



Einschätzung einschlägiger technologischer Entwicklungen im Baumaschinenbereich

Handreichung zur Online-Präsentation

„Technologische Entwicklungen im Baumaschinenbereich“ vom

27.05.2021

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

bibb Bundesinstitut für
Berufsbildung

Das Projekt „Digitales Arbeiten und Lernen in der Baumaschinenbedienung“ (DALiB) wird gefördert im Sonderprogramm ÜBS-Digitalisierung aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Das Sonderprogramm wird durchgeführt vom Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB).

Eine Analyse der GWT-TUD GmbH

Bearbeitet von:

Prof. Dr.-Ing. Frank Will

Freier Mitarbeiter der GWT-TUD GmbH

Inhaber der Stiftungsprofessur für Baumaschinen, Technische Universität Dresden

Prof. Dr. phil. habil. Manuela Niethammer

Freie Mitarbeiterin der GWT-TUD GmbH

Inhaberin der Professur für Bautechnik und Holztechnik sowie Farbtechnik und Raumgestaltung/
Berufliche Didaktik, Technische Universität Dresden

Inhalt

1	Einführung.....	1
1.1	Baumaschinen und Digitalisierung.....	1
1.2	Maschinenkategorien und Anwendungsbereiche.....	1
1.3	Begriffsdefinitionen.....	2
2	Stand der Technik.....	5
2.1	Sensorik.....	5
2.1.1	Absolute Positionsbestimmung (Maschinenposition).....	5
2.1.2	Relative Positionsbestimmung (Arbeitsausrüstung).....	6
2.1.3	Personen- und Objekterkennung.....	7
2.1.4	Erfassung und Überwachung des Maschinenzustands.....	8
2.1.5	Erfassung und Überwachung von Arbeitsprozessen.....	8
2.2	Kommunikation.....	8
2.2.1	Digitale Datenübertragung (On-Board-Vernetzung).....	9
2.2.2	Steuergeräte und Signalverarbeitung.....	9
2.2.3	Funktechnologien.....	10
2.2.4	Telematik.....	11
2.2.5	Potenzielle Beispielanwendungen für Telematikdaten.....	12
2.3	Antriebstechnik.....	13
2.3.1	Antriebskonzepte mit Primäraggregat Verbrennungsmotor.....	13
2.3.2	Hybride Antriebskonzepte.....	13
2.3.3	Antriebskonzepte mit Primäraggregat Elektromotor.....	15
2.3.4	Hydraulische Antriebstechnik.....	16
2.4	Mensch-Maschine-Schnittstelle.....	17
2.4.1	Bedien- und Eingabeelemente.....	17
2.4.2	Ausgabeelemente.....	19
2.4.3	Bedienerarbeitsplatz und Arbeitssicherheit.....	19
2.4.4	Onboard Diagnose.....	20
2.5	Assistenz und Automatisierung.....	21
2.5.1	Assistenzsysteme.....	22
2.5.2	Automatisierung.....	24
2.5.3	Walzen.....	30
2.5.4	Turmdrehkrane.....	30
2.5.5	Kleinmechanismen.....	31
3	Entwicklung der Technologien im Baumaschinenbereich.....	32
3.1	Nutzergruppen.....	32
3.2	Digitales Bauen und BIM.....	33
3.3	Vermessungstechnologien und digitale Geländemodelle.....	33
3.4	Qualitätskontrolle und Bauprozessdokumentation.....	35
3.5	Automatisierung und Robotik.....	35

3.6	Telematik und Software für die vernetzte Baustelle/Flotte.....	36
3.7	Beispiele der Arbeitsaufgaben	37
3.7.1	Exemplarische Tätigkeit.....	39
4	Zusammenfassung.....	43
5	Quellenverzeichnis	45



1 EINFÜHRUNG

Diese wissenschaftliche Analyse beschäftigt sich mit den einschlägigen technologischen Entwicklungen im Baumaschinenbereich. Die Grundlagen der Analyse sind neben aktuellen wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu den relevanten Themenfeldern zudem Erkenntnisse aus der langjährigen Zusammenarbeit mit etablierten Baumaschinenherstellern, Verbänden und Forschungsvereinigungen. Das Ziel dieser Ausführungen ist die Beantwortung der Frage: Welche digitalen Technologien sind am Markt verfügbar und finden aktuell in der Baubranche Anwendung?

In den Ausführungen sind explizit alle Geschlechter (männlich, weiblich und divers) gemeint und angesprochen. Auf eine Unterscheidung im Text an jeder notwendigen Stelle wird aber zugunsten einer besseren Lesbarkeit verzichtet.

1.1 Baumaschinen und Digitalisierung

Baumaschinen, als unverzichtbare Elemente bei der Ausführung von Bauleistungen, bestimmen maßgeblich die Effizienz und Effektivität der Bauausführung. Zwischen den steigenden Anforderungen der Bauwirtschaft (Anwenderseite) und neuen technologischen Angeboten der Maschinen- und Komponentenhersteller werden ständig verbesserte oder neu entwickelte Maschinen auf den Markt gebracht. Im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung durchdringen zusätzlich neuartige Systeme, Komponenten sowie Lösungs- und Denkansätze die Baumaschinenbranche, wodurch zukunftsorientierte Entwicklungspotenziale eröffnet werden. Durch die Digitalisierung und die Vernetzung von Baumaschinen und Baustellen werden die Branchen der Bauwirtschaft, der Telekommunikation und der Bau- und Baustoffmaschinen verzahnt. Ein zentrales Handlungsfeld zur Entwicklung innovativer Geschäftsfelder und zur Erschließung von Effizienzpotenzialen in der Technologieführerschaft um Industrie 4.0, bildet die Etablierung „smarter“ Produkte und Services [107]. In der Baupraxis hat sich die Umsetzung dieses Anspruches in den letzten Jahren deutlich beschleunigt.

Dafür können im Wesentlichen folgende Treiber verantwortlich gemacht werden:

- Produktivität,
- Prozesseffizienz,
- Qualität,
- Fachkräftemangel,
- Kostenminimierung,
- Verfügbarkeit neuer Technologien.

Es kann aber auch festgestellt werden, dass zwar eine Vielzahl von Ideen und Ansätzen für die Digitalisierung von Maschinen und Prozessen bereits vorliegen, die Überführung in reale Anwendungen aber größtenteils fehlt. Die Bauindustrie belegt in einem aktuellen Gutachten von McKinsey hinsichtlich des Digitalisierungsgrads im Vergleich aller Industrien den vorletzten Platz– knapp vor Jagd und Fischerei [106]. Als Ursache dafür kann die kleinteilige Struktur der deutschen Bauwirtschaft mit einer Vielzahl kleiner Handwerks- und Baubetriebe und wenigen Großunternehmen angeführt werden. Großunternehmen verfügen häufig über die Mittel und Erfahrungen um digitale Methoden als Vorreiter zu entwickeln und damit die Digitalisierung voranzutreiben.

1.2 Maschinenkategorien und Anwendungsbereiche

Allgemein versteht man unter dem Begriff „Baumaschinen“ alle Maschinen und Geräte, welche im Bauwesen

- zur Gewinnung, Aufbereitung, Herstellung, Verarbeitung von Erd- und Baustoffen,
- zum Transportieren und Fördern von Erd-, Bau- und Bauhilfsstoffen sowie
- zum Herstellen und Instandhalten von Bauwerken aller Art [39]

genutzt werden.

Das umfasst ein breites Spektrum von Maschinen



- von stationären über handgeführte bis zu selbstfahrenden Maschinen,
- von kleinen Geräten (Eigengewicht unter 100 kg) über typische Baustellenmaschinen (1 bis 100 Tonnen) und Großgeräte (mehrere hundert Tonnen) bis hin zu Tagebau-Großgeräten (im Einzelfall bis über 10.000 Tonnen),
- im Kostenspektrum von wenigen 100 EUR bis zu mehreren Millionen EUR.

Die möglichen Einsatzszenarien sind dementsprechend vielfältig, ebenso wie die sich daraus ergebenden Anforderungen und technischen Ausführungen. Aus diesem Grund kann keine Gesamtbetrachtung aller auf dem Markt verfügbaren Maschinenkategorien und Anwendungen in dieser Analyse erfolgen. Deshalb werden nur die folgenden Maschinentypen beleuchtet:

- Turmdrehkrane
- Minibagger
- Radlader
- Mobilbagger
- Kettenbagger
- Planierdraupe
- Grader
- Walzen

1.3 Begriffsdefinitionen

Im Folgenden werden einige wesentliche Begriffe erläutert, die in dieser Analyse verwendet werden.

Aktor

Als Aktor wird ein Bauteil bezeichnet, welches über ein Steuersignal die Veränderung einer physikalischen Größe (meistens eine mechanische Bewegung) bewirkt. Im Bereich der Baumaschinen ist bspw. ein Hydraulikzylinder ein weit verbreiteter Aktor, ebenso wie ein Antriebsmotor.

Automatisierung und Autonomie

Die Automatisierung zielt darauf ab, Arbeitsprozesse von Maschinen ganz oder teilweise ohne Mitwirkung des Menschen ausführen zu lassen. Der Prozessablauf wird dabei durch die Maschine gesteuert. Die Randbedingungen, die für die automatische Ausführung der Funktion erforderlich sind, müssen dabei vom Bediener hergestellt werden. Weiterhin übernimmt der Bediener zusätzlich zur Überwachung der automatisierten Abläufe, die Ausführung der nicht automatisierten Prozessschritte.

Einen vollständig automatisierten Arbeitsprozess, bei dem der Mensch weder eingreifen noch den Prozess überwachen muss, bezeichnet man als autonomen Prozess. In der Branche erfolgt keine klare Abgrenzung zwischen den Begriffen vollautomatisierter und autonomer Prozess. Die Begriffe (Voll-) Automatisierung und Autonomie werden teilweise synonym genutzt. Als Grundlage für diese Analyse werden die Begriffe wie folgt definiert:

- **Automatisierung:** Die im Vorfeld programmierten Prozesse werden von der Maschine ohne menschliches Einwirken selbständig ausgeführt. Dabei werden Entscheidungen durch vordefinierte Fallunterscheidungen und Lösungsoptionen von der Maschine selbständig getroffen. Treten ungeplante Situationen auf, die nicht in der Programmierung berücksichtigt wurden, ist das Eingreifen des Menschen erforderlich.
- **Autonomie:** Die im Vorfeld programmierten Prozesse werden von der Maschine ohne menschliches Einwirken selbständig ausgeführt. Die Maschine kann auf Veränderungen ihres Umfeldes durch die Anpassung des Arbeitsprozesses an die veränderten Gegebenheiten reagieren. Das wird durch programmierte, ggf. lernfähige Entscheidungsstrategien realisiert. Auch hier ist das Eingreifen durch den Menschen bei ungeplanten Situationen erforderlich, das Spektrum der zu beherrschenden Situationen ist aber deutlich höher.



Digitalisierung

Die Digitalisierung bezeichnet laut Definition die Umwandlung von analogen in digitale Werte. Im Rahmen dieser Ausführungen beschreibt der Begriff aber den gesellschaftlichen und technologischen Wandel, der durch einen allumfassenden Einsatz von Rechentechnik, Automatisierung und Vernetzung vollzogen wird.

HMI

Human-Machine-Interface (HMI) wird mit Mensch-Maschine-Schnittstelle übersetzt und umfasst alle technischen Einrichtungen, welche der Bediener nutzen kann, um die Maschine zu bedienen und zu überwachen.

Fernsteuerung / Fernhantierung

Für die Bedienung von Maschinen können vier Möglichkeiten unterschieden werden. Die klassische Maschinenbedienung erfolgt manuell durch den Bediener. Dieser befindet direkt auf bzw. in der Maschine und bedient diese vollumfänglich. Die zweite Möglichkeit ist eine Fernsteuerung der Maschine unter ständigem Sichtkontakt. Der Bediener befindet sich dabei außerhalb der Maschine und steuert diese mittels Fernbedienung. Die dritte Möglichkeit ist die sogenannte „Teleoperation“. Bei dieser ist der Bediener vom eigentlichen Maschinenstandort räumlich getrennt. Ohne Sichtkontakt erfolgt ein indirektes Feedback auf unterschiedliche Weise (akustisch, visuell, vestibulär). Daran knüpft die „Assistierte Teleoperation“ an, bei welcher die Maschine in der Lage ist, Einzelaufgaben automatisiert durchzuführen. Der Bediener greift vom Fernhantierungsarbeitsplatz nur bei Bedarf in den Prozess ein.

Industrie 4.0

Industrie 4.0 ist die Bezeichnung eines Projektes der deutschen Bundesregierung im Zuge der High-tech-Strategie [10]. Angelehnt ist der Name an die vierte industrielle Revolution. Nach der Mechanisierung, der Elektrifizierung und der Automatisierung folgt die allumfassende Vernetzung der Industrie. Damit soll diese durch Verbindung von physischen Produkten und Anlagen mit Softwarekomponenten und deren Vernetzung zur Produktivitätssteigerung befähigt werden. Dabei werden die gesamte Wertschöpfungskette und der gesamte Lebenszyklus eines Produkts in den Vernetzungsprozess einbezogen.

Internet of Things (IoT) – Internet der Dinge

IoT bezeichnet die Integration von Objekten in ein digitales Kommunikationsnetzwerk. Damit werden zusätzlich zu den etablierten Geräten wie Computern oder Smartphones, auch Alltagsgegenstände Teil des Internets. Ermöglicht wird das durch kleine, energieeffiziente und drahtlos kommunizierende Chips. Damit wird die Vernetzung allgegenwärtig und die Teilnehmenden handeln gewissermaßen autonom.

Künstliche Intelligenz (KI)

„Künstliche Intelligenz erweitert technische Systeme um die Fähigkeit, Aufgaben selbständig und effizient zu bearbeiten. Auf Basis des Maschinellen Lernens erweitern technische Systeme ihr Potenzial, indem sie eigenständig Modelle entwickeln und so hochkomplexe Aufgaben lösen können. Mithilfe von KI können Analysen und Vorhersagen genauer und schneller getroffen, Empfehlungen und Entscheidungen zielgerichteter vorbereitet werden“ [9].

Maschinelles Lernen

„Verfahren, durch die Computersysteme befähigt werden, selbständig Wissen aufzunehmen und zu erweitern, um ein gegebenes Problem besser lösen zu können als vorher“ [9].



Sensor

Als Sensor wird ein Bauteil bezeichnet, welches physikalische oder chemische Eigenschaften qualitativ oder quantitativ erfassen kann. Die gemessene Größe wird zur besseren Interpretierbarkeit in eine andere physikalische Größe umgewandelt.

Sicherheit und Zuverlässigkeit

Sicherheit (safety) ist die Fähigkeit eines technischen Systems, in bestimmten Betriebszuständen Gefährdung und Schaden zu vermeiden. Der Schutz eines technischen Systems vor unzulässigen menschlichen Eingriffen wird als „Security“ bezeichnet (Kriminalprävention). Davon hebt sich der Begriff Zuverlässigkeit ab, welcher beschreibt, wie verlässlich eine Funktion in einem Zeitraum einsatzfähig ist.

Telematik

Im Allgemeinen ist die Telematik die Verknüpfung von Systemen mittels eines (meist drahtlosen) Kommunikationssystems. Im Baumaschinenbereich ist damit die Ausrüstung einer Baumaschine mit einem Funkmodul zur Übertragung von Daten in ein Netzwerk gemeint.



2 STAND DER TECHNIK

Der Stand der Technik umfasst in der vorliegenden Analyse alle **Technologien, die als konkrete Produkte am Markt verfügbar sind und kommerziell genutzt werden.**

2.1 Sensorik

2.1.1 Absolute Positionsbestimmung (Maschinenposition)

Die exakte Standortbestimmung in einem Referenzkoordinatensystem ist Grundlage jedes Bauprozesses. Wichtigster Anwendungsfall einer exakten Positionsbestimmung ist meistens die Vermessungstechnik (Geodäsie), aber auch für die 3D-Maschinensteuerung, zum Geofencing oder Tracking ist eine Positionsbestimmung nötig. Geofencing bedeutet, dass die Position eines Objektes überwacht und bei Überschreiten einer gedachten geografischen Begrenzung automatisiert eine Aktion ausgelöst wird – z. B. das Auslösen einer Wegfahrsperrung, sobald eine Baumaschine die Baustelle unautorisiert verlässt.

Die wichtigste Technologie zur Erfassung einer absoluten geodätischen Position sind **globale Navigationsatellitensysteme (GNSS)**. GNSS ist der Überbegriff für alle Satellitensysteme zur Positionsbestimmung. Beispiele sind das US-amerikanische Satellitensystem „NAVSTAR GPS“, welches oft auch als Synonym für Positionsbestimmungssysteme im Allgemeinen verwendet wird, „GLONASS“ (Russische Föderation), „Galileo“ (Europäische Union) und „Beidou“ (Volksrepublik China). Kann ein Empfänger Signale verschiedener Systeme empfangen und verarbeiten spricht man von Multiband-GNSS. Die Positionsbestimmung bei GNSS-Systemen erfolgt über Laufzeitmessung der Satellitensignale. Der Empfänger muss die Signale von mindestens vier Satelliten gleichzeitig empfangen, in der Praxis ist für eine genaue Positionsbestimmung jedoch eine größere Zahl an Satelliten nötig (Berechnungsverfahren: Multilateration). Durch die potenziell größere Anzahl von Satellitensignalen bei Multiband-Empfängern liefern diese wesentlich schneller und robuster Positionsdaten.

Die GNSS-Messung ist fehlerbehaftet und insbesondere Ungenauigkeiten durch Fehler in der Satellitenposition, atmosphärische Störungen in der Ionosphäre und Troposphäre sowie Signalreflektionen an der Erdoberfläche resultieren in Positionsfehlern. Für die Korrektur können Zusatzsysteme, engl. **Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS)** eingesetzt werden, die Korrektursignale über geostationäre Satelliten aussenden. Zu nennen ist hier das europäische EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) und das US-amerikanische WAAS (Wide Area Augmentation System). Mittlerweile werten moderne GNSS-Empfänger diese Korrektursignale standardmäßig aus, was zu einer durchschnittlich erreichbaren Genauigkeit von 5-15 m führt.

Für die Messgenauigkeit im Zentimeterbereich werden **DGPS (Differential Global Positioning System) oder RTK (Real Time Kinematics)** verwendet. Moderne RTK-Systeme erreichen eine dynamische Positionsgenauigkeit von 10 mm (horizontal) bzw. 20 mm (Höhen Genauigkeit) bei bis zu 20 Messungen pro Sekunde. Neben der Auswertung der GNSS-Nachrichteninhalte wie bei GNSS und DGPS wird beim RTK-Verfahren auch die Phasenlage des Trägersignals für eine genauere Laufzeitmessung herangezogen. Außerdem nutzt bei DGPS sowie auch bei einem RTK-System der mobile GNSS-Empfänger (Rover) Korrektursignale von einer geostationären Referenzstation, welche sich in seiner näheren Umgebung befindet. Solche lokalen Referenzstationen können auch direkt auf einer Baustelle eingerichtet werden. Dazu ist jedoch eine geodätische Einmessung notwendig, was sich nur für größere Baustellen lohnt. Als verbreitete Alternative können auch Referenzsignale von privaten Betreibern oder von den Vermessungsämtern der Bundesländer unter Verwendung eines Referenzstationen-Netztes (Netz-RTK) genutzt werden (SAPOS, ASCOS). Der SAPOS-Dienst ist in Sachsen nach Registrierung beim Landesvermessungsamt kostenfrei nutzbar. Die Korrektursignale können dann von einem Webserver bspw. über Mobilfunk bezogen werden. Für einen zuverlässigen Betrieb sollte die Entfernung des Rovers zur einer temporären Referenzstation 10 km nicht überschreiten. Bei permanenten Referenzstationen ist ab 20 km RTK nicht mehr möglich. Bei der Nutzung öffentlicher oder privater Netz-RTK muss also auch auf den Standort der nächsten Referenzstationen geachtet werden, welche in der Regel 50 bis 100 km voneinander entfernt sind.



Ein weiteres Problem von GNSS-Systemen ist unzureichende Signalverbindung zum Satelliten oder zur Referenzstation durch Abschattungen an Steilböschungen, Felswänden, Alleen oder in Tunneln und Gebäuden. Eine Positionsbestimmung ist dann meist nur sehr ungenau oder gar nicht möglich.

Bei Baumaschinen mit 3D-Maschinensteuerung kommen oft RTK-System zum Einsatz. Für Baumaschinen existiert eine Vielzahl von Nachrüstlösungen, bestehend aus einem GNSS-Empfänger, einem Display und Steuergerät. Viele der OEMs bieten in Kooperation mit den etablierten Vermessungstechnikern GNSS-Lösungen ab Werk an.

Neben der Bestimmung der Maschinenposition mittels Satellitensystemen, ist es ebenfalls möglich die Maschine in einem lokalen Koordinatensystem zu verorten. Diese Bestimmung der Relativposition wird meist mit optischen Messverfahren durchgeführt. Zum Einsatz kommt dabei eine **motorisierte Totalstation**, die mit einem Laserstrahl den Abstand zu einem Reflektor (Prisma) misst [111], [116]. Der Reflektor kann beispielsweise über eine vertikale Stange am Raupenschild angebracht sein. Durch Messung des Abstands und des Strahlwinkels kann die absolute Position des Reflektors sehr genau berechnet werden. Die maximale Entfernung zwischen Tachymeter und Reflektor ist begrenzt und eine direkte Sichtverbindung ist erforderlich. Durch Hindernisse (enge Bebauung, Bewaldung) oder wetterbedingten Sichtbehinderungen infolge von Nebel, Regen oder Schnee kann keine kontinuierliche Messung durchgeführt werden. Als Alternative könnten hier zukünftig funkbasierte Ortungsverfahren (UWB-Ultraweitband) genutzt werden, was momentan jedoch noch zu ungenau im Vergleich zu GNSS oder Totalstation ist.

2.1.2 Relative Positionsbestimmung (Arbeitsausrüstung)

Die zuvor genannten Verfahren dienen der Erfassung der absoluten geodätischen Position der Arbeitsmaschine. Die Position der Arbeitsausrüstung und des Anbauwerkzeugs (z.B. Baggerlöffel, Radladerschaufel, Anbauverdichter, Anbaulafette, o.ä.), welche ebenfalls zur Automatisierung vieler Arbeitsprozesse benötigt werden, lässt sich damit in der Regel (Ausnahme: direkte Montage GNSS-Antenne am Schild bei Raupe und Grader) nicht ermitteln. GNSS-Antennen an exponierten Werkzeugen wie Löffel und Schaufel sind nicht praxistauglich. Die Bestimmung der Position und Orientierung von Arbeitsausrüstung und Anbauwerkzeug muss über eine alternative Sensorik erfolgen. Die Positionsbestimmung erfolgt dann relativ zum Maschinenkoordinatensystem und kann mithilfe der absoluten georeferenzierten Maschinenposition in geodätische Koordinaten überführt werden.

Die bewegten Teile einer Baumaschine kann man als serielle Abfolge von Starrkörpern und (Dreh-)Gelenken beschreiben (kinematische Kette). Im Falle eines Baggers bilden der Ausleger, der Stiel, das Viergelenk und der Löffel die einzelnen Glieder dieser kinematischen Kette. Um beispielsweise von der Position einer GNSS-Antenne ausgehend, die Position der Löffelspitze (Endeffektor-Position / Tool Center Point) berechnen zu können, muss die räumliche Lage und Position der einzelnen Glieder zueinander bekannt sein. Über die Stellung der Gelenke und unter Kenntnis der Bauteilgeometrie kann eine Berechnung der Kinematik erfolgen (sogenannte Vorwärtsrechnung).

