

# Autonome Robotersysteme in der Altlastensanierung

*Dr.-Ing. Philipp Woock, Fraunhofer IOSB, Karlsruhe und Ajish Babu, DFKI  
GmbH, Robotics Innovation Center, Bremen*

## Inhaltsübersicht

	<b>Rdnr.</b>	
1	Einleitung	2 – 4
2	Grundbegriffe der mobilen Robotik	5 – 31
2.1	KI und maschinelles Lernen	5 – 7
2.2	Umgebungswahrnehmung	8 – 14
2.2.1	Sensorik	9 – 11
2.2.2	Kalibrierung und Fusion	12
2.2.3	Interpretation	13, 14
2.3	Planung	15 – 19
2.3.1	Missionsplanung/Ablaufplanung	16
2.3.2	Trajektorien-/Wegplanung	17
2.3.3	Manipulatorplanung	18, 19
2.4	Regelung	20, 21
2.4.1	Aktorik/Ansteuerbarkeit	21
2.5	Digitaler Zwilling	22 – 25
2.6	Schnittstelle zu BIM und GIS	26 – 31
3	Stand der Technik	32 – 38
4	Exemplarische Umrüstung	39 – 60
4.1	IOSB.Alice	40 – 51
4.1.1	Ansteuerung	41
4.1.2	Hydraulik	42
4.1.3	Gelenksensorik	43, 44
4.1.4	Inertialmesseinheit mit GNSS (Global Navigation Satellite System)	45
4.1.5	Umfeldsensorik	46 – 48
4.1.6	Energieversorgung	49 – 51
4.2	ARTER	52 – 60
4.2.1	Hydraulik	55
4.2.2	Elektrik	56 – 58
4.2.3	Gelenksensorik	59
4.2.4	Umfeldsensorik	60
5	Autonomiefunktionen	61 – 83
5.1	Sicherheitsfunktionen	62 – 70

5.1.1	Funk-Not-Aus	63
5.1.2	Eigenkollisionsvermeidung	64 – 67
5.1.3	Arbeitsraumüberwachung	68 – 70
5.2	Ausbaggern eines Bereichs bis zu einer bestimmten Tiefe	71, 72
5.3	Autonomes Fahren des Schreitbaggers	73 – 75
5.4	Autonome Beprobung	76 – 79
5.5	Vor-/Nachteile	80 – 83
6	Fazit	84 – 86
7	Literatur	

**Schlagwortübersicht nach Rdnr.**

Automatisierung 33, 35, 37, 73, 80	Light Detection and Ranging (LiDAR) 10, 46 ff., 60
Autonomie 1, 4, 20, 36 f., 39, 41, 44, 47, 49 f., 55 ff., 61 ff., 82 f., 85	Maschinelles Lernen (ML) 5 f.
Bagger 1, 11, 16, 18 ff., 23, 25, 33 ff., 39 f., 43, 45 f., 49, 51 f., 64 f., 71 ff., 85	Planung 15 ff., 26, 36, 78
Baumaschinen 1, 4, 21, 34, 83	Regelung 15, 20, 43
Building Information Modeling (BIM) 26 ff.	Robotik 4, 15, 24, 32, 36, 81
Geographic Information System (GIS) 26 f., 30	Semantische Segmentierung 14, 28, 30 f.
Kalibrierung 12	Sensorfusion 47
Künstliche Intelligenz (KI) 5 f.	Sensorik 9 f., 42, 44 ff., 58, 83
	Umgebungswahrnehmung/ -verständnis 3, 8

**Zusammenfassung**

In diesem Beitrag wird das Zukunftsthema Digitalisierung im Bereich der Altlastensanierung hinsichtlich des autonomen Einsatzes schwerer Arbeitsmaschinen in kontaminierten Bereichen beleuchtet. Der Schwerpunkt dabei ist die Autonomiebefähigung für schwere Baumaschinen, so dass diese (Teil-)Aufgaben beispielsweise im Rahmen von Bodensanierungsmaßnahmen selbstständig erledigen können. Dazu müssen die handelsüblichen Geräte derzeit meist noch baulich verändert werden, was an zwei Beispielen illustriert wird. Die größte Herausforderung ist es aktuell, die Fähigkeiten des Menschen so nachzubilden, dass die schweren Arbeitsmaschinen bei der Ausführung der Autonomiefunktionen ebenso intelligent vorgehen. Da eine schwere Arbeitsmaschine, die von Algorithmen gesteuert wird, letztlich nichts anderes als ein großer mobiler Roboter ist, werden in diesem Beitrag die robotischen Aufgaben beschrieben, die es zu lösen gilt und wie diese Aufgaben im Kompetenzzentrum ROBDEKON exemplarisch an einem Raupenbagger und einem Schreitbagger gelöst wurden. Dieser Beitrag bietet einen Einblick in technische Details und die komplexen Hintergründe im Zusammenhang mit dem Praxiseinsatz von Robotersystemen in der Altlastensanierung. 1

**1 Einleitung**

Moderne Autos sind voller Assistenzsysteme, die dem Fahrer die Bedienung angenehmer machen, oder seine Sicherheit unterstützen. Es stellt sich zurecht die Frage, ob die dort angewendeten Technologien nicht auch im Bereich der schweren Arbeitsmaschinen beispielsweise im Bereich der Alt- 2

lastensanierung in kontaminierten Bereichen angewendet werden können. Teilweise ist dies durchaus der Fall und es wird auch in naher Zukunft bei schweren Arbeitsmaschinen einen Wandel hin zu mehr automatischer Unterstützung geben. Allerdings wird schweren Arbeitsmaschinen, die Assistenzfunktionen zur autonomen Bearbeitung von Teilaufgaben mitbringen, in der Baubranche immer noch mit einer gewissen Skepsis begegnet, die ähnlich sein dürfte wie die Einführung von Sicherheitsgurt, ABS (Antiblockiersystem) und ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm) beim Automobil.

- 3 Natürlich sind die Anforderungen bei schweren Arbeitsmaschinen andere als beim Auto, da ein Auto in einer stärker geordneten und reglementierten Domäne agiert als eine Baumaschine: Ein Auto fährt auf befestigten Straßen, die fast vollständig vorab bekannt sind und auf denen mit Verkehrszeichen und Ampeln der Verkehr klar geregelt wird. Eine Baumaschine agiert in viel schwächer strukturierter Umgebung, deren Struktur sich im Laufe des Baufortschritts darüber hinaus auch noch ändert bzw. ändern kann. Außerdem greift eine Baumaschine aktiv in die Umgebung ein, wozu ein tiefes Umgebungsverständnis vorhanden sein muss. Daher muss eine autonome Baumaschine viel mehr Fähigkeiten mitbringen als ein autonomes Auto.
- 4 Bevor aufgezeigt wird, wie eine autonome Baumaschine arbeitet, sollen im Folgenden einige Grundbegriffe aus der mobilen Robotik geklärt werden. Denn eine Baumaschine mit Autonomiefähigkeiten ist nichts anderes als ein mobiler Roboter. Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten nationalen Kompetenzzentrum ROBDEKON (Robotersysteme für die Dekontamination in menschenfeindlichen Umgebungen) unter Leitung des Fraunhofer-Instituts für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB wurde die Altlastensanierung als ein exemplarischer Anwendungsfall für Baumaschinen mit Autonomiefunktionen ausgewählt. Bei der Sanierung von Altlasten kann durch autonome Baumaschinen ein potenzielles Gesundheitsrisiko durch Kontaminationen für den Menschen reduziert werden. Darüber hinaus wird zukünftig vermutlich der Fachkräftemangel zunehmend dazu führen, dass Bedienpersonal für die Maschinen fehlt und die Unterstützung durch autonom arbeitende Baumaschinen an Bedeutung zunimmt.

## 2 Grundbegriffe der mobilen Robotik

### 2.1 KI und maschinelles Lernen

Wir möchten die Begrifflichkeiten der künstlichen Intelligenz (KI, engl. artificial intelligence, AI) und des maschinellen Lernens (ML) als erstes klären, da diese in den Medien inflationär und zum Teil auch unterschiedlich verwendet werden. 5

Es ist oftmals üblich, klassische Methoden (wie z. B. Support Vektor Machines, SVM) als ML zu bezeichnen, während datengetriebene Methoden mit tiefen neuronalen Netzwerkarchitekturen („Deep Learning“, Convolutional Neural Networks: CNN) häufig mit dem Begriff KI in Verbindung gebracht werden. Klassisch heißt jedoch nicht schlecht: Häufig wird bei Methoden mit tiefen neuronalen Netzen zwar eine deutlich höhere Leistung beobachtet, jedoch um den Preis, dass man nur sehr viel schwieriger (wenn überhaupt) Einblick in das System erhält, warum eine bestimmte Entscheidung getroffen wurde. Das bedeutet, dass an kritischen Stellen, an denen eine Validierung ggf. mit zu gebenden Garantien erforderlich ist, häufig noch klassische Verfahren zum Einsatz kommen, zumindest bis umfassende Erklärungen für Entscheidungen auch aus tiefen neuronalen Netzen extrahiert werden können. Dies zu erreichen ist aktuell Gegenstand der Forschung. 6

Daher differenzieren wir nicht zu stark zwischen diesen Begriffen. Alle Aufgaben im robotischen System werden in Teilaufgaben aufgeteilt und für jede Teilaufgabe wird entschieden, welche Methode am besten geeignet ist. 7

### 2.2 Umgebungswahrnehmung

Um bei Aufgaben mit der Umwelt interagieren zu können, brauchen Robotersysteme Informationen aus Ihrer Umwelt und müssen diese zu einer Gesamtsicht weiterverarbeiten. Diese Informationen werden von Sensoren für unterschiedliche Modalitäten erfasst. 8

#### 2.2.1 Sensorik

Welche Sensorik ein Robotersystem tragen sollte, hängt von der Aufgabe ab, die das System erfüllen soll, allerdings gibt es Sensorik, die wir als unverzichtbar erachten: Mit einer Inertialmesseinheit (engl. inertial measurement unit, IMU) werden Beschleunigungen und Drehraten des Systems gemessen, vergleichbar mit dem menschlichen Innenohr. Damit kann das System die eigene Bewegung für kurze Zeiträume recht präzise erfassen. Da die Liegenschaften bei der Altlastensanierung nur in extremen Fällen durch Halbleiternbau elektromagnetisch abschirmend eingehaust werden, kann auch über 9

lange Zeit präzise Lokalisierung per Satellit erfolgen. Siehe hierzu auch Kapitel 4.1.4.

