

Unterstützung der Atlastensanierung durch moderne Robotersysteme

Dr.-Ing. Philipp Woock, Fraunhofer IOSB, Karlsruhe
Dr.-Ing. Daniel Kühn, Steffen Planthaber, DFKI-RIC, Bremen

1. Die Vision von ROBDEKON / Was ist ROBDEKON?

ROBDEKON steht für »Robotersysteme für die Dekontamination in menschenfeindlichen Umgebungen« und ist ein Kompetenzzentrum, welches der Erforschung von autonomen und teilautonomen Robotersystemen gewidmet ist. Diese sollen künftig eigenständig Dekontaminationsarbeiten ausführen, damit Menschen der Gefahrenzone fernbleiben können.

Seit Mitte Juni 2018 wird ROBDEKON vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Programms »Forschung für die Zivile



ROBDEKON

Sicherheit« mit zwölf Millionen Euro gefördert. Die Laufzeit erstreckt sich über zunächst vier Jahre, Ziel ist jedoch, dass das Kompetenzzentrum langfristig weiterbesteht.

ROBDEKON wird vom Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB koordiniert. Als Forschungsinstitutionen sind neben dem Fraunhofer IOSB auch das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), das Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) und das FZI Forschungszentrum Informatik beteiligt. Industriepartner im Konsortium sind die Götting KG, die Kraftanlagen Heidelberg GmbH, die ICP Ingenieurgesellschaft Prof. Czurda und Partner mbH und die KHG Kerntechnische Hilfsdienst GmbH.

2. ROBDEKON als Kompetenzzentrum

2.1 Ziele

ROBDEKON soll als nationale Anlaufstelle für Fragen rund um Robotersysteme für die Dekontamination in menschenfeindlichen Umgebungen etabliert werden. Das Kompetenzzentrum hat den Aufbau eines Experten- und Anwendernetzwerks zum Ziel und schafft für die Partner aus Wissenschaft und Industrie ein Innovationsumfeld für neue Technologien zur Dekontamination unter Zuhilfenahme von Robotern. Die Partner besitzen ausgewiesene Expertise zu autonomen Robotersystemen und zu relevanten Dekontaminationsanwendungen. Eine ausführlichere Beschreibung der Struktur von ROBDEKON finden Sie in [Pet19], im Folgenden wird nur ein kurzer Einblick gegeben.

2.2 Forschungsthemen

Ziel von ROBDEKON ist die Erforschung und Entwicklung neuartiger Robotersysteme für Dekontaminationsaufgaben. ROBDEKON konzentriert sich dabei auf den Transfer moderner Robotertechnik in die Praxis. Forschungsthemen sind hierbei mobile Roboter für unwegsames Gelände, autonome Baumaschinen, Roboter manipulatoren sowie Dekontaminationskonzepte, Planungsalgorithmen, multisensorielle 3D-Umgebungskartierung und Teleoperation mittels Virtual Reality. Durch Methoden der

künstlichen Intelligenz können die Roboter zugewiesene Aufgaben autonom oder teilautonom ausführen. Die in ROBDEKON entwickelten Technologien stellen Assistenzsysteme für den Menschen mit unterschiedlichem Autonomiegrad dar (Abbildung 1).

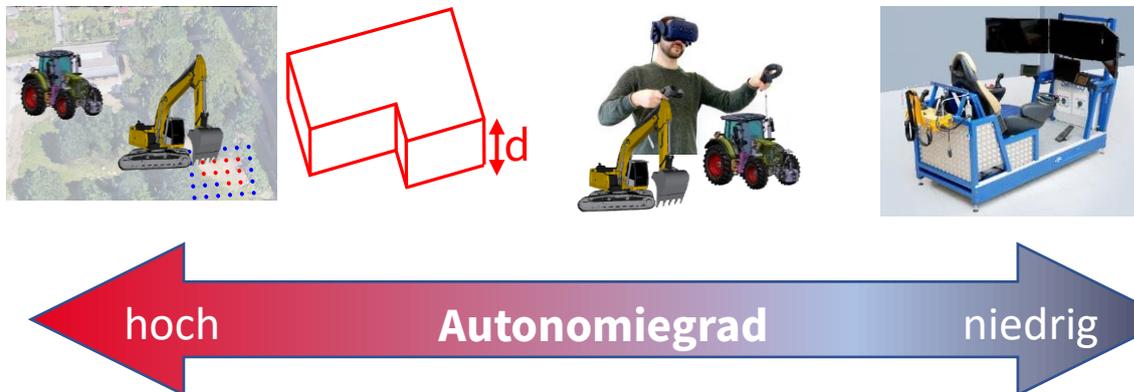


Abbildung 1: Variation des Autonomiegrades nach Aufgabenstellung. Autonome Bearbeitung auf Basis von Beprobungen des Belastungskörpers (ganz links), direkte Spezifikation der Aufgabe (2. v. l.), Teleoperation mittels VR/AR (3. v. l.), bis zur manuellen Bedienung im Führerhausäquivalent (rechts).

In der Aufbauphase des Kompetenzzentrums konzentrieren sich die Arbeiten zunächst auf drei relevante Bereiche: die Sanierung von Deponien und Altlasten, den Rückbau kerntechnischer Anlagen sowie die Dekontamination von Anlagenteilen. Durch die frühzeitige Einbeziehung von Anwendern wird sichergestellt, dass zeitnah praxistaugliche Systeme entwickelt werden, die Menschen entlasten und vor Gefährdungen schützen.