Eine Möglichkeit ist die direkte Messung der Gelenkwinkel über **Drehgeber**. An Baumaschinen findet man diese jedoch nur selten, da die Montage auf dem Drehgelenk ungünstig ist und die Genauigkeit in vielen Fällen unzureichend. Statt einer direkten Messung wird daher häufig auf eine indirekte Messung über die Zylinderlängen zurückgegriffen.

Die einfachste Möglichkeit zur Zylinderlängenmessung ist die Verwendung von **Seilzugsensoren**. Dabei wird ein am Hydraulikzylinder befestigtes Seil von einer Spule an der anderen Seite des Zylinders auf- und abgewickelt und der Drehwinkel der Spule bspw. über ein Potentiometer oder einen Encoder gemessen. Eine äußere Montage am Hydraulikzylinder empfiehlt sich aufgrund der harschen Einsatzbedingungen bei Erdbaumaschinen nicht. Es gibt Hydraulikzylinder mit innenverlegten Seilzugsensoren, was jedoch den Aufwand für die Konstruktion und Fertigung der Zylinder erhöht. Außerdem sind die mechanischen Seilzugsensoren verschleißbedingt in ihrer Lebensdauer begrenzt.



Eine Alternative ist die Messung der Zylinderlänge mit **Ultraschall**. Bei der direkten US-Messung wird ein Ultraschallsensor im Zylinderboden angebracht und per Ultraschall die Entfernung zum beweglichen Kolbenboden bestimmt. Da das Verfahren auf einer Laufzeitmessung basiert, muss die Schallgeschwindigkeit im Medium bekannt sein, welche sich je nach Temperatur und Strömungssituation ändern kann.

Die **magnetostriktive Längenmessung** nutzt den magnetostriktiven Effekt, bei dem ein ferromagnetischer Leiter eine Deformation bei Änderung eines angelegten elektromagnetischen Feldes erfährt. Dazu wird ein Wellenleiterelement entlang des Zylinderhubes in das Zylindergehäuse eingebracht. Bei einem kurzen Stromimpuls entsteht ein zirkulares Magnetfeld um den Leiter. Am bewegten Teil (Kolbenboden) befindet sich ein Dauermagnet, dessen Magnetfeld eine lokale Deformation zur Folge hat, welche sich als Torsionswelle im Wellenleiter ausbreitet. Die Laufzeit diese Welle vom Kolbenboden bis zum Signalwandler am Ende des Wellenleiters ist die Grundlage für die Berechnung des Abstands. Das Verfahren ist sehr genau, erfordert aber ebenfalls einen modifizierten Hydraulikzylinder.

Als weiteres Messverfahren existiert die **Hochfrequenzmessung**, welche beispielsweise im Liebherr-System „LiView“ zum Einsatz kommt. Im Zylindergehäuse werden zwei Sonden verbaut, welche Kontakt zur Kolbenstange haben. Die erste Sonde leitet ein elektromagnetisches Signal in die Kolbenstange ein, welches sich axial durch die Kolbenstange bewegt, am Kolbenboden reflektiert wird und anschließend von der zweiten Sonde empfangen wird. Die Laufzeit des Signals gibt Aufschluss auf die Position des Zylinders. Dieses System ist sehr robust und erfordert minimale Veränderungen an der Zylinderkonstruktion.

Neben den vorgestellten direkten Messungen der Zylinderlänge werden als Nachrüstlösung meist **inertiale Messeinheiten** (englisch *inertial measurement unit*, **IMU**) verwendet. Diese MEMS-Sensoren (englisch: *Micro-Electro-Mechanical Systems*) lassen sich einfach auf der Maschine montieren, sind klein, günstig und verschleißarm. Eine IMU misst Beschleunigungen und Drehraten in allen drei Raumrichtungen. Auf Grundlage dieser Daten lassen sich verschiedene Größen ermitteln, wie bspw. die Richtung des Gravitationsvektors oder die relative Lageänderung. Somit lassen sich auch Neigungswinkel mit ausreichender Genauigkeit bestimmen. MEMS-basierte Neigungssensoren verdrängen auch die älteren flüssigkeitsbasierten Neigungssensoren, welche für dynamische Anwendungen zu ungenau sind.

Neben der Messung der Arbeitskinematik und Position der Maschine ist für eine exakte Positionsbestimmung auch die Ausrichtung der Maschine von Bedeutung. Für die Bestimmung des „Heading“ können ein elektronischer Kompass/**Magnetometer** oder **zwei GNSS-Antennen** auf der Maschine genutzt werden, wobei zu beachten ist, dass Magnetometer anfällig für elektromagnetische Störungen sind.

Die vorgestellten Messsysteme gehen immer von starren Körpern aus. Bei großen und schlanken Bauteilen wie bspw. dem Kranausleger oder dem Betonpumpenmast sind die Verformungen für eine genaue Positionierung nicht mehr zu vernachlässigen. Dann ist nur noch eine direkte Vermessung des Endeffektors bspw. mit automatischem Tachymeter möglich.

2.1.3 Personen- und Objekterkennung

Beim Betrieb von Baumaschinen entstehen immer wieder Personen- und Sachschäden, die auf unzureichende Sicht durch den Bediener zurückzuführen sind. Zur Verbesserung der Sicht können Personen- und Objekterkennungssysteme eingesetzt werden. Weit verbreitet sind **Kamera-Monitor-Systeme** (KMS). Diese sind zur Erweiterung des Sichtfeldes gedacht und helfen Gefahrenbereiche zu überwachen. Zum Einsatz kommen hierzu oft Weitwinkel-Kameras. Neben der einfachen Sicht durch die Kamera, gibt es auch Systeme, welche die Bilder mehrerer Kameras zu einem Bild kombinieren (Bird-View). Auch automatische Bildumschaltung zwischen verschiedenen Kameras bspw. bei Rückwärtsfahrt oder Abbiegevorgängen sind in der Praxis verfügbar.

KMS ersetzen nicht die direkte Sicht und sind nicht für längere Fahrmanöver gedacht. Sie erfordern die Aufmerksamkeit des Bedieners und sind unzureichend bei schlechten Wetterverhältnissen oder Dunkelheit.



Die gezielte Personenortung kann mit **Transpondersystemen** (bspw. RFID-Tags) erfolgen, welche am Bauhelm oder an der Kleidung befestigt sind. Nachteilig ist hierbei, dass nur Personen die einen Tag bei sich tragen, erkannt werden können. Daher bietet sich an, solche Systeme für abgeschlossene Bereiche mit Zugangskontrollen zu nutzen, bspw. im Tunnelbau [85]. Vorteilhaft ist, dass auch bei schlechtem Wetter und schlechter Sicht und sogar durch einige Hindernisse hindurch eine Erkennung gegeben ist.

Systeme ohne Verwendung von Tags können Personen oder Objekte mit Ultraschall, Radar oder mit 3D-Kameras erkennen. **Ultraschallsensoren** sind eine etablierte Technologie um Objekte im Nahbereich unabhängig von Materialfarbe, Transparenz, Glanz und Umgebungslicht zu erkennen. Ultraschall erkennt Hindernisse in maximal 3 m Entfernung und ist relativ unempfindlich gegen Schmutz, Staub, Feuchtigkeit und Nebel. **Radar**-Systeme haben im Gegensatz zu Ultraschall eine größere Reichweite und können auch bei höheren Geschwindigkeiten Objekte detektieren. Die Auflösung von Radarsystemen und insbesondere Ultraschall ist begrenzt, sodass meist nur erkannt werden kann, dass ein Objekt im Messbereich ist aber nicht welches Objekt.

Es gibt Systeme, die in der Lage sind, Objekte nicht nur zu detektieren, sondern auch deren Typ zu erkennen (Klassifikation). Solch ein System sind bspw. **3D-Kameras**, welche mittels Stereoskopie Tiefeninformationen gewinnen. Weiterhin gibt es **Tiefenbildkameras** und **Lidar**-Systeme, welche ein Tiefenbild der Umgebung erfassen können. Für die Objekterfassung und Klassifikation erfordert es teils aufwändige Algorithmen und Rechentechnik. Eine 100%-ige Sicherheit wird nur in den seltensten Fällen erreicht werden können, weswegen keine sicherheitsrelevanten Entscheidungen von diesen Systemen abhängen sollten. Der Einsatz als Warneinrichtung oder Assistenzsystem ist jedoch denkbar, wobei die Verantwortung beim Bediener verbleibt.

2.1.4 Erfassung und Überwachung des Maschinenzustands

Für den sicheren und robusten Betrieb einer Baumaschine sowie für Automatisierungssysteme und Telematik ist es notwendig, die aktuellen Zustandsgrößen von Maschine und Anbauwerkzeug zu kennen und zu überwachen. Diese dienen zum einen als Eingangsgrößen für die Steuerung und Regelung, zum anderen bilden sie die Basis für Prozessdatenauswertungen wie bspw. prädiktive Wartung (*predictive maintenance*) oder die Zustandsüberwachung (*condition monitoring*). Relevante Zustandsgrößen sind unter anderem Drehzahlen, Drehmomente, Kräfte, Drücke, Volumenströme, elektrische Spannungen und Ströme sowie Beschleunigungen und Geschwindigkeiten. Die messtechnische Erfassung ist in der Regel mit etablierter Sensorik ohne weiteres möglich.

2.1.5 Erfassung und Überwachung von Arbeitsprozessen

Die Erfassung maschineller Prozessgrößen dient der Automatisierung, der automatischen Prozessdokumentation sowie zur Prozessüberwachung durch den Bediener. Die Art der Messung ist maschinen- und anwendungsspezifisch. Auf konkrete Assistenzsysteme wird in den maschinenspezifischen Kapiteln eingegangen. Hier sind lediglich einige Beispiele genannt:

- Radladerwaage
- Messung der Einbautemperatur des Asphalts am Fertiger
- Automatische, flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle an der Walze
-

2.2 Kommunikation

Die elektrischen Systeme moderner Baumaschinen werden nicht zuletzt durch die große Anzahl verfügbarer Zubehörsysteme zunehmend komplexer. Diese Systeme werden von den Onboard-Computersystemen gesteuert, wozu es einer Vernetzung der Baugruppen untereinander bedarf. In modernen Baumaschinen kommen bis zu 30 Steuereinheiten zur Überwachung und Steuerung der Maschinenfunktionen zum Einsatz, welche miteinander kommunizieren.



2.2.1 Digitale Datenübertragung (On-Board-Vernetzung)

Die meisten Baumaschinen verfügen bereits über digitale Datenübertragung zur Vernetzung einzelner Subsysteme (bspw. Motorsteuerung, Bedienelemente, Getriebe- und Hydrauliksteuerung). Das im Kraftfahrzeugbereich sowie bei den Land- und Baumaschinen am häufigsten eingesetzte Datenübertragungssystem ist der CAN-Bus (Controller-Area-Network). Der CAN-Bus basiert auf einem Differenzpegelsignal zwischen 2 verdrehten Leitern. Dies macht den Bus unempfindlich für elektromagnetische Störungen. Der CAN-Bus ermöglicht die Integration mehrerer Kommunikationsteilnehmer entlang eines Kabelbaums (sogenannte Bus-Topologie). Dies reduziert den Verkabelungsaufwand und die Größe des Kabelbaums im Vergleich zur Einzelsignalverkabelung. Neben dem grundlegenden CAN-Standard, welcher die Übertragung der Datenpakete spezifiziert, gibt es auch noch branchenspezifische CAN-Standards, die noch umfangreichere Kommunikationsmechanismen festlegen. Solche Standards ermöglichen die Interoperabilität von Systemen, also das herstellerunabhängige Zusammenspiel von Systemen. Im Landmaschinenbereich existiert der ISOBUS (ISO 11783) zur Kommunikation zwischen Traktor und Anbaugerät sowie im LKW-Bereich der SAE J1939-Standard für Truck-Trailer-Kommunikation und zur Motordiagnose. Bis auf den Einsatz der Motordiagnose-Schnittstelle auf Basis der SAE-J1939, gibt es im Bereich Baumaschinen keinen CAN-Standard, sondern jeder Hersteller hat sein eigenes, proprietäres CAN-Protokoll.

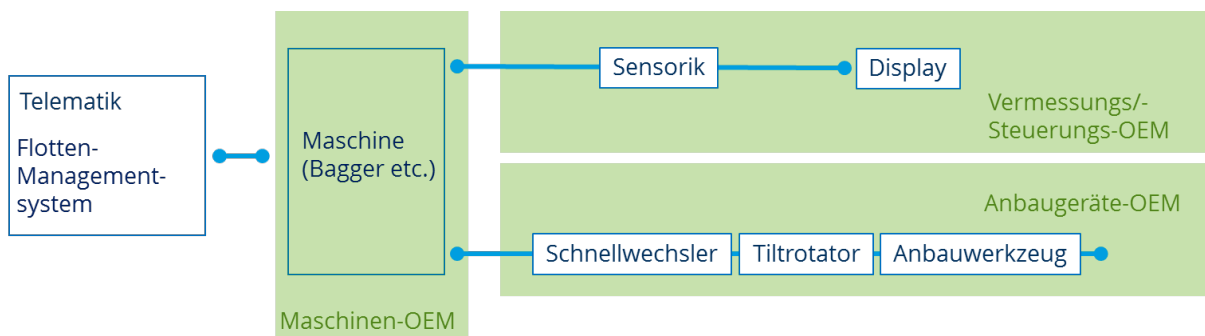


Abbildung 1: Verschiedene Protokolle für unterschiedliche Anwendungen

Die Datenraten, welche mit dem CAN-Bus übertragen werden können, kommen heute deutlich an ihre Grenzen. Immer komplexere Maschinen umfassen bis zu 8 separate CAN-Bus-Systeme auf einem Bordsystem. Eine Alternative ist die Verwendung neuer CAN-Bus-Generationen mit flexibler Daten Rate (CAN FD). Es handelt sich hierbei um eine Erweiterung des klassischen CAN-Protokolls um die Datenübertragungsrate deutlich zu erhöhen. Derzeit findet dieses Protokoll vor allem in der Fahrzeugindustrie Anwendung, perspektivisch werden aber auch andere Bereiche (z. B. bei mobilen Arbeitsmaschinen) den Bedarf erhöhter Übertragungsraten haben. Die Initiative des VDMA: „Machines In Construction 4.0 – MiC 4.0“ arbeitet derzeit an verschiedenen Standardisierungsaktivitäten u.a. zur Spezifikation eines einheitlichen CAN-Bus-Protokolls für die Anbindung von Anbaugeräten an Bagger und Radlader. Müssen noch höhere Bandbreiten erreicht werden, wird die Ethernet-Technologie eingesetzt. Die hohen Übertragungsraten, welche im Haushalt und im Büro damit realisiert werden, sind auch zunehmend in Fahrzeugen und Maschinen notwendig, um dem gesteigerten Bedarf durch Kameras, Assistenzsysteme, Telematikeinheiten und On-Board-Diagnosesysteme zu begegnen. Zusätzlich bietet sich die Möglichkeit, offene und skalierbare Drahtlos-Netzwerkarchitekturen zu realisieren.

2.2.2 Steuergeräte und Signalverarbeitung

Die Teilnehmer eines On-Board-Netzwerkes sind in aller Regel die Steuergeräte verschiedener Einheiten und Module. Um die Kommunikation über ein Netzwerk zu realisieren, müssen die Signale der Teilnehmer konditioniert werden. Diese Konditionierung umfasst die Extraktion der Informationen aus dem Signal oder umgekehrt die Aufbereitung der Signalinformationen für die Übertragung. Für diesen Vorgang werden die Komponenten der elektronischen Signalverarbeitung, welche im Allgemeinen in



Eingangsgrößen (Inputs), Ausgangsgrößen (Outputs) und Prozessor unterteilt werden, durch eine Signalleitung oder ein Bus-System (s. o.) verbunden. Die Eingangsgrößen können dabei Schaltzustände, Bedieneingaben oder Messwerte sein, welche über einen Analog-Digital-Wandler für die Weiterverarbeitung im Mikroprozessor des Steuergerätes gewandelt werden. Bedarf es nach der Berechnung einer Rückwandlung in ein analoges Signal, bspw. für die Steuerung eines Aktors, wird ein Digital-Analog-Wandler eingesetzt. Dieser kann entfallen, wenn der Output digitale Größen verarbeiten kann. Dies ist z. B. bei digitalen Anzeigen der Fall.

Die elektrischen Signale, welche verarbeitet werden, sind analoge, digital oder pulsweitenmodulierte (PWM) Signale. Analoge Signale zeichnen sich durch eine Proportionalität des Signals zur Spannung/Stromstärke oder zur Amplitude/Frequenz/Phase aus. Ein typisches Beispiel ist das Signal eines Gaspedals. Hier verhält sich der Pedalwinkel proportional zur Ausgangsspannung. Das digitale Signal liegt als diskreter Wert vor, welcher binär codiert ist. Diese bilden die Grundlage der digitalen Signalverarbeitung und werden in CAN-Bus-Systemen eingesetzt. Das PWM-Signal besteht aus zwei digitalen Zuständen (ON/OFF), dabei ist hier das Signal proportional zur Zeitspanne, womit ein analoger Informationsgehalt vorliegt. Eingesetzt werden diese bspw. bei Magnetventilen.

Das Steuergerät als zentrale Einheit der Signalverarbeitung besteht aus einem Mikroprozessor und einem Speicher (RAM). Es übernimmt die eigentliche Steuerungs- oder Regelungsaufgabe, indem es die Eingangsgröße mit einer berechneten Sollgröße vergleicht und die Ausgangsgröße so lange anpasst bis beide hinreichend übereinstimmen. Abbildung 2 zeigt zusammenfassend eine beispielhafte Systemarchitektur einer modernen Baumaschine. Die Steuergeräte (Electronic Control Unit - ECU) der verschiedenen Einheiten kommunizieren über ein CAN-Bus mit dem Master-ECU, welches alle Prozesse der Maschine steuert und regelt und mit den Teilnehmern kommuniziert. Darunter zählen auch die Telematikeinheit zur Übermittlung von Maschinen- und Prozessdaten, der Display-Controller mit Eingabe-Größen vom Bediener oder von der Umfeldsensorik und weiterhin ein Diagnoseanschluss für Servicearbeiten.

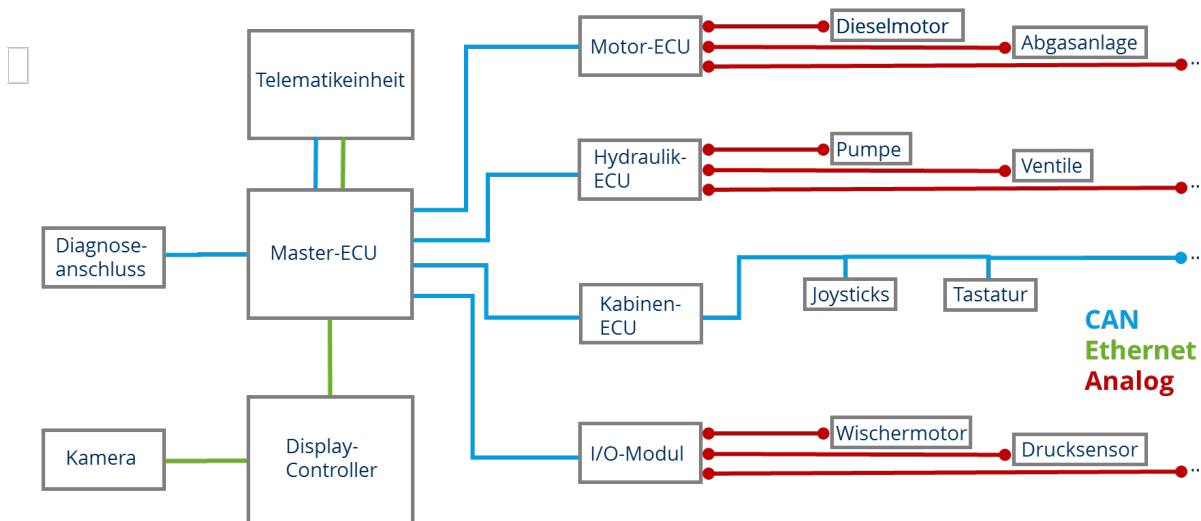


Abbildung 2: Beispielhafte Systemarchitektur

2.2.3 Funktechnologien

Funktechnologien (WLAN, UMTS, LTE) für die drahtlose Datenübertragung sind in Baumaschinen für verschiedene Anwendungen im Einsatz. Für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen existieren Spezifikationen aus dem Personen-Kraftfahrzeugbereich. Diese unterscheiden zwischen der Vernetzung Car2Car (C2C), Car2Everything (C2X), Car2Infrastructure (C2I) von Maschinenherstellern und Telematikanbietern. Die RFID-Technologie wird für berührungslose Identifikationsaufgaben im Nahbereich eingesetzt. Diese Systeme bestehen aus einem Transponder, welcher einen Merkmalscode trägt und einem Lesegerät, welches diesen Code ausliest. Angewendet wird dieses Verfahren in Baumaschinen für



die Identifikation des Fahrers, den elektronischen Zündschlüssel und die Erkennung von Anbauwerkzeugen. Diese Identifikation von Maschinen und Bedienern ist ein wichtiger Bestandteil vieler Automatisierungsprozesse. Weiterhin wird es mit dieser Technologie möglich, Betriebsmittel zu identifizieren. Damit kann gewährleistet werden, dass immer die richtigen Baustoffe verbaut werden und weiterführend eine durchgängig digitalisierte Prozesskette realisiert wird. RFID wurde in [50] und [98] für die in der Bauindustrie auftretenden schwierigen Einsatzbedingungen als geeignet herausgestellt. Ein erster Einsatz am Markt wurde von der Fa. Vemcon realisiert [113]. Bei diesem System wird das Anbauwerkzeug automatisch von der Grundmaschine erkannt und die Maschineneinstellungen für das jeweilige Werkzeug abgerufen.

Ein großes Anwendungsgebiet der Mobilfunktechnologien ist auf der zukünftig immer stärker vernetzten Baustelle (Stichwort: Telematik) zu finden. Dabei wird für diese Anwendungen der Standard der Mobilfunkgeneration 5G zum Einsatz kommen. Mit dieser leistungsfähigen Drahtloskommunikation wird es möglich eine große Datenmenge mit Echtzeitinformationen zur Verfügung zu stellen. Damit wird die durchgängige, digitale Abbildung aller Bauprozesse und -akteure ermöglicht und der Bauprozess transparent. Dafür müssen aber, neben der flächendeckenden Verfügbarkeit des 5G-Netzes, weitere Voraussetzungen, wie einheitliche Kommunikationsschnittstellen zwischen Maschinenkomponenten und Steuergeräten sowie Steuergeräten und Cloudcomputing geschaffen werden. Außerdem bedarf es vereinheitlichter Datenübertragungsprotokolle und Datenformate sowie einer Standardisierung der Systemarchitektur ebenso wie einer Regelung für die Datenhoheit. Eine wichtige Neuheit von 5G-Mobilfunk ist, dass es der Industrie möglich sein wird, private Mobilfunkzellen zu nutzen, sogenannte 5G-Campusnetze, sodass zukünftig leistungsfähige, private Baustellennetze realisierbar sind.

Das bildet wiederum die Grundlage für zukünftige Assistenzsysteme und Automatisierungsfunktionen, welche den Menschen befähigen, effizient in einem digitalen und selbstorganisierten Arbeitsumfeld zu agieren.