- 10 Mit vorgenannter Sensorik erfährt das System jedoch nur etwas über sich selbst, zur Umfelderkennung werden weitere Sensoren benötigt. Häufig werden LiDARs (**L**ight **D**etection and **R**anging, auch Laserscanner genannt) eingesetzt, da diese meistens einen 360°-Rundumblick und eine hohe Genauigkeit der Entfernungswerte bieten. Verglichen mit Kamerainformationen ist die Messpunktdichte von LiDARs im Allgemeinen deutlich geringer, weswegen bestimmte Bereiche, die höher aufgelöst werden sollen, oftmals durch mehrere Scanner abgedeckt oder durch ein Stereokamerasystem ergänzt werden. Denkbar ist auch, hyperspektrale Kameras zu verwenden, wenn sich Bodenbelastungen außerhalb des sichtbaren Bereichs oder nur sehr schmalbandig im Lichtspektrum bemerkbar machen. Hyperspektrale Kameras sind Kameras, die das Lichtspektrum deutlich genauer und meistens auch breiter aufnehmen als nur in den Grundfarben rot, grün und blau und damit Unterschiede sichtbar machen können, die dem menschlichen Auge verborgen bleiben.



**Abb. 1:** Interne Sicht der Roboter. Visualisiert sind die Messdaten aus 4 LiDARen als Punktwolke, der auszuhebende Bereich ist das größere Rechteck auf dem Boden neben dem Bagger und darin das kleinere Rechteck der aktuell geplante Grabevorgang. (Quelle: Fraunhofer IOSB) **11**

### 2.2.2 Kalibrierung und Fusion

- 12 Fusion bezeichnet das Zusammenführen der Sensordaten zu einer ganzheitlichen Sicht auf die Situation. Hierbei ist die korrekte zeitliche Referenzierung der Messdaten zueinander absolute Grundvoraussetzung. Ebenso wichtig ist eine korrekte räumliche Kalibrierung der Sensoren in einem Koordinatensystem, damit die Messwerte ortsrichtig verwendet werden.

### 2.2.3 Interpretation

- 13 Mit der Erfassung der Sensordaten allein ist selbstverständlich noch kein Erkenntnisgewinn verbunden. Einen Mehrwert erhalten die Daten der Umgebung oft in Form einer Kartenerstellung, wobei hier bereits eine Hürde lauert: dynamische Objekte. In einer statischen Umgebung ist der Fall klar: Alle Messpunkte dürfen in eine Karte eingetragen werden. Gibt es jedoch andere Maschinen und/oder Personen, die in den Messdaten kurzzeitig auftauchen, sollten diese nicht Teil einer Gesamtkarte werden. Allerdings sollten sie sehr wohl Teil einer Karte sein, die sich um Hindernisvermeidung für das Robotersystem kümmert. Ein Prinzip, das für die Kartenerstellung häufig verwendet wird, ist das SLAM-Prinzip. SLAM steht hierbei für engl. „simultaneous localization and mapping“ und bedeutet, dass man eine Karte erstellt und sich gleichzeitig selbst in dieser Karte lokalisiert. Hier wird ausgenutzt, dass man durch eine Wiedererkennung von Orten anhand hervorstechender Merkmale seine eigene Vorstellung der Umgebung korrigieren kann. Ein Mensch macht dies ganz genauso, z. B. in einem großen Bürogebäude mit vielen gleich aussehenden Fluren und Türen, die nur anhand von Kleinigkeiten wie der Position von Wandbildern oder Pflanzen unterschieden werden können.
- 14 Durch die Kartierung erhält man zwar einen korrekt zusammengesetzten Datensatz vieler Messwerte, doch es ist noch keinerlei Bedeutung mit den Messwerten verknüpft. Daher ist der nächste Schritt, auf den Messdaten eine sog. semantische Segmentierung durchzuführen. Hierzu werden die Messdaten in bedeutungstragende Einheiten aufgeteilt, die im Regelfall realen physischen Objekten entsprechen. So will man aus den Daten ablesen können, dass die eine Punktgruppe einen Baum darstellt, die andere Punktgruppe ein Gebüsch und wieder eine andere Punktgruppe einen Menschen. In diesem Gebiet sind aktuell Verfahren, die neuronale Netze verwenden, führend in der Erkennungsleistung. Ebenso muss zur Durchführung einer Aufgabe definiert werden, wo sich in der Punktwolkenkarte beispielsweise ein geeigneter Ablageort für das Aushubmaterial befindet. Dies kann ein Mensch vorgeben, idealerweise sollte die Maschine einen solchen Ort jedoch selbst identifizieren können.



## 2.3 Planung

Die vorangegangenen Überlegungen bringen uns zur sogenannten Planung. Der Begriff „Planung“ ist ein feststehender Begriff aus dem Bereich der Regelungstechnik/Robotik, der das Vorgehen des Robotersystems beschreibt. Damit ein Robotersystem eine Aufgabe erfüllen kann, muss mit Hilfe eines Algorithmus dazu ein oft mehrteiliger Plan erstellt werden, nach dem vorgegangen wird. Diese Planung erstreckt sich dabei auf mehrere Zeithorizonte: Eine generelle Missions- oder Ablaufplanung, die das große Ganze repräsentiert, und eine Planung von Teilschritten innerhalb dieses Ablaufplans. Man spricht oft auch von Grob- und Feinplanung. 15

### 2.3.1 Missionsplanung/Ablaufplanung

Bei der Missionsplanung wird im Normalfall durch einen menschlichen Operator eine Aufgabe vorgegeben, etwa dass ein Bereich mit kontaminiertem Boden, der auf einer Karte markiert wird, auszuheben ist. Das Robotersystem muss daraufhin mit einer Strategie einen Plan erstellen, wie einzelne Aushubbereiche verkettet werden können, um nacheinander abgearbeitet werden zu können. Für jeden Aushubbereich bricht das System die Aufgabe wiederum in eine Abfolge kleinerer Teilaufgaben herunter, die typischerweise konkrete Baggerbewegungen und/oder Manipulatorbewegungen enthalten. Mit „Manipulator“ ist das eigentliche Arbeitsgerät vorne am Bagger gemeint, z. B. ein Greifer oder ein Baggerlöffel. 16

### 2.3.2 Trajektorien-/Wegplanung

Das Anfahren eines Aushubbereichs an sich ist bereits eine Teilaufgabe, bei der viele Randbedingungen erfüllt sein müssen. Welcher Weg für das Fahrzeug am besten geeignet ist, hängt vom verfügbaren Platz ab, von der Größe und Manövrierfähigkeit des Fahrzeugs, von der Beschaffenheit des Untergrundes, vom Abstand zu Böschungen und von dynamischen Hindernissen, die im Arbeitsbereich auftauchen können. Hier muss das Robotersystem eine Lösung finden, die all diese Aspekte berücksichtigt. Zusätzlich muss diese Lösung mehrmals pro Sekunde gefunden bzw. aktualisiert werden, um auf eine geänderte Umwelt zu reagieren. Das System hat also nicht allzu lange Zeit, über eine Lösung „nachzudenken“, sondern muss diese schnell und zuverlässig berechnen. Wenn dies zu lange dauert und/oder das Ergebnis ungenau ist, kann dies etwa zur Folge haben, dass eine Kollision mit der Umgebung geschieht. 17

### 2.3.3 Manipulatorplanung

- 18 Ganz ähnliche Aufgaben gibt es bei der Manipulatorplanung (sofern das System einen Manipulator besitzt wie z. B. ein Bagger). Am Beispiel des Baggers müssen bei einem Aushubvorgang mehrere Bedingungen erfüllt sein:
- Der auszuhebende Bereich und der Abladeort müssen für den Baggerarm erreichbar sein.
  - Der Baggerarm darf umgebende Objekte nicht berühren (auch nicht den Bagger selbst – das „Bodenobjekt“ aber freilich schon).
  - Der Baggerlöffel darf befüllt nicht mehr jede Position annehmen, sondern muss in etwa waagrecht gehalten werden, damit der ausgehobene Boden nicht sofort wieder herausfällt.
- 19 Diese Manipulatorplanung fällt bei einem Greifer wiederum anders aus als bei einem Tieflöffel. Der Tieflöffel wiederum könnte zudem an einem Tiltrotator montiert sein. Ein Tiltrotator ist ein Zusatzgerät am Bagger, das es erlaubt, den Baggermanipulator zusätzlich zu verkippen und zu drehen und bietet somit mehr Freiheitsgrade in der Bewegung. Dadurch beeinflusst das Vorhandensein eines Tiltrotators möglicherweise nicht nur die Planung einzelner Teilaufgaben, sondern sogar die darüberliegende Aufgabenplanung, falls mit dem Tiltrotator Arbeiten erheblich effizienter, etwa durch Schrägstellung des Löffels, durchgeführt werden können.

### 2.4 Regelung

- 20 Der beste Plan hilft nichts, wenn man bei der Ausführung nicht überprüft, ob der Plan genau befolgt wird und falls nicht, die Ausführung entsprechend nachbessert. Das gilt für Robotersysteme ganz genauso, insbesondere hydraulikbasierte Systeme stellen durch die Totzeiten eine Herausforderung für die Regelung der Bewegung dar. Totzeit bedeutet, dass es eine gewisse Zeit braucht, bis ein gegebenes Kommando der Autonomiesoftware tatsächlich von der Maschine umgesetzt wird. Bei Hydraulikbaggern muss die Hydraulikpumpe vor einer Bewegung erst eine Druckerhöhung im Hydrauliksystem herbeiführen. Dies betrifft bei einem Hydraulikbagger alle Arbeiten mit dem Baggerarm. Beim Baggerdemonstrator aus ROBDEKON kommen mehrstufige Reglerkonzepte zum Einsatz, sowohl für den Manipulator (Baggerarm) als auch für die Plattform (Unterwagen), um eine schnelle und gleichzeitig präzise Regelung zu gewährleisten.

### 2.4.1 Aktorik/Ansteuerbarkeit

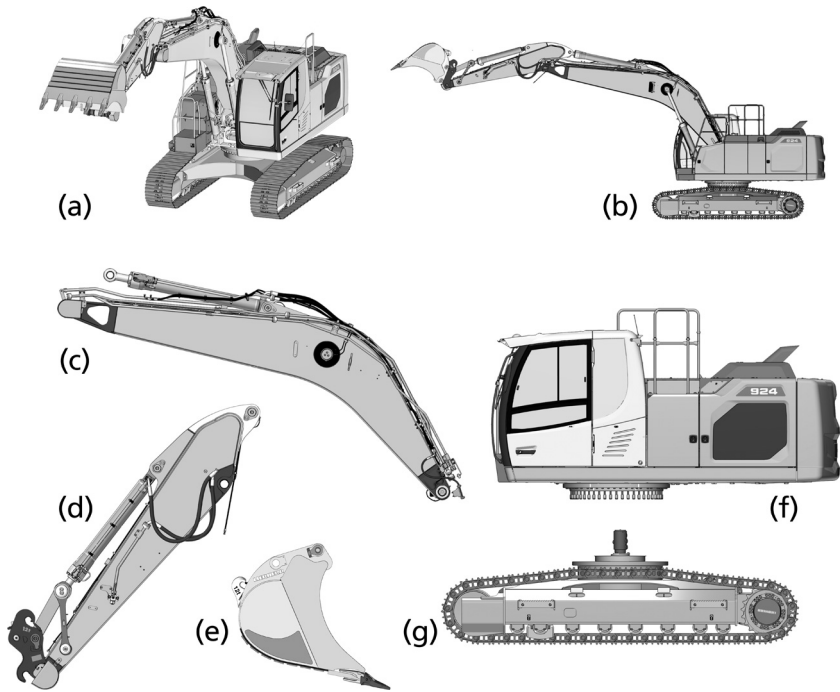
Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Hersteller von Baumaschinen ihre Systeme nur ganz allmählich derart umstellen, dass sie auch digital und nicht nur von Menschen (an-)steuerbar sind. Dies ist allerdings Voraussetzung, um automatisiert präzise Befehle an die Maschine geben zu können. Dies wird erneut in Kapitel 4 aufgegriffen. 21

