AUTOMATISIERTE BAUMASCHINEN UND ROBOTIK

Ersteller:

GWT-TUD GmbH, Freiberger Straße 33, 01067 Dresden

Bearbeiter:

Prof. Dr.-Ing. Frank Will
Freier Mitarbeiter der GWT-TUD GmbH
Inhaber der Professur für Baumaschinen, Technische Universität Dresden

Unterzeichner:

Prof. Dr.-Ing. Frank Will

Bearbeitungszeitraum:

01.07. – 31.10.2019

Abgabedatum:

01.11.2019
Rev. 2 / 04.03.2020
Rev. 3 / 15.06.2023 (ohne inhaltliche Änderungen)

Zusammenfassung

Die Bauwirtschaft sieht sich gegenwärtig und wohl auch in naher Zukunft mit einer großen Nachfrage nach Baumaßnahmen zur Schaffung von Wohnungen und Infrastruktur konfrontiert. Diesem Bedarf stehen ein nicht zu übersehender Mangel an Fachkräften und zunehmende Regularien und Qualitätserwartungen während des gesamten Bauprozesses gegenüber. Verglichen mit anderen Wirtschaftsbereichen hat die Baubranche zudem erheblichen Nachholbedarf im Hinblick auf ihre Produktivitätsentwicklung. So zeigen dahingehend nahezu alle Industrie- und Dienstleistungsbereiche einen mehr oder weniger kontinuierlich ansteigenden Trend, wohingegen die Produktivität in der Bauwirtschaft seit Jahrzehnten stagniert.

Um diesen Anforderungen erfolgreich begegnen zu können, bieten die aktuell in allen Bereichen diskutierten Digitalisierungsansätze auch bei Baumaßnahmen und Baumaschinen nicht unerhebliches Potenzial. Dennoch gibt es bisher nur eine vergleichsweise geringe Durchdringung des Marktes mit industriell tauglichen Digitalisierungslösungen in der Bauwirtschaft.

Vor diesem Hintergrund entstand das vorliegende Gutachten zum Thema „Automatisierte Baumaschinen und Robotik“ im Rahmen des übergeordneten Projektes „Innovative Technologien, Prozesse und Produkte in der Bauwirtschaft“ im Auftrag des Deutschen Bundestages, welches im Wesentlichen auf die Möglichkeiten und Grenzen der Automatisierung etablierter Baumaschinen durch die Integration verfügbarer Technologien zielt. Darüber hinaus werden neuartige und für den Einsatz in der Bauwirtschaft speziell konzipierte Technologien und Maschinen betrachtet. Dabei gewährt das Gutachten einen freien Blick auf den aktuellen Stand angewandter Technologien, Prozesse und Maschinen, zeigt weiterführend erkennbare Entwicklungstrends auf und klassifiziert Potenziale zur Effizienz-, Qualitäts- und Produktivitätssteigerung[1,2].

Im Vorfeld der Betrachtung dieser Kernpunkte war eine Analyse der **Rahmenbedingungen**, welche die Entwicklung und den Betrieb von Baumaschinen maßgeblich beeinflussen, zwingend erforderlich. Im Zuge dessen beleuchten die Autoren sowohl die gegenwärtige Markt- und Wettbewerbssituation als auch juristische Randbedingungen und Fragestellungen zu Normung und Standardisierung. Ergänzend werden die produkt- und einsatzbezogenen Aspekte von Baumaschinen und -geräten, wie Produktsicherheit und Arbeitsschutz, Wirtschaftlichkeit, Akzeptanz sowie Aus- und Weiterbildung, erläutert und es wird auf funktionale Besonderheiten der Maschinen im Bauprozess eingegangen.

Zwei sehr umfangreiche Kapitel zum **Stand der Technik** gewähren auf der einen Seite einen vertiefenden Einblick in die aktuell verfügbaren und eingesetzten Technologien, welche im Hinblick auf (Teil-) Automatisierungslösungen bei Baumaschinen unverzichtbar sind. Dabei wird der Fokus im Wesentlichen auf verfügbare Sensorlösungen, u.a. zur Positionsbestimmung und Objekterkennung, auf steuerungsrelevante Softwaresysteme und Kommunikationstechnologien gerichtet, aber auch explizit auf die derzeit eingesetzte Antriebstechnik und Mensch-Maschine-Schnittstellen.

Auf der anderen Seite sind Erläuterungen zur derzeit eingesetzten Maschinentechnik Bestandteil der Ausführungen zum Stand der Technik. Darin wird der Einsatz von Baumaschinen in der deutschen Bauindustrie sowie im Baugewerbe beleuchtet. Die gängigen Maschinentypen, ihr technologischer Entwicklungsstand, ihr Einsatzspektrum sowie ihre anwendungstechnischen Begrenzungen werden skizziert. Schwerpunkte der Betrachtung liegen in den Anwendungsbereichen Tiefbau, Straßenbau, Hochbau und Abbruch.

Ausgehend von den Rahmenbedingungen und dem aktuellen Stand der Technik werden in einem weiteren ausführlichen Abschnitt die **Potenziale** aufgezeigt, die eine gesteigerte Automatisierung von Ma-

[1] Effizienzsteigerung, hier: Minimierung der für eine Bauleistung insgesamt eingesetzten Mittel.
[2] Produktivitätssteigerung, hier: Minimierung der für eine Bauleistung eingesetzten Arbeitsstunden.

schinenfunktionen und Assistenzsysteme zur Unterstützung von (unzureichend qualifizierten und verfügbaren) Baugeräteführern beinhalten. Dabei richtet sich der Fokus insbesondere auf Sensortechnik, Funktechnologien (5G), maschinelles Lernen sowie eine zunehmende Digitalisierung der Maschinen. Diese Technologien sind „Enabler" für die Produktivitätssteigerung und die Erweiterung des Einsatzspektrums von Baumaschinen.

Im Zuge dessen wird den bislang nur sehr wenig berücksichtigten, wobei sehr vielversprechenden Anwendungen, wie predicitive maintenance, autonome Maschinen, digitale Datenmodelle, Echtzeit-Fernsteuerung, eine besondere Beachtung geschenkt.

Im Rahmen des Gutachtens wird in diesem Zusammenhang untersucht, welche Potenziale die Umsetzung dieser Technologien bei Baumaschinen bietet. Beispielhaft sind hier folgende Entwicklungsrichtungen zu nennen:

- Assistenzsysteme zur Unterstützung und Entlastung der Geräteführer;
- Umgebungserkennungssysteme zur Reduzierung von Gefährdungen für Personen, Maschinen und Baustellenobjekten;
- Verknüpfung von Sensorik, Kommunikation und Software zur Realisierung autonomer Funktionen und Maschinen;
- Maschinelles Lernen und Künstliche Intelligenz;
- Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Virtual Reality und Augmented Reality beim Betrieb von Baumaschinen;
- Fernhantierte Maschinen für die Arbeit in unzugänglichen Bereichen;
- Elektrifizierung von Antriebssträngen und deren Auswirkung auf die Automatisierbarkeit;
- Schnelle und sichere Kommunikation (auf Basis von 5G) zur Verknüpfung von Maschinen (Automatisierung) und überlagerten Systemen (Anbindung an BIM-Prozesse).

Im Gutachten wird außerdem herausgearbeitet, welche Hemmnisse bei der Entwicklung automatisierter Baumaschinen bestehen und wie eine Markteinführung beschleunigt werden kann. Dabei ist zu unterscheiden zwischen technologischen, wirtschaftlichen und regulatorischen Hemmnissen. Auch die Limitierungen und Handlungsoptionen aus den Themenfeldern Qualifikation, demographischer Wandel, Aus- und Weiterbildung sowie Akzeptanz neuer Technologien fließen ein.

Neben der technologischen Entwicklung bestehender Maschinen existieren vielfältige Konzepte für neuartige Maschinen. Manuelle Tätigkeiten können künftig durch vielfältig einsetzbare Manipulatoren, angelehnt an bekannte Roboterkonzepte (z.B. Knickarmroboter, Portalroboter, Seilroboter), jedoch angepasst an die Baustellenbedingungen, unterstützt oder ersetzt werden. Eine effiziente Implementierung von Baurobotikanwendungen unterliegt jedoch diversen Randbedingungen, welche im Gutachten dargelegt werden.

Die Perspektive hinsichtlich einer vernetzten, digitalisierten Baustelle mit automatisierten Bauprozessen und Maschinen wird durch mehrere Faktoren bestimmt. Nicht zu vernachlässigen dabei sind die zahlreichen Forschungs- und Entwicklungsprojekte, die maßgeblich dafür verantwortlich sind, die technologischen Möglichkeiten auf akademischem Niveau zu entwickeln und für die Praxis sichtbar zu machen. Mit der Auswahl der in Deutschland auf diesem Gebiet durchgeführten Forschungsprojekte wird vor dem Hintergrund des im Rahmen dieses Gutachtens dargelegten Entwicklungsstands deutlich, dass die entsprechenden Aktivitäten im Sinne der in diesem Gutachten dargelegten Perspektiven zwar in die gewünschte Richtung zeigen. Um jedoch mit dem Tempo des aktuellen Entwicklungsgeschehens im internationalen Maßstab mithalten zu können, ist eine nicht unerhebliche Intensivierung der Forschungs- und Entwicklungsbestrebungen zwingend erforderlich.

Dies wird, zusammen mit den weiteren Erkenntnissen des Gutachtens, im Rahmen von **Handlungsempfehlungen** noch einmal zum Ausdruck gebracht. Dabei wird die Sicht der Autoren dieses Gutachtens auf notwendige Maßnahmen wiedergegeben. Daraus lassen sich in der Folge konkrete Handlungsbedarfe ableiten, damit wirken die Handlungsempfehlungen unterstützend bei der Entscheidungsfindung verantwortlicher Personen und Gremien.

Inhalt

1 Einführung ... 6
1.1 Begriffsdefinitionen ... 10
1.2 Ebenen der Automatisierung ... 13
2 Rahmenbedingungen ... 16
2.1 Markt- und Wettbewerbssituation ... 16
2.2 Regulierung, Normung und Standardisierung ... 17
2.3 Produktsicherheit und Arbeitsschutz ... 19
2.4 Datensicherheit ... 19
2.5 Wirtschaftlichkeit ... 19
2.6 Arbeitsmarkt Bau, Aus- und Weiterbildung ... 20
2.7 F&E-Ressourcen ... 20
2.8 Akzeptanz ... 21
2.9 Funktionale Besonderheiten ... 21
2.10 Beispiele bisher nicht umgesetzter Technologien ... 22
3 Stand der Technik: Technologien für die Automatisierung von Baumaschinen ... 24
3.1 Sensorik ... 24
3.1.1 Absolute Positionsbestimmung (Maschinenposition) ... 24
3.1.2 Relative Positionsbestimmung (Arbeitsausrüstung) ... 26
3.1.3 Personen- und Objekterkennung ... 29
3.1.4 Identifikation ... 31
3.1.5 Erfassung und Überwachung des Maschinenzustands ... 31
3.1.6 Erfassung und Überwachung von Arbeitsprozessen ... 32
3.2 Softwaresysteme ... 34
3.3 Kommunikation ... 37
3.3.1 Digitale Datenübertragung ... 37
3.3.2 Funktechnologien ... 38
3.3.3 Anwendungsbeispiele ... 38
3.4 Antriebstechnik ... 39
3.5 Human-Machine-Interface (HMI) ... 47
4 Stand der Technik: Maschinentechnik im Bauprozess ... 53
4.1 Bauprozesse/Baulogistik ... 54
4.1.1 Informationsfluss ... 54
4.1.2 Materialfluss ... 56
4.2 Vermessung ... 58
4.3 Tiefbau ... 59
4.4 Strassenbau ... 67
4.5 Hochbau ... 70
4.6 Abbruch ... 73
5 Perspektiven ... 75
5.1 Baustelle der Zukunft ... 75
5.1.1 Vorbemerkung ... 75

5.1.2 Die Vision ... 76
5.1.3 Hindernisse ... 78
5.1.4 Fazit ... 79
5.2 Sensorik ... 80
5.2.1 Ortungssysteme ... 80
5.2.2 Erfassung elastischer Verformungen ... 80
5.2.3 Umgebungserkennung ... 81
5.2.4 Zustandserfassung von Erd- und Baustoffen ... 82
5.3 SoftwareSysteme ... 82
5.3.1 Redundante Sensorik und Sensorfusion ... 82
5.3.2 Digitale Baustellenmodelle ... 83
5.4 Kommunikation ... 83
5.4.1 5G-taktiles Internet ... 83
5.4.2 Schnittstellen ... 83
5.5 Antriebstechnik ... 85
5.6 Human-Machine-Interface (HMI) ... 86
5.6.1 Ausgabeelemente ... 86
5.6.2 Eingabeelemente ... 87
5.7 Digitaler Zwilling ... 89
5.8 Assistenz, Automatisierung und Autonomie ... 90
5.9 Automatisierte Bauprozesse ... 92
5.10 Robotik ... 95
5.11 Aktuelle Forschungsprojekte ... 99
6 Handlungsempfehlungen ... 106
6.1 Forschungsförderung ... 106
6.2 Interdisziplinäre Versuchs- und Demonstrationszentren ... 108
6.3 Regulierung, Normung und Standardisierung ... 109
6.4 Produktsicherheit und Arbeitsschutz ... 111
6.5 Arbeitsmarkt Bau, Aus- und Weiterbildung ... 112
6.6 F&E-Ressourcen ... 113
6.7 Technologieförderung in öffentlichen Bauprojekten ... 114
6.8 Antriebssysteme ... 114
6.9 Mobilfunknetze ... 115
6.10 Forschungsschwerpunkte ... 116
7 Quellenverzeichnis ... 118

1 EINFÜHRUNG

Vorbemerkung

Die Baubranche ist mit einer anhaltend großen Nachfrage nach Wohnungs- und Infrastruktur-Baumaßnahmen konfrontiert. Gleichzeitig besteht ein Mangel an Fachkräften und es gibt zunehmende Regularien und Qualitätserwartungen während des gesamten Bauprozesses. Im Vergleich zu anderen Wirtschaftsbereichen hat die Baubranche erheblichen Nachholbedarf hinsichtlich ihrer Produktivitätsentwicklung. Während nahezu alle Industrie- und Dienstleistungsbereiche einen mehr oder weniger kontinuierlichen Anstieg aufweisen, stagniert die Produktivität[3] in der Bauwirtschaft seit Jahrzehnten (Abbildung 1): Im Zeitraum 1995-2015 verzeichnete die Gesamtwirtschaft ein durchschnittliches jährliches Produktivitätswachstum von 1,32%, das verarbeitende Gewerbe sogar von 2,26% - im gleichen Zeitraum konnte in der Bauindustrie die Produktivität nur um 0,26% jährlich gesteigert werden.

Die aktuell in allen Bereichen diskutierten Digitalisierungsansätze bieten auch bei Baumaßnahmen und Baumaschinen erhebliches Potenzial, um diesen Anforderungen zu begegnen. Dennoch gibt es bisher nur eine sehr geringe Durchdringung des Marktes mit industriell tauglichen Digitalisierungslösungen in der Bauwirtschaft. Vor diesem Hintergrund hat das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) die GWT-TUD GmbH beauftragt, innerhalb des Themenfeldes „Innovative Technologien, Prozesse und Produkte in der Bauwirtschaft“ das vorliegende Gutachten mit dem Titel „Automatisierte Baumaschinen und Robotik“ zu erstellen.

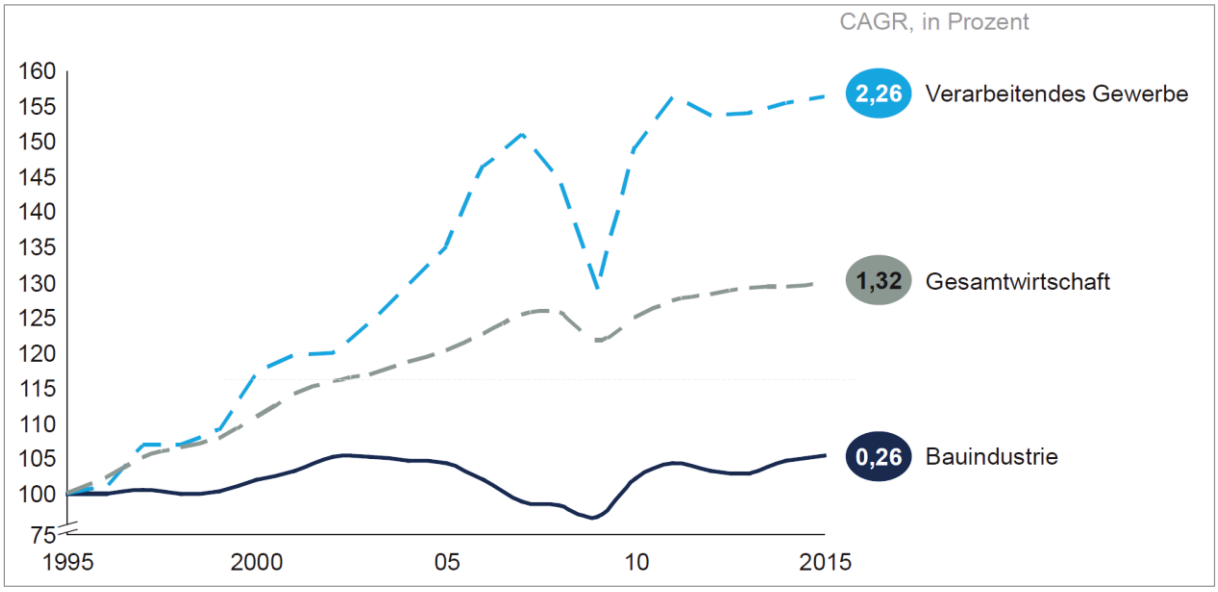


Abbildung 1: Produktivitätsentwicklung in der deutschen Bauindustrie [297][4]

Baumaschinen und Digitalisierung

Baumaschinen stellen ein unverzichtbares Element zur Ausführung von Bauleistungen dar und bestimmen maßgeblich die Effektivität und die Effizienz der Bauausführung. Im Wechselspiel zwischen steigenden Anforderungen auf der Anwenderseite (Bauwirtschaft) und neuen technologischen Möglichkeiten auf der Herstellerseite (Komponenten- und Maschinenhersteller) entstehen ständig verbesserte sowie völlig neu entwickelte Maschinen und Systeme. Hinzu kommen völlig neuartige Komponenten, Systeme sowie Lösungs- und Denkansätze im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung, die sich auch die Baumaschinenbranche zu Nutze machen kann und sollte.

[3] Produktivität, hier: Bruttowertschöpfung je Arbeitsstunde [297]
[4] CAGR = Jährliche Wachstumsrate (Compound Annual Growth Rate)

Die Digitalisierung und Vernetzung von Baumaschinen und Baustellen verzahnt die Branchen der Bauwirtschaft, der Telekommunikation sowie der Bau- und Baustoffmaschinen. Die Etablierung „smarter" Produkte und Services zur Erschließung von Effizienzpotenzialen und zur Entwicklung innovativer Geschäftsfelder bildet ein zentrales Handlungsfeld in der Technologieführerschaft um Industrie 4.0 [302].

Die Umsetzung dieses Anspruches in die Baupraxis hat in den letzten Jahren nach Beobachtung der Gutachter deutlich Geschwindigkeit aufgenommen. Dafür sind im Wesentlichen die folgenden Treiber verantwortlich:

- Produktivität und Prozesseffizienz,
- Qualität,
- Kostenminimierung (Gesamtkosten im Sinne der „Total Cost of Ownership"),
- Fachkräftemangel,
- Verfügbarkeit neuer Technologien.

Allerdings ist bei Beobachtung des Marktes festzustellen, dass zwar zahlreiche Ideen und Ansätze zur Digitalisierung der Maschinen und Prozesse vorliegen, reale Anwendungen aber vielfach noch fehlen. Ein aktuelles McKinsey-Gutachten stellt hierzu fest: „Die Bauindustrie belegt von allen Industrien den vorletzten Platz hinsichtlich des Digitalisierungsgrads – knapp vor Jagd und Fischerei" [297]. Eine der Ursachen dafür ist sicher die Struktur der deutschen Bauwirtschaft, die ganz wesentlich durch die Existenz vieler kleiner Handwerks- und Baubetriebe und nur sehr weniger großer Bauunternehmen gekennzeichnet ist. Hierzu nochmal McKinsey: „Auch ein Mangel an Großunternehmen mit mehr als 250 Mitarbeitern, die über die Mittel und Erfahrung verfügen, digitale Methoden als Vorreiter zu entwickeln und einzuführen, hemmt die Digitalisierung sowie große Programme zur Produktivitätssteigerung" [297]. Weitere Hemmnisse bei der Umsetzung digitaler Technologien und damit bei der Umsetzung von Automatisierungslösungen im Bereich der Baumaschinen werden im Rahmen des Gutachtens erläutert.

Abgrenzung: Maschinenkategorien und Anwendungsbereiche

Unter dem Begriff „Baumaschinen" versteht man alle Maschinen und Geräte, die im Bauwesen genutzt werden

- 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 [85].

Der Begriff umfasst ein sehr 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.

Dementsprechend vielfältig sind die Einsatzszenarien, die Anforderungen und technischen Ausführungen. Eine Gesamtbetrachtung aller auf dem Markt verfügbaren Maschinenkategorien und Anwendungen würde den Rahmen des Gutachtens bei Weitem übersteigen. Daher sind folgende Abgrenzungen zu beachten:

- Das Gutachten betrachtet die Anwendungsgebiete Tiefbau einschließlich Spezialtiefbau, Verkehrswegebau, Hochbau und Abbruch. Nicht oder nur am Rande betrachtet werden die Gebiete Tunnelbau, Wasserbau, Bergbau und Tiefbohren.
- Die maschinentechnischen Betrachtungen orientieren sich vorzugsweise an den mittelgroßen Maschinenkategorien, die im urbanen Umfeld bestimmend sind. Dabei handelt es sich vorwiegend um selbstfahrende, durch einen Geräteführer gesteuerte Maschinen (z.B. Radlader, Bagger, Straßenfertiger, Walze, Bohrgerät, Autobetonpumpe). Großgeräte, die schwerpunktmäßig in der Gewinnung (z.B. Großbagger und Dumper im Steinbruch) im Einsatz sind, stehen hier nicht im Fokus.

Auf der anderen Seite werden auch die kleineren, überwiegend handgeführten Baugeräte (z.B. Stampfer oder Hydraulikhammer) hier nicht betrachtet.
- Bezüglich des Begriffes „Robotik“ im Titel des Gutachtes sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass hier – entsprechend dem übergeordneten Themenfeld – ausschließlich die „Bau-Robotik“ betrachtet wird, also Robotik-Systeme mit direktem Anwendungsbezug in Bauprozessen.

Inhalt, Ziel und Gliederung des Gutachtens

Das vorliegende Gutachten legt den aktuellen Stand der angewandten Technologien, Prozesse und Maschinen dar, zeigt Entwicklungstrends auf und ordnet die Möglichkeiten zur Effizienz-, Qualitäts- und Produktivitätssteigerung ein. Des Weiteren werden die Rahmenbedingungen erläutert und hinsichtlich ihrer Auswirkungen eingeordnet. Derzeit bestehende Hindernisse der weiteren Entwicklung werden ebenso aufgezeigt wie Potenziale und Empfehlungen zu deren Beseitigung.

Mit dem Gutachten werden die Möglichkeiten und Grenzen der Automatisierung von Baumaschinen durch Weiterentwicklung und/oder durch Integration verfügbarer Technologien beleuchtet. Darüber hinaus werden neuartige, für den Einsatz in der Bauwirtschaft speziell konzipierte Technologien und Maschinenkonzepte betrachtet (Bau-Robotik, Additive Fertigung).

Das Gutachten ist wie folgt gegliedert:

Im Kapitel 2 werden die Rahmenbedingungen erläutert, die Einfluss auf Entwicklung und Betrieb von Baumaschinen nehmen. Dabei wird eingegangen auf die Markt- und Wettbewerbssituation, juristische Randbedingungen, Fragen der Normung und Standardisierung, Produktsicherheit und Arbeitsschutz, Wirtschaftlichkeit, Arbeitsmarkt, Aus- und Weiterbildung und Akzeptanz. Abschließend folgen einige Hinweise auf technologische Besonderheiten der Bauprozesse.

Der Stand der Technik wird in Kapitel 3 und 0 dargelegt. Während Kapitel 0 den Fokus auf einzelne Technologien legt, die im Zusammenhang mit der Automatisierung von Baumaschinen und Bau-Robotik relevant sind, gibt Kapitel 0 einen aktuellen Stand der Maschinentechnik im Bauprozess wieder. Dabei wird weniger auf einzelne Technologien als vielmehr auf Maschinen und Gesamtlösungen eingegangen.

Im Kapitel 5 werden technologische Perspektiven zur weiteren Digitalisierung und Automatisierung der Baumaschinen aufgezeigt. Hierzu wird zunächst eine Vision der Baustelle der Zukunft skizziert, bevor einzelne Technologiefelder mit ihren Möglichkeiten und Begrenzungen erläutert werden. Außerdem ist hier ein Überblick über die wesentlichen, aktuell in Deutschland laufenden Forschungsprojekte im Umfeld der Automatisierung von Baumaschinen und Bau-Robotik enthalten.

Der inhaltliche Teil des Gutachtens schließt mit einigen Handlungsempfehlungen in Kapitel 0, die die Sicht der Verfasser zu notwendigen Maßnahmen wiedergeben und damit die Entscheidungsfindung der verantwortlichen Gremien und Personen unterstützen sollen.

Das Gutachten endet mit einem Quellenverzeichnis in Kapitel 7.

Methodik

Um die umfangreiche Zielsetzung des Gutachtens innerhalb der vorgegebenen Grenzen bezüglich Laufzeit und Bearbeitungsaufwand erreichen zu können, war eine methodische Vorgehensweise von entscheidender Bedeutung. Daher wurde die Bearbeitung in die folgenden Teilschritte gegliedert:

- Workshops (Gutachter Prof. Frank Will und wissenschaftliche Mitarbeiter/innen der Stiftungsprofessur für Baumaschinen an der TU Dresden) zur Identifikation von Themenfeldern und Informationsquellen.
- Definition der Themenfelder und Verantwortlichkeiten.
- Informationsbeschaffung und Informationsaustausch im Kreise der Beteiligten.
- Ausarbeitung von Fragebögen für Experten-Interviews und Durchführung der Interviews.
- Aufbereitung und Analyse der gesammelten Informationen.
- Überführung der Informationen in Erkenntnisse und Kernaussagen.

- Erstellung des Gutachtens.

Parallel zur Bearbeitung dieser Teilschritte erfolgte ein laufender Informations- und Statusabgleich im Rahmen 14-täglicher Jour Fixes der Projektbeteiligten.

Informationsbasis

Der Gutachter verfügt über ein umfangreiches und lebendiges Netzwerk aus industriellen, akademischen und baugewerblichen Akteuren. Der direkte Kontakt zu Maschinenherstellern und Branchenverbänden sichert einen umfangreichen Einblick in die aktuelle Markt- und Technologiesituation, relevante Entwicklungstrends sowie aktuelle Innovationen.

Die Fachmesse BAUMA in München (April 2019) ist das bedeutendste weltweite Branchenereignis für Hersteller und Anwender von Baumaschinen und deren Komponenten. Die Messe gab einen hervorragenden Überblick über den aktuellen Stand der Technik und innovative Entwicklungen. Der Gutachter und seine mitwirkenden Mitarbeiter/innen haben im Rahmen dieser Messe – neben einem eigenen Ausstellungsbereich – intensiv recherchiert und zahlreiche Gespräche mit Herstellern und Anwendern geführt. Wesentlichen Anteil an den Gesprächsthemen rund um die Baumaschinentechnik hatten dabei genau die Fragestellungen, die im Gutachten beleuchtet wurden, so dass die dort gewonnenen Erkenntnisse aufgegriffen und in weiterführenden Gesprächen verifiziert und vertieft werden konnten.

Der Lehrstuhl des Gutachters beteiligt sich seit vielen Jahren aktiv an Forschungsvorhaben und wissenschaftlichen Konferenzen auf dem Gebiet der Baumaschinentechnik und verfügt über einen hervorragenden Einblick in die Fachpresse. Aktuelle und zukünftige Entwicklungstendenzen und Forschungsarbeiten können somit kompetent bewertet werden. Der Überblick über die nationale und internationale Forschung auf dem Gebiet der Baumaschinen ermöglichte eine umfangreiche Literaturrecherche über die relevanten Kanäle.

Ergänzend wurden, auf der Grundlage vorbereiteter Fragestellungen, einige „Experten-Interviews“ mit relevanten Akteuren der Branche geführt, um einerseits die eigenen Erkenntnisse zu hinterfragen und abzusichern und um weitere Anregungen und Sichtweisen zu erhalten. Dabei wurden Mitarbeiter von Maschinenherstellern, Zulieferern, Bauunternehmen und Verbänden befragt, im Einzelnen:

Tabelle 1: Gesprächspartner der Experten-Interviews

Name	**Organisation**	**Funktion**
Bauer, Sebastian, Prof. Dr.	BAUER Maschinen GmbH	Geschäftsführer
	Forschungsvereinigung Baumaschinen und Baustoffanlagen (FVB e.V.)	Vorstandsvorsitzender
	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF)	Präsident
Bramberger, Robert	Liebherr-Werk Biberach GmbH	General Manager / Division Development Technology
Branco, Mario	Continental AG	Head of Business Development / Off-Highway
Finzel, Robert, Dr.	Wacker Neuson Linz GmbH	Mitglied der Geschäftsführung / Bereiche Technik, Einkauf, HR
Geigle, Peter, Dr.	Wölfle GmbH	Prokurist Entwicklung und Vertrieb
Giehl, Nikodemus	MOBA Mobile Automation AG	Product Management Paving Quality Systems

Guttenberger, Peter	Max Bögl Transport&Geräte GmbH & Co. KG	Geschäftsführer
	VDBUM-Verband der Baubranche, Umwelt- und Maschinentechnik e.V.	Präsident
Hennrich, Michael	Strabag BMTI GmbH & Co. KG	Direktion Zentrale Invest
	VDBUM-Verband der Baubranche, Umwelt- und Maschinentechnik e.V.	Vorstand
Hermanns, Jörg	Komatsu Germany GmbH	Deputy General Manager & Group Manager / Development Group / R&D Division Construction / European Technical Center 2
Kühnle, André	BFW Bau Sachsen e.V., ÜAZ Glauchau	Leiter Bildung BFW
Meitinger, Bernhard	Liebherr Hydraulikbagger GmbH	Entwicklungsingenieur
Niedermayer, Markus	Atlas Weyhausen GmbH	Geschäftsführer
Schall, Simon	Leonhard Weiss GmbH & Co. KG	Leiter Sondertechnik
Seifried, Werner	Liebherr-Hydraulikbagger GmbH	Geschäftsführer Technik
Siewert, Dirk	Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V.	Leiter Tiefbau und Baumaschinentechnik
Ullrich, Robin, Prof. Dr.	Fakultät für Geoinformation, Hochschule München	Ingenieurgeodäsie, Industrievermessung
Vollstädt, Raimo	Topcon Deutschland Positioning GmbH	Support Engineer OEM[5] Business

1.1 BEGRIFFSDEFINITIONEN

Nachfolgend werden einige wesentliche Begriffe erläutert oder definiert, die im Gutachten mehrfach verwendet werden und möglicherweise nicht für jeden Leser selbsterklärend sind.

Aktor

Ein Aktor ist ein Bauteil, welches über ein Steuersignal die Veränderung einer physikalischen Größe (meist eine mechanische Bewegung) bewirkt. Im Bereich der Baumaschinen ist z.B. der Hydraulikzylinder ein weit verbreiteter Aktor, ebenso zählt jeder Antriebsmotor zu den Aktoren.

Automatisierung und Autonomie

Ziel der Automatisierung ist es, Maschinen in die Lage zu versetzen, Arbeitsprozesse ganz oder teilweise ohne Mitwirkung des Menschen ausführen zu können. Im Gegensatz zur Mechanisierung, bei der der Mensch zwar von körperlicher Arbeit entlastet wird, aber den Prozessablauf in allen Schritten selbst steuert, wird bei der Automatisierung der Prozessablauf durch die Maschine gesteuert. Ein

[5] OEM = Original Equipment Manufacturer. Im Maschinenbau bezeichnet dies üblicherweise ein Unternehmen, das selbstgefertigte oder fremdbezogene Komponenten zu kompletten Maschinen kombiniert und diese am Markt anbietet. Hier: Hersteller von Baumaschinen.

menschlicher Bediener muss dabei alle Randbedingungen herstellen, die für die automatische Ausführung der Funktion erforderlich sind. Neben der Überwachung der automatisierten Abläufe übernimmt der Mensch dabei die Ausführung der nicht automatisierten Prozessschritte.

Wird ein Arbeitsprozess vollständig automatisiert, so dass der Mensch weder eingreifen noch den Prozess überwachen muss, spricht man auch von einem autonomen Prozess. Die Abgrenzung zwischen einem vollautomatisierten und einem autonomen Prozess ist nicht klar definiert, teilweise werden die Begriffe (Voll-)Automatisierung und Autonomie synonym genutzt. Der Verfasser des vorliegenden Gutachtens schlägt folgende Abgrenzung vor:

- Automatisierung: Zuvor programmierte Prozesse werden von der Maschine selbständig ohne menschliches Einwirken durchgeführt. Entscheidungen werden im Rahmen vordefinierter Fallunterscheidungen und Lösungsoptionen durch die Maschine selbständig getroffen. Beim Eintreten ungeplanter, nicht durch die Programmierung abgedeckter Situationen oder im Fehlerfall sind Handlungen durch den Menschen erforderlich.
- Autonomie: Zuvor programmierte Prozesse werden von der Maschine selbständig ohne menschliches Einwirken durchgeführt. Die Maschine reagiert auf Veränderungen ihres Umfeldes auf der Grundlage programmierter, ggf. auch lernfähiger Entscheidungsfindungsstrategien und passt den Arbeitsprozess an die veränderten Gegebenheiten an. Beim Eintreten ungeplanter, nicht durch die Programmierung abgedeckter Situationen oder im Fehlerfall sind auch hier Handlungen durch den Menschen erforderlich, das Spektrum der von der autonomen Maschine zu beherrschenden Situationen ist aber breiter als bei der automatisierten Maschine.

Vgl. hierzu auch Kap. 1.2 „Ebenen der Automatisierung“.

BIM

BIM ist eine für das Bauwesen entwickelte Methode zur vollständigen Digitalisierung der Planung, der Bauausführung und der Nutzung von Bauwerken. Ausgehend von einem 3D-Modell des geplanten Bauwerks, welches die geometrischen Informationen enthält, werden den datenbankbasierten Bauwerksmodellen weitere Informationen zu den physikalischen und funktionalen Eigenschaften hinzugefügt. Dies sind zunächst Informationen zum zeitlichen Ablauf (4. Dimension) und zu den Kosten (5. Dimension). In weiteren Schritten können Informationen zum Betrieb des Bauwerks (6. Dimension) sowie zu dessen Rückbau (7. Dimension) ergänzt werden. Dementsprechend werden vereinzelt auch die Begriffe „5D-BIM“, „6-BIM“ und „7D-BIM“ verwendet. Bei voller Ausprägung kann somit ein digitales Abbild eines Bauwerkes erzeugt werden, welches von der Planung über Bau und Betrieb bis zum Ende des Lebenszyklus reicht und letztlich die Weiternutzung der verwendeten Materialien unterstützt.

Digitaler Zwilling

Wie in [224] zu erkennen, ist der Begriff des Digitalen Zwillings im stetigen Wandel. Aktuell kann demnach der Digitale Zwilling verstanden werden als „ein sich entwickelndes digitales Profil des historischen und aktuellen Verhaltens eines physischen Objekts oder Prozesses, das dabei hilft, die betriebswirtschaftliche Leistung zu optimieren. Der digitale Zwilling basiert auf umfangreichen, kumulativen Echtzeit-Datenmessungen, die dimensionsübergreifend in der realen Welt vorgenommen werden.“ [252].

Die Verfasser des vorliegenden Gutachtens definieren den Begriff wie folgt: Ein digitaler Zwilling ist das modellhafte Abbild eines realen Systems. Der digitale Zwilling wird meist durch real gemessene Daten gespeist und generiert Ergebnisse, welche für unterschiedliche Zwecke verwendet werden können. Beispielsweise können dadurch Vorhersagen getroffen, Anomalien festgestellt oder Einstellungen optimiert werden. Die Modelle eines digitalen Zwillings sind zudem eminente Werkzeuge in der virtuellen Produktentwicklung, Planung und Inbetriebnahme.

Digitalisierung

Digitalisierung bezeichnet im Folgenden nicht die Umwandlung von analogen Werten in digitale, sondern beschreibt den gesellschaftlichen wie technologischen Wandel, welcher durch einen allumfassenden Einsatz von Rechentechnik, Automatisierung und Vernetzung geprägt ist.

HMI

Human-Machine-Interface (HMI) bezeichnet die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine. Das HMI umfasst alle technischen Einrichtungen, die dem Bediener zur Verfügung stehen um die Maschine zu bedienen und zu überwachen.

Fernsteuerung / Fernhantierung

Bei der klassischen (manuellen) Maschinenbedienung befindet sich der Bediener (Fahrer, Geräteführer) direkt auf bzw. in der Maschine und übernimmt deren vollständige Bedienung. Bei der „Fernsteuerung auf Sicht“ befindet sich der Bediener außerhalb der Maschine und steuert diese über eine Fernbedienung mit ständigem Sichtkontakt zur Maschine und ihren wesentlichen Elementen. Bei der „Teleoperation“ ist der Bediener weit entfernt vom eigentlichen Maschinenstandort und bekommt indirektes Feedback auf unterschiedliche Weise (akustisch, visuell, vestibulär) zur Unterstützung bei der weiterhin manuellen Prozesssteuerung. Bei der „Assistierten Teleoperation“ dagegen ist die Maschine in der Lage, Einzelaufgaben automatisiert durchzuführen. Wenn nötig, übernimmt oder greift der Fahrer vom Fernhantierungsarbeitsplatz ein.

Industrie 4.0

Industrie 4.0 ist ein Projekt der deutschen Bundesregierung im Zuge der Hightech-Strategie [32]. Der Name existiert in Anlehnung an die vierte industrielle Revolution, welche nach Mechanisierung, Elektrifizierung und Automatisierung nun die allumfassende Vernetzung der Industrie zu neuen Produktivitätssteigerungen befähigt. Grundlage von Industrie 4.0 sind cyber-physikalische Systeme, also die Verbindung von physischen Produkten und Anlagen mit Softwarekomponenten und deren Vernetzung. Dabei sollen die gesamte Wertschöpfungskette sowie der gesamte Lebenszyklus eines Produkts in den Vernetzungsprozess einbezogen werden.

Internet of Things (IoT) – Internet der Dinge

IoT beschreibt die Integration von beliebigen Objekten in ein digitales Kommunikationsnetzwerk. Neben etablierten Geräten wie Computern oder Smartphones, werden somit auch Alltagsgegenstände Teil des Internets. Das Internet der Dinge wird durch kleine, energieeffiziente und drahtlos kommunizierende Chips ermöglicht. Die Vernetzung ist somit allgegenwärtig, für den Menschen unsichtbar und die Teilnehmer handeln in gewissem Maße autonom.

Künstliche Intelligenz (KI)

„Künstliche Intelligenz erweitert technische Systeme um die Fähigkeit, Aufgaben selbständig und effizient zu bearbeiten. Auf Basis 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“ [27].

Maschinelles Lernen

„Verfahren, durch die Computersysteme befähigt werden, selbständig Wissen aufzunehmen und zu erweitern, um ein gegebenes Problem besser lösen zu können als vorher“ [27].

Roboter

Roboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten, deren Bewegung frei programmierbar oder sensorgeführt ist.

Sensor

Ein Sensor ist ein Bauteil, welches bestimmte physikalische oder chemische Eigenschaften qualitativ oder quantitativ erfassen kann. Die gemessene Größe wird in eine andere, auswertbare physikalische Größe umgewandelt.

Sicherheit und Zuverlässigkeit

Sicherheit (safety) bezeichnet die Fähigkeit eines technischen Systems, Gefährdung und Schaden in bestimmten Betriebszuständen zu vermeiden. Neben dem Begriff „safety“ existiert auch der Begriff „security“, was Kriminalprävention, also den Schutz eines technischen Systems vor unzulässigen menschlichen Eingriffen bedeutet. Zuverlässigkeit beschreibt, wie verlässlich eine Funktion in einem Zeitraum einsatzfähig ist und beschreibt damit ein völlig anderes Merkmal als die vorgenannten Sicherheitsbegriffe.

Telematik

Telematik beschreibt die Verknüpfung von Systemen mittels eines (meist drahtlosen) Kommunikationssystems. Im Bereich der Baumaschinen bezeichnet Telematik derzeit die Ausrüstung einer Baumaschine mit einem Funkmodul zur Übertragung von Daten in ein Netzwerk.

1.2 EBENEN DER AUTOMATISIERUNG

Vorreiter bei der Umsetzung von Automatisierungslösungen ist die Prozessautomatisierung in der Serienfertigung. Seit einigen Jahren durchdringt die Tendenz zur Automatisierung jedoch sämtliche Industriezweige. Insbesondere die Vision des vollautomatisierten Fahrens mit Pkw und Lkw im öffentlichen Verkehrsnetz liefert starke Impulse bei der technologischen Weiterentwicklung. In diesem Zusammenhang hat die Society of Automotive Engineers (SAE) 2014 die Ebenen der Automatisierung in der Automobiltechnik definiert [279]. Dabei werden 5 Ebenen der automatisierten Fahrzeuge unterschieden, wobei der Anteil an Bedien- und Überwachungsaufgaben durch den Fahrer schrittweise reduziert wird (Tabelle 2, Spalte „Automobil“).

Die Automotive Branche hat damit eine globale Einordnung für die Automatisierungsgrade von Straßenfahrzeugen erstellt. Für Baumaschinen ist jedoch eine erheblich größere Vielfalt der Arbeitsaufgaben zu beachten, etwas vereinfachend dargestellt:

- Automotive: Fahren von A nach B.
- Baumaschinen: Erstellen einer Gebäudestruktur; Ausheben einer Grube in weitgehend unbekanntem Boden; Verdichten einer Tragschicht bestehend aus verschiedenen Schüttgütern; Erzeugen einer Tiefgründung durch Bohren und Verfüllen; usw.

Selbstverständlich stellt auch das autonome Fahren mit Pkw und Lkw im öffentlichen Verkehr erhebliche Anforderungen an die technologische Entwicklung (beispielsweise erheblich höhere Fahrgeschwindigkeiten als bei den Baumaschinen), so dass diese Darstellung keineswegs wertend zu verstehen sein soll. Es sollte aber deutlich werden, dass die Aufgabenstellungen in den Bereichen Automotive und Baumaschinen sich massiv voneinander unterscheiden und somit auch die Lösungen des autonomen Fahrens nicht – oder nur in Ansätzen – auf das autonome Fahren von Baumaschinen und vor allem auf automatisierte Arbeitsprozesse der Baumaschinen übertragen lassen.

Daher können auch zur Klassifizierung der Ebenen der Automatisierung nicht einfach die Einstufungen aus dem Bereich Automotive übernommen werden. Sinnvoller erscheint die vom Verfasser gemeinsam mit anderen Autoren in [323] vorgeschlagene Einteilung (Tabelle 2, Spalte „Mobile Arbeitsmaschine“).

Tabelle 2: Stufen der Automatisierung in den Anwendungen Automotive und Baumaschinen [323]

Level	Bezeichnung	Automobil (SAE J3016)	Mobile Arbeitsmaschine
0	Keine Automation	Die Vollzeitleistung des menschlichen Fahrers in allen Aspekten der dynamischen Fahraufgabe.	Der Bediener steuert die Maschine eigenständig ohne weitere, aktiv unterstützende Systeme.
1	Assistenzsystem	Die teilzeit- oder fahrmodusabhängige Ausführung von entweder Lenken oder Beschleunigen / Verzögern durch ein Fahrerassistenzsystem mit der Erwartung, dass der menschliche Fahrer alle anderen Aspekte der dynamischen Fahraufgabe ausführt.	Der Bediener steuert die Maschine eigenständig und wird durch Anzeigen unterstützt. Die dafür benötigten Daten werden aus der Überwachung der Maschine durch Sensorik sowie Auswertealgorithmen gewonnen. Die Algorithmen greifen nicht aktiv in die Maschinensteuerung ein.
			Beispiele: 1D, 2D und 3D-Positionssysteme, Gewichtsmessung der Zuladung
2	Teilautomatisierung	Die teilzeit- oder fahrmodusabhängige Ausführung von sowohl Lenkung als auch Beschleunigung / Verzögerung durch ein oder mehrere Fahrerassistenzsysteme mit der Erwartung, dass der menschliche Fahrer alle anderen Aspekte der dynamischen Fahraufgabe ausführt.	Eine oder mehrere Achsen werden für einzelne Teilarbeitsaufgaben gleichzeitig, automatisiert bewegt. Der Bediener muss aktiv den Arbeitsprozess mitgestalten.
			Beispiele: automatisiertes Planumziehen, Teach-in-Bahnkurven, sicherer Stopp in Kombination mit Nahfeldüberwachung (z. B. Begrenzung des Arbeitsraums)
3	Bedingte Automatisierung	Die teilzeit- oder fahrmodusabhängige Ausführung aller Aspekte der dynamischen Fahraufgabe durch ein automatisiertes Fahrsystem mit der Erwartung, dass der menschliche Fahrer angemessen auf eine Aufforderung zum Eingreifen reagiert.	Das Automatisierungssystem führt Arbeitsaufgaben selbständig aus, erkennt Störfälle, trifft aber keine eigenen Entscheidungen. Der Bediener muss aktiv eingreifen. Eine Fernsteuerung ist denkbar.
			Beispiel: Beim automatisierten Graben wird ein Kabel/Rohr gefunden und die Maschine stoppt sicher.
4	Hochautomatisierung	Die teilzeit-, fahrmodusabhängige oder geografisch eingeschränkte Leistung eines automatisierten Fahrsystems in Bezug auf alle Aspekte der dynamischen Fahraufgabe, selbst wenn ein menschlicher Fahrer nicht angemessen auf eine Aufforderung zum Eingreifen reagiert.	Das Automatisierungssystem führt Arbeitsaufgaben selbständig aus, erkennt Störfälle, trifft eigene Entscheidungen. Der Bediener kann aktiv über bspw. Fernsteuerung eingreifen.
			Beispiele: Die Maschine arbeitet selbständig einen Arbeitsplan ab. Störfälle werden autonom gelöst. Bediener überwacht mehrere Maschinen und kann über Fernzugriff die Maschinen steuern.

5	Vollautomatisierung	Die bedingungslose Vollzeitleistung eines automatisierten Fahrsystems für alle Aspekte der dynamischen Fahraufgabe unter mindestens allen Fahrbahn- und Umgebungsbedingungen, die von einem menschlichen Fahrer bewältigt werden können, einschließlich der Fähigkeit, das Kraftfahrzeug automatisch in einen minimalen Risikozustand bei einem kritischen Fahrzeug- oder Systemausfall oder einem anderen Notfallereignis zu bringen.	Das Automatisierungssystem erfüllt unter allen Umgebungsbedingungen die gleiche dynamische Aufgabe, welche auch von einem menschlichen Bediener beherrscht wird, einschließlich der Fähigkeit, die Maschine automatisch in einen minimalen Risikozustand bei einem kritischen Geräte- oder Systemausfall oder einem anderen Notfallereignis zu bringen.

Den Übergang der Verantwortung vom Menschen auf die Maschine zeigt auch die Darstellung in Abbildung 2. Dazu als ergänzende Erläuterung:

- „Keine Unterstützung“ ist selbsterklärend, hier ist ganz allein der Mensch verantwortlich.
- „Assistenz“ umfasst Systeme, die aus sensorisch erfassten und/oder vom Bediener eingegebenen oder von anderen Systemen übertragenen Daten verwertbare Informationen erzeugen und diese dem Menschen zur Verfügung stellen. Gemäß Definition im Rahmen des vorliegenden Gutachtens greifen Assistenzsysteme nicht in die Steuerung der Maschine ein (es gibt hierzu auch andere Sichtweisen, die auch bei einem Eingriff in die Steuerung noch von einem Assistenzsystem sprechen).
- Am anderen Ende der Skala steht die „Autonomie“ einer Maschine, hier wird für den normalen Arbeitsprozess kein Bediener benötigt. Der Gesamtprozess, an dem auch mehrere Maschinen beteiligt sein können, wird durch ein übergeordnetes System oder aus einem Leitstand heraus koordiniert und überwacht.
- Zwischen der „Assistenz“ und der „Voll-Autonomie“ gibt es ein sehr weites Feld verschiedenster Lösungen: Von der Fernhantierung einer Maschine (Bedienerführung, wobei sich der Bediener nicht auf der Maschine befindet) über die Automatisierung einzelner Funktionen (automatischer Ablauf vordefinierter Prozesse), bis hin zur Teil-Autonomie (autonomer Ablauf von Teilfunktionen einer Maschine).

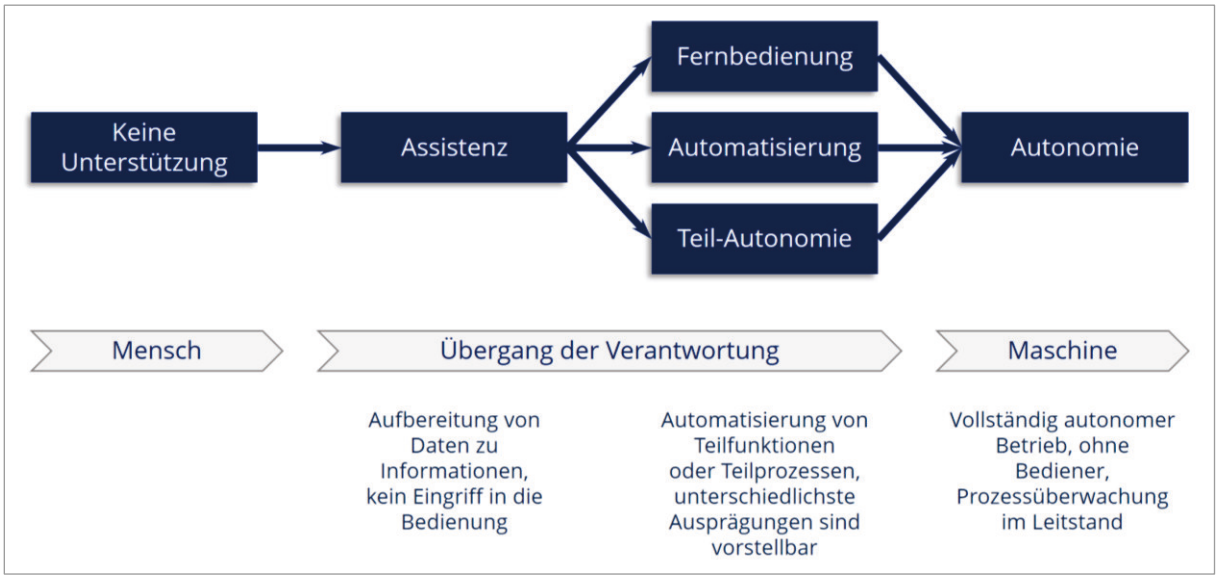


Abbildung 2: Übergang der Verantwortung vom Menschen auf die Maschine [354]

Im Gegensatz zum Bereich Automotive gibt es bei den Baumaschinen nicht die aufeinander aufbauenden Stufen der zunehmenden Automatisierung, insbesondere im weiten Feld der vom Menschen auf die Maschine übergehenden Verantwortung sind zahlreiche Lösungskombinationen möglich. So können beispielsweise bei einer Maschine einzelne Funktionen autonom ablaufen, während für andere Funktionen ein Assistenzsystem zur Verfügung steht oder eine Fernbedienung genutzt wird.

2 RAHMENBEDINGUNGEN

Nicht jede Technologie, die im Grunde bereits verfügbar ist, kommt im realen Baubetrieb auch zum Einsatz. Denn nicht immer ist das, was technologisch möglich ist, unter Berücksichtigung aller Perspektiven auch sinnvoll. Daraus ergibt sich nach Erfahrung der Gutachter häufig eine massive Diskrepanz der Sichtweisen hinsichtlich der Frage, welche Technologie bereits zum Stand der Technik zu zählen ist und welche nicht. Einige neuartige Technologien haben bisher keinen Eingang in die (Bau-)Praxis gefunden (Beispiele vgl. 2.10), obwohl man in der öffentlichen Darstellung den Eindruck gewinnen muss, dass es sich um verfügbare Technologien und „gelöste Probleme“ handelt – was teilweise eben nicht der Fall ist, wie man bei genauerer Betrachtung feststellt.

Daher sollen an dieser Stelle – noch vor einer Darstellung zum Stand der Technik – zunächst die Rahmenbedingungen erläutert werden, die für den Einsatz von automatisierten Baumaschinen relevant sind. Die Rahmenbedingungen haben maßgeblichen Einfluss darauf, ob eine Technologie im realen Baubetrieb „ankommt“ oder nicht und bestimmen daher den Stand der Technik entscheidend mit.

2.1 MARKT- UND WETTBEWERBSSITUATION

Die Baumaschinen-Industrie zählt mit einem Umsatz von 14,1 Mrd. EUR im Jahr 2018 zu den stärksten Sektoren des deutschen Maschinenbaus [43], der Umsatzanteil am gesamten Maschinenbau liegt bei rund 5%. Die aktuelle Marktsituation ist durch hohe Auslastung geprägt. Die Maschinenhersteller und Zulieferer haben in den letzten Jahren massiv in Produktionskapazitäten investiert, so dass die Lieferzeiten nach Aussage verschiedener Hersteller (im Rahmen der Experten-Interviews) trotz hoher Auslastung noch in akzeptablem Rahmen liegen. Die sich abzeichnende Abschwächung des Marktes im gesamten Maschinenbau macht sich bei den Baumaschinenherstellern bisher noch nicht so stark bemerkbar, weil die hohe Auslastung und die weiterhin guten Perspektiven der gesamten Bauindustrie die Nachfrage nach Baumaschinen weiter stabilisiert.

Die deutschen Hersteller von Baumaschinen beanspruchen auch international mit rund 11% [325] einen relevanten Marktanteil und müssen sich zukünftig durch technische Innovationen weiter profilieren. Daher sind die Hersteller an der Weiterentwicklung von Technologien und Maschinen stark interessiert und somit ein wesentlicher Akteur innerhalb der Forschungs- und Entwicklungslandschaft[6], gemeinsam mit Zulieferern, Engineering-Dienstleistern und Forschungseinrichtungen.

Die Entscheidungen der Baumaschinenhersteller sind, nach unserer Einschätzung und Erfahrung und gemessen an anderen Industriezweigen, meist an längerfristigen Ergebnissen ausgerichtet. Der kurzfristige Blick auf Quartalsergebnisse ist nach eigener Einschätzung in der Mehrzahl der uns bekannten Unternehmen nicht der ausschlaggebende Faktor bei Investitions- und Entwicklungsentscheidungen.

Ein weiteres prägendes Merkmal der Baumaschinenhersteller ist die globale Aufstellung der meisten Unternehmen, dies betrifft sowohl den Absatzmarkt als auch den Beschaffungsmarkt und die Produktionsstandorte. Man kann daher kaum zwischen „Deutschen Herstellern“ und „Ausländischen Herstellern“ unterscheiden. Unter den 10 größten Herstellern von Baumaschinen findet sich kein Unternehmen mit Stammsitz in Deutschland [287]. Die Fa. LIEBHERR, die zwar in Deutschland gegründet wurde,

[6] Diese Aussage lässt sich nicht allein an F&E-Aufwendungen messen, sondern auch durch die Beteiligung von Unternehmen an Projekten (ohne Einbringung von Finanzmitteln), Bereitschaft zur Stellung von Versuchsträgern usw.

mit zahlreichen deutschen Standorten der größte inländische Hersteller von Baumaschinen ist und oft als deutsches Unternehmen gesehen wird, hat seinen Konzernsitz in der Schweiz. Weitere bedeutende deutsche Hersteller, wenn auch nicht unter den internationalen Top 10, sind beispielweise BAUER, HERRENKNECHT, SENNEBOGEN und WACKER NEUSON. Auch zahlreiche internationale Maschinenhersteller haben deutsche Entwicklungs- und Produktionsstandorte, wobei diese selten durch Gründung von Standorten, sondern meist durch Übernahme bestehender deutscher Unternehmen entstanden sind. Hier sind beispielhaft zu nennen: VOLVO CE (Übernahme von ZETTELMEYER und ABG), KOMATSU (HANOMAG), JOHN DEERE (WIRTGEN Gruppe mit den Unternehmen WIRTGEN, VÖGELE, HAMM, KLEEMANN und BENNINGHOVEN), FAYAT (BOMAG, DYNAPAC), SANY (PUTZMEISTER) und XCMG (SCHWING, STETTER). Daher spielt die deutsche Baumaschinen-Industrie mit rund 40.000 Beschäftigten national und international eine bedeutende Rolle.

Die globale Aufstellung der Unternehmen und die – gemessen am Automotive Bereich – geringen Produktionsstückzahlen haben zur Folge, dass bei neuen Entwicklungen immer der gesamte internationale Markt mit seinen teilweise unterschiedlichen Erwartungen, Anforderungen und Regelwerken in den Blick genommen werden muss. Es ist im Bereich Baumaschinen in der Regel nicht möglich (bzw. nicht wirtschaftlich), eine Lösung nur für einen, z.B. den deutschen Markt zu entwickeln.

Eine weitere Besonderheit mit Einfluss auf die Entwicklung automatisierter Baumaschinen ist der Lebenszyklus der Baumaschinen. Während hochbeanspruchte Baumaschinen in der Rohstoffgewinnung (Steinbruch) meist sehr hohe Nutzungszeiten haben („rund um die Uhr im Einsatz“) und nach einigen Jahren durch neuere Maschinen ersetzt werden, weisen andere Maschinen wie Radlader und Bagger auf innerstädtischen Baustellen nur sehr geringe Nutzungszeiten (wenige Betriebsstunden pro Tag) auf. Daher sind diese Maschinen oft über sehr lange Zeiträume, teilweise mehrere Jahrzehnte, bei einem Bauunternehmen im Einsatz. Man kann also keineswegs davon ausgehen, dass auf Baustellen durchgängig moderne und ähnlich ausgestattete Maschinen betrieben werden, vielmehr sind nahezu alle Baustellen durch außerordentlich heterogene Maschinenparks gekennzeichnet. Neben Alter und Ausstattung der Maschinen betrifft dies auch die Fabrikate: die weit überwiegende Mehrzahl der Bauunternehmen betreibt Maschinen unterschiedlicher Hersteller. Aus diesen Punkten lässt sich bereits ableiten, dass Automatisierungslösungen, die die Zusammenarbeit mehrere Maschinen auf einer Baustelle erfordern, nur schwer umzusetzen sind.

Bei der Entwicklung von Maschinen müssen die Hersteller auch beachten, dass es einen relevanten Zweitmarkt für Baumaschinen gibt: Manche (in der Regel große) Bauunternehmen verkaufen ihre Baumaschinen nach einigen Jahren Betriebszeit in andere Länder oder an weniger anspruchsvolle Anwender. Dabei werden die Maschinen von weniger qualifizierten Bedienern betrieben, so dass hochtechnisierte Maschinen auf dem Zweitmarkt schwer verkäuflich sind. Dementsprechend fällt die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung beim Erstkäufer schlechter aus, und genau dies kann durchaus für den Maschinenhersteller ein Hemmnis für die Entwicklung anspruchsvoller Maschinentechnik darstellen.

Abschließend ein Hinweis aus einem der Experten-Interviews: Der deutschen Bauindustrie geht es derzeit so gut, dass diese überhaupt keine Notwendigkeit sieht, in die Weiterentwicklung der Bauprozesse zu investieren und automatisierte Baumaschinen einzufordern. Die Erfahrung im Rahmen aktueller Forschungsprojekte spricht allerdings gegen diese Argumentation: das Interesse an Forschungsergebnissen und die Bereitschaft zur Beteiligung an Forschungsprojekten hat bei den Bauunternehmen in den letzten Jahren deutlich zugenommen – zumindest bei den größeren Bauunternehmen. Auch hier spiegelt sich in den widersprüchlichen Einschätzungen vermutlich die Heterogenität der gesamten Branche wieder. Selten gibt es auf eine Frage nur eine, von allen Beteiligten getragene Antwort.

2.2 REGULIERUNG, NORMUNG UND STANDARDISIERUNG

Die europäischen Märkte unterliegen bekanntlich einer starken Regulierung. Neben den für alle Maschinen gültigen gesetzlichen Vorgaben für Hersteller (Produkthaftungsgesetz, EU-Maschinenrichtlinie) und Betreiber (Arbeitsschutzgesetz, EG-Rahmenrichtlinie Gesundheitsschutz) kommen bei Baumaschinen spezifische Regelwerke beispielsweise aus Normungsgremien, Berufsgenossenschaften

(DGUV) und Landesbaubehörden hinzu. Darüber hinaus gibt es Vorgaben aus der Emissionsgesetzgebung und, soweit es sich um Fahrzeuge handelt, die sich zeitweise im Straßenverkehr bewegen, aus der Straßenverkehrsordnung.

Die in 2.1 schon angesprochene Problematik, dass ein Hersteller seine Maschinen in der Regel für mehrere internationale Märkte entwickeln muss, kommt auch hier zum Tragen: die teilweise unterschiedlichen gesetzlichen und normativen Anforderungen in einzelnen Ländern und Regionen behindern eine effiziente Entwicklung neuer Lösungen. Insofern unterstützen die Maschinenhersteller meist die internationale Standardisierung und Vereinheitlichung von Regelwerken.