2.2.4 Telematik

Der Begriff ist eine Kombination von Telekommunikation und Informatik und umfasst die Verarbeitung von Daten zur Speicherung und zum Abruf. In der Literatur werden Telematiksysteme häufig in drei Hauptkomponenten eingeteilt [40]. Diese sind das Endgerät auf der Maschine, die Übertragungseinrichtung zwischen Maschine und Zentrale (Telematikeinheit) und eine datenbankbasierte Applikation zur Datenspeicherung und -auswertung. Die übergeordnete Funktion der am Markt erhältlichen Systeme ist immer die Ermittlung und der Transfer der Betriebs- und Servicedaten der Maschine [87] [74]. Die standardisierten Datensätze werden in der ISO 15143-3 definiert. Diese Norm besagt, dass die Verfügbarkeit der Maschinendaten vom Maschinenhersteller erhoben werden und in einer herstellereigenen Cloud abgelegt werden müssen. Der Maschineneigner/-betreiber muss die Maschinendaten über einen Zugang zur Herstellercloud in einem standardisierten Format erhalten. Dieser Weg der Datenübermittlung ist nicht für Echtzeitanwendungen geeignet, erfordert eine kontinuierliche und ausreichende Internetanbindung und ist nicht kundenindividuell erweiterbar. Einige Hersteller bieten für ihre Maschinen jedoch individuelle und erweiterte Telematik-Datensätze an, wie bspw. im Spezialtiefbau (FA. BAUER). Eine Zusammenführung der Telematikdaten verschiedener Hersteller in einem System gestaltet sich jedoch durch den Zugriff auf die verschiedenen Herstellerclouds aufwändig.

Folgende Telematikdaten sind gemäß ISO 15143-3 vorgesehen und können von einer Herstellercloud bereitgestellt werden:

- Maschineninformationen (Installationsdatum Telematik, Herstellername, Modelname, Identifikationsnummer, Seriennummer, OEM ISO Nummer/PIN)
- Letzte bekannte Position (Zeit, Länge, Breite, Höhe, Einheit der Höhenkoordinate)
- Betriebsstunden
- Gesamtkraftstoffverbrauch
- Kraftstoffverbrauch der letzten 24h
- Zurückgelegte Fahrstrecke
- Fehler-Codes



- Gesamtleerlaufstunden
- Tankfüllstand (in % und volumetrischer Einheit)
- DEF (Ad-Blue) Füllstand (in % und volumetrischer Einheit)
- Motorstatus (Motornummer, An/Aus)
- Digital Input State (SwitchStates) (zusätzliche Schalterstellungen)
- Gesamteinsatzzeit-Zusatzantrieb (bspw. Anbauwerkzeug, Zapfwelle)
- Durchschnittliche tägliche Maschinenauslastung
- Maximale Geschwindigkeit pro Tag
- Anzahl Lastspiele
- kumulierte Nutzlast (bei Maschinen mit Waage)
- kumulierte Regenerationszeit der Abgasnachbehandlung
- kumulierte unproduktive Zeit
- Diagnose-Fehler-Codes (Diagnostic Trouble Codes)

2.2.5 Potenzielle Beispielanwendungen für Telematikdaten

Condition Monitoring

Unter Condition Monitoring versteht man die permanente Überwachung von Maschinenzuständen (Beschleunigung, Temperatur, Druck) und deren Auswertung. Das Ziel ist die Detektion von Verschleiß oder von Versagen, um auf derartige Vorfälle frühzeitig reagieren zu können. Auch die Betriebscharakteristika können analysiert werden und damit kann eine Optimierung des Arbeitsablaufes oder auch des Kraftstoffverbrauches erfolgen. Weiterhin werden belastungsbasierte Wartungsprognose, bekannt als „Predictive Maintenance“, realisiert.

Für diese Funktionalitäten ist es notwendig, den Normzustand oder den zulässigen Einsatzbereich der gemessenen Größe zu kennen. Außerdem wird für die Prognose der Schadensfälle basierend auf Belastungsmessungen, ein Schädigungsmodell des betrachteten Bauteils notwendig, dessen Ermittlung sich in der Regel schwierig gestalten [43] kann. Condition Monitoring ist in der stationären Industrie bereits Stand der Technik, während es in der Baumaschinenindustrie kaum Verbreitung findet.

Kommunikation mit Anbauwerkzeugen

Mit dem Bagger als universell einsetzbare Baumaschine kann eine große Auswahl verschiedener Anbaugeräte zum Einsatz kommen. Als Beispiele sind Tiltrotator, Greifer, Magnet, Hammer oder Zange zu nennen. Diese können hydraulisch oder elektrisch angetrieben werden. Das erfordert zwingend die Konfiguration an der jeweiligen Trägermaschine (Joystickbelegung, Definition von Anschlussgrößen). Mithilfe einer automatischen Werkzeugeterkennung können diese Einstellungen automatisch erfolgen ohne die aufwendige manuelle Parametrierung. Aktuell wird die Funktion mittels der RFID-Technologie realisiert, wobei der jeweilige Transponder direkt an der Koppelstelle des Werkzeuges sitzt. Der zugehörige Empfänger ist im Schnellwechsler verbaut. Dieser liest bei Kopplung von Werkzeug und Maschine die notwendigen Informationen aus dem Transponder aus und die Parametrierung in der Maschinensteuerung wird automatisch gesetzt [48]. Diese Lösungen sind momentan noch herstellerspezifisch.

Flottenmanagement

Ein Flottenmanagementsystem sammelt die Zustandsdaten verschiedener Maschinen in einer Datenbank des Maschinenherstellers (Cloud). Die Übertragung erfolgt über Mobilfunk, wobei Daten wie die Maschinenposition, die Betriebsstunden, der aktuelle oder summierte Kraftstoffverbrauch, aktuelle Lademassen oder auch Asphalttemperaturen übermittelt werden. Wie o. g. dient diese Technologie der betriebswirtschaftlichen Analyse, der Planung und der Abrechnung des Maschineneinsatzes. Die Maschinenposition wird zum einen als Schutz vor Diebstahl und zum anderen beim Geofencing, bei dem die Maschine einen definierten Bereich nicht verlassen darf, angewendet [60].



2.3 Antriebstechnik

Die Antriebstechnik dient der Erzeugung von Bewegungen mittels Kraftübertragung. Dabei umfasst die Thematik neben dem Primäraggregate (Motor) zur Bewegungserzeugung durch Energiewandlung, auch die Leistungswandlung, -übertragung und -speicherung sowie die Verbraucher und die Steuerungstechnik. Die Antriebstechniksysteme haben die Aufgabe alle Funktionen der Baumaschine zu versorgen. Damit können sich Systeme hoher Komplexität ergeben.

Im Folgenden werden verschiedene Antriebskonzepte, die dem Stand der Technik entsprechen, diskutiert. Als Innovationstreiber bei der Entwicklung von Antriebssystemen ist die Steigerung der Energieeffizienz, die Erhöhung der Leistungsdichte, kleinerer Bauraum, Ausweitung der Arbeitsfunktionen, Verbesserung der Betriebssicherheit und Erhöhung des Bedienkomforts zu nennen. Zusätzlich müssen die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte eingehalten werden, wodurch oftmals ein entwicklungs-technischer Zielkonflikt entsteht. Deshalb muss verstärkt auf alternative Konzepte im Bereich der Antriebsentwicklung zurückgegriffen werden, die vermehrt auch Einzug im Baumaschinenbereich halten.

2.3.1 Antriebskonzepte mit Primäraggregate Verbrennungsmotor

Nach wie vor ist der Dieselmotor im Baumaschinenbereich am häufigsten als Primäraggregate vertreten. Der Hauptgrund liegt in der hohen Energiedichte des Dieselmotorkraftstoffes und der damit einhergehenden Mobilität und Autarkie. Es ist mit vergleichsweise kleinem Bauraumbedarf möglich, Kraftstoff in einem Tank für eine große Anzahl an Betriebsstunden mitzuführen und im Bedarfsfall schnell nachzutanken. Hinzu kommen Eigenschaften, die dem Einsatz auf der Baustelle in hohem Maße genügen, wie Leistungsstärke, Robustheit und Effizienz.

Der stufenweisen Senkung der Emissionsgrenzwerte konnte in den letzten Jahren mit verschiedenen motorischen Maßnahmen und durch eine immer umfangreichere Abgasnachbehandlung (Dieselpartikelfilter, SCR-Katalysatoren) begegnet werden. Mit weiteren Verschärfungen, welche in den kommenden Jahren zu erwarten sind, wird die Erfüllung der Grenzwerte aber technisch immer aufwendiger umzusetzen. Es ist außerdem zu beobachten, dass der weiter steigende Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen eine Erhöhung des Kraftstoffverbrauches und damit des CO₂-Ausstoßes mit sich bringt. Das ist ein weiterer Grund, weshalb der Verbrennungsmotor zunehmend durch neuartige Antriebsaggregate substituiert wird.

2.3.2 Hybride Antriebskonzepte

Durch die steigende Forderung nach Antriebsquellen mit reduzierten CO₂-Emissionen sind zunehmend auch hybride Antriebskonzepte (lat. Hybrida – Mischling) im Baumaschinenbereich anzutreffen. Diese vereinen mindestens zwei verschiedene Energiewandler und zwei verschiedene Energiespeichersysteme. Damit wird der Handlungsspielraum bezüglich der Verbesserung des gesamten Antriebssystems erhöht. Zusätzlich zur o.g. Optimierung des Verbrennungsprozesses kann hier die Steigerung der Effizienz vor allem durch eine Verbesserung der einzelnen Komponenten und deren Steuerung erzielt werden. Es wird je nach Aufbau des Systems zwischen parallelen und seriellen Hybridantrieben unterschieden. Eine weitere Unterscheidung erfolgt nach der genutzten Energieform in dieselelektrische, dieselhydraulische oder elektrohydraulische Hybridkonzepte. Der serielle Hybrid zeichnet sich durch die fehlende mechanische Verbindung zwischen dem Verbrennungsmotor und den angetriebenen Rädern aus. Hier führt der gesamte Leistungsfluss über alle Leistungswandler. Im Gegensatz dazu können beim parallelen Hybrid sowohl der Verbrennungsmotor als auch der Elektromotor unabhängig voneinander Leistung bereitstellen. Bereits 2015 hat DEUTZ im Rahmen des GRID-Forschungsprojektes (GREEN INDUSTRIAL DIESEL) ein dieselelektrisches Antriebskonzept an einem Umschlagbagger gezeigt [32]. Es handelt sich um eine Kombination von Dieselmotor und Elektromotor/-generator mit Supercaps als Energiespeicher (Superkondensatoren). Der Oberwagen wird mit einem elektromotorischen Antrieb gedreht. Die Energie, welche beim Abbremsen frei wird, wird in den Supercaps gespeichert. Zusätzlich lädt ein Generator, der an den 160 kW starken Dieselmotor angeflanscht ist, diese auf.



Ein ähnliches System wurde erstmalig 2008 von KOMATSU [65] in einem Serienbagger eingesetzt. Bei diesem System wandelt der elektrische Schwenkmotor/-generator ebenfalls die kinetische Energie des Schwenkvorgangs des Oberwagens in elektrische Energie um. Diese wird in Hochleistungskondensatoren (Supercaps) gespeichert und für den Beschleunigungsvorgang des elektrischen Schwenkwerks genutzt. Damit kann der Dieselmotor, welcher über einen Generator den Großteil der zum Schwenken notwendigen elektrischen Energien bereitstellt, entlastet und weiterführend kleiner dimensioniert werden (Downsizing). Dieser Aufbau ist mittlerweile auch bei anderen Herstellern realisiert worden (z. B. HITACHI, KOBELCO [53] [63]). Das gleiche System kann auch als dieselhydraulischer Hybrid ausgeführt werden. Dabei kommt ein hydraulischer Druckspeicher, in dem Hydrauliköl unter Druck gespeichert wird, zum Einsatz. Der Druckspeicher wird dabei beim Entladen mit hydraulischer Energie gefüllt [21]. Vorteilhaft beim Einsatz von Hydrospeichern ist die deutlich höhere Leistungsdichte im Vergleich zum elektrischen Energiespeicher. Weiterhin ermöglichen Speicherlösungen den Ausgleich kurzfristiger Lastspitzen. Damit wird es möglich, den Dieselmotor kleiner zu dimensionieren (Downsizing). Die Systeme sind auf dem Markt verfügbar und technisch ausgereift.

Allen verfügbaren Systemen ist eine hohe Komplexität gemein, mit welcher der technische Aufwand und wiederum die Investitionskosten steigen. Aus diesem Grund finden hybride Systeme bis heute wenig Akzeptanz beim Anwender.

2.3.1 Antriebskonzepte mit Primäraggregatelektromotor

Der Wechsel auf elektrische Antriebstechnik bietet eine Vielzahl an Vorteilen. Diese sind lokale Emissionsfreiheit und die damit einhergehende Senkung der Umweltbeeinträchtigung, Senkung der Geräuschemissionen, einfache Umsetzung von Steuerungsfunktionen, Teilautomatisierungen und die Möglichkeit der energetischen Rekuperation (Energierückgewinnung). Weiterhin erreichen die vollelektrischen Antriebslösungen höhere Gesamtwirkungsgrade, vor allem im häufig auftretenden Teillastbereich.

Per Definition ist eine vollelektrifizierte Baumaschine mit einem Elektromotor und einer Batterie ausgestattet, welche den Dieselmotor und den Tank ersetzen. Dabei ist vor allem aus funktionaler Sicht die Elektrifizierung der Fahraufgabe sinnvoll. Die Arbeitsfunktionen hingegen sind bei diesen Maschinen weiterhin hydraulisch ausgeführt, da hydraulische Antriebe eine größere Leistungsdichte als elektrische Antriebe bieten.

Die auf dem Markt verfügbaren vollelektrischen Maschinen (Zero-Emission-Baumaschinen) sind dabei zum Großteil der Kompaktklasse (Radlader) zuzuordnen bzw. bis zu einem Einsatzgewicht von ca. 5 t (Bagger) verfügbar [124] [125] [126] [119]. Herstellerübergreifend werden diese Antriebssysteme mit zwei Elektromotoren ausgeführt. Dabei übernimmt ein Motor die Versorgung der Fahraufgabe, wobei zur Leistungsübertragung meist auf klassische Architekturen mit Kardanwellen, Differenzialen und Getrieben zurückgegriffen wird. Der zweite Motor ist Bestandteil einer Motoren-Pumpeneinheit und stellt die hydraulische Antriebsleitung für die Arbeitsausrüstung zur Verfügung.

Die Speicherkapazitäten der Akkumulatoren sind von den Herstellern für einen Werktag von 6 bis 8 h dimensioniert. Die Ladung kann im 230 V-Spannungsnetz oder über Netze höherer Versorgungsspannungen erfolgen. Letzteres ermöglicht dabei eine Schnelladefunktion, wobei diese Netze selten auf der Baustelle installiert sind.



Für höhere Leistungsklassen sind auf dem Markt bisher keine Maschinen verfügbar. Zukünftig werden aber auch in diesen Klassen elektrifizierte Maschinen angeboten werden, was nicht zuletzt an den Prototypen zu erkennen ist, welche die Hersteller auf einschlägigen Messen vorgestellt haben.

Beispiele für diese Maschine sind:

- *Mecalac e12*: 11 t Mobilbagger mit einer Akkukapazität von 146 kWh bei einer installierten Leistung von 75 kW und Betriebszeit von 8 h [80]
- *Cat 323F Z-line*: 26 t Kettenbagger mit einer Akkukapazität von 300 kWh bei einer installierten Leistung von 120 kW und Betriebszeit von 4 h [95]
- *Kramer 5055e*: 3,5 t Radlader mit einer installierten Leistung von 37 kW und Betriebszeit von 5 h [68]

Werden diese Leistungsklassen überschritten, können Akkumulatoren als Speicher aufgrund begrenzter Kapazitäten nicht mehr eingesetzt werden. Um den hohen Leistungs- und Energiebedarf zu decken, werden dann ausschließlich dieselektrische oder kabelgebundene Antriebssysteme eingesetzt

Beispiele für diese Maschine sind:

- *Liebherr R 9200 E*: 210 t Bagger bei einer installierten Leistung von 850 kW [77]
- *Bauer MC 96*: 130 t Seilbagger bei einer installierten Leistung von 550 kW [5]

In der Automobilbranche [110] und bei Flurförderzeugen [79] hält die Brennstoffzellentechnologie zunehmend Einzug in die Serienproduktion. Im Baumaschinenbereich sind solche Konzepte noch nicht dem Stand der Technik zuzuordnen. Aktuell sind aber neue Förderprogramme dafür geschaffen worden, welche die Forschung auf diesem Gebiet vorantreiben, auch im Baumaschinenbereich. Weiterhin nehmen erste Maschinenhersteller Aktivitäten dahingehend auf und planen bereits den Serienstart in den kommenden Jahren [130]. Mittelfristig ist mit der Anwendung dieser Antriebstechnologie zu rechnen.

2.3.2 Hydraulische Antriebstechnik

Zusätzlich zum Primäraggregate besteht eine Baumaschine aus Verbrauchern, welche die Bewegungen der Arbeitsausrüstung, des Fahr- und des Schwenkantriebes realisieren. Diese sind neben mechanischen vor allem hydraulische Komponenten, wie bspw. Hydraulikpumpen, -motoren und -zylinder. Trotz der langsamen Durchdringung des Marktangebotes der o. g. Antriebssysteme, ist das dieselhydraulische Antriebskonzept mit Abstand am häufigsten vertreten. Das ist auf die Eigenschaften hohe Leistungsdichte bei kompakten Abmessungen, hohe Robustheit und geringes Gewicht sowie geringe Kosten zurückzuführen. Dabei gibt es vielfältige Ausführungsmöglichkeiten für die Leistungsübertragung, die Leistungswandlung, die Speicherung und die Rekuperation.

Bei Baumaschinen werden hydrodynamische und hydrostatische Hydrauliksysteme unterschieden. Die hydrodynamische Kraftübertragung erfolgt über einen hydrodynamischen Wandler, welcher aus einem Pumpen- und einem Turbinenrad in einem Gehäuse besteht. Dieser ist zwischen dem Dieselmotor und dem Getriebe angeordnet und kann hohe Drehmomente bereits ab Drehzahl null übertragen.

Funktional gesehen, wird das Pumpenrad vom Primäraggregate direkt angetrieben und versetzt das Hydrauliköl in Bewegung. Dabei erfolgt eine Umwandlung von mechanischer Energie in Strömungsenergie. Auf der anderen Seite trifft das Fluid auf das Turbinenrad und es erfolgt die Umwandlung zurück in mechanische Energie. Die Anpassung von Drehzahl und Drehmoment am Wandlerausgang erfolgt dabei stufenlos und selbsttätig. Vorrangig wird dieses System als Fahrtrieb eingesetzt.

Die Komponenten der hydrostatischen Kraftübertragung sind Hydraulikpumpen und -motoren, welche im offenen oder geschlossenen Kreis örtlich voneinander getrennt angeordnet werden können. Verbunden werden diese dabei mit flexiblen Schläuchen. Auch mit diesen Systemen können Fahrwendungen realisiert werden. Dazu werden die Komponenten im geschlossenen Kreis angeordnet.

Die Pumpe(n) ist/sind direkt oder über eine Verteilgetriebe am Motor angeflanscht. Neben dem Fahrtrieb werden von hier die anderen Verbraucher versorgt. An diesen erfolgt die Leistungsumwandlung von hydraulisch in mechanisch (translatorisch oder rotatorisch).



Die Steuerung der Funktionen erfolgt über Ventile, welche durch den Bediener über Bedienelemente (z. B. Joystick) angesteuert werden (Bediener gibt Sollwege der Antriebe vor). Dabei kann die Ansteuerung der Ventile mechanisch erfolgen. Diese Ausführung zeichnet sich durch hohe Robustheit, einfaches Handling und geringe Herstellungskosten aus. Den Markt dominieren aber hydraulisch-mechanisch vorgesteuerte Ventile. Die zeichnen sich durch ein festes Verhältnis des Vorsteuerdrucks proportional zur Joystickauslenkung des Bedieners aus. Ein Eingriff in die Steuer- bzw. Regelstrecke ist bei dieser Ansteuerung nicht möglich. Mit der Forderung nach Bedienerunterstützung, Leistungs- und Effizienzsteigerung fokussieren die Hersteller zunehmend die elektrohydraulische Ansteuerung, welche erstmalig Anfang der 2000er Jahre eingesetzt wurde [129]. Bei dieser kann mittels elektrischer Stellglieder (Aktoren) die Ausgangsgröße des Systems beeinflusst werden.

Weiterhin sind viele Technologieentwicklungen in den letzten Jahren zu beobachten, welche Einzug in die Maschinen halten (werden). Zu nennen sind bspw. positionsgeregelte Ventile mit Feldbuschnittstelle und integrierter Regelelektronik, Verdrängersteuerungen (Änderung des Verdrängungsvolumens einer Pumpe bzw. eines Motors), Konzepte mit getrennten Steuerkanälen, bei welchen die zentrale Ventilstruktur hin zu dezentralen kleineren Ventilen aufgelöst werden oder auch hybride Antriebsstrukturen mit Kombinationen aus hydrostatischen und elektrischen Verbrauchern [22] [120] [13] [55] [93].

Hinsichtlich Bedienbarkeit und Energieeffizienz sind bedarfsgerechte Systeme, wie z. B. Load-Sensing Systeme mit Lastkompensation dem Stand der Technik zuzuordnen. Hier erfolgt eine lastabhängige Druckanpassung, mit welcher Energieverluste reduziert werden können [99].

2.4 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle oder Human-Machine-Interface (HMI) bezeichnet die Schnittstelle zwischen dem Menschen und der Baumaschine. Diese umfasst alle technischen Elemente, welche dem Anwender zur Bedienung und Überwachung der Maschine zur Verfügung stehen. Angeordnet sind diese bei der klassischen Baumaschine in einer geschlossenen Kabine oder einem offenen Fahrerstand und schaffen damit die Ausgangsbasis für die Interaktion zwischen Mensch und Maschine. Neben der reinen Steuerung der Maschine umfasst diese die Überwachung des Maschinenzustandes und auch Assistenzsysteme, welche den Bediener in der Anwendung der Maschine unterstützen.

Der Umsetzung des HMI sollte deshalb eine große Bedeutung beigemessen werden, da hierdurch sowohl die Ausführungsqualität als auch das Arbeitstempo und damit weiterführend die Leistungsfähigkeit und die Betriebssicherheit der Maschine beeinflusst werden. Aus diesem Grund hat sich der Entwicklungsaufwand für die ergonomische Kabinengestaltung und die HMI-Systeme in der Vergangenheit signifikant erhöht [70] [47] [29] [100] [16].

Eine Standardisierung ist dabei bis heute nicht vorhanden, sodass jeder Hersteller hier eigene spezifische Lösungen anbietet. Deshalb sind oftmals große Unterschiede der Anzeigesymbole und Bedienelemente für gleiche Funktionalitäten der Maschinen verschiedener Hersteller zu beobachten. In den Normen DIN EN 474-1 und ISO 5006 werden zwar allgemeine sicherheitstechnische Anforderungen für Erdbaumaschinen festgelegt, die auf die Gestaltung des Bedienerplatzes bzw. der Kabine eingehen sowie die Gestaltung des Sichtfeldes für eine gute Rundumsicht fokussieren. Herstellern wird aber ein großer Handlungsspielraum für die Gestaltung offengelassen [34] [56], wodurch v. a. der Umstieg auf neue oder der Wechsel zwischen den Maschinen erschwert wird, was vor allem für die Bedienung von Leihgeräten relevant ist. Dadurch werden Einarbeitungszeiten erhöht, Bedienfehler wahrscheinlicher und damit Arbeitsunfälle provoziert.

Im Folgenden sollen Ein- und Ausgabeelemente sowie ausgewählte Assistenzsysteme näher beleuchtet und damit der Stand der Technik der Mensch-Maschinen-Schnittstellen in Baumaschinen verdeutlicht werden.