### 2.5 Digitaler Zwilling

Viele Arbeiten bei der Autonomisierung einer Baumaschine können auf eine Simulation abgebildet werden, wodurch die Sicherheit und die Effizienz erhöht werden. Wichtige Voraussetzung dafür ist ein digitales Modell der Baumaschine. Die volle Detailtiefe einer CAD-Zeichnung (CAD = computer aided design) der Baumaschine ist dabei nicht erforderlich, aber die Drehgelecke und äußeren Dimensionen müssen korrekt abgebildet sein. 22

In Abbildung 2 ist ein digitales Modell eines Liebherr R 924 Baggers abgebildet und wie es in seine für die Autonomisierung bedeutungstragenden Elemente zerlegt wurde. Besitzt eine Baumaschine Sensoren zur Längenmessung der Hydraulikzylinder, kann über die bekannte Geometrie eine Winkelberechnung zur Berechnung der genauen Armposition erfolgen. Letztlich ist man hier jedoch auf den Hersteller angewiesen, die notwendigen Daten für ein entsprechend geeignetes 3D-Modell bereitzustellen. 23

Zur zeitlichen Referenzierung der Messdaten bieten Robotik-Middlewaresysteme wie z. B. ROS (Robot Operating System) [1] bereits Unterstützung, indem alle Sensordaten automatisch bei der Erfassung einen Zeitstempel erhalten. Bei ROS existiert hier auch die Möglichkeit, sog. ROSbags zu erzeugen: Man nimmt hierbei Messdaten in eine ROSbag-Datei auf, und kann diese jederzeit erneut abspielen. Dies ist natürlich hauptsächlich für die Entwicklung von Verfahren relevant, kann aber auch verwendet werden, um reale Situationen im Nachhinein zu evaluieren und nachzuvollziehen, warum das System auf eine bestimmte Weise reagiert hat. Man hat dadurch die Möglichkeit, mit einem digitalen Zwilling des Systems Änderungen zu untersuchen und dabei stets dieselben realen Daten zu verwenden. 24



- 25 **Abb. 2:** Modell für den digitalen Zwilling. 3D-CAD-Modell des Baggers (a und b), bewegliche Einzelteile des Baggers wie Ausleger (c), Löffelstiel (d), Löffel (e), Oberwagen (f) und Unterwagen (g), die alle algorithmisch einzeln angesteuert werden. (Quelle: Fraunhofer IOSB)

## 2.6 Schnittstelle zu BIM und GIS

- 26 Dadurch, dass alle Messdaten (und ggf. auch Planungen) ohnehin digital vorliegen, und für die Interaktion der Robotersysteme mit der Welt oder untereinander gemeinsame Karten erstellt werden, ist es nur naheliegend, diese Daten auch in einer Form für die Weiterverwendung durch den Menschen dauerhaft vorzuhalten. Hierzu existieren BIM/GIS-Systeme (Building Information Modeling/Geographic Information Systems) und die Anbindung eines autonomen Robotersystems an solche Systeme ist prinzipiell möglich, da alle Daten jederzeit digital vorliegen. In diesen BIM/GIS-Systemen könnten dann etwa Aushubmengen oder auch der Fortschritt des Vorhabens zu Dokumentationszwecken abgelegt werden.

Die Frage ist, wo der Schwerpunkt der Betrachtung liegt: Ist das Ziel ein BIM-System, kann beispielsweise mit Dreiecksnetzen gearbeitet werden, um unregelmäßige Bodengeometrien zu beschreiben. Der Fokus von BIM-Elementen liegt üblicherweise jedoch bei menschengemachten Objekten und weniger bei der Beschreibung natürlicher Geometrien, welche in den gängigen BIM-Datenformaten derzeit nur wenig effizient abgelegt werden können. Daher werden für eine Altlastensanierung aktuell wohl noch eher GIS-Systeme das Ziel sein. Allerdings wachsen GIS und BIM-Systeme immer stärker zusammen, und es ist zu erwarten, dass diese eher technischen Probleme durch Erweiterungen der Standards gelöst werden können. 27

Da bei BIM ein erheblicher Fokus auf der semantischen Bedeutung der Objekte liegt, ist daher meist noch ein zusätzlicher Verarbeitungsschritt der Sensordaten des robotischen Systems nötig, wenn man die Daten in ein BIM-System integrieren möchte. Mithilfe der semantischen Segmentierung (s. Erläuterung in Kapitel 2.2.3) der Umgebung wird allen Messdaten (z. B. den Punktwolken) eine Bedeutung zugeordnet, meist in Form einer Zugehörigkeitsklasse. 28

Ein Messpunkt ist zunächst nicht mehr als ein geometrischer Ort im Raum, der vielleicht noch eine Helligkeits- oder Farbinformation enthält und zustande kam, weil dort vom Messsystem ein Objekt erfasst wurde. Allerdings ist diese Information an sich oft nicht ausreichend, und es ist viel wichtiger, dass manche Punkte mitsamt ihrer Nachbarpunkte z. B. zu einer Wand gehören, manche zu einem Baum oder einem Gebüsch, während andere Punkte befahrbaren Boden darstellen. 29

In Abbildung 3 ist exemplarisch eine semantische Segmentierung gezeigt. Diese Segmentierung stammt nicht aus der Altlastensanierung, sondern wurde auf Basis von Orthofotos (verzerrungsfreie und maßstabgetreue Abbildung der Erdoberfläche) einer Stadt, die aus dem SUM-Datensatz (für eine Beschreibung siehe [2]) erzeugt wurden, algorithmisch erstellt. Je nach geforderter Detaillierung und Komplexität der Umgebung ist der Aufwand für eine derartige Segmentierung jedoch keinesfalls zu unterschätzen und stellt im Grunde genommen eine eigene Teildisziplin dar, für die viel Aufwand betrieben werden muss. Weitere ausführliche Informationen zum Spannungsfeld von BIM und GIS liefert der Leitfaden Geodäsie und BIM [3]. 30



weiß: Gebäude  
mittelgrau: Untergrund

hellgrau: hohe Vegetation  
dunkelgrau: Fahrzeuge



- 31 **Abb. 3:** Beispiel einer semantischen Segmentierung. Oben: Texturierte Schrägsicht der 3D-Szene. Unten: Segmentierung in Klassen. Die verwendeten Klassen sind wie folgt: Untergrund, Gebäude, Hohe Vegetation, Fahrzeuge. Bilder mit freundlicher Unterstützung von Max Hermann, erstellt (Quelle: Fraunhofer IOSB).

### 3 Stand der Technik

Zum Stand der Technik möchten wir vorausschicken, dass es weltweit in der mobilen Robotik unzählige Arbeiten gibt, die die unterschiedlichen Teilaspekte intensiv bearbeiten. Es gibt weltweit sehr viele Forschungsgruppen auf dem extrem breiten Gebiet der mobilen Robotik. [4] bietet einen allgemeinen Überblick über alle Teilbereiche der Robotik. Wir fokussieren uns in diesem Beitrag auf den robotischen Einsatz mobiler schwerer Arbeitsmaschinen. 32

Zunächst möchten wir über die industrielle Verfügbarkeit Auskunft geben. Kommerzielle Hersteller erforschen Automatisierungsmöglichkeiten für schwere Maschinen als Teil ihrer Unternehmensstrategie [5]. Kommerziell erhältlich sind Assistenzsysteme vor allem zur Unterstützung von Planierarbeiten, bei denen ein ansonsten weitgehend unveränderter Bagger, der auf einen menschlichen Bediener ausgerichtet ist, mit Sensoren, einer Benutzeroberfläche und zusätzlichen Bedienelementen ausgestattet wurde (TopCon [6], Caterpillar (CAT) [7], Kobelco/Leica [8], Novatron [9], John Deere [10]). Bagger mit erweiterten Unterstützungsfunktionen bietet Komatsu [11] an. 33

Seit Kurzem wird das vollständig autonome Grabenziehen für kompatible Bagger von Built Robotics [12] angeboten. Allerdings scheint die Abladung des Aushubmaterials nur direkt neben dem Graben zu erfolgen. Es gibt auch Bemühungen von ASI Robots, schwere Maschinen zu automatisieren, indem sie den Menschen durch Sensoren und Stellantriebe ersetzen, ohne die Ansteuerung der Maschinen dabei wesentlich verändern zu müssen [13]. Vollelektrische Fahrzeuge ohne die Schwierigkeiten, die die Hydraulik bei der Steuerung mit sich bringt, sind eine sehr junge Ergänzung der kommerziell erhältlichen Baumaschinen [14]. 34

Bemühungen um die Automatisierung von Schwermaschinen wurden schon früher unternommen, oft mit einem anderen Fokus. In der Forschung zu autonomen Aushubarbeiten leistete Singh [15, 16, 17, 18] Pionierarbeit, wobei der Schwerpunkt jedoch allein auf der Aushubaufgabe lag und die Vermeidung von Hindernissen oder das autonome Fahren des Baggers nicht berücksichtigt wurde. Detaillierte Steuerungsstrategien für den Manipulator bei Grabungsaufgaben wurden in [19, 20, 21] entwickelt. 35

Das Robotiklabor der TU Kaiserslautern forscht auch an der Autonomiefunktionalität von Schwermaschinen [22] oder am autonomen Aushub [23]. In der aktuellen Forschung wird die modellprädiktive Steuerung eingesetzt, z. B. bei der Beladung eines Kippers [24] oder bei der Manipulatortrajektorienplanung [25]. Die Planung der Grabungsbewegung eines automatisierten Baggers unter Verwendung von Erreichbarkeitskarten wurde auch in [26, 27] untersucht. 36

- 37 Akademische Forschung zur Automatisierung eines Schreitbaggers wird von der ETH Zürich betrieben [28, 29]. Im Projekt AKIT wurde an nachrüstbaren Autonomiefunktionen für Nutzfahrzeuge geforscht [30]. Ein Forschungsprojekt, das sich mit übergeordneter Automatisierung und drahtloser Vernetzung für Bauaufgaben befasst, ist „Bauen 4.0“ [31].
- 38 Die hier gezeigten Demonstratorfahrzeuge sind im Rahmen der Forschungsarbeiten des Kompetenzzentrums ROBDEKON [32] entstanden, das sich seit 2018 der Robotertechnologie für Dekontaminationsaufgaben widmet und in der Autonomisierung von Arbeitsmaschinen großes Potenzial sieht, Menschen von gefährlichen Tätigkeiten zu befreien.