2.3 Technologiedemonstratoren

Um die erarbeiteten Querschnittstechnologien in der Praxis umzusetzen sowie eine Evaluierung der Forschungsergebnisse durchzuführen, werden im Rahmen von ROBDEKON vier Technologiedemonstratoren entwickelt:

- Ein teilautomatisierter Schreitbagger MenziMuck M545 für Deponiesanierungen (Abbildung 2), ein Bagger der 13-Tonnen-Klasse. Seine einzeln ansteuerbaren Beine machen ihn extrem geländegängig, was auf Deponien mit oft sehr heterogenen Bodenstrukturen von großem Vorteil ist.
- Autonome schwere Baumaschinen zur Altlastensanierung in Industrieliegenschaften (Abbildung 3). Hier kommt ein vom Hersteller sensoruell teilweise vorgerüsteter Liebherr R 924 (24-Tonnen-Klasse) zum Einsatz. Zuvor wurden die Forschungsarbeiten zu autonomen Baumaschinen an einem Minibagger Wacker-Neuson-ET18 mit 1,8 t vorangetrieben.
- Rückbauroboter zur Dekontamination von Gebäudestrukturen in kerntechnischen Anlagen,
- Roboter zur komplexen Manipulation bei der Dekontamination von Anlagenteilen.

2.4 Labore

In den sieben Laboren der Partner von ROBDEKON entsteht ein einzigartiges Innovationsumfeld für die Erforschung, Entwicklung und den Test neuer Technologien zur Dekontamination mit Hilfe von Robotersystemen.

Zusätzlich zu Versuchsgeländen zur Erprobung von mobilen Robotersystemen, automatisierten Baumaschinen und schwerem Gerät verfügen die Partner über Labore für die Entwicklung von Kletter- und Fräsrobotern sowie Manipulatoren und zur Umsetzung von Verfahren der Telepräsenz. Im Rahmen von ROBDEKON werden die bestehenden Labore vernetzt und weiter ausgebaut.



Abbildung 2: Schreitbagger als Basis des Realisierungsprojekts „Dekontamination von Deponien“ im Rahmen von ROBDEKON

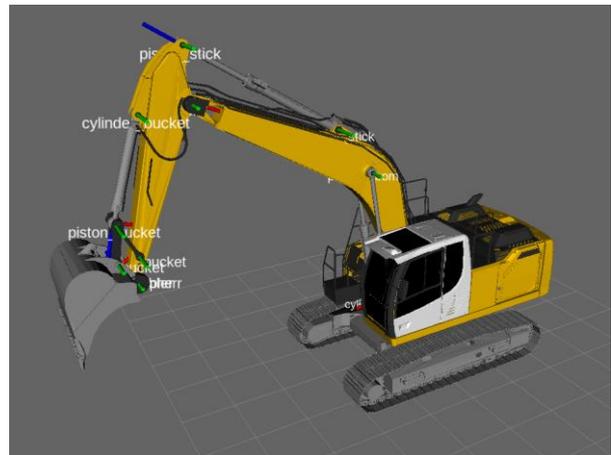


Abbildung 3: Kettenbagger als Basis des Realisierungsprojekts "Sanierung von Altlasten" im Rahmen von ROBDEKON und sein digitaler Zwilling.

2.5 Praxisaustausch, Aus- und Weiterbildungsangebote

Neben der Entwicklung neuer Dekontaminationstechnologien hat sich das ROBDEKON-Konsortium ein hohes Engagement im Bereich der beruflichen Weiterbildung und universitären Lehre zum Ziel gesetzt. Ergänzend hierzu führt das Kompetenzzentrum jährlich¹ eine Partizipationsveranstaltung durch, in deren Rahmen externe Interessenten (z. B. Forschungsgruppen, Anwender, Experten) sich einbringen und die Arbeiten, Ergebnisse und Angebote des Kompetenzzentrums kennen lernen können. Hiermit wird sichergestellt, dass die erarbeiteten Lösungen von hoher Praxisrelevanz sind und bei Problemen im Nutzeralltag eine Hilfe sein werden.

¹ Diese Veranstaltung musste pandemiebedingt 2020 leider ausfallen.

3. Unterstützung des Menschen

3.1 Assistenzsysteme in der Praxis

Bisher verfügen schwere Baumaschinen nicht über Assistenz- und Assistenzfunktionen, wie man sie etwa seit langem aus der Automobilbranche kennt. Während beim Auto mit der Einführung des Antiblockiersystems (ABS) oder spätestens mit der Einführung des elektronischen Stabilitätsprogramms (ESP) der Mehrwert der Systeme für den automobilen Normalnutzer deutlich wurde, gibt es bisher noch keine Systeme, die den Bediener von Baumaschinen unterstützen. Ähnlich wie seinerzeit beim Auto existiert diesbezüglich auch bei den Baumaschinen eine Henne-Ei-Problematik, denn um derartige Assistenzfunktionen überhaupt umsetzen zu können, muss die Baumaschine mit zusätzlicher Sensorik und Intelligenz ausgestattet werden. Aber ohne Nutzung der Daten werden auch keine Sensoren eingebaut. Jedoch ist bei den Herstellern ein Trend zur Drive-by-wire-Steuerung erkennbar, der der Automatisierung der Gerätschaften sehr entgegen kommt. Weitere Details zur sensorischen Ausrüstung ist in Kapitel 5 beschrieben.