2.4.1 Bedien- und Eingabelemente

Die Bedienelemente zur Steuerung einer Baumaschine werden nach [70] als Stellteile bezeichnet. Diese werden nach der Wertigkeit und Häufigkeit der Nutzung kategorisiert. Beispielsweise werden die Stellteile für die Ansteuerung der Arbeitsausrüstung durch die häufigere Nutzung einer höheren Kategorie zugeordnet als die Stellteile der Kabinenbeleuchtung. Nach dieser Klassifizierung erfolgt die Anordnung der Stellteile entsprechend den Maßen des menschlichen Körpers (Anthropometrie). Dafür werden sowohl in der Norm DIN EN 984-3 [36] als auch in der DIN EN ISO 6682 [37] und ISO 10968 [58] (Erdbaumaschinen) Gestaltungsempfehlungen geregelt.

Die Möglichkeiten zur Eingabe der jeweiligen Information sind vielfältig. In Baumaschinen werden nach wie vor vorrangig haptische Eingabelemente genutzt. Diese Elemente werden zunehmend durch eine Touchgestik (Touchscreens, -pads) erweitert. Aber auch die Gestiksteuerung und Spracheingabe könnte zukünftig an Bedeutung gewinnen.

Die klassischen Elemente wie Lenkrad und Pedale oder auch Steuerhebel werden hauptsächlich zur Steuerung der Maschine, also der Fahraufgabe, eingesetzt. Die Bedienung der Arbeitsausrüstung wird zum Großteil mit einem oder mehreren Joysticks umgesetzt. Periphere Maschinenfunktionen werden hingegen üblicherweise mit Schaltern, Tastern, Dreh- und Schiebreglern bedient. Die o. g. Touchscreens werden für diese Anwendungen immer häufiger eingesetzt. Dabei kann die Übersichtlichkeit in der Kabine durch eine themen- und funktionsspezifische Anordnung deutlich verbessert werden.

Um die Erreichbarkeit der Bedienelemente innerhalb der Kabine zu verbessern, werden diese oftmals kombiniert. Üblicherweise werden dabei Schalter, Tasten oder Drehregler an den Joysticks vorgesehen. Zusätzlich werden, aufgrund der Vielzahl der Funktionen einer Baumaschine, die Hauptbedienelemente doppelt belegt. Damit wird es möglich in Abhängigkeit von der Arbeitsaufgabe und der Werkzeugkonfiguration mit demselben Joystick verschiedene Aktoren anzusteuern.

Zusammenfassend betrachtet, stehen zur Informationseingabe bei Mensch-Maschine-Schnittstellen neben haptischen Technologien unterdessen eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten zur Auswahl, die sich mit dem technologischen Fortschritt stets erweitern (z. B. Gestiksteuerung, Spracheingabe, Head-Up-Display, Virtual/Augmented Reality).

2.4.2 Ausgabelemente

Die Rückmeldung der Maschine an den Bediener erfolgt in der Regel auf visuellem Weg. Die Empfehlungen für die Gestaltung und die Anordnung dieser Anzeigen sind in [35] und in [57] für Erdbaumaschinen aufgeführt. Zum Stand der Technik gehören sowohl die klassischen mechanischen Elemente wie bspw. Tachometer oder Betriebsstundenzählwerke als auch Kontrollleuchten, wobei diese zunehmend durch universelle Displays verdrängt werden. Diese bieten den Vorteil einer individuellen Gestaltung und einer situationsabhängigen Anzeige der wichtigsten Informationen. Außerdem werden sie in der Regel als Touchscreens ausgeführt, sodass sie als kombinierte Ein- und Ausgabelemente fungieren. Zusätzlich können die immer häufiger anzutreffenden Assistenzfunktionen über diese Displays bedient und visualisiert werden.

Der auditive Weg über Lautsprecher findet meistens bei der Warnung des Bedieners Anwendung. Gewarnt wird dabei meist vor Gefahrensituationen oder wenn Motor-, Maschinen oder Prozesskenndaten außerhalb des gültigen Bereiches liegen. Hier können Öldruck, Position der Arbeitsausrüstung oder die Motortemperatur beispielhaft genannt werden. Weiterhin sind vereinzelt haptische Rückmeldungen in den Maschinen anzutreffen. Dazu gehören vibrierende Bedienelemente oder auch Force-Feedback-Joysticks [29] [131].



Tabelle 1: Übersicht eingesetzter Ein- und Ausgabeelemente in Baumaschinen

Typ	Nr.	Art	Element	Ausführungsvarianten	Anwendungsbeispiele
Eingabe	1	haptisch	Regler	Drehregler/ Schieberegler/ Stellhebel	Gaspedal, Leistungsstufenauswahl, Lüftung, Betätigung der Arbeitsausrüstung
Eingabe	2	haptisch	Schalter/ Taste	Hard-/Softkey, Kipp-/Drehschalter	Beleuchtung, Aggregate, Betriebsmodi
Eingabe	3	haptisch	Joystick	hydraulisch, elektrisch	Arbeitsausrüstung, Schwenken, Lenkung
Eingabe	4	haptisch	Steuerrad	mechanisch, hydraulisch	Lenkung
Eingabe	5	haptisch	Touchfläche	Touchscreen, Touchpad	universelle Eingaben, Assistenzsysteme
Ausgabe	6	visuell	mechanische Anzeige	Zeiger, Zähler/-walzen	Tachometer, Tankanzeige, Betriebsstundenzähler
Ausgabe	7	visuell	Kontrollleuchte	einfache Leuchte, Symbol-/Farbvarianten	Öltemperatur, Beleuchtung, Betriebsart
Ausgabe	8	visuell	Display	Segmentanzeige, Terminal	Maschinenfunktionen, Assistenzsystem
Ausgabe	9	haptisch/ taktil	Forced Feedback	Joystick, Lenkrad	Joystick-Lenkung
Ausgabe	10	haptisch/ taktil	Vibration Feedback	Vibrationsmotoren, Piezoaktoren	Eingabebestätigung
Ausgabe	11	auditiv	Lautsprecher	Elektromagnetisch, piezoakustisch	Warnsignal, Eingabebestätigung

2.4.3 Bedienerarbeitsplatz und Arbeitssicherheit

Die Gestaltung des Bedienerarbeitsplatzes hat maßgebliche Auswirkungen auf die sichere und effiziente Bedienung der Baumaschine. Die Sicht des Fahrers muss entsprechend der Norm ISO 5006 so gestaltet sein, dass er vorgegebene Umgebungsbereiche durch direkte Sicht einsehen kann. Eine Erweiterung des Sichtfeldes ist durch Kamera-Monitorssysteme (KMS) möglich. KMS bestehen aus einer Kamera, einer Datenübertragung (analog oder digital) sowie einem Monitor. KMS sind bereits weit verbreitet als Rückfahrkamera, zur Schwenkbereichsüberwachung, als Hakenkamera am Kran oder als Seitenkamera an Maschinen mit langem Vorderwagen (Radlader). Über mehrere Kameras auf dem Dach der Maschine kann mittels Video-Stitching eine Rundumsicht der Maschinenumgebung erzeugt werden. Der Fahrer kann die Maschine aus der Vogelperspektive im Monitor überwachen. Ein nächster Schritt für mehr Arbeitsschutz ist die automatische Detektion von Hindernissen und Personen im Maschinenumfeld und die gezielte Information des Fahrers. Erste Objekt- und Personenerkennungssysteme sind bereits marktverfügbar.

Neben den visuellen Informationen ist eine vestibuläre Wahrnehmung des Arbeitsprozesses (Wahrnehmung von Beschleunigungen durch das Gleichgewichtsorgan/Innenohr) wichtig. Durch moderne, gedämpfte Fahrersitze werden schädliche Vibrationen und Stöße auf den Fahrer reduziert oder gar verhindert. Der Schutz des Beschäftigten vor Schädigungen oder Beeinträchtigungen durch Ganzkörpervibrationen oder Hand-Arm-Vibrationen ist in der „Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen“ geregelt.



Nicht zu unterschätzen ist jedoch auch die Rückmeldung der Prozesskräfte im Maschinenbetrieb auf den Fahrer. Ist der Fahrer zu stark vom Prozess entkoppelt, kann es zu einer verschleißintensiven und schadensanfälligen Maschinenbedienung kommen. Neben der Vibration ist auch die Lärmeinwirkung auf den Fahrer und seine Umgebung relevant. Es existieren Tages-Lärmexpositionspegel und Spitzenschalldruckpegel, die beim Betrieb einer Maschine eingehalten werden müssen. Zusätzliche Reduzierung der Lärmexposition des Fahrers kann durch passiven Gehörschutz (Kapselgehörschutz, Orthesen) oder aktiven Gehörschutz (Active-Noise-Cancelling – ANC) realisiert werden. Die Fa. RECALM bietet ANC-Lösungen speziell für Off-Road-Fahrzeuge an, die direkt in die Kopfstütze integriert sind [97].

2.4.4 Onboard Diagnose

Die Onboard-Diagnose ermöglicht dem Servicetechniker, Fehler in der Maschine zu finden. Im Vergleich zum mechanischen Defekt treten diese Fehler meist geräuschlos und unsichtbar auf, wodurch die Bestimmung deutlich erschwert wird. Deshalb ist an Baumaschinen, eine Möglichkeit zur Diagnose des elektronischen Systems vorgesehen. Diese umfasst eine Schnittstelle (Data Link Connector (DLC)), an welcher die Fehlercodes der einzelnen Steuergeräte ausgelesen werden können. Alle relevanten Steuergeräte müssen dabei mit dem System verbunden sein. Die Kommunikation erfolgt über das CAN-Netzwerk, wobei hier der CAN-Standard auf Basis der SAE-J1939 Anwendung findet. Diese von der Society of Automotive Engineers (SAE) entwickelte Norm wird als Heavy-Duty Onboard Diagnostics bezeichnet (HD-OBd). Neben motorspezifischen Signalen, werden auch emissions- bezogene Informationen in dieser Norm festgelegt. Die festgelegten Spezifikationen, zielen alle darauf ab, die Kosten und den Aufwand der Reparatur abgasrelevanter Fehler durch unabhängige Reparaturbetriebe zu reduzieren. Folglich sind die Fehlercodes, die Konfiguration des DLC, die Kommunikationssprache und andere Netzwerkmerkmale im Zusammenhang mit Abgasreinigungssystemen standardisiert.

Der entwickelte Fehlercode-Reporting-Standard, legt für jede Fehlermeldung eine Kennung fest. Diese definiert den Sender der Fehlermeldung, welche Daten in der Meldung enthalten sind und welche Priorität und Seriosität das Fehlerproblem hat. Die zugehörigen Komponenten sind zum einen die Suspect Parameter Number (SPN), als kleinster identifizierbarer Fehler und Failure Mode Indicator (FMI), als Fehlerart, die erkannt wurde. Zum anderen die Source Address (SA), welche das sendende Steuergerät identifiziert, und der Occurrence Count (OC), welcher die Häufigkeit des Fehlerauftritts beinhaltet. Exemplarisch für einen Fehlercode ist Abbildung 3 aufgeführt.

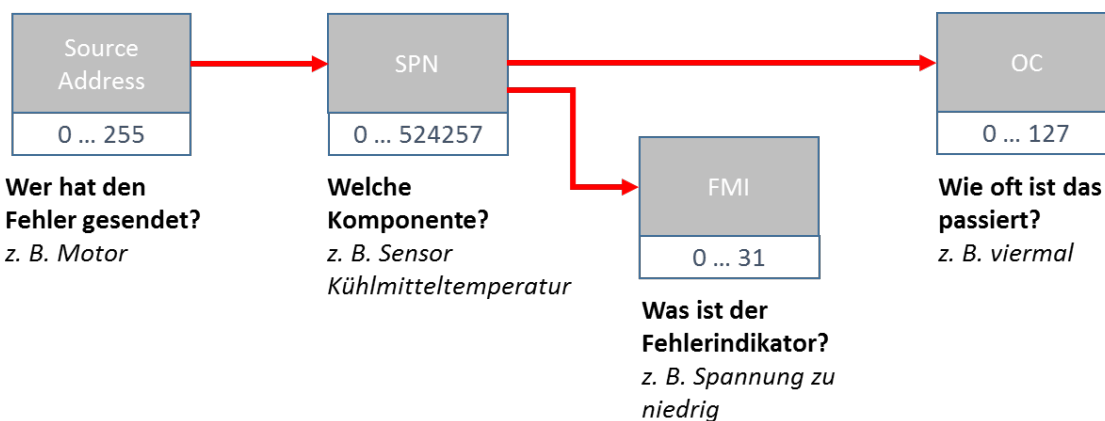


Abbildung 3: Aufbau eines J-1939 Diagnostic Trouble Codes (DTC) zur Übermittlung von Fehlern im Fahrzeugbordnetz



2.5 Assistenz und Automatisierung

Perspektivisch können durch die Automatisierung von Arbeitsprozessen der Komfort, die Sicherheit und die Produktivität gesteigert werden. Blickt man noch weiter in die Zukunft können die körperlichen Belastungen des Fahrers durch Vibrationen und Lärm gänzlich reduziert werden, da ein Einsatz des Bedieners auf der Maschine nicht mehr notwendig ist. Dieser führt dann räumlich getrennt von der Maschine überwachende Tätigkeiten aus. Da die Vollautomatisierung von mobilen Arbeitsmaschinen noch nicht am Markt verfügbar ist, kann an dieser Stelle auch nicht die Zuordnung zum Stand der Technik erfolgen. Die Teilautomatisierung einzelner Prozesse hat hingegen bereits Einzug in einzelne Maschinen gehalten und ist als Zwischenschritt auf dem Weg zur Vollautomatisierung anzusehen. Die vollständige Reduktion der körperlichen Belastungen kann mit der Teilautomatisierung also nicht erfolgen, da bisweilen die Anwesenheit des Bedieners erforderlich ist. Dennoch kann der Bediener entlastet und damit die Arbeitsbedingungen verbessert werden [98]. Das wiederum kann zur Steigerung der Produktivität, Erhöhung der Qualität und damit letztlich zur Kostenreduktion für den Bauunternehmer führen.

2.5.1 Assistenzsysteme

Im einfachsten Fall wird der Maschinenbediener bei seiner komplexen Arbeitsaufgabe durch Assistenzsysteme unterstützt und das in zunehmendem Maße. Diese werden entweder von den Herstellern selbst oder in Zusammenarbeit mit einem OEM entwickelt. Teilweise sind sie bereits als Serienausstattung in den Maschinen verfügbar, häufiger aber als optionale Ausstattung konfigurierbar. Weiterhin sind an dieser Stelle Nachrüstätze von Drittanbietern zu nennen, welche am Markt verfügbar sind.

Zum Einsatz kommen diese Assistenzsysteme immer, wenn ein hohes Maß an Genauigkeit bei der Ausführung der Tätigkeit erforderlich ist (z. B. bei der Erstellung eines Planums oder der Gestaltung einer Böschung mit einem Mobilbagger). Ein weiterer Aspekt ist die Steigerung der Effizienz durch eine Assistenzfunktion. Dazu wurden bereits erste Studien durchgeführt, welche im Ergebnis eine Verbesserung der Ausführungsqualität erfahrener Bediener um 75% bei einer Steigerung der Ausführungsgeschwindigkeit um 41% herausstellten. Für unerfahrene Bediener konnte die Genauigkeit bei einer Geschwindigkeitssteigerung um 28% sogar verdoppelt werden [71]. Weiterführend können die mit dem Assistenzsystem gewonnenen Daten gespeichert und zentral weiterverarbeitet werden, bspw. für ein Flottenmanagement oder die Qualitätssicherung.

Im Erdbaubereich sind unterschiedliche Systeme verfügbar, die oftmals als „Maschinensteuerung“ bezeichnet werden. Erhältlich sind dabei 1D-, 2D- und 3D-Systeme, welche sich in den aufgenommenen Positionsdaten unterscheiden. Bei 1D-Steuerungen wird ausschließlich die Höhe des Arbeitswerkzeuges bestimmt, für 2D-Steuerungen kommt eine weitere Betrachtungsebene hinzu, für Baggeranwendungen bspw. die Schwenkbewegung. Damit erreichen die Systeme eine lokale 3D-Information der Arbeitsausrüstung. Als 3D-Steuerungen werden aber Systeme bezeichnet, welche die Position der Maschine im Baustellenkontext bestimmen. Dies erfolgt mit einem Lasersystem oder per GNSS. Damit kann die Position des Arbeitswerkzeuges im Geländemodell abgebildet werden.

Anwendung finden diese typischerweise bei Erdarbeiten mittels Bagger, Planierdrape oder Grader. Die Systeme erfassen in der Regel über die Sensorik die Positions- und Höhendaten von der Maschine und der Arbeitsausrüstung, werten diese aus und unterstützen den Bediener bei der Arbeitsaufgabe anhand dieser Daten. Je nach Systemausführung können zusätzliche Sollgrößen wie die Lage eines Planums, der Böschungswinkel oder auch die Grabentiefe zu den Arbeitsaufgaben hinzugefügt werden. Diese Planungsdaten werden zukünftig über BIM-Systeme zur Verfügung gestellt werden. Visualisiert werden dem Bediener diese Daten über interaktive Displays. Dabei werden Soll- und Ist-Daten angezeigt, womit der Anwender auf Abweichungen reagieren und somit die Arbeitsaufgabe optimieren kann.

Einen Schritt weiter geht die Eingriffsmöglichkeit bei semiautomatischen Steuerungssystemen. Diese sind in der Lage direkt in die Steuerungshardware (z. B. Hydraulik) einzugreifen und teilautomatisiert Aktoren der Arbeitsausrüstung zu bewegen. Damit können die Sollkoordinaten des Werkzeuges mit geringen Abweichungen eingestellt werden. Im Erdbaubereich erreichen derartige Steuerungssysteme Genauigkeiten im unteren Millimeterbereich [67].



Die Datenerfassung erfolgt bei 2D-Steuerungen in der Regel mit Lasermesssystemen und Neigungssensoren. Bei 3D-Steuerungen werden zusätzlich Totalstationen und GNSS-Systeme zur Erfassung der globalen Position der Maschine eingesetzt. Wird eine zusätzliche Höhenmessung notwendig, wie z. B. bei Gradern, kommen Ultraschallsensoren zum Einsatz. Die Erfassung der Lage der Aktoren der Arbeitsausrüstung wird mit Rotations- oder Neigungssensoren sowie Wegmesssystemen bestimmt [105] [121] [81] [73] [20] [102] [109].

Neben Assistenzsystemen für Erdabreiten sind auf dem Markt auch Systeme für Ladeaufgaben erhältlich. Darunter zählen Systeme zur Lademassenbestimmung, welche die Daten über den aktuell ausgeführten Ladevorgang erfassen und diese auswerten. Der Umschlagprozess kann mit solchen Systemen optimiert werden [122] [94]. Diese Wiegeeinrichtungen werden von verschiedenen Hersteller (CATERPILLAR CPM [23], Load Assist VOLVO [122]) sowohl für Bagger als auch für Radlader angeboten. Diese beruhen immer auf dem gleichen Prinzip, bei welchem die Berechnung der Last aus den Hubzylinderücken erfolgt und die aktuelle Stellung des Hubergerüsts über Winkelgeber oder Positionssensoren erfasst wird [4]. Die geladene Masse in der Schaufel kann mit einer Genauigkeit von $\pm 1\%$ [24] ermittelt werden. Der Wiegevorgang wird kontinuierlich ohne Unterbrechung des Arbeitsablaufs durchgeführt. Die Darstellung der aktuell geladenen Masse erfolgt dabei auf Grafikdisplays. Auch als Nachrüstätze sind solche Systeme erhältlich [4].

Im Straßenbau existieren Assistenzsysteme zur Überwachung der Asphaltmischguttemperatur oder der Schichtdicke. Anzutreffen sind diese im Asphaltdeckenfertiger, wo dem Bediener die Möglichkeit gegeben wird, die Einstellparameter des Prozesses an die vorherrschenden Umgebungsbedingungen, z. B. Untergrundtemperatur oder die Wettereinflüsse, anzupassen. Damit können negative Effekte wie die thermische Entmischung vermieden oder durch die Schichtdickenmessung die eingebaute Asphaltmenge im Sollbereich gehalten. Damit einher gehen Qualitätssteigerungen bei Kostenreduktionen [6] [123].

Auch für Verdichtungsmaschinen sind Assistenzsysteme schon seit längerem dem Stand der Technik zuzuordnen. Beispielsweise GNSS-gestützte Systeme bei Vibrationswalzen, welche die Anzahl der Überfahrten über die zu verdichtende Fläche zählen, bei Asphaltverdichtung die Materialtemperatur bestimmen oder den Verdichtungsfortschritt überwachen. Dem Bediener werden die Prozessinformationen über ein Display angezeigt und ihm damit die Möglichkeit gegeben, bei Abweichungen entsprechend gegenzusteuern. Weiterführend bieten solche Systeme die Möglichkeit der Vernetzung, sodass auf Großbaustellen für ganze Walzenflotten eine Prozessoptimierung erfolgen kann. Damit können bspw. unnötige Überfahrten von Verdichtungsbereichen mehrerer Walzen vermieden werden und damit die Kosten und Einsatzzeiten reduziert werden [82] [117]. Weiterführend gibt es aktive Systeme, welche für leichte (Anbauverdichter, Vibrationsplatten) oder auch schwere Verdichtungsmaschinen einen Eingriff in die Maschinensteuerung umsetzen, mit dem die Maschinenparameter, basierend auf Messdaten, optimal an den Prozess angepasst werden [1] [12] [83].

Auch die Maschinen- und Arbeitssicherheit spielt eine zunehmend bedeutendere Rolle, weshalb vermehrt Assistenzfunktion auf deren Steigerung abzielen. Zu nennen sind hier Systeme zur Umfelderkennung, die Gefahrensituationen, die Personen oder Maschinen im Arbeits- und Fahrbereich detektieren und dem Bediener über ein Signal (auditiv, optisch) [31] [75] [51] [3] anzeigen.

Der Service- und Wartungsbereich wird ebenfalls vermehrt durch Assistenzsysteme unterstützt. Funktionen wie die Reifendruckkontrolle zählen dabei u. a. zu den Systemen, welche über sensorische Überwachung, dem Bediener Handlungsempfehlungen bezüglich des Betriebszustandes der Maschine geben [75]. Über die Anwendungen mit Augmented-Reality (AR) kann das Servicepersonal im Falle von Betriebsstörungen vor Ort unterstützt werden. Dabei wird der Techniker direkt an der Maschine über Smartphone, Tablet-PC oder eine Datenbrille (Smartglasses) entweder mit Informationen wie Reparaturanleitungen oder Ersatzteilkatalogen versorgt oder mittels Bildübertragung direkt mit einem Experten in der Firmenzentrale verbunden. Damit können Reparaturen und Ersatzteilbestellungen schneller erfolgen und Stillstandzeiten verkürzt werden [92] [44] [88].



2.5.2 Automatisierung

Für die Maschinen **Radlader, Bagger, Planierraupe (Dozer) und Erdhobel (Grader)** werden die Assistenzsysteme und automatisierte Funktionen in diesem Abschnitt zusammen behandelt, da sich die Systeme und Funktionalitäten in den meisten Fällen auf differierenden Maschinen wiederfinden. Nahezu alle Baumaschinen leisten mechanische Arbeit durch Bewegung der Arbeitsausrüstung oder des Fahrwerks, wobei Kräfte und Momente auf die Umgebung übertragen werden. Wechselnden Prozessmedien und Umweltbedingungen wird dabei mit einem Zusammenspiel aus mechanischen, elektrischen und hydraulischen Komponenten begegnet.