#### 4 Exemplarische Umrüstung

- 39 Im folgenden Kapitel soll ein Überblick gegeben werden, welche Arbeiten erfolgen mussten, um die Autonomiefunktionalitäten des Raupenbaggers IOSB.Alice und des Schreitbaggers ARTER im Rahmen von ROBDEKON zu ermöglichen

##### 4.1 IOSB.Alice

- 40 IOSB.Alice ist die Bezeichnung des im Rahmen von ROBDEKON umgerüsteten Raupenbaggers des Fraunhofer IOSB.

##### 4.1.1 Ansteuerung

- 41 Die komplette Ansteuerung der Fahrzeughydraulik wurde herstellereitig digitalisiert, so dass über geeignete Befehle auf dem Fahrzeug-CAN-Bus alle Fahr- und Gelenkaktionen ausgeführt werden können. Hierzu muss die Autonomiesoftware Echtzeitanforderungen erfüllen, da das System bei zu langen Antwortzeiten einen Fehler annimmt und stoppt. Bei den sogenannten Bussystemen handelt es sich um Leitungs- bzw. Kommunikationssysteme zur Datenübertragung zwischen den Steuergeräten und ansteuerbaren Komponenten. Der CAN-Bus (Controller Area Network-Bus) ist ein Bussystem, das zeitliche Garantien bezüglich der Verarbeitungsdauer von Befehlen gibt und hat sich in modernen Kraftfahrzeugen als Standard-Bus durchgesetzt.

##### 4.1.2 Hydraulik

- 42 Am Hydrauliksystem ist auch Sensorik zur Erfassung der Hydraulikdrücke verbaut. Hier soll bei einer Druckerhöhung abgeleitet werden, ob ein unerwartetes Hindernis die Ausführung erschwert und zunächst beseitigt werden muss. Dies soll das Gefühl und die Erfahrung ersetzen, die einem geüb-



ten Baggerbediener erlauben, durch den gefühlten Widerstand auf Hindernisse zu schließen.

#### **4.1.3 Gelenksensorik**

Der Bagger wurde nach unseren Wünschen vom Hersteller durch Winkelmessensensoren ergänzt. Prinzipiell könnte stattdessen (oder ergänzend) auch eine Zylinderlängenmessung der Hydraulikzylinder zum Einsatz kommen. Gerade bei hydraulischen Systemen ist es entscheidend, die tatsächliche Gelenkstellung zu messen, da die kommandierten Befehle (um eine bestimmte Baggerarmstellung zu erreichen) je nach aktuell herrschendem Hydraulikdruck unterschiedliche Ergebnisse erzielen. Damit die geforderte Gelenkstellung erreicht wird, muss die Regelung Zugriff auf eine zuverlässige Erfassung des Ist-Zustandes bekommen. Denkbar wäre auch eine kamerabasierte Schätzung aufgrund der bekannten Fahrzeuggeometrie, jedoch sind aktuelle Verfahren dafür noch nicht genau genug.

43



44 **Abb. 4:** Vom Hersteller auf Anfrage nachgerüstete Gelenkwinkelsensorik für die Autonomiefunktionen. (Quelle: Fraunhofer IOSB)

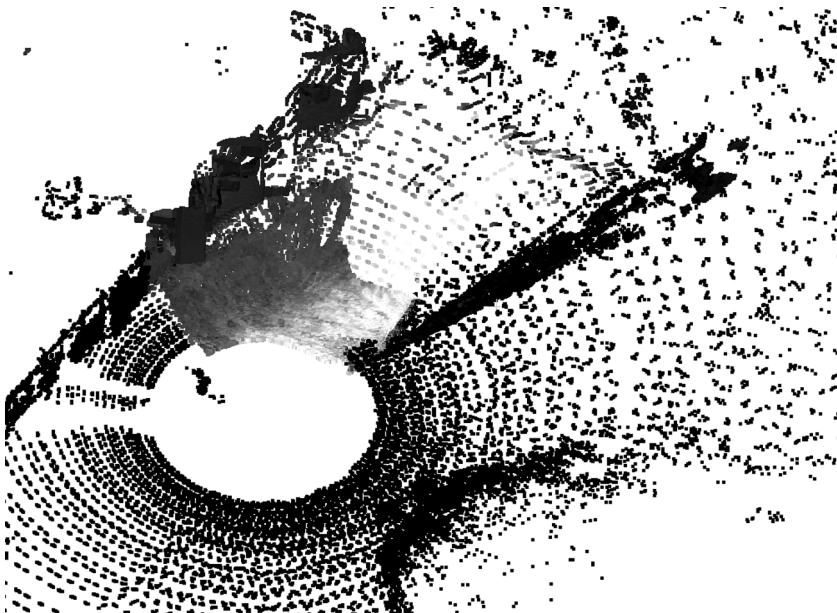
#### 4.1.4 Inertialmesseinheit mit GNSS (Global Navigation Satellite System)

Als Inertialmesseinheit kommt für die autonome Navigation des Baggers eine hochpräzise SBG Ekinox zum Einsatz. Diese dient als Basissensorik für die Berechnung der Eigenbewegung. Es musste darauf geachtet werden, eine Montageposition zu finden, die die Eigenbewegung des Oberwagens möglichst gut erfasst, aber dennoch von Motorvibrationen nur wenig beeinträchtigt wird. In der IMU integriert ist ein 2-Antennen-RTK-GNSS-System (Real Time Kinematic), welches eine sehr genaue Absolutposition mit Zentimetergenauigkeit bei unverdecktem Satellitenempfang liefert. Die Antennen wurden auf dem Oberwagen nachgerüstet. 45

#### 4.1.5 Umfeldsensorik

Für die Erfassung des Umfelds stellen LiDARe die primäre Sensorik dar. Es sind 4 Ouster Sensoren verbaut, die eine 360°-Erfassung um den Bagger herum gewährleisten, wobei die Anordnung der Sensoren so gewählt wurde, dass die Auflösung im Arbeitsbereich nicht nur besonders hoch ist, sondern dort auch die Überlappung der Sensorbereiche am größten ist. 46

Des Weiteren ist eine hyperspektrale Stereo-Kamera eingebaut, die einerseits den Arbeitsbereich noch dichter abtasten soll, andererseits durch die umfassenden Farbinformationen weitere Autonomiefunktionen ermöglichen soll, wie etwa die Trennung unbelasteter von belasteten Böden, bei denen die Farbunterschiede durch die Belastung vielleicht erst im nahen Infrarotbereich klar unterscheidbar sind. Durch intelligente Sensorfusion werden beide Informationen (LiDAR und Kamera) miteinander verbunden und die Stärken beider Systeme kombiniert: LiDARe haben im Allgemeinen eine präzisere Tiefenschätzung, während Kamerasysteme die Umgebung viel dichter abtasten (Abbildung 5). 47

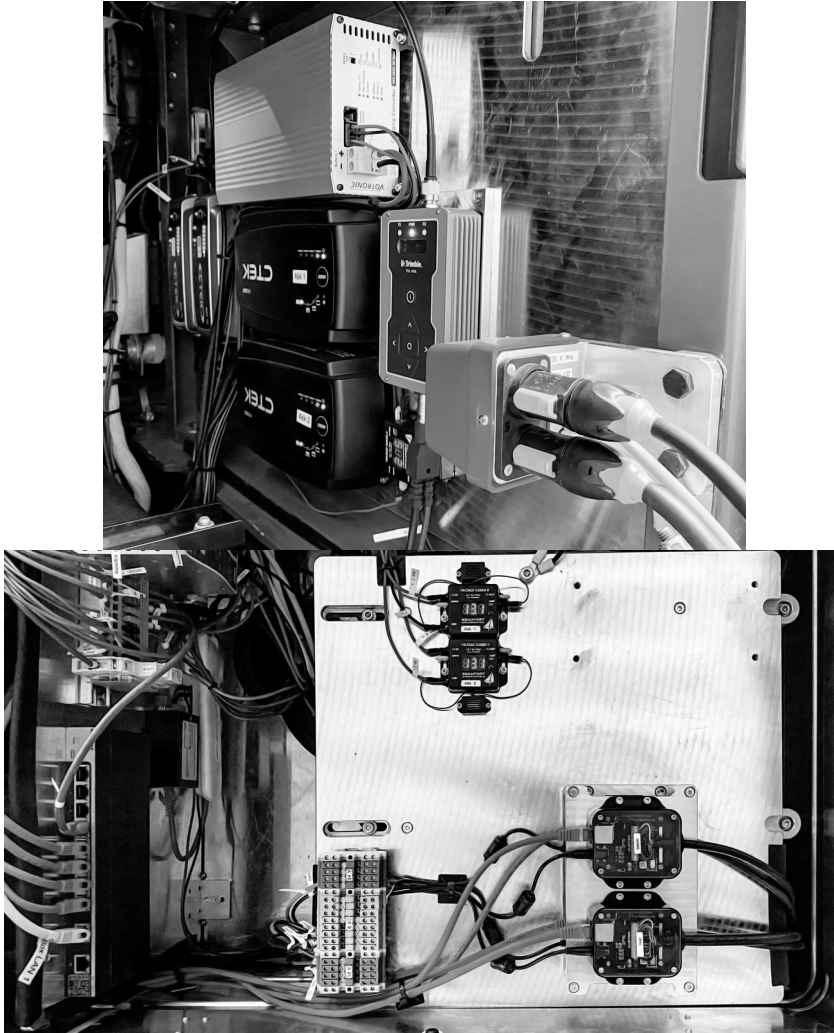


- 48 **Abb. 5:** Erweiterung des Arbeitsbereichs um Farbinformation und eine höhere Punktdichte durch die Kamerainformationen. In schwarz sind die LiDAR-Messpunkte der Umgebung. Die dichte Punktbelegung im oberen Bereich kommt durch die Kamerainformationen hinzu. (Quelle: Fraunhofer IOSB)

#### 4.1.6 Energieversorgung

- 49 Die verbaute Rechentechnik für die Autonomie soll einerseits für Entwicklungszwecke bei ausgeschaltetem Motor auch noch weiterlaufen, andererseits jedoch die Starterbatterie des Baggers nicht belasten. Daher wurden zusätzliche Batterien für die Autonomiehardware eingebaut, die mit Ladewandler, Batteriewächter und Sicherungen ausgestattet sind, um einerseits die Starterbatterie von der Belastung durch die Rechentechnik vollständig zu entkoppeln und um andererseits auch ein Laden über eine 230V-Versorgung zu ermöglichen (Abb. 6).
- 50 Dies erlaubt die Entwicklung am System ohne durchgängig den Motor laufen lassen zu müssen. Die gewählte Energieversorgung ist sicherlich keine Lösung, wie sie später in Seriengeräten umgesetzt werden wird, dennoch möchten wir einen kurzen Einblick in die in ROBDEKON gewählte Lösung geben. Wenn bei entsprechendem Reifegrad der Autonomiefunktionen die

Entwicklung abgeschlossen ist, kann zukünftig in Seriengeräten auf diese Art der Energieversorgung verzichtet werden.