Auf nationaler Ebene sind für die Hersteller nach unserem Eindruck insbesondere die teilweise unterschiedlichen Landesbauvorschriften ein besonderes Ärgernis. Diese schreiben zwar in der Regel keine technische Ausführung der Maschinen vor, aber indirekt ergeben sich aus den Vorgaben hinsichtlich der Bauausführung (z.B. Eigenschaften einer zu bauenden Straße wie Ebenheit oder Verdichtung) dennoch spezifische Anforderungen an die Maschinentechnik. Wenn neue Vorgaben zunächst in einzelnen Bundesländern eingeführt, dort evaluiert, ggf. angepasst und dann auf alle Länder übertragen werden, ist das sicher ein richtiger Weg (Beispiel: das Ende 2018 eingeführte „Handbuch Qualitäts-Straßenbau Baden-Württemberg QSBW 4.0“ [209][7]). Wenn allerdings ähnliche, jedoch nicht identische Vorgaben in den einzelnen Bundesländern eingeführt werden, stellt das für Bauunternehmen und letztlich auch Maschinenhersteller erhebliche Mehraufwendungen und damit ein Hemmnis bei der Realisierung und Einführung neuer Technologien dar.

Ein Überblick über alle relevanten Normen würde an dieser Stelle den Rahmen sprengen, daher sei hier lediglich auf das CEN – European Committee for Standardization verwiesen, innerhalb dessen das Gremium CEN/TC 151 (Construction equipment and building material machines – Safety) für die europäische Normung im Bereich der Baumaschinen verantwortlich ist [97]. Demnach sind aktuell 91 Richtlinien veröffentlicht, 63 Richtlinien sind in Be- oder Überarbeitung.

Weitgehend ungeregelt sind bisher die steuerungstechnischen Schnittstellen bei Baumaschinen, was ein erhebliches Problem für die maschinenübergreifende Automatisierung darstellt. Im Bereich der Landmaschinen existiert bereits seit Jahren der sogenannte „ISOBUS“, der sowohl physikalische Eigenschaften und Statusdefinitionen als auch Datenformate und Netzwerk-Schnittstellen regelt und der sich weitgehend bei Herstellern und Anwendern durchgesetzt hat. Eine erste Übertragung dieses Gedankens auf den Bereich der Baumaschinen bietet die ISO 15143-3 „Erdbaumaschinen und mobile Straßenbaumaschinen – Baustellen-Datenaustausch-Telematikdaten“, die seit 2016 verfügbar ist [154]. Getrieben wurde die Entwicklung dieses Standards durch den VDBUM (Verband der Baubranche, Umwelt- und Maschinentechnik e.V.) in Zusammenarbeit mit der TU München. Dieser Standard muss aber, um die Anforderungen abzudecken, weiterentwickelt werden. Die ISO 15143-3 umfasst einige grundlegende Informationen wie Position, Verbrauch, Motorstatus etc. Weiterführende Anwendungen wie Predictive Maintenance, Produktivitäts-Monitoring oder Automatisierungsfunktionen sind jedoch mit dem begrenzten Datenumfang nicht realisierbar.

Parallel hierzu gibt es seit April 2019 unter dem Dach des Branchenverbandes VDMA (Fachverband Baumaschinen und Baustoffanlagen) das Gremium „MiC 4.0 – Machines in Construction 4.0“. Dieses Gremium hat sich ebenfalls zum Ziel gesetzt, hinsichtlich Kommunikation und Bedienung von Baumaschinen herstellerübergreifende Standards unter Einbeziehung der vorgenannten ISO 15143-3 zu definieren [294]. Es wurden Arbeitskreise gegründet zu den Themen Maschinendaten (als Erweiterung zur ISO 15143-3), Systemarchitektur (Datenformate), HMI, Anbaugerätekommunikation und Datenrechte. Ergebnisse liegen hierzu bisher nicht vor.

[7] Hinsichtlich der Maschinentechnik ergeben sich daraus Anforderungen für Straßenfertiger (Messung und Dokumentation der Asphalttemperatur) und Verdichtungswalzen (Messung und Dokumentation der Überrollungen)

2.3 PRODUKTSICHERHEIT UND ARBEITSSCHUTZ

Oberstes Gebot für die Anwendung neuer Technologien ist die Sicherheit für alle Personen, die mit der Technologie in Berührung kommen: Maschinenbediener, weitere am Arbeitsprozess beteiligte Arbeitnehmer, bei Baueinsätzen ohne sichere Angrenzung zum öffentlichen Raum auch Passanten bis hin zu spielenden Kindern. Das Bauwesen ist generell ein Wirtschaftszweig mit relativ hohen Unfallzahlen. Trotz deutlichem Rückgang der Unfallzahlen in den letzten Jahren (von 1999 bis 2009 Reduzierung um mehr als 50 % [8]) ist die Unfallgefahr für Beschäftigte in der Bauwirtschaft immer noch erheblich höher als für Beschäftigte in der gewerblichen Wirtschaft: während nach Angaben der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung [76] im Jahr 2018 von 1.000 Beschäftigten in der gewerblichen Wirtschaft rund 23 pro Jahr einen meldepflichtigen Unfall erlitten, werden in der Bauwirtschaft rund 53 Unfälle pro Jahr gemeldet. Ferner lag die Anzahl tödlicher Arbeitsunfälle im Jahr 2018 nach Angabe der BG Bau bei 88 [29].

Daher ist im Umfeld des Bauwesens eine besonders ausgeprägte Sensibilität für die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen (vgl. 2.2) bei der Einführung neuer Technologien festzustellen. Dies äußert sich einerseits in einem umfangreichen und neue Technologien stark begrenzenden Regelwerk, andererseits auch in großer Zurückhaltung aller Beteiligten beim Einsatz neuer Technologien, soweit diese neue oder veränderte Risiken mit sich bringen. Diese Situation soll hier nicht kritisiert, sondern lediglich festgestellt werden. Es ist gut und richtig, dass Sicherheitsbetrachtungen gerade im Bauwesen – und damit auch bei den Baumaschinen – einen sehr hohen Stellenwert einnehmen. Es ist aber wichtig auf diesen Einfluss hinzuweisen, denn dies führt oft dazu, dass neue Technologien erst mit erheblicher zeitlicher Verzögerung in diesem Anwendungsbereich Einzug halten.

2.4 DATENSICHERHEIT

Neben der Unfallvermeidung („Safety“) bekommt das Thema Kriminalprävention („Security“) wachsende Bedeutung, also der Schutz der hochwertigen Maschinen und Bauelemente vor Beschädigung und Diebstahl sowie der Schutz von Daten vor unberechtigtem Zugriff oder Manipulation. Auch diese Aspekte können der Einführung neuer Technologien entgegenstehen, andererseits können neue Technologien auch zu einer verbesserten Situation hinsichtlich Safety (Gefahrenbereichsüberwachung) und Security (Maschinenstandortüberwachung durch Telematiksystem) beitragen. Während sich bisherige Security-Probleme im Bereich der Baumaschinen hauptsächlich auf Vandalismus sowie den Diebstahl von Maschinen, Werkzeugen und Betriebsstoffen beschränkte, treten zukünftig durch digitale Technologien und vor allem durch eine tiefgreifende Vernetzung über Funktechnologien neue potenzielle Gefahrenpotenziale zu Tage. Große Bauunternehmen schützen ihre Baustellen derzeit mit Zäunen, Kameraüberwachung und Wachschutz. Cybersicherheit wird jedoch zunehmend wichtiger. Eine mobile Belegschaft, hohe Personalfluktuation und temporäre Büros begünstigen den unautorisierten Zugriff auf relevante Daten. Der künftige Einsatz von BIM-Modellen wird den Datenaustausch über Netzwerke weiter intensivieren, wodurch sich auch Angriffe in Form von Malware, Phishing, Distributed Denial of Service-Attacks (DDoS) häufen werden. Es existieren grundlegende Technologien zur sicheren Datenübertragung, Authentifizierung und Identifikation, welche zukünftig auch auf der vernetzten Baustelle eingesetzt werden müssen [347] . Neben den Bedrohungen der IT-Infrastruktur ist bei autonomen Maschinen oder Drohnen auch die Störung der GNSS-Navigation (Spoofing) eine potenzielle Gefahr.

2.5 WIRTSCHAFTLICHKEIT

Ein weiteres entscheidendes Kriterium für den Einsatz einer neuen Technologie ist die Wirtschaftlichkeit dieser Technologie auf den verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette. Für Komponenten-, System- und Maschinenanbieter sind dabei Themen wie Beschaffungskosten, Engineering- und Montageaufwand, Servicekosten oder Einfluss auf die Preisgestaltung des Produktes relevant, während der Anwender sich primär auf die Anschaffungs- und die Betriebskosten einer Maschine (letztlich also auf die TCO Total Cost of Ownership) fokussiert. Wesentlich für die Betriebskosten sind u.a. technologische Faktoren wie Produktivität, Energiebedarf, Verschleiß, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit. Auch hier gilt

es daher abzuwägen, ob eine neue Technologie die Wirtschaftlichkeit einer Maschine oder eines Prozesses eher verbessert oder verschlechtert. Die Antwort darauf kann in den Wertschöpfungsstufen unterschiedlich ausfallen.

2.6 ARBEITSMARKT BAU, AUS- UND WEITERBILDUNG

Die Anzahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten im Bauhauptgewerbe lag im Jahr 2016 bei 891.000, davon wurden 102.000 (11,4%) aus dem Ausland nach Deutschland entsandt [297]. Die Bauwirtschaft ist aktuell und schon seit mehreren Jahren durch eine sehr hohe Auslastung gekennzeichnet. Das spürt nicht nur jede Privatperson bei der Beauftragung von Handwerksleistungen, sondern natürlich auch die gesamte Bauwirtschaft durch Engpässe an personellen Ressourcen. Dieser Engpass betrifft nach Aussage einiger Gesprächspartner der im Rahmen der Gutachten-Erstellung geführten Experten-Interviews nicht nur die höher qualifizierten Fachkräfte (was in der öffentlichen Diskussion hinlänglich thematisiert wird), sondern alle Bereiche der handwerklich geprägten Bauarbeiten einschließlich Hilfstätigkeiten. Gerade diese Problematik wird sich, eine auf hohem Niveau bleibende Baukonjunktur vorausgesetzt, weiter verschärfen. Denn für junge Menschen stellt die Bauwirtschaft häufig ein wenig attraktives Berufsbild dar: Arbeit im Freien bei jedem Wetter, körperlich anstrengende Tätigkeiten, gesundheitliche Belastungen, vielfach unattraktive und schlecht planbare Arbeitszeiten, wechselnde Einsatzorte, stark konjunkturabhängige Arbeitsplatzsicherheit, und nicht zuletzt ein allgemein negatives Image der Tätigkeit als „Bauarbeiter“ – all dies macht die Besetzung von Ausbildungsstellen durch ausreichend qualifizierte Menschen nicht einfach.

Daher kommt es verstärkt zur Weitergabe von Leistungen an ausländische Subunternehmer und zum Einsatz ausländischer Arbeitnehmer (sicher spielt hier auch der Wunsch nach Senkung der Kosten eine Rolle, aber eben auch die unzureichende Verfügbarkeit von Arbeitskräften). Dieser Bedarf stellt einerseits eine große Chance für die Integration zugewanderter Menschen dar, allerdings dürfen dabei die Hemmnisse (insbesondere eingeschränkte deutschen Sprachkenntnisse sowie begrenzte Qualifikation) nicht übersehen werden. Hier besteht teilweise erheblicher Handlungsbedarf hinsichtlich Kommunikationsfähigkeit, Umgang mit und Bedienung von anspruchsvoller und Gefährdungen verursachender Maschinentechnik, Anforderungen hinsichtlich der Prozessqualität und Dokumentation. Entsprechende Qualifizierungsmaßnahmen sind erforderlich, jedoch sind die Bauunternehmen oft nicht gewillt oder nicht in der Lage, dafür Geld auszugeben.

Ein kritischer Aspekt für den sicheren Betrieb von Baumaschinen ist auch die Tatsache, dass es in Deutschland bisher, im Gegensatz zu anderen EU-Ländern, keine Führerscheinpflicht für Geräteführer solche Maschinen im Baustelleneinsatz gibt. Nur bei Straßenfahrt von Maschinen mit einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit ab 20 km/h ist ein Führerschein erforderlich. Es existiert eine Ausbildung zum Baugeräteführer an einigen (wenigen) Ausbildungsstandorten, für die Ausbildung in Sachsen beispielsweise im Überbetrieblichen Ausbildungszentrum (ÜAZ) in Glauchau (www.bau-bildung.de/glauchau). Dort setzt man auf eine intensive Ausbildung in Theorie und Praxis unter Einsatz moderner Methoden des „Blended Learning“: in mehreren Stufen erfolgt die Ausbildung im Form von E-Learning, Training an Interaktiven Simulatoren, bis zum Training an realen Maschinen auf einem Versuchsgelände [49]. Eine entsprechend erworbene Qualifikation ist aber keine zwingende Voraussetzung für das Führen komplexer, schwer zu überschauender und zahlreiche Gefährdungen verursachender Baumaschinen. Aus Sicht der Gutachter besteht hier Handlungsbedarf, nicht nur aber auch aufgrund der zunehmenden Automatisierung und Komplexität der Prozesse und Maschinen.

2.7 F&E-RESSOURCEN

Die deutsche Baumaschinenindustrie beschäftigt rund 40.000 Mitarbeiter [325] und spürt zunehmend, ebenso wie andere Industriezweige, den Mangel an qualifizierten Fachkräften [295]. Dies gilt auch für

die Bereiche Forschung, Entwicklung und Konstruktion, in denen Ingenieure der Fachrichtungen Maschinenbau, Mechatronik, Elektrotechnik, Automatisierungstechnik und verwandter Richtungen sowie in steigendem Maße Softwareentwickler bzw. Programmierer benötigt werden.

Erschwert wurde der Engpass in den letzten rund 15 Jahren auch dadurch, dass die Baumaschinenhersteller den größten Teil ihrer Entwicklungskapazitäten dafür aufwenden mussten, ihre Maschinen an die sich in kurzen Abständen stufenweise verschärfenden Schadstoff-Emissionsvorschriften (EU-Richtlinie 1628/2016, vgl. 3.4) anzupassen. Jede neue Emissionsstufe führte dazu, dass ein neuer Dieselmotor eingesetzt werden musste, der seinerseits eine neue, in der Regel erweiterte, Peripherie erforderte (z.B. größerer Lüfter, zusätzliche Abgasnachbehandlung, Integration eines Harnstofftanks). Unter den beengten Platzverhältnissen in einer Baumaschine war das extrem aufwändig und erforderte immer wieder neue Konstruktionen, neue Prototypen und Versuche, angepasste Produktionsmittel bei Herstellern und Zulieferern sowie angepasste Lieferketten, bis hin zu neuen Abnahmen, Dokumentationen und Marketingunterlagen. Für die Neu- und Weiterentwicklung von Automatisierungs- und Robotik-Lösungen standen dementsprechend in den Unternehmen in den letzten Jahren wenig bis keine Ressourcen zur Verfügung. Dieser Umstand wurde von mehreren Maschinenherstellern im Rahmen der Experten-Interviews deutlich gemacht und deckt sich mit eigenen Erfahrungen des Verfassers.

Die Anforderungen an die Entwickler von Baumaschinen sowie deren Komponenten und Systemen verändern sich vor allem durch die fortschreitende Automatisierung und Digitalisierung so schnell, dass die meisten Entwickler in den Unternehmen für die heutigen Anforderungen nicht ausgebildet sind. Ein Großteil der heutigen Entwickler hat vor 10, 20 oder 30 Jahren ein klassisches Maschinenbau- oder Elektrotechnik-Studium absolviert, in dem die modernen Technologien und Methoden noch nicht existierten. Auf der anderen Seite fehlt den jüngeren, entsprechend ausgebildeten Ingenieuren, naturgemäß die ebenfalls notwendige Erfahrung und damit verbundenes Urteilsvermögen. Diese Problematik lässt sich auch durch Weiterbildung nicht auflösen, daher müssen „klassische“ und „neue“ Ingenieure und Programmierer neue Wege der Kommunikation und Kooperation finden, um gemeinsam an neuen Lösungen zu arbeiten. Wenn das (noch besser als heute) gelingt, können neue Lösungen entstehen, die nicht nur technisch machbar, sondern auch sinnhaft unter Berücksichtigung aller Rahmenbedingungen sind.

2.8 AKZEPTANZ

Auch wenn eine neue Technologie alle Erwartungen hinsichtlich Sicherheit und Wirtschaftlichkeit erfüllt, ist noch nicht sichergestellt, dass diese Technologie in nennenswertem Umfang in der Baupraxis zum Einsatz kommt. Nur wenn alle entscheidungsrelevanten Prozessbeteiligten die neue Technologie akzeptieren, kommt diese auch tatsächlich zur Anwendung. Mögliche Akzeptanzhindernisse sind z.B. Qualifikationsdefizite der Prozessbeteiligten, benutzerunfreundliche Mensch-Maschine-Schnittstellen und unzureichende ergonomische Bedingungen. Erforderlich für die Akzeptanz einer neuen Technologie ist außerdem die nutzerbezogene, umfängliche und nachvollziehbare Vermittlung der Vorteile (und ggf. auch der Nachteile) dieser Technologie. Diesbezüglich haben gerade die von Ingenieuren geprägten und somit rein technisch kommunizierenden Baumaschinenhersteller vielfach Nachholbedarf.

2.9 FUNKTIONALE BESONDERHEITEN

Reduziert man gedanklich die Baumaschine auf ihre Fahrfunktion, drängen sich Analogien zum Automotive-Sektor (PKW, LKW) auf. Dort stellt sich mittlerweile nicht mehr die Frage, ob das autonome Fahren Realität wird, sondern nur noch wann und in welchen Schritten (z.B. Autobahn – Landstraße – Stadtverkehr). Einerseits sind die Baumaschinen hier schon weiter: Autonom fahrende „Dumper“ (Schwerlast-Muldenkipper ohne Straßenzulassung, für Nutzlasten bis zu mehreren hundert Tonnen), wurden in den ersten Tagebauanwendungen bereits vor rund 10 Jahren eingeführt. Allerdings beschränkt sich die Autonomie in diesen Anwendungen bisher allein auf die Fahrfunktion, denn ein Dumper macht im Grunde nicht mehr als zwischen zwei Punkten auf einer definierten Strecke zu fahren

und am Zielpunkt das Material durch Kippen der Mulde abzuladen. Außerdem fahren diese Maschinen in der Regel auf vordefinierten Wegen und in weitgehend abgesperrten Bereichen, so dass diese nur eingeschränkt auf ungeplante Situationen und Ereignisse reagieren müssen. Insofern hat dieses, im Zusammenhang mit der Automatisierung von Baumaschinen oft herangezogene Beispiel nur wenig mit dem zu tun, was man heute unter dem „autonomen Fahren“ versteht.

Weitaus komplexer sind die Funktionen bei typischen Baumaschinen wie Bagger, Radlader, Straßenfertiger oder Drehbohrgerät. Bei diesen Geräten ist das Fahren eine Nebenfunktion, die Arbeitsaufgabe steht im Mittelpunkt der Automatisierungsbestrebungen. Die Komplexität und Vielfalt dieser Arbeitsaufgaben stehen einer Automatisierung entgegen bzw. gestalten deren Umsetzung aus mehreren Gründen erheblich anspruchsvoller als die Automatisierung im Straßenverkehr oder auch in Produktionsbetrieben („Industrie 4.0“):

- Die Aufgabenstellung des Arbeitsprozesses verändert sich ständig hinsichtlich der geometrischen Gestalt und physikalischen Eigenschaften, weil das Bauwerk parallel „wächst“ (oder anderweitig durch den Prozess verändert wird).
- Die Eigenschaften der Erdstoffe (bzw. anderen zu bearbeitenden Schüttgüter oder Bauobjekte) und deren Wechselwirkungen mit der Baumaschine sind weitaus schwieriger vorherzusagen oder zu erfassen als die Eigenschaften von Straße und Fahrzeug und deren Wechselwirkung.
- Im Umfeld der Baumaschine befinden sich in der Regel zahlreiche Personen sowie andere Maschinen und Geräte, jeweils mit eigenen unabhängigen Aufgaben.
- Die Maschine und der Prozess müssen in einem sehr weiten Feld der Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit, Lichtverhältnisse, Wind, Untergrundbeschaffenheit) arbeiten; dies ist weniger eine Abgrenzung zum Automotive-Bereich, aber eine klare Abgrenzung zur „Industrie 4.0“ in Produktionsprozessen.
- Im Bauwesen sind die Genauigkeitsanforderungen an das Bauwerk weitaus geringer als in sonstigen Produktionsprozessen. Das macht zwar manche Aufgaben durchaus einfacher, erschwert aber gleichzeitig auch die Automatisierung, weil Objekte, mit denen die Maschine eine Interaktion ausführen soll, deutlich von der geplanten und in Daten hinterlegten geometrischen Lage abweichen können.

Insgesamt ist festzuhalten, dass eine praxistaugliche Automatisierungsfunktion bei Baumaschinen sehr viele ungeplante Zustände und Ereignisse erkennen und darauf reagieren muss. Die Vorausplanung von Abläufen ist aufgrund der Vielzahl beeinflussender Parameter oft nicht möglich, daher kommt es maßgeblich auf die sensorischen und aktorischen Fähigkeiten sowie auf die softwarebasierte Entscheidungsfähigkeit der Maschinensteuerungen an.

2.10 BEISPIELE BISHER NICHT UMGESETZTER TECHNOLOGIEN

Nachfolgend einige Beispiele von Technologien oder Lösungen, bei denen aufgrund der Randbedingungen (und nicht aufgrund technologischer Schwächen) der Einzug in die Baumaschinen und die Baupraxis verhindert oder verzögert wurde:

- Begriffe wie „Künstliche Intelligenz“ und „Maschinelles Lernen“ sind seit einigen Jahren in aller Munde, nicht nur in der Fachwelt, sondern auch in Politik und Gesellschaft. Berichtet wird in der Regel entweder über die Faszination der Möglichkeiten, die sich dadurch ergeben, oder über deren besondere Gefahren. Es entsteht vielfach der Eindruck, damit könnte schon heute „alles“ automatisiert werden – so natürlich auch die Baumaschinen und Bauprozesse. Aus rein technischer Sicht wäre auch vieles schon möglich, und einige Lösungen sind – überwiegend im Rahmen von Forschungsprojekten – bereits umgesetzt. Aber: Aufgrund der von einer Baumaschine ausgehenden Gefährdungen und des bisher nicht machbaren Sicherheitsnachweises für KI-Methoden, gibt es bisher nahezu keine realisierten Produkte oder Lösungen auf dem Markt, die diese Methoden wirklich nutzbar machen. Zur Erläuterung der Problematik ein Auszug aus einem Interview mit Dr. Daniel Schneider, Abteilungsleiter Safety Engineering am Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering IESE: „Künstliche Intelligenz, und Machine Learning im Besonderen, erweist

sich zunehmend als wichtiger Enabler der Automatisierung, wobei die Gewährleistung der Sicherheit von Machine Learning eine noch weitgehend ungelöste Herausforderung darstellt. Das Grundproblem liegt darin, dass etablierte Methoden und Standards zur Gewährleistung der Sicherheit stets von einem vollständigen Verständnis eines Systems und seiner Umgebung ausgehen. Diese Grundannahme ist bei Systemen mit KI-Anteilen nun nicht mehr gegeben“ [331]. In diesem Zusammenhang verhindern also in erster Linie Sicherheits- und Akzeptanz-Probleme die Einführung neuer Lösungen.

- Für die Vernetzung von Maschinen werden Kommunikationstechnologien benötigt, die technologisch prinzipiell verfügbar sind. Allerdings benötigen die Maschinenbetreiber, also die Bauunternehmen, aufgrund ihrer heterogenen Maschinenparks einheitlich (standardisierte) und nachrüstbare Lösungen, andernfalls ist für den Betreiber der operative Aufwand eines vernetzten Maschinenparks meist größer als der Nutzen. So lange die Standards fehlen, wird es bei Demonstrations- oder Insellösungen bleiben. Weitere Voraussetzung ist die flächendeckende und nahezu unterbrechungsfreie Netzabdeckung und für Automatisierungsfunktionen auf Maschinenebene auch eine verlässlich niedrige Latenz (Zeitverzögerung) der Datenübertragung (z.B. durch flächendeckende Einführung des 5G-Netzes). Beides ist bisher nicht erkennbar, was zahlreiche Unternehmen von entsprechenden Investitionen abhält.
- Elektrohydraulische Steuerungen zählen heute zum Stand der Technik und werden von vielen Maschinenanbietern genutzt. Sie verbinden die hohe Leistungsdichte und Robustheit der Mobilhydraulik mit der Flexibilität und Anpassungsfähigkeit programmierbarer Steuerungen (vgl. Kap. 3.4 Antriebstechnik). Elektrohydraulische Steuerungen stehen bereits seit Anfang der 2000er-Jahre, also seit fast 20 Jahren, technisch ausgereift zur Verfügung. Trotzdem ist diese Technologie bei Weitem noch nicht in der ganzen Breite der angebotenen Maschinen integriert. Manchen Maschinenanbietern ist die Einführung der Elektrohydraulischen Steuerungen auch heute noch eine Pressemitteilung wert. Die schleppende Einführung dieser, aus funktionaler und anwendungstechnischer Sicht absolut sinnvollen Technologie, scheiterte in der Vergangenheit und scheitert auch heute noch oft an den erhöhten Investitionskosten. Der Nachweis, dass diese durch reduzierte Betriebskosten oder erhöhte Produktivität während der Nutzung dennoch wirtschaftlich sind, scheint nicht immer zu gelingen.
- Baustellen sind meist dadurch geprägt, dass eine Vielzahl von Maschinen mit einer noch größeren Zahl von Menschen auf engem und oft unübersichtlichem Raum zusammenarbeiten. Dabei entstehen erhebliche Gefährdungen für Mensch, Maschine und Bauwerk. Um die Gefährdung der Menschen zu reduzieren, gäbe es eine relativ einfache und zuverlässige technische Lösung, nämlich die Identifikation und Lokalisierung aller Personen auf einer Baustelle durch mitgeführte Funksender. Damit könnten durch maschinenintegrierte oder durch übergeordnete Überwachungssysteme die meisten kritischen Situationen rechtzeitig erkannt und durch Warnungen an den Maschinenführer oder die gefährdete Person sehr viele Unfälle verhindert werden. Im nächsten Schritt wäre dann auch ein aktiver Eingriff in die Maschinenbewegung denkbar. Als Beispiele sei die Rückwärtsfahrt eines Radladers oder das Schwenken eines Baggers genannt, beides gehört zu den häufigen Unfallursachen auf Baustellen. Diese Lösung scheitert derzeit nicht an der Technologie, sondern ausschließlich an regulatorischen Vorgaben (Datenschutz) und mangelnder Akzeptanz (Möglichkeit der Überwachung).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass automatisierte Funktionen bei Baumaschinen unter Nutzung heutiger Technologien in vielen Fällen zwar möglich, oft aber (noch) unwirtschaftlich und daher wenig verbreitet sind. Der Stand der Technik wird in den folgenden Kapiteln 4 und 5 erläutert.

Es ist davon auszugehen, dass durch wachsenden Druck der Anwender (Produktivitätserwartung, Fachkräftemangel, Prozessqualität), durch neue technologische Möglichkeiten aus anderen Anwendungsbereichen (Automotive, Industrie 4.0) und durch Kostensenkung der sensorischen und aktorischen Komponenten der Einzug automatisierter Lösungen im Bereich der Baumaschinen in den nächsten Jahren deutlich zunehmend wird. Hierzu werden im Kapitel 6 die Perspektiven aufgezeigt.

3 STAND DER TECHNIK: TECHNOLOGIEN FÜR DIE AUTOMATISIERUNG VON BAUMASCHINEN

Im Rahmen des vorliegenden Gutachtens wird der „Stand der Technik“ wie folgt definiert:

Eine Technologie zählt dann zum Stand der Technik, wenn diese in Form konkreter Produkte am Markt verfügbar ist und kommerziell genutzt wird. Entscheidend ist, ob die Technologie für den Nutzer direkt implementierbar oder mit überschaubarem Aufwand integrierbar ist. Nicht zwangsläufig zum Stand der Technik zählen daher veröffentlichte Forschungsergebnisse oder Produktankündigungen von Maschinen- oder Komponentenherstellern.

Gleichzeitig bedeutet diese Definition aber auch, dass „Stand-der-Technik-Technologien“ nicht zwangsläufig bereits in der Breite umgesetzt sind. Eine kommerzielle Nutzung in begrenztem Umfang ist gemäß vorgenannter Definition ausreichend. Daher kann sich auch bei solchen Technologien, die bereits zum Stand der Technik zu zählen sind, die Frage stellen, ob deren weitere Verbreitung gewünscht ist und ggf. wie dies gefördert werden kann.

Im Folgenden wird der Stand der Technik, unterteilt nach Technologiefeldern, im Bereich der automatisierten Baumaschinen und Robotik dargelegt, ausgehend von der vorgenannten Definition.

3.1 SENSORIK

3.1.1 Absolute Positionsbestimmung (Maschinenposition)

Eine Grundvoraussetzung für die Automatisierung mobiler Arbeitsmaschinen und Bauprozesse ist die exakte Orts- und Lagebestimmung von Maschinen, Werkzeugen und Baustoffen. Beispielhafte Anwendungsbereiche sind die Vermessung und Baudokumentation, sowie das „Tracking“ und „Tracing“ von Maschinen, Werkzeugen und Bauteilen. Der Begriff „Tracking“ beschreibt dabei die Bestimmung des aktuellen Standortes eines Objektes, während „Tracing“ dessen Zurückverfolgbarkeit meint. Ein weiterer Anwendungsfall ist das sogenannte „Geofencing“. Hierbei wird die Position eines Objektes überwacht und bei Überschreiten einer gedachten geografischen Begrenzung automatisiert eine Aktion ausgelöst – z.B. das Auslösen einer Wegfahrsperre, sobald eine Baumaschine die Baustelle unautorisiert verlässt.

Die Erfassung einer absoluten geodätischen Position erfolgt in der Regel mithilfe globaler Navigationssatellitensysteme (GNSS). Unter dem Begriff GNSS werden alle aktuellen und zukünftigen globalen Satellitensysteme zusammengefasst. Ältere Empfänger nutzen meist das US-amerikanische Satellitensystem NAVSTAR GPS, welches oft auch als Synonym für Positionsbestimmungssysteme im Allgemeinen verwendet wird. Bei neueren GNSS-Empfängern handelt es sich immer öfter um sogenannte Multiband-Systeme, welche auch Navigationsdaten von „GLONASS“ (Russische Föderation), „Galileo“ (Europäische Union) und „Beidou“ (Volksrepublik China) empfangen. Die Positionsbestimmung bei GNSS-Systemen erfolgt über Laufzeitmessung der Satellitensignale. Hierbei muss ein Empfänger die Signale von mindestens vier Satelliten gleichzeitig empfangen. Durch die potenziell größere Anzahl von Satellitensignalen bei Multiband-Empfängern liefern diese wesentlich schneller und robuster Positionsdaten.

Fehler in der Satellitenposition, atmosphärische Störungen in der Ionospähre und Troposhäre sowie Signalreflektionen an der Erdoberfläche führen zu Ungenauigkeiten in der Positionsbestimmung. Zur Korrektur der meisten genannten Fehler werden Zusatzsysteme, engl. Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS), eingesetzt, die Korrektursignale über geostationäre Satelliten abstrahlen. Beispiele sind das europäische EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) oder das US-amerikanische WAAS (Wide Area Augmentation System). Diese Korrektursignale werden heutzutage von jedem GNSS-Empfänger standardmäßig verarbeitet und führen zu durchschnittlich erreichbaren Genauigkeiten von 5-15 m [200].

Zur weiteren Verbesserung der Genauigkeit werden DGPS (Differential Global Positioning System) oder RTK (Real Time Kinematic) verwendet[201]. Aktuelle Systeme erreichen mit dem RTK-Verfahren dynamische Positionsgenauigkeiten von 10 mm (horizontal) bzw. 20 mm (Höhengenauigkeit) bei einer Abtastrate von bis zu 20 Hz [181]. Das Verfahren basiert darauf, dass der mobile GNSS-Empfänger (Rover) Korrektursignale von einer geostationären Referenzstation empfängt, welche sich in seiner näheren Umgebung befindet. Die Einrichtung temporärer Referenzstationen direkt auf der Baustelle (z.B. auf einem Baucontainer, vgl. Abbildung 3) ist möglich, erfordert allerdings das zeitaufwändige Einmessen durch einen Vermessungsingenieur und ist somit nicht für kurzzeitige Baustellen geeignet. Alternativ können auch permanente Referenzstationen genutzt werden, die von einem privaten Betreiber oder von den Vermessungsverwaltungen der Bundesländer zur Verfügung gestellt werden (SAPOS [5], ASCOS [12]). Um nicht zu viele Referenzstationen einrichten zu müssen, ist man zu Netz-RTK übergangen. Hier werden mehrere Referenzstationen vernetzt und Korrekturdaten an den Rover im Vermessungsgebiet über Mobil-Telefon übermittelt (SAPOS-Vernetzung). Die maximale Entfernung des Rovers von der Referenzstation beträgt bei temporären Referenzstationen unter günstigen Bedingungen bis zu 10 km. Bei permanenten Referenzstationen ist ab 20 km RTK nicht mehr möglich. Bei Netz-RTK sind die Referenzstationen 50 bis 100 km voneinander entfernt [239]. Für die Nutzung solcher Korrekturdatendienste – mit Ausnahme temporärer Referenzstationen – entfallen teilweise sehr hohe Gebühren. Die Nutzung von RTK-Systemen ist im Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen mittlerweile stark verbreitet.

Am Markt existiert eine große Zahl von Herstellern, welche Sensorsysteme zum Empfang von GNSS-Signalen anbieten. Dabei handelt es sich meist um Nachrüstlösungen, welche auch an älteren Maschinen montiert werden können. Diese bestehen aus einem GNSS-Empfänger, sowie einem zusätzlichen Anzeige- und Bedienterminal, welches in der Kabine der Baumaschine angebracht wird. Mittlerweile bieten viele der etablierten OEM (Original Equipment Manufacturer) ebenfalls integrierte Lösungen an. Diese bieten den Vorteil, dass diese in das Gesamtsystem der Maschine eingebunden sind und ein zusätzliches Anzeigeelement entfällt.

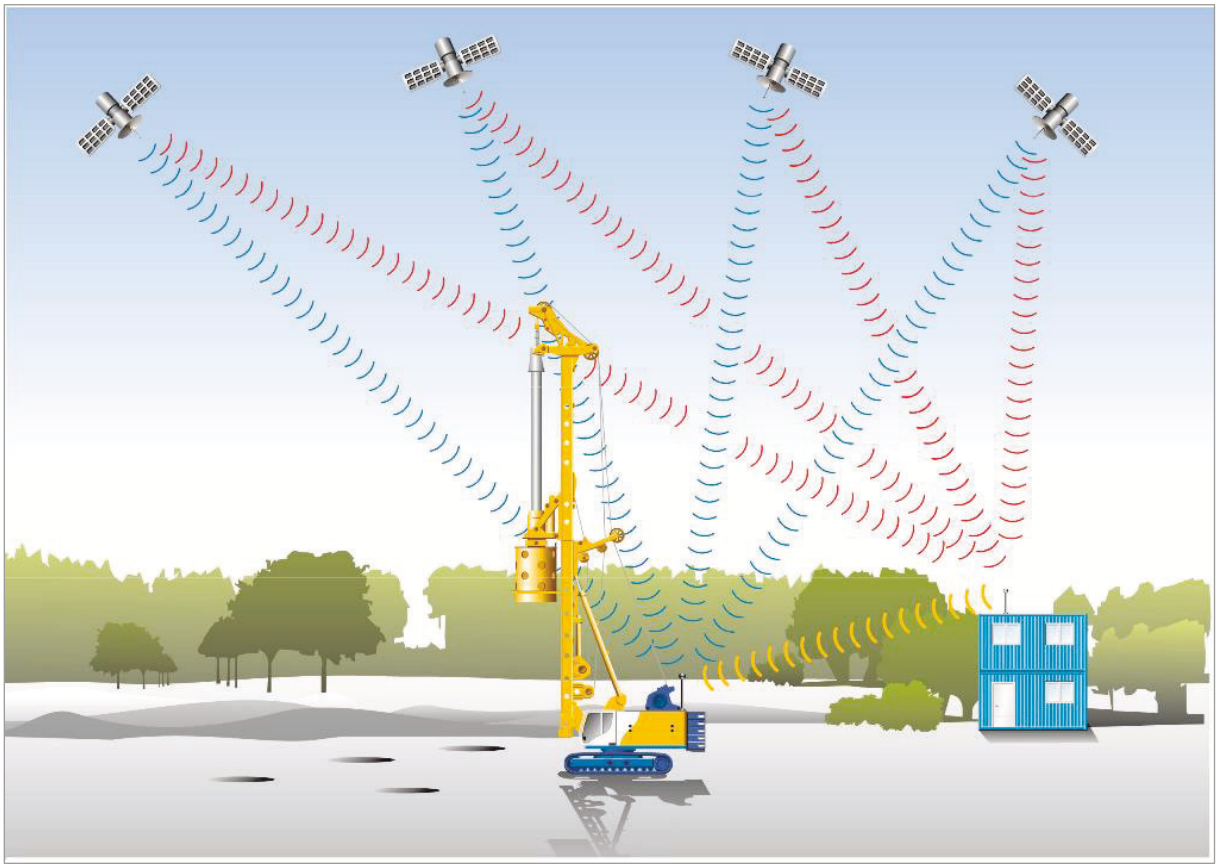


Abbildung 3: Beispiel für ein GNSS-System mit RTK-Korrektur. Der Rover (Baumaschine) empfängt neben den Satellitensignalen auch Korrektursignale von einer lokalen Referenzstation (Baucontainer) [26]

Ein großes Problem von GNSS-Systemen bleibt die verminderte Genauigkeit bei eingeschränkter Sicht- bzw. Funkverbindung zu Satelliten oder Referenzstation. Grund hierfür können Abschattungen an Steilböschungen, Felswänden, Alleen oder in Tunneln und Gebäuden sein. In diesen Fällen lässt sich die absolute georeferenzierte Maschinenposition nicht direkt messen. Als Alternative wird die relative Maschinenposition in Bezug zu einem Punkt mit bekannten geodätischen Koordinaten ermittelt. Meist handelt es sich hierbei um einen Vermessungspunkt.

Aktuelle technische Lösungen zur Bestimmung der Relativposition basieren auf optischen Messverfahren. In den meisten Fällen wird hier eine motorisierte Totalstation verwendet, welche über einen Laserstrahl den Abstand zu einem an der Baumaschine angebrachten Reflektor (Prisma) misst [317], [329]. Durch Messung des Abstands und des Strahlwinkels kann die exakte absolute Position der Maschine berechnet werden. Vorrausetzung ist eine direkte Sichtverbindung zwischen Totalstation und Prisma. Besonders in innerstädtischen Lagen, Zonen mit Baumbestand oder wetterbedingten Sichtbehinderungen infolge von Nebel, Regen oder Schnee kann es zu Problemen kommen. In solchen Situationen stoßen aktuelle Verfahren zur absoluten Positionsbestimmung an ihre Grenzen. Alternativen könnten hier zukünftig funkbasierte Ortungsverfahren (z.B. über Ultraweitband) bieten. An Tagebaugeräten werden diese z.T. bereits eingesetzt [215]. Im Moment ist das UWB-Verfahren noch zu ungenau im Vergleich zur Ortung über GNSS oder Totalstation.

3.1.2 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 nicht ermitteln. Ein Grund hierfür liegt in der fehlenden Montage- und Anbaumöglichkeit für beispielsweise GNSS-Empfänger direkt am Arbeitswerkzeug. Des Weiteren wäre die relativ empfindliche Sensorik hier nicht genug vor Erschütterungen und mechanischer Krafteinwirkung geschützt. Für die Erfassung der Position von Arbeitsausrüstung und Anbauwerkzeug müssen daher andere, relativ robuste Sensoren verwendet werden. Die Positionsbestimmung erfolgt dann relativ zum Maschinenkoordinatensystem und kann mithilfe der absoluten georeferenzierten Maschinenposition in geodätische Koordinaten überführt werden.

Die Arbeitsausrüstung der meisten mobilen Arbeitsmaschinen besteht aus einer mehrgliedrigen kinematischen Kette. Im Falle eines Baggers bilden der Ausleger, der Stiel, das Viergelenk und der Löffel die einzelnen Glieder der kinematischen Kette (vgl. Abbildung 4). Um beispielsweise von der Position eines GNSS-Empfängers ausgehend, welcher sich auf der Fahrerkabine befindet, die Position der Löffelspitze (Endeffektor-Position / Tool Center Point) berechnen zu können, muss die räumliche Lage und Position der einzelnen Glieder zueinander bekannt sein. Diese kann über die Stellungen der einzelnen Dreh- und Schubgelenke ermittelt werden.

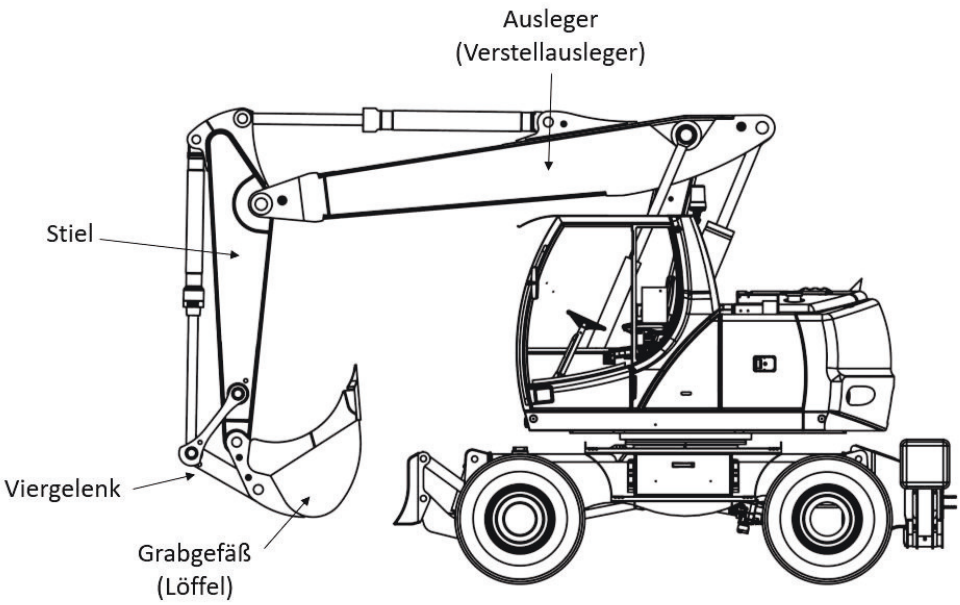


Abbildung 4: Arbeitsausrüstung am Hydraulikbagger [67]

Eine direkte Messung der Drehgelenkstellung kann über Drehgeber erfolgen [128]. In der Praxis lassen sich diese jedoch meist schlecht am Drehgelenk befestigen oder unterliegen einem hohen Verschleiß. Weitaus verbreiteter ist daher die indirekte Bestimmung der Gelenkposition über eine Längenmessung der entsprechenden Hydraulikzylinder.

Eine einfache Möglichkeit zur Längen- bzw. Wegmessung an Hydraulikzylindern besteht in der Verwendung von Seilzugsensoren. Im Inneren eines solchen Sensors befindet sich ein Seil, welches auf eine zylindrische Spule mit konstantem Durchmesser aufgewickelt ist. Die Spule rotiert, wenn sich das Seil auf- oder abwickelt. Um die Spannung des Seils zu erhalten, wird eine Feder an der Spule angekoppelt, diese ist an der Achse des Rotationssensors (Potentiometer oder Encoder) befestigt. Während sich das Seil des Aufnehmers mit dem beweglichen Gegenstand auszieht, wird eine Drehung der Spule und der Sensorachse bewirkt. Die rotierende Achse erzeugt ein elektrisches Signal, das dem linearen Auszug oder der Geschwindigkeit des Kabels proportional ist [324]. Seilzugsensoren können bei ausreichendem Bauraum auch nachträglich implementiert werden. Aufgrund der berührenden Messung sind sie störungsfrei gegenüber optischen Einflüssen, unterliegen allerdings mechanischem Verschleiß.

Als nahezu verschleißfrei kann die Wegmessung mittels Ultraschall oder über magnetostriktive Verfahren angesehen werden [199]. Man unterscheidet zwischen direkter US-Messung und der US-Messung mit magnetostriktivem Wellenleiter. Bei der direkten US-Messung wird ein Ultraschallsensor im Zylinderboden oder in der Wandung des Hydraulikzylinders befestigt. Es erfolgt eine Durchschallung des Druckmediums auf das bewegliche Ziel (meist der Kolbenboden) [131], wobei die Laufzeit der Signale ermittelt und die Position des Kolbens berechnet wird. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Signale im verwendeten Druckmedium muss hierbei genau bekannt sein. Unterschiede zwischen verschiedenen Hydraulikölen sowie Temperatur- und alterungsbedingte Veränderungen der Schallgeschwindigkeit müssen durch entsprechende Kalibrier- und Korrekturstrategien berücksichtigt werden. Das Verfahren ist relativ ungenau (±0,1 mm), kann aber Längen bis 5 m messen.

Bei der magnetostriktiven Messung wird ein spezielles Messelement in das Zylindergehäuse eingebracht, welches als Wellenleiter fungiert und Stromimpulse leitet. Die Stromimpulse erzeugen dabei ein zirkuläres Magnetfeld im Wellenleiter. Am bewegten Teil, d.h. dem Kolbenboden, befindet sich ein Dauermagnet. Beim Zusammentreffen der Stromimpulse mit dem Dauermagneten entstehen durch Magnetostriktion (Deformation magnetischer Stoffe infolge eines angelegten magnetischen Feldes [244]) elastische Verformungen, die eine sich nach beiden Seiten ausbreitende, mechanische Welle im Wellenleiter hervorrufen. Die Laufzeit, welche diese Welle bis zu einem im Gehäuseboden befindlichen

Signalwandler benötigt, wird gemessen und somit der Abstand Signalwandler – Dauermagnet bestimmt. Das Verfahren ist wesentlich genauer und für Längen bis ca. 2 m geeignet. Es hat eine theoretisch unendliche Auflösung und ist für hohe Verstellgeschwindigkeiten geeignet [124]. Eine nachträgliche Installation der Sensoren gestaltet sich in beiden Fällen als sehr aufwändig, da zusätzliche Bohrungen im Zylinder oder Kolben bzw. in der Kolbenstange notwendig sind.

Eine weitere Alternative stellt die Verwendung magnetisch codierter Kolbenstangen dar. Diese können als Absolut- oder Inkremental-Messsystem genutzt werden. Ein wesentlicher Vorteil solcher Messsysteme besteht darin, dass der standardmäßige Aufbau des Hydraulikzylinders nicht verändert werden muss, da die Kernlochbohrung der Kolbenstange entfällt und ein Ausregeln der Körperschallwelle, wie beispielsweise bei magnetostriktiven Systemen, überflüssig ist. Durch das magnetische Verfahren wird die Kolbenstange selbst zum Maßstab [91].

Systeme, welche die Kolbenposition über Hochfrequenzmessungen bestimmen, erfordern keinen Austausch der Kolbenstange. Das Messprinzip nutzt zwei Sonden, welche sich im Gehäuse befinden und direkt auf die Kolbenstange aufgesetzt werden. Über die erste Sonde wird ein elektromagnetisches Signal eingekoppelt welches sich axial durch die Kolbenstange bewegt, am Kolbenboden reflektiert wird und anschließend von der zweiten Sonde empfangen wird (vgl. Abbildung 5). Die Bestimmung der Kolbenposition erfolgt ebenfalls über eine Laufzeitmessung. Solche Systeme sind sehr robust und schränken den Nutzhub nicht ein [194].

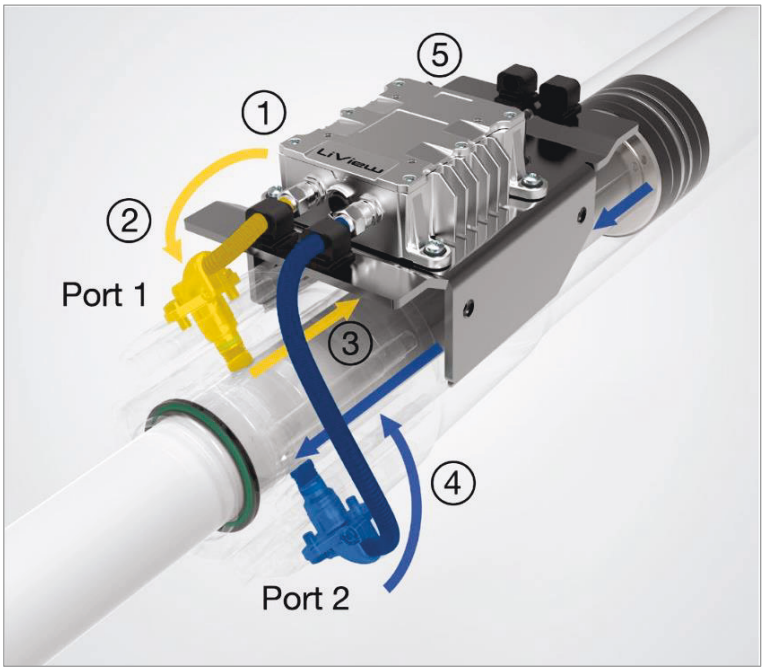


Abbildung 5: Darstellung einer Wegmessung über HF-Signale: 1) Die Auswerteelektronik erzeugt ein Signal. 2) Über eine Sonde (Port 1) wird das Signal eingekoppelt. 3) Das Signal läuft in Richtung des Kolbens und wird reflektiert 4) Über die zweite Sonde (Port 2) kehr das Signal zur Elektronik zurück. 5) Die Elektronik berechnet Position und Geschwindigkeit des Kolbens [194]

Die Nachrüstung (Retrofit) älterer Bestandsmaschinen mit den zuvor genannten Systemen zur Positions- und Geschwindigkeitsmessung von Hydraulikzylindern ist meist sehr aufwändig, teuer oder aufgrund der beschränkten Bauraumverhältnisse nicht möglich. Als Nachrüstlösung werden daher meist inertiale Messeinheiten (englisch *inertial measurement unit*, IMU) eingesetzt. Durch die Ausführung als MEMS-Sensoren (englisch: *Micro-Electro-Mechanical Systems*) sind diese sehr platzsparend, kostengünstig und unterliegen keinem optischen Verschleiß. Des Weiteren sind sie sehr robust gegenüber Alterungs- und Temperatureinflüssen. Eine IMU verfügt in der Regel über drei jeweils orthogonal zueinander ausgerichtete Beschleunigungs- und Drehratensensoren (Gyroskopische Sensoren). Als

Messwerte werden drei lineare Beschleunigungswerte für die translatorische Bewegung und drei Winkelgeschwindigkeiten für die Drehraten ausgegeben. Nach Kompensation der Erdbeschleunigung können durch Zeitintegration die linearen und rotatorischen Geschwindigkeiten, sowie die Position und Orientierung im Raum bezogen zu einem Referenzpunkt ermittelt werden. Für die Bestimmung der Neigungswinkel sind solche IMUs sehr gut geeignet. Die erreichbaren Genauigkeiten sind für viele Anwendungen im Bereich mobiler Arbeitsmaschinen ausreichend. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass diese sehr kostengünstig sind.

Die Montage von IMUs erfolgt mithilfe spezieller Adapterplatten oder Befestigungsvorrichtungen direkt an den einzelnen Gliedern der kinematischen Kette (vgl. Abbildung 4). Die exakte Anbauposition ist dabei nicht entscheidend, sondern kann frei gewählt werden. Nach Montage der einzelnen Neigungssensoren erfolgt eine Kalibrierung des Gesamtsystems, bei der die geometrischen Maße der einzelnen Glieder ermittelt werden. Diese Kalibrierung ist meist sehr zeitintensiv und erfordert zusätzliche Messinstrumente wie Tachymeter (Messgerät zur Bestimmung von Horizontalrichtungen, Vertikalwinkel und Entfernungen) oder Linienlaser.

Wie bereits erwähnt, eignen sich die am Markt verfügbaren IMUs sehr gut zur Bestimmung der Neigungswinkel, jedoch sind die verbauten Beschleunigungs- und Drehratensensoren ungeeignet für eine exakte Positionsbestimmung. Grund hierfür ist das Sensorrauschen, welches durch die zweimalige Integration der Signale zu Drift in den Positionsdaten führt. Zur Verbesserung der Genauigkeit werden manche IMUs deshalb mit GNSS-Sensoren gekoppelt und die Sensordaten fusioniert.

Durch die fehlende Integration eines Magnetometers (Magnetfeldsensor) in den bisherigen IMU-Sensorsystemen bzw. eine zu geringe Genauigkeit der verbauten Magnetometer kann die Bewegung um die Hochachse (Gier-Winkel) bisher nicht mittels IMUs erfasst werden[8]. Um beispielsweise den Winkel des Oberwagens bei einem Bagger zu bestimmen werden aktuell zwei GNSS-Antennen genutzt, welche in definiertem Abstand zueinander auf dem Oberwagen angebracht werden. Für Arbeitsausrüstungen mit höherem Freiheitsgrad - zum Beispiel die Bohrlafette bei Universalbohrgeräten - existiert zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine geeignete Lösung zur Bestimmung der räumlichen Orientierung.

Bisherige Systeme, welche die Position und Lage der Arbeitsausrüstung messen, erfassen nicht die elastischen Verformungen, welche besonders bei langen schmalen Auslegerstrukturen auftreten. Beispiele hierfür sind die Verformungen an Mobilkranen oder am Mast einer Autobetonpumpe. In diesen Fällen ist die Annahme eines Starrkörpersystems nicht mehr zutreffend. Zur Automatisierung solcher Maschinen ist es zukünftig notwendig, die elastischen Verformungen zu erfassen und in den Steuerungs- und Regelalgorithmen zu beachten.

3.1.3 Personen- und Objekterkennung

Beim Betrieb von mobilen Maschinen ereignen sich immer wieder schwere, auch tödliche Unfälle und Sachbeschädigungen, weil im Gefahrenbereich arbeitende Personen und befindliche Objekte nicht richtig erkannt wurden [225]. Eine wichtige Aufgabe zur Erhöhung der Sicherheit ist deshalb die effiziente und zuverlässige Personen- und Objekterkennung. Die am häufigste eingesetzte technische Lösung in diesem Kontext sind Kamera-Monitor-Systeme (KMS). Diese stellen Hilfsvorrichtungen zur Verbesserung der Sicht dar und unterstützen bei der Überwachung des Gefahrenbereichs vor, hinter und um eine mobile Maschine herum – sowohl bei Fahrbewegungen als auch bei Bewegungen der Anbaukomponenten. Oftmals werden hier mehrere Weitwinkel-Kameras eingesetzt. Per Video-Stitching können die zeitgleich erzeugten Digitalbilder weiterverarbeitet und zu einem 360°-Bild kombiniert werden. Der Bediener/Fahrer sieht auf seinem Monitor ein klares Echtzeitbild aus der Vogelperspektive oder mehrere Ansichten im Splitscreen. Eine weitere Möglichkeit ist die ereignisgesteuerte Bildumschaltung, z.B. bei Betätigung des Blinkers (rechte oder linke Kamera) oder Einlegen des Rückwärtsgangs (Kamera hinten) [225].

[8] Durch das Integrieren der Werte von Beschleunigungs- und Drehratensensoren können relative Winkeländerungen erhalten werden. Für eine Absolutwinkelbestimmung (z.B. Geographisch Nord) muss aber vorher entweder eine definierte „Nullstellung“ angefahren oder ein Magnetometer genutzt werden.

KMS erfordern die Aufmerksamkeit des Bedieners und sind nur für den Nahbereich geeignet. Tote Winkel sowie schlechte Sichtverhältnisse können trotz installierter KMS schnell dazu führen, dass Personen oder Objekte übersehen werden. Sensorische Warneinrichtungen zur automatischen Detektion versuchen diese Probleme zu beheben.

Eine aktive Ortung von Personen kann beispielsweise mithilfe von Transpondersystemen oder auf Basis von RFID-Tags erfolgen, welche an der Arbeitskleidung oder am Helm befestigt werden [109]. Der große Vorteil solcher funkbasierten Systeme ist, dass diese auch bei schlechten Sichtverhältnissen, bei Nässe und bei starkem Schmutz zuverlässig arbeiten. Durch die vollflächige Ausbreitung der Funkwellen entstehen keine „toten Winkel“ und von Hindernissen verdeckte Personen werden sicher erkannt. Derartige Systeme können nur in abgeschlossenen Bereichen bzw. Betriebsgeländen mit Zugangskontrolle eingesetzt werden. Zudem muss sichergestellt werden, dass jede Person eine Warneinheit in Form eines kleinen Funk-Kommunikationsgerätes (RFID-Transponder oder auch RFID-Tag, von engl. *tag*: Etikett, Anhängezettel) trägt [225]. Von entscheidender Bedeutung ist auch die Frage nach datenschutzrechtlichen Aspekten. Ohne entsprechende Maßnahmen ist es technisch möglich, dass die Kennung eines Tags einer konkreten Person zugeordnet werden kann. Es besteht die Gefahr, dass das System missbraucht wird um die Aktivität einzelner Personen zu erfassen.

Eine Alternative zur funkbasierten Ortung stellen Warn- und Sensoriksysteme dar, welche mittels Ultraschall, Radar oder 3D-Kameras das Umfeld erfassen. Als besonders robust in der Nahfeldortung gelten Ultraschallsensoren. Diese erfassen unabhängig von Materialfarbe, Transparenz, Glanz und Umgebungslicht, Hindernisse mit Entfernungen bis zu 3 m. Zudem besitzen sie eine hohe Unempfindlichkeit gegen Schmutz, Staub, Feuchtigkeit und Nebel. Radar-Systeme können auch bei Geschwindigkeiten von bis zu 20 km/h großflächige Detektionsbereiche bis zu Entfernungen von 20 m Abstand zum Fahrzeug sicher erfassen.

Neuere Warn-Systeme versuchen Objekte nicht nur zu erkennen, sondern zu klassifizieren [195], d.h. es erfolgt eine Unterscheidung, ob es sich beispielsweise um eine Person oder einen Container handelt. Oftmals werden hierzu 3D-Kameras eingesetzt, welche mittels Stereoskopie Tiefeninformationen gewinnen. Zur Klassifizierung erfolgt oftmals ein Konturvergleich mit vordefinierten Mustern, wie z.B. typisch menschliche Konturen einer stehenden Person. Solche Systeme erfüllen aktuell nicht die Anforderungen einer Sicherheitseinrichtung, da beispielsweise sitzende oder liegende Personen nicht erkannt werden. Sie werden deshalb bewusst als Assistenzsysteme vermarktet. Die Verantwortung bleibt weiterhin beim Bediener, welcher weiterhin das Kamerabild beobachten und selbst reagieren muss.

Abbildung 6: Beispiel für ein 3D-Kamerasystem [225]

Die zur Verfügung stehenden Klassifizierungsalgorithmen sind aktuell noch auf sehr einfache Objekte begrenzt. Das ungeordnete Arbeitsumfeld mobiler Arbeitsmaschinen, mit seinen vielen unterschiedlichen Objekten, stellt hierbei eine besondere Herausforderung im Gegensatz zu den relativ geordneten Verhältnissen im Straßenverkehr oder der industriellen Produktion dar. Hieraus resultiert ein erhöhter Aufwand zur Entwicklung, Absicherung und Integration der entsprechenden Systeme [227].

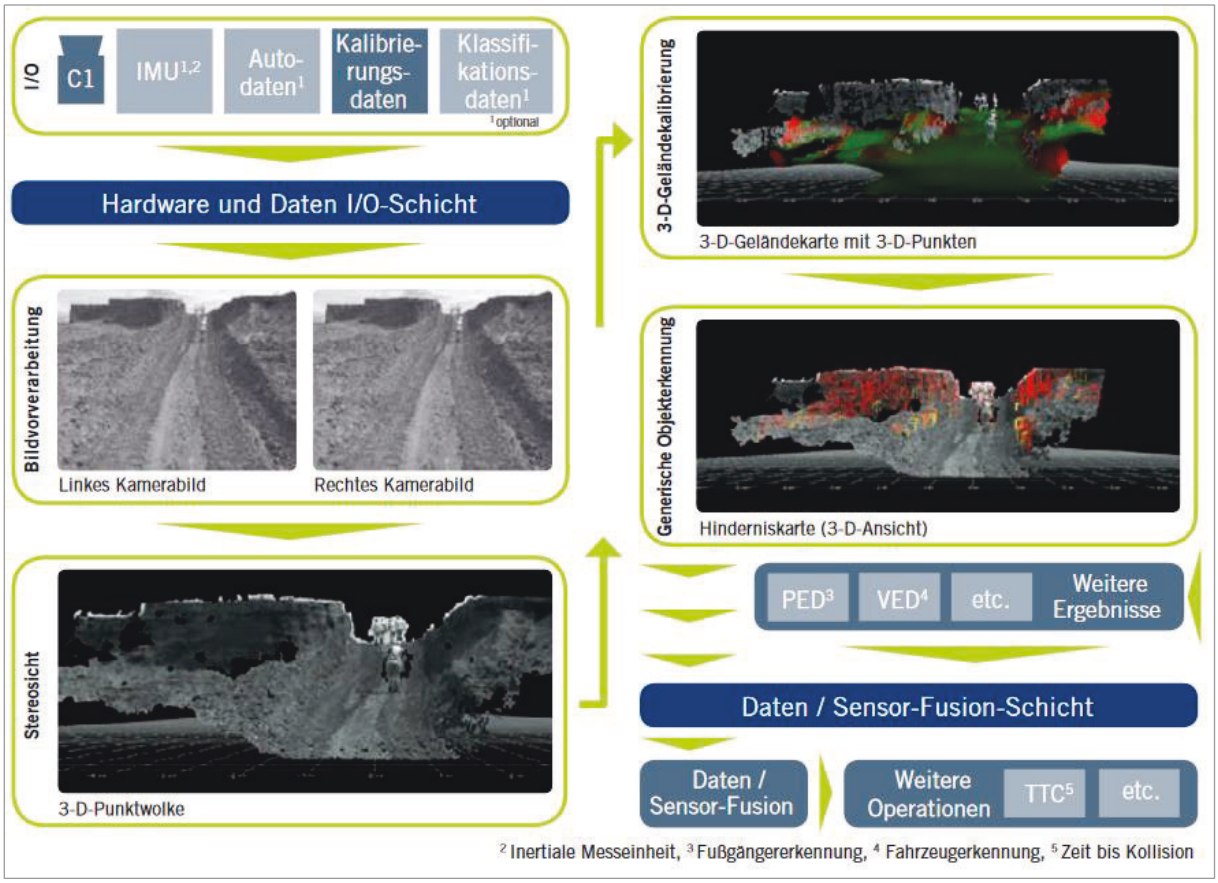


Abbildung 7: Beispielhafter Aufbau eines Objekterkennungssystems [227]

3.1.4 Identifikation

Neben dem reinen Erkennen bzw. der Orts- und Lagebestimmung von Maschinen und Betriebsmitteln ist deren eindeutige Identifikation ein sehr wichtiger Bestandteil vieler Automatisierungsprozesse. Dies ist unter anderem notwendig, damit immer die richtigen Baustoffe verbaut werden und es im Rahmen einer durchgängig digitalen Prozesskette zu keinen falschen Buchungsvorgängen kommt. Potenzielle Anwendungsfälle und Technologien zur eindeutigen Identifikation von Betriebsmitteln wurden unter anderem in [118] und [271] untersucht. Beide Arbeiten sehen RFID als geeignet unter schwierigen Randbedingungen, wie sie in der Bauindustrie auftreten, Betriebsmittel zu kennzeichnen und zu erfassen. Mittlerweile dringen erste praxistaugliche Anwendungen zur Identifikation von Anbauwerkzeugen mittels RFID an den Markt [326]. Hierbei wird das Anbauwerkzeug automatisch durch die Grundmaschine (z.B. Bagger) erkannt und automatisch die entsprechenden Maschineneinstellungen, welche für einen optimalen Betrieb des Werkzeugs notwendig sind abgerufen.