Vor allem die stark differierenden Prozessmedien erschweren die umfassende Automatisierung der Arbeit einer Baumaschine. Am Beispiel eines Radladers, welcher bei einem Ladespiel sowohl leichte und trockene Hackschnitzel in einer Industrieanlage als auch große Steinbrocken in einem Steinbruch bei Regen transportieren können muss, wird die Heterogenität des Materials besonders deutlich. Die Erfassung der stofflichen Zusammensetzung sowie die geometrische Form des Ladeguts und weiterführend die Beschreibung in mathematischen Modellen sind die größte Schwierigkeit bei der Automatisierung von Baumaschinen. Die daraus resultierende Komplexität ist ein Grund dafür, dass bisher nur eine überschaubare Anzahl an teilautomatisierten Maschinen verfügbar ist. Im Gegensatz dazu sind lastarme oder lastfreie Aufgaben, wie bspw. die Fahraufgabe, mit technischen Einschränkungen leichter zu automatisieren. Die auf dem Baumaschinenmarkt verfügbaren automatisierten Prozesse werden im Folgenden beschrieben und an Beispielmaschinen gezeigt.

Automatisiertes Fahren

Mobile Arbeitsmaschinen sind mit Rad- oder Kettenfahrwerken ausgestattet und müssen auch bei widrigen Gelände- und Umgebungsbedingungen die Zugkraft auf den Untergrund übertragen. Teilaufgaben, die zur Automatisierung dieses Prozesses erfüllt werden müssen, sind die sensorische Erfassung der Umgebung, die lokale Referenzierung, die Navigation und die Trajektorienplanung. Diese gleichen sich mit den Aufgaben, die bei der Entwicklung autonomer Straßenfahrzeuge gelöst werden müssen. Das begünstigt die Automatisierung der Fahrfunktion da geeignete Sensorik sowie die Methodik für die Umsetzung verfügbar sind.

Bis heute am häufigsten umgesetzt, ist das automatisierte Fahren bei Muldenkippern in Großtagebauten und Bergwerken. Eine Vielzahl an Herstellern wie CATERPILLAR, KOMATSU und SANDVIK bieten dabei System mit Fernnavigation an [96] [25] [101]. Die Anwendung in abgeschlossenen Arealen wie Tagebauten bietet ideale Bedingungen für eine automatisierte Fahrfunktion. Es gibt keine unbekannt Objekte oder unbefugten Personen und die Fahrstrecken sind auf vollständig kartierten Gebieten festgelegt. Die Orientierung erfolgt untertage an den Tunnelwänden und im Tagebau über GNSS. Für den reinen Fahrweg verfügen die Fahrzeuge über Umgebungserkennungssysteme für die Detektion von Schlaglöchern, anderen Maschinen oder sonstigen Hindernissen. Das Verrichten der Arbeit wird am Zielort aber per Fernsteuerung übernommen.

Daraus leiten sich die derzeitigen Anforderungen an eine automatisierte Fahraufgabe ab. Diese sind:

- eine strukturierte, kartierte, überwachte und kontrollierte Umgebung
- einfache und eindeutig definierte Aufgaben
- Ausschluss von Personen auf dem Gelände
- keine manuell geführten Maschinen oder Fahrzeuge

Daraus wird ersichtlich, worin die derzeitigen Hemmnisse für die Umsetzung auf der Baustelle bestehen. Die Theorie zeigt, dass die regelungstechnischen Anforderungen an die automatisierte Fahrfunktion durchaus überschaubar sind, die zugehörigen Teilaufgaben Antriebsregelung, Lenkung, Kurvenfahrt, Schlupfregelung, Kippkontrolle sind gänzlich aus dem Kraftfahrzeugbereich bekannt und unter Voraussetzung einer elektrisch steuerbaren Maschine adaptierbar. Die Begründung, dass es im Erdbaubereich keine selbstfahrenden Maschinen gibt, liegt darin, dass die Umgebungssensorik mit den notwendigen Auswertgorithmen noch keine Marktreife erreicht hat. Hier besteht noch Entwicklungsbedarf um den chaotischen Strukturen einer Baustelle mit verschiedenen Gewerken, Maschinen und Menschen gerecht zu werden.



Automatisiertes Bewegen der Arbeitsausrüstung

Die Hauptaufgabe eines Baggers ist die Bewegung der Arbeitsausrüstung durch das jeweilige Arbeitsmedium. Diese Bewegung kann so vielfältig wie das Arbeitsmedium selbst sein. Beispiele sind das Ausheben einer Grube mit einem Tieflöffel, Arbeiten mit einem Greiferwerkzeug, bspw. Holzstämme oder Schrott umschlagen, oder das Führen eines Anbauverdichters auf dem Boden. Die Steuerung übernimmt der Fahrer, indem dieser die Bewegung mit den Joysticks vorgibt. Jede Joystickachse ist einem Aktor zugeordnet und die manuelle Kombination der Einzelbewegungen ergibt bevorzugt eine flüssige Gesamtbewegung der Arbeitsausrüstung. Diese Überlagerung ist vor allem für ungeübte Bediener schwierig zu realisieren. Erst mit der nötigen Übung und Erfahrung kann die gewünschte Bewegung intuitiv umgesetzt werden. Zusätzlich wird die Bewegung im Rahmen der Bodeninteraktion gehemmt, da unterschiedliche Prozesslasten auftreten. Hierbei kann die Bewegung sogar verhindert werden (z.B. zu tiefes Graben).

An dieser Stelle setzt die Automatisierung an. Wobei der Großteil der auf dem Markt verfügbaren Lösungen reine Visualisierungen der Arbeitsbewegungen darstellen. Bei diesen Systemen wird die Lage der Arbeitsausrüstung sensorisch erfasst (z. B. IMUs, Neigungssensoren und Zylinderlängensensoren). Damit kann ein Abgleich zwischen Soll- und Ist-Geometrie der Arbeitsausrüstung erfolgen und die Abweichung von gewünschter und tatsächlicher Werkzeugposition dem Bediener auf einem Display angezeigt werden. Dieser hat dann die Möglichkeit manuell zu korrigieren und er erhält letztlich einen besseren Prozesseinblick [72] [112].

Nur wenige Hersteller bieten Systeme für eine automatisierte Bewegung der Arbeitsausrüstung an. Auch hier besteht eine große Schwierigkeit in der Erfassung der Umgebung und zusätzlich in der Berücksichtigung der Prozesslast in der Regelung. Das Ziel ist die Schaffung eines effizienten Arbeitsprozesses. Der erfahrene Bediener kann mit seinem Wissen genau das umsetzen. Er weiß wie die optimale Führung des Löffels aussieht und wie tief er im jeweiligen Erdstoff graben kann. Auch auf Hindernisse kann er reagieren. Die Bodenbeschaffenheit zu bestimmen, ist aus wissenschaftlicher Sicht nicht trivial und aus diesem Grund in den aktuellen Baggersteuerungen nicht berücksichtigt.

Die am Markt verfügbaren Systeme beschränken sich auf Prozesse mit geringen Lasten, wie z. B. das Planum ziehen [26] [66]. Bereits mit diesen Systemen sind aber Steigerungen der Produktivität im Vergleich zum konventionellen Prozess unter Zuhilfenahme eines Messgehilfen zu verzeichnen [105].

Ein weiteres Problem dem begegnet werden muss, ist der notwendige Eingriff in die Baggersteuerung. Da eine Vielzahl der heute verfügbaren Systeme von Sensor- und Elektronikherstellern angeboten werden und nicht von den Maschinenherstellern selbst, setzt die Umsetzung eine Zusammenarbeit mit eben diesen voraus, welche sich häufig schwierig gestaltet. Vor allem in modernen Maschinen mit elektrohydraulisch vorgesteuerten Ventilen ist die Umsetzung dann nicht möglich. Für Maschinen mit hydraulisch vorgesteuerter Ventiltechnik sind sogenannte „retrofit“-Lösungen am Markt erhältlich. Diese sind zwar aufwendig aber auch ohne die Mitwirkung der Hersteller umsetzbar [114]. Die Hersteller bieten häufig eigene Systeme an oder arbeiten gezielt mit einzelnen Steuerungsherstellern wie LEICA, TRIMBLE und XSITE zusammen, um an den Maschinen Vorrüstungen für die spätere Erweiterung des jeweiligen Partners vorzusehen (DOOSAN) [89].

Auch für Radlader werden entsprechende Systeme zur Automatisierung der Arbeitsausrüstung angeboten. Grundsätzlich arbeiten diese nach dem gleichen Prinzip, wie die im Bagger eingesetzten Systeme. Im Unterschied müssen dabei aber nur zwei Aktoren aktiv angesteuert werden (Hub- und Kippzylinder). Es ergeben sich die gleichen Schwierigkeiten bei der Berücksichtigung der Prozesslasten aus der Werkzeug-Boden-Interaktion und zusätzlich müssen noch die translatorischen Anteile aus der Fahrbewegung einbezogen werden, bspw. beim Einstechen ins Haufwerk. Aus diesem Grund beschränken sich verfügbare Systeme auf einfache Bewegungen der Arbeitsausrüstung, ohne den Fahranteil zu berücksichtigen. Als Beispiel sei das HITACHI Auto Level System genannt, welches eine automatische Rückstellung der Schaufel parallel zum Boden nach dem Entladevorgang realisiert und zusätzlich vom Fahrer definierte Hubhöhen automatisiert anfahren kann [52].



Automatisiertes Planieren

Das Planieren oder auch Planum ziehen ist das Erstellen einer planaren Fläche (Planum). Das automatisierte Planieren ist am Markt in einer Vielzahl von Maschinen verfügbar. Wie zuvor angedeutet, resultiert das in erster Linie aus den geringen Prozesslasten, welche während dieser Tätigkeit auftreten. Diese Tätigkeit kann auf der Erdbaustelle von verschiedenen Maschinen realisiert werden. Dazu zählen die Planierdraupe (Dozer), der Erdhobel (Grader) und der Bagger. Im einfachsten Fall kann das Planum über die Einstellung des Werkzeuges auf eine definierte Höhe hergestellt werden. Das gestaltet sich für den Bagger aufgrund der drei anzusteuernenden Aktoren am komplexesten im Vergleich zu Dozer und Grader.

KOMATSU bietet diese Funktion mit einer semiautomatischen Steuerung, welche die Bezeichnung Intelligent Machine Control (IMC) trägt, an. Die Sollvorgabe erfolgt über die Eingabe des Geländeprofils auf die Steuerung. Der Bediener wird bei der Erstellung des Bauwerkes dahingehend unterstützt, dass das System beim Erreichen der Sollhöhe durch einen aktiven Eingriff in die Steuerung der Arbeitshydraulik keinen weiteren Erdabtrag zulässt. Erreicht wird das durch eine Echtzeitvermessung des Bauwerks im Betrieb. Damit können deutliche Zeitvorteile generiert werden, da zum einen die Arbeitsgeschwindigkeit durch den Bediener erhöht werden kann und weiterhin eine zeitaufwendige Korrektur bzw. Anpassung des Feinplanums entfällt [84] [64]. Erhältlich ist diese Funktion in ausgewählten Hydraulikbaggern (z. B. PC210LCi-10) und Dozern (KOMATSU D61PXi-2). Dieses 3D-Steuerungssystem kann auch für ähnliche Erdbewegungsarbeiten wie Ziehen eines Grabens oder auch Anlegen einer Böschung eingesetzt werden.

Für den Bagger ist es dabei noch eher einer Assistenzfunktion zuzuordnen. Für den Dozer D61PXi-2 ist mit diesem System eine vollautomatische Schildsteuerung realisiert worden. Dabei kann zusätzlich das Grobplanum mit diesem System durchgeführt werden. Während dieses Prozesses wird die Schildhöhe an die Schildlast (Last die aufgrund des Erdabtrages am Schild entsteht) angepasst. Zusätzlich zu den Vorteilen beim Einhalten der Planungsdaten kann so der Kettenschlupf minimiert und die Effizienz des Prozesses gesteigert werden. Die Parameter die gesteuert werden, sind die Schildhöhe und -neigung. Mit diesen ist es möglich, ein exaktes Höhenprofil herzustellen [84]. Zur Erfassung der Umgebung ist das System mit 3D-Laserscannern und Stereo-Kameras ausgerüstet [61]. Die Position der Arbeitsausrüstung wird über IMUs erfasst.

Auch CATERPILLAR bietet seit 2018 für ausgewählte Baggermodelle eine ähnliche Planierautomatik an („Grade Control“). Hierbei handelt es sich um eine erweiterte 2D-Steuerung, bei welcher der Bediener die Löffelschneide an einem Referenzpunkt kalibriert und die Zieltiefe von diesem Punkt aus festlegt. Das Planieren erfolgt über eine automatische Ausleger- und Löffelsteuerung. Der Bediener muss lediglich die Stielbewegung mit dem Joystick ansteuern. Der Löffelschneidenwinkel (Löffelschneide = Teil des Löffels der gegen den Erdstoff bewegt wird [70]) wird konstant gehalten und die Höhe über den Ausleger eingestellt. Dem Bediener werden Informationen über die Längs- und Querneigung und auch eine Höheninformation im Display dargestellt. Auch dieses System beinhaltet eine Abschaltfunktion der Arbeitshydraulik beim Über- oder Unterschreiten der definierten Höhen. Optional kann dieses System auch zur 3D-Steuerung durch die TRIMBLE 3D-GNSS-Steuerung erweitert werden. Auch CATERPILLAR bietet diese Funktionalitäten für Dozer und Grader an [27]. Beim Hersteller CASE heißt das korrespondierende System SiteControl. Auch hier wird die Soll- und Ist-Position des Werkzeuges dem Fahrer auf einem Display angezeigt [19] [18].

Das herstellerunabhängige System Copilot von VEMCON soll an jedem Bagger applizierbar sein [115]. Zum Nachrüstsatz gehören ein Steuergerät, ein Display und die notwendige Sensorik (IMU, Druck- und Temperatursensoren). Handelt es sich um einen hydraulisch vorgesteuerten Bagger, wird außerdem ein elektrohydraulischer Vorsteuerblock notwendig, welcher den hydraulischen Vorsteuerdruck der Ventile durch elektrische Druckminderventile einstellt. Die Arbeitsbewegung wird bei diesem System vom Bediener vorgegeben und damit ein neuronales Netz angelernt. Anschließend kann das System diese selbsttätig ausführen. Auch von der TOPCON Positioning Group [90] wird ein ähnliches System angeboten. Benannt als automatische Tiefensteuerung bietet jenes auch lediglich eine Begrenzungsfunktion für vordefinierte Profile. Die Kalibrierung erfolgt hier aber über eine Referenzstation [90].

Für Tiltrotatoren bietet der Markt Systeme mit automatisierter Neigungsfunktion an. Dabei gibt der Bediener die Neigung des Tiltrotators je nach Profilineigung des Erdbauwerks vor. LEICA Geosystems hat in Zusammenarbeit mit ENGCON das „D-Steuerungssystem IXE Copilot“ weiterentwickelt [42] [30].



Dabei handelt es sich um ein ähnliches System wie die zum Planieren gezeigten Anwendungen, erweitert um die Neigungsfunktion [115].

Automatisiertes Laden

Aufgrund der bereits benannten Problematik der Werkzeug-Boden-Interaktion mit stark differierenden Eigenschaften von Böden und Schüttgütern, sind am Markt hauptsächlich Assistenzsysteme verfügbar, die den Ladevorgang nur unterstützen. Solch eine teilautomatisierte Ladefunktion bietet CATERPILLAR mit der AutoDig Funktion beim Radlader an. Der Ladevorgang wird dahingehend beeinflusst, dass das System die Ansteuerung von Hub- und Kippzylinder an der Arbeitsausrüstung automatisch nach einer vorgegebenen Trajektorie vornimmt. Der Bediener aktiviert diese Funktion auf Knopfdruck und beim Einstechen in das Haufwerk wird die Bewegung ausgeführt, der Bediener übernimmt dabei weiterhin den Fahr- und Lenkvorgang. Damit kann der Ladevorgang bezüglich Dauer und Schaufelfüllung optimiert werden, was besonders für ungeübte Fahrer eine Erleichterung darstellt [134].

Fast vollständige Marktdurchdringung hat die Funktion Return-to-Dig erreicht. Auch diese zielt auf die Optimierung des Ladeprozesses ab, indem die Radladerschaufel nach dem Ladevorgang immer in die gleiche Ausgangsstellung zurückkehrt. Die halbautomatische Entladefunktion (z. B. Boom Kick-Out von Volvo [118]) kann den Ladevorgang noch weiter beschleunigen, da mit dieser eine vordefinierte Hubhöhe nicht überschritten werden kann. Die Fahraufgabe wird auch bei diesen Funktionen vom Bediener übernommen. Mit der Systemunterstützung kann dieser sich auf die Vorwärtsbewegung beim Einstechen ins Haufwerk konzentrieren, da diese oftmals, vor allem von ungeübten Fahrern, durch einen hohen Schlupfanteil der Räder ineffizient ausgeführt wird. Auch für diese Problematik sind Assistenten am Markt verfügbar wie die stufenlos automatisch arbeitende Zugkraftregulierung XPower von LIEBHERR. Diese besteht aus einem leistungsverzweigten Getriebe, mit dem die Antriebsleistung, durch die stufenlose Kombination von hydraulischem und mechanischem Antrieb, an die Anforderungen des Einsatzes angepasst werden kann [132]. KAWASAKI bietet mit Intelligidig ein System mit gleicher Funktionalität an, welches aber über den Eingriff in das Motorsteuergerät die Antriebsleistung reduziert und damit das Durchdrehen der Räder reduziert. Mit beiden System lassen sich die Schlupfwerte reduzieren und Kraftstoff einsparen [45]

2.5.3 Walzen

Dynamisch erregte Walzen werden im Straßen- und Tiefbau zur Verdichtung von Asphalt- und Bodenschichten verwendet. Um die Qualität der durchgeführten Verdichtung zu beurteilen, wird die Tragfähigkeit des verdichteten Untergrunds mithilfe der *Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle* (FDVK) bewertet. Diese beurteilt die Bodentragfähigkeit aus den gemessenen Beschleunigungen am Walzenkörper. Solche Systeme werden in verschiedenen Ausführungsstufen, sowohl von den Walzenherstellern [11] selbst, als auch als Add-On Systeme (MOBA) angeboten. Es handelt sich dabei bei allen Systemen nicht um eine direkte Messung der Verdichtung, sondern um indirekte Verfahren, welche aus dem gemessenen Bewegungsverhalten [59] das Steifigkeitsmodul des Bodens bestimmen und dem Bediener anzeigen [49].

HAMM hat mit dem HCQ-Navigator ein solches System im Angebot, welches, über die zusätzliche Bestimmung der Position (GNSS) und eine kontinuierliche Speicherung beider Parameter, den Verdichtungsfortschritt ermittelt. Über eine Datenübertragung kann mit diesen Parametern außerdem der Baufortschritt überwacht werden. Zusätzlich beinhaltet dieses System Rückfahrkameras, einen Tempomaten und eine automatische Reversierfunktion [91]. Dabei handelt es sich um reine Assistenzsysteme. Ein autonomer Walzenbetrieb ist derzeit noch nicht dem Stand der Technik zuzuordnen. Der Hersteller BOMAG zeigt aber mit einem Pilotprojekt bei der zentralen Abfallwirtschaft Kaiserslautern, dass dies angestrebt wird. Hier wurden zwei Walzen mit Umfeldsensorik und den notwendigen Steuerungslösungen ausgestattet und als autonome Systeme getestet [133].

Für Anbauverdichter wird die *Raumfüllende Verdichtungskontrolle* (RFVK) eingesetzt, welche eine Erweiterung der FDVK darstellt. Bei diesen Systemen wird zusätzlich zum Beschleunigungsverhalten die Anpresskraft des Trägergerätes erfasst. Mithilfe künstlich neuronaler Netze wird die Bodenart und -feuchte bestimmt und daraus dann der Verdichtungsgrad abgeleitet [83].



2.5.4 Turmdrehkrane

Turmdrehkrane stellen auf der Baustelle ein wichtiges Bindeglied für eine Vielzahl von Gewerken dar und gewährleisten damit einen reibungslosen Bauablauf. Um diesen Ablauf zu optimieren, sind auf dem Markt verschiedene Assistenzsysteme verfügbar, die das Ziel verfolgen sowohl die Umschlagsleistung zu steigern als auch die Zuverlässigkeit sowie die Sicherheit zu erhöhen. Eingesetzt werden bspw. Positioniersysteme für das zu hebende Gut (Litronic LIEBHERR), Arbeitsraumbegrenzungs-systeme (LIEBHERR ABB), welche den Kran nur in einem definierten Bereich schwenken lassen und kamerabasierte Assistenten zur Kollisionsvermeidung [108]. LIEBHERR bietet die Kombination dieser Funktionalitäten in der Tower Crane Litronic an. Zusätzlich bietet dieser Assistent ein automatisches Nivelliersystem für die Hakenflasche, mit dem es möglich ist, auf Knopfdruck die Last auf einer horizontalen Linie bei variierender Auslegerneigung zu verfahren [76]. Dabei regelt das Hubwerk automatisch auf die Ausgangshöhe nach. Ähnliche Systeme werden auch von Terex angeboten [108].

Neben der Kranbedienung aus der Kabine, zählt die Steuerung mittels Funkfernbedienung zum Stand der Technik. Kamerasysteme unterstützen den Bediener dabei indem diese die aktuelle Situation am Haken erfassen und auf einem Display mit Zoom- und Autofokus-Funktion anzeigen [76].

Nahezu alle Kranhersteller bieten optionale Telematiksysteme an. Mit diesen werden auch im Kranbereich Betriebs- und Servicedaten erfasst und übermittelt. Die Betreiber können damit in Echtzeit alle Prozess- und Kranparameter abrufen und werden schnell handlungsfähig [87] [74].

LIEBHERR bietet mit dem Crane Planner 2.0 zusätzlich eine Softwarelösung an, welche es ermöglicht den Kraneinsatz unter Berücksichtigung aller Randbedingungen auf der Baustelle (Bodenbedingungen, Platzverhältnisse) und den Prozessdaten (Hubmasse, Kranabstützung, Gegengewicht) vollumfänglich zu planen und vor dem eigentlichen Einsatz zu simulieren [78].

2.5.5 Kleinmechanismen

Kleinmechanismen wie Rüttelplatten profitieren von den technologischen Neuerungen der großen Baumaschinen. Mittlerweile sind auch handgeführte Rüttelplatten mit einer Verdichtungskontrolle ausgeführt, bspw. Plattenrüttler der Fa. AMMAN mit ACE-System [2] oder die Compatec Technologie von WACKER NEUSON [127]. Kleinmechanismen und handgeführte Baumaschinen haben oftmals verhältnismäßig geringe Leistungsanforderungen, sodass sich eine elektrische Energieversorgung lohnt und somit lokale Lärm- und Abgasemissionen reduziert werden und ein Beitrag zur Reduktion fossiler Brennstoffe geleistet wird. Die Fa. WACKER NEUSON ist Vorreiter bei den batteriebetriebenen Kleinmechanismen wie Innenrüttler, Stampfer, Rüttelplatten und sogar Radlader, Minibagger und Dumper. Gerade vibrierende Maschinen wie Rüttler sorgen für gesundheitsschädliche Hand-Arm-Vibrationen. Eine Fernsteuerung dieser Maschinen entkoppelt Bediener und Maschine, bspw. Duplexwalzen der Fa. WACKER NEUSON [128]. Bodenschleifmaschinen der Fa. HUSQVARNA lassen sich ebenfalls per Fernsteuerung fahren, lenken und die Prozessparameter (Amplitude und Frequenz) sind einstellbar [54]. WACKER NEUSON hat auf der Bauma 2019 sogar eine automatisierte Vibrationsplatte vorgestellt, deren Arbeitsbereich auf einem Tablet definiert wird und die anschließend automatisiert den Bereich verdichtet. Auch werden zunehmend Apps für handgeführte Maschinen und Kleinmechanismen angeboten. Bspw. können über eine Bluetooth-Verbindung mit einem Smartphone die Maschinendaten (Ladezustand, Betriebsstunden, etc.), die Bedienungsanleitung oder der Kontakt zum Service direkt an der Maschine abgerufen werden [54].