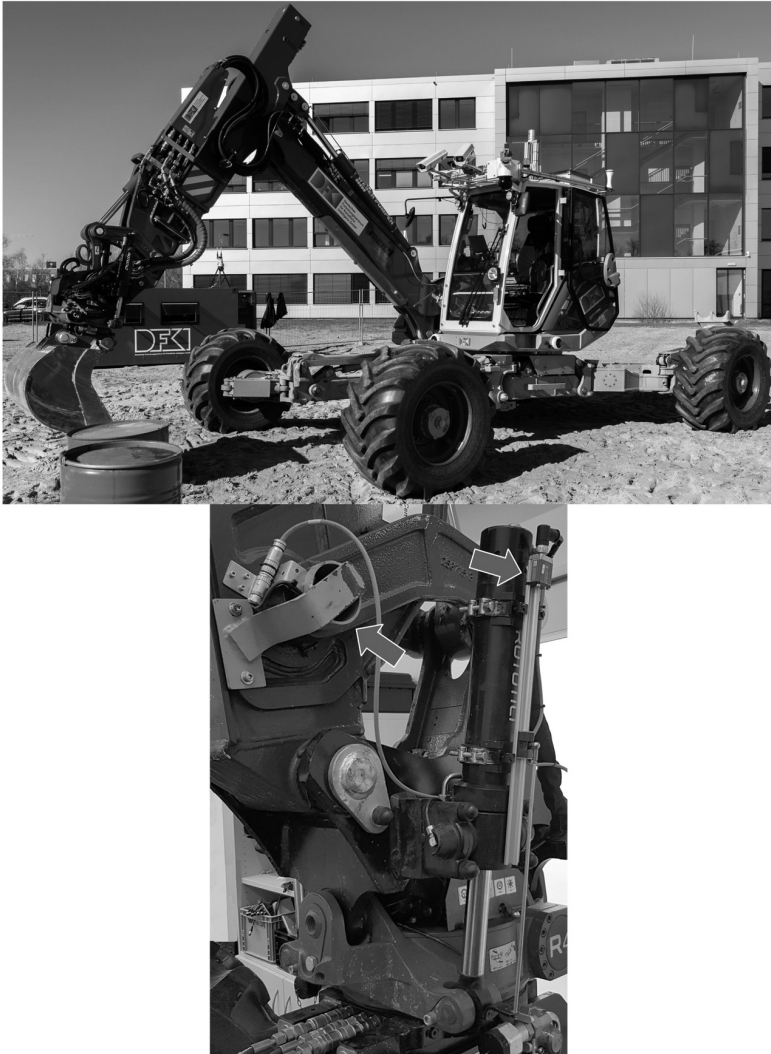
**Abb. 6:** Ladetechnik und Energieversorgung der Rechentechnik im Bagger-Motorraum (oben) und in der Anbaubox (unten). (Quelle: Fraunhofer IOSB)

#### 4.2 ARTER

- 52 Der Autonomous Rough Terrain Excavator Robot (ARTER), wie in Abbildung 7 dargestellt, ist ein nachgerüsteter Schreitbagger auf Basis des Menzi Muck M545<sup>1)</sup>. Das Fahrzeug wiegt 13 Tonnen und verfügt über eine anpassungsfähige Rad-Bein-Konstruktion, die ihm insgesamt 31 individuelle Freiheitsgrade zur Steuerung bietet. Das Fahrzeug ist bereits für die Fernsteuerung und den autonomen Betrieb umgerüstet.
- 53 Es wurden umfangreiche Änderungen an der Hydraulik und den elektrischen Schaltkreisen vorgenommen, um die Steuerung durch den Computer zu ermöglichen. Zusätzlich wurden mehrere Sensoren für die Gelenke sowie für die Wahrnehmung hinzugefügt, um den internen und externen Zustand des Roboters zu erfassen. Die folgenden Unterkapitel geben einen Überblick über die nachgerüsteten Änderungen.

---

1) <https://www.menzimuck.com/en/product-groups/menzi-muck-walking-excavators/>



**Abb. 7:** Der ARTER-Roboter (oben) und der Sensoraufbau (unten) für die Messung der Gelenkposition und -geschwindigkeit. Für die Gelenke sind die Sensoren entweder Drehgeber oder lineare Weggeber, von denen Beispiele durch Pfeile markiert sind. (Quelle: DFKI GmbH)

54

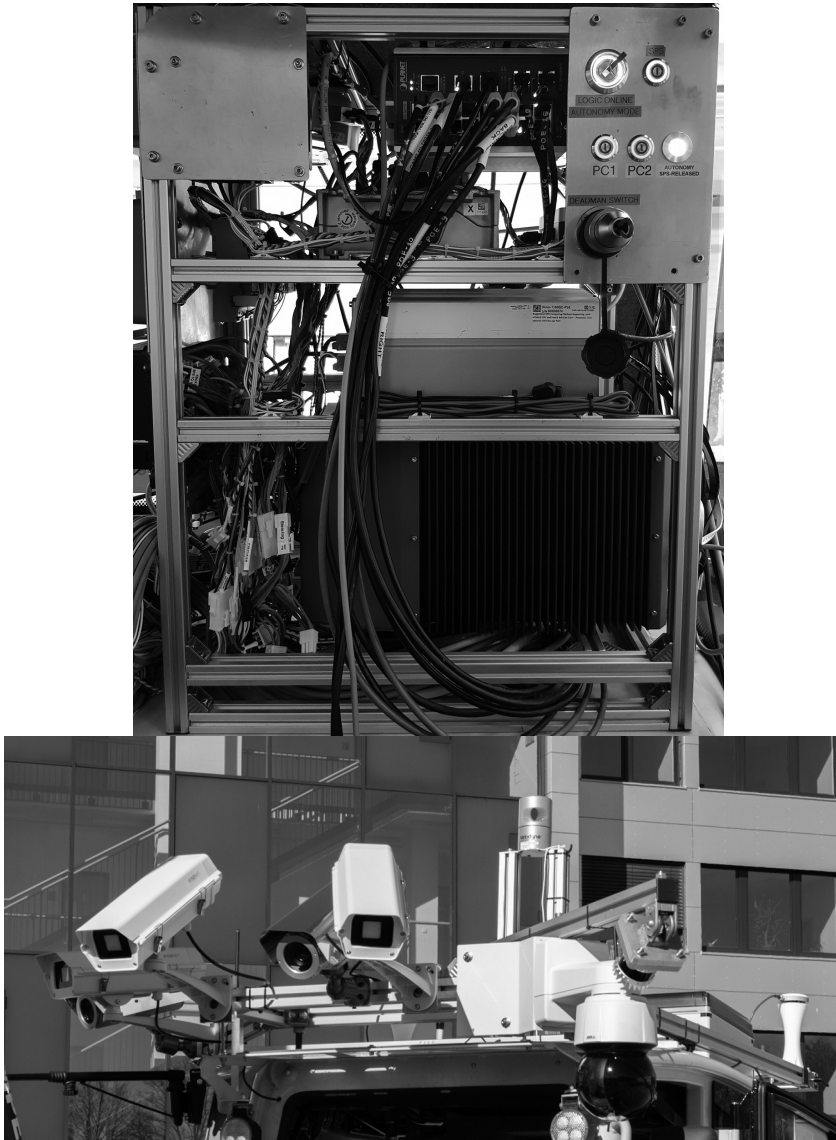
### 4.2.1 Hydraulik

- 55 Zusätzliche Hydraulikkreise wurden parallel zu den bestehenden Kreisen hinzugefügt, so dass die ursprüngliche Steuerung (Joystick-Steuerung von Menzi Muck) erhalten bleibt. Die Umschaltung zwischen der ursprünglichen Steuerung und den neuen Autonomie-Steuerungen erfolgt elektrisch. Die neuen Ventile, direktgesteuert oder vorgesteuert, sind Proportionalventile und können elektronisch angesteuert werden. An den Aktuatoren wurden zudem Drucksensoren angebracht, um den Hydraulikdruck zu messen und die Kraft am Endeffektor (dem eigentlichen Arbeitsgerät am Ende des Armes) abzuschätzen.

### 4.2.2 Elektrik

- 56 Die zentrale Komponente der elektrischen Steuerung ist die nachgerüstete Autonomie-SPS (speicherprogrammierbare Steuerung). Diese SPS steuert alle Ventile, sammelt Sensordaten, kommuniziert mit den übergeordneten Steuerrechnern, aktiviert oder deaktiviert die Autonomie usw. Außerdem steuert sie auch alle Positions- und Geschwindigkeitsregler der Gelenke.
- 57 Fünf verschiedene CAN-Busse sind an die autonome SPS angeschlossen, um mit den Sensoren, den Eingabe-/Ausgabegeräten und dem Fahrzeug zu kommunizieren. Die Abbildung 8 (oben) zeigt das Elektronik-Rack mit der SPS, den übergeordneten Steuerrechnern, dem Netzwerk-Switch usw. Die elektrischen Verbindungen sind so ausgelegt, dass die Steuerventile für die Autonomie mit einem der Notschalter oder durch die Autonomie-SPS deaktiviert werden können. Die Autonomie-SPS ist so programmiert, dass sie die Autonomie bei einem Hardware-Fehler deaktiviert.





**Abb. 8:** Das Elektronikrack (oben) und die oben auf der Kabine angebrachte Umfeldsensorik (unten). (Quelle: DFKI GmbH)

### 4.2.3 Gelenksensorik

- 59 Die Gelenkpositionen und -geschwindigkeiten werden gemessen, um den internen Zustand des Roboters abzuschätzen und um die Position und Geschwindigkeit der einzelnen Gelenke zu steuern. Zu diesem Zweck wurden an allen Gelenken Sensoren angebracht, je nach Möglichkeit und Zweckmäßigkeit entweder rotierend oder linear arbeiten. Die Sensoren können direkt am Gelenk oder am Aktuator (Hydraulikzylinder) angebracht werden. In einigen Fällen wird der Sensor an einem Zwischengelenk im parallelkinematischen Mechanismus angebracht. Siehe Abbildung 7 (unten) für Beispiele. Durch die Anbringung der Sensoren an verschiedenen Stellen für verschiedene Gelenke entstehen verschiedene Steuerungsräume: Gelenkraum, Sensorraum und Aktorraum. Die Befehle und der Zustand des Gelenks werden im Gelenkraum berechnet. Die Daten vom Sensor befinden sich im Sensorraum und die Steuerung läuft im Aktorraum. Die Konvertierung zwischen den Räumen wird von der autonomen SPS durchgeführt.