3.1.5 Erfassung und Überwachung des Maschinenzustands

Für eine Automatisierung mobiler Arbeitsmaschinen und Bauprozesse ist es unabdingbar, stets 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 eine prädiktive Wartung (engl. *Predictive Maintenance*). Zu den wichtigsten maschinellen Zustandsgrößen gehören Drehzahlen, Drehmomente, Kräfte, Drücke, Volumenströme, elektrische Spannungen und Ströme sowie Beschleunigungen und Geschwindigkeiten. Für die messtechnische Erfassung dieser Größen können in der Regel Standard-Sensoren eingesetzt werden, wie sie auch in anderen Industriezweigen (z.B. Automobil oder Verfahrenstechnik) verwendet werden. Auf die einzelnen Sensoren soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden

3.1.6 Erfassung und Überwachung von Arbeitsprozessen

Für eine automatisierte Überwachung und Dokumentation maschineller Arbeitsprozesse ist es notwendig, die zugehörigen prozesstechnischen und stofflichen Parameter sowie zugehörige Stell- und Regelgrößen sensorisch zu erfassen. Anzahl und Art der zu bestimmenden Größen hängen dabei stets vom betrachteten Arbeitsprozess, den be- bzw. verarbeiteten Materialien und den äußeren Randbedingungen, unter denen der Prozess stattfindet, ab. Die Anzahl möglicher Aufgabenstellungen ist dabei so vielfältig wie die der sensorischen Erfassungsmöglichkeiten. Das Portfolio reicht von einfachen Serienprodukten bis hin zu komplexen einsatzspezifischen Speziallösungen, welche nur einmal benötigt werden. Anhand einiger ausgewählter Beispiele soll die Bandbreite sensorischer Prozessüberwachung nachfolgend kurz dargestellt werden.

3.1.6.1 Anwendungsbeispiel: Messung der Schaufelfüllung beim Radlader

Radlader dienen in erster Linie dem Materialumschlag. Eine der wichtigsten Aufgaben hierbei ist die präzise Erfassung, Überwachung und Dokumentation der Umschlagmenge. Diese wird aus der Masse des Materials pro geladener Schaufel bestimmt. Zur sensorischen Erfassung der geladenen Masse müssen der Hydraulikdruck am Hubzylinder sowie die aktuelle Stellung der Arbeitsausrüstung gemessen und fusioniert werden. Die Stellung der Arbeitsausrüstung kann dabei durch Neigungssensoren oder Winkelgeber am Hubgerüst erfasst werden (vgl. Abbildung 8). Mithilfe solcher integrierter Kontrollwaagen ist es möglich, die geladene Masse in der Schaufel mit einer Genauigkeit von ±1 % [61] zu ermitteln. Der Wiegevorgang erfolgt dabei im normalen Ladeprozess ganz ohne Unterbrechung des Arbeitsablaufs.

Abbildung 8: Beispiel zur sensorischen Erfassung des Füllzustandes einer Radladerschaufel. Verbaute Komponenten: 1) Wiegelektronik 2) Digitale Drucksensoren 3) Winkelsensoren [257]

3.1.6.2 Anwendungsbeispiel: Messung der Asphalt-Einbautemperatur

Im Straßenbau ist die Materialtemperatur beim Einbau ein maßgebender Qualitätsparameter. Neben anderen Einflussgrößen, wie z.B. einer homogenen Kornverteilung, gleichmäßig verteilten Bitumenfilmen, einem gleichmäßigen Holraumgehalt und einer optimalen Verdichtung, ist diese ausschlaggebend für eine lange Lebensdauer der Asphaltbeläge. Internationale Untersuchungen haben ergeben, dass der Temperaturverlauf den Dichteverlauf sehr stark beeinflusst. Selbst geringere Temperaturunterschiede von ca. 30°C bedeuten eine signifikante Dichteabnahme von bis zu 5 % [168]. Dementsprechend wichtig ist die sensorische Erfassung und Dokumentation der Asphalt-Einbautemperatur.

Zur Oberflächentemperaturmessung wird in der Regel ein Infrarotscanner eingesetzt. Dieser kann mit einem GNSS-Empfänger und einer Wetterstation, welche sich ebenfalls auf der Maschine befindet, gekoppelt werden [215]. Der GNSS-Empfänger dient dabei der Erfassung der geodätischen Koordinaten, welche für eine Kartierung des Thermalprofils notwendig sind. Die zusätzliche Wetterstation misst Lufttemperatur, Windstärke und Luftfeuchtigkeit und dient als zusätzliches Qualitätssicherungssystem, um thermische Entmischung infolge schneller Abkühlung rechtzeitig zu detektieren.

3.1.6.3 Anwendungsbeispiel: Verdichtungskontrolle

Zur Verdichtung eingebauter Asphalt- oder Bodenschichten werden im Straßen- und Tiefbau dynamisch erregte Walzen eingesetzt. Als wichtigstes Qualitätskriterium, um den Erfolg der Verdichtung zu beurteilen, muss die Tragfähigkeit des verdichteten Untergrunds (Asphalt oder Erdstoffe) bewertet werden. Hierzu kann die *Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle* (FDVK) genutzt werden. Die dynamisch erregte Walze und der bearbeitete Untergrund bilden ein schwingendes Interaktionssystem mit wechselnden Kontaktbedingungen, wobei der Messwert zur Beurteilung der Bodentragfähigkeit aus dem gemessenen Bewegungsverhalten der Walze ermittelt wird [4]. Hierfür müssen die Beschleunigungen am Walzenkörper mittels entsprechender Sensoren erfasst und ausgewertet werden. Eine Weiterentwicklung der FDVK ist die raumfüllende Verdichtungskontrolle (RFVK), welche bisher nur an Anbauverdichtern eingesetzt wird. Bei dieser werden ebenfalls das Beschleunigungsverhalten, sowie die vom Trägergerät aufgebrachte Anpresskraft erfasst und mithilfe künstlicher neuronaler Netze auf die jeweilige Bodenart und Bodenfeuchte geschlossen[9]. Daraus lässt sich der erreichte Verdichtungsgrad ableiten [221]. Bei beiden Verfahren handelt es sich um keine wirkliche Messung der Verdichtung, sondern um eine Bestimmung der Steifigkeitseigenschaften des Bodens. Systeme, welche die reale Verdichtung im Arbeitsprozess messen, existieren noch nicht.

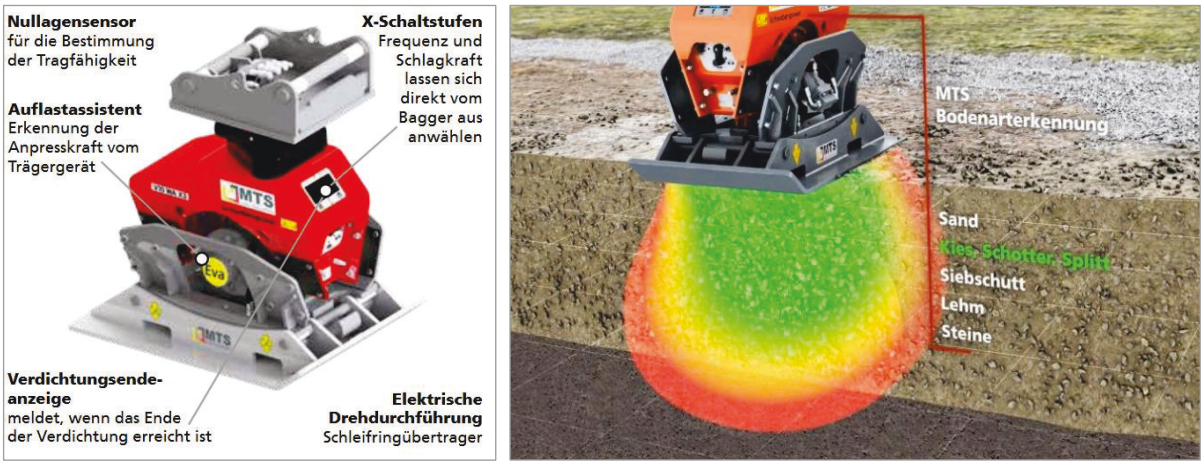


Abbildung 9: Beispiel für raumfüllende Verdichtungskontrolle [221]

[9] Bodenart und Bodenfeuchte können in der Regel als nicht bekannt vorausgesetzt werden (eines der wesentlichen Probleme bei der Bearbeitung von Erdstoffen). Daher wurde das aufgeführte System entwickelt, welches aus den genannten Messdaten mit einem KNN einen Rückschluss auf Bodenart und Bodenfeuchte zulässt.

3.2 SOFTWARESYSTEME

Konventionelle Baumaschinen werden heutzutage weitestgehend gesteuert, das heißt, sie verfügen über Stellgrößen für die Fahr- und Arbeitsaufgabe, welche vom Bediener betätigt werden. Der Mensch fungiert hier als Regler, indem er mit seiner sensorischen Wahrnehmung den Prozess erfasst und durch seine Bedienereingaben die zuvor geplante Bewegung vorgibt. Bei der Automatisierung dieser Arbeitsprozesse muss der Mensch durch Sensorik, Regelungstechnik und Logik ersetzt werden. Wie in anderen Robotikanwendungen operieren automatisierte Baumaschinen entsprechend in den drei Phasen „sense-plan-act“ (erfassen, planen, agieren).

Im vorherigen Kapitel wurde bereits auf die technische Realisierung der sensorischen Erfassung („sense“) eingegangen. Um den Regelkreis zu schließen, müssen die erfassten Sensordaten verarbeitet und daraus die Stellgröße für die Aktoren berechnet werden („act“). Die Aufgabe, konkrete Stellgrößen aus einem Abgleich zwischen Soll- und Istzustand abzuleiten, wird hier als Regelung verstanden. Darüber hinaus stellt sich die Frage, wie bei einer automatisierten Maschine die Sollgrößen generiert werden, da geeignete HMIs lediglich abstrakte Aufgaben definieren („plan“). Beispielsweise soll ein Bagger automatisiert ein Loch mit einer gewissen Ausdehnung an einer bestimmten Position graben. Wie er die Arbeitsausrüstung dazu ansteuern muss, um aus der abstrakten Aufgabe „Loch graben“ eine Trajektorie zu generieren, wird im Folgenden als Prozessplanung bezeichnet.

Regelungstechnische Ansätze

Die Regelungstechnik soll mittels einer Eingangsgröße (bspw. Ventilschieberposition) den Istzustand (Volumenstrom) so verändern, dass er einem Soll-Zustand entspricht. Die Regelung ist seit langem Gegenstand der Auslegung automatisierter Maschinen. Die ingenieurstechnische Umsetzung ist alltäglich und dementsprechend etabliert. Der Einsatz leistungsfähiger Rechentechnik auf der Maschine ermöglicht neben klassischen Regelmethoden auch aufwändigere, rechenintensive Verfahren. Im Folgenden werden diese kurz vorgestellt.

Klassische Regelungstechnik

Ein gemeinhin bekannter Vertreter der klassischen Regelverfahren ist der PID-Feedback-Regler. Dabei wird die Stellgröße über eine proportionale Verstärkung (P-Anteil), einen integrierenden (I-Anteil) und differenzierenden Anteil (D-Anteil) aus der Regelabweichung bestimmt. Der PID-Regler benötigt kein Systemmodell, sondern arbeitet lediglich mit dem aktuellen Fehlersignal. Bei einem Feedforward-Regler (Regler mit Vorsteuerung) wird über ein Berechnungsmodell die Dynamik der Regelstrecke invertiert, um die Stellgrößen zu bestimmen. Der PID-Anteil des Reglers korrigiert dann nur noch Modellabweichungen und externe Störungen.

Model Predictive Control

Ein sehr erfolgreiches Regelungskonzept ist die modellprädiktive Regelung. Dabei wird ein Simulationsmodell (digitaler Zwilling) des zu regelnden Systems aufgestellt. Dieser berechnet die optimalen Regelparameter für einen kurzen, zukünftigen Zeithorizont und optimiert damit dynamisch die Reglereinstellungen. Dieses Regelungsverfahren erzielt äußerst gute Ergebnisse und ist robust, erfordert aber ein mathematisches Modell der Regelstrecke, welches schneller als Echtzeit berechnet werden muss, was wiederum leistungsfähige Rechentechnik auf der Maschine voraussetzt. Die Anforderungen an die Berechnungszeit steigen somit bei hochdynamischen Prozessen[21], [311].

Künstliche Neuronale Netze

Unter künstlicher Intelligenz versteht man ganz allgemein die Fähigkeit einer Maschine kognitive Fertigkeiten des Menschen nachzuahmen. Das kann durch eine deskriptive Beschreibung eines Algorithmus geschehen (wissensbasierte KI) oder aber durch das Training eines generischen Modells mittels

großer Datenmengen (datenbasierte KI). In Zeiten von Big Data hat die Anwendung von datenbasierten Methoden stark an Bedeutung gewonnen.

Beim Maschinellen Lernen wird ein generisches Modell über sogenannte Trainingsdaten parametriert und erkennt somit Beziehungen und Gesetzmäßigkeit allein aus Erfahrung. Ein Vertreter des ML sind Künstliche Neuronale Netze (KNN).

KNN sind eine Methode um Modelle komplexer Prozesse zu generieren ohne deren Funktionsweise mathematisch beschreiben zu müssen. Dabei wird ein generisches Netz aus Übertragungsgliedern (ähnlich den Neuronen und Synapsen des menschlichen Nervensystems) aufgestellt und mittels einer großen Menge an Daten parametriert. Ist die Beschreibung eines komplexen Prozesses, beispielsweise die Werkzeug-Schüttgut-Interaktion oder eines hydraulischen Antriebsmodells, mathematisch nur schwer möglich, erlauben KNN die Bildung eines Ersatzmodells auf Grundlage vieler Messdaten [121], [231], [250]. Ein verbreiteter Ansatz besteht darin, mit KNN große Datenmengen auszuwerten und Vorhersagemodelle bspw. für Energieverbrauch oder Produktivität zu trainieren [233].

Nachteilig ist, dass KNN bei Änderungen im System auch neu trainiert werden müssen.

Neben dem Einsatz als Regelglied eines komplexen Systems, werden KNN insbesondere bei der Bilderkennung eingesetzt, was bei der Umgebungserkennung für autonome Fahrzeuge von großer Relevanz ist.

Grundprobleme der automatisierten Prozessplanung

Für den fahrerlosen Betrieb ergeben sich auf algorithmischer Ebene weitere Aufgaben wie [74], [254]:

- Umgebungserfassung und Kategorisierung
- Kartierung und Positionserfassung (Mapping)
- Navigation
- Trajektorienplanung
- Trajektorienverfolgung
- Prozessplanung
- Kollisionsvermeidung
- Kooperation

Umgebungserfassung und Klassifizierung

Sensoren zur Erfassung der Umgebung liefern unter anderem Abstands- und Intensitätsinformationen der nächsten Reflektionsfläche in Messrichtung. Durch die Anordnung der Sensoren in einem Messgitter können 2D- oder 3D-Punktwolken gebildet werden. Für eine Umgebungserkennung müssen diese Daten in der Regel zuerst segmentiert werden („welche Punkte gehören zum selben Objekt“) und anschließend kategorisiert werden („was ist das für ein Objekt“). Für die Segmentierung gibt es fünf Ansätze (edge based, region based, attributes based, model based, graph based). Modellbasierte Ansätze (bspw. RANSAC-Random Sample Consensus oder HT-Hough Transform) sind gut geeignet, wenn das zu erwartende Objekt bekannt ist (bspw. Identifizierung der Bodenfläche). Region based segmentation Algorithmen sind hingegen robust bei der Segmentierung unbekannter Objekte. Edge-based Verfahren versuchen die Grenzen zwischen Flächen zu identifizieren, welche beispielsweise über Sprünge in den Flächennormalenrichtungen bestimmt werden können. Attributes based Segmentation basiert auf der Gruppierung von Punkten anhand von Eigenschaften wie beispielsweise Dichte, vertikaler Abstand, Normalenrichtung, Intensität, etc. Beim Graph-basierten Ansatz wird die Punktwolke in einen Graphen bestehend aus Kanten und Knoten überführt. Verschiedene Metriken für die Gewichtung können eingesetzt werden um den Graph zu separieren. Eine Vorstellung und Verweise auf weiterführende Veröffentlichungen zu Segmentierungsalgorithmen findet sich in [254].

Bei der Klassifizierung werden die Punkt-Cluster vorgegebenen Kategorien wie Boden, Fahrzeug, Vegetation o.ä. zugeordnet. Auch hier ist ersichtlich, dass eine strukturierte Umgebung mit ausschließlich bekannten Objekten die Klassifizierung von Umgebungsdaten begünstigt. Zur Klassifizierung existiert

eine Vielzahl von anwendungsspezifischen Algorithmen, wobei viele auf maschinellem Lernen und künstlichen neuronalen Netzen beruhen.

Kartierung und Positionserfassung

Grundlegend für das autonome Fahren ist die Kenntnis des Fahrzeugs über die eigene Pose (Position und Orientierung). Meist ist die exakte Pose nur mit hohem technische Aufwand messbar (bspw. Lasertachymeter) oder zu ungenau (GNSS). Aktuell gilt die Fusion aus GNSS und IMU (inertia measurement units) als beste Möglichkeit für eine online Posenbestimmung. Dabei wird die Ortsbestimmung durch das GNSS mit der Orientierungs- und Geschwindigkeitsmessung (Koppelnavigation) durch die IMU ergänzt. Zusätzlich zur Ortsbestimmung und Koppelnavigation kann die Lokalisierung durch eine Karte ergänzt werden. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf den SLAM-Algorithmen (simultaneous localization and mapping), welche die gleichzeitige Kartierung der Umgebung und Positionierung in dieser Karte ermöglichen [55], [178], [312]. Für sich ständig verändernde Baustellenumgebungen mit unkartiertem Terrain ist die Erstellung von semantischen 3D-Karten während des Betriebs eine vielversprechende Perspektive [102]. Einsatzgebiete von automatisch erstellten Umgebungskarten und 3D-Modellen reichen von der Qualitätssicherung, Baufortschritsüberwachung bis hin zur Navigation von automatisierten Systemen. Aktuell findet sich diese Technologie (SLAM-Algorithmen) vorrangig bei Drohnenkameras oder selbstfahrenden Rovern zur Bauwerksvermessung wieder [90].

Navigation

Der Begriff der Pfadplanung bezeichnet die Erstellung einer Fahrroute entlang von Schlüsselpunkten auf einer Karte. Grundlage hierfür ist wiederum eine digitale Karte mit Knotenpunkten, welche die Fahrwege und Haltepunkte darstellen. Im Allgemeinen erfolgt die Pfadplanung dann über Graphensuchalgorithmen, um den Weg vom Start zum Ziel entsprechend verschiedener Kriterien (kürzester, schnellster, effizientester Weg) zu finden. Navigationssysteme implementieren diese Algorithmen bereits seit geraumer Zeit.

Trajektoriengenerierung

Bei der Trajektoriengenerierung wird der zeitliche Verlauf von Position und Orientierung generiert. Beispiele aus dem Bereich Baumaschinen wäre das Werkzeug am Bagger oder ein Betonpumpenarm, der einen bestimmten Weg abfahren soll. Die Trajektorie beschreibt die Bahnkurve des Endeffektors/Werkzeugs, aus der dann die Zustände der einzelnen angetriebenen Gelenke abgeleitet werden können. Jedes angetriebene Gelenk (in der Baumaschinentechnik meist ein Hydraulikzylinder) ist hinsichtlich seiner Verfahrgeschwindigkeit (Zylinderlänge/Zeit) und seiner zu verrichtenden Arbeit limitiert. Unter Beachtung dieser Randbedingungen sowie der Maschinendynamik kann ein Arbeitsprozess optimiert werden. Geschwindigkeit, Genauigkeit, Sicherheit und Effizienz sind verschiedene Zielkriterien bei der Gestaltung einer Trajektorie.

Trajektorienverfolgung

Trajektorienverfolgung (trajectory tracking) umfasst die Aufgabe eine Regelgröße zu bestimmen, um einer gewünschten Bahn zu folgen. Es wird zwischen einfachen und robusten geometrischen Bahnverfolgungsalgorithmen und modellbasierten Methoden unterschieden.

Prozessplanung

Jede abstrakte Aufgabe wie „Fahre von A nach B“, oder „Grabe ein Loch der Größe X“ lässt sich in viele Einzelaufgaben untergliedern. Diese Aufgaben werden meist in einem Zustandsautomaten definiert, welcher die verschiedenen Handlungsmöglichkeiten beschreibt. Ein Zustandsautomat ist eine modellhafte Beschreibung eines Verhaltens, bestehend aus Zuständen und Zustandsübergängen. Um von einer Teilaufgabe zur nächsten zu gelangen, müssen die Transitionsbedingungen erfüllt sein. Um zum

Beispiel vom Zustand „Maschine steht“ in den Zustand „Maschine fährt “ zu wechseln, müssen Transitionsbedingungen wie „Motor ist an“, „Bremsen sind offen“, etc. erfüllt sein. Neben den funktionalen Anforderungen an den Betrieb erhöhen die Anforderungen an Effizienz, Produktivität und Sicherheit die Komplexität solcher Zustandsautomaten enorm. Die Übertragbarkeit solcher Zustandsautomaten zwischen unterschiedlichen Maschinen und Einsatzbedingungen ist sehr begrenzt. Es existieren auch stochastische oder datenbasierte Ansätze zur Entscheidungsfindung, welche aber schwierig zu generalisieren sind und nur bedingt nachvollziehbare Entscheidungen treffen.

Kollisionsvermeidung

Einer der wichtigsten Aspekte bei der automatisierten Bewegung ist die Kollisionsvermeidung mit statischen oder dynamischen Objekten. Grundlage ist die Kenntnis über die Position des Objekts, dessen Geschwindigkeitsvektor sowie der eigenen Position und Fähigkeit zur Geschwindigkeitsänderung. Dies erfordert eine Erfassung der räumlichen sowie zeitlichen Systemkonfiguration, was die Problemkomplexität erhöht. Aufbauend auf der Klassifizierung der Umgebungsdaten müssen die erkannten Objekte nun über den Zeitverlauf verfolgt werden, um die Geschwindigkeit zu überwachen. Durch gemeinsame Kenntnis der eigenen und fremden Trajektorien werden kritische Bereiche bei der Pfadplanung berücksichtigt. Die Ergebnisse der Kollisionsvermeidung müssen in die Entscheidungsfindung bei der Prozessplanung mit einfließen um entweder auszuweichen oder in einen sicheren Zustand zu wechseln. Da die Position eines fremden Objekts nur bedingt prognostiziert werden kann, ist die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation bei der Kollisionsvermeidung von großer Bedeutung.

Kooperation

Kooperation umfasst zum einen die direkte Zusammenarbeit, bspw. ein Bagger belädt einen Muldenkipper. Des Weiteren können Informationen verschiedener Maschinen genutzt werden, um beispielsweise Umgebungsinformationen zu teilen, Prozessabläufe logistisch zu koordinieren und Fahrwege abzustimmen um Kollisionen zu vermeiden. Für die technologische Umsetzung müssen die Maschinen einander erkennen (bspw. über Kamerasysteme, 3D-Scans) oder miteinander kommunizieren (bspw. über Funkverbindung).

3.3 KOMMUNIKATION

3.3.1 Digitale Datenübertragung

Automatisierung erfordert die Verwendung von Rechentechnik, welche über analoge oder digitale Schnittstellen verfügt. Moderne Maschinen verfügen bereits über CAN-Bus-Systeme, welche eine digitale Datenübertragung über das gesamte Bordnetz ermöglichen. Meist kommunizieren die Teilsysteme der Maschine (Motor, Getriebe, Hydraulik, HMI, etc.) über Bussysteme miteinander. Bei Maschinen kleinerer Leistungsklassen sind oftmals noch hydraulische Joysticks verbaut. Maschinen größerer Leistungsklassen verfügen (Bagger und Radlader > 20t) im Allgemeinen bereits über elektronische Joysticks, welche Arbeits- und Fahrfunktionen übernehmen können. Diese Maschinen verfügen somit über die notwendige Elektrifizierung, um Automatisierungsfunktionen zu implementieren. Leider sind die CAN-Protokolle der Hersteller proprietär und eine Ansteuerung der Maschinenfunktionen ist nur in Zusammenarbeit mit dem OEM möglich. Viele Hersteller implementieren auf einem zusätzlichen Bus jedoch die SAE J1939[10], welche die Übertragung von Diagnosedaten im Nutzfahrzeugbereich definiert [362].

[10] Die SAE J939 ist ein von der amerikanischen Society of Automotive Engineers vereinbartes Netzwerkprotokoll.

3.3.2 Funktechnologien

Drahtlosverbindungen zur Datenübertragung sind alltäglich und werden kontinuierlich weiterentwickelt. Die Datenrate und Reichweite von Funkverbindungen wird weiterhin steigen, während die Latenz weiter sinkt. Zu unterscheiden sind lokale Netzwerke wie WLAN, ZigBee oder Bluetooth sowie zelluläre Netzwerke (Mobilfunk) wie UMTS(3G) oder LTE(4G). WLAN umfasst lokale Funknetzwerke entsprechend dem IEEE-802.11-Standard. WLAN nutzt Frequenzen im 2,4 GHz, 5 GHz oder 60 GHz-Band. Für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen existieren bereits Spezifikationen aus dem Personen-Kraftfahrzeugbereich. Diese umfassen die Vernetzung von Car2Car (C2C), Car2Everything (C2X), Car2Infrastucture (C2I) sowohl von Maschinenherstellern als auch von Telematikanbietern. Eine Prüfung des Anbieters auf Compliance und eine juristische Absicherung müssen bilateral geklärt werden [347].

3.3.3 Anwendungsbeispiele

Condition Monitoring

Condition Monitoring bezeichnet die permanente Überwachung von Maschinenzuständen (bspw. Beschleunigung, Temperatur, Druck) und deren Diagnose. Ziel ist beispielsweise, aufgrund von Normabweichungen Verschleiß oder bevorstehendes Versagen zu erkennen und frühzeitig zu reagieren. Außerdem können Betriebscharakteristika analysiert und so der Arbeitsablauf oder Kraftstoffverbrauch optimiert werden. Auch eine belastungs- und einsatzbasierte (und nicht Betriebsstunden-basierte) Wartungsprognose (predictive maintenance) ist realisierbar. Grundlage ist jedoch die Kenntnis des Normzustands der gemessenen Größe oder des zulässigen Einsatzbereichs (beispielsweise Druckverlauf im Hydraulikzylinder, um die Arbeitsintensität abzuschätzen). . Die Vielfalt der Maschinen und die Heterogenität der Einsatzfälle macht die Definition der Norm äußerst schwierig. Für die Prognose von Schadensfällen auf Basis von Belastungsmessungen wird zudem ein Schädigungsmodell des relevanten Bauteils benötigt, was nur sehr aufwändig ermittelt werden kann [101].

Identifikation von Werkzeugen

Bagger sind universelle Geräteträger und können vielfältige Anbauwerkzeuge wie z.B. Tiltrotator (Werkzeugadapter zum Drehen und Schwenken das Baggerwerkzeugs), Greifer, Magnet, Hammer oder Zange tragen. Diese werden teilweise auch hydraulisch oder elektrisch angetrieben und gesteuert, was eine Konfiguration der Trägermaschine (Joystickbelegung, Definition von Anschlussgrößen) erfordert. Mit einer automatischen Erkennung der Anbauwerkzeuge können Einstellungen automatisch getroffen werden. Realisiert wird die Werkzeugerkennung über RFID-Technologie. Der RFID-Transponder sitzt an der Koppelstelle des Werkzeugs. Der Empfänger ist im Schnellwechsler verbaut. Beim Verbolzen des Werkzeugs wird die benötigte Information aus dem Transponder gelesen und in der Maschinensteuerung können die notwendigen Einstellungen gesetzt werden [108].

Flottenmanagement

Flottenmanagementsysteme aggregieren Zustandsdaten von mehreren Maschinen über Mobilfunk in einem Cloudservice. Dabei werden Daten wie Position, Betriebsstunden, Kraftstoffverbrauch, Wägedaten, Asphalttemperaturen etc. überwacht. Dies dient zunächst zur betriebswirtschaftlichen Analyse, Planung und Abrechnung des Maschineneinsatzes. Des Weiteren kann auch Geofencing umgesetzt werden, wobei die Position der Maschine einen vorgegebenen Bereich nicht verlassen darf. Dies dient auch dem Diebstahlschutz [155].

3.4 ANTRIEBSTECHNIK

Die Antriebstechnik umfasst im Allgemeinen die Erzeugung einer oder mehrerer Bewegungen mittels Kraftübertragung. Der Begriff umfasst dabei nicht nur das Primäraggregat (ugs. Antrieb), welches mittels Energiewandlung eine Bewegung erzeugt, sondern es handelt sich hierbei um ein komplexes technisches System, welches die vielfältigen Funktionen der Baumaschinen versorgt. Dieses Antriebssystem besteht somit aus der Leistungsquelle, Leistungswandlern, Übertragungs- und Speicherelementen, Verbrauchern sowie der Steuerungstechnik.

Allgemeine Entwicklungsziele der Antriebstechnik für Baumaschinen sind, wie in vielen anderen Anwendungsbereichen, die Steigerung der Energieeffizienz, Senkung der Emissionen, Reduzierung von Energieumwandlungen, Ausweitung von Funktionen, eine hohe Leistungsdichte, ein kleiner Bauraum, die Verbesserung der Steuerbarkeit, gesteigerter Bedienkomfort und Betriebssicherheit, die Verbesserung der Ergonomie sowie die Senkung der „Total Cost of Ownership“. Für das Erreichen dieser Ziele steht oftmals die Automatisierung von einzelnen Bewegungen bis hin zu kompletten Prozessen im Fokus.

Der oftmalige Zielkonflikt von vorgeschriebener Reduzierung der Emissionen und Effizienz, bei gleichzeitig unveränderlichen Anforderungen an die Antriebsleistung und Kostenstruktur einer Baumaschine, führte zu neuen alternativen Konzepten bzw. Ansätzen der Antriebstechnik, welche teilweise dem Markt zur Verfügung stehen.

Die Einsatzbereiche von Baumaschinen sind sehr vielseitig, was sich neben den unterschiedlichsten Ausführungen vor allem in den unterschiedlichsten Leistungs- und Gewichtsklassen widerspiegelt (Abbildung 10).

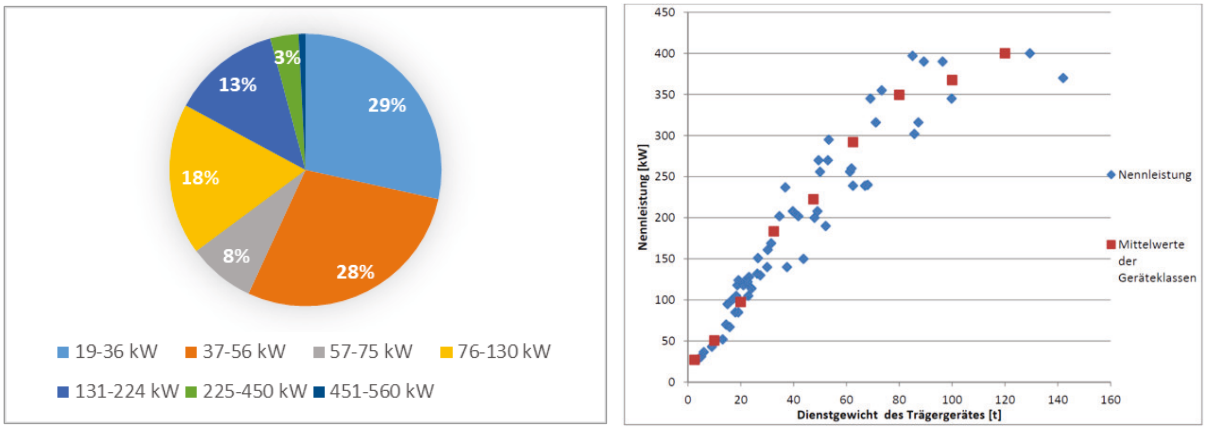


Abbildung 10: Baumaschinenbestand > 19 kW für das Jahr 2013 in Deutschland (links) [30] und Zusammenhang zwischen Dienstgewicht und Nennleistung von Hydraulikbaggern (rechts) [198]

Der technologische Fortschritt ermöglicht neue Maschinenkonzepte für bestimmte Anwendungen, jedoch wird es nicht das eine, beste Antriebskonzept für alle Maschinen geben (Abbildung 12 und Abbildung 13). Es wird daher auf einen Mix der Antriebssysteme hinauslaufen, aus z.B. Verbrennungsmotor mit Dieselkraftstoff (A1) oder synthetischen (regenerativ erzeugten) Kraftstoffen (A2), dieselelektrische Hybridsysteme (B), Elektromotor und Batterie (C) oder mit leitungsgebundener Versorgung (D) oder gar mit einer Wasserstoff-Brennstoffzelle (E). Alle genannten Systeme haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile und werden in unterschiedlichen Anwendungsbereichen (Abbildung 11) ihre Berechtigung haben [259], [353]. Die Grenzen zwischen den einzelnen Bereichen werden sich durch technologische Weiterentwicklung und regulatorische Vorgaben verschieben, aber nicht auflösen. Insbesondere die Frage, wie lange das System A1 und B1 (Dieselantrieb) für Baumaschinen noch benötigt wird, wird dadurch entschieden, wie intensiv an den alternativen Lösungen (insbesondere A2/B2 und E) in den nächsten Jahren gearbeitet wird.

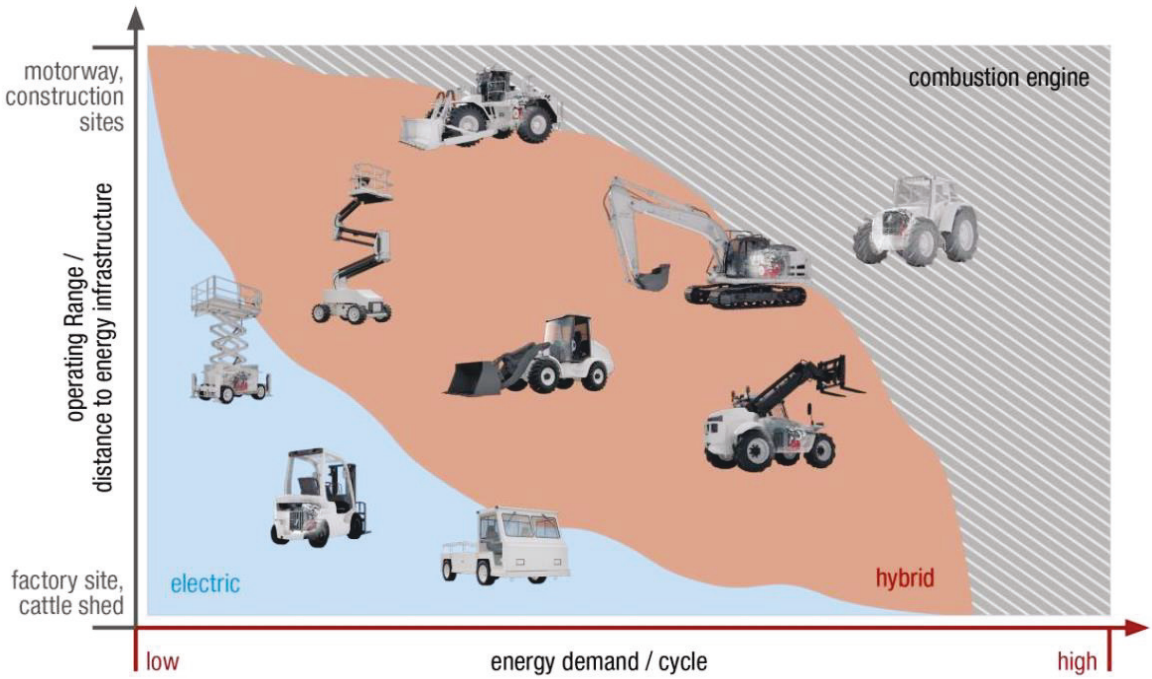
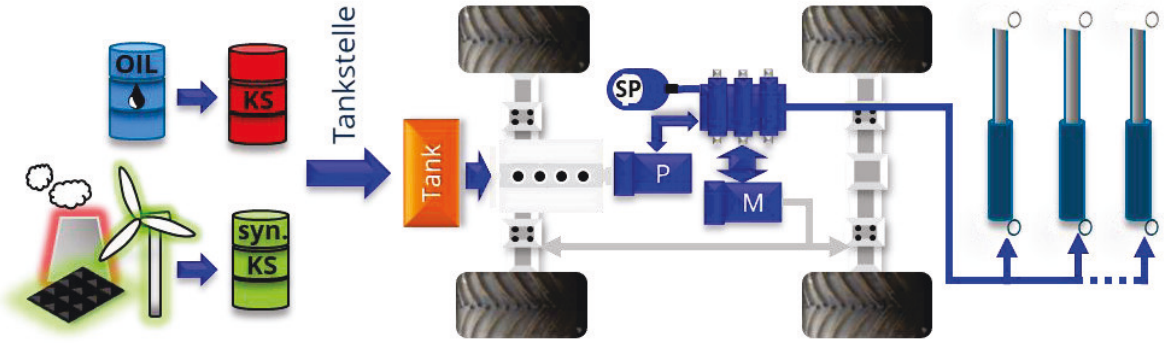


Abbildung 11: Abhängigkeit der Antriebssysteme von Arbeitszyklus und Leistungsbedarf [259]

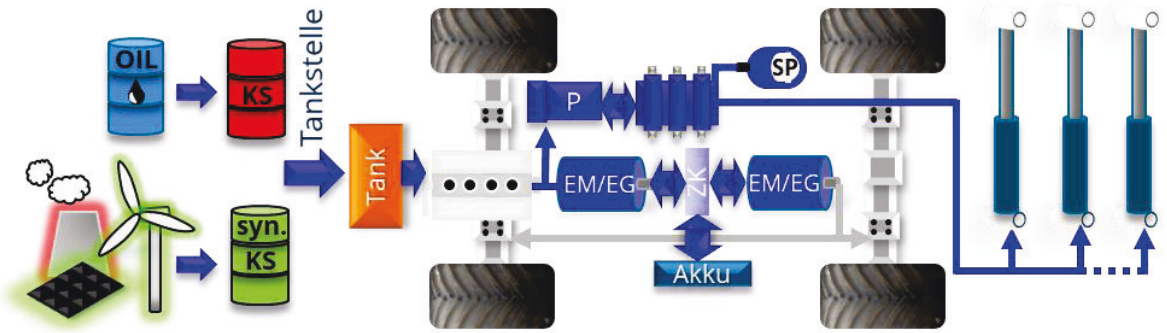
Antriebskonzepte mit Primäraggregat Verbrennungsmotor

Stand der Technik für mobile Anwendungen ist derzeit noch immer der Diesel-Verbrennungsmotor als Primäraggregat (Abbildung 12, A1). In absehbarer Zeit wird man auf den Einsatz fossiler, zukünftig auch regenerativ erzeugter Kraftstoffe im Verbrennungsmotor nicht verzichten können. Hauptgrund hierfür ist die hohe Energiedichte, mit der die chemisch gebundene Energie in einfachen, relativ wenig Platz beanspruchenden Kraftstoffbehältern (Energiespeicher) mitgeführt werden kann. Bei einem ausreichend großen Tank ist ein fortlaufender mobiler Arbeitseinsatz von bis zu 24 Stunden bei gleichzeitig sehr kurzer Nachtankzeit möglich. Der Verbrennungsmotor ist zudem durch seine hohe Leistungsstärke, Robustheit und Effizienz gekennzeichnet.

A) Verbrennungsmotor mit konventionellen (A1) oder mit regenerativ erzeugten synthetischen (A2) Kraftstoffen, konventioneller Antriebsstrang



B) Verbrennungsmotor mit konventionellen (B1) oder mit regenerativ erzeugten synthetischen (B2) Kraftstoffen, Elektrogeneratorische Leistungswandlung (Dieselelektrischer Antrieb)



Legende

EG	Elektro-Generator	M	Hydraulikmotor	ZK	Zwischenkreis
EM	Elektro-Motor	P	Hydraulikpumpe		
KS	Kraftstoff	SP	Hydraulikspeicher		

Abbildung 12: Antriebskonzepte mit Primäraggregat Verbrennungsmotor

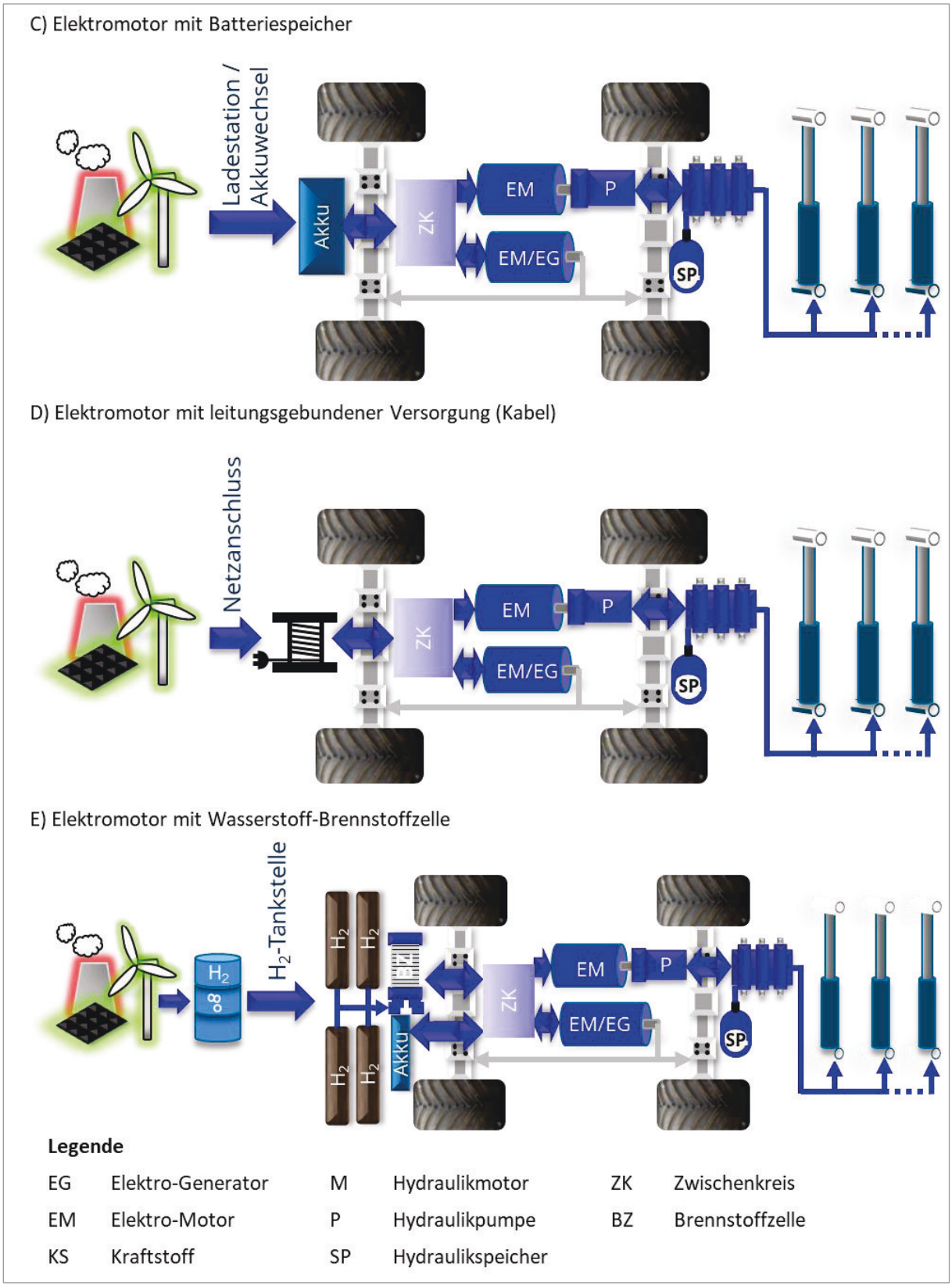


Abbildung 13: Antriebskonzepte mit Primäraggregat Elektromotor

Die Schadstoffemissionen wurden durch stufenweise Verschärfung der Emissionsvorschriften (EU-Richtlinie 1628/2016) über die letzten 15 Jahre massiv reduziert [352]. Dies wurde vor allem durch die kontinuierliche Verbesserung des Verbrennungsprozesses sowie durch eine Abgasnachbehandlung mittels Partikelfilter und SCR-System verwirklicht. Inzwischen ist allerdings ein Punkt erreicht, an dem

eine weitere Reduzierung nur noch durch extrem hohe technische Aufwände realisiert werden kann. Die zuletzt umgesetzten Maßnahmen der Emissionsreduzierung führten zudem gleichzeitig zu einer Erhöhung des Kraftstoffverbrauches und damit zu einer Erhöhung des CO_2-Ausstoßes [207],[146], [3]. Daher ist von einer weiteren Verschärfung der Emissionsrichtlinien auf der bestehenden technologischen Basis (Verbrennungsmotoren) dringend abzuraten. Da es sich aber beim Dieselkraftstoff um einen fossilen Energieträger handelt, der langfristig aus ökologischer und gesundheitsrelevanter Sicht durch regenerative Alternativen ersetzt werden sollte, müssen stattdessen neuartige Antriebssysteme entwickelt und in den Markt gebracht werden.

Als "CO_2-neutral" definierte Alternativ-Kraftstoffe gelten Wasserstoff, Methan oder synthetischer Diesel. Diese lassen sich prinzipiell in konventionellen Verbrennungsmotoren durch geringe Modifikationen einsetzen. Sie ermöglichen so die Nutzung chemischer Energieträger, die durch Umwandlung regenerativ erzeugter elektrischer Energie bereitgestellt werden können. Diese sogenannten E-Fuels sollen mittels Power-to-Gas oder Power-to-Liquid Verfahren hergestellt werden. Dabei wird z.B. Wasser per Elektrolyse in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. In einem weiteren Prozess bildet der so gewonnene Wasserstoff zusammen mit Kohlenstoffmonoxid ein Synthesegas, aus welchem mittels Synthese langkettige und flüssige Kohlenwasserstoffe (synthetische Kraftstoffe) gewonnen werden [299] [77]. Das dafür benötigte CO_2 kann mittels Carbon Capturing aus der Umgebung oder direkt aus Industrieemissionen gewonnen werden. Die Power-to-Gas und Power-to-Liquid Kraftstoffe aus regenerativen Quellen haben neben der annähernd CO_2-neutralen Bilanz den Vorteil, dass auf eine vorhandene Infrastruktur und Motortechnik zurückgegriffen werden kann (Abbildung 12, A2). Zur Verbrennung von reinem Wasserstoff wurden in der Vergangenheit spezielle Gasmotoren auf Prototypenbasis entwickelt. Neuere Ansätze hingegen beruhen auf Umrüstkits, um herkömmliche Serienmotoren auf die Verbrennung von Wasserstoff umzustellen [156]. Alternativ kann der Wasserstoff direkt für einen Brennstoffzellenantrieb genutzt werden, dabei wird aus dem Wasserstoff zunächst elektrische Energie gewonnen und mit dieser werden elektromotorische Antriebe versorgt. Die Brennstoffzellentechnologie ist jedoch technisch sehr komplex und für den höheren Leistungsbereich der Baumaschinenbranche noch immer Forschungsgegenstand.

Hydraulische Verbraucher

Neben dem Dieselmotor als Primäraggregat auf der einen Seite besteht eine heutige typische Baumaschine auf der anderen Seite aus Verbrauchern (Arbeitsausrüstung, Fahr- und Schwenkantrieb) aus mechanischen und vor allem hydraulischen Komponenten, wie z.B. Hydraulik-Pumpen, Hydraulik-Motoren oder Hydraulik-Zylinder. Das Dieselhydraulische Antriebskonzept (Abbildung 12, A1) ist bei Baumaschinen derzeit das Maß der Dinge. Dieselhydraulische Antriebssysteme zeichnen sich durch ihre hohe Leistungsdichte, Kompaktheit, Robustheit, geringes Gewicht und günstige Kosten aus. Für Leistungsübertragung, Leistungswandlung, Speicher, Rekuperation etc. gibt es zahlreiche weitere Ausführungsmöglichkeiten.

Das in Baumaschinen verbaute Hydrauliksystem wird als Mobilhydraulik bezeichnet und kann in hydrodynamisch und hydrostatische Systeme unterschieden werden. Die hydrodynamische Kraftübertragung besteht aus einem hydrodynamischen Wandler zwischen Dieselmotor sowie Getriebe und ermöglicht ein hohes Drehmoment bei kleiner Drehzahl bzw. Drehzahl null. Der hydrodynamische Wandler besteht sehr vereinfacht aus einem Pumpen- und einem Turbinenrad in einem Gehäuse. Angetrieben vom Primäraggregat erfassen und beschleunigen die Schaufeln des Pumpenrads auf der einen Seite ein Fluid (Hydrauliköl). Dabei wird mechanische Energie in Strömungsenergie umgewandelt. Diese wird auf der anderen Seite vom Turbinenrad wiederum aufgenommen und in mechanische Energie am Abtrieb gewandelt. Bei konstanter Motorleistung erfolgt die Anpassung von Abtriebsdrehzahl und –drehmoment (Ausgangsgrößen des Wandlers, die dem Verbraucher. z.B. Fahrantrieb. zur Verfügung stehen) an die Anforderung des Arbeitsprozesses stufenlos und selbsttätig. Sinnvoll ist dieses System vor allem als Fahrantrieb bei Arbeitsprozessen mit hohem Fahranteil. Die hydrostatische Kraftübertragung besteht aus Pumpe und Hydraulikmotoren, bei Fahranwendungen in der Regel im geschlossenen Kreis, örtlich voneinander getrennt angeordnet, durch flexible Hydraulikschläuche ver-

bunden. Diese hydraulischen Getriebe, die direkt am Motor oder über ein Verteilergetriebe angeflanscht sind, verteilen die Primärenergie auf die einzelnen Funktionen der Maschine. Die Hydraulik ist dabei unabdingbar für die Arbeitsausrüstung durch die Erzeugung hoher Kräfte mittels hydraulischer Aktoren. Hierbei wird hydraulische Leistung (p, Q) in eine mechanische translatorische (v, F) oder rotatorische Leistung (ω, M) gewandelt.

Aufgrund der Forderungen nach Robustheit, einfachem Handling sowie geringen Herstellungskosten setzten sich in der Vergangenheit hydraulische Antriebssysteme ohne elektronische Steuerungen auf dem Markt durch. Die Vielzahl von anwendungsorientieren Lösungen sind heutzutage hauptsächlich hinsichtlich Energieeffizienz getrieben [345]. Herkömmliche Baumaschinen sind bedienergeführt, d.h. der Bediener gibt die Sollbewegung der Antriebe über Bedienelemente (z.B. Joystick) vor. Hinsichtlich Bedienbarkeit und Energieeffizienz haben sich bedarfsgerechte Systeme, wie z.B. Load-Sensing Systeme mit Lastkompensation (lastabhängige Druckanpassung zur Reduzierung von Energieverlusten [276]), etabliert und sind heute Stand der Technik. In den meisten Erdbewegungsmaschinen der Kompakt- und Mittelklasse (<60 t Einsatzgewicht) sind neben mechanischen hauptsächlich hydraulische Ansteuerungen anzutreffen. Dabei ist aufgrund fester Verhältnisse der Vorsteuerdruck proportional zur Joystickauslenkung des Bedieners. Ein situationsabhängiges Eingreifen in die Steuer- bzw. Regelstrecke ist nicht möglich. Mittels elektrischer Stellglieder (Aktoren) könnte dagegen die Ausgangsgröße des Systems jederzeit beeinflusst werden, bedarf jedoch eine Anpassung der Systemkomponenten.Daher ist aufgrund der Forderungen nach Bedienerunterstützung, Leistungssteigerung und Prozesseffizienz die elektrohydraulische Ansteuerung in den Fokus gerückt und wurde erstmalig Anfang der 2000er Jahre umgesetzt [346]. Bis heute sind jedoch aufgrund der Unsicherheit bezüglich Robustheit sowie der Markt- und Kundenanforderungen vorwiegend hydraulisch gesteuerte Maschinen anzutreffen. Auf der Seite der Hersteller kommen zudem Themen der Softwareentwicklung und der funktionalen Sicherheit hinzu. In den letzten Jahren finden im Bereich der Erdbewegungsmaschinen (< 60 t Dienstgewicht) Technologieentwicklungen wie positionsgeregelte Ventile mit Feldbusschnittstelle (Ventilhub resultiert aus Positions-Istwert und Sollwert per integrierter Regelelektronik, Datenübertragung mittels Feldbus-Schnittstelle), Verdrängersteuerungen (Geschwindigkeitssteuerung eines hydraulischen Antriebs durch die Änderung des Verdrängungsvolumens einer Pumpe bzw. eines Motors), Konzepte mit getrennten Steuerkanten (Auflösung der zentralen Ventilstruktur hin zu dezentralen kleineren Ventilen) oder hybride Antriebsstrukturen (Kombination hydrostatischer und elektrischer Verbraucher) zunehmend Anwendung. Diese werden sowohl von OEM ([62] [333]) als auch von Zulieferern ([40] [140] [251]) vorgestellt.

Die Hauptherausforderung der Antriebstechnik zur Realisierung von automatisierten Maschinenbewegungen liegt vor allem in der Systemarchitektur. Die eingesetzten hydraulischen Komponenten sowie deren räumliche Anordnung (Volumina der Leitungen) definieren deren statische und dynamische Eigenschaften (Laufzeiten, Schwingungsverhalten, Volumenstrom, Leistungen) und haben somit Einfluss auf die Möglichkeiten und Grenzen der Automatisierungsalgorithmen. Hinzu kommen die Steuerungsarchitektur (Rechenleistung, Algorithmen, Signallaufzeiten) und vor allem die Sensorik. Insbesondere die Lageinformation der Arbeitsausrüstung im Raum sowie die Zylinderpositionen müssen für Automatisierungsaufgaben zwingend erfasst werden, was bei Baumaschinen im Bestand nicht bzw. nur durch aufwändige Nachrüstung möglich ist (vgl. Kap. 3.1) [323].

Hybride Antriebskonzepte

Generell lässt sich die deutlich zunehmende Forderung nach CO_2-armen Antriebstechniken beobachten, die auf unterschiedliche Art und Weise umgesetzt werden können. Gegenüber der Optimierung des Verbrennungsprozesses steht vor allem die Verbesserung der Energieeffizienz des gesamten Antriebssystems bzw. der einzelnen Komponenten und deren Steuerung im Fokus. Neben der bedarfsgerechten Bereitstellung von Hilfsenergie und der Anpassung der primär erzeugten Antriebsleistung auf die aktuelle Abnahme der Verbraucher werden auch leistungsverzweigte Antriebssysteme ohne und mit zusätzlichen, wieder aufladbaren Speichern eingesetzt (Hybrid). Fast allen derartigen Lösungsansätzen gemeinsam ist die steigende Komplexität und der erhöhte technische Aufwand mit entsprechend steigenden Investitionskosten.

Ein Fahrzeug mit einem Hybridantrieb besitzt nach der üblichen Definition mindestens zwei verschiedene Energiewandler und zwei verschiedene Energiespeichersysteme im Fahrzeug. Die Energiewandler können mechanische Energie zum direkten Fahrzeugantrieb erzeugen oder elektrische Energie für den Elektroantrieb bereitstellen. Die jeweiligen technischen Ausführungen sind genauso vielfältig wie die Maschinen selbst. Es lässt sich je nach Systemstruktur zwischen parallelen und seriellen Hybridantrieben sowie nach genutzten Energieformen zwischen dieselelektrischen, dieselhydraulischen oder elektrohydraulischen Hybridkonzepten unterscheiden. In Abbildung 12, B ist ein dieselelektrisches Antriebskonzept als serieller Hybrid dargestellt. Bei einem seriellen Hybrid führt der gesamte Leistungsfluss über alle Leistungswandler. Beim parallelen Hybrid hingegen können der Verbrennungsmotor und der Elektromotor unabhängig voneinander Leistung bereitstellen.

Das erste funktionsfähige dieselhydraulische Hybridsystem kam in einem Hydraulikbagger im Jahr 2008 auf den Markt [165]. Der elektrische Schwenkmotor/-generator wandelt dabei die kinetische Energie des Oberwagens beim Abbremsen in elektrische Energie um. Diese so gewandelte Energie wird in Hochleistungskondensatoren, sogenannten Supercaps, gespeichert. Beim Beschleunigen des elektrischen Schwenkantriebs wird dieser sowohl über den vom Dieselmotor angetriebenen Generator als auch aus den Supercaps mit elektrischer Leistung versorgt – damit wird der Dieselmotor entlastet. Auf die gleiche Technologie setzen heutzutage auch andere Hersteller ([135] [163]), manche nutzen hingegen einen hydraulischen Druckspeicher, in dem Hydrauliköl unter Druck gespeichert wird und der beim Entladen hydraulische Energie abgibt (dieselhydraulischer Hybrid) [63]. Die häufigsten Bauformen sind Kolben-, Blasen- und Membranspeicher, die mit Drücken bis 1000 bar beaufschlagt werden können. Im Vergleich zu elektrischen Energiespeichern haben Hydrospeicher eine erheblich höhere Leistungsdichte. Nach Herstellerangaben erreichen moderne Hybridlösungen (inkl. effizienter Komponenten, Assistenzsystemen, etc.) eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bzw. der CO_2-Emissionen von bis 40 %. Praktische Erfahrungen und Forschungsvorhaben zeigten jedoch, dass je nach Anwendung und betrachteten Prozessen die Einsparpotenziale zwischen 0 und 30% liegen können [237] [344].

Parallel dazu ermöglichen Antriebssysteme mit Speicherlösungen, kurzzeitige Lastspitzen, die zwar regelmäßig, aber immer nur für wenige Sekunden abgerufen werden, auszugleichen. Bei gleichem Leistungsvermögen der Maschine kann somit ein kleinerer Dieselmotor eingesetzt werden (Downsizing) bzw. muss durch den Hybridverbund ein geringerer Anteil der Leistung durch den Verbrennungsmotor erzeugt werden (Phlegmatisierung) [198]. Diese Systeme sind technisch ausgereift, stehen dem Markt zur Verfügung und zählen durch stetige Optimierung auf der Komponenten- und Steuerungsebene neben der Start-Stopp-Funktion (wenn kein Energiebedarf für Fahr- und Arbeitsfunktionen besteht, wird unter Voraussetzung einer ausreichenden Kraftreserve für einen hydraulischen Start der Verbrennungsmotor abgeschaltet) zum Stand der Technik. Jedoch finden sämtliche am Markt existierenden Hybridkonzepte aufgrund des deutlich höheren Preises wenig Akzeptanz beim Anwender.

Antriebskonzepte mit Primäraggregat Elektromotor

Hohe Kraftstoffpreise ziehen entsprechende Betriebskosten nach sich. Umweltbeeinträchtigung sowie Geräuschemissionen müssen sinken, der Bedienerkomfort verbessert werden. Eine Chance, diese Ziele zu erreichen, bietet der Wechsel auf neuartige elektrische Antriebstopologien. Eine Elektrifizierung des Antriebsstranges ermöglicht neben der lokalen Emissionsfreiheit einen höheren Gesamtwirkungsgrad, vor allem im häufig auftretenden Teillastbereich. Steuerungsfunktionen sowie Teilautomatisierungen sind einfacher umsetzbar und Rekuperationspotenziale (Energierückgewinnung aus dem Prozess z.B. durch generatorisches Bremsen) können genutzt werden, sofern der Arbeitsprozess diese Potenziale bietet.

Von einer vollelektrifizierten Baumaschine wird gesprochen, wenn das Primäraggregat, bisher der Verbrennungsmotor und Tank, durch einen Elektromotor und Batterie ersetzt wird. Die Arbeitsfunktionen der Maschine werden auch weiterhin hydraulisch ausgeführt, weil hydraulische Antriebe eine wesentlich größere Kraft- und Leistungsdichte bieten als elektrische Antriebe. Beim Fahrantrieb dagegen kann aus funktionaler Sicht eine Elektrifizierung durchaus sinnvoll sein. Es wird oft irrtümlich angenommen,

dass eine vollelektrifizierte Maschine nur noch elektrische Antriebe enthält, das ist jedoch nicht der Fall **(**Abbildung 13, C).

