance of contrasting distance-independent and distance-dependent competition metrics in predicting individual tree diameter increment and survival within structurally-heterogeneous, mixed-species forests of Northeastern United States.
For Ecol Manag. 2019; 433:205-16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.002>.
- 91.** Valentine, H.T.; Mäkelä, A. (2005)
 Bridging process-based and empirical approaches to modeling tree growth.
Tree Physiol. 2005; 25:76979. DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/25.7.769>.
Diese Arbeit beschreibt eine Methodik zur Einbeziehung individueller Baumkronendaten in biologisch aussagekräftige Prognosen des Stammwachstums auf Grundlage individueller Baumkronenmerkmale.
This paper describes a methodology for incorporating individual tree crown data into biologically meaningful prediction of stem growth based on individual tree crown characteristics.
92. Creasy, M.B.; Tinkham, W.T.; Hoffman, C.M.; Vogeler, J.C. (2021)
 Potential for individual tree monitoring in ponderosa pine dominated forests using unmanned aerial system structure from motion point clouds.
Canadian Journal of Forest Research 2021; 51:1093–105.
 DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0433>.
93. Packalen, P.; Pukkala, T.; Pascual, A. (2020)
 Combining spatial and economic criteria in tree-level harvest planning.
Forest Ecosystems 2020; 7:18. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00234-3>.
94. Wing, B.M.; Boston, K.; Ritchie, M.W. (2019)
 A technique for implementing group selection treatments with multiple objectives using an airborne lidar-derived stem map in a heuristic environment.
Forest Science 2019; 65:211–22. DOI: <https://doi.org/10.1093/forsci/fxy050>.

95. • West, T.; Sessions, J.; Strimbu, B.M. (2021) Heuristic optimization of thinning individual Douglas-fir. *Forests*. 2021;12: 280. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12030280>.
Diese Arbeit liefert eine hilfreiche Analyse des wirtschaftlichen Nutzens der Einbeziehung individueller Baumdaten in praktische Durchforstungen auf Grundlage von heuristischen Ansätzen.
This paper provides a useful analysis of the economic benefit of incorporating individual tree information into operational thinning treatments based on heuristics.
96. • Fransson, P.; Franklin, O.; Lindroos, O.; Nilsson, U.; Brännström, Å. (2020) A simulation-based approach to a near-optimal thinning strategy: Allowing harvesting times to be determined for individual trees. *Canadian Journal of Forest Research* 2020; 50:320–31. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0053>.
Diese Arbeit liefert ein hilfreiches Beispiel für die Einbeziehung individueller Baumdaten in die praktische Durchführung der Holzernte.
This paper provides a useful example of incorporating individual tree information into operational harvest implementation.
97. Cansler, C.A.; Hood, S.M.; Varner, J.M.; van Mantgem, P.J.; Agne, M.C.; Andrus, R.A. et al. (2020) The Fire and Tree Mortality Database, for empirical modeling of individual tree mortality after fire. *Sci Data*. 2020; 7:194. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0522-7>.
98. Nordström, M.; Hemmingsson, J. (2018) Measure up! - A Skogforsk guide to harvester measurement [Internet]. Palmér CH, editor. Uppsala, Sweden: Skogforsk; 2018 [cited 250214]. Available: <https://www.skogforsk.se:443/english/products-and-events/other/measure-up%2D-a-skogforsk-guide-to-harvester-measurement/>.
99. Löwe, R.; Sedmíková, M.; Natov, P.; Jankovský, M.; Hejmanová, P.; Dvořák, J. (2019) Differences in timber volume estimates using various algorithms available in the control and information systems of harvesters. *Forests*. 2019; 10:388. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10050388>.
100. Barth, A.; Möller, J.J.; Wilhelmsson, L.; Arlinger, J.; Hedberg, R.; Söderman, U. (2015) A Swedish case study on the prediction of detailed product recovery from individual stem profiles based on airborne laser scanning. *Ann Forest Science* 2015; 72:47–56. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0400-6>.