### 4.2.4 Umfeldsensorik

- 60 Neben der internen Zustandsabschätzung muss der ARTER-Roboter auch seinen Zustand in Bezug auf die Umgebung abschätzen. Dies wird durch den Einsatz einer Vielzahl von Sensoren erreicht, von denen die meisten Wahrnehmungssensoren sind. Dazu gehören 3D-LiDAR-Sensoren, Bildverarbeitungskameras, Wärmebildkameras und Fernsichtkameras. Die LiDAR-Sensoren liefern eine hochdichte 3D-Punktwolke der Umgebung für SLAM- und Manipulationszwecke (SLAM = Simultane Lokalisierung und Kartierung). Die Bildverarbeitungskameras erzeugen RGB-Bilder (Bilder aus den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau), die zur Segmentierung, Objekterkennung, Markierungserkennung usw. verwendet werden können. Die Remote-Vision-Kameras und die Wärmebildkameras streamen Videos an den Bediener für die Fernsteuerung. Neben den Wahrnehmungssensoren gibt es ein Inertial-Navigationssystem (INS), das die geschätzte Bewegung des Fahrzeugs auf der Grundlage von GPS und Beschleunigungsmessungen liefert. Abbildung 8 (unten) zeigt die Sensoren auf dem Dach der ARTER-Bedienerkabine.

## 5 Autonomiefunktionen

- 61 In diesem Kapitel sollen beispielhaft die im Kompetenzzentrum ROBDEKON umgesetzten Autonomiefunktionen vorgestellt werden, um einen besseren Eindruck der Arbeitsweise zu erlangen.

## 5.1 Sicherheitsfunktionen

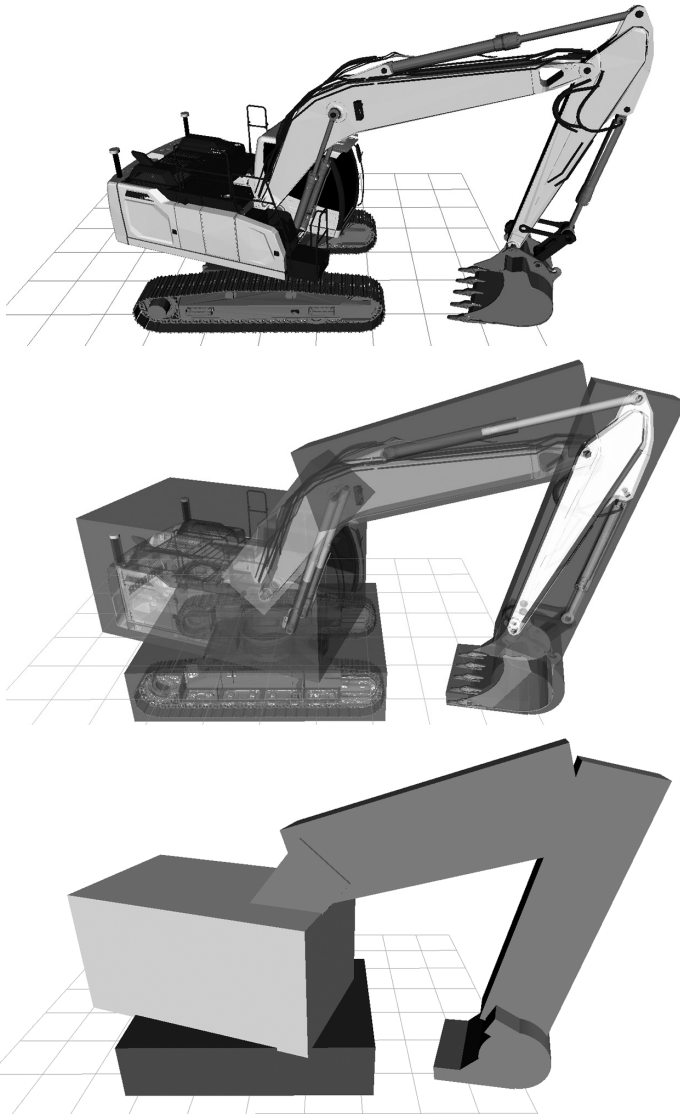
Die wichtigste Autonomiefunktion ist die Bereitstellung von Sicherheitsfunktionen. Das bedeutet, dass die Baumaschine weder sich selbst noch andere als die zu bearbeitenden Objekte im Arbeitsbereich berührt und auch Personen im Umfeld nicht verletzen kann. 62

### 5.1.1 Funk-Not-Aus

Während der Entwicklungsphase der autonomen Demonstratorsysteme in ROBDEKON bearbeiten die Systeme nur dann autonome Aufgaben, wenn ein Funk-Not-Aus mit dem System verbunden ist. Damit können autonome Aufgaben sofort abgebrochen werden und das System akzeptiert keine weiteren Befehle aus der Autonomiesoftware. Diese Absicherung durch Abschaltbarkeit aus der Ferne werden spätere Seriensysteme sicherlich auch besitzen. 63

### 5.1.2 Eigenkollisionsvermeidung

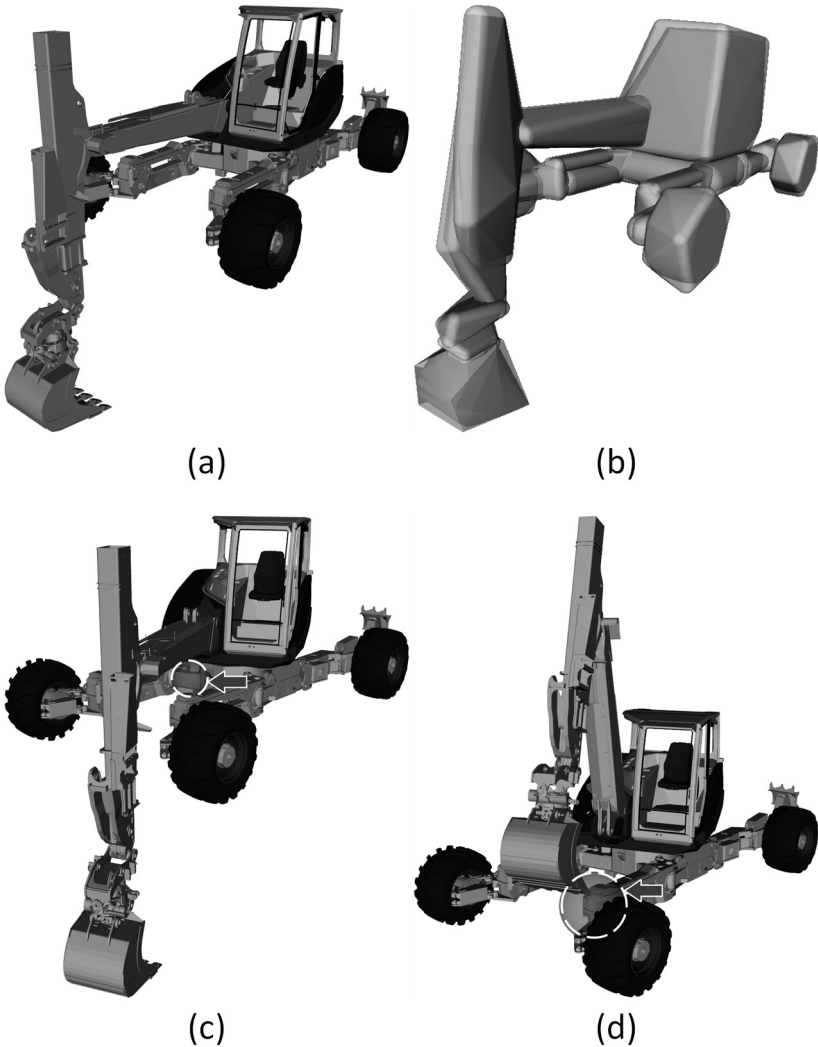
Rein von der Erreichbarkeit ihrer Manipulatoren, können sich schwere Arbeitsmaschinen selbst beschädigen. Dies muss im Betrieb freilich ausgeschlossen werden. Daher wird für die Vermeidung von Eigenkollisionen eine Überprüfung auf niedrigster Softwareebene eingebaut, die verhindert, dass Befehle gegeben werden können, die den Manipulator in den Raum der Baumaschine eindringen lassen und so für eine Beschädigung sorgen. Da die Berechnung hierfür stets sehr schnell – nämlich in Echtzeit – erfolgen muss, wird mit einem stark vereinfachten Modell der Baumaschine als Summe von einfachen geometrischen Körpern, z. B. Quadern, gerechnet. Für den Bagger IOSB.Alice ist dies in Abbildung 9 dargestellt. 64



65 **Abb. 9:** Baggermodell für die Eigenkollisionsvermeidung: CAD-Modell und vereinfachtes Modell des Baggers für Kollisionsprüfung und Abstandsberechnung. (Quelle: Fraunhofer IOSB)

Eine weitere Methode zur kontinuierlichen Detektion von Kollisionen und des Kollisionsrisikos ist die Verwendung der Bibliothek Kinematic Continuous Collision Detection (KCCD) [33]. Sie verwendet konvexe Hüllen, um die Kollisionsmodelle der Robotergelenke darzustellen. Dies ermöglicht eine Kollisionsvermeidung, die auch in Echtzeit funktioniert und genau ist. Der Algorithmus berücksichtigt auch die aktuelle Geschwindigkeit jedes Gelenks, um das Kollisionsvolumen so zu vergrößern, dass für jedes Gelenk ein ausreichender Anhalteweg zur Verfügung steht. Abbildung 10 zeigt ein solches Kollisionsmodell für das ARTER-System.

**66**



67 **Abb. 10:** CAD-Model (a) des ARTER-Roboters und des entsprechenden KCCD-Modells (b). Das Kollisionsrisiko für zwei verschiedene Posen ist auf den beiden unteren Bildern (c, d) dargestellt. (Quelle: DFKI GmbH)

### 5.1.3 Arbeitsraumüberwachung

Für die Ausführung der Arbeiten ist es notwendig, dass die autonome Baumaschine ihre Umgebung erfasst. Aus den vorliegenden Sensordaten können bewegte Objekte von unbewegten Objekten getrennt werden. Die unbewegten Objekte werden dabei direkt in eine Hinderniskarte eingetragen, welche kontinuierlich aktualisiert wird. Für die bewegten Objekte (z. B. ein Fahrzeug oder ein Mensch) können Vorhersagen erfolgen, wie sie sich jeweils voraussichtlich innerhalb der nächsten Sekunden weiterbewegen werden, d. h., es kann abgeschätzt werden, wo sich Kollisionsrisiken ergeben könnten. 68

Mit diesen Informationen kann das autonome System je nach Vorgabe entweder um ein Hindernis herum planen und eine andere Lösung suchen oder den Betrieb einstellen, bis das dynamische Hindernis aus dem Arbeitsraum verschwunden ist. Diese Aufgabe der Behandlung von Hindernissen benötigt bei näherer Betrachtung viele Einzelentscheidungen, denn ab welcher Zeit soll ein Hindernis in die statische Hintergrundkarte aufgenommen werden und gilt dann nicht länger als dynamisch? Das lässt sich nicht pauschal beantworten und hängt vom Objekt, von der Situation und der aktuellen Aufgabe ab. Ein Mensch sollte etwa deutlich weniger wahrscheinlich als statisches Hindernis bewertet werden, als etwa ein Transportfahrzeug, das möglicherweise für einige Stunden an einer Stelle abgestellt bleibt. 69

Zeitgleich wird eine statische Navigationskarte aufgezeichnet. Da diese nur die statischen Hindernisse enthalten und in einer sich ändernden Umgebung aktuell gehalten werden soll, kommen hier zusätzliche statistische Verfahren zum Einsatz, um auch Informationen über den freien Raum einzubeziehen. 70