Während die ersten Autos inzwischen technisch bereits in der Lage sind, Passagiere autonom über das öffentliche Straßennetz von A nach B zu bringen, ist zu erwarten, dass die Entwicklung der Baumaschinen ähnlich verläuft wie beim Auto und zunächst Unterstützungsfunktionen entwickelt werden, wobei der Mensch in unerwarteten Situationen weiter eingreifen muss. Allerdings erlauben die modernen Möglichkeiten der künstlichen Intelligenz eine schnellere Abfolge der Entwicklungsschritte bis zur autonomen Durchführung von einzelnen Arbeitsschritten oder ganzen Aufgabenstellungen.

3.2 Assistenz- und Autonomiefunktionen

Es gibt mehrere Möglichkeiten, die Belastung für den Menschen zu reduzieren. Entweder kann man den Menschen komplett aus der Gefahrenzone herausnehmen, oder man unterstützt ihn, um den Aufenthalt in der gefährdenden Umgebung möglichst kurz und effizient zu gestalten. Die komplette Entfernung des Menschen aus der Gefahrenzone bedeutet Fernsteuerung der Systeme über einen Leitstand oder autonomes Arbeiten der Systeme (oder eine Mischung mit teilweiser Fernsteuerung bei ansonsten autonomem Betrieb). Für beide Einsatzmöglichkeiten werden in ROBDEKON Lösungen entwickelt: Einerseits neue Leitstandskonzepte für Bediener, die über die klassische Fernsteuerung weit hinaus gehen (siehe Kapitel 4), andererseits vollständig autonomes Ausführen von Teilaufgaben.

Assistenzfunktionen bei einem Schreitbagger könnten etwa die Berechnung der Kippstabilität oder die aktive Anpassung des Fahrwerks an den Untergrund sein. Bei schweren Baumaschinen ist generell die Kollisionsvermeidung eine sinnvolle Assistenzfunktion, die angeboten werden kann. Ebenso ist die selbstständige Erledigung einer einfachen, monotonen Teilaufgabe etwas, das den Bediener entlastet.

3.3 Fähigkeiten des Menschen

Um einer Baumaschine einen autonomen Vorgang beizubringen, muss man alle Fähigkeiten nachbilden, die ein Mensch durch lebenslange Erfahrung und seine Ausbildung bereits mitbringt. Bis eine Aufgabe durch ein Robotersystem autonom gelöst werden kann, müssen also viele komplexe Teilprobleme gelöst werden. Die Beantwortung der Fragen „Wo bin ich gerade?“, „Wie bewegt sich ein Bagger?“, „Wie muss sich der Bagger bewegen um die Aufgabe zu lösen?“ oder „Steht jemand/etwas im Weg?“ sind Fragen, die

Menschen entweder von Natur aus beherrschen, gelernt haben (Erdbaumaschinen-Führerschein) oder aus dem Verständnis für die Gesamtaufgabe ableiten können.

Der Ausweichvorgang des Baggerarms für ein Hindernis ist in Abbildung 4 dargestellt. Dies erfordert auf technischer Seite umfangreiche Berechnungen, die der Mensch scheinbar spielend beherrscht. Ebenso muss man der Maschine als Bewegungsabfolge vorgeben, was z. B. mit „Erdaushub“ überhaupt gemeint ist (Abbildung 5).

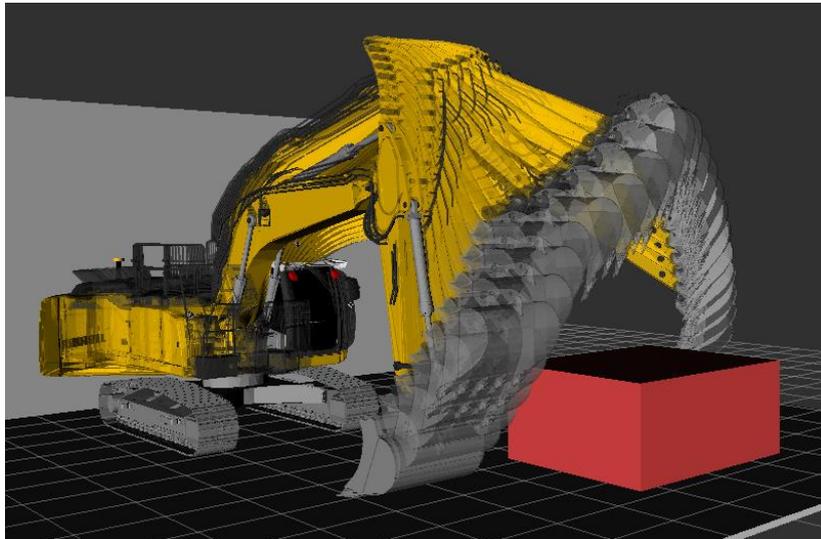


Abbildung 4: Überlagerung der Einzelschritte der Bahnplanung um ein Hindernis (roter Quader) herum.



Abbildung 5: Posensequenz für das Abtragen von Bodenschichten. Der Grabevorgang wird in Teilbewegungen des Manipulators unterteilt, die je nach Aufgabenstellung unterschiedlich parametrisiert sind.

3.4 Autonomer Aushubvorgang

Eine Teilaufgabe, die bei der Altlastensanierung häufig vorkommt, ist der Erdaushub eines Belastungskörpers nach vorgegebenem Muster. Dazu wurde in ROBDEKON ein Kettenbagger befähigt, einen vom Nutzer vorgegebenen Bereich bis in eine vorgegebene Tiefe autonom auszuheben und auf eine Transportplattform zu verbringen. Hier wird die Umgebung durch die Sensorik ständig erfasst und die

gewünschte Sollgeometrie mit dem Istzustand verglichen. Der Bagger baggert so lange aus, bis der gewünschte Zustand erreicht ist, bzw. das Transportfahrzeug voll ist (Abbildung 6).