101. Saukkola, A.; Melkas, T.; Riekki, K.; Sirparanta, S.; Peuhkurinen, J.; Holopainen, M. et al. (2019) Predicting forest inventory attributes using airborne laser scanning, aerial imagery, and harvester data. *Remote Sensing* 2019; 11:797. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11070797>.
102. Shan, C.; Bi, H.; Watt, D.; Li, Y.; Strandgard, M.; Ghaffariyan, M.R. (2021) A new model for predicting the total tree height for stems cut-to-length by harvesters in Pinus radiata plantations. *Journal of Forestry Research* 2021; 32:21–41. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01078-6>.
103. Carter, P.; Wang, X.; Ross, R.J. (2013) Field application of processor head acoustic technology in forest harvest operations. Proceedings of the 18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium [Internet]. Madison, WI, USA: US Forest Service - Forest Products Laboratory; 2013 [cited 250506]. Available: https://www.fpl.fs.fed.us/documents/pdf2013/fpl_2013_carter001.pdf.
104. Walsh, D.; Strandgard, M.; Carter, P. (2014) Evaluation of the Hitman PH330 acoustic assessment system for harvesters. *Scand Journal of Forestry Research* 2014; 29:593–602. DOI: <https://doi.org/10.1080/02827581.2014.953198>.
105. Sandak, J.; Sandak, A.; Marrazza, S.; Picchi, G. (2019)
• Development of a sensorized timber processor head prototype
– part 1: Sensors description and hardware integration.
Croatian Journal of Forest Engineering. 2019; 40:25–37. Available: <https://croife.com/site/assets/files/4262/sandak.pdf>.
Diese Arbeit enthält ein Praxisbeispiel für die Verwendung mehrerer Sensoren am Prozessoraggregat, um individuelle Daten zu erfassen und die Stammabschnitte zu verfolgen.
This paper provides a real-world example of using multiple sensors on the processor head to support individual product measurements and tracing.

106. Spinelli, R.; Magagnotti, N.; Labelle, E. R. (2020).
 The effect of new silvicultural trends on mental workload of harvester operators.
Croatian Journal of Forest Engineering, 41(2), 177–190.
 DOI: <https://doi.org/10.5552/croife.2020.747>.
107. Möller, B.; Wikander, J.; Hellgren, M. (2011)
 A field-tested log traceability system.
Forest Products Journal. 2011; 61:466–72. DOI: <https://doi.org/10.13073/0015-7473-61.6.466>.
108. OTMETKA [Internet].
 OTMETKA. [cited 250502]. Available: <https://otmetka.com/>.
109. Kaulen, A.; Stopfer, L.; Lippert, K.; Purfürst, T. (2023)
- Systematics of Forestry Technology for Tracing the Timber Supply Chain.
Forests, 14(9), 1718. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14091718>.
Diese Arbeit stellt eine konsistente Systematik der Technologien für das Tracking & Tracing auf.
This paper establishes a consistent system for tracking and tracing technologies.
110. Watson, R. T. (2001).
 Climate change 2001: Synthesis report (Vol. 398). Cambridge University Press, Cambridge.
111. Eriksson, E.; Gillespie, A. R.; Gustavsson, L.; Langvall, O.; Olsson, M.; Sathre, R.; Stendahl, J. (2007a).
 Integrated carbon analysis of forest management practices and wood substitution.
Canadian Journal of Forest Research, 37(3), 671–681.
112. Eriksson, E.; Gillespie, A. R.; Gustavsson, L.; Langvall, O.; Olsson, M.; Sathre, R.; Stendahl, J. (2007b).
 Integrated carbon analysis of forest management practices and wood substitution.
Canadian Journal of Forest Research, 37(3), 671–681. DOI: <https://doi.org/10.1139/X06-257>.
113. Buonocore, E.; Häyhä, T.; Paletto, A.; Franzese, P. P. (2014).
 Assessing environmental costs and impacts of forestry activities: A multi-method approach to environmental accounting.