Bei der Umsetzung vollelektrischer Antriebssysteme sind Unterschiede in Abhängigkeit des Einsatzgewichtes festzustellen. Sowohl die Kompaktklassen der Radlader als auch der Bagger bis zu einem Einsatzgewicht von ca. 5 t werden von einigen Herstellern als vollelektrische Varianten angeboten - sogenannte Zero-Emission-Baumaschinen ([339] [340] [341] [334]). Charakteristisch für die Antriebssysteme ist die Verwendung von zwei Elektromotoren. Eine Einheit dient als zentraler Fahrantrieb, wobei die Leistung meist klassisch über Kardanwellen, Differenziale und Getriebe an die Räder übertragen wird. Der zweite E-Motor bildet eine Elektromotor-Pumpeneinheit zur hydraulischen Versorgung der Arbeitsausrüstung, da Hydraulikzylinder zur Realisierung der notwendigen Kräfte benötigt werden. Dabei wird der Volumenstrom über die Drehzahl des Elektromotors gesteuert und mittels eines Steuerblocks an die verschiedenen Verbraucher verteilt. Als Betriebszeit, begrenzt durch die Speicherkapazität der Batterien, wird idR. ein Werktag von 6 bis 8 h angegeben. Neben dem Laden am 230 V-Spannungsnetz ermöglicht eine Schnellladefunktion eine 80 %-ige Aufladung innerhalb von 1 bis 2 h. Voraussetzung dafür ist allerdings der Zugang zu einer Versorgungsspannung mit entsprechend hoher Leistungsfähigkeit, was auf Baustellen bisher meist nicht der Fall ist.

Batterieelektrische Maschinen größerer Leistungsklassen werden zwar auf Messen vorgestellt, befinden sich aber noch immer im Prototypenstatus, z.B. ein 11 t Mobilbagger mit einer Akkukapazität von 146 kWh bei einer installierten Leistung von 75 kW und Betriebszeit von 8 h [205] oder ein voll elektrisch betriebener 26 t Bagger mit 120 kW Antriebsleistung. Das Batteriepack bringt ein Gewicht von 3,4 t auf die Waage und die Kapazität von 300 kWh verspricht einen halben Tag Betrieb [260]. Diese Beispiele deuten bereits die Grenzen der Elektrifizierung bei größeren Baumaschinen an. Werden Maschinen größerer Klassen betrachtet, finden sich ausschließlich dieselelektrische oder kabelgebundene Antriebssysteme, um den hohen Leistungs- und Energiebedarf der Baumaschinen abzudecken (Abbildung 13, D). Beispielhaft für kabelgebundene Systeme sind hier ein 210 t Bagger mit 850 kW Antriebsleistung [193] oder ein Seilbagger mit 130 t Einsatzgewicht mit einer Leistung von 550 kW [17] zu nennen.

Im Bereich der Automobilbranche [315] und bei Flurförderzeugen (Fördermittel für den horizontalen, innerbetrieblichen Gütertransport, z.B. Gabelstapler) [197] hält die Brennstoffzellentechnologie in der Serienproduktion Einzug. Im Bereich der Baumaschinen sind solche Konzepte (Abbildung 13, E) noch weit entfernt vom Stand der Technik. Nach Kenntnis der Verfasser sind diesbezüglich weder konkrete Aktivitäten bei den Maschinenherstellern noch, mangels entsprechender Förderprogramme, an den Forschungsstellen in Bearbeitung.

Kritische Bewertung zur Elektrifizierung der Baumaschinen

Im Bereich der E-Mobilität (PKW) gibt es tagtäglich neue Meldungen über neue Produkte, dagegen befindet sich der Großteil der elektrifizierten Baumaschinen noch im Prototypenstatus, laut Herstellerangaben in einigen Fällen kurz vor der Serieneinführung. Die elektrischen Antriebslösungen müssen noch unter Beweis stellen, dass sie genauso leistungsfähig und robust sind wie die bewährten Antriebslösungen auf der Basis von Verbrennungsmotoren. Aus technischer sowie langfristig aus ökologischer Sicht ist die Elektromobilität durchaus positiv zu bewerten, jedoch sind kritische Fragen angebracht, da spezifische technische Herausforderungen (Speicherkapazität, Bauraum, Kommunikationsschnittstellen), Sicherheitsaspekte (Hochspannung, defekter Akkumulator), Kostenstruktur (Preiserhöhung von Neu- und Gebrauchtmaschinen) zu klären sind.

Der E-Antrieb arbeitet lokal emissionsfrei und ist angesichts der gesundheitsgefährdenden Schadstoffe fossiler Verbrennungsrückstände zu befürworten. Jedoch kommt der Aspekt nur direkt am Einsatzort der Maschinen zum Tragen. Die E-Mobilität ist auch nur dann ökologisch sinnvoll, wenn regenerative Energieerzeugung zum Laden genutzt wird, z.B. im Rahmen der für die Energiewende notwendigen Sektorenkopplung. So lange das nicht der Fall ist, sind auch vollelektrische Lösungen nicht wirklich emissionsfrei, sondern bestenfalls „lokal emissionsfrei“: die Emissionen entstehen nur an anderer Stelle, nämlich im Kraftwerk. Dabei stellt sich zudem die Frage, ob die Gesamt-Energiemenge aller

Baumaschinen überhaupt regenerativ erzeugt werden könnte. Selbst wenn dies gegeben ist, so ist immer noch die aktuell bestehende Lade-Infrastruktur zu hinterfragen. Auf Baustellen steht in der Regel keine (ausreichende) Ladeinfrastruktur zur Verfügung, schon heute müssen zur Bereitstellung der elektrischen Leistung für die elektrisch betriebenen Verbraucher (z.B. Kran) teilweise Dieselaggregate an der Baustelle bereitgestellt werden.

Das aktuell größte Hindernis sind die Investitionskosten. Eine batterieelektrisch getriebene Maschine ist erheblich teurer als eine Maschine mit Verbrennungsmotor. Nach Aussage eines Herstellers von Batteriesystemen im Rahmen einer Tagungsveranstaltung sind bei den Produktionskosten der Akkumulatoren keine großen Skaleneffekte mehr zu erwarten, da diese heutzutage schon in relevanter Stückzahl hergestellt werden [38]. Dem steht in der Regel kein für den Betreiber messbarer Zusatznutzen gegenüber, so dass auch die am Markt bereits verfügbaren Maschinen sich bisher nur in sehr geringen Stückzahlen verkaufen. Der wesentliche Kostentreiber ist dabei die Batterie. Sollen größere Maschinen mit größerem Leistungsbedarf batterieelektrisch betrieben werden, so würden die Mehrkosten noch deutlicher. Wirtschaftliche Lösungen für größere Baumaschinen mit batterieelektrischem Antrieb sind aus heutiger Sicht nicht vorstellbar, zudem würden die erforderlichen Speicher den verfügbaren Bauraum um ein Vielfaches überschreiten. Mit der stetigen Weiterentwicklung der Technologien und Komponenten wird in Zukunft mehr möglich sein, dies führt aber nur zu einer Verschiebung der Grenze und nicht zu einer Auflösung dieser Problematik. Der Akkumulator bestimmt zudem maßgebend über die Klimabilanz der Maschine. Bei der Betrachtung der CO_2-Reduzierung muss unbedingt auch die aufwändige Herstellung und Entsorgung berücksichtigt werden. Gerade bei der Gewinnung der Akku-Materialien und der Herstellung der Batteriezellen wird viel Energie benötigt. Neben den fossilen Brennstoffen sind auch die für viele Lösungen benötigten Seltenen Erden als endlich anzusehen. Die Ressourcenknappheit und die Abhängigkeit von geopolitischen Interessen erfordern verschiedene Entlastungsstrategien wie die Förderung der Wissenschaft für neue Materialien sowie der Recyclingwirtschaft. Auch die Wartung und Reparatur elektrischer Komponenten stellt neue Herausforderungen an die Betreiber und Servicetechniker der Branche, was die breite Einführung batterieelektrischer Antriebssysteme in Baumaschinen erschwert. Die E-Mobilität ist somit nicht die Lösung aller Probleme, aber immerhin in bestimmten Anwendungsbereichen eine Antwort auf aktuelle Probleme und Entwicklungen.

Zur Realisierung der lokal emissionsfreien oder emissionsarmen Baumaschine müssen neben der Weiterentwicklung batterieelektischer Lösungen auch die anderen o.g. Ansätze wie Nutzung von E-Fuels in Verbrennungsmotoren oder Antriebssysteme auf Basis der Wasserstoff-Brennstoffzelle vorangetrieben werden.

3.5 HUMAN-MACHINE-INTERFACE (HMI)

Im heutigen Baustellenumfeld ist es nach wie vor erforderlich, dass ein qualifizierter Maschinenbediener die Steuerung der Baumaschine übernimmt. Hierzu ist in den meisten Fällen eine spezielle Ausbildung oder zumindest eine maschinenspezifische Einweisung erforderlich. Abgesehen von handgeführten Baumaschinen und wenigen Sondermaschinen stellt bei der klassischen Baumaschine eine geschlossene Kabine (oder ein offener Fahrerstand) die Ausgangsbasis für die Interaktion zwischen Bediener und Maschine (HMI) dar. Neben der Sicherheits- und Schutzfunktion, der die Kabine gerecht werden muss, dient sie als Bedienstand, in dem zumeist alle Elemente zusammengeführt sind, die für die Steuerung der Maschine relevant sind. Außerdem sind weitere Elemente untergebracht, die dem Bediener ein Feedback über den aktuellen Zustand der Maschine geben. Darüber hinaus können je nach Komplexität der Arbeitsaufgabe spezielle Assistenzsysteme vorhanden sein, die den Bediener bei der Steuerung der Maschine unterstützen. Die Ausführung des HMI-Systems hat einen signifikanten Einfluss auf Arbeitstempo und Ausführungsqualität des Bedieners und beeinflusst damit in hohem Maße die Leistungsfähigkeit und Betriebssicherheit der Maschine. Dementsprechend wird mittlerweile sehr viel Aufwand für die Entwicklung und ergonomische Gestaltung der Kabinen und HMI-Systeme betrieben [173] [107] [70] [277] [44]. Abgesehen von den Richtlinien für allgemeine Sicherheits-

anforderungen[11] ([79] [143]) geschieht dies größtenteils ohne Standardisierung, sodass die HMI-Konzepte zwischen den Herstellern stark variieren. Dadurch können sich beispielsweise die Anzeigensymbole oder auch Bedienelemente für die gleiche Funktion bei Maschinen unterschiedlichen Herstellers stark voneinander unterscheiden. Dies erschwert dem Bediener den Wechsel zwischen den Maschinen, bindet Ressourcen durch unnötige Einarbeitungszeit und erhöht die Gefahr von Bedienfehlern und Arbeitsunfällen. Nachfolgend werden überblicksmäßig verschiedene Ein- und Ausgabemöglichkeiten sowie Beispiele für Assistenzsysteme vorgestellt, die aktuell in Baumaschinen zu finden sind.

Eingabeelemente

Bedienelemente zur Steuerung der Maschine werden im Allgemeinen als Stellteile bezeichnet [173]. Entsprechend der Wertigkeit und der Häufigkeit ihrer Nutzung können diese verschiedenen Kategorien zugeordnet werden, z. B. sind Stellteile zur Bedienung der Arbeitsausrüstung von höherer Ordnung als die Stellteile zur Bedienung der Kabinen- oder Außenbeleuchtung. Entsprechend dieser Klassifizierung bzw. Priorisierung erfolgt die Anordnung der Stellteile nach anthropometrischen Merkmalen. Empfehlungen für die Auswahl und Anordnung der Stellteile sind z.B. in der Norm DIN EN 984-3 [81] gegeben. Speziell für Erdbaumaschinen gelten die Normen DIN EN ISO 6682 [82] und ISO 10968 [145].

Allgemein betrachtet stehen zur Informationseingabe bei Mensch-Maschine-Schnittstellen neben haptischen Technologien eine Vielzahl an weiteren Möglichkeiten zur Auswahl, die sich mit dem technologischen Fortschritt stets vergrößert (z.B. Gestiksteuerung, Spracheingabe). Die in Baumaschinen verwendeten Stellteile beschränken sich heutzutage aber weiterhin auf haptische Elemente, teilweise erweitert um Touchgestik auf Touchpads oder Touchscreens. Hier findet man vorwiegend zur Steuerung der Gesamtmaschine (Fahraufgabe) klassische Elemente wie Lenkrad und Pedale vor (teilweise auch Steuerhebel), während zur Steuerung der Arbeitsausrüstung bei einem Großteil der Maschinen ein oder mehrere Joysticks zum Einsatz kommen. Für die Bedienung peripherer Maschinenfunktionen werden zumeist Schalter, Tasten oder auch Dreh- und Schieberegler genutzt. In modernen Maschinen kommen dafür aber auch häufig schon serienmäßig Touchscreens zum Einsatz, auf denen die Steuerelemente themen- oder funktionsspezifisch gruppiert sind, wodurch die Übersichtlichkeit verbessert wird, die Kabine insgesamt „aufgeräumter“ wirkt und damit die Bedienung wesentlich vereinfacht werden kann. Um die Erreichbarkeit der Stellteile für den Bediener zu verbessern, werden diese häufig kombiniert. Zum Beispiel befinden sich an Joysticks meist Schalter, Tasten oder Drehregler. Oftmals werden auch Drehregler zusätzlich mit Tastfunktion ausgestattet. Aufgrund der Vielzahl an Funktionen von Baumaschinen sind einige Haupt-Bedienelemente häufig doppelt belegt oder frei programmierbar. Damit können zum Beispiel bei einem Universalbagger je nach Werkzeugkonfiguration und Arbeitsaufgabe mit dem gleichen Joystick unterschiedliche Aktoren angesteuert werden (vgl. Abbildung 14).

Die beschriebenen Stellteile finden sich in ähnlicher Form auch an den Bedienpanels handgeführter Baumaschinen oder an Fernbedienungen, die z.B. zur Steuerung von Lademaschinen oder Autobetonpumpen genutzt werden, wieder. In Tabelle 3 sind die Elemente zusammengefasst.

[11] DIN EN 474-1 legt allgemeine sicherheitstechnische Anforderungen für Erdbaumaschinen fest und geht unter anderem auch auf die Gestaltung von Maschinenführerplatz und Kabine ein; ISO 5006 legt den Fokus auf das Sichtfeld des Maschinenbedieners (Erdbaumaschinen) zur Sicherstellung einer guten Rundumsicht für die sichere Maschinenbedienung; Die Norm regelt die Testmethoden zur Sichtfeldanalyse und liefert Gestaltungshinweise.

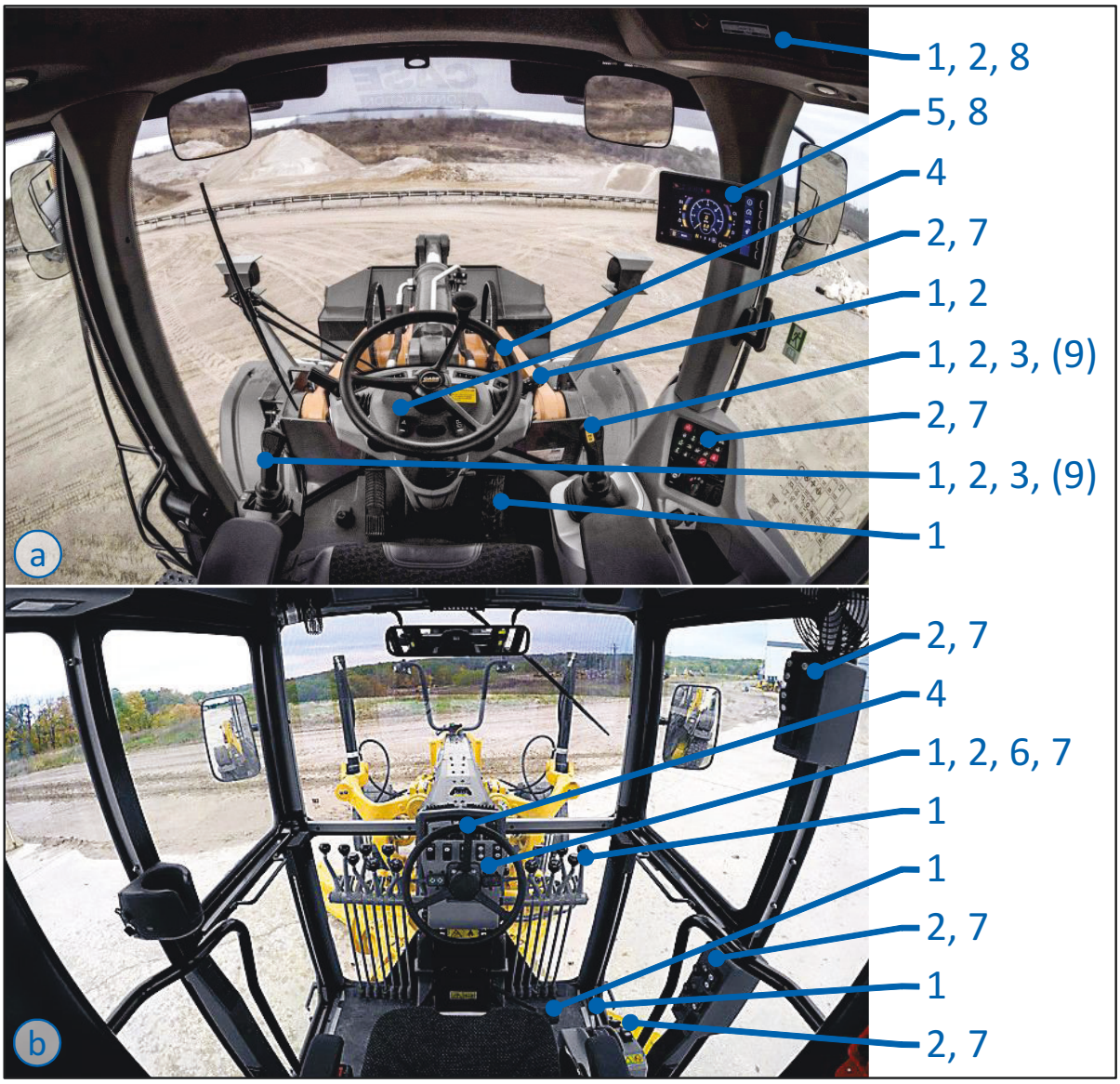


Abbildung 14: Fahrerkabinen von Radlader (a) und Grader (b) mit Ein- und Ausgabeelementen [59] [60] (Nummerierung bezieht sich auf Tabelle 3)

Ausgabeelemente

Die Informationsausgabe bzw. Rückmeldung seitens der Maschine erfolgt zumeist auf visuellem Weg. Empfehlungen zur Gestaltung und Anordnung der Anzeigen sind in [80] und in [144] für Erdbaumaschinen in sehr allgemeiner Form gegeben. In älteren Maschinen werden die Informationen zu den wichtigsten Maschinenfunktionen über klassische mechanische Anzeigeinstrumente (z.B. Tachometer, Betriebsstundenzählwerk) und Kontrollleuchten dargestellt. Diese Anzeigen werden in modernen Maschinen mehr und mehr durch universelle Displays ergänzt oder gänzlich ersetzt. Dies bietet den Vorteil, dass die Anzeigen individuell gestaltet werden und situationsbezogen wichtige Informationen hervorgehoben werden können. Zudem sind diese Anzeigen zumeist als Touchscreens ausgeführt und dienen damit als kombinierte Aus- und Eingabeinstrumente. Vor allem die Interaktion mit den immer häufiger eingesetzten Assistenzsystemen findet auf diesem Weg (Terminals) statt.

Der Weg der auditiven Informationsübermittlung über Lautsprecher wird meist zur Warnung des Maschinenbedieners in Gefahrensituationen genutzt, oder wenn bestimmte Kennwerte außerhalb des gültigen Bereichs liegen (z.B. Öldruck. Motortemperatur, Position der Arbeitsausrüstung). Teilweise

werden dem Bediener Rückmeldungen auch auf haptischem Weg gegeben, z.B. durch Force Feedback an Joysticks oder Vibration an Bedienelementen [69] [350].

Tabelle 3: Übersicht eingesetzter Ein- und Ausgabeelemente in Baumaschinen

	Nr.	Art	Element	Ausführungsvarianten	Anwendungsbeispiel
Eingabe	1	haptisch	Regler	Drehregler, Schieberegler, Stellhebel	Gaspedal, Leistungsstufenwahl, Lüftung, Betätigung der Arbeitsausrüstung
	2		Schalter / Taste	Hard-/Softkey, Kipp-/ Drehschalter	Beleuchtung, Aggregate, Betriebsmodi
	3		Joystick	Hydraulisch, elektrisch	Arbeitsausrüstung, Schwenken, Lenkung
	4		Steuerrad	Mechanisch, hydraulisch	Lenkung
	5		Touchfläche	Touchscreen, Touchpad	Universelle Eingaben, Assistenzsysteme
Ausgabe	6	visuell	Mechanische Anzeige	Zeiger, Zählscheiben/-walzen	Tachometer, Tankanzeige, Betriebsstundenzähler
	7		Kontrollleuchte	Einfache Leuchte, Symbol-/ Farbvarianten	Öltemperatur, Beleuchtung, Betriebsart
	8		Display	Segmentanzeige, Terminal	Maschinenfunktionen, Assistenzsystem
	9	haptisch / taktil	Force Feedback	Joystick, Lenkrad	Joystick-Lenkung
	10		Vibration Feedback	Vibrationsmotoren, Piezo-Aktoren	Eingabebestätigung
	11	auditiv	Lautsprecher	Elektromagnetisch, piezoakustisch	Warnsignal, Eingabebestätigung

Assistenzsysteme

Bei seinen komplexen Arbeitsaufgaben wird der Maschinenbediener in modernen Baumaschinen mehr und mehr durch Assistenzsysteme unterstützt. Die Hersteller entwickeln teilweise allein oder gemeinsam mit OEM eigene Assistenzsysteme, die serienmäßig oder optional in die Maschinen integriert sind. Es existieren aber auch zahlreiche Nachrüst-Sets von Drittanbietern. Genutzt werden die Assistenzsysteme immer dann, wenn eine hohe Ausführungsgenauigkeit gefragt ist (z.B. Gestaltung eines Planums[12] oder einer Böschung) oder die Effizienz der Arbeit gesteigert werden soll. Untersuchungen zum Einsatz eines Assistenzsystems am Bagger zeigten bei erfahrenen Bedienern eine Verbesserung der Ausführungsqualität um 75% und eine Geschwindigkeitssteigerung um 41%. Unerfahrene Baggerfahrer konnten durch ein Assistenzsystem die Genauigkeit ihrer Arbeit sogar verdoppeln und die Geschwindigkeit um 28% steigern [174]. Darüber hinaus können die mit Hilfe der Assistenzsysteme gewonnenen Daten gespeichert und für Flottenmanagement und Qualitätssicherung zentral weiterverarbeitet werden.

Für den Erdbau werden Assistenzsysteme unterschiedlichster Art angeboten. Sie werden meist als „(Bau)Maschinensteuerung“ bezeichnet und in 2D- oder 3D-Systeme unterschieden. Typische Anwendungen sind beispielsweise Erdarbeiten mittels Grader, Planierraupe oder Bagger. Die Systeme erfassen in der Regel die Positions- und Höhendaten von Baumaschine und Arbeitsausrüstung, werten diese

[12] Planum: technisch bearbeitete Bodenschicht mit festgelegten Eigenschaften, wie z. B. Ebenheit oder Neigung

aus und unterstützen den Bediener anhand dieser Daten bei seiner Arbeitsaufgabe. Dazu können je nach Umfang des Systems die Sollgrößen (z.B. Lage eines Planums, Böschungswinkel, Grabentiefe etc.) anhand digitaler Planungsdaten eingespeist werden, zukünftig aus BIM-Systemen (vgl. Kap. 1.1). Über interaktive Displays werden dem Bediener diese Daten im Vergleich mit den Ist-Koordinaten ausgegeben, sodass er eventuellen Abweichungen entgegensteuern kann und seine Arbeitsaufgabe stets nahe am Optimum erfüllt. Darüber hinaus sind semiautomatische Steuerungssysteme in der Lage, direkt in die Steuerungshardware der Maschine (z.B. Hydraulik) einzugreifen und teilautomatisiert ausgewählte Aktoren der Arbeitsausrüstung zu bewegen, sodass die Sollkoordinaten am Werkzeug mit hoher Präzision erreicht werden. Im Bereich Erdbau können mit diesen Steuerungssystemen Genauigkeiten im unteren Millimeterbereich erreicht werden [167]. Zur Datenerfassung kommen bei 2D-Steuerungen häufig Lasermesssysteme und Neigungssensoren zum Einsatz. Diese werden bei 3D-Steuerungen mit GNSS Systemen oder Totalstationen zur globalen Positionserfassung kombiniert. Zur Höhenmessung werden z.B. bei Gradern (Baumaschine zur Herstellung großer, ebener Flächen) oder Straßenfertigern auch Ultraschallsensoren eingesetzt (vgl. Kap. 3.1). Zur Erfassung der Lage der Aktoren an den Arbeitsausrüstungen werden Rotations- oder Neigungssensoren und Wegmesssysteme genutzt [296] [335] [211] [180] [59] [291] [313].
Die verfügbaren Assistenzsysteme beschränken sich nicht nur auf Erdarbeiten. Für Ladeaufgaben existieren z.B. für Radlader integrierte Wiegeeinrichtungen, die präzise Daten über den Ladevorgang erfassen, diese auswerten und damit zur Optimierung des Umschlagprozesses beitragen [336] [256]. Große Qualitätsverbesserungen werden auch im Straßenbau durch den Einsatz diverser Assistenzsysteme erzielt. Für Asphaltdeckenfertiger existieren zum Beispiel Systeme zur Überwachung von Mischguttemperatur und Schichtdicke. Mit dieser Information kann der Bediener die Parameter des Fertigers optimal an die vorherrschenden Bedingungen (Wetter, Untergrundtemperatur etc.) anpassen, um negative Effekte wie z.B. thermische Entmischung auszuschließen. Die permanente Kontrolle der Schichtdicke erlaubt es, die eingebaute Materialmenge stets im Sollbereich zu halten, wodurch nicht nur die Qualität, sondern auch die Baukosten optimiert werden können [19] [337]. Für den Bereich der Verdichtungsmaschinen werden schon seit einiger Zeit Assistenzsysteme angeboten. Diese analysieren z.B. bei Vibrationswalzen mit Hilfe von GNSS-Daten die Anzahl der Überfahrten über die zu verdichtende Fläche, die Materialtemperatur (bei Asphaltverdichtung) und bei einigen Systemen auch das Verdichtungsergebnis. Über ein Display werden die erfassten Informationen dem Bediener grafisch aufbereitet zur Verfügung gestellt, sodass dieser den Prozess entsprechend steuern kann. Über Vernetzung der Assistenzsysteme kann die Arbeit ganzer Walzenflotten auf diesem Weg optimiert werden. Dadurch lassen sich unter anderem unnötige Überfahrten vermeiden, was sich direkt in einer Reduzierung von Kosten und Arbeitszeit auswirkt [212] [330]. Neben diesen eher passiven Systemen gibt es sowohl für leichte (Vibrationsplatten, Anbauverdichter) als auch für schwere Verdichtungsmaschinen Assistenzsysteme, die aktiv in die Steuerung eingreifen und die Maschinenparameter anhand der Messdaten optimal anpassen [6] [37] [221].
Wie dieser kurze Abriss sowie die Ausführungen zur Erfassung und Überwachung von Arbeitsprozessen in Kap. 3.1.6 zeigen, werden mittlerweile für eine Vielzahl an Arbeitsaufgaben spezielle Assistenzsysteme angeboten. Diese sind oftmals nicht nur auf den jeweiligen Prozess, sondern auch auf den Maschinentyp spezialisiert. Dementsprechend hoch ist die Anzahl der Anbieter und Produkte. Das führt zwangsläufig dazu, dass sich die Systeme in Darstellung und Bedienung voneinander unterscheiden und seitens der Anwender mit der Zeit eine gewisse Gewöhnung oder Spezialisierung auf einen bestimmten Hersteller stattfindet, was einen Wechsel zwischen den Systemen ggf. erschwert.

Neben den Assistenzsystemen für die Unterstützung des Arbeitsprozesses werden auch Lösungen angeboten, die ausschließlich der Verbesserung der Maschinensicherheit dienen. Zum Beispiel sind für Baumaschinen Systeme zur Umfelderfassung erhältlich, die Gefahrensituationen (z.B. Person im Arbeits- oder Fahrbereich) erkennen und dem Bediener automatisch eine Warnung auf dem Display ausgeben [73] [187] [125] [9].

Auch im Bereich Service und Wartung werden vermehrt Assistenzsysteme eingesetzt. Sensoren zur Überwachung des Betriebszustandes der Maschinen erlauben Rückschlüsse auf anstehende Reparatur- oder Wartungsarbeiten und geben dem Bediener direkte Handlungsempfehlungen (z.B. Reifendruckkontrolle [187]). Im Falle von Betriebsstörungen oder zur Durchführung von Reparaturarbeiten werden zur direkten Unterstützung des Service-Personals vor Ort Assistenzsysteme angeboten. In Form von Augmented-Reality (AR) Anwendungen ist die Möglichkeit gegeben, z.B. über Smartphone oder Tablet-PC, künftig auch über Datenbrillen (Smartglasses), direkt an der Maschine Zusatzinformationen (Reparaturanleitungen, Ersatzteilkataloge) abzurufen oder mittels Bildübertragung direkt mit dem Experten in einer Zentrale in Kontakt zu treten. Ersatzteillieferung und Reparatur können dadurch beschleunigt und Stillstandzeiten verkürzt werden [247] [104] [240].

4 STAND DER TECHNIK: MASCHINENTECHNIK IM BAUPROZESS

Während im letzten Kapitel der Stand der Technik einzelner Technologien mit Bezug zu Baumaschinen erläutert wurde, soll jetzt eine Zusammenführung auf Maschinen- und Anwendungsebene folgen.

Im Kapitel „Rahmenbedingungen“ wurde bereits auf die Heterogenität des Baumaschinenbestandes hinsichtlich Alter, Hersteller und Ausstattung verwiesen. Zur Verdeutlichung gibt Abbildung 15 einen Überblick über die zahlenmäßige Entwicklung des Baumaschinenbestandes in Deutschland bis 2013 (neuere Daten liegen nicht vor). Aus dieser Darstellung ist zu entnehmen, dass 2013 rund 250.000 Baumaschinen in Deutschland zur Verfügung standen [18]. Die Kategorisierung der Maschinen, die in diesem Fall von den Verfassern der zitierten Studie gewählt wurde, gibt einen Hinweis darauf, wie vielfältig die Maschinentypen und Anwendungen von Baumaschinen sind.

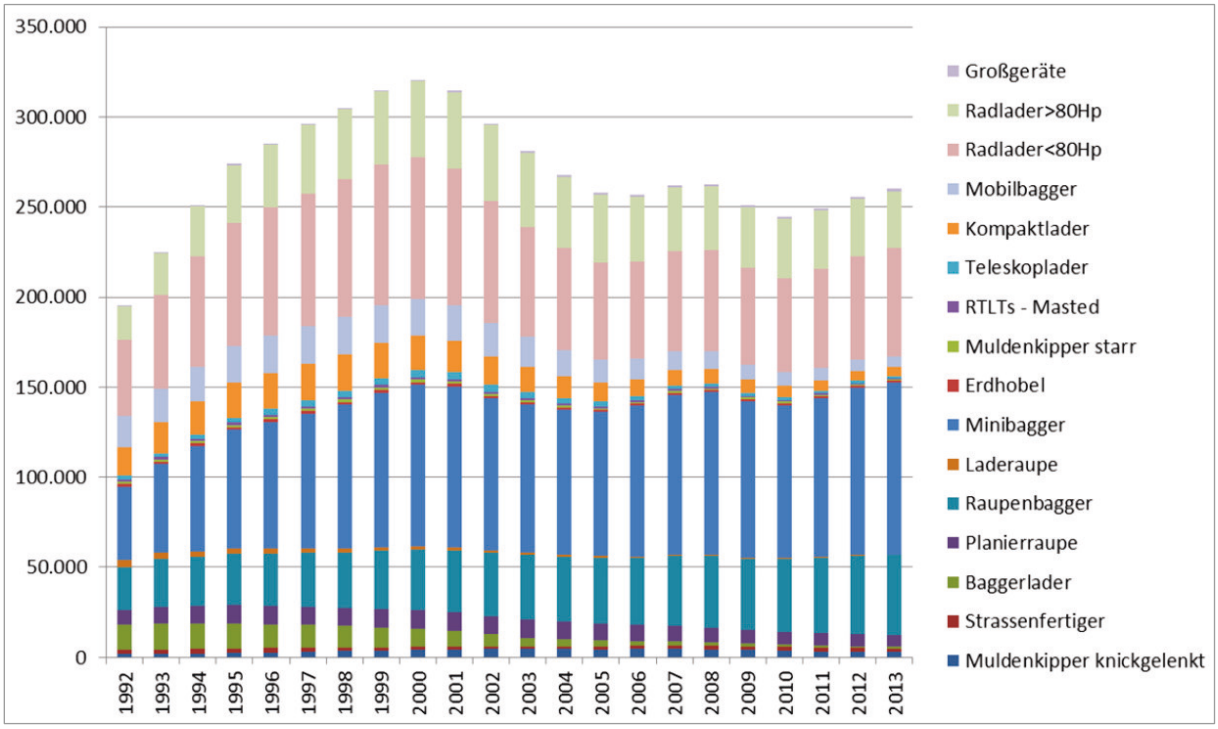


Abbildung 15: Bestandsentwicklung Baumaschinen in Deutschland [30] (RTLT: Rough Terrain Lift Truck = Geländegängige Stapler) (Nicht enthalten: Maschinen mit Antriebsleistung < 19 kW; Mobile Krane; Baumaschinen mit Elektrischem Antrieb)

Daher orientiert sich die nachfolgende Übersicht zum Stand der Technik von Baumaschinen an einer Gliederung nach Baubereichen, beginnend mit dem allgemeinen Bauprozess.

Die Tiefe des Maschineneinsatzes hängt – neben dem jeweils betrachteten Baubereich – auch davon ab, ob ein größeres industrielles Bauprojekt oder ein kleineres, eher handwerklich geprägtes Bauvorhaben betrachtet wird. In der Bauindustrie werden in der Regel die Möglichkeiten des Maschineneinsatzes ausgeschöpft, bei Überschreitung der eigenen Kapazitäten auch ergänzt durch Einsatz von Mietmaschinen. Dagegen wird im Bauhandwerk eher mit minimalem Maschineneinsatz gearbeitet, bedingt durch die für kleine Handwerksbetriebe verhältnismäßig hohen Investitionskosten für Baumaschinen und die für einzelne Betriebe unzureichende Auslastung. Bestenfalls werden hier Mehrfunktions-Maschinen eingesetzt wie z.B. ein Radlader, der zahlreiche Funktionen auf der Baustelle ausführen kann (neben Erdarbeiten auch Materialtransport für Stückgut und Schüttgut sowie in eingeschränktem Umfang auch Hebearbeiten).

Das vorliegende Gutachten fokussiert auf industrielle Bauprozesse, weil hier der Erfahrungshintergrund der Gutachter liegt. Auf die Besonderheiten der handwerklichen Bauprozesse wird an einigen Stellen hingewiesen.

4.1 BAUPROZESSE/BAULOGISTIK

Die Baulogistik, also die Material- und Informationsflüsse zur Vorbereitung einer Baustelle, ihrer Handhabung während des Bauprozesses sowie zur Nachbereitung der Baustelle beschreiben ein weites und sehr heterogenes Aufgabenfeld. Die Komplexität der Aufgaben sowie die aktuellen Ansätze zum Umgang mit den sich stellenden Herausforderungen sollen in diesem Kapitel im Überblick dargestellt werden.

4.1.1 Informationsfluss

Der Informationsfluss eines Bauvorhabens vom Konzept bis zur Abnahme des Bauprojekts umfasst zahlreiche Aufgabenfelder, in denen die Projektabläufe und die damit verbundenen Informationsflüsse nur begrenzt auf die verschiedenen urbanen Baustellen, wie Straßen-, Tief- und Hochbau übertragbar sind. Allein im Hochbau können nach [293] 15 Bauprojektarten von privaten Bürogebäuden über Flughäfen bis zum Wohnungsbau untergliedert werden. Ebenso wie die Bauprojektarten können auch die beteiligten Parteien Auftraggeber, Planer und Berater, bauausführende Firmen sowie Genehmigungsbehörden und Träger öffentlicher Belange in variierenden Konstellationen auftreten. Dies ist insbesondere bei Bauprojekten in öffentlicher Hand zu beobachten, deren Bauleistungsvergabe über Ausschreibungen (VOB/VOL) erfolgt und somit die Bauteilnehmer einem ständigen Wechsel unterzogen sind. Bedingt durch diese Diversität besteht mit zunehmender Projektgröße und Anzahl der am Bauprojekt beteiligten Parteien die Herausforderung in der Gewährleistung und Koordination der polydirektionalen Informationsflüsse, um die Bauabläufe effizient umzusetzen. Der Innovationsschwerpunkt der letzten Jahre liegt hierbei in der Digitalisierung der Bauprojekt- und Bauausführungsinformationen [228], wobei der Digitalisierungsstand der Baubranche als sehr heterogen zu beschreiben ist.

Vermessung und Aufmaß

Zu Beginn des Bauvorhabens sind für die Erstellung von Lageplänen die Geländeinformationen zu bestimmen oder für Baumaßnahmen im Bestand das Aufmaß von Bausubstanz und Medienverlegung zu ermitteln. Für erstere sind je nach Bundesland topografische und Flurkarten online verfügbar, wobei für die meisten Baumaßnahmen, vor allem im Hochbau, die Datenauflösung zu gering ist, womit eine separate Vermessung mit analogen und digitalen Hilfsmitteln zu erfolgen hat. Die Aufmaßnahme im Bestand muss in der Regel stattfinden, da Pläne nicht vorliegen oder veraltet sind und erfolgt meist mit analogen zu verarbeitenden Hilfsmitteln. Die (per Gliedermaßstab, Messlatte, Laser oder Drohne) ermittelten Koordinaten- und Aufmaßpunkte können nun als handschriftliches Protokoll, gedruckte Koordinatenliste, digitale Koordinatenliste im PDF-Format oder als digitales IFC-Austauschformat vorliegen. Am Beispiel der PDF-Koordinatenliste wird ersichtlich, dass digitale Daten nicht zwingend einen barrierefreien Transfer bedeuten, da auch die PDF-Liste zur Weiterverarbeitung händisch auszulesen ist.

Planung

In der parallelen Erstellung der Planungsunterlagen, beispielsweise im Hochbau die Entwurfs- und Konstruktionspläne, werden CAD-Verfahren in 2D und zunehmend 3D eingesetzt [25] [293]. Die Entwurfspläne dienen beispielsweise dem Genehmigungsverfahren durch die hiesige Behörde. Dabei ist der Digitalisierungsstand auf Behördenseite als limitiert zu bezeichnen. Am Beispiel der Stadt Dresden; hier sind die notwendigen Formulare online [177] also digital verfügbar und editierbar, müssen entgegen dem Digitalisierungstrend jedoch in analoger Form eingereicht werden. In Erweiterung der genehmigten Entwurfspläne, welche die Kubatur des Bauwerks beschreiben, können die ausführungsreifen Werkpläne mit den entsprechenden Ausbrüchen der Medienverlegungen erstellt werden, was je nach Bauprojekt- und Unternehmensgröße der Gewerke unterschiedlich genutzt wird. Vor allem bei kleinen Bauprojekten, wie im Eigenheimbau, erfolgt die Kennzeichnung der Medienverlegung zumeist vor Ort in Absprache mit dem Bauherrn ohne vorherige Detailplanung. Die Leitungsverlegung erfolgt anschlie-

ßend anhand der Kennzeichnung geführt durch Normungen. Bedingt durch die transiente Bauausführung, also den zeitlichen Versatz aufeinander folgender Gewerke, kann es zu Überschneidungen in der Verlegung der einzelnen Gewerke führen. Um dem entgegen zu wirken, werden Werkpläne zunehmend auch in Hinblick auf die projektspezifische Beschaffungsplanung mittels CAD-Verfahren erstellt. Hierfür verwendet jedoch jedes Gewerk meist seine spezialisierte Software, womit die Werkpläne auf Grund fehlender Standards schwer bis gar nicht austauschbar sind. Widersprüche werden daher erst während der Bauausführung ersichtlich.

Bauausführung

Für die Koordination während der Bauausführung, zumindest bei Großprojekten, haben sich webbasierte Projektkommunikationssysteme durchgesetzt [25]. Sie können als komplettes Projektarchiv dienen und durch eine hohe Qualität der Dokumentation, eine hohe Verfügbarkeit, eine erhöhte Sicherheit, Transparenz und Prozessoptimierung einen Mehrwert für alle Beteiligten bieten [293]. Die aktuellen Managementprogramme der Bauindustrie dienen dabei dominant der Versionierung und Archivierung von Projektinformationen. Demnach endet der digitale Informationsfluss zumeist beim Bauleiter oder Polier des Bauvorhabens. Den ausführenden Werkern liegen die Pläne in der Regel in gedruckter Form oder verbal vor. Auch wenn die Baustellentauglichkeit von Endgeräten, wie Smartphones oder Tablets, in den letzten Jahren stieg, scheitert die Verwendung der digitalen Pläne direkt durch den Werker häufig an der Akzeptanz. Dabei ist die Einstellung der Mitarbeiter auf der Baustelle kontrovers. Das Tablet bietet zwar den Vorteil, Bauabschnitte und Baubereiche explizit zu vergrößern sowie ergänzende Informationen abzurufen, ist jedoch oftmals anfällig gegen Verunreinigungen und unter Baustellenbedingungen nicht immer leicht zu handhaben. Auf der anderen Seite geben gedruckte Unterlagen oft nicht den letzten Stand wieder und sind nach kurzer Zeit kaum noch lesbar.

Eine Neuerung in der Bauindustrie ist die Verwendung von Smartphone oder Tablet in der Warenannahme. Anstatt die Lieferscheine auf der Baustelle händisch zu erfassen, den Einbauort auf dem Papier zu kommentieren und die verbauten Mengen zu verwalten, scannt der Polier einen QR-Code [123], [232] mittels einer App, wie [175], [357]. Die Summe der bereits gelieferten und verbauten Materialien, die durch die App erfasst wurden, können dem Polier visuell dargestellt werden. Der Umfang der Apps ist aktuell auf die Baustoffe Beton und Asphalt beschränkt. Zudem kann die App noch nicht in Warenwirtschaftssysteme eingebunden werden und digitale Lieferscheine sind auch nur mit digitalen Bestellungen verknüpfbar, die noch nicht durchgängig möglich sind.

Nicht nur auf der Werker- sondern auch auf Maschinenebene ist die Diskrepanz zwischen Möglichkeiten der Digitalisierung und Anwendung zu erkennen. Auf den Maschinen sind teilweise Bildschirme und GPS-Maschinensteuerung in die Fahrerkabine implementiert, um Aufgabenstellungen und digitale Geländemodelle dem Geräteführer direkt in die Fahrerkabine des Baggers übertragen zu können [41]. Die bauausführenden Unternehmen besitzen jedoch meist einen heterogenen Maschinenpark verschiedener Hersteller, unterschiedlichen Alters und mit stark variierendem Digitalisierungsgrad. Somit können die digitalen Schnittstellen je nach Maschinenalter und -ausführung fehlen, außerdem fehlen herstellerübergreifende Standards zur Übertragung und Darstellung der digitalen Informationen aus Plänen oder 3D-Modellen auf den Bediener-Terminals. Im gleichen Sinne gilt dies bezüglich der Automatisierung. Auch hier existiert keine herstellerübergreifende Schnittstelle, um auf die Maschinensteuerung zuzugreifen.

Dokumentation

Für die Baudokumentation sind auf dem Markt zahlreiche Softwarelösungen zu finden [2] [258] [338]. Sie bieten in Kombination mit Notebooks, Smartphones oder Tablets dem Bauleiter oder Polier die Möglichkeit zur automatisch dokumentierten Echtzeitkommunikation sowie im Wesentlichen dem Daten- und Mängelmanagement durch eine kontinuierliche und vereinfachte Datenerfassung. Die Auswahl stellt nur einen Bruchteil der auf dem Markt erhältlichen Lösungen dar. Neben der Einigung auf eine Softwarelösung oder der Festlegung von Daten- und Austauschformaten im Rahmen des jeweiligen Bauprojektes bedarf es in jedem Fall der Mitwirkung aller Beteiligter. Bedingt durch die Vielzahl

der Anwendungen, die in der Regel nicht untereinander kompatibel sind, kommt es für die bauausführenden Unternehmen zur notwendigen parallelen Nutzung multipler Softwarelösungen. Neben den allgemeinen Softwarelösungen für Gewerke existieren im Straßenbau Soft- und Hardwarelösungen zur Prozessoptimierung und –dokumentation [148] [338]. Am Beispiel des Asphalteinbaus können das Asphaltmischwerk, der LKW-Fahrer des Transportunternehmens, der Bauleiter und das Einbauteam vor Ort miteinander vernetzt werden. Neben dem Datenaustausch zwischen den Prozessbeteiligten können zur Dokumentation auch Bedienereingaben einfließen, ebenso Maschinen- und Prozessdaten wie die während des Einbaus gemessene Asphalttemperatur.

Fazit zum Informationsfluss

Die Digitalisierung hält in vielen Bereichen des Bauwesens Einzug. Variierende Anforderungen, fehlende Standards für die Art und den Umfang der zu erfassenden Daten sowie Austauschformate zwischen den Gewerken von der Vermessung bis zur Bauausführung stellen dabei Hemmnisse für die Nutzung der digitalen Möglichkeiten dar. Vor allem für kleinere Unternehmen ist die Anschaffung digitaler Schnittstellen oder aktuellerer Maschinen in Verbindung mit der Vielzahl von software- und hardwareseitigen Lösungen ein Kostenfaktor, der wirtschaftlich schwer zu rechtfertigen ist.

Die Chancen durchgängiger Informationsflüsse hinsichtlich Fehlerreduzierung und Produktivitätssteigerung sind prinzipiell bekannt und bereits eingeflossen in die Bestrebungen zur Einführung des BIM-Verfahrens (Building Information Modeling, vgl. Kap. 1.1). Allerdings gibt es nach wie vor kein einheitliches Verständnis, was sich „hinter BIM verbirgt“, das zeigen zahlreiche Gespräche mit Prozessbeteiligten des Bauwesens. Manche halten BIM für eine spezielle Software, andere gehen von einer Beschränkung auf Geometriedaten aus (CAD), wieder andere verbinden mit BIM ausschließlich den Planungsprozess – zum Verständnis des Gutachters sei auf die Begriffsdefinition in 1.1 verwiesen. Nach Aussage eines Gesprächspartners der Experten-Interviews ist selbst in den Baubehörden, die eigentlich auf die Einführung von BIM drängen, oft nicht bekannt, was BIM ist und wozu es dienen soll – bis hin zu völliger Unkenntnis des Begriffes.

4.1.2 Materialfluss

Die Materialflüsse in der Bauindustrie sind sehr vielfältig und können in ihrer Art und ihrem Volumen, je nach Baustelle, stark variieren. Zum anderen ist keine Baustelle gleich, womit viele Bereiche des Baus mit einer Manufaktur zu vergleichen sind. Daraus ergeben sich einige Unterschiede zu anderen Industriezweigen, die die Bauindustrie vor weitere Herausforderungen stellt.

Im Gegensatz zur Fertigung in der Industrie, in der sowohl die Werkzeuge wie auch der Arbeitsort überwiegend stationär vorliegen, sind mit der Dimension der Baustelle und vor allem den sich stetig verlagernden Einbauorten nicht zu vernachlässigende Transporte von Stoffen, Werkzeugen wie auch Personen verbunden, die einen großen Teil der Arbeitszeit einnehmen können. Als weiterer Unterschied zur Industrie ist jede Baustelle zu Beginn neu einzurichten. Das heißt, unterschiedlichste Personen, Werkzeuge und Baumaschinen sind zum Teil mit Sondergenehmigungen zum Einsatzort zu bewegen, wobei in der Regel nicht mit der Errichtung, sondern im Tiefbau mit der Entsorgung von Baurestsoffen, sprich Erdstoffe oder Abbruchmaterial, begonnen wird. Erst im Anschluss kann mit dem eigentlichen Bau begonnen werden, für den die Materialflüsse an die spezifischen Gegebenheiten der Baustelle anzupassen sind.

Die Koordination der Materialflüsse auf der Baustelle wird durch die Baulogistik beschrieben und umfasst die 3 Teilbereiche: Versorgungs-, Baustellen- und Entsorgungslogistik. In der Versorgungslogistik wird die Bestellung, der Transport zur Baustelle sowie der Zugang von Personal, Bau- und Betriebsstoffen, Werkzeugen usw. koordiniert. Sind die Baustoffe auf der Baustelle angekommen, übernimmt die Baustellenlogistik den Materialfluss von der Warenannahme in das Baustellenlager, ein Zwischenlager oder direkt zur Einbaustelle, sowie das gleiche Prozedere in umgekehrter Reinfolge für die Entsorgung von Reststoffen bis zur Beladung von Transportmitteln. Danach obliegt der Entsorgungslogistik die Rückführung, Verwertung oder Beseitigung der Baustelleneinrichtung und Reststoffe [281].

Versorgungslogistik

Während des Baus werden, beginnend mit der Baustelleneinrichtung, unter anderem Baumaschinen, Schalung, Container, Baugerüste sowie in der eigentlichen Bauabwicklung diverse Bau- und Bauhilfsstoffe als Stückgüter der unterschiedlichsten Abmessungen, aber auch Schüttgüter in variierendem Umfang auf die Baustelle geliefert [281]. Die große Vielfalt der bauvorhabenspezifischen Baustoffe verdeutlicht die Komplexität des Materialflusses zur und auf der Baustelle. Dabei bleibt stets zu beachten, dass der Bauplatz die dominante Fläche eines Baugeländes darstellt und Lager in ihrer bestehenden Notwendigkeit so klein wie möglich gehalten werden. Somit gilt, ebenso wie in der Industrieproduktion, die Prämisse der Just-in-time-Lieferung.

Während in der Industrieproduktion in der Regel die unerwünschte Kapitalbindung der Treiber für kleine Lagerbestände und Just-in-time-Lieferungen ist, kommen im Bauwesen weitere Aspekte hinzu: die verfügbare Lagerfläche ist in der Regel nur sehr begrenzt verfügbar (und auch nicht unter Inkaufnahme entsprechender Kosten erweiterbar) und manche Bauteile dürfen nur zeitlich begrenzt im Freien gelagert werden. Im Asphalt-Straßenbau kommt noch hinzu, dass das Material die Baustelle mit einer bestimmten Temperatur erreichen muss, so dass die Zeitspanne für den Transport zwischen Mischwerk und Baustelle nur in einem engen Zeitfenster liegen darf. Ähnlich im Betonbau (Hochbau, Straßenbau), auch hier darf der Transportbeton zwischen Mischwerk und Einbauort nur eine bestimmte Zeitspanne unterwegs sein. Diese Zusammenhänge erfordern die exakte Planung und sorgfältige Überwachung des Baustellenablaufes, die Bereitstellung von Material, Maschinen und Personal muss genau und verlässlich aufeinander abgestimmt sein.

Baustellenlogistik

Sind die Baustoffe auf der Baustelle angekommen, stehen für den Transport unterschiedliche Transportgeräte, wie beispielsweise Krane, Betonpumpen, Gabelstapler oder Aufzüge zur Verfügung. Für viele Transportarbeiten in frühen Bauphasen des Hochbaus eignet sich der Turmdrehkran, da er neben der vertikalen auch die horizontale Bewegung ermöglicht, wohingegen in späteren Bauphasen, wie dem Innenausbau, die Aufzüge an Bedeutung gewinnen, um Stoffe vertikal zu fördern. Dabei stellen Vertikaltransporte nach [281] regelmäßig zeitkritische Engpässe dar. Da Vertikaltransporte im Hochbau unumgänglich sind, werden zur Vermeidung von Engpässen feste Zeit- und Transportfenster für die Anlieferung sowie die daran anschließende Kran- oder Aufzugsnutzung vergeben. Das Verpassen eines Zeitfensters und das Warten auf das nächste zugewiesene Zeitfenster kann zu einer Bauverzögerung und zur Störung der Bauabläufe führen. Wie bereits in der Anlieferung bleibt zu beachten, dass der Zugang zu einer Baustelle in der Regel eingeschränkt oder nur aus einer Richtung möglich ist. Das hat zur Folge, dass Baustoffe und Werkzeuge nach der vertikalen Bewegung innerhalb des Gebäudes bis zum Einbauort auf der möglicherweise abgewandten Gebäudeseite zumeist händisch oder mit einfachen Hilfsmitteln zu fördern sind. Diese Wege werden mit zunehmenden Baufortschritt durch Wände und Durchgänge begrenzt, was wiederum einen nicht vernachlässigbaren Transport- und Logistikaufwand mit sich bringt.

Entsorgungslogistik

Neben der Entsorgung von Baureststoffen obliegt der Entsorgungslogistik die Rückführung der Baustelleneinrichtung, sprich Maschinen, Gerüste, Schalung sowohl nach als auch bereits während des Baus. Dazu gehört aus wirtschaftlicher Sicht die Aufbereitung der Abfälle gemäß Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG). Demnach sollte bereits auf der Baustelle eine Trennung erfolgen, um eine kostenpflichtige Nachsortierung zu vermeiden. Da auch in diesem Bereich kaum Lagermöglichkeiten bestehen, sind die gekennzeichneten Sammelbehälter an die zu erwartenden Aufkommen anzupassen.

Fazit zum Materialfluss

Es wird ersichtlich, dass je nach Bauprojekt verschiedenste Baustoffe und Werkzeuge sowie Personen zur, auf und von der Baustelle zu bewegen sind. Den dafür benötigten Transportwegen und –mitteln geht eine umfangreiche und mit dem Bauprozess fortlaufende Planung voraus, die nur begrenzt in einer Automatisierung endet.

4.2 VERMESSUNG

Die Ingenieurgeodäsie, als ein Teilgebiet der Vermessungskunde, zeichnet sich besonders durch die interdisziplinäre Arbeitsweise mit vielen Nachbardisziplinen aus. In der Norm DIN 18710 werden allgemeine Anforderungen an Vermessungsarbeiten an baulichen Anlagen definiert. Ziel ist die Vereinheitlichung der Qualität von Ingenieurvermessungen [78]. Die Erfassung und Modellierung des Ist-Zustandes eines Objektes/Gebietes (Aufnahme), die Übertragung geplanter geometrischer Größen/Merkmale in die Örtlichkeit (Absteckung) sowie die Überprüfung der Position und Geometrie eines Objekts bzgl. der Planungsdaten (Monitoring) sind dabei die grundlegenden Hauptaufgaben.

Neben diesen grundlegenden, geometriebezogenen Fragestellungen wird die vorhandene Sensorik zunehmend zur Automatisierung in Bau-, Fertigungs- und Überwachungsprozessen integriert. In diesem Zusammenhang wird für Positionierungsaufgaben des Hoch- und Tiefbaus häufig der Terminus Ingenieurnavigation verwendet. Sensorsysteme zur Positionsbestimmung und -überwachung sind u.a. Tachymeter, Nivelliere, GNSS-Empfänger, Laserscanner, Neigungsmesser, UAV und photogrammetrische Systeme (siehe Kapitel 3.1).

Als Datengrundlage der Positionierungsaufgabe wird i. A. ein zwei- oder dreidimensionales Modell der Realität genutzt (digitale Karten, Pläne, Geländemodelle), welches durch geodätische Grundlagenvermessungen generiert wird. Dazu zählt die Erdoberfläche in gleicher Weise wie alle künstlichen Bauwerke (As-Built Dokumentation). Zur Bestimmung der Position und Lage bzw. zur dreidimensionalen Führung von Baumaschinen und deren Werkzeugen werden i.d.R. zielverfolgende Tachymeter oder GNSS-RTK eingesetzt. Die Messdaten der Sensoren werden im Bereich des Tief- und Verkehrswegebaus für Führungssysteme (z.B. Anzeige von Tiefe und Neigung des Werkzeugs) oder vollautomatische 3D-Maschinensteuerungen (assistierte oder automatisierte Erstellung von Geometrien wie Ebenen, Kanälen und Böschungen) verwendet. Im Hochbau wird die Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Bauprozesse besonders durch einen hohen Vorfertigungsgrad in Kombination mit automatisierten Kranen und Montagerobotern erreicht. Kran- oder Montageroboter befördern vorgefertigte Segmente automatisiert an die vorgesehene Position. Der ingenieurgeodätische Beitrag liegt dabei nicht in der aktiven Positionierung, sondern in der Überwachung des Montageprozesses und der Prüfung der Endposition. Eine quasi-flächenhafte Dokumentation des Ist-Zustands eines Objekts kann mit Laserscanning erreicht werden. Die generierten Punktwolken lassen Rückschlüsse auf die Maßhaltigkeit bzw. den Baufortschritt zu.

Neben den qualitativen Verbesserungen dient die Automatisierung und Digitalisierung zudem der Steigerung der Produktivität sowie der damit verbundenen Kostenreduzierungen, vor allem durch die Vermeidung von Baufehlern. Bis zu 20 % der Baukosten werden durch Fehlerbehebung und damit verbundene Bauverzögerungen verschlungen [56]. Die Ursachen sind jedoch nicht zwangsläufig in der physischen Bauausführung zu finden, sondern in dem nicht abgestimmten Informationsaustausch und -abgleich zwischen den einzelnen Fachdisziplinen, welcher sich z.B. in fragmentierten Daten, uneinheitlichen Modellierungen, Medienbrüchen sowie fehlenden inhaltlichen und zeitlichen Abstimmungen ausdrückt [151].

Aktuelle Forschungsbestrebungen zielen daher auf eine einheitliche, integrierte und zentrale Modellierung ab (BIM). Weitere Forschungsfragen beschäftigen sich mit Themen des 3D-Drucks, wo bspw.

die Spritzdüse mithilfe von Tachymetrie oder GNSS derart geführt wird, dass schichtweise dreidimensionale Strukturen erstellt werden können (siehe Kapitel 5.9). Auch im Bereich des Innenausbaus bestehen prototypische Konzepte, welche zukünftig auf Grundlage geodätischer Bildverarbeitungsmethoden automatisierte Fliesenverlegearbeiten versprechen [158]. Im Bereich mobiler, automatisierter Anwendungen werden mittels Laserscanning und Photogrammmetrie räumliche Abbilder der Baustellenszene generiert. Der Bearbeitungsaufwand sinkt dadurch für ein mittelgroßes Bauobjekt von mehreren Wochen auf wenige Minuten[13]. Auch wenn diese Aussage sehr optimistisch erscheint, ist der Trend sicher richtig. In einer verarbeiteten Form können aus den Daten Abweichungen bzgl. des geplanten Modells errechnet und direkt während des Baufortschritts eingegriffen werden [56] [83].

4.3 TIEFBAU

Laut Definition behandelt der Tiefbau die Errichtung von Bauwerken, die an oder unter der Erdoberfläche liegen [255]. Damit gehören u.a. die Teilgebiete Erdbau, Grundbau und Spezialtiefbau in diese Kategorie. Auf die Maschinen, die im Tiefbau eingesetzt werden, wird im folgenden Kapitel eingegangen. Nach [283] können die diese wie folgt eingeteilt werden.

1. Flachbaggergeräte zum Gewinnen, Fördern, Einbauen und Verdichten des Bodens
2. Ladegeräte
3. Verdichtungsgeräte
4. Transportgeräte
5. Spezialgeräte

Aus allen Kategorien werden die bedeutendsten Maschinen beleuchtet und hinsichtlich ihres Automatisierungsgrades bewertet. Die betrachteten Maschinen aus Kategorie 1 sind Planierraupen (Dozer), Radlader, und Erd- oder Straßenhobel (Grader). Der Bagger als das am Weitesten verbreitete Baugerät zählt zur Kategorie 2 und die Walzen zur Kategorie 3. Neben diesen werden außerdem die Bohrgeräte aus Kategorie 5 behandelt.

Durch Automatisierung können Komfort, Sicherheit und Produktivität gesteigert werden. Der Fahrer einer Baumaschine ist im Berufsalltag Vibrationen und Lärm ausgesetzt. Diese führen zu körperlichen Belastungen, welchen der Fahrer meist über einen längeren Zeitraum ausgesetzt ist [103]. Diesen Belastungen kann zwar infolge einer Automatisierung entgegengewirkt werden, indem der Einsatz des Fahrers auf der Maschine nicht mehr notwendig ist und dieser von den genannten Einflüssen gekapselt, räumlich getrennt, überwachende Tätigkeiten ausführen kann. Dies ist aber noch nicht dem Stand der Technik zuzuordnen, da eine vollumfängliche Automatisierung noch nicht verfügbar ist. Als Zwischenschritt auf dem Weg zur Vollautomatisierung ist die Teilautomatisierung einzelner Prozesse oder Tätigkeiten zu nennen. Diese erfordern bisweilen die Anwesenheit des Geräteführers, können also die gennannten Aspekte der körperlichen Belastungen nicht vollumfänglich beseitigen, aber durch die Verbesserung der Arbeitsbedingungen zu einer Entlastung des Bedieners beitragen [271].

Damit einher geht die Steigerung der Produktivität und Qualität, was zu einer Kostenreduktion für den Bauunternehmer führt.