Was innerhalb von ROBDEKON ebenfalls entstehen soll, aber im Moment noch nicht umgesetzt ist, ist eine sinnvolle Reaktion des Robotersystems auf unerwartete Änderungen als eigene Entscheidung ohne Nutzereingriff.

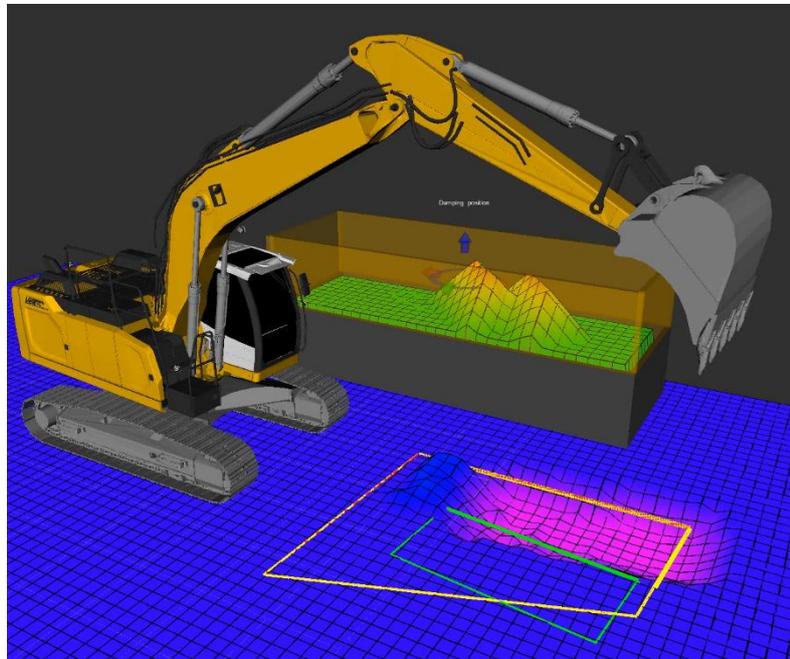


Abbildung 6: Aushubvorgang in der Simulation. Das gelbe Polygon markiert den gesamte Abtragbereich, grün ist der Plan für den aktuellen Löffelaushub, der Ring mit den Pfeilen (blau, rot, grün) zeigt den Abladeort auf dem Anhänger. In Magenta ist die Bodenvertiefung zu sehen, die die bisherigen Grabevorgänge erbracht haben.

3.5 Bewegungskontrolle eines Schreitbaggers

Zweifelsohne gehört das aktive Fahrwerk zu einem der Merkmale eines Schreitbaggers, welches ihn von anderen Baggern mit Kettenantrieb absetzt. Aktuell bedeutet eine Nutzung dieses Fahrwerks aber auch, dass sich eine erfahrene Person am Steuer befinden muss, da jedes Gelenk in dem Bein bei einer Bewegung einzeln anzusteuern ist. Eine Steuerung des Endpunkts, also des Rades, ist herstellereitig bislang nicht vorgesehen. Im Rahmen der Entwicklung von Assistenzfunktionen ist die Berechnung der kinematischen Kette sowohl für die Baggerbeine als auch für den Baggerarm ein zentraler Punkt, der gleich zu Beginn in ROBDEKON bearbeitet wurde.

Die Bewegungskontrolle des Schreitbaggers übernimmt ein sogenanntes Motion Control System (MCS). Es ist eine Software-Bibliothek mit Regelalgorithmen zur Steuerung des automatisierten Schreitbaggers und beinhaltet verschiedene Komponenten aus den unterschiedlichen Schichten der Kontrolle, namentlich die High-Level-Controller, Sicherheitscontroller und Low-Level-Controller. Es ist verantwortlich für eine Reihe von Funktionalitäten, die in das System entweder bereits eingebaut sind oder sich gerade in der Entwicklung befinden.

Durch die in Abschnitt 5.2 beschriebene, erweiterte sensorielle Ausstattung der Räder ist es nun möglich, die Bewegungsgeschwindigkeit des Baggers zu approximieren. Für das autonome Fahren ist dies enorm wichtig. Es konnte bereits gezeigt werden, dass der Autonomiemodus in der Lage ist, den Bagger zu fahren, ohne dass eine Person im Führerhaus anwesend war.

3.6 Kippstabilität eines Schreitbaggers

Die Kippstabilität des Schreitbaggers ist eine wichtige Kenngröße, um zu beurteilen, wie stabil die Baumaschine steht. Ist sie bekannt, ermöglicht dies, eine möglichst kipp sichere Bewegung des Baggers zu planen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die statische Stabilität eines mobilen Roboters zu bewerten. Für den in ROBDEKON verwendeten Schreitbagger haben wir uns für die Normalized Energy Stability Margin (NESM) entschieden, die im Gegensatz zu anderen Methoden die tatsächliche Position des Massenschwerpunkts berücksichtigt und damit direkt eine Vorstellung von der Stabilität liefert.