Ecological Modelling, 271, 10–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.02.008>.
114. Busenius, M.; Engler, B.; Smaltschinski, T.; Opferkuch, M. (2015).
 Consequences of increasing payloads on carbon emissions—an example from the Bavaria State Forest Enterprise (BaySF).
Forestry Letters, 108(8).
115. Günther, D.; Juhrich, K.; Kludt, R.; Kuntze, D.; Rimkus, D. (2015).
 Entwicklung der CO₂-Emissionen.
 In M. Fischedick; K. Görner; M. Thomeczek (Eds.) CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung (SS. 111–149). Springer Berlin Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-19528-0_6.
116. Knauf, M.; Köhl, M.; Mues, V.; Olschofsky, K.; Frühwald, A. (2015).
 Modeling the CO₂-effects of forest management and wood usage on a regional basis.
Carbon Balance and Management, 10(1), 13. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13021-015-0024-7>.
117. Berndes, G.; Abt, B.; Asikainen, A.; Cowie, A.; Dale, V.; Egnell, G.; Lindner, M.; Marelli, L.; Paré, D.; Pingoud, K.; et al. (2016).
 Forest biomass, carbon neutrality and climate change mitigation. From Science to Policy, 3(7).
118. Braun, M.; Fritz, D.; Weiss, P.; Braschel, N.; Büchsenmeister, R.; Freudenschuß, A.; Gschwantner, T.; Jandl, R.; Ledermann, T.; Neumann, M.; et al. (2016).
 A holistic assessment of greenhouse gas dynamics from forests to the effects of wood products use in Austria.
Carbon Management, 7(5–6), 271–283.
119. Klein, D.; Wolf, C.; Schulz, C.; Weber-Blaschke, G. (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, 539, 45–60.
120. Kubová, P.; Hájek, M.; Třebícký, V. (2018).
 Carbon footprint measurement and management: Case study of the school forest enterprise.
BioResources, 13(2), 4521–4535.
121. Yoshimoto, A.; Asante, P.; Itaka, S. (2018).
 Incorporating carbon and bioenergy concerns into forest management.
Current Forestry Reports, 4, 150–160.
122. Forster, E.; Healey, J.; Dymond, C.; Newman, G.; Davies, G.; Styles, D. (2019).
 Linking construction timber carbon storage with land use and forestry management practices.
 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 323(1), 012142.

123. Gundersen, P.; Thybring, E. E.; Nord-Larsen, T.; Vesterdal, L.; Nadelhoffer, K. J.; Johannsen, V. K. (2021). Old-growth forest carbon sinks overestimated.
Nature, 591(7851), E21–E23. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03266-z>.
124. Hoymann, J.; Baum, S.; Elsasser, P.; Dechow, R.; Gutsch, M.; Fick, J. (2021). Ist-Situation der Landnutzung in Deutschland.
In H. Gömann & J. Fick (Eds.), Wechselwirkungen zwischen Landnutzung und Klimawandel (SS. 21–70). Springer Fachmedien Wiesbaden. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-18671-5_2.
125. Kühmaier, M.; Kral, I.; Kanzian, C. (2022). Greenhouse gas emissions of the forest supply chain in austria in the year 2018.
Sustainability, 14(2).
126. Schulte, M.; Jonsson, R.; Hammar, T.; Stendahl, J.; Hansson, P.-A. (2022). Nordic forest management towards climate change mitigation: Time dynamic temperature change impacts of wood product systems including substitution effects.
European Journal of Forest Research, 141(5), 845–863.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-022-01477-1>.
127. Brand, C.; Briechle, M.; Schulz, C. (2023). Regionalität verbessert Kohlendioxid-Bilanz. Ergebnisse einer Untersuchung zum Einfluss des Transports auf die CO₂-Bilanz verschiedener Holzprodukte.
Holz-Zentralblatt, 28, 473–474.
128. IPCC. (2024). Climate change 2023: Synthesis report.
Intergovernmental Panel on Climate Change.