3 ENTWICKLUNG DER TECHNOLOGIEN IM BAUMASCHINENBEREICH

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Digitalisierung der Arbeit im Bereich Baumaschinen. Grundlagen der Ausführungen sind neben aktuellen, wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu den relevanten Themenfeldern zudem Erkenntnisse aus der langjährigen Zusammenarbeit mit etablierten Baumaschinenherstellern, Verbänden, Forschungsvereinigungen. Als Ergebnis sollen die digitalen Inhalte im Baumaschinenbereich herausgestellt werden. Der Hauptaspekt liegt dabei auf zukünftig zu erwartenden Technologien und die sich daraus ableitenden Inhalte des jeweiligen Berufsfeldes bzw. der jeweiligen Nutzergruppe. Die Eingliederung der einzelnen Technologien in die Nutzergruppe erfolgt in jedem Abschnitt im Fließtext. Die relevanten Nutzergruppen sind im Folgenden aufgeführt.



3.1 Nutzergruppen

1. Baumaschinenbediener:innen

- Auszubildende: Baugeräteführer, Baumaschinenbedienung in anderen Berufen (z. B. Straßenbauer, Spezialtiefbauer, Straßenwärter)
- Bediener von Baumaschinen auf der Baustelle / in der Praxis
- Ausbilder, auch denkbar Berufsschullehrer

2. Servicebetrieb, Werkstatt, Hersteller

- Auszubildende: Land- und Baumaschinenmechatroniker
- Serviceleute in der Werkstatt, Händler, Vermieter, Anbauteilehersteller, Leiter Fuhrpark
- Lieferant (z. B. Kraftstoffe)
- Ausbilder, auch denkbar Berufsschullehrer

3. Baufirma, KMU

- Geschäftsführer
- Mittlere Führungsebene Bauleiter, Baumaschinenmeister, Poliere
- Kalkulations- und Abrechnungsabteilung
- Dozenten / Ausbilder in der Aufstiegsfortbildung

4. Planungsbüro, BIM-POOL

- BIM-Akteure
- Planungs-, Bauleitungs- und Architekturbüro
- Dozenten / Ausbilder in der Aufstiegsfortbildung

5. Sonstige

- Sicherheitsfirmen (Ortung, Diebstahlschutz)
- Behörden, Bauamt, Ordnungsamt, z. B. Einhaltung von Vorgaben (u. a. Arbeitszeiten, Lärm-, Gewässer-, Naturschutz, Nachweise)
- Auftraggeber

3.2 Digitales Bauen und BIM

Für die durchzuführenden Arbeiten auf einer Baustelle bedarf es einer Planungsgrundlage, welche für teilautomatisierte Abläufe oder Maschinenfunktionen als digitale Modelle der Baustelle oder des Bauwerkes ausgeführt werden sollten. Mit diesen werden sowohl die geometrischen und verfahrenstechnischen Randbedingungen definiert als auch die Maschinensteuerung der Arbeitsprozesse geplant, durchgeführt und dokumentiert. Die Planung des Bauwerkes erfolgt bereits digital, mit dem Beginn der Bauausführung ist der Einsatz digitaler Planungsdaten jedoch meist beendet.

An dieser Stelle setzt die BIM-Methode an, mit welcher die durchgängig nutzbare Modellierung von Bauwerken für die verschiedenen Gewerke umgesetzt werden soll. Mit dieser objektorientierten und mehrdimensionalen Methode können die Planung, die Herstellung und der Betrieb von Gebäuden mit einer Softwarelösung durchgeführt werden. Grundlage ist dabei zunächst ein 3D-Modell des Bauwerkes. Dieses enthält alle Bauwerksinformationen. Das Modell wird mit Leistungsdaten ergänzt (4D) um letztlich daraus die Kosten zu ermitteln (5D). Zwei zusätzliche Dimensionen kommen mit dem Facility Management hinzu (Nachhaltigkeitsbewertung (6D), Gebäudeverwaltung (7D)) [7].

Ausgangspunkt bei den Überlegungen für BIM war der Hochbau, mittlerweile erfolgte aber eine Erweiterung auf verschiedenste Anwendungen. Als wichtigstes und vor allem offenes Datenformat ist das IFC-Format zu nennen. Zukünftig werden die Planungsdaten eines Bauwerkes so formalisiert werden, dass daraus für die Maschinensteuerung eine funktionale Definition der Prozessschritte erfolgen kann



[15]. Damit wird BIM besonders im Kontext digitaler Geländemodelle (DGM) für die Nutzergruppe **Baumaschinenbediener** relevant, da hier vor allem für die Umsetzung von Erdbauwerken digitale Geländemodelle lesbar und interpretierbar sein müssen. Weiterführend müssen für Assistenzfunktionen, welche mit den digitalen Modellen arbeiten, Kenntnisse über den Import in die Maschinensteuerung vorhanden sein. Ein wichtiger Punkt ist die Interpretation der Geländemodelle auf Plausibilität.

3.3 Vermessungstechnologien und digitale Geländemodelle

Die Vermessungskunde ist ein interdisziplinäres Arbeitsgebiet mit vielen Nachbardisziplinen. Die allgemeinen Anforderungen an die Vermessungsaufgabe von baulichen Anlagen werden in der Norm DIN 18710 definiert. Damit wurde eine Grundlage mit dem Ziel einheitlicher Qualitätsstandards bei Ingenieursvermessungen geschaffen [33]. Die Teilaufgaben einer Vermessungsaufgabe sind:

1. Aufnahme – Modellierung des Ist-Zustandes eines Objektes/Gebietes
2. Absteckung – Übertragung der geplanten Größen und Merkmale in die Umgebung
3. Monitoring – Überprüfung der Position und Geometrie des Objektes bzgl. der Planungsdaten

Die Sensorik zur Umsetzung dieser Aufgaben wird zunehmend für die Automatisierung von Bau- und Überwachungsprozessen eingesetzt. Die Sensorsysteme, die speziell dafür zur Anwendung kommen, sind Tachymeter, Nivelliere, GNSS-Empfänger, Laserscanner, Neigungsmesser, UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) (Befliegung) und photogrammetrische Systeme.

Zwei- oder dreidimensionale Modelle (digitale Karten, Pläne, Geländemodelle) werden durch geodätische Grundlagenvermessung generiert. Dabei werden neben der Erdoberfläche auch alle künstlichen Bauwerke erfasst (As-Built-Dokumentation). Diese Modelle dienen bspw. bei Positionieraufgaben als Datengrundlage. Zur Positionsbestimmung bzw. zur 3D-Führung von Baumaschinen und deren Werkzeugen werden i. d. R. zielverfolgende Tachymeter oder GNSS-RTK eingesetzt.

Verschiedene Augmented Reality-Anwendungen (AR) (=erweiterte Realität) werden bereits angeboten und werden zukünftig eine größere Durchdringung auf deutschen Baustellen erreichen. Mit der zunehmenden Verbreitung wird auch die Akzeptanz gegenüber dieser Technologie steigen. Für Anwendungen im **Servicebereich** werden bereits von den Baumaschinenherstellern Lösungen angeboten [92] [44] [88] [69]. Auch für **Planungsbüros** oder die **Baufirma** sind Systeme, mit denen Geländemodelle hochpräzise in reale Umgebung integriert werden können, am Markt erhältlich [103]. Die Umgebung wird mit der Kamera erfasst, die aktuelle Position mit einem GNSS-Empfänger ermittelt und die 3D-Modelle auf das Bild gemappt. Zusätzlich kann der Benutzer Bauwerke wie Gräben, Straßen, Dämme oder Baugruben erstellen und daraus ein Datenmodell erzeugen.

Zukünftig werden diese Systeme in größerem Umfang in der Bedienerkabine Einzug halten. Dabei können Höhenprofile oder Systemzustände der Anbaugeräte über ein Head-Up-Display oder eine AR-Brille eingeblendet werden. Verfügbar sind diese Anwendungen für den **Maschinenbediener** noch nicht, aber bereits Thema aktueller Forschungstätigkeiten [8] [46]. Voraussetzung ist hier die Echtzeiterfassung und -auswertung der notwendigen Zustandsgrößen. Deshalb werden sich diese Systeme kurzfristig auf Wartungs-, Bedien- und Verarbeitungsinformationen beschränken. Bspw. können Einbauhinweise für Fertigteile eingeblendet oder Warnhinweise im Maschinencockpit angezeigt werden.

Allgemein ist von einer deutlichen Steigerung beim Einsatz von 3D-Modellen und der aufgeführten Vermessungstechnologien auszugehen. Letzteres geht vor allem mit sinkenden Kosten dieser Systeme einher. Vor allem der Einsatz von Laserscannern auf der Baustelle wird weiter zunehmen, da diese Entwicklung bereits eingesetzt hat. Damit wird eine flächenhafte Dokumentation des Ist-Zustands erreicht werden. Beim Laserscanning werden Punktwolken generiert, die Rückschlüsse auf die Maßhaltigkeit bzw. den Baufortschritt zulassen. Im Bereich mobiler, automatisierter Anwendungen können damit dann räumliche Abbilder der Baustellenszene generiert werden. Damit sinkt der Bearbeitungsaufwand für ein mittelgroßes Bauobjekt von mehreren Wochen auf wenige Minuten. Es wird dann möglich sein, aus den Daten, Abweichungen bzgl. des geplanten Modells zu errechnen und direkt während des Baufortschritts einzugreifen [17] [38]. Ein Beispiel, welches auf diese Anwendung fokussiert, ist der Einsatz des Roboterhundes Spot® von BOSTON DYNAMICS. Dieser wird bereits von ZÜBLIN auf Hochbaustellen eingesetzt um die Bauwerke zu vermessen [62].



Die Positionsbestimmung mit der GNSS-Technologie wird voraussichtlich durch das UWB-Verfahren (Ultraweitband) ergänzt. Dabei kann die Maschinenposition auf der Baustelle mithilfe einer Referenzstation bestimmt werden und damit den Nachteilen eines gestörten GNSS-Empfangs begegnet werden. Für die ausführende Baufirma verändern sich dann die Tätigkeiten, welche zur Einrichtung der Baustelle notwendig sind.

3.4 Qualitätskontrolle und Bauprozessdokumentation

Die Bauteilnehmer (Auftraggeber, Planer, Berater, bauausführende Firmen, Genehmigungsbehörden, Träger öffentlicher Belange) sind bei Bauprojekten, insbesondere bei öffentlich ausgeschriebenen Projekten, bei welchen die Bauleistungsvergabe über Ausschreibungen (VOB/VOL) erfolgt, einem ständigen Wechsel unterzogen. Für die effiziente Umsetzung der Bauabläufe generiert diese Diversität einen erhöhten Aufwand bei der Gewährleistung und der Koordination der polydirektionalen Informationsflüsse. Der in den vergangenen Jahren zu beobachtende Innovationsschwerpunkt lag in der Digitalisierung der Bauprojekt- und Bauausführungsinformationen [86] und dieser Trend wird sich auch fortsetzen.

Dem Beispiel aus den USA oder auch skandinavischen Ländern folgend, werden auch in Deutschland die qualitativen Anforderungen im Bauprozess vertraglich vereinbart und dokumentiert werden. Beispielsweise bedarf die Asphalttemperatur für den optimalen Einbauprozess einer Solltemperatur bei Anlieferung. Eine Erfassung des Ist-Zustandes und der Abgleich sowie die dazugehörige Dokumentation wird auch auf deutschen Baustellen zukünftig umgesetzt werden. Weitere vertragsrechtliche Vereinbarungsgegenstände könnten bspw. die Schichtdicke oder der Verdichtungszustand sein. Für den **Bediener** wird es ggf. notwendig Ist-Zustände sensorisch zu erfassen und die Eignung abzuschätzen. Je nach Größe der Baustelle werden diese Tätigkeiten aber durch den **Bauleiter** umgesetzt.

Im Erdbaubereich wird eine Bauprozessdokumentation aufbauend auf dem Stand der Technik weiterhin durch optische Sensorik ermöglicht. Die zeitnahe Übermittlung durch Kommunikation und Vernetzung beschleunigt dabei den Dokumentations- und Planungsprozess.

Zunehmend kann die Baustellenvermessung auch durch Drohnen vorgenommen werden. Im einfachsten Fall werden dabei Bildaufnahmen gemacht und für die tägliche Baufortschrittsdokumentation genutzt. Weiterführend werden aber auch hier Laserscanner zum Einsatz kommen die Erdvolumina berechnen und so eine detaillierte Dokumentation des Baufortschritts ermöglichen.

Für die Dokumentation sind zahlreiche Softwarelösungen dem Stand der Technik zuzuordnen [1] [18] [21]. Hierbei wird in Kombination mit einem Notebook, Tablet oder auch Smartphone dem **Bauleiter** die Möglichkeit einer automatisch dokumentierten Echtzeitkommunikation gegeben. Durch eine kontinuierliche Datenerfassung wird weiterhin die Möglichkeit des Daten- und Mängelmanagements geschaffen. Problematisch ist, dass die Anwendungen in der Regel untereinander nicht kompatibel sind. Zukünftig ist aber von einer Interoperabilität durch einheitliche Standards auszugehen, wengleich die bauausführenden Unternehmen derzeit auf die parallele Nutzung multipler Softwarelösungen angewiesen sind. Wiederum sind im Bereich des Straßenbaus die höchsten Ausbaustufen der verfügbaren Systeme anzutreffen. Es ist davon auszugehen, dass auch diese Entwicklungen im Erdbaubereich umgesetzt werden. So existieren bereits Soft- und Hardwarelösungen zur Prozessoptimierung und -dokumentation [10] [21], welche bspw. beim Asphalteinbau das Asphaltmischwerk, den LKW-Fahrer des Transportunternehmens, den Bauleiter und das Einbauteam vor Ort miteinander vernetzen. Hierbei können zur Dokumentation auch Bedieneringaben sowie Maschinen- und Prozessdaten (z. B. Asphalttemperatur) in die Dokumentation mit einfließen.

3.5 Automatisierung und Robotik

Die Anzahl der im Kapitel Stand der Technik (2.5) genannten Lösungen teilautomatisierter Funktionen bei Baumaschinen wird zukünftig weiter ansteigen. Neben weiteren Einzelfunktionen wird dabei auch der vollautomatisierte Betrieb mobiler Arbeitsmaschinen weiter vorangetrieben werden. Dabei ist



aber zu erwarten, dass hauptsächlich Prototypen als Nischenprodukte umgesetzt werden. In der kleinteiligen deutschen Baulandschaft werden eher wenige vollautonome Funktionen anzutreffen sein. Der höchste Automatisierungsgrad ist hier im Straßenbau zu erwarten, da hier, im Unterschied zum Erdbau, ein abgeschlossener Arbeitsbereich (Straßenbreite) vorliegt und vor allem die Arbeiten vom Verdichtungsprozess bis hin zum Asphalteinbau ein hohes Automatisierungspotenzial bieten. Aber auch für automatisierte Maschinen werden die **Bediener** weiterhin eine tragende Rolle übernehmen. Das Aufgabengebiet wird sich aber deutlich in Richtung reiner Überwachungstätigkeiten verschieben, wofür es notwendig ist, dass der Bediener mit den Systeminterfaces arbeiten kann. Die Routinetätigkeiten werden also zunehmend durch die Maschine übernommen, speziellere Aufgaben aber weiterhin durch den Bediener ausgeführt. Der **Servicetechniker** muss die am Markt verfügbaren Systeme an der Maschine identifizieren und einordnen können, um bspw. eine Diagnose und ggf. eine Reparatur durchzuführen. Für die Umsetzung der Automatisierungsfunktionen wird es eine Steigerung des Umfangs der sensorischen Ausstattung der Maschinen geben, welcher für den Werkstattbetrieb ebenfalls von Relevanz ist. Um Fehler analysieren zu können, müssen Messprinzipien und Bauarten der verwendeten Sensoren bekannt sein. Ein Grundwissen sollte hier ebenfalls beim Bediener vorhanden sein und entsprechend in der Ausbildung berücksichtigt werden.

Für die **Baufirma** wird ein erhöhter Grad an Planungssicherheit erreicht. Für definierte wiederkehrende Tätigkeiten kann eine eindeutige Zeitabschätzung durch die (teil-)automatisierte Funktion erfolgen. Außerdem ist durch die Automatisierung von einer deutlichen Steigerung der Qualität und der Produktivität mit den damit verbundenen Kostenreduzierungen auszugehen, was die Planungssicherheit erhöht und einen Mehrwert für **Baufirma** und **Planungsbüro** darstellt. Derzeit sind bis zu 20 % der Baukosten auf Fehlerbehebung und die damit einhergehenden Verzögerungen zurückzuführen [6]. Die Ursachen sind bei der physischen Bauausführung zu finden, aber auch einem inkonsistenten Informationsaustausch zwischen den Fachdisziplinen zuzuordnen. Fehlerquellen liegen zudem in uneinheitlichen Modellierungen, fragmentierten Daten, Medienbrüchen sowie fehlenden inhaltlichen und zeitlichen Abstimmungen [11].

3.6 Telematik und Software für die vernetzte Baustelle/Flotte

Bei Telematiksystemen ist davon auszugehen, dass plattformübergreifende Systeme auf den Baustellen Anwendung finden werden. Die derzeit angebotenen Lösungen sind alle herstellerspezifisch. Sind auf den Maschinen bspw. Bildschirme für die Maschinesteuerung implementiert, kann der Bediener sich direkt Aufgabenstellungen und digitale Geländemodelle übertragen lassen [14]. Da die bauausführenden Unternehmen meist einen heterogenen Maschinenpark verschiedener Hersteller, unterschiedlichen Alters und mit stark variierendem Digitalisierungsgrad besitzen, fehlen die digitalen Schnittstellen und zusätzlich herstellerübergreifende Standards zur Übertragung der digitalen Informationen aus Plänen oder 3D-Modellen auf die Bediener-Terminals. Gleiches gilt für die Schnittstellen der Maschinesteuerung und damit für die (teil-)automatisierten Funktionen. Um dem zu begegnen, wurde der neue ISO-Standard **Worksite Topographical Data Standard** definiert, welcher den Datenaustausch zwischen verschiedenen Gerätetypen und mehreren Datenanbietern vereinfachen soll. Dabei werden die Schnittstellen zwischen Steuerungs- oder Vermessungssystemen (TOPCON, TRIMBLE, LEICA) und einem Baustellen-Informationssystem genormt und damit eine herstellerübergreifende Cloudanwendung ermöglicht. Die Veröffentlichung ist für Dezember 2021 geplant.

An diesem Beispiel lässt sich ein weiterer Trend ablesen, welcher eine Zunahme des Datenumfangs im Baustellen-Informationssystem umfasst. Maschinenseitig werden bereits Daten wie Tankfüllstand oder auch die zurückgelegte Wegstrecke erfasst und übermittelt. Hinzu kommen die Daten der DGM (siehe ISO-Standardisierung) und weitere Prozessdaten wie bspw. die Echtzeitdaten aus einer flächendeckenden Verdichtungskontrolle (FVK) bei Walzen. BAUER bietet bereits eine Vielzahl von Prozessdaten von deren Tiefbohrgeräten zur Übermittlung an.

Erste Umsetzungen interoperabler Softwarelösungen in verschiedene Ausbaustufen sind das BEUTLHAUSER One Stop Pro oder auch die herstelleroffene Plattform Q-Point. Letztere adressiert neben der



bekannten Dokumentation und Kommunikation, die dynamischen Prozesssteuerungen und autonomen Arbeitsgeräte.

Die französische Regierung stellt dem Bausektor bereits heute eine Plattform zur Verfügung, welche die Möglichkeit bietet, dass alle am Bauprozess beteiligten Akteure mit einem BIM-Modell arbeiten und in allen Phasen des Gebäude-Lebenszyklus Zugriff auf dieses haben. Alle öffentlichen Aufträge werden bereits über diese Plattform abgewickelt. Damit wird auch kleinen und mittleren Unternehmen der BIM-Zugang erleichtert und ein Informations- und Dokumentenaustausch in Echtzeit unterstützt. Aufbauend darauf ist es perspektivisch denkbar, direkt Maschinendaten mit diesem Service zu bearbeiten und den Baufortschritt zu dokumentieren bzw. in Echtzeit auf veränderte Abläufe oder Zielsetzungen zu reagieren.

Die Übertragung steuerungsspezifischer Parameter auf die Maschine (z. B. digitale Geländemodelle) erfolgt derzeit mit einem Speichermedium (bspw. USB-Stick). Zukünftig werden diese Modelle over-the-air mittels Mobilfunktechnologie übertragen. Für den **Bediener** wird sich damit das Lesen der Baupläne und die Baubesprechungen reduzieren. Die detaillierten Informationen der Bauaufgabe werden direkt auf die Maschinensteuerung übertragen und auch visualisiert. Daraus ergibt sich zukünftig die Anforderung der Interaktion mit 3D-Modellen für den Bediener, das heißt das Verstehen, das Einordnen, umsetzen und damit letztlich auch die Überprüfung des angezeigten Modells im Umgebungskontext.

Für den **Servicebetrieb** ergibt sich im Umgang mit den Telematiksystemen die Notwendigkeit, sich spezifisches Systemwissen der marktverfügbaren Produkte anzueignen, um die Ausstattung der Maschine analysieren zu können. Die Systeme verschiedener Hersteller haben heute bereits verschiedene Funktionalitäten. Jeder Hersteller installiert dabei sein eigenes Modul auf der Maschine. Der Werkstattbetrieb muss im ersten Schritt wissen, dass verschiedene Module existent sind und weiterhin welche Funktionen diese abdecken. Eine LEICA-Maschinensteuerung mit Telematikmodul hat hier bspw. einen geringeren Funktionsumfang als ein LIEBHERR Telematiksystem mit Flottenmanagement.

Ein Flottenmanagement ist v.a. für die ausführende **Baufirma** interessant, da diese damit den Baufortschritt überwachen sowie planen und damit eine umfassende Baufortschrittsdokumentation durchführen kann. Außerdem können von der Firmenseite direkt Geländemodelle auf die ausführenden Maschinen gesendet werden (s. o.). Diese Modelle werden vom **Planungsbüro** erstellt und damit werden sich zukünftig auch weitere Herausforderungen ergeben. Die konsistente Nutzung der digitalen Planungsdaten generiert, neben den genannten Vorteilen, den Bedarf der anwendungsspezifischen Formatierung dieser Daten (Datenformat, Metadaten etc.). Das heißt, dass bereits in der Planungsphase die Modelle auf das jeweilige System abgestimmt werden sollten, solange keine einheitliche Spezifizierung der Datenformate erfolgt ist.

3.7 Beispiele der Arbeitsaufgaben

In diesem Abschnitt werden exemplarisch an einer Arbeitsaufgabe, die Veränderungen der Anforderungen durch den Einsatz digitaler Technologien im Baumaschinenbereich für den Anwender beschreiben. Es wird der Rahmenlehrplan als Grundlage herangezogen, um die zu erwartenden Aufgaben an diesem zu spiegeln. Dabei kann auf eine projektinterne Analyse zurückgegriffen werden, welche die Schwerpunkte der Ausbildungsinhalte bezüglich Rahmenlehrplan und technologischen Neuerungen definiert (vgl. Tabelle 2). Exemplarisch soll im Folgenden auf die Erstellung eines Grabens mithilfe eines Mobilbaggers eingegangen werden. Diese Tätigkeit ist dem Punkt 7 zuzuordnen.