[271] nennt bei der Betrachtung der Produktivitätssteigerung von Hydraulikbaggern als weiteren Treiber für die Kostenreduktion die Effizienzsteigerung bei der Ausführung der Primärtätigkeit, welche als die Hauptaktivität einer Maschine definiert ist. Für den Bagger stellt die Erdbewegung die Primärtätigkeit dar und hebt sich damit von den Sekundärtätigkeiten und Tertiärtätigkeiten ab. Sekundärtätigkeiten sind Aufgaben, welche nur indirekt auf die Primäraufgaben einwirken und keinen wertschöpfenden Anteil besitzen. Als Beispiel für diese Tätigkeiten sind Wartungsarbeiten, Rüstvorgänge und Bedie-

[13] www.doxel.ai

nerautorisierungsprozesse zu nennen. Die Tertiärtätigkeiten üben keinen Einfluss auf die Primäraufgabe aus und beinhalten in erster Linie Backoffice-Aufgaben. Bei der Automatisierung von Baumaschinen steht die Primärtätigkeit im Mittelpunkt, um die genannten Vorteile zu generieren.

Der Großteil der Baumaschinen leistet mechanische Arbeit durch die gezielte Bewegung der Arbeitsausrüstung oder des Fahrwerks und überträgt Kräfte und Momente auf die Umgebung. Baumaschinen sind geprägt durch ein Zusammenspiel von mechanischen, elektrischen und hydraulischen Komponenten im Einsatz mit wechselnden Umweltbedingungen und hochgradig stochastischen Prozessmedien. Ein Radlader muss sein Ladespiel absolvieren können, egal ob er leichte Holzhackschnitzel in einer Industrieanlage lädt oder ob er große Findlinge im Steinbruch bei Regen transportieren muss. Die umfassende Automatisierung der Arbeit einer Baumaschine scheitert derzeit hauptsächlich an der hohen Heterogenität der Arbeitsmedien. Sowohl die geometrische Form als auch die Zusammensetzung und die stofflichen Eigenschaften der Schüttgüter und Erdstoffe lassen sich unzureichend erfassen und auch schlecht in mathematischen Modellen beschreiben. Die Komplexität und Heterogenität der Maschine-Prozess-Interaktion ist die größte Schwierigkeit bei der Automatisierung von Baumaschinen. Aus diesem Grund existiert bisher eine überschaubare Menge an teilautomatisierten Maschinen.

Im Gegensatz zum Arbeiten im Erdstoff oder mit anderen Prozessmedien, lässt sich die Fahraufgabe oder das lastarme Bewegen der Arbeitsausrüstung derzeit technisch mit gewissen Einschränkungen automatisieren.

Die dem Stand der Technik zugehörigen automatisierten Prozesse werden im Folgenden beschrieben und Vertretern zugeordnet.

Automatisiertes Fahren

Baumaschinen sind meist mobil, verfügen über Rad- oder Kettenfahrwerke, welche auf unwegsamem Gelände und unter widrigen Umweltbedingungen Zugkraft auf den Untergrund übertragen müssen. Die sensorische Erfassung der Umgebung, lokale Referenzierung sowie die Navigation und Trajektorienplanung sind ähnliche Aufgaben, wie sie bei der Entwicklung autonomer Straßenfahrzeuge auftreten. Das hat zur Folge, dass die Verfügbarkeit von geeigneter Sensorik sowie die Methoden für die Umsetzung der automatisierten Fahraufgabe durch die onroad-Fahrzeugindustrie sowie die Mobilrobotik begünstigt wird.

Bekanntestes Beispiel für eine automatisierte Fahrt sind Muldenkipper in Großtagebauen. Verschiedene OEM wie CATERPILLAR, KOMATSU und SANDVIK bieten bereits Systeme zur Fernnavigation in Tagebauen und Bergwerken[14, 15, 16,17, 18, 19].

Diese Anwendungsszenarien bieten ideale Umgebungen für den automatisierten Betrieb. Die Einsatzorte sind abgeschlossene Areale, es gibt keine unbefugten Personen im Bereich der Fahrstrecken und keine unbekannten Objekte. Die Fahrzeuge fahren auf festgelegten Strecken, ähnlich einem fahrerlosen Transportsystem (FTS), und das Gebiet ist vollständig kartiert. In Tagebauen können die Kipper über GNSS gesteuert werden, während sich die Fahrzeuge untertage an Tunnelwänden orientieren können. Die Fahrzeuge verfügen über Technologien zur Erfassung von Hindernissen auf den Fahrwegen, wie Schlaglöcher oder andere Maschinen, und können auf diese reagieren. Das Manövrieren am Aufgabeort wird jedoch per Fernsteuerung übernommen.

[14] https://www.equipmentworld.com/how-komatsus-autonomous-haul-trucks-work-and-what-it-takes-to-implement-the-technology-at-a-working-mine/
[15] https://www.cat.com/en_US/news/machine-press-releases/cat-autonomous-mining-trucks-haul-one-billion-tonnes.html
[16] https://www.equipmentworld.com/how-komatsus-autonomous-haul-trucks-work-and-what-it-takes-to-implement-the-technology-at-a-working-mine/
[17] https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/automation/automine-equipment-and-teleoperation-systems/
[18] https://www.smh.com.au/business/companies/no-one-behind-the-wheel-the-new-workforce-driving-australia-s-mines-20190411-p51dd2.html
[19] https://im-mining.com/2019/08/06/pilbara-leads-way-haul-truck-automation/

Maßgeblich für das Gelingen einer automatisierten Fahraufgabe ist derzeit eine

- kontrollierte, strukturierte Umgebung mit guten Voraussetzungen für Kartierung und Überwachung,
- klar definierte Aufgaben, geringe Notwendigkeit zur online-Entscheidungsfindung,
- Ausschluss von manuell bedienten Fahrzeugen oder Passanten auf dem Gelände.

Das wiederum sind gleichzeitig die Hemmnisse für die Umsetzung im Baumaschinenbereich. Die regelungstechnischen Herausforderungen zum automatisierten Fahren einer Maschine sind grundsätzlich überschaubar. Unter Voraussetzung einer elektronisch steuerbaren Maschine sind die Aufgaben zur Antriebsregelung, Lenkung, Kurvenfahrt, Schlupfregelung, Kippkontrolle und ähnlichem aus dem Automotive-Bereich bekannt und Stand der Technik. Dennoch existieren im Bereich der Erdbaumaschinen keine selbstfahrenden, autonomen Maschinen auf dem Markt, da unter anderem bei der sensorischen Umfelderkennung mit notwendiger Auswertung noch Entwicklungsbedarf besteht und keine Marktreife erreicht ist (vgl. Kap. 3.1.3, 5.2.3). Das ist elementar für die automatisierte Fahraufgabe, da eine Baustelle durch verschiedene Gewerke, Maschinen und Menschen unvorhersehbare chaotische Strukturen aufweist.

Automatisiertes Bewegen der Arbeitsausrüstung

Eine Hauptaufgabe der Bagger ist das Bewegen des Werkzeugs durch das Arbeitsmedium. Dies kann das Ausheben einer Grube mit einem Tieflöffel sein, das Bewegen eines Anbauverdichters auf der Bodenoberfläche oder das Greifen von Schrott oder Baumstämmen mit einem Greifwerkzeug. Die Bewegung wird dabei vom Fahrer über Joysticks gesteuert, wobei jede Joystick-Achse einem Aktor zugeordnet ist. Das Zusammenspiel und der daraus resultierende, bevorzugt flüssige, Bewegungsablauf der Arbeitsausrüstung wird vom Bediener über die manuelle Kombination der Einzelbewegungen erreicht, es gibt beim klassischen Bediensystem keine Möglichkeit, z.B. eine lineare Bewegung über eine einzige Hebelbewegung auszuführen (am Beispiel Bagger Abbildung 4: separate Ansteuerung der einzelnen Hydraulikzylinder für die Bewegung von Ausleger, Stiel und Viergelenk). Die Überlagerung mehrerer Einzelbewegungen zu einer Gesamtbewegung ist für ungeübte Fahrer äußerst schwierig zu realisieren. Die Überlagerung erfolgt zunächst „im Kopf“, erst mit zunehmender Erfahrung kann die gewünschte Bewegung intuitiv realisiert werden. Bei der Bewegung des Werkzeugs durch das Arbeitsmedium treten unterschiedliche Prozesslasten auf, die sogar eine Bewegung verhindern können (zu tiefes Eindringen in den Boden beim Graben).

Aus dieser Problematik ergibt sich ein Ansatz für die Automatisierung. Ein Großteil der sogenannten „Baggersteuerungen“ auf dem Markt sind jedoch reine Visualisierungslösungen. Der Bagger wird dazu sensorisch ausgerüstet, um die Lage der Arbeitsausrüstung zu erfassen. Das geschieht durch Zylinderlängensensoren oder Neigungssensoren bzw. IMUs (vgl. Kap. 3.1). Die Vorgabe einer Soll-Geometrie ermöglicht den online Abgleich zwischen tatsächlicher und gewünschter Werkzeugposition. Die Differenz wird dem Fahrer visuell über ein Display zur Verfügung gestellt. Der Fahrer kann dann manuell eingreifen und hat durch das System einen besseren Prozesseinblick [179] [318].

Wenige Hersteller bieten eine Komplettlösung an, um den Bagger auch automatisiert zu bewegen. Technologisch besteht hier die Schwierigkeit, die Prozesslast in die Regelung einzubeziehen und mit der Messtechnik die Umgebung zu erfassen, sodass ein effizienter Arbeitsprozess entsteht. Ein erfahrener Bediener weiß, wie tief er im jeweiligen Erdstoff graben kann, wie er den Löffel zu führen hat um eine ideale Füllung zu erreichen und wie mit Hindernissen umzugehen ist. Bei aktuellen Baggersteuerungen wird jedoch keine Information über die Bodenbeschaffenheit berücksichtigt[20]. Daher beschrän-

[20] Informationen über die Bodenbeschaffenheit können in der Regel nicht vorgegeben werden, dazu müsste diese zunächst gemessen und charakterisiert werden (Bodenprobe, Analyse, Kennwerte). Dies allein ist ein weites Forschungsfeld, unabhängig von der Maschine. Für die Integration von entsprechenden Messsystemen in die Maschine gibt es bisher bestenfalls Ansätze oder Einzellösungen.

ken sich viele automatisierte Baggersteuerungen auf Prozesse mit geringen Lasten, wie bspw. das Ziehen eines Feinplanums [64] [166]. Trotzdem sind durch solche Systeme bereits Produktivitätssteigerungen im Vergleich zum konventionellen Abziehen des Planums mit einem Messgehilfen möglich [296].

Ein weiteres Problem bei der Umsetzung der Baggersteuerung ist die notwendige Manipulation des Steuersystems des Baggers. Anbieter von Baggersteuerungen sind in der Regel nicht die Maschinenhersteller, sondern Systemanbieter aus dem Bereich Sensorik und Elektronik. Diese könnten bei elektrohydraulisch vorgesteuerten Maschinen aus technischer Sicht durchaus über das Bordsystem in die Maschinensteuerung eingreifen, um die gewünschte Bewegung der Arbeitsausrüstung zu realisieren. Dies setzt aber eine Zusammenarbeit mit dem Maschinenhersteller voraus, was häufig nicht der Fall ist. Bei hydraulisch vorgesteuerten Maschinen ist so eine „retrofit"-Lösung dagegen zwar aufwändig, aber auch ohne Mitwirkung des Maschinenherstellers durch Systemanbieter machbar [327].

Die Hersteller reagieren auf die Kundenwünsche und Entwicklungen in der Branche mit unterschiedlichen Strategien. Neben der Entwicklung eigener Steuerungssysteme und damit der Teilautomatisierung einzelner Prozesse, bietet bspw. DOOSAN Vorrüstungen für die verschiedenen Steuerungshersteller wie LEICA, TRIMBLE und XSITE an, damit die Maschinen nachträglich ohne erheblichen Aufwand umgerüstet werden können [241].

Ein Radlader besitzt zusätzlich zur Bewegung des Werkzeuges durch das Arbeitsmedium einen zum Bagger vergleichsweise hohen Fahranteil. Die Automatisierung der Arbeitsausrüstung gestaltet sich dadurch ähnlich komplex, da zwar lediglich die Bewegung zweier Aktoren, nämlich Hub- und Neigungszylinder automatisiert synchronisiert werden müssen, aber der translatorische Anteil der Arbeitsbewegung aus der Antriebsbewegung hinzukommt. Die am Markt verfügbaren Lösungen beschränken sich derzeit auf die Ansteuerung dieser beiden Zylinder der Arbeitsausrüstung, ohne den Fahranteil einzubeziehen, wie z.B. das HITACHI Auto Level System. Dieses ermöglicht zum einen eine automatische Rückstellung der Schaufel nach dem Entladevorgang parallel zum Boden (Neigungszylinder) und zum anderen ein automatisches Anfahren voreingestellter Hubhöhen (Hubzylinder) [134].

Automatisiertes Planieren

Automatisiertes Planieren ist eine Funktion, die am Markt schon flächendeckend verfügbar ist. Der Grund besteht darin, dass diese Tätigkeit, im Vergleich zu anderen, zu den steuerungstechnisch wenig komplexen Arbeitsaufgaben gehört und die Prozesslasten kleiner sind und damit eine untergeordnete Rolle spielen. Das Planieren ist das Errichten einer planaren Fläche, dem Planum. Dazu ist es ist es im einfachsten Fall notwendig, die Höhe des Werkzeuges auf die gewünschte Höhe einzustellen. Für das Planieren sind auf der Erdbaustelle verschiedene Baumaschinen geeignet. Dazu zählen der Bagger, die Planierraupe (Dozer) und der Erdhobel (Grader). Für den Bagger stellt die Automatisierung dieses Prozesses die komplexeste Aufgabe im Vergleich zu Dozer und Grader dar, da die Bewegungen von Ausleger, Stiel und Schaufel parallel geregelt werden müssen. KOMATSU hat diese Funktion mit der IMC, der Intelligent Machine Control, einer semitautomatischen Steuerung der Arbeitsvorgänge Graben und Planum ziehen, umgesetzt. Dabei wird das Geländeprofil auf die Steuerung übertragen, welche durch den Eingriff in die Arbeitshydraulik dafür sorgt, dass das vorgegebene Profil nicht unterschritten wird. Die Herstellungszeit des Erdbauwerks kann so deutlich verkürzt werden, da zum einen die Geschwindigkeit der Arbeitsbewegung erhöht wird und zum anderen ein aufwändiges Nacharbeiten im Falle eines Unterschreitens der Profilhöhe vermeiden wird [222] [164]. Zusätzlich wird die Vermessung des Erdbauwerkes während der Erstellung durch das System in Echtzeit übernommen und damit ein Zeitvorteil generiert. Angeboten wird diese Funktion in ausgewählten Hydraulikbaggern (z.B. PC210LCi-10) und Dozern (KOMATSU D61PXi-2). Bei den Dozern kann zusätzlich zwischen Grob und-Feinplanum unterschieden werden. Zunächst wird ein Grobplanum mit automatisierter Schildsteuerung erstellt, bei dem die Schildhöhe an die Schildlast (Last die aus dem bewegten Gut vor dem Schild entsteht) angepasst und so der Kettenschlupf, welcher beim Gleiten der Kette auf der Oberfläche entsteht, minimiert wird (Effizienzsteigerung). Die Schildsteuerung umfasst dabei das Einstellen des Schil-

des in Höhe und Neigung. Über das anschließende Feinplanum kann so ein exaktes Höhenprofil hergestellt werden [222]. Die sensorische Ausstattung des Systems umfasst 3D- Laserscanner und Stereo-Kameras [162].

Der weltweit größte Baumaschinen-Hersteller CATERPILLAR bietet serienmäßig ebenfalls eine Planierautomatik an. Bei dem System „Grade Control“, welches seit 2018 in ausgewählten Baggermodellen angeboten wird, handelt es sich um eine Erweiterung der 2D-Steuerung von CATERPILLAR, bei der dem Bediener Informationen über die Längs- und Querneigung und eine Höheninformation mit entsprechender akustischer Höhen- und Tiefenwarnung angezeigt werden. Das System umfasst das Planieren mittels einer automatischen Auslegersteuerung, der Bediener steuert dabei lediglich die Stielbewegung mittels Joystick. Die Ausleger- und Schaufelbewegung müssen durch den Bediener nicht gesteuert werden, sondern erfolgen automatisiert, sodass ein plane Fläche entsteht. Dafür ist der Bagger mit Winkelsensoren ausgestattet. Der Bediener kalibriert die Höhe der Löffelschneide an einem Referenzpunkt und legt die Zieltiefe von diesem Punkt aus fest. Die Löffelschneide besteht aus dem Schneidenblech und aufgesetzten Zähnen und stellt den Teil des Löffels dar, der gegen den Erdstoff bewegt wird [173]. Die Automatikfunktion umfasst nun die o.g. Auslegersteuerung bei konstantem Schneidenwinkel des Löffels. CATERPILLAR bietet optional eine Erweiterung dieser Funktion mit einer TRIMBLE 3D-GNSS-Steuerung an, mit der auch komplexere Profile erstellt werden können. An dieser Stelle sei noch die Protect-Funktion genannt, welche eine Höhenbegrenzung der Arbeitsausrüstung durch Unterbrechung des Ölvolumenstroms beim Überschreiten einer vordefinierten maximalen Höhe ermöglicht. Dabei wird in Echtzeit die Höhe verschiedener Punkte der Arbeitsausrüstung (Auslegerbuckel, Stielhochpunkt, Koppel-, Löffelschneide- und Löffelrückseitenhöhe berechnet und mit der Maximalhöhe verglichen. Wie bei der vorgenannten Lösung von Komatsu kann auch hier die Steuerung maschinenübergreifend verwendet werden. So kommt die Planierautomatik auch bei Dozern und Gradern zum Einsatz. Es erfolgt die Auswertung von Sensorsignalen im Bordrechner und die Umsetzung als vollautomatisierte Schildführung. Der Fahrer muss lediglich lenken um ein Feinplanum herzustellen [65].

Der Hersteller CASE bietet mit SiteControl eine ähnliche Prozessautomatisierung für Planierraupen und Grader an. Zusätzlich ist es bei diesem System möglich, ein gewünschtes Gefälle einzustellen, welches automatisch gehalten wird. Dabei wird die Schildneigung mithilfe eines Schildneigungssensors gemessen und nachgeregelt und die Echtzeitdaten über Soll- und Ist-Position des Schildes auf dem Display in der Fahrerkabine angezeigt [58] [57].

VEMCON bietet mit dem herstellerunabhängigen System Copilot eine Nachrüstmöglichkeit für die Funktion teilautomatisiertes Feinplanum ziehen an [328]. Dabei wird die gewünschte Neigung der Planums-Ebene im Panel des Systems eingegeben und nach der Aktivierung die Ebene abgezogen, dabei ist auch das Arbeiten an Böschungen sowohl von unten als auch von oben möglich. Das System kann laut Hersteller in jedem Bagger implementiert werden. Dabei muss je nach Baggermodell und sensorischer Ausstattung des Grundmodells neben dem Steuergerät und der Anzeigeeinheit, die notwendige Sensorik (IMU, Druck- und Temperatursensoren) implementiert werden. Im Falle einer hydraulischen Vorsteuerung des Ventilblocks muss noch ein elektrohydraulischer Vorsteuerblock ergänzt werden, der den hydraulischen Vorsteuerdruck der Ventile durch elektrische Druckminderventile einstellt. Fachartikel, wie [30], suggerieren, dass dieses System unabhängig von der Aufgabe wiederkehrende Bewegungen teilautomatisieren kann. VEMCON selbst benennt hingegen nur das Planum ziehen und das Abziehen bei verschiedenen Böschungswinkeln als teilautomatisierbare Arbeitsprozesse. Im Unterschied zur Lösung von CATERPILLAR muss hier kein Referenzpunkt vermessen werden. Vielmehr lernt das System beim Fahrer, indem mithilfe eines neuronalen Netzes die Bewegung der Arbeitsausrüstung vom Fahrer erlernt und anschließend exakt abgefahren wird. Der Hersteller verspricht laut [30] die Möglichkeit einer Aufrüstung bis hin zur Vollautomatisierung.

Die TOPCON Positioning Group [242] verfolgt mit ihrer automatischen Baggersteuerung einen ähnlichen Weg. Die Kalibrierung der Steuerung erfolgt drahtlos mit einer Referenzstation und zeichnet sich durch hohe Genauigkeiten aus. TOPCON betitelt die Funktion als automatische Tiefensteuerung und bewegt sich damit auf einer Vorstufe zum Planum ziehen, da lediglich ein vorher definiertes Profil nicht unterschritten wird [242].

Im Rahmen dieses Abschnittes soll noch die automatisierte Neigungsfunktion eines Tiltrotators angeführt werden. LEICA Geosystems und ENGCON haben in einer Kooperation ein solches System entwickelt. Dabei handelt es ich um eine Funktion des „D-Steuerungssystems IXE Copilots von LEICA. Die Neigung des Tiltrotators wird dabei auf die gewünschte Profilneigung des Erdbauwerks eingestellt. Das gewünschte Profil wird vor Arbeitsbeginn in das System über die Bedieneinheit eingegeben [93] [71].

Diese Beispiele zeigen, dass eine Vielzahl von Herstellern bereits teilautomatisierte Lösungen vermarkten bzw. Nachrüstlösungen am Markt verfügbar sind, diese aber das Leistungsniveau einer Teilautomatisierung nicht überschreiten und auf die Anwendungen mit begrenzten Prozesslasten beschränkt sind (Planum ziehen, Neigungsfunktion Tiltrotator) [328].

Automatisiertes Laden

Ein automatisierter Ladezyklus eines Radladers in einem Kompostierwerk wurde bereits 2003 von [226] gezeigt. Mit der technologischen Einfachheit eines abgeschlossenen Arbeitsbereiches des Radladers und der damit einhergehenden Möglichkeit der Fahrzeugorientierung in der Halle mithilfe von Laserscannern, wird die Fahraufgabe mittels induktiven Leitdrähten in der Halle realisiert. Die Fahraufgabe beschränkt sich damit auf immer wiederkehrende Aufgaben mit gleichen Fahrabschnitten. Die Randbedingungen, die dazu führen, dass diese Methodik nicht auf eine offene Baustelle übertragen werden kann, wurden in diesem Abschnitt (siehe Automatisiertes Fahren) bereits erläutert.

Gleiches gilt für den Ladevorgang. Bei diesem wird das Gut aus der untersten Schaufelstellung aufgenommen, angehoben und in der obersten Stellung entladen. Dabei kann das Hubgerüst eine immer wiederkehrende Bewegung ausführen. Ein optimale Schaufelbefüllung und die damit einhergehende optimale Trajektorie findet in diesem Fall keine Beachtung. Damit entfällt die Notwendigkeit, das Haufwerk vor dem Einstechen zu erkennen, was zu einer starken Vereinfachung des Automatisierungsaufwandes führt, die Umsetzung aber auch auf diesen Anwendungsfall beschränkt. In Kombination mit der Transportaufgabe entlang definierter Bahnen wurde ein vollautomatischer Prozess umgesetzt. Nicht zuletzt die unterschiedlichen Eigenschaften der Böden und Schüttgüter verhindern jedoch eine einfache Übertragung dieses Vorgehens auf die Baustelle bezüglich der Werkzeug-Material-Interaktion.

Aktuell sind am Markt deshalb in erster Linie Assistenzsysteme verfügbar, die den Ladevorgang teilweise unterstützen. Ein Beispiel für eine teilautomatisierte Ladefunktion bietet CATERPILLAR mit der AutoDig Funktion an. Der Fahrer hat die Möglichkeit den Ladevorgang nach einer vorgegebenen Bewegung der Schaufel automatisiert durchführen zu lassen. Das System wird per Knopfdruck aktiviert und mit dem Einstechen ins Haufwerk beginnt die Bewegung, bis die gefüllte Schaufel in der Transportstellung steht und der Fahrer aus dem Haufwerk herausfahren kann. Der Bediener muss währenddessen die Fahr- und Lenkaufgaben ausführen. Damit kann ein schneller Ladevorgang mit optimaler Schaufelfüllung wiederholt erreicht werden, was vor allem für einen ungeübten Fahrer einen Mehrwert darstellt, da dieser eine hohe Ladeleistung erreichen kann, aber auch für den geübten Fahrer durchaus eine Erleichterung darstellt [367].

Eine Ladefunktion, die nahezu in jedem Radlader verfügbar ist, ist die Return-to-Dig Positionierung der Radladerschaufel. Diese ermöglicht die Rückkehr in eine definierte Ladestellung und führt damit zu einer Optimierung des Ladeprozesses. Besonders in Kombination mit einer halbautomatischen Entladefunktion (bspw. Boom Kick-Out von Volvo [332]) kann der Entladevorgang schneller erfolgen, da eine vordefinierte Höhe nicht über – oder unterschritten werden kann. Neben dem Aspekt der Zeitersparnis ist als Vorteil auch der Sicherheitsaspekt zu nennen. Zum einen ermüdet der Fahrer weniger schnell bei immer wiederkehrenden gleich ausgeführten Entladevorgängen, zum anderen können Unfälle bei Tätigkeiten mit einer einzuhaltenden Maximalhöhe vermieden werden, da die begrenzende Höhe nicht überschritten werden kann. Die Kopplung der drei genannten Funktionen kann einen Ladezyklus mit Lade- und Entladevorgang teilautomatisieren. Dabei wird zunächst automatisch geladen, nach Erreichen des Entladepunktes automatisiert entladen und schließlich in die Ausgangstellung der Arbeitsausrüstung gefahren. Für alle genannten Funktionen kann die Parametrierung dem System vorgegeben werden, sodass diese auf verschiedene Randbedingungen anpassbar ist. Die Fahraufgabe

muss vom Fahrer übernommen werden, dabei kann dieser sich im Besonderen auf die Abstimmung der Vorwärtsbewegung beim Einstechen in den Haufen konzentrieren, da dieser Vorgang vor allem von ungeübten Fahrern mit hohem Schlupfanteil der Räder und damit ineffizient ausgeführt wird. LIEBHERR bietet für diese Problemstellung eine stufenlos automatisch arbeitende Zugkraftregulierung (XPower) unter Nutzung eines leistungsverzweigten Getriebes an [363]. Damit kann die Antriebsleistung immer spezifisch an die Anforderungen des Einsatzes angepasst werden. Möglich wird das durch die stufenlose Kombination beider Antriebsarten (hydraulisch und mechanisch). Es ergeben sich reduzierte Schlupfwerte und damit eine Senkung des Kraftstoffverbrauches. KAWASAKI biete mit Intellidig ein System mit der gleichen Funktionalität an, welches aber über den Eingriff in das Motorsteuergerät die Antriebsleistung anpasst und so ein Durchdrehen der Räder verhindert [105].

Die kontinuierliche Nutzlastbestimmung ist ein weiteres Assistenzsystem, welches dem Ladevorgang zuzuordnen ist. Diese Wiegeeinrichtungen sind bei verschiedenen Hersteller (CATERPILLAR CPM [66] , Load Assist VOLVO [336]) erhältlich und beruhen auf der Berechnung der Last aus den Hubzylinderrücken und der Position des Hubergerüstes (Winkelgeber, Positionssensor) [10]. Alle Systeme bieten die grafische Darstellung der aktuell geladenen Masse und die Speicherung für die weitere Verwendung, bspw. für die Verwaltung der Produktionsziele. Auch für Bagger ist dieses System verfügbar.

Auch als Nachrüstlösung werden solche Wiegeeinrichtungen angeboten [10]. Die Hersteller versprechen eine Erhöhung der Genauigkeit jeder Ladung, was wiederum zur Steigerung der Produktivität führt.

Gründe für den geringen Grad der Automatisierung in diesem Sektor sind die vielfältigen Arbeitsaufgaben sowie die anspruchsvollen Umgebungsbedingungen (Schwingungen, Temperatur, Schmutz). Die Nachfrage nach höherer Produktivität, Effizienz und besseren Arbeitsbedingungen begründet den Bedarf nach automatisierten Erdbewegungsmaschinen.

Die Entwicklungsaufgaben für die Teilautomatisierung eines Radlader-Arbeitsspiels sind:
- Pfadplanung für die Fahraufgabe,
- Objekterkennung, Kollisionsvermeidung und Navigation,
- Pfadplanung für die Arbeitsausrüstung.

Dabei müssen insbesondere folgende Aspekte berücksichtigt werden:
- Technologische Leistung (Füllgrad und Spielzeit[21]),
- Energieeffizienz,
- Sicherheit.

Automatisiertes Bohren und Fräsen

Die im Spezialtiefbau eingesetzten Bohrverfahren sind das Kellybohren, das Endlosschneckenbohren, das Vollverdrängerbohren, das Doppelkopfbohren, das Greiferbohren, das Lufthebebohren und das Imlochhammerbohren, wobei dem Kellybohrverfahren die größte Bedeutung zuzuordnen ist, da es aufgrund seiner charakteristischen teleskopierbaren Bohrstange sehr flexibel einsetzbar ist [188]. In [153] werden die einzelnen Bohrverfahren ausführlich beschrieben. Auf eine detaillierte Ausführung wird an dieser Stelle verzichtet.

Das Bohren im Allgemeinen wird im Spezialtiefbau eingesetzt, um definierte Bohrlöcher unterschiedlichen Durchmessers und Tiefe herzustellen. So unterschiedlich die Parametrierung des Bohrloches dabei erfolgen kann, so vielfältig sind die Anwendungsgebiete dieses Verfahrens. Zu nennen sind die Gründung hoher Gebäude, die Herstellung von Pfahlwänden, das Lösen verschiedener Böden und die Herstellung von Baugruben und Schlitzwänden. Die Automatisierung kann dabei für die einzelnen Prozessschritte erfolgen.

[21] Die Spielzeit für einen Bagger setzt sich nach [116] zusammen aus dem Füllen des Löffels, dem Heben und Schwenken zum Entladeort, dem Entleeren und dem Rückschwenken und Senken zum Ausgangspunkt.

BAUER als bedeutender Hersteller von Bohrgeräten bietet eine Vielzahl von Assistenzsystemen an, die Teilprozesse automatisieren und so zur Steigerung von Effizienz, Komfort und Sicherheit führen. Zu nennen ist beispielsweise der Einfahrassistent der Kellybohrstange, welcher zu einem automatisierten Hochleistungsbetrieb durch die Regelung der Windengeschwindigkeit der Bohrstange beim Ein- und Ausfahren führt [13].

Ein weiterer Teilprozess ist das Ausrichten des Mastes, für das ein automatisches System angeboten wird, bei dem auf Knopfdruck die gewünschte Maststellung ohne ein Nachjustieren des Fahrers erreicht wird [14].

Ein beim Bohrverfahren üblicher Arbeitsschritt ist das alternierende Drehen der gezogenen Bohrstange am Entladeort, um den Bohrer zu entleeren. Auch dieser Prozess ist bereits automatisiert verfügbar, womit der Entladevorgang optimiert und der Fahrer entlastet wird. Der Bohrvorgang als solcher kann mit einem vollautomatischen Bohrassistenten ohne Eingriff des Geräteführers erfolgen. Dabei werden die Parameter Vorschub und Drehzahl konstant gehalten, können aber während des Prozesses angepasst werden. Die Eingriffsmöglichkeit des Bedieners bleibt also erhalten [14].

Weiterhin sind die Abbohr- und Ziehautomatik und der Ziehassistent für die Bohrrohre zu nennen. Erstere ist eine vollautomatische Knopfdrucklösung zum Ziehen und Verfüllen des Bohrloches mit Beton. Dadurch wird ein optimaler Füllgrad bei geringer Werkzeugbelastung und eine hohes Gütemaß der Pfahlgeometrie erreicht. Auch bei diesem Assistenten werden Vorschub und Drehzahl der Bohrstange geregelt. Der Ziehassistent hingegen ist eine alternierende Drehbewegung des Bohrrohres, welche vom Fahrer beim Ziehen gewählt werden kann, um den Ziehvorgang zu optimieren [14].

Die Gesamtheit dieser Assistenten führt durch die Zeitersparnis zu einem Anstieg der Produktivität. Zusätzlich erfolgt eine Visualisierung aller relevanten Prozessparameter für den Fahrer. Weiterhin kann über dieses Display die Position der zu setzenden Bohrung mittels GNSS-Ortung präzise angefahren werden. Ein manuelles Abstecken der Bohrpfähle entfällt damit [15].

KLEMM Bohrtechnik, als Hersteller von Bohrgeräten für kleinere Leistungsklassen, bietet mit dem MBS Bohrdatenerfassungssystem ein Datenerfassungs- und Regelungssystem an, welches neben der Sensorkalibrierung und der Datenaufzeichnung eine Prozessautomatisierung ermöglicht [161]. Bei diesem System werden verschiedenste Prozessparameter erfasst. Beispielhaft seinen an dieser Stelle Bohrtiefe, Vorschubgeschwindigkeit, Drehzahl des Drehantriebes und Druck im hydraulischen Vorschubkreis genannt. Alle aufgezeichneten Parameter sind ausführlich in [160] aufgeführt.

PRAKLA Bohrtechnik bieten mit dem Modell RB 65 ein Bohrgerät an, welches mittels elektrischer Vorsteuerung des Bohrantriebs Automatisierungsprozesse ermöglicht und damit die Anlage wirtschaftlicher und sicherer macht [262].

Sowohl Klemm als auch Prakla bieten damit die Voraussetzungen um eine Automatisierung von Teilprozessen durchzuführen. Die Hersteller suggerieren zwar in deren Produktbeschreibungen die Möglichkeit einer Automatisierung. Weiterführende Quellen sind dazu aber nicht zu finden, weshalb davon auszugehen ist, dass eine Automatisierung noch nicht umgesetzt wurde. Die Tatsache, dass beide Firmen der Bauer AG angehören, welche die o.g. Teilautomatisierungen umgesetzt hat, lässt vermuten, dass erste Lösungen in naher Zukunft aber zu erwarten sind.

Herstellerunabhängige Nachrüstsysteme werden bspw. von TRIMBLE oder MOBA angeboten. Diese beinhalten die sensorische Ausstattung des Bohrgerätes, welche aus GNSS-Antennen zur Positionsbestimmung der Lafette, einem Tiefensensor für die Erfassung der Bohrtiefe und einem Neigungssensor für den Winkel der Bohrlafette besteht. Eine Automatisierung von Bohrprozessen ist damit nicht umsetzbar, aber eine 3D-Positionierung der Maschine und Tiefenüberwachung des Bohrprozesses [292] [216].

VEMCON und KINSHOFER bieten mit SmartTag eine Sensoreinheit an, welche an ein Anbaugerät angebracht werden kann und die je nach Ausbaustufe verschiedene Messgrößen erfasst. Darunter zählen die GNSS-Position und die Beschleunigungsmessung, mit denen die Position und Bewegung des Anbaugerätes (z.B. Erdbohrer) ermittelt werden können. Mittels einer Auswertungs-App kann das entsprechende Anbaugerät gewählt werden und über eine Visualisierung dem Bediener eine Handlungsempfehlung bei Abweichungen von der idealen Bohrlochform im Bohrprozess gegeben werden [159].

Das Fräsen wird im Spezialtiefbau zur Herstellung von Schlitz- und Dichtwänden eingesetzt. Im Gegensatz zur konventionellen Greifermethode, bei der das Lösen, Aufnehmen und der Transport des Materials aus dem Bohrloch mit einem mechanischen Grabwerkzeug (zwei Löffel) erfolgt, werden beim Fräsen zwei gegenläufig rotierende Fräsräder, die als Anbauwerkzeug an einem Trägergerät installiert werden, zum Lösen des Materials eingesetzt. Der Erdabtrag erfolgt durch die Drehbewegung bei vertikaler Vorschubrichtung. Das gelöste Material wird mit einer Suspension vermischt und mit einer Pumpe zur Aufbereitungsanlage gefördert. Als Trägergeräte werden entweder Hydraulik- bzw. Seilbagger eingesetzt [203].

Automatisierungslösungen sind bei keinem Hersteller vorhanden, lediglich Assistenzsysteme zur Vertikalmessung des Schlitzes, unter Verwendung von Neigungssensoren, werden in die Steuerungen integriert und für den Fahrer auf dem Display visualisiert. Die Vertikalität des erstellten Schlitzes kann so überwacht und herstellerspezifisch über die Klappensteuerung [16] oder hydraulisch verstellbare Führungsleisten [74] am Fräsenkörper korrigiert werden. Die Korrektur erfolgt durch den Fahrer, stellt aber einen möglichen Ansatzpunkt für eine Teilautomatisierung dar. Weiterhin werden die Prozessdaten gespeichert und mittels Mobilfunktechnologie zur weiteren Auswertung übertragen.

Betrachtet man die Anbaufräsen für Hydraulikbagger im Tiefbau, eröffnet sich ein großes Feld an Herstellern, aber auch ein ähnlich geringer Grad der Automatisierung.

Fazit Tiefbau

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Bauunternehmer bei Baggern auf 2D- oder 3D-GNSS Steuerungen verschiedener Hersteller setzen, um die in diesem Abschnitt benannten Möglichkeiten der Teilautomatisierung von Maschinenaufgaben auszuschöpfen. Die beiden hauptsächlich eingesetzten Systeme kommen dabei entweder von TOPCON oder TRIMBLE, wobei die Unternehmer sich meist auf einen Hersteller festlegen, um Kompatibilitätsprobleme der zugrundeliegenden Geländedaten auszuschließen. Dabei sind nicht nur die Nachrüstsysteme der genannten Hersteller anzuführen, sondern auch die Tatsache, dass die Maschinenhersteller bei der Serienausstattung ihrer Maschinen ebenfalls überwiegend die Systeme der genannten Anbieter einsetzen.

Ein Problem beim Einsatz der Steuerungen ist die Bereitstellung der notwendigen Geländedaten. In vielen Fällen sind diese noch nicht vorhanden oder die Interpretation durch den Bediener ist nicht eindeutig. Die Verbindlichkeit der angezeigten Geländedaten muss geprüft werden, bspw. ob die angezeigte Begrenzungslinie im Display tatsächlich dem durch die Maschine herzustellenden oder dem fertigen Bauwerk entspricht. Wenn die Datengrundlage hingegen stimmt, können Genauigkeiten im einstelligen Zentimeterbereich erreicht werden, was bei anspruchsvollen Bauprojekten dem Auftragnehmer einen Wettbewerbsvorteil beim Einsatz dieser Technik einbringt. Die Steuerungen bieten dabei verschiedene Entwicklungsstufen: von reinen Visualisierungslösungen, bei denen der Fahrer lediglich eine Information über die Löffelposition im Gelände erhält, das System aber nicht aktiv eingreift, bis hin zur Teilautomatisierung einzelner Prozesse (bspw. Planum ziehen), was den aktiven Eingriff der Steuerung in die Aktorik bedeutet.

Diese Aussagen sind auch auf andere Baumaschinen wie Dozer und Grader übertragbar. Auch hier werden integrierte GNSS-Steuerungen verwendet. Maschinenspezifisch werden hier automatische Schildsteuerungen angeboten, die zum einen Funktionalitäten wie die automatische Schildlasterkennung und zum anderen die Höhensteuerung für eine vorgegebene Planumshöhe beinhalten. Hohe Genauigkeiten, also auch das Feinplanum ziehen, sind bei den derzeitigen Systemen bereits realisierbar (millimetergenau). Bei Radladern zählen automatische Wägeeinrichtungen und teilautomatisierte Be- und Entladungsvorgänge zum Stand der Technik.

4.4 STRASSENBAU

In diesem Abschnitt werden die für den Straßenbau typischen Maschinen betrachtet. Dabei sind Parallelen zum Tiefbau (4.3) beim Einsatz der Maschinen Radlader, Bagger, Grader und Dozer festzustel-

len. Da diese Maschinen im Straßenbau gleichermaßen eingesetzt werden, wird auf eine erneute Beschreibung verzichtet und lediglich auf die ausschließlich im Straßenbau zur Herstellung der Asphalt- oder Betondecke und der notwendigen Vorarbeiten eingesetzten Maschinen eingegangen. Diese sind die Straßenbaumaschinen Beschicker, Kaltfräse, Straßenfertiger, Verdichtungswalze und Recycler.

Schon heute ist im Straßenbau ein vergleichsweise hoher Automatisierungsgrad der einzelnen Maschinen anzutreffen, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Die Hauptparameter eines Straßenbauprozesses sind die Schichtstärke, Ebenheit und Verdichtung als Gütekriterium des Straßenbauwerkes, und die variablen Prozessparameter, die eben diese beeinflussen, z.B. die Einbautemperatur. Weiterhin sind der Materialfluss und die Abstimmung aller beteiligten Akteure ein wichtiges Stellglied, was unter dem Begriff Asphaltlogistik zusammengefasst werden soll [217].

Die Bestrebungen der Hersteller und Zulieferer bestehen in der Überwachung dieser Parameter und/oder in der Automatisierung der Prozesse, die Einfluss auf diese Größen ausüben. Die Abstimmung dieser Prozesse ist der kritische Punkt im Straßenbau, denn besonders hier kommt es auf die ganzheitliche Prozesskette an, um den geforderten Qualitätsanspruch zu erreichen [68].

Asphalt-Straßenfertiger können grundsätzlich eine vorgegebene Schichtdicke kontinuierlich einbauen und somit Schichten mit gleichbleibender Höhe herstellen. Die „schwimmenden“ Bohlen liegen dabei frei auf dem Mischgut auf, wobei die Steuerung der Schichtdicke über die Fahrgeschwindigkeit des Fertigers und über die Materialhöhe vor der Bohle erfolgt [349]. Voraussetzung für eine hohes Gütemaß bei der Ebenheit ist die entsprechende Vorbereitung des Unterbaus. Die konventionelle Methode, die Höhe der gefertigten Asphaltdecke einzustellen, besteht in der Steuerung von Hydraulikzylindern, welche die Bohle entsprechend eines seitlichen Leitdrahtes, welcher mechanisch oder mit Ultraschallsensoren abgetastet wird, nivellieren [152]. Der Leitdraht, mit den verbundenen Kosten eines erhöhten Einrichtungsaufwandes, wurde im Straßenbau zunehmend durch eine berührungslos messende Ebenheitssteuerung verdrängt. Als physische Referenz wird dabei beispielsweise die vorhandene Straßenschicht genutzt (MOBA-Matic II, LEICA Icon Pave [182], TOPCON mmGPs [314]). Beim MOBA-Matic II System wird beispielsweise, mittels verschiedener Sensoren (z.B. Ultraschall, Drehgeber, Neigungssensor, Laser), die Bohlenhöhe und -neigung gesteuert, um die hohen Anforderungen an die Ebenheit zu gewährleisten [210]. Ebenfalls von MOBA (Pave TM) wird eine automatische und kontinuierliche Messung der Asphaltschichtdicke unter Verwendung von Ultraschallsensorik umgesetzt [213].

Zur Steuerung der Einbauhöhe und Querneigung sind auch 3D-Steuerungen für Asphaltfertiger dem Stand der Technik zuzuordnen (bspw. VÖGELE Navitronic Plus [149]). Bei diesen Systemen kann auf Grundlage der Planungsdaten sowohl die Steuerung der Einbaulage als auch der Einbaurichtung erfolgen. Das System greift dabei aktiv in die Lenkung des Fertigers ein und ist damit als automatisierter Prozess einzustufen. Zur Positionsbestimmung werden auch die aus der Positionsbestimmung bei Erdbaumaschinen bekannten Positioniersysteme genutzt. Dabei kommen sowohl GNSS-Systeme als auch optische Systeme mit Laser und Prisma zum Einsatz [149].

Um die Prozessparameter beim Umsetzen eines Fertigers nicht erneut aufwändig einrichten zu müssen, bieten die Steuerungen oftmals die Möglichkeit, die notwendigen Parameter (Position der Förderschnecke und der Bohle) zu speichern (DYNAPAC Set Assist), was den Abschnittswechsel deutlich beschleunigt [87].

Die Einbautemperatur ist ein wichtiger Parameter sowohl für den Einbau, also die Verarbeitung im Asphaltfertiger, als auch während des anschließenden Verdichtungsprozesses. Aktuell ist es möglich, mittels Infrarotmesstechnik die Asphalttemperatur der eingebauten Schicht hinter der Bohle zu ermitteln. Zur Anwendung kommt diese Technik beispielsweise beim VÖGELE RoadScan-System [150], beim Zulieferer MOBA mit PAVE IR [214] oder bei VOLVO [337]. Diese berührungslosen Messsysteme ermitteln die Oberflächentemperatur des Asphalts während des Einbaus über die gesamte Bohlenbreite. Das Ergebnis wird dem Bohlenbediener in Echtzeit dargestellt, damit dieser den Prozess entsprechend steuern kann. Für einige Systeme ist zusätzlich eine cloudbasierte Speicherung zur weiteren Verarbei-

tung der Daten und für die Überwachung des gesamten Prozessablaufes erhältlich. Der Einbautemperatur ist ein hoher Stellenwert zuzuordnen, da die nachfolgende Verdichtung innerhalb eines optimalen Temperaturbereiches erfolgen muss. Bei zu hohen Temperaturen sinkt die Verdichtungswalze in den Asphalt ein und bei zu niedrigen Temperaturen ist das Material nicht mehr ausreichend verdichtbar [349]. Eine Verdichtungskontrolle in verschiedenen Ausführungsstufen wird sowohl von den Walzenherstellern [36] selbst, als auch als Add-On System (MOBA) für Bestandswalzen angeboten. Bei diesen Systemen wird die Verdichtung indirekt aus einer Messung des Vibrationsverhaltens der Bandagen der Walze [152] berechnet und als Steifigkeitsmodul dem Fahrer angezeigt [112]. HAMM bietet mit dem HCQ-Navigator ein solches System an. Über eine kontinuierliche Speicherung wird dabei eine flächendeckende Verdichtungskontrolle gewährleistet und die zugehörige Position mittels GNSS-System dem Verdichtungsfortschritt zugeordnet. Das System bietet zusätzlich eine Datenübertragung der Verdichtungsparameter, sodass auch aus der Ferne eine Überwachung des Baufortschrittes ermöglicht wird. Außerdem sind Rückfahrkameras, ein Tempomat und ein automatische Reversierfunktion implementiert [245]. Es lässt sich also feststellen, dass auch bei den Walzen der Weg zur Automatisierung über die Einführung von Assistenzsystemen gegangen wird.

Ein autonomer Betrieb ist derzeit noch nicht Stand der Technik, wird aber von den Herstellern forciert. So zeigt BOMAG bei der zentralen Abfallwirtschaft Kaiserslautern mit zwei umgebauten Walzen, wie die Umsetzung mithilfe von Umfeldsensorik und Steuerungslösungen aussehen kann [366].

Zur Prozessoptimierung und -dokumentation sind am Markt Softwarelösungen verfügbar, welche die Daten aller Maschinen und die Prozessparameter kombinieren und aus- bzw. bewerten [218] [359] [88]. Damit wird es möglich, die gesamte Prozesskette vom Asphaltwerk, über die Anlieferung zum Beschicker, den Einbau mit dem Fertiger bis hin zum Verdichtungsvorgang mit der Walze zu planen, zu dokumentieren und zu überwachen. Die Prozesse Asphaltherstellung, Logistik und Einbau können so in Echtzeit aufeinander abgestimmt werden. Die Datenübertragung erfolgt über das mobile Datennetz unter Verwendung von Datenübertragungsmodulen (Antenne, Sim-Karte). Eine durchgängige Netzabdeckung ist also elementar für diese Systeme. Zusätzlich werden servicerelevante Parameter und Betriebsstunden erfasst, damit Wartungsarbeiten optimiert geplant werden können.

Wird eine Bestandsstraße saniert, werden zusätzliche Arbeitsschritte, die dem Abtragen der alten Fahrbahnbeläge zuzuordnen sind, notwendig. Dafür werden Fräsen und Recycler eingesetzt. Moderne Kaltfräsen und Recycler können mit einer Nivellierautomatik die Sollfrästiefe regeln oder vorgegebene Profile erstellen. Das erfolgt weitestgehend automatisiert, der Bediener muss in diesen Prozess nicht mehr eingreifen [360]. Weiterhin wird der Fräsprozess durch Systeme unterstützt, welche die Maschine automatisiert parallel zur Oberfläche ausrichten (Wirtgen PTS [361]). Ebenfalls ist ein erstes System, welches in Echtzeit ein Simulationsmodell des Fräsprozesses (Digitaler Zwilling) mit gemessenen Prozessdaten vergleicht und die Leistung und Prozessparameter effizient regelt, verfügbar. Mit diesem kann sehr schnell auf sich ändernde Bedingungen [358] im laufenden Betrieb reagiert werden.

Ein hoher Automatisierungsgrad ist bei Betonfertigern aktuell schon anzutreffen. Diese Fertiger werden zum Erstellen von Fahrbahnen oder Schalungsbauwerken eingesetzt [152].

Der Asphalt-Einbauprozess ist dabei soweit automatisiert, dass eine Regelung der Profilhöhe und des Profilverlaufes anhand eines Leitdrahtes oder mittels einer 3D-Steuerung unter Zuhilfenahme eines geodätischen Datenmodells erfolgen kann. Die Soll-Position wird mit den per GNSS ermittelten Maschinenpositionsdaten verglichen. Bei einer Abweichung erfolgt ein korrigierender Lenkeingriff des Systems. Damit kann der Herstellungsprozess des Betonbauwerks (bspw. Fahrbahndecke) hochpräzise erfolgen [356].

Bei den genannten Lösungen fehlt es bis heute an der Vernetzung der einzelnen Maschinen. Erste Ansätze wurden umgesetzt, sind aber flächendeckend noch nicht im Einsatz. Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, ist die herstellerübergreifende Kommunikation zwischen den Maschinen elementar für die Umsetzung diverser Funktionen. Die Straßenbaustelle weist dabei aufgrund der zeitlich immer wiederkehrenden gleichen Prozessabläufe und der kleineren Anzahl an Maschinenherstellern im Vergleich zur Erdbaustelle Vorteile bezüglich der Vernetzung auf. Die Umsetzung dieser

Anforderungen scheitert bislang an einer fehlenden Standardisierung der Kommunikationsschnittstellen.

Die umfassende sensorische Ausstattung der Straßenbaumaschinen und die Umsetzung erster teilautomatisierter Prozesse sind die Grundlage für die Automatisierung des gesamten Straßenbauprozesses. Der aktuelle Stand der Technik ist, dass die Maschinen ihre Tätigkeiten unabhängig voneinander ausführen und vom Geräteführer manuell eingestellt werden müssen. Vermessungssysteme kommen dabei von allen namhaften Herstellern zum Einsatz (LEICA, MOBA, TOPCON, TRIMBLE). Eine Kommunikation zwischen den am Straßenbauprozess beteiligen Maschinen findet noch unzureichend oder in den meisten Fällen gar nicht statt. Für eine Automatisierung des gesamten Prozesses wird es notwendig sein, die Teilfunktionen der Maschinen miteinander zu verknüpfen, um die Straßenbaustelle effizienter zu gestalten. Die Besonderheit, dass die einzelnen beteiligten Maschinen bereits einen vergleichsweise hohen Automatisierungsgrad aufweisen, sollte als Grundlage für eine umfassende Vernetzung der einzelnen Akteure angesehen werden und auf diese nachhaltig fokussiert werden. Weiterhin wird es notwendig sein, den komplexen Straßenbauprozess als digitales Baustellenmodell abzubilden.

4.5 HOCHBAU

Im Gegensatz zum Tiefbau befasst sich der Hochbau mit dem Planen und Errichten von Bauwerken, die oberhalb der Geländelinie liegen. Bei den Bauwerken kann es sich um Wohngebäude, Hotels oder Bürogebäude handeln, aber auch um Kaufhäuser, Krankenhäuser, Veranstaltungsbauten oder Produktionsgebäude. Die wichtigste Bauweise ist das Errichten von Bauwerken in Massivbauweise, vorzugsweise mit den Werkstoffen Beton oder Mauerwerk.

Zu der im Hochbau einsetzbaren Maschinentechnik gehören einerseits verschiedene Bauarten von Kranen, aber auch Spezialgeräte für den Betonbau (Fahrmischer, Betonpumpe, Betonverteiler), den Mauerwerksbau (Mauerroboter) oder den Innenausbau (Betonsäge, Kernbohrer).

Turmkrane

Als logistisches Bindeglied für eine Vielzahl von Gewerken gewährleisten Turmkrane einen reibungslosen Bauablauf. Sie werden entweder als unten- oder obendrehender Kran mit Katz- oder Nadelausleger ausgeführt. Für den Stand der Automatisierung ist die Unterscheidung nicht relevant, da die vorhandenen Systeme bauartübergreifend Anwendung finden.

Auch vor Turmkranen macht der aktuelle Trend zur Automatisierung nicht halt. Ähnlich wie in den zuvor betrachteten Bereichen wird auch hier der Weg über Assistenzsysteme gegangen. Durch den Einsatz von Assistenzfunktionen soll eine Steigerung sowohl der Umschlagleistung, der Zuverlässigkeit als auch der Sicherheit erreicht werden. Dabei reicht das Spektrum von Positioniersystemen (Litronic LIEBHERR), welche eine exakte Positionierung der Last ermöglichen, über Begrenzungssysteme für den Arbeitsraum (LIEBHERR ABB), die den Kran vorgegebene Bereiche nicht überschwenken lassen, bis hin zu kamerabasierten Kollisionsvermeidungssystemen mehrerer Krane auf Großbaustellen [310].

LIEBHERR verpackt alle Einzelassistenzen in der Tower Crane Litronic, zu der auch ein automatisches Nivelliersystem der Hakenflasche zählt. Auf Knopfdruck kann so auch bei variierender Auslegerneigung die Last auf einer horizontalen Linie verfahren werden, da das Hubwerk automatisch die gewählte Höhe nachregelt [190]. Auch TEREX bietet ein solches System an [310].

Ebenfalls zum Stand der Technik zählt, neben der Bedienung des Kranes aus der Kabine, die Steuerung mittels Funkfernsteuerung. Unterstützt wird die Bedienung durch Kamerasysteme, welche die Situation am Haken erfassen. Die Darstellung mit Zoom- und Autofokus-Funktion erfolgt auf einem Display in der Kabine [190].

Allen Herstellern gemein ist der Einsatz von Telematik-Systemen in verschiedenen Ausbaustufen. Das Ziel bei diesen Systemen ist immer die Erfassung und Übermittlung der Betriebs- und Servicedaten.

Dadurch können die Verfügbarkeit und die Einsatzzeit erhöht werden, da Betreiber und Servicetechniker immer den aktuellen Zustand des Kranes mit allen Prozessparametern abrufen und im Bedarfsfall schnell handeln können [238] [191].

Mobilkrane

Auch bei Mobilkranen werden Assistenzsysteme zur Begrenzung und Überwachung eines definierten Arbeitsbereiches von den Herstellern angeboten (LIEBHERR Liccon [192]).

Die Betriebsdaten werden auch bei diesen Maschinen auf einem Touchdisplay angezeigt. Telematiksysteme zur Übertragung der Daten und ein nachgelagertes Flottenmanagement sind Funktionalitäten, die als Erweiterung der Betriebsdatenaufzeichnung anzusehen sind. Die Fernbedienbarkeit, zum Herstellen des Rüstzustandes und zum Bedienen der Kranfunktionen, zählt ebenfalls zum Stand der Technik bei Mobilkranen [75].

Der Rüstzustand ist definiert durch den abgestützten Zustand, wobei die Stützen bei aktuellen Kranen auch asymmetrisch ausgefahren werden können. Das bietet Vorteile für den Einsatz an Einsatzorten mit beengten Platzverhältnissen. Die Überwachung erfolgt über automatische Systeme, welche die Stützenposition erfassen und über hinterlegte Traglasttabellen dem Bediener für jeden Schwenkwinkel die Maximallast anzeigen (DEMAG-Tragfähigkeitsradar). Im Falle des Überschreitens der bestimmten Grenzen, wird der Schwenkvorgang vollautomatisch angehalten um ein Kippen zu verhindern (echtzeitfähige Tragfähigkeitsbestimmung) [300].

LKW-Ladekrane

Automatisierte Prozesse sind auch bei LKW-Ladekranen noch nicht dem Stand der Technik zuzuordnen. Die Hersteller bieten dahingehend lediglich Bedienassistenzsysteme an, die bspw. auf den automatisierten Parallelbetrieb einzelner Aktoren abzielen. Zu nennen sind dabei Systeme zur Steuerung der Kranspitze anstelle der einzelnen Aktoren (Hub- und Knickarmzylinder, Schwenkwerk, Ausschub). Am Markt erhältliche Systeme sind bspw. Crane Tip Control von HIAB oder Smart Boom Control von PALFINGER [248]. Diese Systeme stellen eine wichtige Voraussetzung für die Umsetzung von automatisierten Prozessen dar, da aus der Soll-Position der Kranspitze die notwendigen Aktorbewegungen berechnet werden.

Ein erster Bewegungsablauf, welcher automatisiert wurde, ist die Rüstfunktion des Kranes. Dabei handelt es sich um das automatische Entfalten des Kranauslegers bis zu einer definierten Rüststellung und das Zusammenklappen aus einer beliebigen Arbeitsposition heraus in die Fahrstellung (PALFINGER P-Fold) [249].

Hinzu kommen sicherheitsrelevante Systeme, welche die Dynamik des Ladekrans aktiv überwachen und ggf. einen Steuerungseingriff initiieren, welche aber keine Automatisierungsfunktionen darstellen (Automatic Dynamic Control von FASSI [99]).

Maschinentechnik im Betonbau

Im Betonbau werden Bauelemente aus Beton hergestellt. Die Produktion kann entweder direkt auf der Baustelle oder in einem Betonwerk erfolgen. Der Fertigteilbau, der sich schon heute durch eine hohen Automatisierungsgrad auszeichnet, soll an dieser Stelle nicht betrachtet werden, da die Häusereinheiten oder Module in einer kontrollierten Fabrikumgebung vorgefertigt und auf der Baustelle montiert werden. Bei der direkten Fertigung ist es hingegen notwendig, ein Negativ des Elementes aus Schalungselementen zu installieren und schließlich den Beton einzubringen. Zur Anlieferung des Betons werden Autobetonpumpen und Transportmischer eingesetzt. Autobetonpumpen fördern den durch den Transportmischer angelieferten Beton über große Reichweite an die gewünschte Stelle. Grundsätzlich sind durch den kinematischen Aufbau der Betonpumpen verschiedenste Automatisierungsfunktionen denkbar. Die Hersteller haben dabei Systeme ähnlich der bei LKW-Ladekranen gezeigten entwickelt. PUTZMEISTER bspw. bietet mit Ergonic 2.0 ein Regel- und Steuersystem an, mit dem die

Arbeitsräume der Autobetonpumpe bzw. eines Verteilermastes definiert werden können. Die Bewegungen werden vom System entsprechend geregelt, sodass der Arbeitsbereich nicht verlassen wird. Weiterhin bietet das System die Möglichkeit, den Mast teilautomatisch ein- und auszufalten, was zur Reduzierung der Rüstzeiten führt. Die Ergonic Boom Control als Bestandteil des Ergonic-Systems ermöglicht eine Einhandsteuerung des Bedieners. Die Spitze des Mastes kann ohne die separate Ansteuerung jedes einzelnen Aktors horizontal und vertikal verfahren werden [266].

Betonmischer haben die Aufgabe, den Frischbeton vom Betonwerk zur Baustelle zu transportieren. Der Aufbau besteht aus der Trommel, welche auf einem Trägerfahrzeug (LKW), installiert wird. Neben der Autobetonpumpe und dem Transportbetonmischer existieren auf dem Markt auch Kombinationen aus beiden Maschinen in Form von Fahrmischbetonpumpen.

Die Aufgaben eines Betonmischers unterteilen sich in Fahren, Mischen und Entladen. Eine Automatisierbarkeit von Teilfunktionen oder -vorgängen ist denkbar, wird aber von den Herstellern bisweilen nicht umgesetzt. Die Firma PUTZMEISTER bietet mit Ergonic Mixer Control eine Funkfernsteuerung zur Mischertrommelbedienung inklusive Reinigungsfunktion an [266]. Dieses System ist aber keine Automatisierungslösung. In die gleiche Kategorie fällt die Mischersteuerung SMART 3.0 von SCHWINGSTETTER, mit der die Trommeldrehzahl unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit eingestellt werden kann [286].

Maschinentechnik im Mauerwerksbau

Der Mauerwerksbau ist nahezu vollständig durch manuelle Arbeit geprägt. Lediglich für den Materialtransport auf der Baustelle werden die verschiedenen Kranlösungen genutzt. Der Einsatz von automatisierten Lösungen für den Hauptprozess, das Erstellen von Mauerwerk, ist in Deutschland noch nicht gegeben. Bislang sind noch keine robusten, baustellentauglichen Lösungen am Markt verfügbar. Außerdem sind die zu erwartenden hohen Anschaffungskosten für die besonders durch kleine Betriebe geprägten Bauunternehmen ein erhebliches Hindernis auf dem Weg zur Automatisierung des Mauerwerksbaus. Dass der Ziegelhersteller WIENERBERGER den noch in einer frühen Entwicklungsphase befindlichen australischen Ziegelroboter FASTBRICK für den europäischen Markt testet, zeigt aber, dass der Bedarf für ein automatisiertes Mauern gesehen wird [351]Der auf einem Träger-LKW montierte Bauroboter kann bis zu 1000 Mauersteine pro Stunde legen. Dabei werden die Steine über ein Förderband bis an den Bestimmungsort transportiert. Während des Transportes wird ein Kleber appliziert. Die Steine werden über eine 3D-CAD Software platziert. Dieser Prozess verläuft vollautomatisch [316]. In den USA gibt es Systeme, die beim Erstellen von Mauerwerk unterstützen und auf der Baustelle zum Einsatz kommen (Mule und SAM 100). Diese sind aber „nur“ einfache Kranlösungen (Mule) wie diese auch auf deutschen Baustellen eingesetzt werden oder teilautomatisierte Lösungen (SAM 100). Der SAM 100 (Roboter) hebt dabei einen Stein, trägt den Mörtel auf und setzt die Steine aufeinander. Ein Maurer ist hier aber weiterhin notwendig um den überschüssigen Mörtel zu verstreichen. Des Weiteren können nur gerade Mauerwerke erstellt werden. Ecken und komplexere Mauerabschnitte können nicht erstellt werden. Außerdem muss für jede neue Mauer der Roboter inklusive Schienensystem neu ausgerichtet werden. Hier ist eine Erhöhung des Automatisierungsgrades in Zukunft zu erwarten. Aber auch solche Lösungen sind in Deutschland noch nicht auf der Baustelle anzutreffen. Der Bauunternehmer BONAVA geht davon aus, dass ein Roboter bis 2020 auf den eigenen Baustellen Einzug halten wird. Dafür wurde ein spezielles Ziegelsystem entwickelt, welches den konventionellen Kalksandsteinen stark ähnelt. Als Hilfsmittel für den Transport und das Setzen von großen Kalksandsteinen werden Mini-Krane beim Mauern eingesetzt. Die heute noch händische Bedienung soll bei BONAVA ein Roboter übernehmen. Die Kleberapplikation wird in diesem Fall weiterhin vom Facharbeiter ausgeführt [98].