3.7 Kollisionsvermeidung und Sicherheit

Sicherheit und Zuverlässigkeit sind entscheidend für robotische Systeme, ganz unabhängig von ihrem Einsatzgebiet. Je größer, schwerer und kräftiger die Systeme jedoch sind, desto mehr müssen Sicherheitsfragestellungen in den Fokus rücken. Kollisionen, sei es zwischen dem Roboter und seiner Umgebung oder auch prinzipiell mögliche Selbstkollisionen müssen effizient erkannt und vermieden werden. Wir sehen dies als eine zentrale Aufgabe bei der Automatisierung von schweren Baumaschinen an. Um dies jederzeit gewährleisten zu können, wird der Bagger durch ein vereinfachtes Modell angenähert (Abbildung 7)

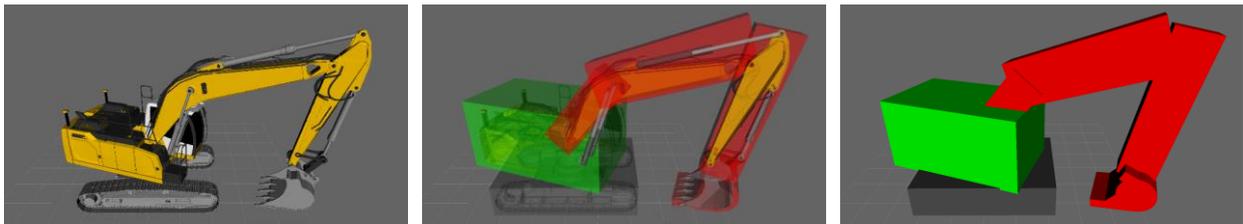


Abbildung 7: Baggermodell für die Eigenkollisionsvermeidung: CAD-Modell und vereinfachtes Modell des Baggers für Kollisionsprüfung und Abstandsberechnung.

Abgesehen von der grundsätzlichen Notwendigkeit, die Umgebung zu erfassen (siehe Abschnitt 5.1), gibt es große Variationen zwischen den verschiedenen, bereits entwickelten Algorithmen in der Komplexität der Berechnung und der gewünschten Genauigkeit. Zu diesem Zweck wurde die Kinematic Continuous Collision Detection Library (KCCD) in die Roboterkontrolle in ROS (Robot Operating System²) integriert und für den Schreitbagger modelliert. Im Vergleich zur Flexible Collision Library, die zur Berechnung der Kollisionen beim Schreitbagger ca. 200 ms benötigt, benötigt KCCD für den Schreitbagger nur 15 ms pro Berechnung. Sie bietet einen guten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Berechnungszeit. Um es benutzerfreundlich zu halten, wurde zusätzlich eine Visualisierung ebenfalls in ROS implementiert.

Allerdings steckt auch hier der Teufel im Detail: Teile des Baggers sind auch in den Messdaten sichtbar, gehören aber nicht zur Umgebung. Diese Messdaten müssen entfernt werden, da der Bagger sich selbst sonst möglicherweise als zu entfernendes Material ansieht (Abbildung 8).

² <https://www.ros.org>, Quelloffene Roboter-Middleware.

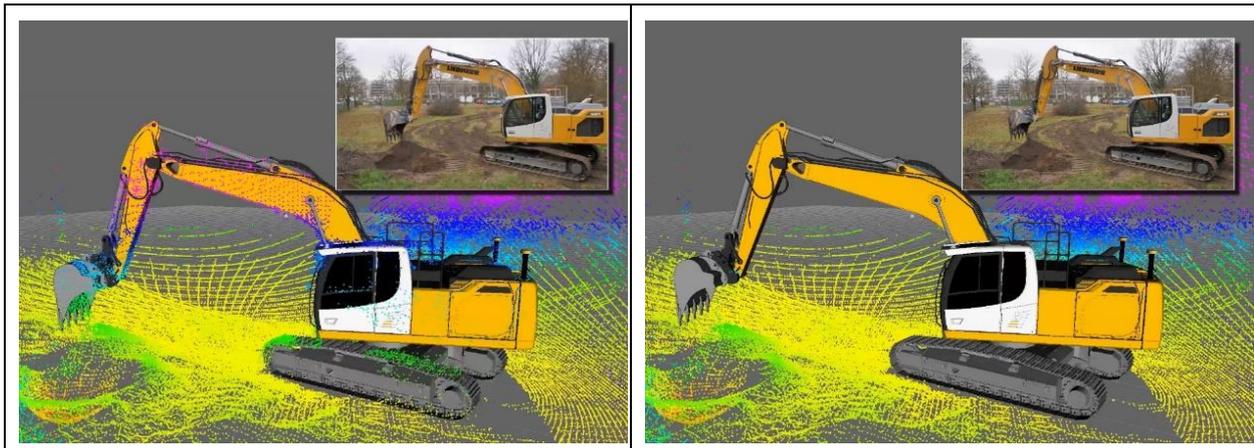


Abbildung 8: 3D-Punktfilterung basierend auf Baggermodell

4. Leitstand und Teleoperation

4.1 Fernsteuerung und Alternativen

Schon lange gängig sind Fernsteuerungssysteme, die die Baggerkabine im Leitstand replizieren und bei denen der Bediener die Umgebung über Kamerabilder wahrnimmt. Als Bedienelemente kommen die Bedienhebel genauso zum Einsatz, wie sie auch im Baggerführerhaus vorhanden sind.

Dadurch, dass für die Assistenz- und Autonomiefunktionen ohnehin der gesamte Ablauf digitalisiert werden muss, ist es dann auch leicht möglich, andere Bedienkonzepte zu integrieren. Beispielsweise kann der Bagger auch von außen mit einem Gamepad gesteuert werden (Abbildung 9)



Abbildung 9: Fernsteuerung des Kettenbaggers per Gamepad

4.2 Virtual Reality / Augmented Reality

Ein modernes Bedienkonzept verwendet von Methoden der virtuellen Realität bzw. der augmentierten Realität (VR/AR). Hier wird dem Nutzer in einem Datenhelm eine Darstellung der Situation eingeblendet und die Bedienung erfolgt durch Handgesten bzw. handgetragene Controller (Abbildung 10). Die Einblendung kann hierbei nicht nur ein Kamerabild umfassen, wie bei klassischer Fernsteuerung, sondern es können alle verfügbaren Daten präsentiert werden. Das könnten LiDAR-Daten des Baggers sein,

Sensordaten von anderen Robotersystemen oder auch Zusatzinformationen wie etwa eine Schadstoffverteilung, die aus der Beprobung bekannt ist. Da all diese Daten digital hinterlegt sind, ist der Nutzer nicht ortsgebunden, sondern kann die Steuerung prinzipiell von überall übernehmen.