Tabelle 2: Definierte Schwerpunkte Ausbildungsinhalte

Nr.	Thema/Tätigkeit	Beispiele
1	Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz, Umweltschutz und rationelle Energieverwendung	digitale Warner im Gefahrenbereich, modernste PSA, Simulatoren, alternative Antriebe, kraftstoffsparende Technologien und Fahrweisen, Einsatz alternativer umweltschonender Schmiermittel, ferngesteuerte Verdichtungsgeräte, ...
2	Arbeitsplanung	Bereitstellen und Anwenden von digitalen Betriebsanleitungen, Bedienungsanleitungen, Gefährdungsbeurteilungen, Herstellerinformationen, ... unter Verwendung mobiler Endgeräte wie Tablet und Smartphone
3	Einrichten und Sichern von Baustellen	Arbeits- und Schutzgerüsten, Digitales Baumaschinenmanagement (Maschinenlokalisierung, Berechtigungsverwaltung, Anbaugeräte, Verbräuche, Pflichtprüfungen, Reparaturen, Diebstahlschutz, Wartung, ...), Nutzung von Telematikdaten
4	Verarbeiten von Bau- und Bauhilfsstoffen	digitale Wiegeeinrichtung, vollautomatisches Planiergerät; GPS-Verdichtungskontrolle; Erd- und Tiefbauarbeiten (Bagger, Grader, Raupe, Radlader)
5	Handhaben von Vermessungsgeräten	GPS-Vermessung, automatische Maschinensteuerung; Lasermesstechnik
6	Handhaben von Bauteilen, Baugruppen und Systemen von Baugeräten	
7	Inbetriebnehmen, Führen und Außerbetriebnehmen von Baugeräten	Einsatz von Baumaschinensimulatoren zur sinnvollen Ergänzung der überbetrieblichen Ausbildung; Tägliche Inbetriebnahme, Abfahrtskontrolle; Führen von Baumaschinen und -geräten in praxisnahen Baustellensituationen; Verwenden moderner Anbaugeräte; Integration von Laser- und GPS-gesteuerten Maschinen, 2D und 3D gesteuerte Raupen, Grader, Bagger
8	Warten von Baugeräten, Verwenden von Kraft- und Schmierstoffen sowie von Hydraulikölen	Datenübertragung von Maschinendaten (Telematik) – IST-Parameter, Leistungsbereiche, vorbeugende Wartung, Instandsetzung, Fehlerauslesung, Verbräuche, Erkenntnisse aus den Daten, Pflicht- und Sachkundeprüfungen
9	Feststellen von Störungen sowie Einleiten von Maßnahmen zur Fehlerbeseitigung an Baugeräten, Instandsetzen von Bauteilen und Baugruppen.	
10	Digitales Baumaschinenmanagement (Maschinenlokalisierung, Berechtigungsverwaltung, Anbaugeräte, Verbräuche, Pflichtprüfungen, Reparaturen, Diebstahlschutz, Wartung ...)	



3.7.1 Exemplarische Tätigkeit

In diesem Abschnitt soll exemplarisch für die Entwicklungen im Baumaschinenbereich eine Tätigkeit analysiert werden und vom aktuellen Stand der Ausführung ausgehend, die Veränderungen neuer Technologien für die Arbeitsinhalte analysiert werden. Es werden die einzelnen Tätigkeiten, welche notwendig sind, um das Bauwerk zu erstellen, aufgeführt. In Abhängigkeit von der Größe der ausführenden Firma oder der Baustelle, können diese auch durch verschiedene Instanzen umgesetzt werden. Aber auch wenn der Baugeräteführer bspw. nicht in jedem Fall die Vermessung des Bauwerkes übernimmt, muss das notwendige Handlungswissen dafür vorhanden sein.

Beispiel: Ziehen eines Grabens

Im Rahmenlehrplan für die Berufsausbildung zum Baugeräteführer/zur Baugeräteführerin ist ein Punkt der zu erlernenden Fertigkeiten das „Handhaben von Vermessungsgeräten“.

Dazu gehören:

- Vermessungsgeräte handhaben, insbesondere Winkelprisma, Nivellierinstrument und Laser
- Geraden ausfluchten, Längenmessungen ausführen sowie Höhen übertragen und einmessen
- Schnur- und Visiergeräte aufstellen sowie rechte Winkel anlegen und überprüfen
- Bauteile nach Richtung, Lage und Höhe einmessen
- Längs- und Querprofile abstecken

Weiterführend ist im Lehrplan für die Berufsschule die Vermessung im Rahmen nahezu aller Lerninhalte enthalten. Besonders für das „Herstellen von Baugruben und Gräben“ lässt sich durch den Einsatz digitaler Technik eine Transformation der Arbeitsaufgabe erwarten bzw. schon beobachten. Diese sollte in den Ausbildungsinhalten berücksichtigt werden.

Durch den Einzug digitaler Geländemodelle können diese Aufgaben perspektivisch von der automatisierten Maschine übernommen. Dazu benötigt diese eine Planungsgrundlage, welche aus dem digitalen Modell der Baustelle und des zu erstellenden Bauwerkes besteht. Notwendige Arbeitsinhalte, die sich zusätzlich ergeben, sind das Einlesen der Modelle in die Baggersteuerung und die Prüfung auf Plausibilität, also ob die im Display angezeigten Daten tatsächlich dem durch die Maschine herzustellenden Bauwerk entsprechen. Je nachdem, welches System genutzt wird, kann außerdem die Kalibrierung der Arbeitsausrüstung an einem Referenzpunkt erforderlich werden.

Stufe 1 Vergangenheit/Gegenwart

Der Graben wird mit einem hydraulisch-mechanisch vorgesteuerten Bagger erstellt. Im Vorfeld wurde das Gelände vermessen und ein Lageplan sowie ein Aufmaß erstellt. Mit einem Tachymeter, GNSS-Empfänger oder einem Rotationslaser ermittelt der Vermessungsingenieur die notwendigen Koordinaten- und Aufmaßpunkte und dokumentiert dies. Darauf aufbauend erstellt das Planungsbüro die notwendigen Baupläne. Für den eigentlichen Prozess des Grabens ergeben sich für den Bediener folgende Tätigkeiten:

1. Lesen und verstehen des Bauplans
2. Einrichten der Baustelle und Übertragen des Bauplanes in das Gelände
 - Bedienung Vermessungsgeräte (Winkelprisma, Nivellierinstrument und Laser)
3. Bedienung des Baggers mit Joysticks
 - Wissen über Funktion Aktorik, Werkzeugwahl
 - Wissen über Hydrauliksystem, Zusammenhang Joystickauslenkung-Maschinenverhalten, Wissen über den korrekten Prozessablauf
4. Kontrolle des Bauwerks/Vermessung des Grabens
 - Bedienung Vermessungsgeräte (Winkelprisma, Nivellierinstrument und Laser)

Für den Rahmenlehrplan für die Berufsausbildung zum Baugeräteführer/zur Baugeräteführerin ist wie o.g. ein Punkt der zu erlernenden Fertigkeiten das „Handhaben von Vermessungsgeräten“. Damit wird



der Bediener befähigt, die notwendigen Tätigkeiten, die in der Vergangenheit notwendig waren und teilweise auch noch sind, auszuführen.

Stufe 2 Gegenwart

Aktuell werden Systeme angeboten, welche dem Bediener den Arbeitsfortschritt visualisieren. Dafür wird die Position der Arbeitsausrüstung sensorisch erfasst und auf einem Display in der Fahrerkabine angezeigt. Dafür wird die Geländeoberfläche als Startposition mit dem Anfahren der Arbeitsausrüstung festgelegt (Anfahren Referenzpunkt). Die Zieltiefe wird durch den Bediener festgelegt. Durch die Anzeige der aktuellen Position wird der Bediener dahingehend unterstützt, dass die Zieltiefe mit höherer Genauigkeit und schneller erreicht wird. Die durchzuführenden Tätigkeiten für den Bediener werden durch dieses System nicht substituiert. Es werden vielmehr zusätzliche Tätigkeiten (vgl. Tabelle 3) notwendig:

- Bedienung des Systeminterfaces
 - Referenzhöhe Gelände definieren
 - Solltiefe festlegen
- Lesen und verstehen der digitalen Anzeige
 - Aufbau und Funktion der sensorischen Ausstattung
 - Vorgehen bei Systemfehlern, Wartung

Tabelle 3: Tätigkeiten für den Bediener bei Verwendung eines Assistenzsystems

Tätigkeit

1	Solltiefe festlegen (z. B. 1 m)
2	Höhe der Löffelspitze an Referenzpunkt festlegen
3	Displayanzeige während des Grabvorgangs
4	Erreichen der Solltiefe (grüne Seitenmarkierungen) und akustisches Signal
5	Graben fertiggestellt

Stufe 3 Gegenwart/Zukunft

Eine Erweiterung des Systems wird in aktuellen Maschinen als Assistenzfunktion im Umfang einer Tiefenbegrenzung oder einer Teilautomatisierung einzelner Aktoren angeboten. Bei Letzterem muss der Bediener nur noch die Stielbewegung ausführen, Löffel- und Auslegerzylinder werden so angesteuert, dass eine definierte Höhe am Löffel eingehalten wird. Diese Systeme werden weitere Marktdurchdringung erlangen und zukünftig auf vielen Maschinen verfügbar sein. Dafür ist es notwendig, dass die Ventilvorsteuerung des Hydrauliksystems elektrohydraulisch vorgesteuert ist. Diese Funktion senkt die Fertigstellungszeit des Bauwerks, erhöht die Sicherheit und steigert die Güte des Bauwerks. Zusätzliche Tätigkeiten werden im Vergleich zu den vorgenannten nicht notwendig. Das Definieren der Position der Arbeitsausrüstung wird bei diesen Systemen ebenfalls über das Anfahren eines Referenzpunktes realisiert, was zusätzlich ausgeführt werden muss. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung eines Laserempfängers.

Stufe 4 Zukunft

Zukünftig wird der Prozess (teil-)automatisiert sein. Das Gelände der Baustelle wird zum Planungsbeginn und in der Bauphase zur Baufortschrittsdokumentation vermessen (bspw. durch Befliegung mit Drohne). Das daraus erstellte DGM und ein 3D-Modell des Grabens wird dann dem Steuerungssystem als Grundlage für die Tätigkeit übermittelt. Das kann entweder durch den Bediener und ein Speichermedium erfolgen oder über eine Cloudanbindung (Telematiksystem). Der Bediener setzt sich zum Arbeitsbeginn in die Maschine und bekommt alle notwendigen Daten auf dem Steuerungsdisplay ange-



zeigt. Im ersten Schritt wird die Maschine im Baustellenumfeld verortet (Bsp. GNSS) um daraufhin zum Bestimmungsort des Baumwerks zu gelangen. Sensorik verschiedener Ausprägung ermittelt zusätzlich die Position der Arbeitsausrüstung. Der Prozess erfolgt voll- oder teilautomatisiert. Je nach Ausführungsform übernimmt der Bediener nur noch eine überwachende Tätigkeit oder muss noch einzelne Joystickstellensignale vorgeben. Die auszuführenden Tätigkeiten für den Bediener erweitern sich erheblich:

1. System bedienen und verstehen
2. GNSS-gestützte Maschinenpositionierung durchführen
 - GNSS-Empfang herstellen/überprüfen
3. 3D-Modell auf Steuerung übertragen
 - Datenflüsse verstehen
4. Abschätzung der geologischen Bodeneigenschaften
 - Vorgabe in Baggersteuerung

Zusammenfassend für die genannten Stufen zeigt Abbildung 4 die neuen oder transformierten Tätigkeiten beim Erstellen eines Erdbauwerks. Die linke Seite stellt dabei den üblichen Bauablauf, welcher in der Vergangenheit so ausgeführt wurde und auch heute noch in gleicher Weise so umgesetzt wird, dar. Die rechte Seite zeigt die Veränderung dieser Aufgabe durch die Digitalisierung und den damit einhergehenden Systemen, welche wie o.g. bereits eingesetzt werden bzw. mit deren Anwendung zukünftig zu rechnen ist.

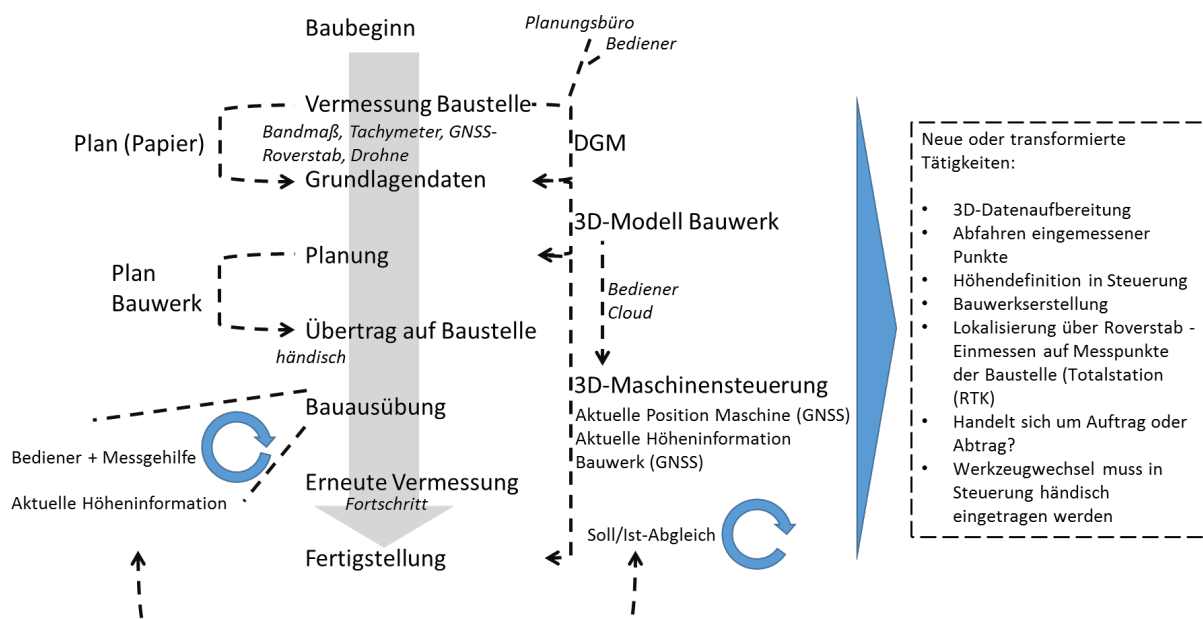


Abbildung 4: Veränderung der Tätigkeiten beim Erstellen eines Erdbauwerks durch die Digitalisierung

4 ZUSAMMENFASSUNG

Mittelfristig ist der Einsatz autonomer Baumaschinen, welche keinen Geräteführer mehr benötigen, auf wenige Anwendungsbereiche beschränkt. Automatisierungslösungen können daher teilweise dem Personalmangel entgegenwirken, qualifizierte Fachkräfte für den Betrieb und die Instandhaltung der Baumaschinen sind aber weiterhin unabdingbar. Mit der zunehmenden Komplexität der Maschinenteknik und der Digitalisierung des gesamten Berufsfeldes werden die **Qualifikationsanforderungen** aber **massiv steigen**. Es ist wichtig neue Technologien, Maschinentypen und Funktionen in einer frühen Phase in die Ausbildungs- und Qualifizierungsmaßnahmen zu integrieren, um zum einen den sicheren und effizienten Umgang mit neuen Maschinen und Bauprozessen zu vermitteln und zum anderen die Akzeptanz für neue Technologien bei allen Prozessbeteiligten zu steigern. Daraus entsteht der gesteigerte Bedarf nach neuen Aus- und Weiterbildungskonzepten an den überbetrieblichen Ausbildungszentren (ÜAZ) für Baugeräteführer, welche durch notwendiges Equipment ergänzt werden sollten. Zusätzlich zur aktuellen Maschinenteknik umfasst das auch moderne Ausbildungsmittel wie in-



teraktive Simulatoren und Blended Learning Methoden, welche sowohl den Umfang als auch die Qualität der Ausbildung unterstützen. Realisiert wird das durch ein realitätsnahes Training als Vorstufe zum Training auf kapitalintensiven realen Maschinen. Zusätzlich können an interaktiven Simulatoren auch neue und besonders kritische Situationen trainiert werden. Dies ist an der realen Maschine oft mit einem hohen Risiko für Mensch und Maschine verbunden.

Nicht nur die Bedienung von Baumaschinen ändert sich mit dem technologischen Wandel, sondern auch die Instandhaltung der Maschinen. Durch zusätzliche elektrische und steuerungstechnische Komponenten und durch völlig neuartige Antriebssysteme und -komponenten wird es notwendig, die Qualifikationen deutlich zu erhöhen. Insofern sind die Ausbildungsinhalte in den Bereichen Mechanik und Hydraulik nicht nur durch Kenntnisse in der Elektro- und Steuerungstechnik sowie Leistungselektronik zu ergänzen, sondern zugleich, parallel zur technologischen Weiterentwicklung, in regelmäßigen Zeitabständen zu modifizieren.

Das gesamte Berufsbild des Baugeräteführers wird sich durch die Digitalisierung, d. h. die Einführung und Etablierung zunehmend anspruchsvollerer, hoch technisierter Maschinen und Arbeitsmittel verändern. Hinzu kommen sich verändernde und digitalisierte Arbeitsprozesse. Wenngleich die belastenden äußeren Bedingungen, wie Wetter, Lärm und Staub, weiterhin bestehen bleiben, könnten die Entwicklungen die Attraktivität der Bauberufe für die jüngere Generation steigern. Die Digitalisierung kann also als Chance verstanden werden. Sie setzt aber zugleich eine entsprechende innovative Ausbildung voraus.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verschiedene Protokolle für unterschiedliche Anwendungen.....	9
Abbildung 2: Beispielhafte Systemarchitektur	10
Abbildung 3: J-1939 Beispielfehlercode.....	19
Abbildung 4: Veränderung der Tätigkeiten beim Erstellen eines Erdbauwerks durch die Digitalisierung...	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht eingesetzter Ein- und Ausgabeelemente in Baumaschinen	18
Tabelle 2: Definierte Schwerpunkte Ausbildungsinhalte.....	32
Tabelle 3: Tätigkeiten für den Bediener bei Verwendung eines Assistenzsystems.....	34



5 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] AMMANN GROUP: *Verdichtung Technologie* (Technologie Portfolio). Langenthal, Suisse, 2019
- [2] AMMANN GROUP: *Strassenbau*. URL <https://www.ammann.com/de/technology/road-construction>. - abgerufen am 2021-03-19
- [3] ARCURE S. A.: *The Blaxtair: Person/Machinery Anti-Collision Camera* (Broschüre). Pantin, France, 2018
- [4] AS WÄGETECHNIK: *Radladerwaagen*. URL <https://www.as-waegetechnik.de/produkte/mobile-waagen/radladerwaagen/>. - abgerufen am 2019-10-30
- [5] BAUER MASCHINEN GMBH: *MC 128 mit Elektroantrieb*. URL https://www.bauer.de/export/shared/documents/pdf/bma/datenblatter/MC_96_Electric_Drive_DE_EN_905_842_1_2.pdf. - abgerufen am 2019-10-29
- [6] BAUMAGAZIN-ONLINE.DE: *MOBA: Deckeneinbau entscheidet oft darüber, was am Ende übrig bleibt*. URL <https://www.baumagazin-online.de/d/moba-deckeneinbau-entscheidet-oft-darueber-was-am-ende-uebrigbleibt/>. - abgerufen am 2019-10-21
- [7] BAUNETZ: *Welche Dimensionen hat ein BIM-Modell? | BIM | Modelle | Baunetz_Wissen*. URL <https://www.baunetzwissen.de/bim/fachwissen/modelle/welche-dimensionen-hat-ein-bim-modell-5269413>. - abgerufen am 2021-04-06. — Baunetz Wissen
- [8] BERGER, CHRISTOPH: *Augmented Reality-Technologie auf der Baustelle*. URL <https://www.springerprofessional.de/bau-projektmanagement/arbeitsmaschinen/augmented-reality-technologie-auf-der-baustelle/16551232>. - abgerufen am 2019-10-09
- [9] BETTENHAUSEN, KURT ; WESTERKAMP, DIETER: *Künstliche Intelligenz* (VDI-Statusreport). Düsseldorf : VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2018
- [10] BMBF: *Industrie 4.0 - BMBF*. URL <https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html>. - abgerufen am 2019-10-23
- [11] BOMAG GMBH: *BOMAG Verdichtungsmess- und Dokumentationssysteme* (Firmenschrift). Boppard, 2012
- [12] BOMAG GMBH: *Verdichten mit Durchblick – Mess- und Dokumentationssysteme von BOMAG* (Broschüre). Boppard, 2017
- [13] BOSCH REXROTH: *Systemlösung Virtual Bleed Off der zweiten Generation erhöht Effizienz von Baggern*. URL <https://www.boschrexroth.com/de/de/unternehmen/presse/press-detail-1-143043>. - abgerufen am 2019-10-29
- [14] BOSLE, FABIENNE: *Innovative Technologien auf der Baustelle*. URL <https://kompetenzzentrum-kaiserslautern.digital/innovative-technologien-auf-der-baustelle/>. - abgerufen am 2019-08-14
- [15] BRAMANN, HELMUT ; MAY, ILKA: *Stufenplan Digitales Planen und Bauen* (Broschüre). Berlin : Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015
- [16] BRINKMEIER, BRITTA: *Geniale Kabine: Steuerungszentrale mit Massagefunktion*. URL <https://www.bi-medien.de/artikel-8964-bm-genius-cab-sitz-von-grammer.bi>. - abgerufen am 2019-10-21
- [17] CAO, VÉANNE: *Digitizing construction sites with Scaled Robotics – TechCrunch*. URL https://techcrunch.com/2019/08/02/digitizing-construction-sites-with-scaled-robotics/?xing_share=news. - abgerufen am 2019-10-29
- [18] CASE CONSTRUCTION EQUIPMENT: *Lösungen für Maschinensteuerungen - SiteControl* (Broschüre), 2015
- [19] CASE CONSTRUCTION EQUIPMENT: *SiteControl Copilot System*. URL <https://www.casece.com/northamerica/en-us/solutions/sitecontrol-precision-construction/solutions/crawler-dozers/copilot-system#internal>. - abgerufen am 2019-10-29
- [20] CATERPILLAR: *CAT® Grade Control* (Broschüre), 2012
- [21] CATERPILLAR: *Hybrid-Hydraulikbagger Cat 336E H*. URL https://www.cat.com/de_DE/news/machine-press-releases/cat-336e-h-hydraulichybridexcavator-delivers-no-compromise-fuelsavin.html. - abgerufen am 2019-10-29