Die Hersteller der o.g. Mini-Krane bieten für verschiedene Anwendungen Anbaugeräte, wie die erwähnten Ziegel- oder Betonteilversetzer. Stand der Technik sind mechanische Krane, die auf der Baustelle den Mauerprozess beschleunigen. Das sogenannte Ein-Mann-Mauern hat in ersten Studien ge-

zeigt, dass die Arbeitszeiten durch diese Hilfsmittel halbiert werden können [176]. Das liegt darin begründet, dass die Anzahl der Mitarbeiter halbiert werden kann. Eine weitere Erhöhung des Automatisierungsgrades durch Mauerwerksroboter könnte diesen Trend fortsetzen.
Weiterhin sind auch hydraulisch-elektrisch betriebene Mini-Krane erhältlich, die eine Vielzahl an Anbauwerkzeugen bieten [137] [147]. Diese ferngesteuerten Maschinen sind sehr wendig und leicht und damit ideal für den Einsatz auf einer Baustelle geeignet. Fälschlicherweise werden diese oftmals als Roboter bezeichnet [114], gehören aber zu den Kranen.

Maschinentechnik im Innenausbau

Auch bei den vorwiegend im Innenausbau tätigen Handwerksunternehmen wird die Automatisierung immer häufiger thematisiert bzw. eingesetzt. Beim klassischen Innenausbau beschränken sich digitale Technologien auf Assistenzsysteme, diese werden von 25% (Abbildung 16) der Unternehmen bereits genutzt [142] [275].

Der Innenausbau gehört zu den besonders arbeitsintensiven Bauprozessen [86], die durch einen hohen Anteil an handwerklichen Tätigkeiten geprägt sind. Assistenzfunktionen, wie die in Kapitel 4.6 genannten teilautomatisierten Prozesse Betonsägen und Kernbohren, sind auch für den Innenausbau relevant und sind als Automatisierungsvorstufe anzusehen. Eine flächendeckende Verbreitung ist aber noch nicht gegeben.

Fernsteuerbare Mini-Krane mit entsprechenden Werkzeugen erleichtern bspw. die Fenstermontage enorm. Die körperliche Belastung durch den Arbeitnehmer sinkt dadurch deutlich, als Automatisierung können aber diese Prozesse nicht eingestuft werden. Die digitalen Veränderungen kommen im Innenausbau weniger als automatisierte Arbeitsprozesse an, vielmehr sind die Bestrebungen dahingehend ausgerichtet, die Transparenz und Effizienz der menschengeführten Arbeitsprozesse auf der Baustelle durch neue Lösungen auf digitaler Ebene zu erhöhen [86]. Dazu zählt z.B. das BIM-Konzept, welches als bauphasenübergreifende Methode alle Bauabschnitte und Gewerke verbindet und den gesamten Bauprozess visualisiert.

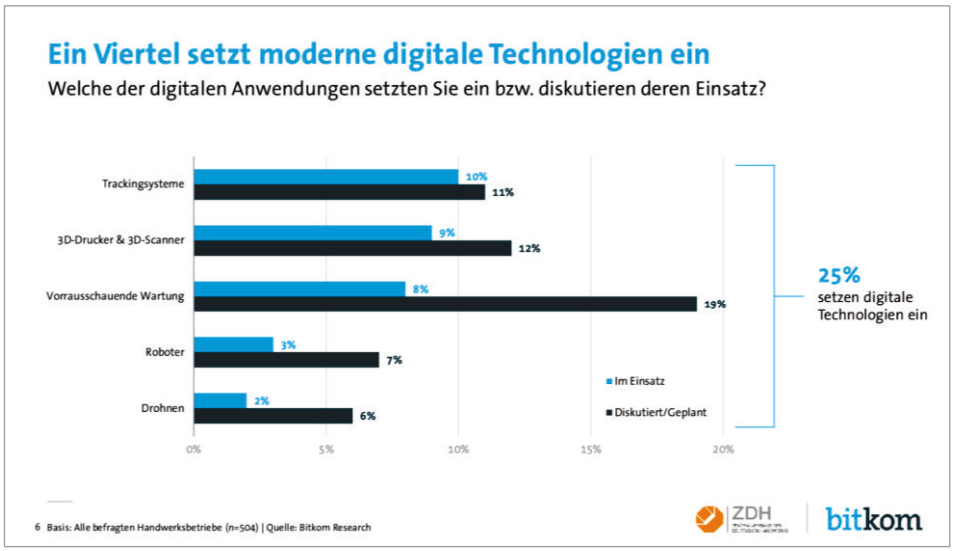


Abbildung 16: Trendentwicklung der Automatisierung im Handwerk [142]

4.6 ABBRUCH

Abbrucharbeiten umfassen den teilweisen oder vollständigen Abbruch von Bauwerken, technischen Anlagen oder Teilen davon [255]. Je nach Größe, Aufbau und Beschaffenheit des Bauwerkes können verschiedene Verfahren zur Anwendung kommen. Die Genauigkeitsanforderungen der ausgeführten Arbeiten differieren je nachdem, ob es sich bei dem Projekt um den Abriss eines gesamten Bauwerkes

oder nur um einen teilweisen Abriss mit nachträglicher Kernsanierung handelt. Die Anforderungen des Auftraggebers und die Richtlinien des Gesetzgebers sind dabei maßgeblich für die Einhaltung spezieller Maßnahmen zum Schutz der Umwelt. Besonders zum Tragen kommen diese Randbedingungen beim Rückbau kontaminierter Gebäude oder Bereiche (Atomkraftwerke).

Typische Hilfsmittel, Werkzeuge und Maschinen sind Kernbohrgeräte, Seilsägen, Wandsägen, Bodensägen, Abbruchhämmer, Bagger, Abbruchroboter. Weiterhin werden Mobilkrane oder Turmdrehkrane für den Abtransport von bspw. geschnittenen Betonelementen eingesetzt.

Die modernsten Kernbohrgeräte auf dem Markt beinhalten Assistenzsysteme, mit denen Funktionen wie eine Anbohrfunktion für ein ruckfreies Ansetzen, einen automatischen Vorschub sowie eine automatische Leistungsregelung genutzt werden können. Diese Funktionen werden als vollautomatisiertes Bohren kombiniert, wobei das Bohrgerät an der Wand montiert ist und nach dem Bohrvorgang automatisch den Antriebsmotor sowie Wasserzufuhr abschaltet und die Bohrkrone zurückzieht [132].

Die aufgeführten Sägearten werden zum Trennen und Zerlegen des rückzubauenden Objektes eingesetzt. Je nach Größe und Beschaffenheit des aufzuschneidenden Objektes wird die Auswahl des passenden Sägentyps getroffen. Automatisierungslösungen werden vor allem für Wandsägen angeboten. Dabei wird ein schienengeführter vollautomatischer Schnittvorgang ausgeführt. Die gewünschte Schnittlänge und Tiefe kann über eine Fernbedienung eingestellt und während des Vorgangs in Echtzeit der Fortschritt angezeigt werden [133]. Nachteilig an dieser Methode ist das zwangsweise installieren der Führungsschienen vor dem Beginn der Arbeiten. Bei Abbrucharbeiten bestehen beim Zerlegen keine hohen Anforderungen an die Genauigkeit, sodass die genannten Maschinen eher Anwendung im Hochbau finden. Im Abbruch wird stattdessen auf handgeführte Sägen zurückgegriffen, weil damit bislang noch ein schnellerer Arbeitsfortschritt erzielt wird als mit automatisierten Systemen.

Bagger aller Leistungsklassen werden bei Abbrucharbeiten mit den Werkzeugen Abbruchhammer, Abbruchzange oder Abbruchschere bestückt und zählen wie die o.g. zu den mechanischen Abbruchverfahren [264]. Je nachdem wie hoch das Risikopotenzial der Abbrucharbeit ist, wird der Bagger konventionell durch einen Geräteführer bedient oder durch eine Fernbedienung aus sicherer Entfernung gesteuert. Minibagger werden dabei für Abbrucharbeiten innerhalb der Gebäude [33] und Hydraulikbagger höherer Leistungsklassen mit speziellen Long-Front-Auslegern für die Anwendung außerhalb der Abrissobjekte eingesetzt. BROKK [45] und HUSQVARNA [139] bieten mit ihren Abbruchrobotern ferngesteuerte Minibagger mit verschiedenen Anbaugeräten an. Die Herstellerbezeichnung „Roboter“ ist dabei nicht ganz korrekt, da es sich lediglich um ferngesteuerte Maschinen handelt, die der Definition Roboter nicht gerecht werden.

Für spezielle Abbruchaufgaben und wenn zusätzlich nicht gesprengt werden kann, sind prototypische Einzellösungen anzutreffen. Beispielsweise werden beim Rückbau von Kühltürmen modifizierte Bagger eingesetzt, die auf verschiedene Arten die Schornsteinkante von oben mittels Schere abtragen. Eine Automatisierung dieses Prozesses wäre anzustreben, ist aber noch nicht dem Stand der Technik zuzuordnen. Derzeit muss der Bagger entweder konventionell oder über eine Fernbedienung in großer Höhe gesteuert werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Abbruch mit Hydraulikbaggern das am häufigsten eingesetzte Abbruchverfahren ist [348]. Dabei stellt aus Sicht der Automatisierung die Bedienung über Fernsteuerungen den Stand der Technik dar. Für nahezu alle Leistungsklassen sind entsprechende Systeme am Markt verfügbar.

5 PERSPEKTIVEN

5.1 BAUSTELLE DER ZUKUNFT

5.1.1 Vorbemerkung

Unter dem Begriff Industrie 4.0 wird ein Übergang von der klassischen Wertschöpfungskette hin zu grundsätzlich dynamischen Wertschöpfungsnetzwerken verstanden, welcher sich mithilfe modernster Kommunikationstechniken, Vernetzungspraktiken und digitalem Datentransfer gegenwärtig durchsetzt. Im Bereich der industriellen Produktion wird durch diesen Ansatz eine weitere Flexibilisierung und Produktivitätssteigerung durch die Verzahnung von Logistik und Planungsprozessen und deren damit einhergehender Selbstorganisation ermöglicht.

Bauprozesse und die damit verbundenen Baustellenabläufe unterscheiden sich jedoch grundlegend von denen der industriellen Güterproduktion. Dies bezieht sich im Wesentlichen auf die weitaus komplexeren, örtlich und zeitlich veränderlichen Randbedingungen und die Vielzahl an unterschiedlichen Akteuren auf Baustellen. Der Unikatcharakter von Bauprojekten, die starke Fragmentierung der Bauindustrie und das Fehlen einheitlicher Schnittstellen zur Dokumentation und Koordination des heutigen Bauablaufs führen dazu, dass große Effizienz- und Qualitätspotenziale unter klassischen Bedingungen ungenutzt bleiben.

Eine leistungsfähige Drahtloskommunikation auf Basis der neuen Mobilfunkgeneration 5G ermöglicht erstmals mit der massiven Verfügbarkeit von Echtzeitinformationen die durchgängige, digitale Abbildung aller Bauprozesse und -akteure, was bisherige Drahtloskommunikationen aufgrund technischer Einschränkungen, insbesondere zu geringe Bandbreite, zu hohe Latenz, Verfügbarkeit, Datensicherheit, nicht leisten können. Gleichzeitig kann 5G als Ausgangspunkt zur Erarbeitung gemeinsamer Standards für eine heterogene Baulandschaft fungieren. Der Baufortschritt wird dadurch für alle Beteiligten transparent. Die umzusetzenden Standards beziehen sich im Wesentlichen auf einheitliche Kommunikationsschnittstellen zwischen Maschinenkomponenten und Steuergeräten bzw. Steuergeräten und Cloud sowie vereinheitlichte Datenübertragungsprotokolle und Datenformate. Die Standardisierung betrifft dabei auch die Systemarchitektur ebenso wie die Regelung der Datenhoheit. Dies ist Voraussetzung und Grundlage für zukünftige Automatisierungs- und Assistenzsysteme, welche den Menschen erst in die Lage versetzen, in einer hochdigitalen, selbstorganisierenden Umgebung effizient zu agieren.

Die im Kapitel 1.1. beschriebene Differenzierung der Begriffe Automatisierung und Autonomie ist vor allem vor dem Hintergrund stark heterogener Bauprozesse und dem damit verbundenen Maschineneinsatz untersetzt mit der Fragestellung nach dem Zeitpunkt des umfassenden Einsatzes von künstlicher Intelligenz in Baumaschinen

Die Grundlage für autonom agierende Baumaschinen ist ein hoch entwickelter Stand der Künstlichen Intelligenz. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass Baustellen hoch komplexe und vielfältige Arbeitsräume darstellen. Die darauf stattfindenden Bauabläufe sind nicht vollständig planbar bzw. sich einstellende Situationen sind nicht vollumfänglich vorhersehbar. Das bedeutet, die Maschinen müssen auf unbekannte und sich ständig ändernde Situationen eigenständig reagieren können. Die dafür benötigten mathematischen Algorithmen können keinesfalls programmiertechnisch abgebildet werden, was in letzter Konsequenz maschinelles Lernen erfordert. Neuronale Netzwerke und andere Methoden innerhalb der Maschinensteuerungen ermöglichen einen Lerneffekt (Maschinelles Lernen) bei der Ausführung von Arbeitsprozessen. Positive und negative Erfahrungen dabei werden künftig für die Ausführung derselben Aufgabe herangezogen, um den Prozess zu optimieren. Über ein entsprechendes Kommunikationsnetzwerk werden diese Informationen an die anderen Maschinen weitergereicht, sodass hier ein gegenseitiger Erfahrungsaustausch stattfinden kann.

Diese Art der Maschinensteuerung bietet durch die Möglichkeit einer permanenten Optimierung der Betriebsstrategie ein hohes Energieeinsparpotenzial, eine kontinuierliche Geschwindigkeitssteigerung des Bauablaufs und damit ein erhebliches Kosteneinsparpotenzial.

5.1.2 Die Vision

Nachfolgend wird die Vision einer „Baustelle der Zukunft“ skizziert. Ob diese Vision jemals Realität wird und wenn ja wann, lässt sich aus der Sicht des Gutachters derzeit nicht seriös absehen. Die Darstellung soll verdeutlichen, in welche Richtung sich das Bauwesen auf Grundlage automatisierter Baumaschinen in den nächsten Jahren und Jahrzehnten entwickeln wird.

Die Vision einer Baustelle der Zukunft (Abbildung 17) lässt sich anhand des in den Kapiteln 3 und 0 beschriebenen Status Quo der Maschinentechnik im Bauprozess sowie der Technologien zur Automatisierung von Baumaschinen mit allerletzter Konsequenz auf das Niveau des vollautomatisierten Bauprozesses stellen. Die Entwicklung entsprechend konfektionierter und konfigurierter Baumaschinen muss dabei vorausgesetzt werden – aktuelle Entwicklungsarbeiten (siehe Kapitel 0) geben Anlass, deren Bereitstellung zumindest in einigen Anwendungsbereichen zu erwarten.

Abbildung 17: Vision einer vernetzten Baustelle (Bildquelle: Continental AG, 2019)

Ausgehend von der fertigen Bauplanung werden sämtliche Prozesse automatisch gestartet, von der Materialbestellung über die Logistik bis hin zur Verarbeitung auf der Baustelle. Dabei übernehmen die einzelnen Maschinen die Prozessablaufsteuerung, d.h. sie entscheiden, zu welchem Zeitpunkt welches Material in seiner jeweiligen Qualität und Quantität an dem jeweils erforderlichen Einbauort bevorratet sein soll. Die einzelnen maschinellen Arbeiten, wie zum Beispiel Erdbewegung, Materialumschlag, Errichtung des Bauwerks, laufen vollautomatisiert ab mit einem Minimum an Störungen oder technischen Fehlern. Die Einhaltung bautechnischer Normen und Grenzwerte durch höchste Präzision bei der Ausführung einzelner Arbeitsschritte sind unabdingbare Randbedingungen.

Ein im Baubetrieb nicht zu unterschätzender Faktor war und ist das Wetter. Über intelligente, cloudbasierte Kommunikationstechnologien werden aktuelle Wetterinformationen an die Maschinensteuerungen gesendet und der Ablauf des Bauprozesses (inkl. Logistik) wird entsprechend gesteuert und ggf. abgebrochen. Hierbei wird geprüft, welche Arbeiten als nächstes anstehen und wieviel Zeit diese

beanspruchen. Ein Abgleich mit den Wetterdaten bewirkt dann die Verschiebung von Tätigkeiten, den Abbruch von Arbeiten, falls diese mit den zu erwartenden Wettergeschehnissen nicht vereinbar sind, sowie eine Anpassung der Logistikkette.

Jeder Baufortschritt wird digital dokumentiert, entsprechend abgerechnet und ist jederzeit von überall abrufbar, wodurch eine optimale Bauprozessplanung bzw. -korrektur gewährleistet ist. Gleichzeitig wird über die Condition Monitoring Systeme der Baumaschinen der aktuelle Betriebszustand (Betriebsstunden, Leistungsdaten, Betriebsmittel, Verschleißzustände von Werkzeugen und Bereifung etc.) erfasst, woraus im Zusammenwirken mit dem Bauablauf optimale Wartungsintervalle festzulegen sind.

Den vorgenannten Kommunikationsmöglichkeiten ist gemein, dass deren Funktionalität nur dann sichergestellt ist, wenn die dafür benötigte Infrastruktur in Form von Cloud-Servern, maschineller Sensorik und standardisierter Systemarchitektur existiert. Hier besteht noch Entwicklungs- und Standardisierungsbedarf.

Es ist zu erwarten, dass aufgrund der enormen Vielseitigkeit der Baustellenabläufe und Arbeitsprozesse zu den bislang obligatorischen Bauleitern ergänzend Prozessmanager (wie bereits im „Qualitätshandbuch Straßenbau Baden-Württemberg“ [209] gefordert) auf den Baustellen Einzug halten. Ein Prozessmanager dient der Überwachung und Kontrolle der einzelnen von den Maschinen ausgeführten Teilaufgaben, d.h. sie übernehmen die Überwachung und Steuerung der Bauprozesse. Der Prozessmanager fungiert damit als ausführender Dienstleister für den Bauleiter mit administrativer Funktion. Dadurch kann es gelingen, neben dem benötigten Material auch die für jeden einzelnen Arbeitsschritt erforderlichen Maschinen in der passenden Leistungsklasse mit den zur optimalen Erfüllung der Arbeitsaufgabe energieeffizientesten Antriebssystemen bereitzustellen. Voraussetzung dafür sind im Hinblick auf die Energieeffizienz optimierte Maschinenkomponenten (Motoren, Pumpen, Ventile etc.) sowie optimale Betriebsstrategien (u.a. mit Trajektoriensteuerung für die Arbeitsausrüstung), wodurch auf der Maschinenseite ein Minimum an Energie erforderlich ist.

Zuverlässige Umgebungserkennungssysteme sichern stets die Arbeitsräume sowohl neben als auch unter- und oberhalb der Maschinen und gewährleisten dabei ein optimales Zusammenspiel verschiedener Baumaschinen zur Ausführung der anspruchsvollen Arbeitsaufgaben.

Die Qualität und Quantität des Arbeitsergebnisses werden mit Hilfe technisch ausgereifter Systeme zur Positions- und Lageerfassung und zuvor festgelegter Vermessungspunkte überprüft und an das digitale Dokumentationssystem übermittelt, wodurch beispielsweise eine permanente Aktualisierung der Informationen zum Baufortschritt erfolgt.

Die beschriebene Bauprozessplanung und der damit einhergehende Maschineneinsatz, der ein hohes Maß an Automatisierung und Zustandsüberwachung beinhaltet, ermöglichen einen Maschinenbetrieb auf deutlich reduziertem Energieniveau. Dies führt dazu, dass die Leistungsbereitstellung auf den Maschinen mit kleineren Verbrennungsmotoren und/oder elektrischen Motoren erfolgen kann. Insbesondere kleine Baumaschinen (Kompaktklasse) werden in vielen Fällen eine rein elektrische Leistungsbereitstellung aufweisen, aber auch Brennstoffzellenantriebe mit Wasserstoff als Energieträger oder synthetische Kraftstoffe, was in der Folge für eine nahezu emissionsfreie (keine schädlichen Abgase, geräuscharme Motoren) Baustelle sorgt. Entsprechende Infrastrukturmaßnahmen, welche z.B. eine dauerhafte Verfügbarkeit elektrischer Energie auf, vor allem urbanen, Baustellen sichern (z.B. mobile Ladestationen für Batteriespeichersysteme) werden vorausgesetzt.

Eine Vielzahl von Bauwerken wird im 3D-Druckverfahren hergestellt. Über eine Robotersteuerung für die erforderliche Auslegerstruktur wird der Arbeitsprozess realisiert. Grundlage dafür sind aus der Bauplanung stammende BIM-Modelle, die beispielsweise die Gebäudestruktur beinhalten, deren Informationen über die konstruktive Gestaltung direkt von der Maschinensteuerung verarbeitet werden. Gleichzeitig wird ein digitales Abbild der errichteten Gebäudestruktur erstellt, welches mit den ursprünglichen BIM-Daten verglichen werden kann. Eine entsprechende Qualitätskontrolle und Baufortschrittsdokumentation ist dadurch gegeben.

Der Begriff „Baustelle der Zukunft“ darf jedoch keinesfalls pauschalisiert werden. Hier ist zwingend zu unterscheiden in Baustellen, die im Bestand anzutreffen sind (Reparaturbaustellen) und Baustellen, die von Grund auf Neues schaffen, wobei bei letzterer eine weitere Unterscheidung zwischen Großbaustelle (mehrere Millionen Euro) und der klassischen Einfamilienhausbaustelle (wenige hunderttausend Euro) zu treffen ist.

Die oben beschriebene Vision bezieht sich auf eine von Grund auf neu angelegte Großbaustelle, die weitgehend menschenleer ist. Die Mehrzahl der Baustellen in Deutschland wird allerdings durch die übrigen Baustellentypen repräsentiert. Dabei erfordert die Umsetzung der oben genannten Automatisierungslösungen noch weitaus größere technische Entwicklungen und Prozessveränderungen. Denn zum einen liegen für Bestandsbaustellen kaum bzw. gar keine digitalen Gebäudemodelle oder Infrastrukturinformationen vor, die als Grundlage für einen automatisierten Baubetrieb zwingend benötigt werden. Zum anderen werden kleinere Gebäude, wie z.B. das klassische Einfamilienhaus, überwiegend durch handwerkliche Tätigkeiten errichtet. Hier muss neben der Entwicklung automatisierter Maschinentechnik (Bau-Robotik) eine massive Veränderung der gesamten Planungs-, Ausführungs- und Abrechnungsprozesse in Angriff genommen werden, was insbesondere aufgrund der Vielzahl Prozessbeteiligter und deren heterogener Struktur eine große Herausforderung darstellt.

5.1.3 Hindernisse

Die im vorigen Abschnitt geschilderte Vision einer Baustelle der Zukunft bedingt die Einhaltung technischer, ökonomischer, ökologischer und gesellschaftlicher Randbedingungen. Dabei erforderliche normative und gesetzliche Regularien dürfen nicht bremsend, sondern müssen fördernd auf diesen Realisierungsprozess wirken.

Vor diesem Hintergrund ist die Behandlung des Themas Autonomie/Voll-Automatisierung von Baumaschinen insbesondere aus sicherheitstechnischen Gründen sehr schwierig. Die wichtigste Voraussetzung dafür ist die Gewährleistung einer sicher funktionierenden Umgebungserkennung bzw. Gefahrenbereichsüberwachung der Maschine. Dazu ist eine Sensortechnologie mit ausreichender Redundanz und Robustheit unabdingbar, wofür allerdings aus heutiger Sicht noch erheblicher Entwicklungsbedarf besteht.

Erschwerend kommt hinzu, dass die meisten Baumaschinen eine erwartete Einsatzdauer von durchschnittlich 10-15 Jahren besitzen, was bedeutet, dass die heutigen Bestandsmaschinen, welche sich gar nicht oder nur sehr schwer für eine Automatisierung eignen, weil sie die technischen Voraussetzungen nicht erfüllen, in den Entwicklungsprozess zur Automatisierung unweigerlich zu integrieren sind. Ein Zusammenwirken von automatisierten und nicht automatisierten Maschinen ist zwar technisch vielfach schon möglich, aber bei automatisierten Maschinen ist, wie auch im Automotivebereich, die Haftungsfrage noch ungelöst. Bezugnehmend auf die Aussage von einem der befragten Experten sehen sich weder Maschinenhersteller noch Betreiber in der Lage, die Haftung für Schäden durch automatisierte Maschinen und Prozesse zu übernehmen, da die Frage des Verursachers (Schuldfrage) i.d.R. nicht zu klären sein wird.

Eine durchgängige, schnelle, und sichere Kommunikation – sowohl zwischen den einzelnen Maschinen als auch zwischen den Maschinen und den vornehmlich als Kontrollinstanz fungierenden Menschen, entweder in einem zentralen Leitstand oder nach wie vor auf der Maschine – erfordert die Standardisierung von Kommunikationsschnittstellen, Datenaustauschformaten und Übertragungsprotokollen ebenso wie die Festlegung auf den Inhalt der zu übertragenden Informationen, welche derzeit nicht existieren. Zwar bieten bspw. alle OEM bereits Telemetriesysteme zur Ortung und Betriebszustandsübermittlung ihrer Maschinen an. Allerdings sind diese bislang ausschließlich herstellerspezifisch, d.h. für Maschinen anderer Hersteller nicht zugänglich. Teilweise existieren offene Plattformen einzelner großer Hersteller, bei denen sich die kleineren einmieten können. Dies setzt allerdings nach wie vor eine herstellerübergreifende Standardisierung von Schnittstellen (vgl. Kapitel 5.1.1) voraus, sofern nicht der Standard des Anbieters einer derartigen Plattform übernommen werden soll, was durchaus einen Interessenkonflikt bei den übrigen OEM darstellt. Vor allem aber haben sich diese Plattformlösungen bislang nicht durchgesetzt, und auf absehbare Zeit wird das auch so bleiben, weil die einzelnen

Hersteller aufgrund ihrer individuellen Interessenlagen die Daten ihrer Maschinen nicht über die Systeme eines Wettbewerbers kommunizieren wollen.

BIM ist noch lange nicht so weit, dass es durchgängig genutzt werden kann. Das liegt u.a. daran, dass das Bauen im Bestand, was nach wie vor den häufigsten Praxisfall darstellt, mit BIM nicht abbildbar ist, weil dazu die erforderlichen Gebäude- und Infrastrukturdaten nicht bzw. nicht in der hinreichenden Güte vorliegen. Zudem müssen die vorgenannten Rahmenbedingungen, wie Kommunikationsstandards, geschaffen werden, bevor eine durchgängige BIM-Anwendung auf Baustellen überhaupt nutzbringend ist.

Ein weiteres Hindernis stellt die Frage nach den anwendungsbezogenen effizienten Antriebskonzepten dar. Diese Frage kann aktuell und in naher Zukunft nicht beantwortet werden, denn dazu fehlen entsprechende Standards in Bezug auf die Bewertung der Prozesseffizienz von Baumaschinen[22]. Damit ist diesbezüglich eine Optimierung der Betriebsstrategien zur Reduktion von Energiebedarf und Emissionen kaum realisierbar, was der Erfüllung der o.g. Randbedingungen entgegensteht.

Darüber hinaus fehlt es aktuell an leistungsfähigen und kostengünstigen Batteriespeichern, deren Herstellung bereits mit einem hohen Energiebedarf (z.B. Lithiumgewinnung) einhergeht und ferner Rohstoffe (u.a. Kobalt) benötigt, die z.T. knapper als Erdöl sind, was eine sinnvolle Kreislaufwirtschaft erforderlich macht [234].

Unter Beachtung der begrenzten Sinnhaftigkeit einer vollelektrischen Leistungsbereitstellung auf den Maschinen, insbesondere bei den als grundsätzlich schwer elektrifizierbar geltenden mobilen Baumaschinen der höheren Leistungsklassen, bei denen die hohe Energieabnahme während des Betriebs und die geringen Speicherkapazitäten bzw. langen Ladezeiten der eingesetzten Batteriespeicher sich gegenüberstehen, ist zwingend die Auseinandersetzung mit Wasserstoff, synthetischen Kraftstoffen und Brennstoffzellen erforderlich. Die Erforschung und Entwicklung von synthetischen Kraftstoffen beispielsweise ist bereits weit vorangeschritten, jedoch mangelt es hier mit 4,50 EUR pro 1 Liter Dieseläquivalent noch stark an der Wirtschaftlichkeit [289].

Ein weiteres wesentliches Hindernis auf dem Weg zur automatisierten Baustelle ist die Kundenakzeptanz. Zwar ist grundsätzlich davon auszugehen, dass Assistenzfunktionen und automatisierte Arbeitsspiele der Maschine den Geräteführer unterstützen und entlasten. Allerdings können Assistenzsysteme sowohl über- als auch unterfordernd wirken und damit ihre Wirkung verfehlen. Wieviel Automatisierung für den Fahrer als hilfreich oder schon als über- bzw. unterfordernd einzustufen ist, ist bislang nur wenig erforscht, weil arbeitspsychologische Untersuchungen dahingehend fehlen. Zu bedenken ist an dieser Stelle, dass von derartigen Forschungsergebnissen die Gestaltung des Maschinenarbeitsplatzes bzw. des Leitstands der Maschinenüberwachung maßgeblich abhängt.

Nicht zwingend als Hindernis auf dem Weg zur Baustelle der Zukunft zu werten, aber dennoch als Ursache für eine deutlich verspätet aufgenommene Entwicklungsarbeit im Baumaschinensektor muss die Abgasgesetzgebung der letzten 15 Jahre verstanden werden. In diesem Zeitraum waren der wesentliche Entwicklungstreiber bei den OEM die sich ständig verschärfenden Emissionsgrenzwerte, wodurch die Entwicklungsabteilungen in den Unternehmen dazu gezwungen waren, alle verfügbaren personellen Kapazitäten für die konstruktiven Änderungen der Maschinen zu binden. Erst jetzt, nach dem Abschluss der gestuften Verschärfung der Emissionsgesetzgebung, können die Unternehmen sich den Themen Digitalisierung, Automatisierung, Vernetzung etc. mit größerer Kapazität widmen.

5.1.4 Fazit

Vor dem Hintergrund der in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Vision einer automatisierten Baustelle und den hier aufgezeigten Hindernissen, welche einer Realisierung dieser Vision entgegenstehen bzw. die-

[22] Die Effizienzbewertung von Baumaschinen ist ein eigenes Forschungsthema. Da sich die Aufgaben einer Baumaschine immer aus vielen verschiedenen Anteilen zusammensetzt (z.B. Fahren, Last umsetzen, Grube ausheben, Boden verschieben, Beton pumpen, usw.), sind pauschale Aussagen zur Effizienz einer Baumaschine ohne Bezug zur jeweiligen Arbeitsaufgabe kaum möglich.

sen Prozess maßgeblich verlangsamen, wird es ohne intensive wissenschaftliche Forschung und industrielle Entwicklungsarbeit nicht gelingen, sich im internationalen Vergleich konkurrenzfähig zu präsentieren.

Auf wissenschaftlicher Ebene wird seit einigen Jahren eine Vielzahl von Forschungsprojekten durchgeführt, welche die o.g. Schwerpunktthemen beleuchten. Eine kurze Übersicht dazu mit entsprechenden Erläuterungen ist im Kapitel 0 zu finden. Auf Forschungsarbeiten zum Themenfeld BIM wird darin nicht näher eingegangen, dies ist Inhalt eines separaten Gutachtens.

Darüber hinaus sind vielseitige Entwicklungstätigkeiten auf Komponentenebene zu beobachten, die es den Baumaschinenherstellern perspektivisch ermöglichen, Automatisierungslösungen in die künftigen Maschinengenerationen zu integrieren. Ein Überblick dazu wird in den nachfolgenden Abschnitten gegeben.

5.2 SENSORIK

Ausgehend von ausgewählten Problemstellungen aus dem Bereich mobiler Arbeitsmaschinen sollen nachfolgend Entwicklungspotenziale und mögliche Technologiepfade für zukünftige Neu- und Weiterentwicklungen sensorischer Komponenten benannt und kurz erläutert werden. Der Verlauf der technologischen sowie preislichen Entwicklungen einzelner Sensorsysteme ist aus heutiger Sicht nur schwer abzuschätzen, weshalb es sich bei den genannten Beispielen nur um Lösungsansätze handelt, welche aus technischer wie auch wirtschaftlicher Sicht vielversprechend erscheinen.

5.2.1 Ortungssysteme

Wie bereits in Kapitel 3.1.1 beschrieben, erfolgt die Bestimmung einer georeferenzierten Position in der Regel über GNSS-Systeme mit RTK-Korrektur. Eines der größten Defizite einer solcher Ortung stellt die verminderte Genauigkeit bei eingeschränkter Sicht- bzw. Funkverbindung zu den Satelliten oder der RTK-Referenzstation dar. Grund hierfür können Abschattungen und Signalreflektionen, z.B. in dicht bebauten innerstädtischen Lagen oder an Alleen und Steilböschungen, sein. Eine Ortung innerhalb von Gebäuden, wie sie beispielsweise für zukünftige Bauroboter benötigt wird (vgl. Kap. 5.10) ist mit diesen Systemen ebenfalls nicht möglich.

In solchen Fällen muss die relative Position der Maschine bzw. des Roboters in Bezug zu einem oder mehreren Punkten mit bekannten geodätischen Koordinaten ermittelt werden. Aktuelle technische Lösungen zur Bestimmung der Relativposition basieren in der Regel auf optischen Messverfahren. In den meisten Fällen wird eine Totalstation auf einem Vermessungspunkt aufgestellt und mittels Laser die Position eines an der Maschine befestigten Prismas erfasst und verfolgt [173]. Voraussetzung ist eine direkte Sichtverbindung zwischen Totalstation und Prisma, welche nicht immer gewährleistet werden kann.

Eine vielversprechende Alternative stellen funkbasierte Ortungsverfahren dar. Lokalisierungslösungen auf Basis der Ultra-Breitband-Technologie (UWB), wie sie in anderen Industriebreichen bereits eingesetzt werden, sind beispielsweise heute in der Lage, Objekte auf bis zu ca. 10 cm Genauigkeit zu orten. Mithilfe technischer Verbesserungen ist eine theoretische Erhöhung der Ortungsgenauigkeit bis in den Sub-Millimeterbereich [202] möglich. Auch der neue Bluetooth 5.1-Standard kann für die Entwicklung verbesserter Ortungssysteme genutzt werden. Forschungs- und Entwicklungspotenziale bestehen in der Verbesserung der Hardwarekomponenten, der Optimierung der zugehörigen Ranging- und Lokalisierungsalgorithmen und einer anwendungsnahen Erprobung der Systeme im Baustellenumfeld.

5.2.2 Erfassung elastischer Verformungen

Zur Erreichung möglichst großer Arbeitshöhen und Reichweiten besitzen viele mobile Arbeitsmaschinen sehr lange schmale Auslegerstrukturen, welche unter Krafteinwirkungen zu starken elastischen

Verformungen und Schwingungen neigen. Beispiele hierfür sind unter anderem Betonpumpen, Mobilkrane oder Hubarbeitsbühnen (vgl. Abbildung 18). Eine Erhöhung der Steifigkeit der betreffenden Auslegerstrukturen ist meist mit einer Steigerung der Gesamtmasse verbunden und damit nicht zielführend. Für eine Automatisierung der zugehörigen Arbeitsprozesse ist es notwendig, eine exakte Positionierung sowie eine Kompensation der Schwingungen zu realisieren [368]. Als Voraussetzung hierfür gilt die sensorische Erfassung der tatsächlichen Verformung. Diese kann direkt (z.B. über Dehnmessstreifen) oder indirekt (z.B. über Neigungssensoren) bestimmt werden [129]. Neben dem Einsatz etablierter Sensorik bietet diese Aufgabe das Potenzial für zahlreiche Spezialentwicklungen (z.B. Einsatz von Tachymetern oder magnetostriktive Verfahren). Die Integration und Evaluierung entsprechender Sensorsysteme ist eine ausstehende Forschungsaufgabe, welche in den nächsten Jahren gelöst werden muss um die genannten Maschinentypen zu automatisieren.

Abbildung 18: Beispiele für die Verformung elastischer Auslegerstrukturen [120] [23]

5.2.3 Umgebungserkennung

Die Grundlage für viele zukünftige Assistenz- und Autonomiefunktionen bilden effiziente und zuverlässige Umgebungserkennungssysteme. Diese stellen eine Kombination aus entsprechender Sensorik (1D, 2D oder 3D) sowie den notwendigen Hardware- und Softwarekomponenten (Prozessor, Algorithmus) zur Datenaufbereitung und Datenverarbeitung dar. Einsatzbereiche von Umgebungserkennungssystemen sind überall dort, wo eine automatische Bewegung von Maschinen oder Maschinenteilen stattfindet und der sich daraus ergebende Gefahrenbereich überwacht werden muss (z.B. automatisches Schwenken, Rückwärtsfahren, Verladen, Ausfahren der Pratzen, Arbeiten in gefährlichen oder kontaminierten Bereichen, usw.). Ziel ist die Vermeidung von Kollisionen mit Personen, Maschinen, Bauwerksteilen oder anderen Gegenständen. Ein weiterer Einsatzzweck kann die Detektion und Identifikation von Objekten oder Geländeoberflächen zur Realisierung der eigentlichen Arbeitsaufgabe sein (z.B. automatisches Baggern). Die Konzeption von Umgebungserkennungssystemen für mobile Arbeitsmaschinen erfolgt immer in Bezug zu den jeweiligen Einsatzbedingungen und der angestrebten Assistenz- bzw. Autonomiefunktion. Dementsprechend hoch ist auch das Potenzial für sensorische Spezial- und Sonderlösungen.

Ein Beispiel bildet die zuverlässige Personen- und Objekterkennung unter schlechten Sichtbedingungen, wie beispielsweise in Tunneln oder bei Arbeiten in der Nacht. Einfache Kameras sind hier meist nicht ausreichend. Eine Lösungsmöglichkeit besteht beispielsweise im Einsatz von Thermalkameras [253].

Viele Objekterkennungsverfahren nutzen heute im Wesentlichen die geometrische Gestalt und Farbeigenschaften zur Identifikation und Klassifikation von Objekten. Im Bauwesen variieren die geometrischen und farblichen Eigenschaften von Objekten einer Klasse oftmals sehr stark, so dass diese sich nur schwer identifizieren lassen. Als Beispiel sei hier ein Erdhaufen genannt, dessen Erscheinungsbild sehr unterschiedlich sein kann. Hier ist es notwendig, über spezielle Sensoren (z.B. Spektrometer, Plenoptische Kameras) weitere Informationen zu generieren, welche für eine eindeutige Identifikation genutzt werden können.

5.2.4 Zustandserfassung von Erd- und Baustoffen

Hauptaufgabe vieler mobiler Arbeitsmaschinen ist das Be- und Verarbeiten von Bau- und Erdstoffen wie Asphalt, Beton, Kies, Sand, Lehm, Ton oder Fels. Zur Steigerung der Prozesseffizienz und der Verbesserung der Qualitätskontrolle ist es notwendig, den Zustand und die Eigenschaften der genannten Materialien zu erfassen und zu überwachen. Die Entwicklung entsprechender Sensorsysteme stellt ein vielversprechendes Zukunftsfeld dar.

Eine Beispielapplikation stellt die Überwachung der Baugrundeigenschaften zur Gewährleistung der Standsicherheit dar. In der Regel werden Baumaschinen wie Krane oder Betonpumpen vor dem Arbeiten abgestützt. In den letzten Jahren kam es dennoch immer wieder zu schweren Unfällen, bei denen Maschinen umgestürzt sind [163] [164]. Grund hierfür waren entweder versteckte Hohlräume (z.B. alte Kellergewölbe) oder ein Grundbruch, d.h. ein seitliches Wegbrechen des Bodens durch zu große Krafteinwirkung. Eine zukünftige Möglichkeit zur Vermeidung solcher schweren Unfälle besteht im Einsatz von Sensorsystemen, welche das Verformungsverhalten des Untergrundes erfassen [28] oder Hohlräume detektieren (z.B. mittels Bodenradar [267]).

Eine weitere Gefahr, speziell bei Baggerarbeiten, ist die Beschädigung von Kanälen, Rohren, Kabeln oder Blindgängern (Bomben), welche sich im Boden befinden. Die Detektion solcher Objekte durch geeignete Verfahren (z.B. Radar oder elektromagnetische Felder) ist bisher wenig erforscht und bietet das Potenzial für zukünftige Warn- und Assistenzsysteme.

Neue Bauverfahren wie der Beton-3D-Druck stellen erhöhte Anforderungen an die Baustoffqualität. Aktuell unterliegt die Qualität des verbauten Betons gewissen Schwankungen, welche meist auf Probleme in der Lieferkette zurückzuführen sind. Lange Standzeiten eines Fahrmischers können beispielsweise an heißen Tagen dazu führen, dass der Wassergehalt des verbauten Betons zu gering ist. Vor diesem Hintergrund wird die Überwachung der mechanischen und rheologischen Betoneigenschaften entlang der gesamten Lieferkette immer wichtiger. Aktuelle Betonpumpen oder Fahrmischer verfügen nicht über die notwendige Sensorik. Analoge Aussagen lassen sich für die Asphalt-Lieferkette treffen.

5.3 SOFTWARESYSTEME

5.3.1 Redundante Sensorik und Sensorfusion

Assistenzfunktionen zur Gefahrenbereichsüberwachung (Schwenken, Rückwärtsfahren) sind ein aktueller Entwicklungstrend. Die Erfassung des relevanten Bereichs kann über verschiedene Sensorkonfigurationen erzielt werden. Mittels optischer Kameras und Auswertealgorithmen können beispielsweise Personen erkannt und der Fahrer gewarnt werden. Ein Eingriff in die Maschinenbewegung ist jedoch nicht umgesetzt. Grund dafür ist die mangelnde Sicherheit des Erkennungssystems, was sowohl die Funktionsweise des Sensors als auch die Robustheit des Algorithmus betrifft. Soll ein automatisierter Eingriff in die Maschinenfunktionalität erfolgen, ist die Absicherung der korrekten Erkennung wohl lediglich über eine Kombination verschiedener Erkennungssysteme möglich. Beispielsweise können beim automatisierten Schwenken eines Drehbohrgeräts optische Kameras mit Ultraschallsensoren kombiniert werden, um eine valide Aussage über einen freien Schwenkbereich zu erzielen. Redundante Sensorik mit der zugehörigen softwareseitigen Sensorfusion ist ein wichtiger Baustein bei der Umsetzung aktiver Sicherheitssysteme [26].

5.3.2 Digitale Baustellenmodelle

Automatisierte Maschinen benötigen eine Planungsgrundlage. Soll ein Bagger eine Grube ausheben oder eine Walze eine Fahrbahn verdichten, so müssen die geometrischen und verfahrenstechnischen Randbedingungen definiert werden. Dazu benötigt die Maschinensteuerung ein digitales Modell der Baustelle und des Bauwerks, um den Prozessschritt zu planen, durchzuführen und zu dokumentieren. Während die Planung eines Bauwerks digital erfolgt, ist mit der Bauausführung der Einsatz der digitalen Planungsdaten jedoch oft beendet. BIM ist eine vielversprechende Methode um digitale Bauwerksmodelle für die verschiedenen Gewerke zur Verfügung zu stellen. BIM war ursprünglich für die Anwendung im Hochbau erdacht. Als wichtiges und offenes Datenmodell ist das IFC-Format jedoch mittlerweile für verschiedenste Anwendungen erweitert worden. Um den Maschineneinsatz auf der Grundlage von BIM durchzuführen, sollten die Planungsdaten eines Bauwerks so formalisiert werden, dass für die Maschinensteuerung eine funktionale Definition der Prozessschritte generiert werden kann [42].

5.4 KOMMUNIKATION

5.4.1 5G-taktiles Internet

Der neue 5G-Mobilfunkstandard unterscheidet drei Anwendungsbereiche: ultra-schnelles Breitband (hohe Datenraten für Videostreaming), Machine-to-Machine-Communication (viele Teilnehmer und geringe Datenmengen, IoT) und besonders für Industrieanwendungen relevant: ein Hoch-Zuverlässigkeitsnetz mit geringen Latenzen (autonomes Fahren, Echtzeitsteuerung).

5G-Funk verspricht eine Latenzzeit von 1ms, was die echtzeitfähige Interaktion zwischen Mensch und Maschine ohne empfundene Verzögerung ermöglicht. Eine wichtige Anwendung ist die Fernsteuerung von Baumaschinen ohne direkten Sichtkontakt über Kamerabilder. Momentan ist Senden von mehreren gut aufgelösten Kameravideos nur mit Verzögerungen von >30ms möglich, die dem menschlichen Bediener das effiziente Bedienen erschweren.

Eines der größten Bedenken der Branche ist die mangelnde Netzabdeckung auf Baustellen, insbesondere bei Infrastrukturprojekten. Die Bundesnetzagentur hat jedoch die Möglichkeit einer regionalen und lokalen Frequenzfreigabe für Industrienetze geschaffen. Somit können ohne Abhängigkeit von etablierten Netzbetreibern Industrienetze in Produktionsanlagen, auf landwirtschaftlicher Fläche und auf Baustellen installiert werden [53].

5.4.2 Schnittstellen

Die Kommunikation zwischen Maschinen, Leitstand und Baustelleninfrastruktur erfordert einen umfangreichen Austausch von Daten. Die derzeitige Standardisierung von Telematikdaten entsprechend ISO 15143-3 wird dem nicht genügen. Selbstfahrende Maschinen müssen für Navigation und Kollisionsvermeidung Routeninformationen, Karten und Umgebungsinformationen austauschen. Automatisierte Prozesse erfordern Prozessplanungsdaten und eine Synchronisierung zwischen den beteiligten Maschinen. Welche Netzwerkstruktur dafür geeignet ist, wie Protokolle und Schnittstellen verwendet werden, ist noch ungeklärt. Proprietäre Lösungen eines Herstellers würden vernetzte Baustellensysteme aus einer Hand liefern können, was aber nicht der Realität einer deutschen Baustelle entspricht. Der Einsatz von Maschinen unterschiedlicher Hersteller erfordert die Spezifikation offener Schnittstellen. Die Verknüpfung der Maschinen in einer Baustellencloud wird sicherlich Aufgabe von Drittanbietern sein. Als aussichtsreicher Datenaustauschstandard wird momentan OPC-UA (open platform communications unified architecture) gehandelt [235]. OPC-UA fügt sich bereits jetzt in das Referenzarchitekturmodell RAMI 4.0 ein, welches als Muster für die Implementierung von Industrie 4.0 Anwendungen gilt [229]. OPC-UA ist die Spezifikation eines plattformunabhängigen Standards zur Kommunikation zwischen Produkten unterschiedlicher Hersteller. Es existieren bereits verschiedene quelloffene, freie und kommerzielle Implementierungen. OPC-UA ermöglicht die objektorientierte Modellierung der zu übertragenden Daten und unterstützt sowohl client-server Kommunikation (Datenaustausch

zwischen zwei Partnern) als auch publish-subscribe Mechanismen (Vernetzung vieler Produkte im Sinne von IoT).

OPC-UA definiert, wie eine Information über ein Netzwerk zwischen Maschine und Anwendung (HMI, Cloud, Datenbank, etc.) übertragen wird, welche Informationen übertragen werden definiert der Anwender. Sinnvollerweise wird die Information von einem Branchengremium spezifiziert. Andere Industrieverbände und Organisationen haben bereits Regelungen zum Übertragen ihrer bestehenden Datenmodelle auf OPC-UA [236] entwickelt.

Im Bereich der Baumaschinen wird sich die Arbeitsgemeinschaft Machines in Construction 4.0 (MiC 4.0) innerhalb des VDMA mit dieser Aufgabe befassen. Vom VDMA-Fachverband Robotik existiert bereits ein OPC UA Robotics Companion Sheet [126], was durchaus als Anhaltspunkt für die Spezifikation von Baumaschinen herangezogen werden kann. Trotz der starken Fokussierung auf OPC-UA in Europa, existieren andere denkbare Standards wie DDS (data distribtuion service), welche in den USA favorisiert werden. Welche Technologien eingesetzt werden, ist abhängig vom Einsatzfall. Interoperabilität zwischen den verfügbaren Systemen ist daher ein wichtiges Entscheidungskriterium bei der Entwicklung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Baumaschinenbranche.

5.4.2.1 Asset Tracking

Durch den Einsatz von Lokalisierungstechnologien und drahtloser Kommunikation können Maschinen, Beistellgeräte und Material auf der Baustelle lokalisiert und verfolgt werden (Tracking & Tracing). Verschiedene Lokalisierungstechnologien sind bereits jetzt verfügbar (RFID, Bluetooth Low Energy GNSS, ZIGBEE) und werden bereits in der industriellen Produktion eingesetzt. Dabei werden „Tags“ an den physischen Assets angebracht, lokalisiert und die Bewegungshistorie mit einem Server geteilt. Es gibt bereits erste kommerzielle Produkte dafür, wie bspw. BOSCH Bluehound [39]. Auf einer Baustelle besteht die Schwierigkeit, nicht nur Maschinen und Geräte in widrigen Umweltbedingungen mit robusten Tags auszustatten, sondern auch Schüttgüter zu überwachen. Der Einsatz von Tags ist hier nur schwer möglich. Durch volumetrische Messungen mittels Kameras oder Lasermesssystemen von Kranen oder Drohnen können auch Schüttgüter verfolgt werden [265], [343].

5.4.2.2 Kooperation von Baumaschinen

Baumaschinen arbeiten in vielen Arbeitssituationen zusammen, was die Koordination zwischen den Bedienern erfordert. Die Kooperation autonomer Maschinen und Roboter stellt zusätzliche Anforderungen an Sensorik, Datenverarbeitung und Kommunikation. Gerade im Straßenbau ergeben sich zahlreiche Anwendungsszenarien für kooperative Maschinen. Der Fertigungszug, meist bestehend aus Beschicker und Fertiger, muss in kontrolliertem Abstand fahren, die Walzen müssen sich am Einbaufortschritt orientieren. Dazu ist eine gegenseitige Übermittlung von Position und Trajektorie nötig. Die derzeitigen Anforderungen an die Latenz der Datenübertragung ist für die Kooperation von Baumaschinen geringer als beispielsweise in der Robotik oder im autonomen Straßenverkehr, da die Fahr- und Arbeitsgeschwindigkeiten im Bereich Baumaschinen wesentlich langsamer sind. Zukünftige Anwendungsfälle werden die Anforderungen jedoch steigern. Im Forschungsvorhaben „SmartSite“ wurde bereits unter Beweis gestellt, dass vernetzte Straßenfertigung realisiert werden kann [172].

5.4.2.3 Flottenorchestrierung

Flottenmanagementsysteme aggregieren Maschinendaten und ermöglichen die Analyse und Überwachung zur besseren Kalkulation und Planung. Werden zukünftig automatisierte und autonome Maschinen Teil der Prozesskette, ergibt sich die Notwendigkeit die automatisierten Arbeitsprozesse zu koordinieren. Der Begriff der Flottenorchestrierung bezeichnet die Verwaltung sowie die Einsatzplanung von automatisierten Maschinen, sowie deren Versorgung mit Auftragsdaten. Grundlage ist auch hier ein offener, maschinenübergreifender Datenstandard und eine zuverlässige Kommunikation.

5.5 ANTRIEBSTECHNIK

Das Ziel einer zukünftigen Automatisierbarkeit von Baumaschinen wird durch eine Elektrifizierung der Antriebsstränge unterstützt (siehe Kapitel 3.4), was neben den Primäraggregat auch die Mobilhydraulik betrifft. Auf der einen Seite wird die Hydraulik aufgrund ihrer Robustheit und Leistungsdichte weiterhin Bestand haben. Jedoch wird sich diese hinsichtlich einer elektro-hydraulischen Ansteuerung weiterentwickeln, um so eine Automatisierung durch elektrische Stellglieder erst wirklich zu ermöglichen. Dabei wird ein wichtiger Meilenstein von hydraulisch angetriebenen Baumaschinen mit Auslegerstrukturen (Bagger, Autobetonpumpe) die exakte Positionierung des Endeffektors sein. Dazu müssen jedoch neue antriebstechnische Konzepte etabliert werden. Momentan sind der zentrale Ventilblock und die langen Hydraulikleitungen nicht geeignet, um die nötige Regelgüte zu erzielen, die für eine genaue Positionsregelung notwendig ist. Grundlegende Konzepte, wie Direktantriebe oder getrennte Steuerkanten (Auflösung der Ventilstrukturen, d.h. es wird z.B. ein herkömmlicher 4/3-Wege-Ventilschieber durch vier einzelne 2/2-Wege-Ventile ersetzt) existieren bereits, doch eine Umstellung der Antriebssysteme von Seiten der Maschinenhersteller ist aus Gründen von Wirtschaftlichkeit, Akzeptanz, Standardisierung, Produktsicherheit, F&E-Ressourcen sowie funktionalen Besonderheiten (vgl. Kap. 2 Rahmenbedingungen) schwer absehbar. In der benötigten Leistungsklasse ist zudem auch zukünftig kein Linearaktor (Erzeugung einer geradlinigen Bewegung zur Kraftübertragung, bei Baumaschinen in der Regel ein Hydraulikzylinder) rein elektrisch betreibbar, wohingegen eine Kombination als elektro-hydraulischer Zylinder die Vorteile von Steuerung und Leistungsdichte verbindet. Die im Vergleich zur Hydraulik höhere leistungsspezifische Masse, der höhere konstruktive Bauraumbedarf und nicht zuletzt die gemeinhin höheren Kosten der Aktoren sind nicht zu ignorierende Einflüsse auf die Einsetzbarkeit elektrischer Antriebe.

Auf der Seite der Primäraggregate ist abzusehen, dass es zukünftig nicht die eine Antriebslösung geben wird. Vielmehr wird es auf einen Mix aus maschinengrößen- und arbeitsaufgabenspezifischen Antriebskonzepten hinauslaufen, mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen. Die Grenzen werden sich durch technologische Weiterentwicklung und regulatorische Vorgaben jedoch stetig verschieben. In welchen Anwendungsbereichen sich dabei der Elektromotor (mit Versorgung über Batterie, Brennstoffzelle oder Kabel) oder der Verbrennungsmotor mit synthetischen (regenerativ erzeugten) Kraftstoffen als Primäraggregat durchsetzen wird, ist jedoch noch völlig offen. Die regenerative und preislich akzeptable Bereitstellung der Energieträger sowie die Schaffung einer geeigneten Lade- und Infrastruktur sind dabei die Hauptvoraussetzungen.

Bezogen auf die verschiedenen Funktionen der Maschinen beginnt die Elektrifizierung der Antriebstechnik bei den Fahrantrieben (hohe Effizienz), außerdem werden Nebenfunktionen zunehmend elektrifiziert. Aus technischer und wirtschaftlicher Sicht liegt der Fokus vor allem auf Maschinen mit einem Betriebsgewicht von meist kleiner 5 t Betriebsgewicht. Dies zeigt auch die Verfügbarkeit von batterieelektrischen Maschinen auf dem Markt. Größere Leistungen für mobile Anwendungen sind derzeit technisch nicht mit vollelektrischen Antriebssystemen realisierbar bzw. würden die erforderlichen Speicher den verfügbaren Bauraum um ein Vielfaches überschreiten. Zudem würden die Maschinen dabei im Hinblick auf die Beschaffungskosten immer unwirtschaftlicher und die Nutzungszeiten (zwischen den Ladezyklen) kürzer. Mit der stetigen Weiterentwicklung der Technologien (z.B. Akkumulatoren) und Komponenten wird in Zukunft potenziell auch mehr möglich sein (bis 15 t). Dies führt aber nur zu einer Verschiebung der Grenze und nicht zu einer Auflösung dieser Problematik. Auch die Wartung und Reparatur elektrischer Komponenten stellt neue Herausforderungen an die Betreiber und Servicetechniker der Branche, was die breite Einführung elektrischer Antriebssysteme in Baumaschinen erschwert. Bei Baumaschinen mit höheren Betriebsgewichten werden, soweit sich das aktuell beurteilen lässt, auch dauerhaft batterieelektrische Antriebe keine Lösung darstellen. Ein Einsatz von vollelektrifizierten Baumaschinen ist in erster Linie da sinnvoll, wo lokale Abgasemissionen unbedingt verhindert werden müssen (z.B. auf innerstädtischen Baustellen, in Gebäuden und im Tunnelbau) und bei Maschinen mit kurzen Einsatzzeiten (Hilfsmaschinen). Der Einsatz von Batterien als Energiespeicher oder die Versorgung aus der Steckdose hängt dabei ganz vom Einsatzprofil ab. Ob zumindest auf Baustellen im innerstädtischen Bereich die Zero-Emission-Baumaschinen Einzug halten, wird wohl der

Gesetzgeber entscheiden. Unter rein wirtschaftlicher Bewertung wird dies nicht passieren, solange dafür keine nennenswerten Anreize gegeben sind.

Dennoch wird allen Antriebskonzepten die notwendige, wenn auch nur anteilige, Bereitstellung elektrischer Leistung gemein bleiben, denn der große Vorteil elektrischer Aktoren gegenüber anderen Antriebskonzepten liegt in der einfacheren Versorgung und Ansteuerung (Verlegung von Kabeln ist weniger aufwändig als die Verlegung von Druckschläuchen oder Rohren), ihrer rechnergestützten Steuerbarkeit und somit der Automatisierbarkeit von Arbeitsprozessen.

5.6 HUMAN-MACHINE-INTERFACE (HMI)

5.6.1 Ausgabeelemente

Augmented Reality (AR)

In der Unterstützung von Servicearbeiten werden bereits von einigen Baumaschinenherstellern AR-Technologien angeboten [247] [104] [240] [169]. Hier ist eine höhere Markdurchdringung der AR-Hilfsmittel zu erwarten, womit neben der Verbreitung die nicht zu vernachlässigende Akzeptanz zunimmt. Somit ist auch die Verwendung von AR-Technologien in der Bedienerkabine zu sehen. Beispielsweise können virtuelle Höhenprofile oder Systemzustände der Anbaugeräte in das Sichtfeld des Bedieners über ein Head-Up-Display oder eine AR-Brille eingeblendet werden. Letztere Variante ist ein aktuelles Forschungsthema ([24] [106]) und zeigt die Perspektiven des AR-Einsatzes für den Bediener auf. Voraussetzung für die Visualisierung ist die Echtzeiterfassung und -auswertung der Zustandsgrößen sowie die Objekterkennung mit geeigneten Sensoren. Kurzfristig wird AR wohl auf die Anzeige von Wartungs-, Bedien- und Verarbeitungsinformationen über mobile Endgeräte beschränkt bleiben. Beispielsweise indem Warnhinweise im Maschinencockpit als Marker genutzt werden oder für das Einspielen von Einbauhinweisen für Fertigteile.

Virtual Reality (VR)

Im Gegensatz zur AR-Technologie, die die reale Wahrnehmung des Benutzers in seinem Sichtfeld um Information erweitert, beruht die VR-Technologie auf der kompletten Interaktion mit einer simulierten, virtuellen Umgebung. Da dem Verfahren der direkte Echtzeitbezug zum realen System fehlt und Bauprozesse keine statischen Strukturen darstellen, sprich die Simulationsmodelle in Echtzeit angepasst werden müssten, ist der Einsatz der VR für Baumaschinen in erster Linie im Bereich der Planung sowie Ausbildung und Schulung zu sehen.

So können in der Planung Strukturen virtuell errichtet und somit der Bauablauf bereits im Vorhinein untersucht und erprobt werden [185]. Die Voraussetzung hierfür bilden entsprechende Bau- und Planungsmodelle, die jedoch mit zunehmender Etablierung von BIM ohnehin in der Baubranche vorliegen sollten, aber auch Maschinenmodelle, um den Prozess realistisch abzubilden.

Der größere Nutzen der VR-Anwendung liegt sicherlich im Bereich der Ausbildung und Schulung [22], [186], [219], [246]. Die Vielzahl der herstellerspezifischen Bedienkonzepte bedingt beim Maschinenwechsel für jeden Bediener eine gewisse Anpassungsphase, die mit der Komplexität der Maschine steigt. Zudem kann im Bereich der Schulung und Ausbildung nicht jeder Maschinentyp oder jedes Bedienkonzept vorliegen. Hier bietet die VR-Technologie die Möglichkeit, sich in einem sicheren Umfeld mit der Bedienung vertraut zu machen, was die sichere Interaktion mit der realen Maschine begünstigt.