129. Kaulen, A.; Engler, B.; Purfürst, T. (2024)
• Net carbon storage of supplied timber in highly mechanized timber harvest
Silva Fennica. 2024 Vol. 58, No. 4, Article ID 24011. 30 p. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.24011>.
Diese Arbeit berechnet die CO₂-Bilanz einer Holzbereitstellungskette mit hochmechanisierter Holzernte, indem die Daten der Forstmaschinen ausgelesen und, einschließlich Holzabfuhr, aufsummiert werden.
This paper calculates the carbon footprint of a timber supply chain involving highly mechanised timber harvesting by reading and totalling data from forestry machines, including timber logistics.
130. Kaulen, A.; Mayer, D.; Franz, M.-F.; Purfürst, T. (2025) Practical Application of Carbon Footprint of Timber Supply Chain Using Forest Machine Data
Croatian Journal of Forest Engineering. 2025; 46/2: 289–307.
DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2025.3233>.
131. Lippke, B.; Gustafson, R.; Venditti, R.; Steele, P.; Volk, T.A.; O'Neil, E.; Johnson, L.; Puettmann, M.E.; Skog, K. (2012). Comparing life-cycle carbon and energy impacts for biofuel, wood product, and forest management alternatives.
Forest Products Journal, 62(4), 247–257.
132. Timmermann, V.; Dibdiakova, J. (2014). Greenhouse gas emissions from forestry in East Norway.
The International Journal of Life Cycle Assessment, 19, 1593–1606.
133. Diederichs, S.K. (2015). Monitoring energy efficiency and environmental impact of the woodworking industry in Germany.
European Journal of Wood and Wood Products, 73(5), 573–588.
134. Knauf, M., Joosten, R., & Fröhwald, A. (2016). Assessing fossil fuel substitution through wood use based on long-term simulations.
Carbon Management, 7(1–2), 67–77.
135. de la Fuente, T.; Athanassiadis, D.; Gonzalez-Garcia, S.; Nordfjell, T. (2017). Cradle-to-gate life cycle assessment of forest supply chains: Comparison of Canadian and Swedish case studies.
Journal of Cleaner Production, 143, 866–881.
136. Sgarbossa, A.; Boschiero, M.; Pierobon, F.; Cavalli, R.; Zanetti, M. (2020). Comparative life cycle assessment of bioenergy production from different wood pellet supply chains.
Forests, 11(11), 1127.
137. Castillo, V.B.; Schweizer, R. (2022). Life cycle assessment.

138. Kock, H.; Schmid-Schirling, T.; Last, C.; Staudenmaier, J. (2023) Forschungsprojekt DiGeBaSt: Markierungsfreie Rückverfolgung für den Herkunftsachweis von Baumstämmen. Presseinformation Fraunhofer IPM, 05.12.2023. Available: https://www.ipm.fraunhofer.de/de/presse_publikationen/Presseinformationen/markierungsfreie_rueckverfolgung_baumstaemme-forschungsprojekt-digebast.html. FVA Baden-Württemberg: <https://www.fva-bw.de/top-meta-navigation/fachabteilungen/waldnutzung/digebast>.
139. Schraml, R.; Hofbauer, H.; Petutschnigg, A.; Uhl, A. (2015) Tree log identification based on digital cross-section images of log ends using fingerprint and iris recognition methods. In: Azzopardi G, Petkov N, editors. Proceedings of the International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns, CAIP 2015. Valletta: Springer International Publishing; 2015. p. 752–65. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-23192-1_63. **D ie grundlegende Arbeit über den digitalen Fingerabdruck der Schnittflächen des Rohholzes.**
140. Yadav, A.; Shivani, S.; Manda, V.K.; Sangwan, V.; Demkiv, A. (2024) Blockchain technology for ecological and environmental applications. *Ecological Questions* 35(2024)4. DOI: <http://dx.doi.org/10.12775/EQ.2024.050>.