- [22] CATERPILLAR: *XE Technologie - elektronisch gesteuertes ACS-Ventil*. URL https://www.cat.com/de_DE/campaigns/npi/xe-series-form.html. - abgerufen am 2019-10-29
- [23] CATERPILLAR: *Der neue Cat® 988 XE Radlader mit elektrischem Antrieb*. URL https://www.cat.com/de_DE/news/machine-press-releases/new-electric-drive-cat-988kxe-wheel-loader-offers.html. - abgerufen am 2019-10-30
- [24] CATERPILLAR: *Assistenzsysteme*. URL <https://www.zepelin-cat.de/produkte/technologie/assistentensysteme.html>. - abgerufen am 2019-10-02
- [25] CATERPILLAR: *Cat® Autonomous Mining Trucks Haul One Billion Tonnes*. URL https://www.cat.com/en_US/news/machine-press-releases/cat-autonomous-mining-trucks-haul-one-billion-tonnes.html. - abgerufen am 2021-03-19. — https://www.cat.com/en_US/news/machine-press-releases/cat-autonomous-mining-trucks-haul-one-billion-tonnes.html
- [26] CATERPILLAR: *Grade – An Autograde Grade Control System for Excavators*. URL https://www.cat.com/en_US/by-industry/construction/cat-connect/technologies/grade-technology/grade-for-excavators.html. - abgerufen am 2019-10-28
- [27] CATERPILLAR: *AccuGrade® ATS*. URL https://www.cat.com/de_DE/support/operations/technology/earth-moving-solutions/accugrade-grade-control-system/ats.html. - abgerufen am 2019-10-29
- [28] COHRS, HEINZ-HERBERT: *Kleinigkeiten, welche die Baumaschinenwelt bewegen*. URL <http://www.baublatt.de/startseite/2017/07/20/kleinigkeiten-welche-die-baumaschinenwelt-bewegen/>. - abgerufen am 2019-10-21
- [29] COHRS, HEINZ-HERBERT: *Der Mensch ist alternativlos*. URL <https://www.baumaschinen-dienst.de/artikel/der-mensch-ist-alternativlos-6025/>. - abgerufen am 2019-10-21
- [30] CONSTRUCTION PLANT NEWS: *The Latest Control Technology from Engcon*. URL <https://cpnonline.co.uk/features/latest-control-technology-engcon/>. - abgerufen am 2019-10-29
- [31] CONTINENTAL AG: *Richtige Information im richtigen Moment geben*. URL <https://allgemeinebauzeitung.de/abz/continental-richtige-information-im-richtigen-moment-geben-32517.html>. - abgerufen am 2019-10-21
- [32] DECKER, JANA: Der Hybrid-Bagger. In: *Deutzworld* Bd. 2015 (2015), Nr. 1, S. 24
- [33] DIN 18710-1: Ingenieurvermessung – Teil 1: Allgemeine Anforderungen, DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2010)
- [34] DIN EN 474-1:2018-08: Erdbaumaschinen- Sicherheit- Teil_1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN_474-1:2006+A5:2018, Beuth Verlag GmbH (2018)
- [35] DIN EN 894-2:2009-02: Sicherheit von Maschinen- Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen- Teil_2: Anzeigen; Deutsche Fassung EN_894-2:1997+A1:2008, Beuth Verlag GmbH (2009)
- [36] DIN EN 894-3:2010-01: Sicherheit von Maschinen- Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen- Teil_3: Stellteile; Deutsche Fassung EN_894-3:2000+A1:2008, Beuth Verlag GmbH (2010)
- [37] DIN EN ISO 6682:2008: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 3: Stellteile, Beuth Verlag GmbH (2009)
- [38] DOXEL: *Artificial Intelligence for Construction Productivity*. URL <https://www.doxel.ai/>. - abgerufen am 2019-10-29
- [39] DUBBEL, HEINRICH ; GROTE, K.-H. ; BENDER, B. ; GÖHLICH, D. (Hrsg.): *Taschenbuch für den Maschinenbau*. 25., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin, Germany : Springer Vieweg, 2018
- [40] DUDEK, H. ; KÖPPEL, M.: Telematik 2011: Ergebnisse einer Befragung von Telematiknutzern und Telematikinteressierten im Bereich Transport und Logistik. In: *Duale Hochschule Baden-Württemberg, Ravensburg* (2011)
- [41] EMBEDDED FLAKES: *J1939 Diagnostics - Part 1*. URL <https://embeddedflakes.com/j1939-diagnostics-part-1/>. - abgerufen am 2021-06-02
- [42] ENGCON: *Efficiency, Profitability, Safety*. URL <http://www.digrite.com.au/content/pdfs/Engcon.pdf>. - abgerufen am 2019-10-29



- [43] FELDMANN, SEBASTIAN ; ROLAND BERGER GMBH (Hrsg.): *PREDICTIVE MAINTENANCE Service der Zukunft – und wo er wirklich steht* (Studie). München, 2017
- [44] FINZEL, KLAUS: *Ferndiagnose und -wartung gehört die Zukunft* (Pressemitteilung). Garching bei München : Zeppelin Baumaschinen GmbH, 2019
- [45] FORCONSTRUCTIONPROS: *Wheel Loaders Offer Choice Between Added Value and Value Priced*. URL <https://www.forconstructionpros.com/equipment/earthmoving/loaders/article/12068050/wheel-loaders-offer-choice-between-added-value-and-value-priced>. - abgerufen am 2019-10-30
- [46] FRITZMEIER: *Fritzmeier Cabs: CAB 4.0 à la carte, Augmented Reality und HMI-Cluster*. URL <https://www.baumagazin-online.de/d/fritzmeier-cabs-cab-40-a-la-carte-augmented-reality-und-hmi-cluster/>. - abgerufen am 2019-10-09
- [47] FRITZMEIER ; CAB CONCEPT CLUSTER: *Der Diamant unter den Kabinen*. URL <http://www.cabconceptcluster.com/genius-cab-bauma/>. - abgerufen am 2019-10-09
- [48] FUCHS, PEPPERL: *Automatische Identifikation von Anbaugeräten an Liebherr Hydraulikbaggern | Applikationsbericht*. URL <https://www.pepperl-fuchs.com/germany/de/8292.htm>. abgerufen am 2019-10-18
- [49] GESTRATA: *Intelligente Asphaltverdichtung*. URL <http://www.gestrata.at/publikationen/archiv-journal-beitrage/gestrata-journal-130/intelligente-asphaltverdichtung>. - abgerufen am 2019-10-30
- [50] GÜNTHNER, WILLIBALD ; SCHNEIDER, OLIVER: *RFID-Einsatz in der Baubranche: Entwicklung eines RFID-System mit mobilen Leseeinrichtungen zur schnellen Identifikation und Verfolgung von Betriebsmitteln zwischen Baustellen und Werken* (Abschlussbericht). München : TU München - Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik, 2012
- [51] HEIL, OLIVER: *bauma 2019: Continental macht die Kabine digital und dem Maschinenführer das Leben leichter* (Pressemitteilung Continental). Frankfurt/Main, 2019
- [52] HITACHI CONSTRUCTION MACHINERY: *Hitachi ZW 180 Wheel Loader* (Broschüre), 2007
- [53] HITACHI CONSTRUCTION MACHINERY: *ZH210-5 Hybrid*. URL <https://www.hitachicm.eu/de/maschinen/bagger/mittelgrosse-bagger/zh210-5-hybrid/>. - abgerufen am 2019-10-29
- [54] HUSQVARNA DEUTSCHLAND GMBH: *Husqvarna Connect - Entfalten Sie das volle Potenzial Ihrer Produkte*. URL <https://www.husqvarna.com/de/produkte/husqvarnaconnect/>. - abgerufen am 2021-03-19. — Husqvarna
- [55] HYDAC: *LX-6 Load-Sensing Ventil*. URL <https://m.hydac.com/de-de/produkte/mobilventile/load-sensing-ventile/lx-6-load-sensing-ventil.html>. - abgerufen am 2019-10-29
- [56] ISO 5006:2017 (E): *Earth-moving machinery — Operator’s field of view — Test method and performance criteria*, 2017
- [57] ISO 6011: *Earth-moving machinery — Visual display of machine operation*, 2003
- [58] ISO 10968: *Earth-moving machinery — Operator’s controls*, 2004
- [59] KAPPEL, MARC: *Angewandter Straßenbau: Straßenfertiger im Einsatz*. 2. Aufl. 2016. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2016
- [60] KESSLER, STEPHAN ; WIMMER, JOHANNES ; GÜNTHNER, WILLIBALD: *Baumaschinen Flottenmanagement mit Telematik – Benefit für den Betreiber*. In: *41. VDBUM Seminar - Seminarband 2012*. München, 2012, S. 13
- [61] KLICKRENT: *Autonome Baumaschinen definieren den Bauprozess von Morgen*. URL <https://portal.klickrent.de/blog/autonome-baumaschinen-definieren-den-bauprozess-von-morgen>. - abgerufen am 2019-10-29
- [62] KNALL, MARKUS: *Stuttgart 21: Hilfe auf vier „Pfoten“ – Roboter-Hunde auf Baustelle im Einsatz*. URL <https://www.heidelberg24.de/baden-wuerttemberg/stuttgart-21-baustelle-roboterhund-boston-dynamics-spot-robotdog-zr-90572808.html>. - abgerufen am 2021-06-02. — <https://www.heidelberg24.de>
- [63] KOBELCO: *SK219HLY-10 Hybrid*. URL <https://www.kobelco-europe.com/innovation/hybrid/>. - abgerufen am 2019-10-29
- [64] KOMATSU: *Hydraulikbagger PC210LCi-10* (Broschüre), 2015



- [65] KOMATSU: *Komatsu Hybridsystem*. URL <https://www.komatsu.eu/de/komatsu-hybridsystem>. - abgerufen am 2019-10-29
- [66] KOMATSU: *Komatsu intelligent Machine Control*. URL <https://www.komatsu.eu/de/komatsu-intelligent-machine-control>. - abgerufen am 2019-10-28
- [67] KÖNIG, HORST: *Maschinen im Baubetrieb: Grundlagen und Anwendung, Leitfaden des Baubetriebs und der Bauwirtschaft*. 4., aktualisierte Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014
- [68] KRAMER: *Der Kramer 5055e*. URL <https://www.kramer-online.com/de/produkt/model/5055e/>. - abgerufen am 2021-04-07. — Kramer
- [69] KRAUS, MELANIE: *Baumaschinenbranche setzt auf digitale Lösungen*. URL <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/baumaschinenbranche-setzt-auf-digitale-loesungen-a-812671/>. - abgerufen am 2019-10-21
- [70] KUNZE, GÜNTER ; GÖHRING, HELMUT ; JACOB, KLAUS ; SCHEFFLER, MARTIN: *Baumaschinen: Erdbau- und Tagebaumaschinen, Fördertechnik und Baumaschinen*. 1. Aufl [Nachdr.]. Wiesbaden : Vieweg, 2002
- [71] KURMANN, FABIAN: Schritt für Schritt zur Roboterbaustelle. In: *VDI nachrichten* (2019), Nr. 21/22
- [72] LEICA GEOSYSTEMS: *Maschinensteuerungssysteme Bagger*. URL <https://leica-geosystems.com/de-DE/products/machine-control-systems/excavator>. - abgerufen am 2019-10-28
- [73] LEICA GEOSYSTEMS AG: *Icon Baumaschinenteuerungen* (Broschüre). Heerbrugg, Suisse, 2017
- [74] LIEBHERR: *Komfortabel und individuell einstellbar: Die neue Litronic-Kransteuerung für Liebherr-Turmdrehkrane*. URL <https://www.liebherr.com/de/deu/aktuelles/news-pressemitteilungen/detail/komfortabel-und-individuell-einstellbar-die-neue-litronic-kransteuerung-f%C3%BCr-liebherr-turmdrehkrane.html>. - abgerufen am 2019-10-30
- [75] LIEBHERR: *Liebherr: Intelligente Assistenzsysteme für »XPower«-Großradlader*. URL <https://www.liebherr.com/de/deu/aktuelles/news-pressemitteilungen/detail/intelligente-assistenzsysteme-fuer-xpower-grossradlader-bei-liebherr-auf-der-bauma-2019.html>. - abgerufen am 2019-10-21
- [76] LIEBHERR: *Tower Crane Litronic*. URL <https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/baumaschinen/turmdrehkrane/tower-crane-litronic/tower-crane-litronic.html>. - abgerufen am 2019-10-30
- [77] LIEBHERR MINING: *Elektrifizierend*. URL <https://www.liebherr.com/de/deu/aktuelles/news-pressemitteilungen/detail/elektrifizierend-liebherr-mining.html>. - abgerufen am 2019-10-29
- [78] LIEBHERR-INTERNATIONAL DEUTSCHLAND GMBH: *Crane Planner 2.0*. URL <https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/mobil-und-raupenkrane/service/crane-planner/crane-planner.html>. - abgerufen am 2021-03-19
- [79] LINDE: *Mit Wasserstoff in die Zukunft*. URL <https://www.linde-mh.de/de/Ueber-uns/Innovationen-von-Linde/Brennstoffzellen.html>. - abgerufen am 2019-10-29
- [80] MECALAC: *MECALAC e12: 100 % Elektrobagger*. URL <https://www.mecalac.com/de/e12-electric-wheel-excavator.html>. - abgerufen am 2019-10-29
- [81] MOBA MOBILE AUTOMATION AG: *Xsite Baggersteuerungen* (Broschüre). Limburg, 2019
- [82] MOBA MOBILE AUTOMATION AG: *MCA – Compaction Assistant* (Broschüre). Limburg, 2019
- [83] MTS MASCHINENTECHNIK SCHRODE AG: *Verdichtungsassistent* (Broschüre), 2019
- [84] MÜLLER-HOFSTETTER, SABINE: Die digitale Baustelle. In: *A3BAU* (2017), Nr. 01–02, S. 24–27
- [85] NETZWERK BAUMASCHINEN DER OFFENSIVE GUTES BAUEN: *Personen-/Objekterkennung, Warnung in Gefahrenbereichen* (Leitfaden). Kassel, 2019
- [86] NIEDERDRENK, RALPH ; SEEMANN, RALPH: *Wachstum 2020 – Digitalisierung und BIM, Baubranche aktuell* (Kurzstudie) : PricewaterhouseCoopers GmbH, 2018
- [87] o.V.: Kommunikative Krane. In: *Hub-, Hebe-, und Krantechnik* (2015), Nr. Dezember 2014/Januar 2015, S. 64–65
- [88] o.V.: Per Datenbrille in die Maschine schauen. In: *B_I galabau* (2019), Nr. 7, S. 27



- [89] o.V.: Neue Vorbereitung für Leica, Trimble and Xsite für Doosan Bagger. In: *VDBUM Info* (2019), Nr. 3, S. 4
- [90] o.V.: Auf Knopfdruck-Automatische Baggersteuerung erhöht die Produktivität und senkt die Kosten. In: *VDBUM Info* (2019), Nr. 3, S. 37
- [91] o.V.: *Die autonome Walze kommt*. URL <https://www.baugewerbe-magazin.de/maschinensteuerung/ausgezeichnetes-design---die-autonome-walze-kommt.htm>. - abgerufen am 2019-10-30
- [92] PALFINGER AG: *Mit Innovation stets an ihrer Seite-Lifetime Service* (Broschüre). Bergheim, Austria, 2019
- [93] PARKER: *Mobile Directional Control Valve*. URL https://www.parker.com/literature/HY17-8537-UK_K220.pdf. - abgerufen am 2019-10-29
- [94] PFREUNDT GMBH: *Die WK60 Radladerwaage* (Broschüre). Südlohn, 2019
- [95] PON CAT: *Cat 323F Z-line*. URL <https://www.pon-cat.com/no/nyheter/z-line>. - abgerufen am 2019-10-29
- [96] RANDALL-REILLY, LLC: *Komatsu's autonomous haul trucks work and the technology*. URL <https://www.equipmentworld.com/equipment-controls/autonomous/article/14970116/komatus-autonomous-haul-trucks-work-and-the-technology>. - abgerufen am 2021-03-19. — Equipment World
- [97] RECALM GMBH: *ANC acoustic devices for vehicle cabins*. URL <https://recalm.com/en/https-recalm-com-en/>. - abgerufen am 2021-04-07. — recalm
- [98] RINNEBERG, SUSANNE MIRIAM: *Assistenzfunktionen für Erdbaumaschinen mittels Identifikations-technologie*. München, TU München - Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik, Dissertation, 2016
- [99] ROHR, W. ; HAMME, T. VAN: Hydrauliksysteme in Standard-Baggern. In: *BMT. Baumaschine+ Bautechnik* Bd. 34 (1987), Nr. 7–8, S. 315–323
- [100] ROPER, JACK: Magic touch. In: *IVTInternational* Bd. 27 (2019), Nr. 2, S. 30–36
- [101] SANDVIK AB: *AutoMine® Underground*. URL <https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/automation/automine-equipment-and-teleoperation-systems/automine-underground/>. - abgerufen am 2021-03-19. — Sandvik Mining and Rock Technology
- [102] SITECH DEUTSCHLAND GMBH: *Maschinensteuerungen für Bagger, Dozer und Grader von Caterpillar* (Broschüre). Oberhausen, 2012
- [103] SITECH DEUTSCHLAND GMBH: *Trimble SiteVision*. URL <https://www.sitech.de/produkte/software-it/trimble-sitevision>. - abgerufen am 2021-04-01
- [104] STARKE, MARTIN ; WAURICH, VOLKER: Technologische Entwicklungen im Baumaschinenbereich.
- [105] STELLMACH, HENDRIK: *Automatische Maschinensteuerung: Fehlerfrei baggern für jedermann*. URL <https://www.bi-medien.de/artikel-8762-bm-cat-grade-control-mit-assist.bi>. - abgerufen am 2019-10-21
- [106] STERN, SEBASTIAN ; STRUBE, GERNOT ; LOTZ, CARSTEN ; KUTZ, ANDRÉ: *Infrastruktur & Wohnen: Deutsche Ausbauziele in Gefahr* (Studie) : McKinsey & Company, 2018
- [107] TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN - PROFESSUR FÜR FLUID-MECHATRONISCHE SYSTEMTECHNIK: *Bauen 4.0: Effizienz und Produktivitätssteigerung von Bauprozessen durch Vernetzung und Kommunikation mobiler Maschinen*. URL <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/die-fakultaet/news/tu-dresden-errichtet-erste-5g-baustelle-deutschlands-ingenieurwissenschaftler-koordinieren-9-mio-euro-verbundprojekt-zur-zukunft-des-bauens>. - abgerufen am 2019-10-29
- [108] TEREX CRANES: *Der neue Terex CTL 272-18*. URL <https://www.terex.com/bauma/de/home/2018/09/24/der-neue-terex-ctl-272-18>. - abgerufen am 2019-10-30
- [109] TOPCON DEUTSCHLAND POSITIONING GMBH: *3D-Bau-Lösungen* (Broschüre). Hamburg, 2018
- [110] TOYOTA: *Toyota Mirai*. URL <https://www.toyota.de/automobile/mirai/index.json>. - abgerufen am 2019-10-29



- [111] TRIMBLE: *Trimble Earthworks Vers. 1.10: Bagger*. URL <https://www.sitech.de/medien/aktuelles/trimble-earthworks-vers-110-bagger>. - abgerufen am 2019-12-13
- [112] TRIMBLE CIVIL ENGINEERING AND CONSTRUCTION: *Maschinensteuerung für Bagger*. URL <https://www.sitech.de/produkte/maschinensteuerung/trimble-maschinensteuerung-fuer-bagger/>. - abgerufen am 2019-10-28
- [113] VEMCON GMBH: *Toolmanagement zur Maximierung des Arbeitsmaschineneinsatzes*. URL <https://www.vemcon.de/technologieplattform/toolmanagement/>. - abgerufen am 2019-09-30
- [114] VEMCON GMBH: *CoPilot*. URL <https://www.vemcon.de/technologieplattform/bagger-copilot/>. - abgerufen am 2019-10-28
- [115] VEMCON GMBH: *Der Vemcon Copilot zur Teilautomatisierung von Arbeitsmaschinen*. URL https://www.vemcon.de/wp-content/uploads/2018/10/2018_08_Vemcon_Infoblatt_Copilot_web.pdf. - abgerufen am 2019-10-29
- [116] VERMESSUNGSTECHNIK ENGELMANN KG: *Bau - Maschinensteuerung - Maschinensteuerung*. URL <http://www.vt-engelmann.de/bau/maschinensteuerung/maschinensteuerung.html>. - abgerufen am 2019-12-13
- [117] VÖLKELEKTRONIK GMBH: *VCC – Völkel Compaction Control®* (Broschüre). Münster, 2018
- [118] VOLVO CONSTRUCTION EQUIPMENT: *Volvo Wheel Loaders L110G, L120G* (Broschüre), 2011
- [119] VOLVO CONSTRUCTION EQUIPMENT: *L25 und ECR25*. URL <https://www.volvoce.com/global/en/this-is-volvo-ce/what-we-believe-in/innovation/electrifying-the-future/>. - abgerufen am 2019-10-29
- [120] VOLVO CONSTRUCTION EQUIPMENT: *Volvo: Active Control*. URL <https://www.volvoce.com/europe/en/services/volvo-services/productivity-services/dig-assist/volvo-active-control/>. - abgerufen am 2019-10-29
- [121] VOLVO CONSTRUCTION EQUIPMENT: *Dig Assist*. URL <https://www.volvoce.com/deutschland/de-de/services/volvo-services/productivity-services/dig-assist/>. - abgerufen am 2019-10-21
- [122] VOLVO CONSTRUCTION EQUIPMENT: *Volvo-Wägesystem*. URL <https://www.volvoce.com/deutschland/de-de/services/volvo-services/productivity-services/load-assist/>. - abgerufen am 2019-10-21
- [123] VOLVO CONSTRUCTION EQUIPMENT: *Pave Assist*. URL <https://www.volvoce.com/deutschland/de-de/services/volvo-services/productivity-services/pave-assist/>. - abgerufen am 2019-10-21
- [124] WACKER NEUSON: *WL20e - Radlader mit Elektroantrieb*. URL <https://www.wackerneuson.de/de/produkte/radlader/knickgelenkte-radlader/model/wl20e/>. - abgerufen am 2019-10-29
- [125] WACKER NEUSON: *DW15e - Elektro-Raddumper*. URL <https://www.wackerneuson.de/de/produkte/dumper/raddumper/model/dw15e/>. - abgerufen am 2019-10-29
- [126] WACKER NEUSON: *EZ17e und EZ26e - Elektro-Minibagger*. URL <https://www.wackerneuson.de/de/aktuelles/news/ez17e/>. - abgerufen am 2019-10-29
- [127] WACKER NEUSON SE: *Compatec Verdichtungskontrolle Vibrationsplatte*. URL <https://www.wackerneuson.de/de/produkte/innovative-loesungen/compatec/>. - abgerufen am 2021-03-19. — Wacker Neuson
- [128] WACKER NEUSON SE: *Infrarot-Fernsteuerung mit Sichtfeldsteuerung*. URL <https://www.wackerneuson.de/de/produkte/innovative-loesungen/infrarot-fernsteuerung/>. - abgerufen am 2021-03-19. — Wacker Neuson
- [129] WEBER, JÜRGEN ; LAUTNER, ERIK: Intelligente Baumaschinensteuerungen und alternative Antriebssysteme. In: *Fachtagung Baumaschinentechnik 2004: Forschung, Entwicklung, Innovation*. Magdeburg, 2004, S. 41–48
- [130] WEKA BUSINESS MEDIEN GMBH: *Pilotprojekt*. URL <https://www.baugewerbe-magazin.de/bagger/displayaction-552768.htm>. - abgerufen am 2021-02-24
- [131] WIENÄBER BAUMASCHINEN: *Großabbruch mit dem neuen Hyundai HX300L - Home*. URL <https://wienaeber-hyundai.de/detailseite-112/grossabbruch-mit-dem-neuen-hyundai-hx300l.html>. - abgerufen am 2019-10-21



-
- [132] WULF, MICHAEL: »XPower ist mehr als ein neuer Radlader«. URL <https://www.baumagazin-online.de/d/xpower-ist-mehr-als-ein-neuer-radlader/>. - abgerufen am 2019-12-17
 - [133] ZAK ZENTRALE ABFALLWIRTSCHAFT KAISERSLAUTERN: „Testgelände“ für autonome Straßenwalzen. URL <https://www.zak-kl.de/node/995>. - abgerufen am 2019-10-30
 - [134] ZEPPELIN BAUMASCHINEN GMBH: *AutoDig*. URL <https://www.zeppelin-cat.de/produkte/cat-lader/autodig.html>. - abgerufen am 2019-10-30