Abbildung 10: Steuerung des Baggers durch Handgesten, Sicht des Benutzers. In der Datenbrille wird dem Nutzer das Baggermodell zur Steuerung eingeblendet. Mit der Hand wird ein virtueller Anfasser (rote Kugel) gegriffen und damit der Bagger bewegt. (Bild: KIT-ISAS)

4.3 Umsetzung am Leitstand des DFKI

Der Leitstand des DFKI (Abbildung 11) bietet eine umfangreiche Ausstattung an Virtual-Reality-Visualisierungs- und Eingabemöglichkeiten. Genutzt wird er hauptsächlich als VR-Leitstand zur Fernsteuerung von Robotersystemen, die zusammen mit deren 3D-Umgebungskarten in der virtuellen Welt visualisiert werden. Hierzu können nicht nur VR-Brillen, sondern auch die in einem 180-Grad-Blickfeld angeordneten, 3D-fähigen Leinwände per Polarisationsbrille genutzt werden. Es stehen eine Vielzahl von Eingabegeräten zur Verfügung, von VR-Controllern über Datenhandschuhe bis hin zu Exoskeletten. Ein omnidirektionales Laufband ermöglicht es, sich frei in der virtuellen Welt zu bewegen.

Die Software des virtuellen Leitstandes überwindet dabei erfolgreich Betriebssystemgrenzen und kann mit Linux-basierenden Robotern als auch Windows-basierten Eingabe- oder Anzeigegeräten kommunizieren.

Durch die Standardisierung einer einheitlichen ROBDEKON-Softwareschnittstelle sind alle ROBDEKON-Robotersysteme von allen ROBDEKON-Leitständen bedienbar und die Sensordaten der Systeme werden entsprechend den Fähigkeiten des Leitstands angezeigt.

5. Sensorische Aus- und Weiterrüstung

Zur Realisierung der gewünschten Assistenzfunktionen und weitergehend auch der Autonomiefähigkeiten war es unabdingbar, die Hardware der schweren Baumaschinen zu überarbeiten und um zusätzlichen sensorischen Output zu erweitern. Für jede Art von Regelung wird ein Rückkanal benötigt, um den aktuellen Zustand der Baumaschine zu überwachen. Der Mensch bringt die Sensorik bereits mit (Auge, Innenohr, „Popometer“), weshalb Baumaschinen bisher lediglich Steuerungselemente für den Bediener bereithalten.

Bislang wird Sensorik, beispielsweise zur Erfassung der Bewegung des Systems, nicht ab Werk angeboten (bzw. nur als Überwachung für einzelne technische Parameter), jedoch wird durch die Digitalisierung der Ansteuerung der Baumaschinen der Grundstein gelegt, auch noch weitere Sensorik zu integrieren.

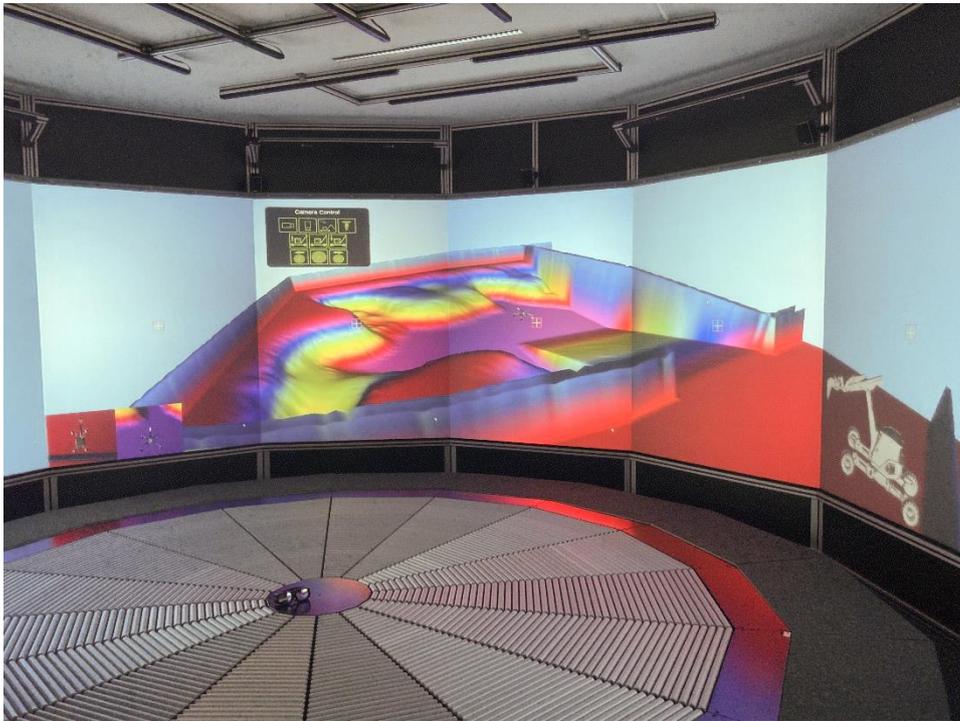


Abbildung 11: Leitstand mit 3D Kartenanzeige (hinten), Robotermodell (rechts) und Omnideck-Laufband (vorne)