Kamerasysteme

Neben AR und VR ist auch der Einsatz von Datenbrillen in Kombination mit geeigneten Kamera- und Steuerungssystemen denkbar. Der Einsatz von Kamerasystemen ist vor allem dann von Interesse, wenn die Sicht des Bedieners stark eingeschränkt ist oder das Werkzeug einen großen räumlichen Abstand zum Bediener aufweist, siehe Maschinenfernsteuerung. Typische Anwendungen hierfür sind die

Bedienung von Kranen oder Lademaschinen. Anstelle eines Hochsitzes oder einer Kanzel befindet sich der Bediener am Boden und steuert den Kran über eine spezielle Bedieneinheit. Dabei könnte ihm das Bild des Kamerasystems in der First-Person-Ansicht direkt auf die Datenbrille übertragen werden. Ist die Datenbrille, wie bei VR-Anwendungen üblich, gänzlich geschlossen, muss die Datenbrille um eine entsprechend intuitive Bedienung ergänzt werden, da sich selbige nicht im Sichtfeld des Bedieners befindet. Eine alternative Ergänzung hierfür ist die Einblendung der konventionellen Bedieneinheit durch die Erweiterung mit einem entsprechenden Kamerasystem an der Datenbrille, wobei die Handbewegung des Bedieners ebenfalls zu tracken ist. Problematisch bleibt die Bildübertragung. Digitale HD-Kameras können noch nicht in Echtzeit Videostreams in für den täglichen Gebrauch ausreichender Qualität von der Maschine zum Bedienerarbeitsplatz senden [113]. Ein zeitlicher Versatz oder eine zu geringe Bildauflösung kann zur Irritation des Bedieners und folglich zur Fehlbedingung der Maschine führen, was eine produktive und sichere Arbeit behindert. Dass bereits erste Übertragungskonzepte existieren, zeigt die Anwendung im Bereich des Drohnenflugs [130]. Hier haben die Latenz der Video- und Steuerungssignale sowie die übertragene Bildqualität ein praktikables Niveau erreicht, welches auch für den Bereich der Baumaschinen denkbar ist. Allerdings ist die Rundumsicht, wie sie in der Fahrerkabine ggf. bereits ergänzt durch weitere Kamerasysteme erzielbar ist, nur schwer über eine einzelne Kamera zu realisieren. Folglich muss die Übertragung der Videodaten mehrerer Kameras gesichert werden.

Erweiterte Ereignispräsentation

Im Sinne einer erweiterten Ereignispräsentation werden beispielweise Hindernisse nicht nur akustisch oder auf einem zentralen Display, sondern gezielt dezentral im Sichtfeld des Bedieners, sprich in der Kabine oder dem Spiegel, durch geeignete Lichtsignale dargestellt. So wird dem Bediener nicht nur das Eintreten einer Gefahrensituation angezeigt, sondern der Fokus intuitiv in Richtung der Gefahrenstelle gelenkt. Ein Beispiel hierfür ist das Blind-Spot-Detection-System im Automobilbereich [72], das dem Fahrer die Anwesenheit von Hindernissen oder Personen, die sich im Totwinkel aufhalten, im Spiegel visuell anzeigt.

Umfeldkommunikation

Neben der Visualisierung in der Kabine für den Bediener wird im Hinblick auf automatisierte oder ferngesteuerte Maschinen die Kommunikation mit Personen in der Maschinenumgebung immer relevanter. Ein Ansatz zur Kommunikation ist die Verwendung von Licht. Damit ist nicht nur eine Warnleuchte gemeint, vielmehr geht es in Richtung auf den Boden projizierter Piktogramme [54]. Hierfür werden über spezielle Scheinwerfer, wie [127], Warnsignale oder Hilfslinien auf den Boden projiziert, die außenstehenden Personen den Arbeitsbereich, den Totwinkel der Maschine oder weitere Informationen, wie die Bewegungsrichtung der Arbeitsausrüstung eines Baggers anzeigen.

5.6.2 Eingabeelemente

Spracheingabe

Im Consumer-Bereich werden Sprachassistenzsysteme bereits in großer Breite zur Steuerung von Endgeräten bis hin zu Gebäudefunktionen, wie Heizung und Lichtquelle, angeboten. Auch im Kraftfahrzeugbereich werden Sprachassistenten zur Steuerung von Fahrzeugfunktionen wie der Navigation eingesetzt. Obgleich der Nutzungszuwachs nicht der Angebotssteigerung entspricht, bietet die technische und informationstechnische Weiterentwicklung der Spracherkennung und -auswertung auch im Bereich der Baumaschinen Perspektiven für die Maschinensteuerung. Für Baumaschinen sind zwar noch keine Lösungen zu finden, jedoch im Bereich der Kraftfahrzeuge [92], [273]. Neben grundlegenden Funktionen ist der Einsatz der Sprachsteuerung vor allem für Nebenfunktionen zu sehen. Sind beispielsweise beide Hände durch die Maschinenbedienung im Arbeitsprozess gebunden, könnten Nebenfunktionen, wie Beleuchtung oder Scheibenwischer, verbal betätigt werden ohne den visuellen Fokus vom Arbeitsprozess zu lösen.

Fernsteuerung

Baumaschinen haben extrem heterogene Einsatzumgebungen und Arbeitsaufgaben, sodass eine Vollautomatisierung wohl noch in weiter Ferne liegt. Einzelaufgaben auf Großbaustellen werden jedoch nach und nach von Automatisierungsfunktionen übernommen werden. Die Bedienung durch einen Menschen wird also nur zeitweise benötigt. Es ergibt sich somit eine Situation, in der mehrere Maschinen abwechselnd automatisiert und manuell gesteuert werden. Dem entsprechend wird sich die Maschinenbedienung, je nach Automatisierungsgrad, aus der Fahrerkabine auf der Maschine in einen externen Leitstand verschieben.

Je nach Automatisierungsgrad steuert der Bediener kontinuierlich, übernimmt mittels Fernsteuerung sofern notwendig manuelle Tätigkeiten oder orchestriert mehrere Maschinen, die für sich autonom arbeiten.

Dazu wird ein effizienter Fernhantierungsarbeitsplatz benötigt. Lösungen für die Fernsteuerung von Maschinen sind bereits im Bereich des Tage- und Untertagebaus verfügbar [280] und in Forschungsarbeiten [364] zu finden. Der Bediener befindet sich in einem mit Monitoren ausgestatten Leitstand, der die Funktionalitäten wie Joystick oder andere Eingabegeräte abbildet und so die Steuerung der Maschine ermöglicht. Die Fernsteuerung bietet die Vorteile, dass auf der Maschine kein Bauraum für eine Fahrerkabine sowie etwaige Fahrerschutzsysteme vorzusehen sind und sich der Bediener zum anderen nicht persönlich in eine Gefahrensituation begeben muss. Hier sind vor allem im Bereich des Rückbaues von Energie- und Industrieanlagen sowie Gebäuden, die unter Umständen mit gesundheitsgefährdenden Stoffen kontaminiert sind, Einsatzmöglichkeiten für ferngesteuerte Baumaschinen zu sehen. Dabei kann die zentrale Leitwarte theoretisch hunderte bis tausende Kilometer vom Einsatzort der Maschine entfernt liegen. Die Maschinenfernsteuerung über derartige Distanzen setzt jedoch geeignete Datenübertragungsstandards voraus, welche die zuverlässige Übertragung der Video- wie Steuerungssignale ermöglichen. Ein Ansatz ist hierfür die 5G-Technologie, die bisher in einzelnen Demonstrations- und Konzeptstudien [122] Einsatz findet. Weitreichende Änderungen in der Fernsteuerung von Baumaschinen sind daher erst mit der flächendeckenden Bereitstellung der Übertragungsstandards zu sehen. Zudem bleibt ein Forschungsschwerpunkt die gezielte Erfassung und Rückmeldung der System- und Umgebungsgrößen, die dem Bediener die gleichen und mehr Informationen zur Verfügung stellen, die er bei physischer Anwesenheit auf der Maschine hätte. Erste Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der multisensoriellen Umwelterfassung und Bewegungsplanung sind in [272] zu finden. Problematisch bleibt bei der Fernsteuerung das mangelnde Feedback beim Arbeiten mit einer Baumaschine aus der Ferne. Ein wichtiger Feedbackkanal ist die vestibuläre Wahrnehmung der Prozesslasten. Das Schwanken eines Radladers auf unwegsamen Gelände oder die Erschütterungen beim Baggern geben dem Fahrer ein Gefühl für den Prozess. Dieses Feedback fehlt bei einer ferngesteuerten Maschine oder es muss mit aufwändiger Aktorik als Bestandteil des Leitstandes eingerichtet werden.

Gestensteuerung

Neben den konventionellen Eingabemedien kann die Steuerung über neuartige Eingabegeräte anstelle von Joysticks erfolgen. Das zeigt die Umsetzung der Robotersteuerung von [342]. Hierfür werden in ein Textil, sei es Jacke oder Handschuh, spezielle Sensoren eingearbeitet, die die Bewegungen des Trägers erfassen. Durch entsprechende in der Software hinterlegte Algorithmen werden die Aktoren der Maschine derartig gesteuert, dass die Maschine die Bewegung des Bedieners nachvollziert und überträgt. Dieses Konzept ermöglicht ein sehr intuitives Arbeiten, da beispielsweise das Schließen der Hand dem Schließen der Zange als Anbaugerät am Bagger gleichkommt. Dieses Steuerungskonzept setzt die Positionierung des Bedieners außerhalb der Maschine nicht voraus, wird jedoch durch einen Arbeitsplatz des Bedieners außerhalb der Maschine begünstigt. Das bietet Vorteile gerade im Bereich des Gebäuderückbaus, der mit etwaigen Gefahren durch Einsturz verbunden ist.

Maschinenübergreifende & intuitive Bedienkonzepte

Einer der Negativtrends der letzten Jahre ist der zunehmende Fachkräftemangel. Das betrifft sowohl die Anzahl der Personen, die sich als Maschinenbediener qualifizieren, bis hin zur geringen Qualifikation vieler Bediener. In der Folge werden unternehmensgrößenabhängig verschiedene Maschinen und Maschinentypen von wenigen Bedienern geführt, die sich auf das jeweilige Bedienkonzept einstellen müssen. Das ist mit einem hohen Schulungsaufwand der ohnehin schon wenigen Bediener verbunden, was die Produktivität eines Unternehmens senkt. Wiederum steigt mit variierenden herstellerspezifischen Bedienkonzepten die Gefahr der Fehlbedienung, wenn Funktionalitäten nicht am erwarteten Ort liegen oder die Aufmerksamkeit des Bedieners vom eigentlichen Arbeitsprozess abgelenkt wird.

Ziele der aktuellen Entwicklung und Forschung sind somit die Etablierung von intuitiven, einheitlichen, hersteller- und maschinenübergreifenden Bedienkonzepten. [107] und [171] zeigen, wie das zukünftige Bedienkonzept und die Fahrerkabine selbst auch herstellerübergreifend aussehen könnte. Gleichzeitig werden aber auch herstellerspezifisch maschinenübergreifende Bedienungskonzepte entwickelt, die den Umstieg und die Neuorientierung von einer Baumaschine des Herstellers zur anderen vereinfachen [184]. Der herstellerübergreifende Bedienungsstandard zur Erleichterung des Maschinenwechsels muss aber das Ziel bleiben, trotz teilweise gegenläufiger Interessenlagen der Hersteller, die ihre eigenen Bediensysteme als Alleinstellungsmerkmale nutzen und sich damit gerade durch abweichende Lösungen von anderen Anbietern abgrenzen wollen [136] Im Ergebnis würde eine Vereinheitlichung der Baumaschinenbedienung den Schulungsaufwand sowie die Wahrscheinlichkeit der Maschinenfehlbedienung reduzieren.

5.7 DIGITALER ZWILLING

Nach allgemeinem Verständnis ist der digitale Zwilling das virtuelle Abbild eines existenten oder noch nicht existenten realen Systems, welches das Verhalten des realen Systems möglichst genau beschreibt. Das oberste Ziel der Entwicklung eines digitalen Zwillings für eine Maschine besteht in der Regel darin, den gesamten Produktlebenszyklus von der Planung bis zur Entsorgung in die Betrachtung einzuschließen.

Die virtuelle Abbildung von realen Systemen und ihrem Systemverhalten ist bereits seit Jahrzehnten in der Forschung und Entwicklung zu finden und wurde bisher gemeinhin mit der Zielstellung einer ganzheitlichen Systemsimulation beschrieben [304], [353]. Die Grundlage bilden Simulationsmodelle, die mit geeigneten Algorithmen und Gleichungssystemen bei bekannter Datengrundlage, sprich bekannten systeminhärenten Größen sowie externen Einflüssen, die reale Systemantwort auf besagte Einflüsse möglichst genau widergeben. Im Bereich Bau dienen digitale Zwillinge der Planung und Dokumentation von Anlagen und Bauwerken. Für Baumaschinen werden Digitale Zwillinge in der Regel zur Auslegung und Optimierung eingesetzt [94].

Daraus ergibt sich die Komplexität in der Erstellung digitaler Zwillinge, denn geeignete Algorithmen, insbesondere, wenn sie den Arbeitsprozess einschließen, sind zumindest auszuwählen, wenn nicht neu zu entwickeln. Zum anderen sind externe Einflüsse stark vom jeweiligen Einsatzbereich abhängig und nicht verallgemeinert quantifizierbar. Diese systemspezifische Komplexität erfordert zumeist die Reduktion auf beschreibbare Subsysteme, die jeweils einen definierten Teil des Gesamtsystems darstellen. Für die Simulation des Gesamtsystems können derartige Subsysteme beispielsweise über den FMI-Standard [31] oder in multidomänen Simulationsumgebungen verknüpft werden. Das Functional Mock-up Interface (FMI) ist ein werkzeugunabhängiger Standard, der sowohl den Modellaustausch als auch die Co-Simulation dynamischer Modelle mit einer Kombination aus Xml-Dateien und kompiliertem C-Code unterstützt. Festzuhalten bleibt, dass die Kopplung, je nach Modellierungstiefe sowie fachlicher Domäne, komplex bis kaum möglich sein kann und die Modelle stets nur eine Näherung des realen Systems bleiben, die über einen eingeschränkten Gültigkeitsbereich verfügen. Das bedeutet, dass der Umfang und Inhalt eines Digitalen Zwillings, je nach Anwendung und Zielstellung, stark variieren kann. Sehr detaillierte Modelle erfordern in der Regel eine hohe Rechenleistung und Berech-

nungsdauer fernab der Echtzeit. Derartige Modelle können zur langfristigen System- und Prozessoptimierung herangezogen werden. Für eine kurzfristige Optimierung werden Modelle in einer reduzierten Detaillierungstiefe in die Maschinensteuerung implementiert, die echtzeitfähig sind und durch Teilautomatisierung in die Regelung der Maschine eingreifen. Auf die Weise kann wie in [358] der Arbeitsprozess optimiert und der Bediener entlastet werden.

Der aktuelle Ansatz des digitalen Zwillings erweitert nun diese virtuellen Modelle um eine Historie. Sprich die Vereinigung von Simulationsmodellen mit Daten, die über die Lebensdauer eines Systems hinweg erfasst werden. Die erreichbaren Vorteile liegen unter anderem in der Möglichkeit zur Modell- und Prozessoptimierung sowie in der Systembetrachtung für eine verbesserte Produktsicherheit. Anstatt auf Schäden oder Ausfälle zu reagieren, wird im Rahmen der prädiktiven Instandhaltung mit dem virtuellen Zwilling, dem die bisherigen Prozesszyklen bekannt sind, das Lebensdauerende von Komponenten prognostiziert [101], [274]. Diese kritischen Komponenten sind daraufhin geplant vor dem Versagen austauschbar. Die reale Umsetzung von Digitalen Zwillingen ist bisher weitgehend auf Forschungsprojekte oder einzelne Pilotprojekte beschränkt, für die Umsetzung in der Breite bleibt noch viel zu tun. Schwerpunkt bleibt dabei neben der Entwicklung geeigneter virtueller Modelle, die das Versagen adäquat berücksichtigen [111], [138], [290], vor allem die umfangreiche Erfassung der relevanten System- und Belastungsgrößen am realen System [268], [278]. Das wiederum kann, je nach System, alles andere als trivial sein, insbesondere, wenn die relevanten Größen nicht direkt messbar oder bisher unbekannt sind.

Ein Treiber, der die Nutzung von digitalen Zwillingen und die Berechnung von komplexeren Simulationsmodellen ermöglicht, ist die zunehmend leistungsfähigere Rechentechnik. Davon ausgehend, dass der Leistungszuwachs Bestand hat und sich die Möglichkeiten der zentralen und dezentralen Parallelisierung weiter verbessern, kann der virtuell erfasste Systemumfang erhöht oder die Berechnungsdauer reduziert werden, was die Praktikabilität von digitalen Zwillingen signifikant verbessert. Im gleichen Sinne gilt das für die Steigerung der Leistungsfähigkeit von Speichertechnologien bezüglich ihrer Speicherkapazität. Mit der zunehmenden Komplexität virtueller Modelle sowie der Erfassung von Prozessgrößen über den gesamten Lebenszyklus entstehen umfangreiche Datenmengen, die es eventuell im Rahmen der Gewährleistung von Komponenten oder Baugruppen oder im Rahmen der Produkthaftung über einen noch nicht spezifizierten Zeitraum zu sichern gilt.

Die Definition des Digitalen Zwillings ist branchenabhängig sehr divers und wird auch in Zukunft Interpretationsspielraum lassen. Grundsätzlich bleibt die Komplexität des virtuellen Abbilds in der Entwicklung geeigneter, das System beschreibender Modelle, sowie im zunehmenden Maße in der Systemdatenerfassung und -verarbeitung bestehen. Zur Auswertung der umfangreichen Mess- und Simulationsdaten werden Verfahren in den Fokus rücken, die es ermöglichen, mit den entstehenden Informationsmengen effizient umzugehen, um aus ihnen neue Erkenntnisse oder Optimierungsmaßnahmen abzuleiten und diese in das physische Äquivalent zu überführen.

5.8 ASSISTENZ, AUTOMATISIERUNG UND AUTONOMIE

Assistenzsysteme

Auf dem Markt sind bereits zahlreiche herstellerspezifische, aber auch herstellerübergreifende Assistenzsysteme von Drittanbietern erhältlich, die dem Personenschutz, der Bedienerentlastung, der Prozessgenauigkeit (Effizienzsteigerung) sowie dem Maschinen- und Flottenmanagement dienen. Branchenübergreifend wird der Begriff Assistenz unterschiedlich definiert oder verstanden, daher soll an dieser Stelle auf die Definition von Assistenzsystemen verwiesen sein, nach der nur das Feedback zum Bediener, optisch, akustisch oder haptisch, als Assistenz bezeichnet wird, jedoch nicht der Eingriff in die Maschinensteuerung durch das Assistenzsystem (vgl. Kap. 1.2).

Der Grund, warum im Bereich der Baumaschinen vorwiegend Assistenzsysteme, also Systeme ohne Eingriff in die Steuerung zum Einsatz kommen, liegt in den stark schwankenden Belastungen auf die

Maschinen, die eine in jedem Fall zuverlässige Erkennung und Abgrenzung vom Normal- zum Sonderfall sehr schwierig gestalten. Diese Komplexität in Kombination mit einer meist ungeklärten Haftungsfrage, also ob das System den Fehlerzustand hätte erkennen müssen, führt zum Behalt der Verantwortlichkeit beim Maschinenbediener. Somit wird in erster Linie die Entwicklung in eine erweiterte Erfassung von Umgebungs- und Maschinengrößen gehen. Einer der Schwerpunkte wird hierbei die Aufbereitung der Sensorsignale sein, beispielsweise durch eine Prozessmusterkennung, um Sonderfälle oder Abweichungen von der Zielgröße zuverlässig zu erkennen. Die aufbereiteten Signale bilden ebenso die Grundlage zur verbesserten Präsentation für den Bediener, die innerhalb oder außerhalb der Kabine erfolgen kann, siehe Kapitel HMI. Im letzteren Fall können beispielsweise geplante oder bereits verlegte Rohrleitungen und Kabel auf den Boden projiziert werden, um die Sensibilität des Bedieners zu erhöhen. Für verlegte Leitungen werden jedoch die tatsächlichen Positionen benötigt, die eine adäquate Datengrundlage (Einbaudokumentation) oder die in-situ Erkennung voraussetzen.

Trotz dieser unterstützenden Systeme bleibt im Rahmen der Assistenz der Bediener das zentrale Medium zur Eingabe der Befehle und Daten in die Maschine. So sind vor Arbeitsbeginn die Randparameter der Assistenzsysteme gerade bei anbieterübergreifender Nutzung von variierenden Anbaugeräten zumeist händisch einzustellen. Gleiches gilt für die manuelle Abarbeitung von herstellerinternen Kalibrierungszyklen durch den Bediener. Nicht zu vernachlässigen ist, dass einige der Assistenzsysteme die mehrmalige Eingabe oder Kalibrierung von Randparametern erfordern, bis das gesamte Arbeitsziel erreicht ist. Dabei bleibt das Arbeitsergebnis auch mit Assistenzsystemen stark von den Bedienereingaben abhängig.

Teilautomatisierung

Mit dem Ziel einer weiteren Bedienerentlastung liegen beginnend mit den erforderlichen manuellen Eingaben der Assistenzsysteme die Perspektiven in der Teilautomatisierung, denn häufig durchzuführende Arbeitsschritte, die nicht dem eigentlichen Zielprozess dienen, werden häufig vermieden oder umgangen. Beispielsweise werden in der Bedienerassistenz zur Vermeidung von Personenschäden visuelle und akustische Medien in der Bedienerkabine installiert, die die Wahrnehmung gegenüber dem Sichtfeld mittels zugehöriger Sensoren an der Maschinenaußenseite erweitern. Der Bediener wird optisch oder akustisch gewarnt, muss jedoch manuell auf die Gefahrensituation reagieren. In der Teilautomatisierung erfolgt die Arbeitsraumbegrenzung zur Kollisionsvermeidung ebenfalls mittels geeigneter Sensorik, wie Schall oder Optik, jedoch übernimmt eine im Steuergerät implementierte Logik direkt die Ansteuerung der Aktoren ohne das Einwirken des Bedieners abzuwarten. In Folge dessen wird der Arbeitsbereich ohne die manuelle, wie in [60] notwendige, Kalibrierung des Bedieners kontinuierlich begrenzt.

Die aktuellen Möglichkeiten, begrenzende Parameter händisch in der Steuerung vorzugeben sowie der grundsätzliche Trend der Sensorintegration in der Baumaschine, stellt eine wesentliche Voraussetzung und Grundlage der Weiterentwicklung von Systemen zur Arbeitsraumbegrenzung und Kollisionsvermeidung dar. Die Schwerpunkte von Forschung und Entwicklung vieler Assistenzsysteme sind und bleiben dabei die Evaluierung von Sensoren, die für den Bauprozess geeignet sind, die Entwicklung von Algorithmen zur zuverlässigen Objekt- und Prozesserkennung sowie die Entwicklung von baumaschinenspezifischen Algorithmen zur Maschinensteuerung.

Autonomie

Unter gewissen Randbedingungen ist der Einsatz autonomer Baumaschinen denkbar. Der wichtigste Punkt ist sicherlich die Abwesenheit von Menschen im Arbeitsbereich der Maschine, um das Sicherheitsrisiko zu reduzieren. Dadurch wird die technische Komplexität deutlich verringert, da keine Gefährdung für den Menschen besteht. Eine gut strukturierte Umgebung ist ebenso hilfreich um unvorhergesehene Ereignisse zu vermeiden. Technische Voraussetzungen sind eine zuverlässige und performante Kommunikation, leistungsfähige Umgebungssensoren und eine umfassende Kenntnis von Prozess und Maschine für die Prozessplanung. Ob unter diesen Voraussetzungen autonome Maschinen

Bauprozesse schneller, produktiver oder effizienter gestalten und den erheblichen Entwicklungsaufwand rechtfertigen, ist im Einzelfall zu prüfen. Für Spezialaufgaben, welche eine maschinelle und methodische Neuentwicklung erfordern, ist die autonome Maschine jedoch durchaus realistisch. Als Beispiel sind hier die Entwicklung von Beton-3D-Druckmaschinen, Baurobotern oder Abbruchrobotern denkbar [90], [95], [206].

5.9 AUTOMATISIERTE BAUPROZESSE

Hochbau

Vor allem die Notwendigkeit zur Produktivitätssteigerung im Baugewerbe und der schon mehrfach genannte Fachkräftemangel (vgl. Kap. 2.6) führen zu dem Wunsch, Bauprozesse effizienter zu gestalten. Entgegen anderen Industriezweigen, wo die Prozessautomatisierung große Teile der gesamten Wertschöpfungskette bestimmt, spielt sie im Bausektor, wenn überhaupt, bisher nur eine untergeordnete Rolle. Die Gründe dafür wurden in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt. Die Einführung von BIM kann nun die Basis für die Etablierung einer teilweise bis vollständig digitalisierten Prozesskette im Bauwesen darstellen. Dies bietet in einigen Bereichen der Bauindustrie großes Potenzial zur Effizienzsteigerung durch Digitalisierung und Automatisierung.

Der Betonbau mit jährlich mehreren Milliarden m³ Materialumsatz weltweit bietet großes Potenzial für eine Effizienzsteigerung durch die Einführung digitaler Prozesse. Aktuell ist das Bauen mit Beton noch durch einen großen personellen Aufwand und ein eher begrenztes Maß an maschineller Unterstützung gekennzeichnet. Die notwendigerweise verwendeten Schalungen verursachen einen großen Materialbedarf, können teilweise nicht wiederverwendet werden und die Kosten für die Schalungsherstellung können je nach Objekt bis zu 35% der Rohbaukosten ausmachen [284]. Das technologische und wirtschaftliche Potenzial digitalisierter Prozesse beim Betonbau wurde inzwischen von vielen Forschungsstellen und Unternehmen erkannt, was in letzter Zeit zu einem sprunghaften Anstieg der Innovationsaktivitäten auf diesem Gebiet führte [157] [223] [206] [284] [355] [7]. Vor allem der Entwicklung neuer, schalungsfreier Konzepte für den Betonbau wird große Bedeutung beigemessen. Dabei wird das Prinzip der schichtweisen additiven Fertigung auf das Bauwesen übertragen und die in der Industrie üblicherweise verwendeten Kunststoffe oder Metalle werden durch den Baustoff Beton ersetzt. Damit stellt der 3D-Betondruck einen durchgängig digitalen Bauprozess dar, von der Planung des CAD Modells bis zur Produktion des Baukörpers durch eine automatisch agierende Baumaschine (Abbildung 19). Tabelle 4 fasst die aktuell dem Gutachter bekannten, weltweiten Aktivitäten im Bereich des Beton-3D-Drucks überblicksmäßig zusammen. Die Konzepte unterscheiden sich teilweise stark in Ihren Ansätzen. In Ihren Zielen sind sie sich in vielen Punkten jedoch sehr ähnlich. Die wichtigsten Verbesserungen sind:

- Signifikante Senkung der Baukosten und Bauzeit,
- Minimierung des Materialeinsatzes,
- Entlastung der Bauarbeiter,
- Steigerung der Produktivität,
- Verbesserung der architektonischen Gestaltungsfreiheit.

Einige dieser Konzepte sind in Ihrer Entwicklung schon weit vorangeschritten und werden auch schon für den kommerziellen Einsatz angeboten. Erste Demonstrationsgebäude wurden vor allem im asiatischen und arabischen Raum mit großem Medienecho präsentiert [355] [1] [84]. Trotz dieser ersten Erfolge sind in Zukunft aber noch einige Hürden zu überwinden, bis sich diese Technologie in Deutschland etablieren kann. Dabei sind es vor allem die zulassungsrechtlichen Rahmenbedingungen für 3D-gedruckte Gebäude, die künftig zu klären sind. Erst wenn ausreichend Erkenntnisse über die neuen 3D-Druck-fähigen Baustoffe und die daraus entstandenen Baukörper vorhanden sind, wird eine Zulassung gedruckter Bauwerke nach bestehenden oder angepassten Richtlinien möglich sein. Darüber hinaus muss die eingesetzte Maschinentechnik (Druckkopf, Bewegungssystem) zu robusten, baustellentauglichen Gesamtkonzepten weiterentwickelt werden, damit sich die Anschaffungskosten für solch

hochautomatisierte Systeme auch über längere Zeiträume rentieren. Zur Klärung dieser Themen können vor allem Pilotprojekte beitragen, die auf deutschem Boden und nach den hier geltenden Richtlinien ausgeführt werden. Nach erfolgreichem Abschluss dieser Pilotprojekte ist davon auszugehen, dass sich die deutsche Bau- und Baumaschinenindustrie weltweit auf diesem Markt behaupten kann und der 3D-Druck als innovative Bautechnologie den Betonbau der Zukunft maßgeblich prägen wird.

Tabelle 4: Überblick über aktuelle Betondruck-Projekte weltweit

	Projekt	**Land**
1	AMT-Specavia *(https://specavia.pro/)*	RUS
2	Apis Cor: Mobile Construction 3D Printer *(https://www.apis-cor.com/)*	RUS
3	Baumit: Bauminator® *(https://baumit.at/bauminator)*	AUT
4	BeMore3D *(https://bemore3d.com/language/en/home/)*	ESP
5	Bet Abram: P3 House Printer *(https://betabram.com/products.html)*	SVN
6	COBOD: The BOD2 *(https://cobod.com/)*	DNK
7	Contour Crafting Corporation *(http://contourcrafting.com/)*	USA
8	CyBe *(https://cybe.eu/)*	NLD
9	Enrico Dini: D-Shape *(https://d-shape.com/)*	ITA
10	ETH Zürich: DFAB HOUSE *(https://dfabhouse.ch/de/)*	CHE
11	HINDCON *(http://www.hindcon3d.com/)*	ESP
12	Huashang Tengda *(http://www.hstdgm.com/)*	CHN
13	ICON *(https://www.iconbuild.com/)*	USA
14	Imprimere AG: Big 3D Printer *(http://www.imprimere.ch/)*	CHE
15	Indian Institute of Technology Madras / Tvasta *(https://www.tvastagroup.in/3d-construction/)*	IND
16	Institute for Advanced Architecture of Catalonia: Minibuilders *(https://iaac.net/project/minibuilders/)*	ESP
17	Loughborough University: Freeform 3D Concrete Printing *(http://www.buildfreeform.com/index.php)*	GBR
18	Overtec *(https://overtec.com/de/3d-druck)*	AUT
19	PrintStones *(https://www.printstones.eu/)*	AUT
20	Siam Cement Group: Triple S House *(https://www.scgbuildingmaterials.com/th/LivingIdea/ArchitectLifestyle/Y-BOX-Pavilion-21st-C-Cave.aspx)*	THA

21	S-Squared: ARCS *(https://www.sq4d.com/)*	USA
22	Total Kustom: 3D Concrete House Printer *(http://www.totalkustom.com/)*	USA
23	TU Braunschweig: Generative Fertigung *(https://www.tu-braunschweig.de/ite/forschung/nth)*	DEU
24	TU Dresden: CONPrint3D® *(https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/imd/bm/forschung/forschungsschwer-punkte/arbeitsprozesse/b3d/index)*	DEU
25	TU Eindhoven: 3DCP *(https://www.tue.nl/en/research/research-groups/structural-engineering-and-de-sign/concrete-research-areas/3d-concrete-printing/)*	NLD
26	TU München: Additive Fertigung durch Extrusion von Holzleichtbeton *(https://www.tum.de/nc/die-tum/aktuelles/pressemitteilungen/details/34334/)*	DEU
27	US Army, ERDC: Automated Construction of Expedited Structures *(https://www.erdc.usace.army.mil/Media/Fact-Sheets/Fact-Sheet-Article-View/Arti-cle/1290247/automated-construction-of-expedited-structures-aces/)*	USA
28	WinSun *(http://www.winsun3d.com/En/Product/pro_inner/id/1)*	CHN
29	XtreeE: The large-scale 3d *(https://www.xtreee.eu/)*	FRA
30	Yhnova: Batiprint3D *(http://batiprint3d.fr/en/)*	FRA

Abbildung 19: CONPrint3D®: 3D-Betondruck-Verfahren der TU Dresden

Im Bereich des Hochbaus bietet neben den Betondruckverfahren der Mauerwerksbau einiges Potenzial für die Prozessautomatisierung. Dafür wurden schon in den 1980er Jahren erste Prototypen von Mauerwerksrobotern vorgestellt und auch aktuell gibt es einige vielversprechende Entwicklungen [263] [261] [298] [89] [47] [115] [100] [305]. Die immer wiederkehrenden Bewegungsmuster der Mauertätigkeit begünstigen die Automatisierung dieses Arbeitsprozesses. Unter anderem wegen zu hoher

Anschaffungskosten, mangelnder Robustheit der Systeme und geringer Akzeptanz im Bausektor konnten sich die Mauerroboter bisher allerdings nicht durchsetzen. Die wachsende Bereitschaft zum Einsatz innovativer Technologien und die zuvor genannten Treiber (Kapazitätsengpässe [269], [270], Fachkräftemangel [110], Kosteneffizienz, digitale Prozesskette) können den Einsatz solcher Maschinen jedoch in Zukunft begünstigen.

Tiefbau und Straßenbau

Automatisierung ist vor allem dann sinnvoll, wenn gut planbare Arbeitsschritte sich nach klaren Mustern stets wiederholen oder diese über einen längeren Zeitraum kontinuierlich fortlaufen. Ein gutes Beispiel für planbare, kontinuierliche Bauprozesse ist der Asphalteinbau beim Straßenbau. Die eingesetzten Maschinen wie Beschicker, Fertiger und Walzen arbeiten mit relativ geringen Geschwindigkeiten und sind damit zeitlich gut beherrschbar. Die zur Automatisierung benötigten Sensoren und Aktoren sind verfügbar und werden heutzutage teilweise schon eingesetzt. Zur Automatisierung des gesamten Asphalteinbau-Prozesses müssen die einzelnen Arbeitsschritte (Materialanlieferung, Einbau und Verdichtung) optimal aufeinander abgestimmt werden, was mit der Vernetzung und zentralen Steuerung der einzelnen Arbeitsmaschinen einhergeht. Damit können künftig nicht nur Qualität und Haltbarkeit verbessert und die Bauzeit verkürzt werden, sondern die Automatisierung trägt auch zur Verbesserung der Arbeitssicherheit bei, vor allem beim halbseitigen Asphalteinbau bei fließendem Verkehr. Das aktuelle Forschungsprojekt „Straßenbau 4.0“ befasst sich z.B. mit dieser Thematik [52]. Wesentliche Voraussetzung für die Automatisierung des Asphalteinbaus ist allerdings ein tieferes Verständnis des Zusammenwirkens von Material, Maschinen und Umgebung bei diesem Prozess. Bis heute sind die komplexen Zusammenhänge zwischen den zahlreichen, sich gegenseitig beeinflussenden Parametern nur in Ansätzen erforscht und einer vollständigen, modellgestützten Optimierung nicht zugänglich. Dieses Prozessverständnis muss im Rahmen künftiger Forschungsprojekte unter Verwendung moderner Simulationsmethoden ausgebaut werden und in die technische Weiterentwicklung der Automatisierungssysteme einfließen.

Obwohl gerade im Bereich Erdbau einige Randbedingungen gegen eine zunehmende Prozessautomatisierung sprechen (hohe Individualität, unvorhersehbare Einflüsse etc.), gibt es doch Arbeitsprozesse, bei denen in Zukunft Automatisierungslösungen höherer Level (vgl. Kap. 1.2) vorstellbar sind und auch angestrebt werden. Beispielsweise können das Planieren großer Flächen oder das Fräsen langer Gräben als automatisierte Prozesse ausgeführt werden, da in diesen Segmenten ab einer gewissen Baustellengröße gut planbare Randbedingungen herrschen.

Materialumschlag

Ein weiteres interessantes Anwendungsfeld für die Automatisierung wird in Zukunft der Materialumschlag sein. Schon heute existieren praktikable Lösungen für die Vollautomatisierung des Y-Ladespiels von Radladern – allerdings nur als Insellösungen für spezielle Anwendungsbereiche (z.B. [226]). Mit fortschreitender Verbesserung der Sensoren und Algorithmen zur Umfeldüberwachung und Objekterkennung ist der Einsatz autonomer Radlader aber auch auf konventionellen Baustellen denkbar. Sei es rein für die Umschlagarbeit nach dem klassischen Y-Zyklus oder auch zur automatischen Materialbereitstellung. Beispielsweise könnte auf Großbaustellen oder beim Verkehrswegebau über Nacht, wenn alle anderen Arbeiten ruhen und die Störeinflüsse dadurch minimiert sind, Material automatisch zu- oder abtransportiert und dem Bedarf des nächsten Arbeitstages entsprechend bereitgestellt werden. Aktuell schon verfügbare Assistenzsysteme könnten dahingehend weiterentwickelt werden.

5.10 ROBOTIK

Wie bereits in Kapitel 1 erwähnt, weist die Baubranche im Vergleich zu anderen Industriebereichen ein äußerst geringes Produktivitätswachstum auf. Gleichzeitig sind die Kosten für die Errichtung und Sanierung von Gebäuden in den letzten Jahren enorm gestiegen, was sich z.T. in stetig wachsenden Preisen für Miete und Erwerb von Wohnraum widerspiegelt. Einer der Hauptgründe hierfür ist der

nach wie vor geringe Einsatz automatisierter Maschinen und Systeme bei der Errichtung und Sanierung von Gebäuden. Während die industrielle Fertigung heute durch hochautomatisierte Fabriken und Roboter geprägt ist, dominiert im Baugewerbe weiterhin Lohnarbeit. Steigende Lohnkosten sowie zunehmender Fachkräftemangel, welcher sich durch den demografischen Wandel in den nächsten Jahren noch verstärken wird, bedingen höhere Baukosten und Verzug in den Bauabläufen. Dies führt dazu, dass die Bauwirtschaft bereits heute an ihre Auslastungsgrenzen stößt.
Ein weiteres Problem der aktuellen Baubranche sind die latenten gesundheitlichen Gefahrenpotenziale (z.B. Lärm, Staub, Schwingungen), sowie körperlich schwere Tätigkeiten, welche verstärkt zu Berufskrankheiten wie Silikose, Bandscheibenproblemen oder Hypothenar-Hammer-Syndrom führen [48]. Viele Bauarbeiter sind deshalb nicht in der Lage ihren Beruf bis zum vollen Renteneintrittsalter auszuüben. Neben der persönlichen Schädigung entstehen hier auch enorme Belastungen für die Kranken- und Sozialversicherungssysteme.
Eine vielversprechende Möglichkeit, die genannten Probleme zu lösen, stellt der zukünftige Einsatz von Baurobotern dar. Diese können dabei helfen, einzelne Bauprozesse teil- oder vollautomatisiert durchzuführen und somit die Produktivität des Bauwesens maßgeblich zu steigern. Des Weiteren können Roboter schwere, gefährliche, repetitive oder ergonomisch ungünstige Tätigkeiten (z.B. Überkopfarbeiten) übernehmen, was zu einer Entlastung der Arbeiter führt. Durch den Einsatz autonomer oder ferngesteuerter Systeme ist außerdem eine komplette Entfernung menschlichen Personals aus Bereichen mit erhöhter Gefährdung möglich (z.B. AKW-Rückbau) [141].
Historisch gesehen ist die Idee eines Einsatzes von Robotern auf Baustellen nicht neu. Erste Systeme wurden bereits in den 1980er Jahren entwickelt – zuerst in Japan und dann weltweit. Diese Bauroboter der ersten Generation zielten auf eine Substitution einzelner, meist Gewerke bezogener Prozesse, ab (Betonglätten, Streichen, usw.). Bis heute wurden so über 100 verschiedene Prototypen entwickelt und im Baustelleneinsatz getestet [34].

Abbildung 20: Beispiel für eine automatisierte Hochbaustelle [288]

Ein Trend, welcher in den 1990er Jahren aufkam und bis heute vorwiegend auf Japan begrenzt ist, sind die automatisierten Hochbaustellen bzw. sogenannte Feldfabriken [35]. Bei diesen handelt es sich um eine Art mobile Produktionshalle, welche während des Bauablaufes mit dem Gebäude nach oben wandert. Ein Beispiel hierfür ist das Robotersystem SMART vom japanischen Baukonzern Shimizu [322].

Innerhalb einer Feldfabrik wird die für eine hohe Automatisierung notwendige strukturierte Umgebung geschaffen (vgl. Abbildung 20). Es kommen typische Elemente und Prozesse einer industriellen Vorproduktion (z.B. Einsatz von Portalkranen) zum Einsatz. Zu den Prozessen, welche durch das SMART-System automatisiert werden, gehören u.a. das Aufstellen und Schweißen von Stahlrahmen, das Verlegen von Betonbodenbrettern sowie die Montage von Außen- und Innenwänden. Bis heute werden automatisierte Hochbaustellen bzw. Feldfabriken vorrangig in Japan eingesetzt, da diese sich in erster Linie für Hochhäuser mit standardisierter Stahlskelettbauweise eignen. Der in Europa dominierende Bau- und Architekturstil umfasst in erster Linie kleine und mittlere Gebäude mit wenigen Geschossen, sowie ausgefallene Hochhäuser mit zumeist stadtbildprägenden Charakter. Die Einrichtung einer automatisierten Hochbaustelle, wie sie für Hochhäuser mit einfacher Bauform eingesetzt wird, ist hier in den wenigsten Fällen wirtschaftlich.

Mit dem Aufkommen neuer technischer Möglichkeiten (verbesserte Sensoren, kostengünstige Hardware und Software) und einer verstärkten Ausrichtung auf Assistenz- und Service-Robotik, welche den Menschen unterstützen und nicht ersetzen soll, ergeben sich neue Chancen für eine Etablierung und Akzeptanz der Robotik im Bauwesen. Bei näherer Analyse ergeben sich die größten Einsatzpotenziale für Bauroboter in den Bereichen Hochbau, Innenausbau, Installation, Vermessung, Sanierung und Rückbau. Dies spiegelt sich auch in vielen Studien, Prototypen und Produkten wieder, die in den letzten Jahren entstanden sind. Beispiele hierfür sind u.a. Roboter, welche zum Abbruch von Gebäuden [46], zum Bohren [230], zum automatisierten Mauern [89], für 3D-Betondruck [204], zum Fliesenlegen [96], zum Abschleifen von Wänden und Decken[285], für Farbauftrag [11] oder für Vermessungsaufgaben und die Erstellung digitaler Gebäudemodelle [90] eingesetzt werden können. Ein Teil der genannten Systeme ist in Abbildung 21 dargestellt.

In einer Studie vom Fraunhofer IPA wurden bereits 2011 die Potenziale eines Einsatzes von Service-Robotern im Bauwesen untersucht [119]. Der betrachtete Anwendungsfall bezog sich damals auf die Innenausbauassistenz. Die Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, dass Serviceroboter aus wirtschaftlicher Hinsicht eine ernstzunehmende Alternative zur konventionellen Leistungserbringung bieten und zu deutlich besseren Stückkosten produzieren können. Zudem kamen die Forscher zu dem Ergebnis, dass Serviceroboter günstiger als die manuelle Alternative sind, Arbeiter entlasten und das Krankheitsrisiko senken können. Des Weiteren wurden im Rahmen der genannten Studie Forschungsbedarfe identifiziert, welche nach wie vor Gültigkeit besitzen. Hierzu zählen unter anderem die Entwicklung und Verbesserung von Schlüsseltechnologien, wie beispielsweise Roboterarmen mit einem hohen Verhältnis von Tragkraft zu Kinematik-Eigengewicht (ideal 1:1) oder Abstands-Sensoriken für den Klemmschutz, die dynamische kollisionsfreie Bewegungsplanung und die haptische Feinpositionierung von Objekten.

Aktuell finden die meisten Entwicklungs- und Forschungsvorhaben im asiatischen Raum, in den USA, in Norwegen oder in der Schweiz statt. Besonders hervorzuheben ist hierbei die ETH Zürich, welche mit dem 2010 gegründeten „Robotic Fabrication Lab“ [117] eine weltweit einzigartige Forschungseinrichtung in diesem Bereich besitzt. Trotz vieler Forschungsvorhaben in den frühen 1990er und 2000er Jahren spielt Deutschland im Bereich Baurobotik aktuell eine eher untergeordnete Rolle. Dies ist erstaunlich, da eine Vielzahl der deutschen Baumaschinen- und Baugerätehersteller zu den internationalen Marktführern in ihrem Bereich zählt. Bei näherer Analyse können mehrere Ursachen für diesen Umstand ausgemacht werden. Erstens handelt es sich bei den meisten Baurobotik-Unternehmen um Start-Ups, welche sehr agil handeln und den First-Mover-Effekt [183] ausnutzen wollen, um schnell eine Nische zu besetzen. Zweitens sind die meisten dieser Start-Ups das Resultat universitärer Ausgründungen oder langjährig geförderter Forschungsvorhaben. Fehlende Fördermaßnahmen haben dazu geführt, dass Deutschland hier Gefahr läuft den Anschluss an die internationale Konkurrenz zu verlieren.

Langfristig bietet die Entwicklung neuer Baurobotik-Systeme die Chance zum Aufbau eines völlig neuen Industriezweigs, welcher die Führungsposition der deutschen Baumaschinenhersteller sichert und den Wirtschaftsstandort Deutschland stärkt. Hinzu kommt ein beträchtlicher gesellschaftlicher Nutzen, da

Bauroboter das Problem des Fachkräftemangels entschärfen, Bauzeiten verkürzen und die Kosten für die Errichtung eines Bauwerks senken können.

Abbildung 21: Beispiele für bereits existierende Bauroboter [11] [89] [96] [230] [90] [285]

5.11 AKTUELLE FORSCHUNGSPROJEKTE

Nachfolgend werden die aktuellen Forschungs- und Entwicklungsbemühungen im akademischen und industriellen Umfeld aufgeführt. An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass hier nur ein Ausschnitt der gegenwärtigen wissenschaftlichen Aktivitäten skizziert werden kann. Diese stehen vornehmlich repräsentativ für die deutsche Forschungslandschaft, wobei davon auszugehen ist, dass vergleichbare Themen auch international behandelt werden.

BauFlott – Entwicklung eines Flottenmanagementsystems für Baumaschinen

IGF-Vorhaben Nr. 18135 N (01.04.2014 – 31.03.2016)

Zentrale Zielstellung in diesem Forschungsvorhaben ist es, ein Flottenmanagementsystem zu konzipieren, welches die diversen Baumaschinentypen und deren Einsatzarten unterstützt. Hierzu werden erforderliche Daten und Kennwerte für unterschiedlichste Baumaschinen-Typen (Klein-, Beistell- und Leistungsgeräte) abgeleitet, um damit unter logistischen Gesichtspunkten ein baumaschinenübergreifendes Flottenmanagementsystem zu realisieren. Die erarbeitete Technologie kann nach Einschätzung der Antragsteller gewinnbringend in jeder Baufirma genutzt werden. Auch für Maschinenverleihfirmen wird die Nutzung der Baumaschinen transparenter. Einsparpotenziale auch bei gemischten Flotten und Fremdgeräten werden aufgedeckt. Weiterhin können die beteiligten Telemetriehersteller (überwiegend KMU) durch die Forschungsarbeit ihre Produkte auf den Baumaschinensektor ausweiten. Entsprechend profitieren insbesondere Unternehmen der KMU-dominierten Wirtschaftszweige Hoch- und Tiefbau, welche entweder als Baufirma oder als Maschinenverleiher die erarbeitete Technologie einsetzen und somit ihre Verwaltung vereinfachen können. Im Ergebnis des Forschungsprojekts stand ein Demonstrator für ein herstellerübergreifendes Flottenmanagementsystem für Baumaschinen, mit dem der Baumaschineneinsatz besser geplant, gesteuert und überwacht werden kann [322].

SMART SITE – Smarte Technologien für den intelligenten Straßenbau

BMWi „Autonomik für Industrie 4.0“ (01.11.2013 – 31.10.2016)

SmartSite führt Wertschöpfungsketten aus den Bereichen Baumaschinen, Baustellenumgebung und Baustellennetze sowie Bauprozessüberwachung zusammen und vernetzt diese, um wichtige nächste Innovationsschritte auf dem Sektor des Straßenbaus einzuleiten bzw. zu befördern.

Dazu werden die auswertbaren Daten für Umwelt, Baumaschine und Bauprozesssteuerung entlang der gesamten Wertschöpfungskette Straßenbau – von der Mischanlage über die Transportlogistik bis hin zum teilautomatisierten Fertiger und vollautomatisierten Walzenzügen – erhoben und dokumentiert.

Die SmartSite-Plattform führt dabei die Maschinensteuerung mit den 5D-Planungsdaten, den Baugeräte-IST-Daten mit der über Netzwerke angebundenen digitalen, modellbasierten Bauprozesssteuerung zusammen. Ziel ist eine dynamische, bidirektionale und IP-basierte Ende-zu-Ende-Kommunikation zwischen Maschinen und Bauprozesssteuerung. Um dies zu erreichen, müssen die existierenden 5D-Modelle strukturell erweitert und um die Dimension Qualität angereichert werden. Ferner sind Methoden der Integration qualitätsrelevanter Daten in die Maschinensteuerung neu zu entwickeln. Die Bauprozesssteuerung wird unmittelbar mit Daten direkt von der Baustelle versorgt. Die Überwachung der Prozessausführung sowie die Visualisierung erfolgen über Geräte wie SmartPhones und SmartTablets („mobile Cockpit-Lösungen“) – den zukünftigen Arbeitsgeräten der Maschinisten und Bauleiter.

SmartSite entwickelt den Autonomie-Gedanken wesentlich weiter. Hierfür werden neuartige, flexible und offene Plattform-Lösungen für intelligente autonome Baumaschinen („Service Roboter“), intelligente autonome Baustellenumgebungen und Netze („Smart Networks“) sowie intelligente, wertschöpfungssystemweite Bauprozesssteuerung und -überwachung auf Basis dezentraler SmartX-Technologien entwickelt. Dies erfolgt u.a. durch die Erweiterung und Übertragung von Konzepten des Internets der Dinge und Dienste auf Tiefbaustellen.

SmartSite bezieht in die Datenlieferkette vorgelagerte, baustellenexterne Anlagen (Asphaltmischwerke), die Baustellenumgebung („Smart Dust“) sowie externe Daten (u.a. Stauinformationen) mit ein. Dadurch wird eine weit in die Zukunft orientierte Bauprozesssteuerung möglich. Unter Einbezug serviceorientierter sowie Cloud basierter Architekturen und dem Einbezug mobiler Smart-Technologien wird ein ortsunabhängiger Zugriff auf steuerungsrelevante Daten für Mensch und Maschine (Rückkopplung der Daten in die Maschinensteuerung) möglich. Dies setzt intelligente Authentifizierung und Autorisierungsverfahren voraus [172].

IOSB.BoB – Bagger ohne Bediener

Fraunhofer IOSB, Karlsruhe (2017)

Der autonome Bagger IOSB.BoB kann beispielsweise Gefahrstoffe bergen oder kontaminierte Bodenschichten abtragen und stellt ein flexibles Demonstrations- und Entwicklungssystem zum Test skalierbarer Autonomiefunktionen dar.

BIMsite – BIM-gestützte Planung, Simulation und Monitoring von Baustellen

Bayrische Forschungsstiftung (2015 – 2019)

Das Projekt BIMsite setzt an der Schnittstelle zwischen Bauplanung und Bauausführung an. Heute werden zur Informationsübergabe an dieser Stelle gedruckte 2D-Bauzeichnungen übergeben. Dadurch gehen viele bereits digital vorliegende Informationen verloren. Die Planung des Bauablaufs erfolgt entsprechend mithilfe manueller Methoden.

Im Rahmen des Projekts BIMsite soll daher untersucht werden, wie digitale Gebäudemodelle für relevante Fragestellungen in der Arbeitsvorbereitung und während der Bauausführung erweitert genutzt werden können. Dies beinhaltet unter anderem die Ermittlung und Auswahl verschiedener möglicher Bauverfahren sowie die Erstellung von Baustelleneinrichtungsplänen. Ziel des Vorhabens ist es, weitgehend automatisierte Verfahren der Bauablaufsimulation zu entwickeln, um die Planung des Bauablaufs bestmöglich zu unterstützen und eine detaillierte Variantenuntersuchung von Bauverfahren und Baustellenlayouts zu ermöglichen.

Dabei soll zum einen betrachtet werden, welche Anforderungen Gebäudemodelle hinsichtlich Informationsgehalt und Detaillierungsgrad erfüllen müssen, damit eine direkte Weiternutzung möglich ist. Darauf aufbauend sollen in einem weiteren Schwerpunkt modellgestützte Methoden der Baustellensimulation entwickelt werden, die es ermöglichen, Aussagen über Produktivität und Sicherheit der Baustelle zu treffen. Zur Validierung der Prognosemodelle sollen Verfahren des Baustellenmonitorings zum Einsatz kommen, die darüber hinaus dynamische Anpassungen und etwaige Umplanungen während der Bauausführung aufwandsarm ermöglichen [20].

AMMCOA – Autonomous Mobile Machine Communication for Off-Road Applications

BMBF-Projekt (01.04.2017 – 31.03.2020)

Der Betrieb von Land- und Baumaschinen ähnelt immer mehr komplexen Fertigungsprozessen in der Industrie. Dementsprechend hoch sind auch hier die Anforderungen an Effizienz, Präzision und Sicherheit. Automatisiertes – und perspektivisch auch komplett autonomes – Arbeiten ermöglicht eine Optimierung und Intensivierung der Prozesse. Nur Maschinen und Geräte, die solche Konzepte umsetzen, sind wettbewerbsfähig und können auch in der Zukunft zur bedarfsgerechten land- und bauwirtschaftlichen Produktion beitragen. Im Unterschied zum Anwendungsfeld „Automatisiertes und vernetztes Fahren“ im Straßenverkehr sind in Land- und Bauwirtschaft häufig unbefestigte Straßen typisch. Aus Kostengründen sind jedoch abseits jeglicher Wege oft keine digitalisierten Karten verfügbar. Andererseits ist eine sehr genaue relative und absolute Lokalisierung nötig, damit die Maschinen nicht ins benachbarte Feld oder gegeneinander fahren. Um dies möglich zu machen, soll auch bei „Funklöchern“ eine lokale „5G“-Kommunikationsinfrastruktur zur Verfügung stehen, die sowohl autark als auch eingebunden in Mobilfunknetze (und somit bei Bedarf fernkoordiniert) arbeiten kann.

Ziel im Projekt AMMCOA (Autonomous Mobile Machine Communication for Off-Road Applications) ist es, eine mobil mitführbare und infrastrukturlose Vernetzungslösung zu erforschen. Die angestrebte Lösung erfüllt lokal dieselben Anforderungen wie das „5G Taktile Internet“, insbesondere eine sehr niedrige Verzögerungszeit. Sie fügt sich automatisch in bestehende Mobilfunknetze ein und ist somit eine dynamische und bedarfsangepasste Erweiterung des 5G-Netzes. Zusätzlich wird eine integrierte, hochpräzise Lokalisierungslösung entwickelt, die die besonderen Anforderungen in Land- und Bauwirtschaft unterstützt. Zum einen werden kooperative Arbeiten mehrerer mobiler landwirtschaftlicher Maschinen untersucht. Dies stellt ein häufig vorkommendes Szenario im Ackerbau dar. Um etwa Doppelarbeiten und Überdosierungen zu vermeiden, oder das Umladen von Erntegut zu koordinieren, sind eine Maschine-zu-Maschine- bzw. Maschinen-zu-Infrastruktur-Kommunikation sowie eine hochpräzise relative und absolute Ortung notwendig. Im Projekt soll außerdem ein Straßenfertigungsszenario demonstriert werden. Dabei besteht die Herausforderung in der orchestrierten Positionierung der unterschiedlichen Baumaschinen. Basierend auf der Bewegung des Straßenfertigers sollen die anderen Baumaschinen autonom gesteuert werden.
Die zu entwickelnde Lösung soll als bedarfsangepasste, lokale Erweiterung der 5G-Netze von Mobilfunkbetreibern dienen. Ihr Einsatz ist somit nicht nur auf die hier beschriebenen Anwendungsfälle beschränkt: Sie kann auch in Szenarien eingesetzt werden, in denen schnell, gegebenenfalls zeitlich begrenzt und unabhängig von lokalen Netzwerken, eine 5G-artige Vernetzung zwischen Fahrzeugen und örtlich platzierten Maschinen benötigt wird. Das 5G-AMMCOA-Vernetzungskonzept ist somit auch eine Schlüsselkomponente für 5G-zertifizierte Produkte aller Industrieausstatter und Fahrzeughersteller [50].

AsiMAT – Assistenzsysteme zum sicheren und zuverlässigen Verrichten typischer Aufgaben im Tiefbau und im kommunalen Bereich

BMBF-Projekt (2014-2016)

Die Erhöhung der Autonomie von Nutzfahrzeugen scheitert meist daran, dass geltende Sicherheitsstandards nicht erreicht werden. Insbesondere fehlt es an Verfahren zur Umweltperzeption, die ein sicheres und zuverlässiges Arbeiten in hochdynamischen Umgebungen – vor allem in Bezug auf Personen im Arbeitsraum der Maschine – garantieren. Die Projektpartner haben die Entwicklung entsprechender Assistenzsysteme zur Erhöhung der Autonomie von Nutzfahrzeugen als Anwendungsfeld mit hohem wirtschaftlichem Potenzial identifiziert. Als Beispielanwendung für das Projekt sollen ein Mobilbagger und ein kommunales Testfahrzeug untersucht werden. Hierzu sind Sensorsysteme und Verfahren zur Umweltperzeption, zur Lokalisation und zur adaptiven Steuerung der Maschine zu entwickeln. Die größte Herausforderung bei der Realisierung eines solchen Systems stellt die Einsatzumgebung dar. Durch Umwelteinflüsse wie Staub, Niederschlag, wechselnde Beleuchtungsbedingungen oder verrauschte Messwerte müssen innovative, leistungsfähige Perzeptionssysteme entwickelt werden [319].

Autonomer Fahrbetrieb von Nutzfahrzeugen im Off-Road-Bereich am Beispiel des Unimog

EFRE-Projekt (2016-2019)

Das in Kooperation des Lehrstuhl Robotersysteme (RRLab), Fachbereich Informatik der Technischen Universität Kaiserslautern, mit dem CVC und weiteren Industriepartnern beantragte Leitprojekt beschäftigt sich mit der Erforschung der Perzeption und Navigation eines autonom fahrenden Nutzfahrzeugs in rauem Gelände am Beispiel des Unimog. Das RRLab wird sich als erfahrener technologischer Kompetenzträger mit der Entwicklung der technischen Lösungen für das autonome Fahren im Off-Road-Bereich befassen. Besonders soll das Perzeptionssystem erforscht werden, welches die notwendigen Daten für darauf aufsetzende Assistenzsysteme sowie autonome Steuerungen liefert. Dies schließt unter anderem die Erkennung und Bewertung von Wegen sowie die Detektion von statischen und dynamischen Hindernissen ein. Für die Lokalisation sollen probabilistische Verfahren zur Fusion von GPS und hochgenauen Koppelnavigationsverfahren analysiert werden. Um vor allem die ver-

rauschten und fehlerbehafteten Sensormessungen berücksichtigen zu können, soll ein neues biologisch motiviertes Perzeptionskonzept erstellt werden, welches die Berücksichtigung der sich dynamisch ändernden Sensordatenqualität in der Navigation erlaubt und somit eine Plausibilitätseinschätzung der berechneten Inferenzen ermöglicht. Für die Navigation sollen Konzepte für die Wegplanung und für die Adaption der Trajektorien an Gefahrenquellen wie Löchern, Hindernissen, Wegrutschen, Kippen untersucht werden [320].

SAFEGUARD Verbundprojekt: Nutzfahrzeug-Assistenzsystem zur Steigerung des Sicherheitsniveaus auf Basis von Augmented Reality

BMBF-Projekt (2017-2020)

In zahlreichen Wirtschaftsbereichen werden zur Steigerung der Arbeitseffizienz heute Nutzfahrzeuge eingesetzt. So kommen z.B. in der Bauwirtschaft, in der Agrar- und Forstwirtschaft oder dem Transportwesen unterschiedlichste Fahrzeugtypen zum Einsatz, die ihre jeweiligen Aufgaben mit hoher Wirtschaftlichkeit durchführen.

Den deutlichen wirtschaftlichen Vorteilen, die der Einsatz von schweren Nutzfahrzeugen mit sich bringt, steht jedoch eine vergleichsweise hohe Anzahl von schweren Unfällen gegenüber, die durch Aufmerksamkeitsdefizite, konstruktiv bedingte Sichteinschränkungen und weitere Faktoren verursacht werden. Zu den Unfallursachen gehören insbesondere die Sichteinschränkungen des Maschinenführers, welche durch den Sichtbereich einschränkende Maschinenkomponenten oder große Bereiche toter Sichtwinkel entstehen.

Das Ziel des Projektes SAFEGUARD besteht daher in der Entwicklung eines Assistenzsystems für Nutzfahrzeuge, welches auftretende Gefahrensituationen frühzeitig erkennt, den Maschinenführer auf die Gefahr aufmerksam macht und in letzter Instanz aktiv in die Steuerung der Maschine eingreift, um z.B. einen Nothalt einzuleiten. Das SAFEGUARD–System wird im Rahmen des Vorhabens zunächst am Beispiel von Mobilkranen entwickelt und evaluiert. Das System wird hierbei von Grund auf modular und flexibel gestaltet, so dass eine Übertragung auf weitere Baumaschinen und auch andere Nutzfahrzeuggruppen ohne größere Anpassungsarbeiten möglich ist. Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten wird dabei das Konzept des „Design for all“ angewendet. Auf diese Weise vereinfacht das System grundsätzlich für alle Nutzer das effiziente und sichere Führen von Nutzfahrzeugen. Insbesondere ermöglicht es älteren Mitarbeitern, typische sensomotorische Einschränkungen auszugleichen und stellt somit einen Ansatz dar, Maschinenführerarbeitsplätze den Anforderungen des demographischen Wandels anzupassen.

Die Nutzung von AR-Technologien erlaubt es dabei, die Sinneswahrnehmungen der Maschinenführer zu erweitern, ohne dass hierbei ihre unmittelbare Realitätswahrnehmung eingeschränkt wird. Alle diese Schritte müssen in Echtzeit erfolgen, um eine Unterstützung der Maschinenführer in ihrer realen Arbeitsumgebung zu erreichen. Dies stellt hohe Anforderungen sowohl an die hardwaretechnische Vernetzung der verschiedenen Komponenten als auch an die verwendeten softwareseitigen Algorithmen.

Durch die Umsetzung der beschriebenen Projektinhalte wird die Sicherheit von Nutzfahrzeugen deutlich erhöht werden. Gleichzeitig werden die Maschinenführer durch die gezielte Informationsvermittlung in die Lage versetzt, Arbeiten schneller und effizienter durchzuführen [321].

Mustererkennendes Verfahren zur Verdichtungskontrolle und automatischen Bodenarterkennung für Baggeranbauverdichter

BMBF-Projekt (2015-2018)

Ziel des Projektes war es, aus der Interaktion der Anbauverdichterplatte mit dem Boden direkt auf die Bodenart und auf den relativen Wassergehalt des zu verdichtenden Boden zu schließen.