## 5.2 Ausbaggern eines Bereichs bis zu einer bestimmten Tiefe

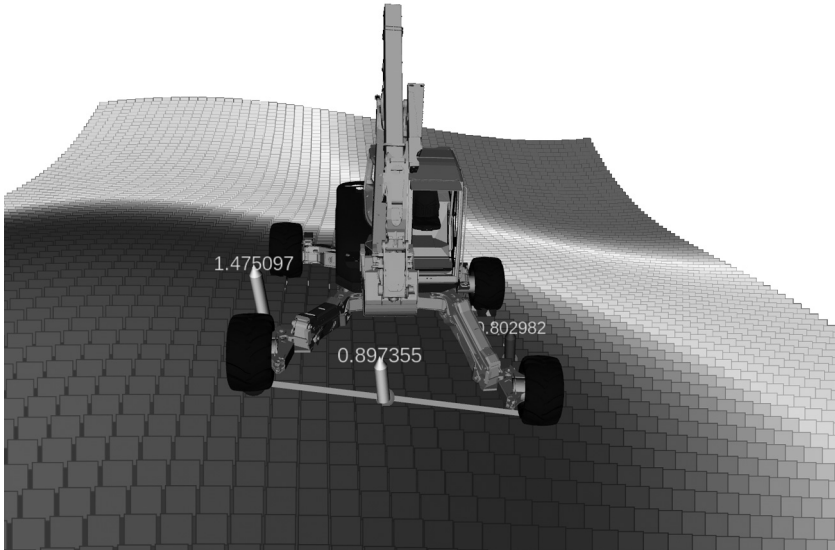
Eine eigentliche Nutzfunktion, die autonom durchgeführt wird, ist das im autonomen Raupenbagger „IOSB.Alice“ umgesetzte autonome Abtragen einer Erdschicht einer vorgegebenen Mächtigkeit. Hier muss der Nutzer auf einer Karte ein Polygon angeben, das ausgehoben werden soll. Die Baumaschine beherrscht die autonome Anfahrt mit Hindernisvermeidung und teilt das auszuhebende Polygon in einzelne Grabevorgänge auf. Mit einem Vergleich, ob die gewünschte Aushubgeometrie (z. B. eine vorgegebene konstante Tiefe) bereits erreicht ist, überprüft die Maschine den Fortschritt. Dabei werden immer die aktuellen Sensordaten verwendet und kein starrer Plan abgearbeitet, so dass auch nachgerutschtes Erdreich entfernt wird, sofern die gewünschte Tiefe noch nicht erreicht wurde. 71

- 72 Während des Aushebens ist die Hindernisvermeidung weiter aktiv, so dass in den Arbeitsraum eindringende Personen oder Objekte rechtzeitig erkannt werden. Kombiniert ist der autonome Aushubvorgang des Baggers mit einem autonomen Transportfahrzeug (Traktor mit kippbarem Anhänger), das den Aushub selbstständig zu einem vorher angegebenen Ablageort fährt und dort abkippt. Dies wird auf technischer Ebene detailliert in [34] dargelegt.

### 5.3 Autonomes Fahren des Schreitbaggers

- 73 Ein Schreitbagger ist mit höhenverstellbaren Beinen ausgestattet, die sich an Bodenunebenheiten anpassen können. Dies erhöht die Stabilität und das Geländegängigkeit des Fahrzeugs in schwierigem Gelände. Die Automatisierung der Bodenanpassung ist eine Herausforderung, da sie mehrere Faktoren wie die Geländestruktur, die Bein kinematik, den Stabilitätsspielraum, Kollisionen, Rad-Boden-Kontakt usw. berücksichtigen muss.
- 74 In ROBDEKON wurde eine Lösung entwickelt, die Deep Reinforcement Learning [35] in der Simulation einsetzt, um eine Steuerung zu erlernen, die sich automatisch an kontinuierliches und unebenes Gelände anpasst. Die Simulation generiert zufällige Terrains und der Regler trainiert auf diesen Terrains, um die Beinbewegung zu erlernen, die die Kippstabilität maximiert. Dies vermeidet den Kontakt des Fahrgestells mit dem Boden und gewährleistet einen optimalen Kontakt zwischen Rädern und Boden. Weitere Forschungsarbeiten müssen durchgeführt werden, um dies auf den tatsächlichen Roboter zu übertragen und in realistischen Szenarien zu testen. Abbildung 11 zeigt die Visualisierung des Roboters in einer simulierten Umgebung.

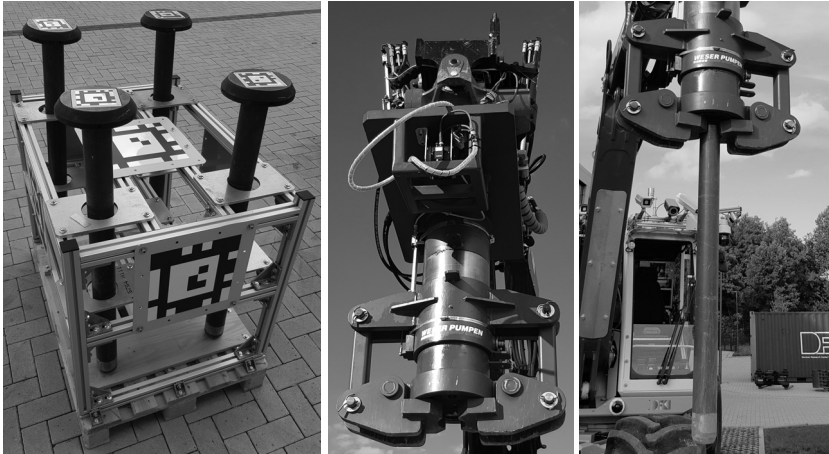




**Abb. 11:** Visualisierung des ARTER-Roboters auf künstlich erzeugtem, unebenem Gelände in der Simulation, um die Steuerung für die Geländeanpassung zu lernen. Die Pfeile und die Zahlen zeigen die Haltungsstabilität für verschiedene Kanten des Stützpolygons. (Quelle: DFKI GmbH) 75

#### 5.4 Autonome Beprobung

Eines der Szenarien, das im Rahmen des ROBDEKON-Projekts umgesetzt wurde, war die automatische Bodenbeprobung. Ziel war es, an vordefinierten Stellen autonom Bodenproben zu nehmen und nach der Analyse der chemischen Zusammensetzung des Bodens eine Karte zu erstellen, die die Verteilung der Schadstoffe zeigt. Zur Entnahme der Proben wurden spezielle Lanzen mit Markierungen verwendet, und es wurde auch ein spezieller Greifer entwickelt, um die Lanze zu greifen. Abbildung 12 zeigt die Lanze und den Greifer. 76



- 77 **Abb. 12:** Das linke Bild zeigt die Bodenentnahmelanze auf dem Gestell. Sowohl am Gestell als auch an der Lanze sind Marker angebracht, um die Position zu erkennen. Das mittlere Bild zeigt den speziell entwickelten Greifer zum Greifen der Lanze und das rechte Bild zeigt den Greifer und die Lanze im gegriffenen Zustand. (Quelle: DFKI GmbH)
- 78 Das Szenario besteht aus mehreren Schritten: Bewegen des Roboters zum Ort der leeren Lanze, Greifen der Lanze, Bewegen zum Ort der Bodenprobenentnahme, Entnahme der Bodenprobe, Bewegen zum Ort der Ablage und Ablegen der Probe. Für die Ausführung der oben genannten Schritte sind u. a. die folgenden Softwaremodule erforderlich: Simultane Lokalisierung und Kartierung (SLAM), Pfadplanung und -verfolgung für das Fahrzeug, kollisionsfreie Pfadplanung und -ausführung für den Manipulator, visuelles Einfädeln für den Manipulator.
- 79 Außer diesen Modulen ist eine übergeordnete Prozesssteuerung notwendig, um die Ausführung der verschiedenen Schritte zu koordinieren. Eine eigene Prozesssteuerung wurde auf der Grundlage von Behavior-Trees<sup>1)</sup> implementiert. Die Behavior-Trees wurden so konzipiert, dass der Bediener die Ausführung jederzeit stoppen und den Roboter fernsteuern kann. Außerdem kann der Bediener die Ausführung des Prozesses mit Hilfe verschiedener, anpassbarer Steuerparameter leicht beeinflussen.

1) [https://github.com/splintered-reality/py\\_trees](https://github.com/splintered-reality/py_trees)

## 5.5 Vor-/Nachteile

Große Vorteile der Automatisierung liegen auf der Hand: Vermeidung von für Menschen gefährlichen oder gesundheitsgefährdenden Arbeiten, konstante Arbeitsleistung ggf. auch rund um die Uhr, mit dem Baufortschritt schritthaltende digitale Erfassung. 80

Nachteilig ist aktuell noch, dass ein autonomes System immer auf unerwartete Situationen stoßen wird, und dann das Eingreifen eines menschlichen Operators erforderlich ist. Dies kann etwa in einem Sensorausfall oder einer Fehlklassifikation der Umgebungselemente begründet sein. Mit immer weitergehenden Fähigkeiten und redundanter Sensorauslegung werden derartige Situationen jedoch immer seltener werden.

Die Arbeitsgeschwindigkeit ist derzeit noch kein primäres Ziel der Forschungsarbeiten, die Funktionalität und Sicherheit stehen bei der Entwicklung im Vordergrund. Aus diesem Grund sind aktuelle Demonstratorsysteme, wie sie in ROBDEKON entwickelt wurden sicherlich noch nicht optimal hinsichtlich der Effizienz. Ebenso sind die Systeme aktuell nicht als fertiges Paket vom Kunden zu erwerben und erfordern noch die Einrichtung durch einen Robotikexperten. 81

Daher fallen für Systeme wie die aktuellen ROBDEKON-Demonstratorsysteme aktuell noch erhebliche Zeit- und Kostenaufwände an, bis die Systeme in der Lage sind, Befehle von einer autonomen Steuerung umzusetzen. Auch die eigentliche Programmierung der Autonomiefunktionalität erfordert Experten aus verschiedenen Disziplinen. Die Hersteller werden jedoch in Zukunft immer besser ansteuerbare Maschinen bauen, so dass der Umrüstungsaufwand erheblich sinken wird. Ebenso ist es einfacher, bestehende Autonomiefunktionalitäten zukünftig anzupassen, als sie von Grund auf neu zu entwickeln. Diese Vorarbeiten sind Aufgabe des Kompetenzzentrums ROBDEKON, damit zukünftig mit Anwendern Lösungen schnell erarbeitet werden können. 82