141. Stopfer, L.; Kaulen, A.; Purfürst, T. (2024). • Potential of blockchain technology in wood supply chains. *Comput. Electron. Agric.*, 216, 108496. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108496>. Diese Arbeit gibt einen Überblick über die Blockchain-Technologie, betrachtet die Erfordernisse für die Forst- und Holzindustrie, erörtert notwendige Aspekte der Digitalisierung und verweist auf bestehende Anwendungen. This paper provides an overview of blockchain technology, considers requirements for forestry and timber industries, discusses necessary digitization aspects and refers to existing applications.
142. Qu, H.; Wang, Y.; Liu, K. (2023) Forest resource management system based on blockchain. *Cerne*, v.29, e-103259, DOI: <https://doi.org/10.1590/01047760202329013259>
143. He, Z.; Turner, P. (2022) Blockchain Applications in Forestry: A Systematic Literature Review. *Appl. Sci.* 2022, 12, 3723. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12083723>.
144. Komdeur, E.F.M.; Ingenbleek, P.T.M. (2021) The potential of blockchain technology in the procurement of sustainable timber products. *International Wood Products Journal*, 2021;12(4):249-257. DOI: [10.1080/20426445.2021.1967624](https://doi.org/10.1080/20426445.2021.1967624).
145. Howson, P.; Oakes, S.; Baynham-Herd, Z.; Swords, J. (2019) Cryptocarbon: The promises and pitfalls of forest protection on a blockchain. *Geoforum*. 2019; 100:1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2019.02.011>.
146. Ozyilmaz, K.R.; Yurdakul, A. (2019) Designing a blockchain-based IoT with Ethereum, Swarm, and LoRa: The software solution to create high availability with minimal security risks. *IEEE Consumer Electron Mag.* 2019; 8:28–34. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCE.2018.2880806>.
147. Figorilli, S.; Antonucci, F.; Costa, C.; Pallottino, F.; Raso, L.; Castiglione, M.; Pinci, E.; del Vecchio, D.; Colle, G.; Proto, A.R.; Sperandio, G.; Menesatti, P. (2018) A Blockchain Implementation Prototype for the Electronic Open Source Traceability of Wood along the Whole Supply Chain. *Sensors*, 18(9), 3133. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18093133>.
148. Nikolakis, W.; John, L.; Krishnan, H. (2018) How blockchain can shape sustainable global value chains: An Evidence, Verifiability, and Enforceability (EVE) framework. *Sustainability*. 2018; 10:3926. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10113926>.
149. Bor, M.; Vidler, J.E.; Roedig, U. (2016) LoRa for the Internet of Things. Proceedings of the International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks (EWSN) 2016 [Internet]. Graz, Austria: Junction Publishing; 2016 [cited 250421]. p. 361–6. Available: <https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/77615/>.

150. Gallo, R.; Grigolato, S.; Cavalli, R.; Mazzetto, F. (2013) GNSS-based operational monitoring devices for forest logging operation chains. *J Agric Eng.* 2013; 44: e27. DOI: <https://doi.org/10.4081/jae.2013.269>.
151. Becker, R.M.; Keefe, R.F.; Anderson, N.M. (2017) Use of real-time GNSSRF data to characterize the swing movements of forestry equipment. *Forests.* 2017; 8:44. DOI: <https://doi.org/10.3390/f8020044>.
152. Overbeck, M.; Sauter, H.U. (2023) Präzise Forstwirtschaft (SuperNav) Fraunhofer IIS. Available: <https://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/lv/lok/proj/supernav.html>. FVA Baden-Württemberg: <https://www.fva-bw.de/top-meta-navigation/fachabteilungen/waldnutzung/supernav>.
153. Gallo, R.; Visser, R.; Mazzetto, F. (2021) Developing an automated monitoring system for cable yarding systems. *Croatian Journal of Forest Engineering.* 2021; 42:213–25. DOI: <https://doi.org/10.5552/croife.2021.768>.