5.1 Umgebungserfassung

Es kommen zahlreiche Sensoren zum Einsatz, die dem Bediener vor Ort oder im Leitstand ein Bild von der Umgebung ermöglichen. Neben den Punktwolken, die aus vom LiDAR aufgezeichneten Daten erstellt werden, sind Kameras im Einsatz, die in Echtzeit einen Rundumblick um den Bagger ermöglichen. Dazu gehören Fischaugenkameras, Stereokameras und Pan-Tilt-Zoom-Kameras. Wird der Bagger manuell geführt, können auf Wunsch die Kamerabilder auch auf den in der Steuerkabine integrierten Monitoren angezeigt werden. Ein Aussteigen aus dem Fahrzeug ist dann nicht mehr notwendig, um sich einen Überblick zu verschaffen. Auch können nun Bereiche sichtbar gemacht werden, die während der Arbeit im toten Winkel lagen. Bei einer ferngesteuerten Bedienung der schweren Baumaschine ist davon auszugehen, dass die zusätzlichen Sensordaten (Kamerabilder, 3D-Punktwolken) eine Bedienung massiv vereinfachen (Abbildung 12).

Um geeignete Positionen für die Befestigung der Laserscanner am Bagger zu ermitteln, wurden die Scanner in der Simulation am Bagger angebracht und untersucht, wie die resultierende Sensorabdeckung und die abgeschatteten Bereiche aussehen (Abbildung 13).

5.2 Druckmesszylinder am Fahrwerk

Weitere notwendige Umrüstungen sind beim Unterwagen des Schreitbaggers, die Hubzylinder des Fahrwerks zu erweitern, diese sind jetzt mit Druckmesszylindern ausgestattet. Die vier Radantriebe des Schreitbaggers wurden gegen Antriebe mit Rotationssensoren ausgetauscht. Alle vier Antriebsaggregate liefern nun pulsweitenmodulierte (PWM) Signale zur Auswertung an das Hauptsystem. Damit kann auf die Geschwindigkeit des Systems rückgeschlossen werden. Die Ansteuerung der Hebe- und Senkzylinder der

vier Baggerbeine ist auf CANopen-Proportionalventile umgestellt worden. Dies ermöglicht eine genauere Ansteuerung der Beine während der Lokomotion und Fahrt. Zur Verarbeitung der neuen Signale wurde eine weitere Steuerbox im Unterwagen integriert.