Wir sind der Meinung, dass Autonomiefunktionen bei Baumaschinen in derselben Weise Einzug halten werden wie Assistenzsysteme beim Pkw, nämlich als Assistenzfunktionen für bestimmte, eng umrissene, Aufgaben, die im weiteren Verlauf immer leistungsfähiger werden. Mit der Zeit werden die übernommenen Aufgaben dann immer komplexer und es ergeben sich vergleichbare Fragestellungen wie bei selbstfahrenden Autos. Als Beispiel sei das Einparken beim Pkw genannt, wo anfangs lediglich reine Abstandssensorik verbaut war und per Piepsignal dem Fahrer ein Hindernis signalisiert wurde, während heutzutage die Parklücke erkannt und vermessen wird und im Anschluss komplett selbstständig eingeparkt werden kann. 83

## 6 Fazit

- 84 Autonome Arbeitsmaschinen werden zukünftig nicht mehr wegzudenken sein. Fachkräftemangel auf der einen Seite und Arbeitsschutz auf der anderen Seite werden dazu führen, dass Aufgaben zumindest teilweise autonom bearbeitet werden und werden müssen. Genauso, wie es heute kaum mehr einen Pkw ohne Antiblockiersystem (ABS) zu kaufen gibt, werden die aktuell noch als Zusatzausstattung erhältlichen Hilfsmittel irgendwann von den Herstellern serienmäßig angeboten. Da die technischen Voraussetzungen bereits vorhanden sind, wird die Entwicklung autonomer schwerer Arbeitsmaschinen erheblich schneller gehen als beim autonomen Pkw.
- 85 In diesem Beitrag wurden im Gegensatz zu einfachen, am Markt bereits verfügbaren, Assistenzfunktionen zur Herstellung von Böschungen fortgeschrittene Autonomiefunktionen zur Bodensanierung vorgestellt, die bereits heute auf echten Baggern erfolgreich eingesetzt werden konnten. Selbstverständlich ist eine Altlastensanierung in ihrer Gänze ein sehr komplexer Vorgang, der heute noch nicht vollständig autonom ablaufen kann. Dennoch können bereits heute einfachere Routineaufgaben autonom vonstattengehen. Die Erfahrung der geübten Baggerfahrer wird zukünftig besser genutzt werden können, weil diese sich auf die anspruchsvollen Arbeiten konzentrieren können und von lästigen eintönigen Aufgaben befreit werden.
- 86 Der meiste Forschungsbedarf wird weiterhin in der intelligenten Abarbeitung von Aufgaben liegen. Es wird von einem autonomen System erwartet, dass es „mitdenkt“, und zwar auf eine Art wie es ein menschlicher Bediener täte. Beim Menschen fallen viele Entscheidungen teilweise auch unbewusst und basieren auf Erfahrungen und „Bauchgefühl“. Eine derartige Bewertung einer Maschine beizubringen, wird eine Kernaufgabe der Zukunft sein.

## 7 Literatur

- [1] Quigley, Morgan, Brian Gerkey, Ken Conley, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Eric Berger, Rob Wheeler and Andrew Ng., 2009. ROS: an open-source Robot Operating System. In: ICRA Workshop on Open Source Software. Kobe, Japan. 2009
- [2] Gao, Weixiao, Liangliang Nan, Bas Boom and Hugo Ledoux, 2021. SUM: A Benchmark Dataset of Semantic Urban Meshes. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing [online]. 2021. vol. 179, p. 108–120. DOI 10.1016/j.isprsjprs.2021.07.008. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271621001854>, zuletzt geprüft am 1.11.2022

- [3] Leitfaden Geodäsie und BIM Version 3.0, 2021. DVW e.V., Runder Tisch G.I.S. e.V., ISBN: 978-3-95786-290-7, Verfügbar unter: <https://dvw.de/BIM-Leitfaden.pdf>, zuletzt geprüft am 1.11.2022
- [4] Springer Handbook of Robotics“, Editors: Bruno Siciliano, Oussama Khatib, 2016, DOI 10.1007/978-3-319-32552-1
- [5] Frank, Martin, 2019. A Step Towards the Design of Collaborative Autonomous Machines – A Study on Construction and Mining Equipment
- [6] TopCon Positioning, 2022–01. [online]. Verfügbar unter: <https://www.topconpositioning.com/machine-control>, zuletzt geprüft am 1.11.2022
- [7] Caterpillar CAT, Grade Assist for Excavators, 2022–07. [online]. Verfügbar unter: [https://www.cat.com/en\\_US/products/new/technology/assist/153921756853575.html](https://www.cat.com/en_US/products/new/technology/assist/153921756853575.html), zuletzt geprüft am 1.11.2022
- [8] Kobelco and Leica Geosystems, 2019–04. [online]. Verfügbar unter: <https://www.kobelco-europe.com/news/kobelco-joins-forces-with-engcon-and-leica-geosystems/>, zuletzt geprüft am 1.11.2022
- [9] Novatron, 2022–01. [online]. Verfügbar unter: <https://novatron.fi/en/automation-for-excavators>, zuletzt geprüft am 1.11.2022
- [10] John Deere Smartgrade Excavators, 2021–06. [online]. Verfügbar unter: <https://www.deere.com/en/news/all-news/2021apr06-smart-grade-excavators/>, zuletzt geprüft am 1.11.2022
- [11] Komatsu iMC (intelligent Machine Control), 2022. [online]. Verfügbar unter: <https://www.komatsu.eu/de/komatsu-intelligent-machine-control>, zuletzt geprüft am 1.11.2022
- [12] Built Robotics, 2022–07. [online]. Verfügbar unter: <https://www.builtrobotics.com/technology/ecosystem>, zuletzt geprüft am 1.11.2022
- [13] ASI Robots Mining Excavator, 2022–01. [online]. Verfügbar unter: <https://asirobots.com/mining/excavator>, zuletzt geprüft am 1.11.2022
- [14] All-Electric Compact Loader, 2022–07. [online]. Verfügbar unter: <https://www.bobcat.com/company-info/innovation/all-electric-compact-loader>, zuletzt geprüft am 1.11.2022
- [15] Singh, Sanjiv, 1995. Synthesis of tactical plans for robotic excavation. Carnegie Mellon University
- [16] Singh, Sanjiv, 1997. The State of the Art in Automation of Earthmoving. Journal of Aerospace Engineering. September 1997. vol. 10
- [17] Singh, Sanjiv and Howard Cannon, 1998. Multi-resolution planning for earthmoving. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on

- Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146). 1998. vol. 1, p. 121–126 vol.1
- [18] Stentz, Anthony, John Bares, Sanjiv Singh and Patrick Rowe, 1999. A Robotic Excavator for Autonomous Truck Loading. *Autonomous Robots*. 1999. vol. 7, p. 175–186
- [19] Maeda, Guilherme Jorge, 2013. Learning and Reacting with Inaccurate Prediction: Applications to Autonomous Excavation
- [20] Maeda, Guilherme J., Ian R. Manchester and David C. Rye, 2015. Combined ILC and Disturbance Observer for the Rejection of Near-Repetitive Disturbances, With Application to Excavation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2015. vol. 23, p. 1754–1769
- [21] Yang, Yajue, Pinxin Long, Jia Pan, Xinbin Song and Liangjun Zhang, 2020. Optimization-Based Framework for Excavation Trajectory Generation. 2020
- [22] Wolf, Patrick, Axel Vierling, Jörg Husemann, Karsten Berns and Peter Decker, 2021. Extending Skills of Autonomous Off-Road Robots on the Example of Behavior-Based Edge Compaction in a Road Construction Scenario. In: ISBN 978–3-658–29716–9
- [23] Groll, Tobias, Steffen Hemer, Thorsten Roperts and Karsten Berns, 2019. Autonomous trenching with hierarchically organized primitives. *Automation in Construction*. February 2019. vol. 98
- [24] Ishihara, Shinji, Akira Kanazawa and Ryu Narikawa, 2021. Realization of Excavator Loading Operation by Nonlinear Model Predictive Control with Bucket Load Estimation. *IFAC-PapersOnLine*. 2021. vol. 54, p. 20–25
- [25] Lee, Dongjae, Inkyu Jang, Jeonghyun Byun, Hoseong Seo and H. Jin Kim, 2021. Real-Time Motion Planning of a Hydraulic Excavator using Trajectory Optimization and Model Predictive Control. 2021
- [26] Zhang, Liangjun, Jinxin Zhao, Pinxin Long, Liyang Wang, Lingfeng Qian, *Feixiang Lu.*, Xibin Song and Dinesh Manocha, 2021. An autonomous excavator system for material loading tasks. *Science Robotics*. 2021. vol. 6, p. eabc3164
- [27] Yang, Yajue, Liangjun Zhang, Xinjing Cheng, Jia Pan and Ruigang Yang, 2019. Compact Reachability Map for Excavator Motion Planning. In: 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2019. p. 2308–2313
- [28] Jud, Dominic, Philipp Leemann, Simon Kerscher and Marco Hutter, 2019. Autonomous Free-Form Trenching Using a Walking Excavator. *IEEE Robotics and Automation Letters*. October 2019. vol. 4
- [29] Jud, Dominic, Simon Kerscher, Martin Wermelinger, Edo Jelavic, Pascal Egli, Philipp Leemann, Gabriel Hottiger and Marco Hutter, 2021.

- HEAP – The autonomous walking excavator. Automation in Construction. 2021. vol. 129, p. 103783
- [30] Walther, Christian, Nina Heide, Christoph Eisenhut, Mostafa Aboubakr, Marc Etzhold, Thomas Emter, Janko Petereit, Alexander Albrecht, Christian Frese, Angelika Zube, Kai Pfeiffer and Andreas Wenzel, 2020–05. Intelligente Unterstützungsfunktionen für Navigation und Manipulation für mobile Arbeitsmaschinen (Verbundprojekt: Autonomie-KIT für seriennahe Arbeitsfahrzeuge zur vernetzten und assistierten Bergung von Gefahrenquellen – AKIT). 2020–05. DOI 10.2314/KXP:1734046082
- [31] Verbundprojekt Bauen 4.0, 2022–07. [online]. Verfügbar unter: <https://www.verbundprojekt-bauen40.de>, zuletzt geprüft am 1.11.2022
- [32] Woock, Philipp, Janko Petereit, Christian Frey and Jürgen Beyerer, 2022 „ROBDEKON – competence center for decontamination robotics“ at – Automatisierungstechnik, vol. 70, no. 10, 2022, pp. 827–837. <https://doi.org/10.1515/auto-2022-0072>
- [33] Taeubing, Holger and Udo Frese, „A New Library for Real-time Continuous Collision Detection,“ ROBOTIK 2012; 7th German Conference on Robotics, 2012, pp. 1–5.
- [34] Frese, Christian, Angelika Zube, Philipp Woock, Thomas Emter, Nina Felicitas Heide, Alexander Albrecht and Janko Petereit, 2022 „An autonomous crawler excavator for hazardous environments: Ein autonomer Raupenbagger für menschenfeindliche Umgebungen“ at – Automatisierungstechnik, vol. 70, no. 10, 2022, pp. 859–876. <https://doi.org/10.1515/auto-2022-0068>
- [35] Babu, Ajish and Frank Kirchner, „Terrain Adaption Controller for a Walking Excavator Robot using Deep Reinforcement Learning,“ 2021 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), 2021, pp. 64–70, doi: 10.1109/ICAR53236.2021.9659399.