154. Noordermeer, L.; Sørngård, E.; Astrup, R.; Naeset, E.; Gobakken, T. (2021) Coupling a differential global navigation satellite system to a cut-to-length harvester operating system enables precise positioning of harvested trees. *Int J For Eng.* 2021; 32:119–27. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1899686>. **Diese Arbeit beschreibt Verfahren zur hochgenauen GNSS-Positionierung des Harvesteraggregats unter Verwendung von differentieller Korrektur.** **This paper describes methods for high-accuracy GNSS positioning of the harvester head using differential correction.**
155. Zimbelman, E.G.; Keefe, R.F. (2018) Real-time positioning in logging: Effects of forest stand characteristics, topography, and line-ofsight obstructions on GNSS-RF transponder accuracy and radio signal propagation. *PLoS One.* 2018; 13: e0191017. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191017>.
156. Wempe, A.M.; Keefe, R.F. (2017) Characterizing rigging crew proximity to hazards on cable logging operations using GNSS-RF: Effect of GNSS positioning error on worker safety status. *Forests.* 2017; 8:357. DOI: <https://doi.org/10.3390/f8100357>.
157. Zimbelman, E.G.; Keefe, R.F.; Strand, E.K.; Kolden, C.A.; Wempe, A.M. (2017) Hazards in motion: Development of mobile geofences for use in logging safety. *Sensors.* 2017; 17:822. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17040822>.
158. Kemmerer, J.; Labelle, E.R. (2021) Using harvester data from on-board computers: A review of key findings, opportunities and challenges. *Eur Journal of Forestry Research* 2021; 140:1–17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01313-4>. **Diese Arbeit fasst die Nutzung von StanForD-Dateien aus Bordcomputern für verschiedene Anwendungen im Zusammenhang mit einzelnen Bäumen und Produkten zusammen.** **This paper summarizes uses of StanForD files from onboard computers for various individual tree and product applications.**
159. Skogforsk. (2021). StanForD 2010 – modern communication with forest machines. Available: <https://www.skogforsk.se/english/projects/stanford/stanford-2010/>.
160. Zimbelman, E.G.; Keefe, R.F. (2021) Development and validation of smartwatch-based activity recognition models for rigging crew workers on cable logging operations. *PLoS One.* 2021; 16: e0250624. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250624>.
161. Keefe, R.F.; Zimbelman, E.G., Wempe, A:M. (2019) Use of smartphone sensors to quantify the productive cycle elements of hand fallers on industrial cable logging operations. *Int J For Eng.* 2019; 30:13243. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2019.1572489>. **Diese Arbeit beschreibt die Verwendung von Smartphone-Sensoren zur Entwicklung von Modellen und Apps, mit denen motormanuelle Tätigkeiten in Echtzeit erfasst und ausgewertet werden können.**

- This paper describes methods for using smartphone sensors to develop models and apps to summarize motor-manual work activities in real time.**
162. Becker, R.M.; Keefe, R.F.; Anderson, N.M. (2017)
Use of real-time GNSSRF data to characterize the swing movements of forestry equipment.
Forests. 2017; 8:44. DOI: <https://doi.org/10.3390/f8020044>.
163. • Cheța, M.; Marcu, M.V.; Iordache, E.; Borz, S.A. (2020)
Testing the capability of low-cost tools and artificial intelligence techniques to automatically detect operations done by a small-sized manually driven bandsaw.
Forests. 2020; 11:739. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11070739>.
Diese Arbeit beschreibt Verfahren zur Verwendung künstlicher neuronaler Netze (KNN) auf Grundlage kostengünstiger Sensordaten, um Arbeitsvorgänge so zu charakterisieren, dass dies hilfreich ist zur Rückverfolgung einzelner Produkte.
This paper describes methods for using Artificial Neural Networks (ANNs) based on low-cost sensor data to characterize work activities in ways that are useful for individual product tracing.
164. Borz, S.A. (2021)
Development of a modality-invariant Multi-Layer Perceptron to predict operational events in motor-manual willow felling operations.
Forests. 2021; 12:406. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12040406>.