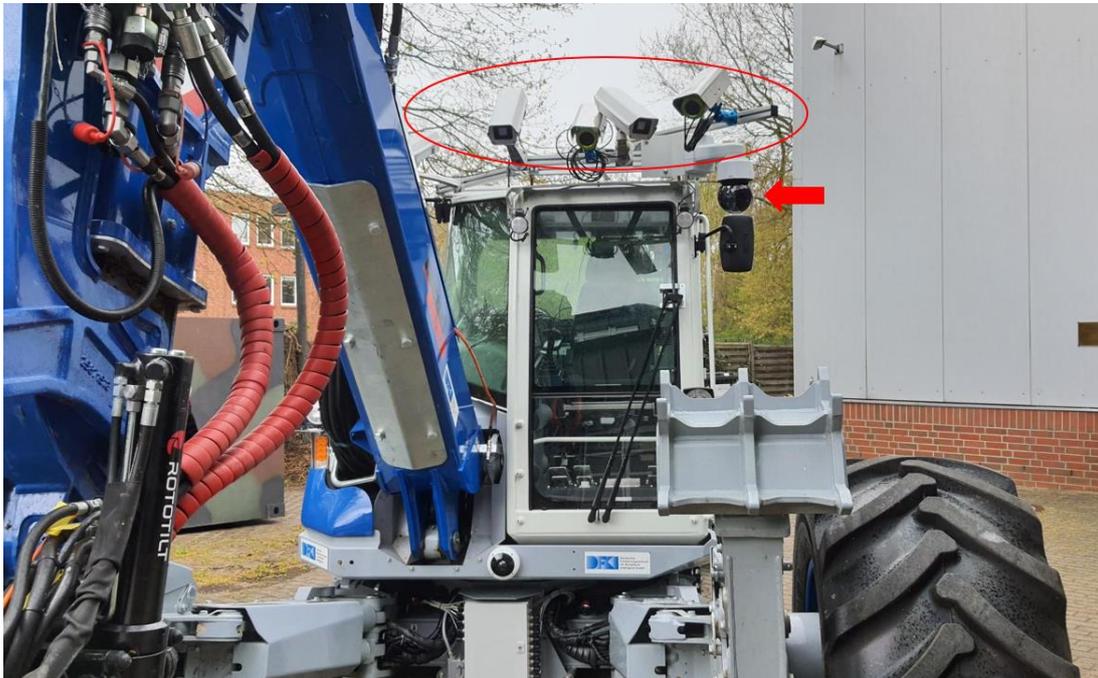


Abbildung 12: Kameraerweiterungen am Dach des Schreitbaggers

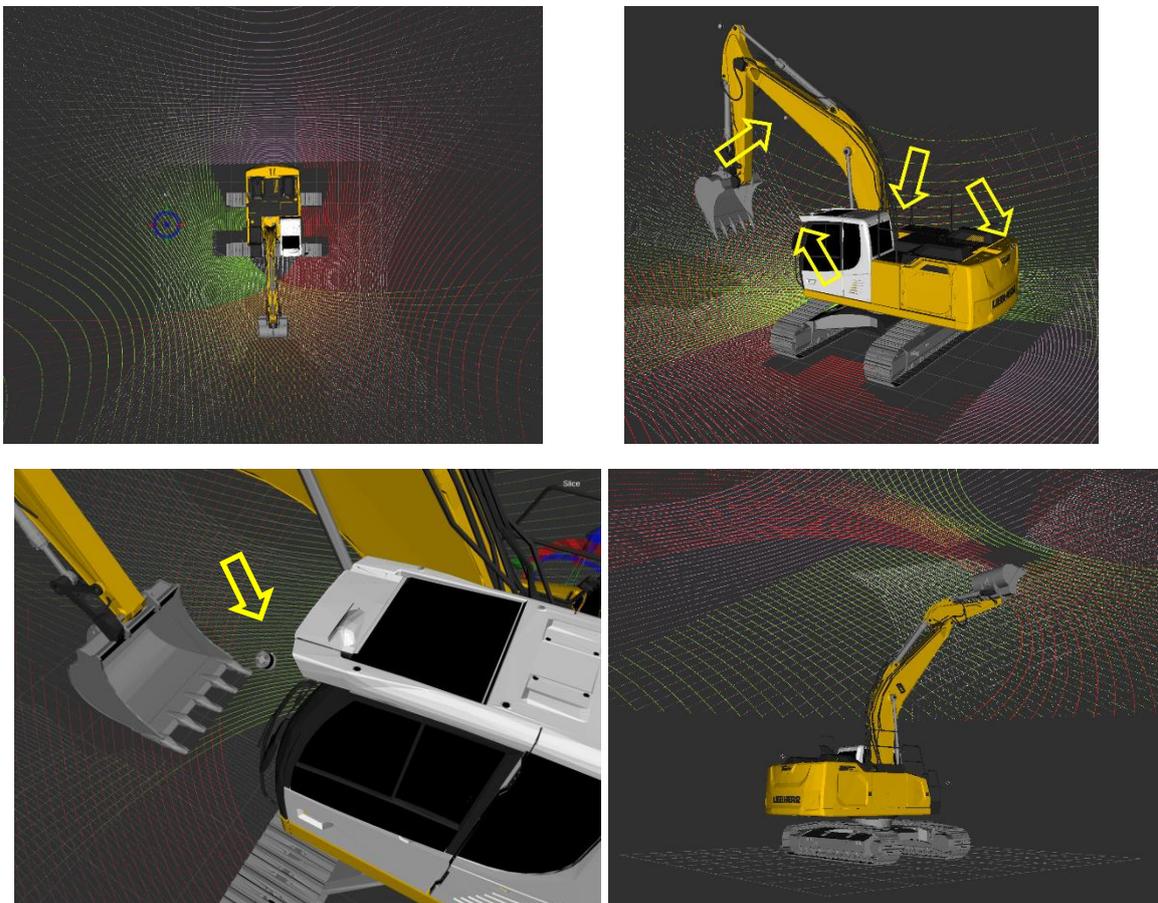


Abbildung 13: Bestimmung der Montagepositionen der LiDAR-Sensoren am Liebherr-Bagger durch Simulation der Datenaufnahme

5.3 Sensorik am Baggerarm

Neben den Beinen fand im oberen Bereich des Schreitbaggers eine Überarbeitung der Hydraulikzylinder des Baggerarms statt, diese sind nun mit Drucksensoren ausgestattet. Nun ist es möglich, dem Kontrollsystem Informationen bezüglich der Belastungen der einzelnen Beine und Armsegmente zur Verfügung zu stellen. Alle hydraulischen Steuerkreise des Oberwagens, die nur über eine hydraulische Vorsteuerung ansteuerbar waren, wurden um CANopen-Proportionalventile erweitert und sind somit nun elektrisch ansteuerbar.

Beim Kettenbagger wurden entsprechende Umrüstungen vorgenommen, u. a. noch eine Gelenkwinkelerfassung an den Baggerarmgelenken und eine funkbasierte Sensordaten-Durchführung zwischen Oberwagen und Chassis.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Forschungsaktivitäten in ROBDEKON ist es, schwere Arbeitsmaschinen in die Lage zu versetzen, dedizierte Aufgaben in gefährlichen Gegenden ohne Bediener durchzuführen. Jedoch ist das gesamte Aufgabenspektrum eines Baggerfahrers sehr groß, sodass für einen vollständig autonomen Bagger weiterhin erheblicher Forschungsbedarf besteht.

Dank des modularen Aufbaus und den klar definierten Softwareschnittstellen konnten zwei sensoruell umgerüstete und bezüglich der Rechenleistung aufgerüsteten Standardbagger in sehr kurzer Zeit mit einer vollständigen Verarbeitungskette bestehend aus Umgebungserfassung, Bewegungsplanung und Bewegungsausführung automatisiert werden. Ist eine rein automatisierte Bewältigung einer Aufgabe nicht möglich oder gewünscht, erlauben die Softwareschnittstellen dem Benutzer, jederzeit einzugreifen. Dies kann entweder vor Ort am System geschehen oder remote per Fernsteuerung klassisch oder mit neuen Bedienkonzepten.

7. Literatur

[Pet19] Petereit, J.; Beyerer, J.; Asfour, T.; Gentes, S.; Hein, B.; Hanebeck, U. D.; Kirchner, F.; Dillmann, R.; Götting, H. H.; Weiser, M.; Gustmann, M., Egloffstein, T.: ROBDEKON: Robotic Systems for Decontamination in Hazardous Environments. In *2019 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)* (pp. 249-255).