165. Borz, S.A.; Păun, M. (2020)
Integrating offline object tracking, signal processing, and artificial intelligence to classify relevant events in sawmilling operations.
Forests. 2020; 11:1333. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11121333>.
167. Arias, O.; Wurm, J.; Hoang, K.; Jin, Y. (2025)
Privacy and security in Internet of Things and wearable devices.
IEEE Trans Multi-Scale Comput Syst. 2015; 1:99–109.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TMCS.2015.2498605>.
168. Paul, G.; Irvine, J. (2014)
Privacy implications of wearable health devices.
Proceedings of the 7th International Conference on Security of Information and Networks.
Glasgow: Association for Computing Machinery; 2014. p. 117–21.
DOI: <https://doi.org/10.1145/2659651.2659683>.
169. Picchio, R.; Latterini, F.; Mederski, P.S.; Venanzi, R.; Karaszewski, Z.; Bembenek, M. et al. (2029)
Comparing accuracy of three methods based on the GIS environment for determining winching areas.
Electronics. 2019; 8:53. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics8010053>.
170. Picchio, R.; Latterini, F.; Mederski, P.S.; Tocci, D.; Venanzi, R.; Stefanoni, W. et al. (2020)
Applications of GIS-based software to improve the sustainability of a forwarding operation in central Italy.
Sustainability. 2020; 12:5716. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12145716>.
171. Winkel, G.; Sotirov, M. (2016).
Whose integration is this? European forest policy between the gospel of coordination, institutional competition, and a new spirit of integration.
Environment and Planning C: Government and Policy, 34(3), 496–514.
DOI: <https://doi.org/10.1068/c1356j>.
172. Primmer, E.; Varumo, L.; Krause, T.; Orsi, F.; Geneletti, D.; Brogaard, S.; Aukes, E.; Ciolfi, M.; Grossmann, C.; Hernández-Morcillo, M.; Kister, J.; Kluvánková, T.; Loft, L.; Maier, C.; Meyer, C.; Schleyer, C.; Spacek, M.; Mann, C. (2021).
Mapping Europe's institutional landscape for forest ecosystem service provision, innovations and governance.
Ecosystem Services, 47, 101225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101225>.
173. Hermoso, V.; Carvalho, S.B.; Giakoumi, S.; Goldsborough, D.; Katsanevakis, S.; Leontiou, S.; Markantonatou, V.; Rumes, B.; Vogiatzakis, I.N.; Yates, K. L. (2022).
The EU Biodiversity Strategy for 2030:
Opportunities and challenges on the path towards biodiversity recovery.
Environmental Science & Policy, 127, 263–271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.10.028>.
174. Schenuit, F.; Böttcher, M.; Geden, O. (2022).
CO2-Entnahme als integraler Baustein des europäischen 'Green Deal'.
SWP-Aktuell. DOI: <https://doi.org/10.18449/2022A37>.

175. Schier, F.; Lost, S.; Seintsch, B.; Weimar, H.; Dieter, M. (2022).
Assessment of Possible Production Leakage from Implementing the EU Biodiversity Strategy on
Forest Product Markets.
Forests, 13(8), 1225. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13081225>.
176. Köthke, M.; Lippe, M.; Elsasser, P. (2023).
Comparing the former EUTR and upcoming EUDR:
Some implications for private sector and authorities.
Forest Policy and Economics, 157, 103079. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.103079>.
177. Robinson, D.G.; Ammer, C.; Polle, A.; Bauhus, J.; Aloni, R.; Annighöfer, P.; Baskin, T.I.; Blatt, M.R.;
Bolte, A.; Bugmann, H.; Cohen, J.D.; Davies, P.J.; Draguhn, A.; Hartmann, H.; Hasenauer, H.; Hepler,
P.K.; Kohnle, U.; Lang, F.; Löf, M.; Näsholm, T., et al. (2023).
Mother trees, altruistic fungi, and the perils of plant personification.
Trends in Plant Science. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.08.010>.