Als zielführend wurden hier maschinelle Lernmethoden basierend auf überwachten Lernalgorithmen, die alle auf denselben klassifizierten Trainingsdaten beruhen, eingesetzt. Während des Verdichtungs-

prozesses stellen sich für jeden Bodentyp charakteristische Merkmale heraus, die durch ein intelligentes Zusammenspiel von Sensortechnik und Maschinensteuerung mit Hilfe geeigneter Mustererkennungsalgorithmen extrahiert und für künftige Verdichtungsprozesse aufbereitet werden, um selbständig durch Nutzung künstlicher neuronaler Netzwerke eine Bestimmung der Bodenart vorzunehmen [220].

Smart Loader /Adaptive Mobile Systeme

Sächsische Aufbaubank (2015 – 2018)

Das Forschungsprojekt verfolgte die prototypische Umsetzung einer smarten Baumaschine. Dabei galt es, die Interaktion zwischen Mensch, Maschine, Prozess und Cloud zu digitalisieren und zu vernetzen.

Als Anwendungsfall wurde die Entwicklung eines teilautomatisierten Radladers herangezogen. Das vielfältige Einsatzspektrum dieser Maschine sowie komplexe, bisher nicht automatisierbare Arbeitsabläufe machen ihn zu einem idealen Demonstrator für den Nachweis der Praxistauglichkeit entwickelter Ansätze. Insbesondere die Reduktion des Bedienereinflusses auf die Effizienz, Produktivität und notwendigen Wartungsintervalle bietet großes Potenzial zur Übertragung der Lösungen in die Wirtschaft.

Ein an der TU Dresden verfügbarer Radlader wurde mit zusätzlicher Rechentechnik ausgestattet, die mit einem Cloud-Dienst kommuniziert. An diesem Rechenzentrum werden sensorisch generierte Daten gesammelt und verarbeitet. Ein virtuelles Maschinenmodell gewährleistet in Echtzeit eine Optimierung der Maschinenparameter sowie die Planung des Arbeitsprozesses. Die rein digitale Ansteuerung der Maschine ermöglicht teilautomatisierte Funktionen, die den Bediener bei eintöniger Arbeit entlasten [306].

CONPrint3D© Ultralight

BMUB Forschungsinitiative ZukunftBAU (06/2017 – 05/2019)

Im Vorhaben wurden die baustofflichen und maschinentechnischen Voraussetzungen für das schalungsfreie, kontinuierliche Bauen mit Schaumbeton geschaffen. Ausgangspunkt der Arbeiten waren die Ergebnisse aus dem mit dem BAUMA-Innovationspreis 2016 ausgezeichneten "Zukunft Bau"-Forschungsvorhaben CONPrint3D© ("Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton" AZ: SWD-10.08.18.7-14.07) [307].

Diese wurden angewendet und erweitert auf:

- die Entwicklung eines Schaumbetons, der
    - pumpbar ist bzw. direkt am Druckkopf geschäumt werden kann,
    - eine ausreichende Grünstandfestigkeit für die schalungsfreie Ausformung aufweist,
    - zum schnellen Erstarren angeregt werden kann,
    - weitgehend raumbeständig erhärtet und
    - im erhärteten Zustand hinreichend tragfähig für konstruktive Anwendungen ist und eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist;
- die Entwicklung eines Druckkopfes;
- die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der neuen Schaumbeton-Drucktechnologie.

digiCON^2 – Digital Concrete Construction

BMBF-Projekt (01/2018 – 12/2019)

Mit einem monolithischen, schalungsfreien und kontinuierlichen 3D-Druckverfahren für Beton sind verschiedene Gebäudestrukturen, wie bspw. Wände, Ausbrüche oder T-Verbindungen herstellbar. Für diese anspruchsvollen Gebäudeelemente wird in der aktuellen Forschung der Prototyp eines Druckkopfes (Hardware) entwickelt und dessen Steuerungsdaten in einer virtuellen Simulationsumgebung erprobt. Diese Technologie ist ein entscheidender Schritt auf dem Weg zur Einführung des 4.0-Konzeptes ins Bauwesen, nämlich von der bereits existierenden digitalen Bauplanung zur digitalen Fertigung.

digiCON² schließt die Lücke der Datenverarbeitung zwischen CAD-Daten, die gemeinsam mit den Stoffdaten als Input in einem BIM-Modell vorhanden sind, und dem physikalischen Bauprozess mit Beton als Output. Im Ergebnis von digCON² wird ein sehr effizienter, flexibler und ressourcenschonender „digitaler“ Bauprozess mit Beton vorliegen [308].

HEAP – Hydraulic Excavator for an Autonomous Purpose

ETH Zürich (2015 – 2019)

HEAP ist ein handelsüblicher Schreitbagger des Herstellers MENZI MUCK vom Typ Menzi Muck M545, welcher derart modifiziert wurde, dass er für einen autonomen Einsatz und ferner zur Teleoperation gerüstet ist. Die Maschine verfügt über neuartige kraftgesteuerte Hydraulikzylinder im Chassis, um sich an nahezu jeden Untergrund anzupassen. Darüber hinaus ist der HEAP mit Sensoren ausgestattet, ohne die ein autonomer Betrieb kaum möglich wäre, wie z.B. LIDAR-Sensoren, IMUs sowie Sensoren zur Positions- und Lageerfassung [95].

BIMDrill – Entwicklung eines robusten Systems zur automatischen Lagebestimmung und Prozessdokumentation für Universalbohrgeräte

AiF ZIM (04/2018 – 03/2020)

Das FuE-Projekt schließt die Verfahrenslücke vom rein mechanischen Bohrprozess zur vollautomatischen, digitalen Echtzeitdokumentation. Damit ist das zu entwickelnde System der erste Baustein in einer Reihe von Entwicklungen auf dem Weg zur vollautomatisierten Technik im Spezialtiefbau.

Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Lage- und Positionserfassung der Bohrlafette in Bereichen mit gestörten GNSS-Signalen (z.B. Tunnel oder Steilwände). Diese wird mithilfe eines neuartigen Messsystems realisiert. Ein vollständig modularer sowie adaptiver Aufbau des Systems ermöglicht dabei die einfache Nachrüst- und Austauschbarkeit unter verschiedenen Bohrgeräten.

Hierzu werden im ersten Schritt die von einer oder mehreren Maschinen erzeugten Daten erfasst, aufgearbeitet, weiterverarbeitet und ausgewertet. Die Entwicklung ebnet den Weg, auch in Zukunft bei steigenden Anforderungen an Zeit- und Kostenmanagement, die Prozesse bezüglich der Qualitätskontrolle, Baustellenmanagement, Kosteneffizienz, Kalkulation und Termintreue optimal zu gestalten [309].

Arbeitsschritte zur Entwicklung des Gesamtsystems:

- Adaptierung von bestehenden Lageerfassungssystemen für Vertikalbohrgeräte zu einem robusten System für die Positionserfassung der Lage des Bohransatzpunktes für Anbaulafetten und kleine Universalbohrgeräte,
- Entwicklung und Erprobung eines Systems zur Messung der verwendeten Bohrparameter,
- Untersuchung verschiedener Datenübertragungs- und Verarbeitungssysteme auf ausreichende Robustheit für den Einsatzfall,
- Modularisierung des Konzeptes, um eine Nachrüstung an vorhandene Bohrgeräte zu ermöglichen,
- Aufbau einer Bohr- und Injektions-Datenbank, um mit den gewonnenen Daten Vorhersagen für zukünftige Projekte zu erstellen.

Bauen 4.0 – Effizienz und Produktivitätssteigerung von Bauprozessen durch Vernetzung und Kommunikation mobiler Maschinen

BMBF-Projekt (07/2019 – 07/2022)

Das Forschungsvorhaben BAUEN 4.0 setzt sich zum Ziel, innovative, leistungsfähige und flexible Maschinen- sowie Kommunikationstechnologien zu erforschen und zu entwickeln, um so insbesondere die mittelständische Industrie in der Umsetzung des Industrie 4.0 Leitgedankens auf der Baustelle zu unterstützen. Die Schnittstellen zu bestehenden oder gerade in der Entwicklung befindlichen digitalen Infrastrukturkonzepten aus den Bereichen Kommunikation, industrielle Fertigung, Verkehr und natür-

lich dem Bauwesen sowie allen weiteren Industrie 4.0 - nahen Feldern sollen hierbei konsequent genutzt und weiterentwickelt werden. Es entsteht eine einheitliche 5G-Architektur in einer heterogenen Baulandschaft, welche anwendungsfallabhängig durch die Nutzung unterschiedlicher Zugangstechnologien die verschiedenen Anforderungen an die drahtlose Vernetzung auf der Baustelle ideal abdeckt. Darauf aufbauend werden Methoden und Lösungsprinzipien zur Einbettung etablierter Industrie 4.0 Standards in den Baustellenkontext entwickelt. So verknüpfen die Projektpartner vorhandene Ansätze aus der BIM-Modellierung und entwickeln die für die Vernetzung notwendigen Verwaltungsschalen und Assets der Netzwerkteilnehmer einer Baustelle. Es bildet die Basis einer unternehmensübergreifenden Kollaboration. Für die Integration des Menschen in die sich dadurch wandelnde Baustellentechnologie entwickelt das Konsortium für Arbeitsmaschinen geeignete Assistenzkonzepte und erarbeitet automatisierungsgerechte Antriebstechnologien [303].

6 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Die Produktivität im deutschen Bauwesen muss massiv steigen, um die gesellschaftlichen Erwartungen in den Bereichen Wohnungs- bzw. Gebäude- und Infrastrukturbau (Bereitstellung von ausreichendem Wohnraum zu vertretbaren Kosten sowie Erhaltung und Ausbau der Infrastruktur als Voraussetzung für Mobilität und Wohlstand) mit den begrenzt verfügbaren Ressourcen erfüllen zu können. Aufgrund der seit einigen Jahren weitgehenden Vollauslastung von Bauindustrie und Baugewerbe ist eine Leistungssteigerung nur durch Produktivitätssteigerung oder durch weiteren Aufbau von Kapazitäten möglich. Kapazitätsaufbau ist wegen begrenzter personeller Ressourcen und unzureichender Arbeitsplatzattraktivität im Bauwesen schwierig, außerdem erfordert ein solcher Kapazitätsaufbau eine gewisse Planungssicherheit für die Unternehmen, die derzeit nicht gegeben ist.

Somit liegt in der **Produktivitätssteigerung** von Baumaschinen und Bauprozessen ein wesentlicher Hebel zur Ausweitung und Beschleunigung von Bauleistungen. Dementsprechend sollten insbesondere solche Maßnahmen gefördert werden, die eine positive Wirkung auf die Produktivität erwarten lassen.

Grundsätzlich sollte sich jede Förderung, ob Forschungs-, Unternehmens- oder Projektförderung, aus Sicht der Verfasser weniger an aktuell modernen Begriffen (Buzzwords) wie „Digitalisierung“, „Künstliche Intelligenz“, „Big Data“ oder „BIM“ orientieren. Denn diese Technologiefelder bieten zwar enormes Potenzial, sollen aber kein Selbstzweck sein, sondern das Bauwesen einem übergeordneten Ziel näherbringen. Daher sollten die übergeordneten Ziele bzw. der wirtschaftliche und/oder gesellschaftliche Nutzen bei der Ausschreibung von Förderprogrammen stärker in den Blick genommen werden, beispielsweise die Steigerung von

- Arbeitssicherheit,
- Umweltverträglichkeit,
- Produktivität und
- Wettbewerbsfähigkeit.

Maßnahmen mit Fokus auf Produktivität und Wettbewerbsfähigkeit stärken letztlich neben dem Bauwesen auch die technologisch orientierten Maschinenhersteller und damit besonders die deutsche Baumaschinenindustrie mit ihren rund 40.000 direkten Beschäftigten.

6.1 FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Die weitere Verbreitung von automatisierten Baumaschinen und Bau-Robotik erfordert noch erhebliche Anstrengungen der Forschung. Insbesondere anwendungsorientierte Forschungsprojekte sind notwendig, um die zahlreichen vielversprechenden Lösungsansätze, die im vorliegenden Gutachten angesprochen wurden, in reale Maschinen und Prozesse zu überführen (vgl. 6.10). Auf einige technologische Schwerpunkte wird weiter unten noch eingegangen, an dieser Stelle geht es um die Verbesserungspotenziale der anwendungsnahen Forschung in Zusammenarbeit zwischen Forschungsstellen und Unternehmen.

Es gibt bereits zahlreiche Förderinstrumente der Bundesministerien, teilweise auch regionale Programme, die für die Forschung im Bereich Baumaschinen zugänglich sind. Übernationale Programm wie z.B. das Europäische „Horizon 2020“ werden hier nicht in die Betrachtung einbezogen. Der Gutachter nutzt dieses Programm nicht, da es durch geringe Erfolgswahrscheinlichkeit und unverhältnismäßigen Beantragungsaufwand geprägt ist.

Nach Einschätzung des Gutachters weist die Forschungsförderung – trotz grundsätzlich gut funktionierender Ausgestaltung – noch einige Verbesserungspotenziale auf:

- Die für den maschinentechnischen und industriellen Forschungsbereich existierenden Programme zur Förderung von FuE-Projekten werden vorwiegend vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) ausgegeben. Hierbei handelt es sich in der Regel um themenoffene Förderprogramme. Beim BMBF widmen sich diese der Innovationsförderung bzw. Förderung der High-Tech-Strategie, wobei Naturwissenschaf-

ten und angewandten Ingenieurwissenschaften, wie Maschinen- und Anlagenbau oder Elektrotechnik und Informationstechnik, im Fokus sind. Die Förderprogramme des BMWi adressieren vornehmlich die Entwicklungsarbeiten des deutschen Mittelstands sowie Forschungs- und Entwicklungsarbeiten hinsichtlich neuer Technologien, Energie und Nachhaltigkeit.
Innerhalb des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat (BMI), hier speziell durch das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), werden Fördermittel explizit für Bautechnische Entwicklungen sowie FuE-Tätigkeiten im Hinblick auf Stadtentwicklung und Wohnungsbau bereitgestellt.
Die Förderprogramme von BMBF und BMWi umfassen gemeinsam ein Budget von rund 1,3 Mrd. EUR p.a., das BMI stellt lediglich rund 108 Mio. EUR p.a. für die genannten Forschungsbereiche bereit. Für technologische Entwicklungen im Bauwesen, wozu Bauverfahren ebenso zählen wie Baumaschinen, stehen folglich nur rund 10% der finanziellen Mittel zur Verfügung [51].
Angesichts der enormen Bedeutung des Bauwesens für gesellschaftlich relevante Fragestellungen, wie bezahlbaren Wohnraum oder funktionierende Infrastruktur, ist – nach Einschätzung des Gutachters – das Volumen der Forschungsförderung im Bereich Bau und Baumaschinen erstaunlich gering, es gibt relativ wenig Förderprogramme mit direktem Bezug zum Bauwesen (positives Beispiel ist das Programm „Zukunft Bau“). Die Automatisierung von Baumaschinen und Bauprozessen beinhaltet ein außerordentlich großes Potenzial hinsichtlich Qualität, Termintreue, Kosten und Sicherheit, sodass hier viel mehr investiert werden müsste. Insbesondere die interdisziplinäre Forschung im Spannungsfeld Bauprozess – Baumaschine – Mensch müsste deutlich stärker gefördert werden, als dies bisher der Fall ist.

- Die Durchgängigkeit von der Grundlagenforschung über vorwettbewerbliche Forschung bis zur anwendungs- und produktnahen Forschung ist nicht gegeben, vor allem endet die Förderung in der Regel deutlich vor der Marktreife eines Produktes bzw. einer Lösung. Zur Orientierung kann hier die Definition des „Technology Readiness Level“ (TRL) genutzt werden, eine Forschungsförderung im Bereich TRL 7 oder höher ist in der Regel nicht vorgesehen. Dazu kommt, dass Projektförderungen oft nicht ineinandergreifen, für die Realisierung von Folgeprojekten fehlt meist das passende Förderprogramm. Das führt dazu, dass die in einem Projekt erarbeiteten Lösungsansätze (die ja in der Regel noch nicht in einem marktreifen Produkt enden) nach Abschluss eines Projektes nicht weiterverfolgt werden und „in der Schublade verschwinden“. Für die Unternehmen (insbesondere KMU) ist das Projektergebnis oft noch zu weit weg vom verkaufsfähigen Produkt und der Weg dahin zu unsicher. Die Weiterentwicklung durch die Forschungsstellen ist aber auch nicht möglich, weil das Ergebnis des vorherigen Projektes aus Sicht der Fördermittelgeber schon zu nah am Produkt ist. Insofern ergibt sich hier oft eine Lücke, die dazu beiträgt, dass viele gute Lösungsansätze aus Forschungsprojekten den Schritt in die Realität nicht schaffen.
- Viele Förderprogramme fokussieren auf Projekte unter Beteiligung von kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU). Das ist generell sicher richtig, nur ist die überwiegend anzuwendende, auf EU-Regelungen basierende Definition eines KMU (max. 250 Mitarbeiter, max. 50 Mio. EUR Umsatz oder 43 Mio. EUR Bilanzsumme, jeweils einschließlich verbundener Unternehmen) so eng gefasst, dass für sehr viele Unternehmen mittlerer Größenordnung keine Fördermöglichkeit gegeben ist. Aus eigenen Mitteln können diese Unternehmen aber auch keine nennenswerte Forschungsfinanzierung leisten. Unternehmen, die unterhalb der Grenzen der KMU-Regelung liegen, können oft trotz Förderung keine Beteiligung an Forschungsprojekten leisten, weil sie voll auf ihr Tagesgeschäft fokussiert sind und über keinerlei Entwicklungsressourcen verfügen. Der „größere Mittelstand“ (z.B. in der Größenordnung bis wenige 1.000 Mitarbeiter), der durchaus an gemeinsamen Forschungsaktivitäten in gewissem Umfang interessiert ist und sich bei entsprechender Förderung an Projekten beteiligen würde, fällt mit der o.g. KMU-Begrenzung aus der Förderung weitgehend heraus. Damit bleiben viele Chancen erfolgreicher Forschungskooperation zwischen Forschungsstellen und größeren Mittelstandsunternehmen ungenutzt.
- Der Umfang an förderfähigen Sachmitteln ist in den Förderprogrammen meist sehr begrenzt. Gerade in der anwendungsnahen Baumaschinen-Forschung stellt dies ein großes Hindernis bei der Überführung von Forschungsergebnissen in praktische Anwendungen dar, weil oft keine Demonstratoren im Rahmen des Projektes gefördert werden. Gerade die sehr praxisorientiert denkenden

Unternehmen aus dem Bereich Bau und Baumaschinen vertrauen aber nicht auf Forschungsergebnisse, die in Form von Berichten, Präsentationen und Animationen dargestellt werden, sondern wollen ein Forschungsergebnis „erleben“ oder zumindest „sehen“.

Empfehlung: Das Volumen der Forschungsförderung zugunsten des Bauwesens sollte deutlich ausgeweitet werden. Ein Schwerpunkt sollte hier im Bereich anwendungsnaher Forschung in Kooperation zwischen Forschungsstellen, Maschinenherstellern und Bauunternehmen (bevorzugt ohne KMU-Begrenzung) liegen. Inhaltliche Schwerpunkte müssten unter Berücksichtigung der aktuellen Problemlagen die Bereiche Wohngebäude- und Infrastrukturbau sein. Konkrete Vorschläge mit Bezug zum Thema des Gutachtens sind in Kap. 6.10 benannt.

Empfehlung: Die KMU-Grenze (250 Mitarbeiter, 50 Mio. EUR Umsatz oder 43 Mio. EUR Bilanzsumme) sollte deutlich nach oben verschoben werden, so dass auch etwas größere Mittelstandsunternehmen sich an geförderten Projekten beteiligen können. Denkbar wären auch z.B. zwei Kategorien von KMU, mit jeweils unterschiedlicher Förderquote. Dies wäre gerade im Rahmen der ZIM-Förderung (ZIM: Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand) hilfreich, da es sich hierbei um ein verhältnismäßig schnelles und unkompliziertes Programm handelt – ganz im Sinne der mittelständischen Unternehmen, bisher aber nur von kleinen Unternehmen nutzbar.

Empfehlung: Die Programme der Forschungsförderung sollten stärker berücksichtigen, dass praxistaugliche Ergebnisse meist nicht in einem einzigen isolierten Forschungsprojekt erreicht werden, sondern mehrere aufeinander aufbauende oder sich ergänzende Projekte erfordern. Die Förderung von Folgeprojekten sollten daher stärker in den längerfristig orientierten Förderprogrammen verankert vorgesehen werden.

Empfehlung: Es könnte ein spezielles Förderprogramm für marktnahe Forschungsprojekte geschaffen werden, welches zur Überführung von Projektergebnissen in marktreife (oder marktnahe) Produkte in Kooperation von Forschungsstellen und Unternehmen dienen könnte. Vorgesehen ist hierfür nach Verständnis des Gutachters das themenoffene Programm „VIP+“ des BMBF[23]. Allerdings ist auch in diesem Programm die Erfolgsaussicht so gering, dass viele Forscher von einer Beantragung absehen. Evtl. könnte durch Ausbau des Programmes die Situation am Übergang vom Forschungsergebnis zum Produkt positiv beeinflusst werden.

Empfehlung: In Förderprogrammen mit dem Ziel anwendungsnaher Forschung sollten neben den Personalausgaben stärker auch Sachausgaben gefördert werden, um die Realisierung von Demonstratoren zu ermöglichen. Die Verfügbarkeit solcher Demonstratoren, Versuchsmaschinen oder sonstigen Versuchseinrichtungen an der Forschungsstelle ist oft Voraussetzung für weiterführende Forschungsarbeiten. Praxisnahe Umsetzungsprojekte bieten im Anschluss auch die Möglichkeit für Ausgründungen (Start-Ups) oder die Etablierung von Unternehmen und Technologien mit internationaler Konkurrenzfähigkeit in Deutschland.

6.2 INTERDISZIPLINÄRE VERSUCHS- UND DEMONSTRATIONSZENTREN

Wie zuvor schon beschrieben, sind die finanziellen Möglichkeiten zur Realisierung von Demonstratoren in Forschungsprojekten wegen der begrenzten Sachmittel oft nicht gegeben, genau dies wäre aber erforderlich, um den nächsten Schritt, nämlich die Umsetzung in marktfähige Maschinen und Prozesse, anzuschieben. Dazu bedarf es in den meisten Fällen auch noch einer geeigneten Versuchsfläche. Gerade in diesem Bereich sind die aktuellen Möglichkeiten der Forschungsstellen meist nicht ausreichend.

[23] https://www.bmbf.de/de/vip-technologische-und-gesellschaftliche-innovationspotenziale-erschliessen-563.html

Empfehlung: Um die Praxistauglichkeit innovativer Lösungen unter realitätsnahen Bedingungen testen und gegenüber interessierten Unternehmen präsentieren zu können, sollten regional (in räumlicher Nähe zu den maßgeblichen Forschungsstellen) Versuchs- und Demonstrationszentren entstehen. Diese Zentren könnten als ausgelagerte Stützpunkte der Forschungsstellen den Bau und die Inbetriebnahme der Demonstratoren, die Versuche unter Baustellenbedingungen (einschließlich Errichtung von Demonstrations-Bauobjekten) und die Präsentation im Rahmen von Veranstaltungen für interessierte Bauunternehmen, Maschinenhersteller und sonstige am Bauprozess beteiligte übernehmen. Durch interdisziplinäre Aufstellung dieser Versuchs- und Demonstrationszentren würde die durchgängige Betrachtung der gesamten Prozesskette und damit die Praktikabilität und Wirtschaftlichkeit der Ergebnisse sichergestellt werden. Gleichzeitig würden die Zentren auch als Inkubator für Start-ups im Umfeld Baumaschinen und Bauprozesse wirken (Gründerzentren).

6.3 REGULIERUNG, NORMUNG UND STANDARDISIERUNG

Ein wesentlicher Baustein für die Etablierung nachhaltiger Automatisierungslösungen in der Bauwirtschaft und insbesondere im Bereich der Baumaschinen ist die übergeordnete Festlegung auf definierte Standards. Besonderer Handlungsbedarf ergibt sich bei der Standardisierung und Normierung digitaler Datenformate, Datenschnittstellen, Kommunikationsprotokolle und Mensch-Maschine-Schnittstellen (HMI). Aktuelle Diskussionen zeigen, dass die Überwachung heterogener Maschinenflotten für den Betreiber momentan praktisch unmöglich oder mindestens unverhältnismäßig aufwändig ist. Ein Grund hierfür ist die Vielzahl herstellerspezifischer Telemetrie- und Cloud-Lösungen, welche untereinander weitestgehend inkompatibel sind.

In der Norm ISO 11873 ist die Standardisierung des Datenaustauschs zwischen Maschinen und Anbaugeräten im Bereich der Agrar- und Forsttechnik seit 2015 geregelt. Neben den genannten Anwendungsbereichen wird dieser Standard teilweise auch bei einigen wenigen Baumaschinen-OEM umgesetzt, jedoch nicht mit einem vergleichbaren Effekt. Dies wäre erst dann der Fall, wenn sich weitere Anbaugerätehersteller und OEM hier beteiligen würden.

Die zur Standardisierung auf Basis freiwilliger Vereinbarungen initiierte Arbeitsgruppe „Machines in Construction 4.0“ im VDMA Fachverband Baumaschinen und Baustoffanlagen hat sich u.a. zum Ziel gesetzt, herstellerübergreifend ein einheitliches Verständnis der von den Maschinen gelieferten Daten zu schaffen. Betrachtet werden in einem ersten Schritt reine Maschinendaten wie z.B. an/aus, Betriebsstunden, Kraftstoffverbrauch etc. Hierzu versuchen Experten in sieben Maschinenclustern herstellerübergreifende Festlegungen zu Dateninhalten, Datenformaten und Übertragungsschnittstellen zu treffen. Ob dies – trotz der teilweise gegenläufigen Interessen der Maschinenhersteller – gelingt, ist noch offen.

Parallel gibt es vergleichbare Aktivitäten auch auf Seiten des Branchenverbandes VDBUM. Dort wird versucht, den bereits bestehenden, aber für die Komplexität der Baustellen und der Baumaschinen nicht ausreichenden, Standard ISO 15143-3 auszubauen.

Ein Grundproblem der Standardisierung durch Normungsgremien (DIN, ISO) ist die Tatsache, dass die Entwicklung der Normen meist sehr langwierig ist. Diese Normung kann mit dem immer schnelleren technischen Fortschritt nicht mithalten, so dass die Regelung einer Norm durchaus die weitere Entwicklung bremsen können. Ein Beispiel: Für sog. Schnellwechsler, die meist die Schnittstelle zwischen einem Bagger und verschiedenen Anbaugeräten darstellen, ist vorgeschrieben, dass der Bediener per Sichtkontrolle die Verriegelung prüft. Diese Forderung wird nicht konsequent befolgt, weil der Bediener dazu aus der Kabine aussteigen muss und Zeit „verliert“. Bei Nichteinhaltung der Vorgabe haftet der Betreiber für Schäden, die aus einer unzureichenden Verbindung entstehen. Es gibt bereits eine technische Lösung, nämlich die Überwachung des Verriegelungszustandes durch Sensorik und Anzeige im Display innerhalb der Kabine. Aber: solange die Norm unabhängig von dieser technischen Lösung eine Sichtkontrolle direkt am Schnellwechsler fordert, ergibt sich aus der technischen Lösung kein Mehrwert für den Betreiber. In diesem Fall wäre es sinnvoll, die Normung dahingehend zu erweitern,

dass auch eine sensorische Überwachung zugelassen wird, wobei dann ein bestimmtes Zuverlässigkeitsniveau für die Sicherheitseinrichtung vorgegeben werden könnte. Aber wegen der Langwierigkeit des Normungsprozesses bleibt die sensorische Lösung in ihrer Marktwirkung eingeschränkt.

Ein weiteres Problem auf dem Feld der Regulierung, Normung und Standardisierung ist die Tatsache, dass Verantwortungs- und Haftungsfragen für automatisierten und autonomen Betrieb von Baumaschinen bisher fehlen. Nach Kenntnis der Gutachter und der befragten Experten ist es weiterhin unklar, wer für Sach- und Personenschäden, resultierend auf einem Fehler der automatisierten Maschine, haftet: der Maschinenbetreiber oder der Maschinenhersteller?

Ebenfalls problematisch ist es, wenn bei der Regelsetzung keine ausreichende Sachkenntnis über die Randbedingungen im Baustellenumfeld oder über den verfügbaren Stand der Technik einfließt. So wurde in den Experten-Interviews auf Vorgaben im Zusammenhang mit dem Asphalteinbau verwiesen, die eine Temperaturmessung während des LKW-Transportes vorschreiben, obwohl dafür zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der Vorgabe keine entsprechende technische Lösung am Markt verfügbar war. Daher sollte bei der Regelsetzung immer, egal auf welcher Ebene eine solche stattfindet, auf die ausreichende Einbindung praxisrelevanter fachlicher Expertise geachtet werden. Eine Zusammenarbeit mit den relevanten Verbänden ist daher zu empfehlen.

Empfehlung: Standardisierungsbestrebungen auf verschiedenen Ebenen mit dem Ziel einheitlicher Datenformate, Schnittstellen und Kommunikationsprotokolle sind zu befürworten und zu unterstützen. Der (internationale) Normungsprozess ist in diesem Zusammenhang sicher wichtig, allerdings in der Regel sehr langwierig und durch Kompromisse auf dem „kleinsten gemeinsamen Nenner“ geprägt. Bei der Regelsetzung durch Gesetzgeber und Behörden kommt hinzu, dass diese oft mit begrenzter Sachkenntnis erstellt werden und dementsprechend in der Praxis kaum umsetzbar sind. Branchenverbände wie der VDMA, der VDBUM oder der VDI könnten hier zu schneller wirksamen und in der Praxis umsetzbaren Ergebnissen kommen.

Grundsätzlich sollte bei Regelsetzungen darauf geachtet werden, dass

- die Erfahrung der in der Praxis beteiligten Akteure (idR. durch deren Verbände) ausreichend berücksichtigt wird,
- keine Lösungen vorgeschrieben werden, die noch gar nicht als Stand der Technik am Markt verfügbar sind,
- die Erarbeitung der Standards so schnell erfolgt, dass ihr Inhalt nicht bei Veröffentlichung schon durch die technologische Entwicklung schon wieder überholt ist.

Empfehlung: Die Entwicklung herstellerunabhängiger Daten- und Schnittstellenspezifikationen bildet die Grundvoraussetzung für effiziente Flottenmanagementsysteme, eine sicherere Lieferkettenüberwachung, praktikable Predictive Maintenance Lösungen, verlässliche M2M-Kommunikation und kollaborierende Baumaschinen. Daher sollten Standardisierungsbestrebungen wie das vom VDMA initiierte Gremium MiC 4.0 (Machines in Construction 4.0) unterstützt werden, insbesondere solche, die auf freiwilliger Basis durch Vereinbarung zwischen den maßgeblichen Herstellern beruhen.

Empfehlung: Die aktuell laufenden Standardisierungs-Bestrebungen seitens des VDMA (MiC 4.0 – Machines in Construction 4.0) und des VDBUM sollten zusammengeführt werden, um die Gefahr der Entwicklung konkurrierender Standards zu vermeiden. Bauwirtschaft und Maschinenhersteller brauchen ein gemeinsames Verständnis der auszutauschenden Daten, dieses kann nur von allen Beteiligten gemeinsam erarbeitet werden.

Empfehlung: Neben den standardisierten Daten- und Schnittstellenspezifikationen werden auch dezentrale Datenmarktplätze (z.B. auf Basis der Distributed Ledger Technologie) benötigt, über welche die Maschinen- und Prozessdaten zwischen den Beteiligten nach zu vereinbarenden Regeln ausgetauscht werden. Aktuell verfolgen diesbezüglich viele Maschinenhersteller ihre eigenen Wege, es gibt

also eine große Anzahl von Hersteller-Portalen. Nachdem der Druck der Betreiber mit ihren heterogenen Maschinenparks in jüngster Zeit massiv zugenommen hat, öffnen die Hersteller ihre Portale neuerdings auch für Maschinen anderer Hersteller. Das ist aber keine zielführende Lösung, da Hersteller A die Daten seiner Maschinen verständlicherweise nicht freiwillig über ein Datenportal des Herstellers B senden wird. Zur Lösung dieser Situation werden unabhängige Portale von Drittanbietern (Dienstleister, unabhängig von Bauunternehmen und Maschinenherstellern) benötigt. In diesem Bereich ergeben sich auch Chancen für die Neugründung von Unternehmen, die unterstützt werden sollten. Erste Start-ups sind in diesem Bereich bereits gegründet (z.B. CORRUX[24], TOOLSENSE[25]) aber auch bereits etablierte Anbieter beginnen sich auf diesem Feld zu betätigen (z.B. PROEMION[26], BOSCH MOBILITY SOLUTIONS[27]).

Empfehlung: Die Haftungsfragen beim Betrieb von automatisierten und autonomen Baumaschinen müssen möglichst eindeutig geklärt werden, wenn eine weitere Verbreitung automatisierter Baumaschinen erreicht werden soll. Solange diese Frage offen ist und als Risiko über allen Beteiligten schwebt, werden sich viele Akteure bei der Umsetzung automatisierter Lösungen zurückhalten.

6.4 PRODUKTSICHERHEIT UND ARBEITSSCHUTZ

Baustellen sind, trotz aller Vorschriften und Sensibilisierung der beteiligten Personen, ein Unfallschwerpunkt. Wesentliche Gründe sind die Unübersichtlichkeit und die ständige Veränderung der Baustellenumgebung, die (oft unkoordinierte) Zusammenarbeit vieler Akteure, das Hantieren mit großen und schweren Objekten und Maschinen und die Anwesenheit vieler Personen, teilweise auch unbeteiligter und weniger aufmerksamer Passanten. Durch fortschreitende Automatisierung können einerseits Gefahrensituationen automatisch erkannt und vermieden werden, auf der anderen Seite können aber durch komplexe Funktionen, Assistenzsysteme und automatisierte Betriebszustände auch neue Gefahren entstehen. Daher muss neben der Begeisterung für neue technologische Möglichkeiten immer auch das Ziel der Risikominimierung im Auge behalten werden.

Empfehlung: Es sind derzeit keine Förderprogramme bekannt, die auf die Entwicklung technischer Maßnahmen zur Vermeidung von Unfällen im Umgang mit Baumaschinen zielen. Aus Sicht des Gutachters wäre ein solches Programm zu empfehlen, um die Möglichkeiten der neuen Technologien im Sinne von Produktsicherheit und Arbeitsschutz nutzbar zu machen.

Empfehlung: Das Risiko der Personengefährdung sinkt nicht nur durch technische Maßnahmen (automatisierte oder unterstützende Systeme zur Gefahrenbereichsüberwachung und Kollisionsvermeidung), sondern auch mit zunehmender Qualifikation und Sensibilisierung der beteiligten Personen. Daher ist gerade im Zusammenhang mit den Themen Produktsicherheit und Arbeitsschutz besonderer Wert auf die Qualifikation bzw. Qualifizierung der beteiligten Personen zu legen (z.B. Baugeräteführerschein, vgl. Kap. 6.5).

Empfehlung: Wie in Kap. 2.10 bereits ausgeführt, könnte auf zugangsbeschränkten Baustellen eine Reduzierung der Personengefährdung erreicht werden, wenn alle Personen verlässlich mit Funksendern ausgestattet und entsprechende Meldesysteme eingerichtet wären. Dann könnte beispielsweise ein Baugeräteführer immer erkennen, ob und wo sich im Umfeld seiner Maschine gerade Personen aufhalten. Hier müssten die regulatorischen Vorgaben (Datenschutz) entsprechend geschaffen oder angepasst und an der Akzeptanz aller Beteiligten gearbeitet werden, an technologischen Hürden

[24] https://corrux.io/de
[25] https://toolsense.io/
[26] https://www.proemion.com/de
[27] https://www.bosch-mobility-solutions.de/de/

würde eine solche Lösung vermutlich nicht scheitern. Denkbar wären in diesem Zusammenhang z.B. Modellversuche auf einigen Großbaustellen, mit begleitender statistischer Auswertung der Unfallzahlen und der Systemzuverlässigkeit.

6.5 ARBEITSMARKT BAU, AUS- UND WEITERBILDUNG

Der Einsatz autonomer Baumaschinen, die keinen Geräteführer mehr benötigen, wird sich auf absehbare Zeit auf wenige Anwendungsbereiche beschränken. Automatisierungslösungen können daher zwar zu einer gewissen Entlastung hinsichtlich des Personalmangels beitragen, es werden aber weiterhin qualifizierte Fachkräfte für Betrieb und Instandhaltung der Baumaschinen benötigt. Dabei werden allerdings die Qualifikationsanforderungen aufgrund der zunehmenden Komplexität der Maschinentechnik massiv steigen. Für einen effizienten und sicheren Umgang mit neuen Maschinen und Bauprozessen sowie eine hohe Akzeptanzbildung bei den Baugeräteführern und weiteren Bauprozessbeteiligten ist es wichtig, neue Technologien, Maschinentypen und Funktionen so früh wie möglich in Ausbildungs- und Qualifizierungsmaßnahmen zu integrieren.

Empfehlung: Dies verlangt nach erweiterten Aus- und Weiterbildungskonzepten und mit dem nötigen Equipment ausgestatteten Kapazitäten an den überbetrieblichen Ausbildungszentren (ÜAZ) für Baugeräteführer, exemplarisch seien hier das Überbetriebliche Ausbildungszentrum Glauchau[28] und das Aus- und Fortbildungszentrum Walldorf[29] [243] genannt. Neben aktueller Maschinentechnik umfasst dies auch moderne Ausbildungsmittel wie Interaktive Simulatoren und Blended Learning Methoden. Diese unterstützen sowohl den Umfang als auch die Qualität der Ausbildung, da sie ein realitätsnahes Training als Vorstufe zum Training auf kapitalintensiven realen Maschinen ermöglichen. Außerdem können an Interaktiven Simulatoren auch neue und besonders kritische Situationen trainiert werden, was an der realen Maschine oft mit einem nicht unerheblichen Risiko für Mensch und Maschine verbunden ist.

Empfehlung: In Zusammenarbeit mit der Bauwirtschaft und den Ausbildungsträgern sollte das Thema „Baugeräteführerschein“ durch bundeseinheitliche Regelungen gelöst werden (vgl. 2.6). Nach Einschätzung der Gutachter ist die Bereitschaft bei allen Beteiligten vorhanden, sich über die obligatorische Einführung einer Zugangsvoraussetzung für das Führen größerer Baumaschinen zu verständigen. Die bisherige Situation, in der ohne jegliche formale Qualifikation Maschinen mit erheblichem Gefährdungspotential auf Baustellen betrieben werden dürfen, ist aus Sicht des Gutachters nicht vertretbar. Das Minimalziel eines solchen Führerscheins sollte darin bestehen, dass sich jeder Bediener einer Baumaschine bewusst ist, welche Gefährdungen von der Maschine ausgehen, wie er selbst präventiv zur Minimierung der Gefährdungen beitragen kann und wie er sich in kritischen Situationen verhalten muss. Wirtschaftlicher Nebeneffekt, wenn auch nicht eigentliches Ziel eines Führerscheins, wäre vermutlich eine verbesserte Produktivität beim Maschineneinsatz, zumindest bei der Bedienung durch weniger erfahrene Personen und wechselnden Maschinen.

Empfehlung: Neben der Bedienung von Baumaschinen verändert sich mit dem technologischen Wandel auch die Instandhaltung der Maschinen durch zusätzliche elektrische und steuerungstechnische Komponenten sowie durch völlig neuartige Antriebssysteme und -komponenten. Damit verbunden ist eine deutliche Ausweitung der notwendigen Qualifikationen: die Fähigkeiten in den Bereichen Mechanik und Hydraulik werden weiterhin benötigt, zusätzlich müssen jetzt aber Kenntnisse in den Elektro- und Steuerungstechnik sowie Leistungselektronik vermittelt werden. Die Ausbildungsinhalte müssen

[28] https://www.bau-bildung.de/glauchau/
[29] https://www.biw-bau.de/ueber-uns/kontakt/aus-und-fortbildungszentrum-walldorf/

parallel zur technologischen Weiterentwicklung regelmäßig angepasst werden. In diesem Zusammenhang sollten sowohl die Ausbildungsbetriebe als auch die entsprechenden schulischen Einrichtungen gefordert und unterstützt werden.

Empfehlung: Das Berufsbild des Baugeräteführers und anderer baustellennaher Berufe wird sich durch Digitalisierung und Automatisierung der Maschinen und Prozesse verändern. Einerseits bleiben zwar die belastenden äußeren Bedingungen des Baustellenumfeldes weitgehend bestehen (Wetter, Lärm, Staub), auf der anderen Seite werden im Bauwesen zunehmend anspruchsvolle „High-Tech-Maschinen“ und moderne Arbeitsmittel zum Einsatz kommen, was den Interessen jüngerer Generationen entgegenkommen dürfte. Diese bevorstehende Veränderung sollte genutzt werden, um die Bauberufe für junge Menschen wieder attraktiver zu machen und damit die Ausbildungszahlen in diesen Berufen zu halten oder zu steigern. Hier dürften in erster Linie die Arbeitgeber und die Bauverbände gefragt sein, durch Aufklärung, Öffentlichkeitsarbeit und gezielte Aktionen für Schüler, Eltern und berufsberatende Stellen zur Vermittlung eines modernen und ansprechenden Berufsbildes beizutragen. Exemplarisch sei hier der vom Verband VDBUM organisierte bundesweite „Baumaschinenerlebnistag 2019“ genannt[30].

6.6 F&E-RESSOURCEN

Voraussetzung für die weitere Verbreitung automatisierter Lösungen im Bauwesen ist unter anderem die Verfügbarkeit ausreichender personeller Ressourcen für die Forschung, Produktentwicklung und Einführung dieser Lösungen. Dafür muss neben allgemeiner Stärkung der MINT-Fächer in der Ausbildung auch die Attraktivität der entsprechenden Studienfächer und der Studienschwerpunkte gestärkt werden. Nur so kann Nachwuchs in ausreichender Qualität und Quantität für die Unternehmen ausgebildet werden. Dies gilt in gleicher Weise für nichtakademische Ausbildungen, auch hier wird gut qualifiziertes Personal zwingend benötigt, um die Lösungen in die Baupraxis zu überführen und zu betreiben.

Empfehlung: Gerade die anwendungsnahen Lehrstühle, zu denen die Baumaschinen und Bauprozesse gehören, stehen an den Universitäten unter ständigem Existenzdruck. So sollte der Lehrstuhl des Gutachters mit dem altersbedingten Ausscheiden seines Vorgängers eigentlich geschlossen werden. Erst durch massiven Druck des VDMA (Fachverband Baumaschinen und Baustoffanlagen) und der FVB (Forschungsvereinigung Baumaschinen und Baustoffanlagen) konnte der Lehrstuhl im Rahmen einer Stiftungsprofessur – zunächst zeitlich befristet bis 2021 – erhalten werden. Wenn die Potenziale automatisierter Baumaschinen und Bauprozesse in Deutschland genutzt werden sollen, kann das nur mit Hilfe einer starken Forschung in diesem Bereich erfolgen. Hierfür sind entsprechend ausgerichtete Lehrstühle – ähnlich wie in anderen anwendungsnahen Forschungsbereichen – unverzichtbar. Die seit einigen Jahren zu beobachtende Fokussierung der Hochschulen auf die Grundlagenforschung ist vor diesem Hintergrund kritisch zu sehen.

Empfehlung: Um die Attraktivität und Sichtbarkeit des Fachgebietes „Automatisierte Baumaschinen und Bau-Robotik“ zu stärken, könnte ein Wettbewerb ausgeschrieben werden. In ähnlicher Form wie bei der „Formula Student“ oder dem „Robocup“, nur mit der inhaltlichen Ausrichtung auf Baumaschinen und Bauprozesse, könnten sich darauf internationale Teams aus Wissenschaftlern und Studenten bewerben. Evtl. könnte der Wettbewerb auch für kleinere Unternehmen (Start-ups, Systementwickler) geöffnet werden. Der Gutachter wird diesen Gedanken mit den entsprechenden Verbänden diskutieren, jegliche Unterstützung ist wünschenswert.

[30] www.baumaschinenerlebnistag.de

Empfehlung: Die Anforderungen an die Maschinenentwickler werden aufgrund der neuen technologischen Möglichkeiten zunehmend interdisziplinärer. Nicht jeder Maschinenhersteller kann dieser Anforderung dadurch begegnen, dass er Mitarbeiter der verschiedensten Fachrichtungen und Ausprägungen dauerhaft einstellt. Ein Lösungsansatz dafür ist die Kooperation mit spezialisierten Dienstleistern[31], die jedoch oft daran scheitert, dass der Maschinenhersteller aus Sorge um den Schutz seines internen Wissens lieber auf ein Projekt verzichtet oder dieses verschiebt, als mit einem externen Partner zu kooperieren. Diese Bedenken aufzulösen, erfordert ein Umdenken seitens der Hersteller und eine stärkere Öffnung in Richtung von Kooperationen mit Dienstleistern, ebenso wie mit Anwendern, Zulieferern und Forschungseinrichtungen.

6.7 TECHNOLOGIEFÖRDERUNG IN ÖFFENTLICHEN BAUPROJEKTEN

Öffentlich ausgeschriebene Bauprojekte können dazu genutzt werden, die Erprobung und Demonstration neuer Technologien zu unterstützen. Dazu müsste die Anwendung neuer Technologien in Ausschreibungen gefordert werden, unter Berücksichtigung entsprechender Vergütungsregelungen zur Kompensation ggf. anfallender Mehraufwendungen. Bei privaten Ausschreibungen wird dies weniger möglich sein, weil hier der Gedanke der Förderung neuer Technologien in der Regel keine Rolle spielen kann.

Empfehlung: Die Unterstützung der Erprobung und Pilotierung neuer Technologien durch Berücksichtigung in öffentlichen Ausschreibungen sollte verstärkt werden. Auch wenn das Instrument bereits genutzt wird, z.B. im Zusammenhang mit der geforderten BIM-Einführung, könnte es sicher noch ausgeweitet werden [196]. Mögliche Beispiele solcher Erprobungs- und Pilotprojekte:

- Errichtung von (kleineren) Gebäuden im 3D-Betondruck-Verfahren,
- Lokal emissionsfreie Baustellen (mit entsprechender Versorgungs-Infrastruktur für die Maschinen mit alternativen Antriebssystemen),
- Großbaustelle mit funkbasierter Personenerkennung (vgl. Kap. 6.4),
- Baumaschinen mit sensorischer Objekterkennung und Gefahrenbereichsüberwachung,
- Einsatz teilautomatisierter oder autonomer Baumaschinen für begrenzte Anwendungen.

6.8 ANTRIEBSSYSTEME

Wie im Kapitel 2 „Rahmenbedingungen“ erläutert, wurden die Entwicklungsressourcen bei den Maschinenherstellern in den letzten ca. 15 Jahren durch Anpassung an die stufenweise Verschärfung der Emissionsgesetzgebung weitgehend gebunden. Im Rückblick ist festzustellen: Das gewünschte Ergebnis der Verschärfungen wurde in Form von massiven Emissionsreduzierungen erreicht, allerdings zu Lasten anderer Entwicklungen, die in dieser Zeit aufgrund ausgelasteter Ressourcen nicht angegangen werden konnten. Die vorerst letzte Emissionsstufe ist nun erreicht („EU Stufe V“), weitere Verschärfungen sind bisher nicht definiert.

Empfehlung: Aus zwei Gründen sollte es keine weiteren Emissionsstufen für Verbrennungsmotoren festgelegt werden:

- Durch die in den letzten 15 Jahren stufenweise umgesetzte Verschärfung wurde das Niveau der Stickoxid- und Partikelemissionen massiv reduziert. Technische Maßnahmen zur weiteren Reduzierung der Emissionen eines Verbrennungsmotors würden die Maschinenkosten massiv in die Höhe treiben und gleichzeitig teilweise gegenläufige Effekte bei Kraftstoffverbrauch und CO_2-Emissionen mit sich bringen. Aus Sicht des Gutachters ist eine weitere Verschärfung ohne vollständigen technologischen Wandel (vgl. Kap. 3.4) nicht zielführend.
- Wenn die Maschinenhersteller weiterhin ihre Entwicklungsressourcen damit beschäftigen müssen, werden diese für eine Aufgabe mit sehr begrenzter Wirksamkeit gebunden, während andere

[31] Z.B. IBAF Engineering (www.ibaf-engineering.de) und HYDRIVE Engineering (www.hydrive-engineering.de)

Maßnahmen weitaus größere Hebel bieten. Automatisierung und Prozessoptimierung bieten das Potenzial zur Senkung des Kraftstoffverbrauches und damit sowohl der CO_2- als auch der Schadstoffemissionen in zweistelligen Prozentbereichen, an Effekte in dieser Größenordnung ist durch weitere Maßnahmen am verbrennungsmotorischen Antriebsstrang nicht zu denken.

Empfehlung: Stattdessen sollte die Erforschung, Entwicklung und Erprobung alternativer Antriebskonzepte (vgl. Kap. 3.4) stärker gefördert werden. Schwerpunkte sollten dabei in den Bereichen E-Fuels für Verbrennungsmotoren (regenerativ erzeugte, synthetische Kraftstoffe) und Wasserstoff-Brennstoffzelle zur Versorgung von Elektrischen Antriebssystemen gelegt werden. Bisher konzentriert sich die Forschungsförderung für alternative Antriebe praktisch ausschließlich auf den PKW, LKW und Busse, alternative Antriebssysteme für Baumaschinen werden in den Förderprogrammen nicht berücksichtigt. Das sollte sich ändern, wenn auch in diesem Anwendungsbereich eine Umstellung der Antriebssysteme angestrebt wird.

Empfehlung: Für alle neuartigen Antriebssysteme muss auch die Frage der Infrastruktur gelöst werden. Heute erfolgt eine sehr einfache Betankung der Baumaschinen auf der Baustelle durch angelieferten Diesel, dieses Versorgungskonzept kann auf E-Fuels übertragen werden. Schwieriger wird es allerdings bei batterieelektrischen Systemen oder solchen mit Wasserstoff-Brennstoffzelle, diese müssen an speziellen Ladestationen nachversorgt werden. Eine Baumaschine kann aber in der Regel nicht zum Aufladen oder Betanken an eine entfernte Tankstelle oder Ladestation fahren, sondern muss vor Ort auf der Baustelle aufgeladen werden. Hierfür werden sichere und wirtschaftliche technische Lösungen für die Baustelle benötigt, ebenso muss die überregionale Lieferkette gelöst werden.

6.9 MOBILFUNKNETZE

Zahlreiche Automatisierungsbestrebungen setzen die maschinenübergreifende Kommunikation voraus, also die Übertragung von Daten zwischen einzelnen Maschinen oder zwischen Maschinen und übergeordneten Systemen. Die Übertragung von Statusmeldungen der Maschinen (z.B. für vorbeugende Wartung und statistische Auswertungen) oder von Prozessdaten (für Dokumentation und Abrechnung) ist mit den bestehenden Kommunikationsnetzen realisierbar – sofern am Standort der Baustelle eine entsprechende Netzabdeckung gegeben ist. Wenn aber die Kommunikation für eine direkte Beeinflussung der Bewegungsvorgänge einer Maschine genutzt werden soll, z.B. bei kollaborierenden Maschinen, bei ferngesteuerten Maschinen oder bei Cloud-gestützter Prozessführung, muss diese Kommunikation in Echtzeit und mit höchster Verfügbarkeit erfolgen (5G). Dafür sind die heute standardmäßig nutzbaren Kommunikationsnetze (max. LTE/4G) aufgrund zu geringer Bandbreite, zu großer Latenz, eingeschränkter Netzabdeckung und Zuverlässigkeit heute nicht geeignet. Ein geeigneter Lösungsansatz ist die flächendeckende Einführung des 5G-Netzes, allerdings ist unklar, wann diese neue Technologie tatsächlich „überall“ verfügbar sein wird. Solange diese Voraussetzung nicht erfüllt ist, müssen Baustellenbetreiber, die eine maschinenübergreifende Kommunikation nutzen wollen, sich lokale Netze mit entsprechenden Mehrkosten einrichten.

Empfehlung: Die flächendeckende Umsetzung des 5G-Standards sollte auch aus Sicht der Baumaschinen-Anwendungen vorangetrieben werden.

Empfehlung: Um auch vor der flächendeckenden Einführung von 5G schon die Erprobungen entsprechender Maschinen und Prozesse zu ermöglichen, sollte die lokale, in der Regel temporäre, Installation entsprechender Kommunikations-Infrastrukturen gefördert werden – sowohl im Rahmen zentraler Testfelder (vgl. Kap. 6.2) als auch bei einzelnen größeren Bauprojekten.

6.10 FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE

Der verbreitete Einsatz autonomer Baumaschinen ist in überschaubarer Zukunft nicht abzusehen. Lediglich in wenigen ausgewählten Anwendungen gibt es bereits oder wird es in den nächsten Jahren vollautonome Lösungen geben, die das Potenzial zur breiten Anwendung aufzeigen. Der Weg zum langfristigen Ziel „Autonomie“ führt daher über mehrere Zwischenstufen, welche zunächst die Implementierung von Assistenzfunktionen und teilautomatisierten Systemen in den Fokus stellen. Der menschliche Bediener bleibt demzufolge auf absehbare Zeit unentbehrlich. An diesen Randbedingungen sollten sich auch zukünftige Förderprogramme orientieren.

Empfehlung: Folgende Forschungsschwerpunkte sollten aus Sicht des Gutachters besonders gefördert werden:

- Entwicklung von **Assistenzsystemen** für Baumaschinen, insbesondere solchen zur Erhöhung der **Personensicherheit** (Geräteführer, Arbeiter im Umfeld der Maschine, unbeteiligte Personen).

- Entwicklung von **automatisierten und/oder ferngesteuerten Maschinen** für den Einsatz in **gefährdeten Bereichen** (z.B. Rückbau von Atomkraftwerken, Rückbau von Schornsteinen und Kühltürmen, Abbrucharbeiten allgemein).

- Entwicklung von **automatisierten Maschinen und Prozessen im Straßenbau**. Für diese Anwendung sprechen verschiedene Gründe: im Straßenbau bestehen besonders hohe Gefährdungen für die beteiligten Arbeitnehmer; aufgrund besonders unattraktiver Arbeitsbedingungen wird es zunehmend schwierig, qualifizierte Arbeitskräfte zu finden; der Straßenbau zeichnet sich durch relativ planbare Abläufe mit wenigen plötzlichen Störungen aus; das volkswirtschaftliche Potenzial durch beschleunigte Baustellenabwicklung und Vermeidung von Nacharbeiten ist besonders hoch.

- Die **Additive Fertigung (Beton-3D-Druck)** bietet im Gebäudebau enormes Potenzial zur Ressourcenschonung (schalungsfreies Bauen) und zur Kostensenkung (automatisierbares Bauen). Während sich international unzählige Forschungsprojekte und Unternehmen unter massiver staatlicher Förderung mit dem Thema beschäftigen, sind in Deutschland nur vereinzelte Forschungsprojekte möglich. Eine reale Umsetzung scheitert bisher neben unzureichenden Mitteln auch an den hohen und verhältnismäßig unflexiblen Regularien und Bauvorschriften. Das Zukunftsthema Beton-3D-Druck sollte massiv gefördert werden – sowohl durch stärkere Finanzierung von Forschungsprojekten und unternehmerischen Aktivitäten als auch durch Unterstützung bei der Planung und Genehmigung von Demonstrations-Bauvorhaben noch vor vollständiger Erbringung der Nachweise über die Einhaltung aller bestehenden Bauvorschriften.

- Im Bereich der **Baurobotik** lag der Fokus viele Jahre auf der Entwicklung von Spezialmaschinen, so genannten Single-Task Construction Robots. Diese sollen Handwerker bei der Durchführung einfacher repetitiver Tätigkeiten (z.B. Mauernutfräsen, Bohren, Fliesen legen, o. ä.) unterstützen. Der hohe Investitionsaufwand für derartige Spezialmaschinen übersteigt jedoch in den meisten Fällen die finanziellen Möglichkeiten eines einzelnen Handwerksbetriebs, weshalb es bisher zu keiner signifikanten Marktdurchdringung kam. Der zukünftige Fokus der Forschung und Entwicklung sollte sich stärker auf vielseitig einsetzbare Bauroboter (**Multi-Task Construction Robots**) konzentrieren. Diese können von mehreren Gewerken genutzt werden, was wiederum neue Finanzierungs- und Nutzungskonzepte ermöglicht (z.B. Leasing, gemeinschaftliche Nutzung). Besondere Forschungsbedarfe, die sich hieraus ergeben, betreffen die Entwicklung leistungsfähiger Leichtbau-Manipulatoren, einheitlicher Werkzeugaufnahmen sowie hochgenauer Systeme zur Positionsbestimmung innerhalb bestehender Gebäudestrukturen.

- Projekte zur **Optimierung und Rationalisierung von Bauprozessen**. In dieses Feld fallen z.B. folgende Themen: Standardisierung von Schnittstellen, aufeinander abgestimmte Abläufe durch

Kommunikation zwischen einzelnen Maschinen sowie zwischen Maschinen und übergeordneten Systemen; Durchgängigkeit von Informationsflüssen von der Planung über die Realisierung bis zum Betrieb und Rückbau von Bauwerken.

- Nicht zuletzt durch neue gesetzliche Vorgaben gewinnt das Thema **Building Information Modeling (BIM)** zunehmend an Bedeutung im Bereich der digitalen Bauplanung, Bauausführung und Dokumentation. Die Anbindung von Baumaschinen an BIM-Systeme, das automatische Ableiten und Extrahieren der notwendigen Informationen für eine automatische Maschinen- und Prozesssteuerung, sowie die Erfassung und Rückspeisung des aktuellen Baufortschritts sind wichtige Aspekte zukünftiger Forschungsprojekte im Zusammenhang mit BIM und automatisierten Baumaschinen. Unter anderem ist die Erweiterung des IFC-Datenformats um maschinenspezifische und prozessrelevante Metainformationen hierfür erforderlich [170].

- Überführung der **„LEAN"-Ansätze** aus der industriellen Produktion auf die Bauprozesse, zur Vermeidung jeglicher Art von Verschwendung (Arbeitsstunden, Material, Bauzeit).

- Besonderes Potenzial zur Steigerung der Produktivität im Bauwesen bietet auch die **Bau-Logistik**, also vor allem die Versorgung von Baustellen mit Material – zum richtigen Zeitpunkt, am richtigen Ort, in der richtigen Menge und Qualität. Gerade hier hat das Bauwesen noch erheblichen Nachholbedarf, verglichen mit der industriellen Produktion. Neben den informationstechnischen Fragestellungen sollten in diesem Zusammenhang auch Fragen der **Materialbereitstellung durch automatisierte Fördersysteme** betrachtet werden – im Ansatz vergleichbar mit den fahrerlosen Transportsystemen der Intralogistik, jedoch in der Ausführung angepasst an die speziellen Bedingungen des Baustellenumfeldes.

7 QUELLENVERZEICHNIS

[1] 3DPRINT: *Chinese Construction Company 3D Prints an Entire Two-Story House On-Site in 45 Days*. URL https://3dprint.com/138664/huashang-tengda-3d-print-house/. - abgerufen am 2019-12-12

[2] 123ERFASST: *123erfasst - Behalten Sie Ihre Projekte und Baustellen online im Überblick.* URL https://www.123erfasst.de/. - abgerufen am 2019-08-14

[3] ADAC: *Hardware-Nachrüstung: SCR-Filtersysteme im 50.000 km-Dauertest*. URL https://www.adac.de/verkehr/abgas-diesel-fahrverbote/dieselkauf/test-prototypen-scr-nachruestkats/. - abgerufen am 2019-12-16

[4] ADAM, DIETMAR ; PAULMICHL, IVAN ; KOPF, FRITZ ; ERDMANN, PETER: Integrierte Verdichtungskontrollen bei dynamischen Verdichtungsverfahren. In: *Symposium: Baugrundverbesserung in der Geotechnik*. Siegen, 2015

[5] ADV-ARBEITSGEMEINSCHAFT DER DEUTSCHEN VERMESSUNGSVERWALTUNGEN: *Startseite*. URL http://www.sapos.de/index.html. - abgerufen am 2019-12-13

[6] AMMANN GROUP: *Verdichtung Technologie* (Technologie Portfolio). Langenthal, Suisse, 2019

[7] APIS COR: *Apis Cor*. URL https://www.apis-cor.com. - abgerufen am 2019-10-24

[8] ARBEITSSCHUTZ-PORTAL-REDAKTION: *Gefährliche Baustellen - sicher gestaltet*. URL https://www.arbeitsschutz-portal.de/beitrag/asp_news/3310/gefaehrliche-baustellen---sicher-gestaltet.html. - abgerufen am 2019-10-29

[9] ARCURE S. A.: *The Blaxtair: Person/Machinery Anti-Collision Camera* (Broschüre). Pantin, France, 2018

[10] AS WÄGETECHNIK: *Radladerwaagen*. URL https://www.as-waegetechnik.de/produkte/mobile-waagen/radladerwaagen/. - abgerufen am 2019-10-30

[11] ASADI, EHSAN ; LI, BINGBING ; CHEN, I-MING: Pictobot: A Cooperative Painting Robot for Interior Finishing of Industrial Developments. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* Bd. 25 (2018), Nr. 2, S. 82–94

[12] AXIO-NET GMBH: *Satellite Positioning Services*. URL http://www.axio-net.eu/?id=161. - abgerufen am 2019-12-13

[13] BAUER AG: *Mehr Sicherheit, mehr Komfort, mehr Effizienz: Der adaptive Kellyeinfahrassistent von Bauer überzeugt auf der Baustelle „One Bangkok“*. URL https://www.bauer.de/bma/company/bauer-newsletter/Mehr-Sicherheit-mehr-Komfort-mehr-Effizienz-Der-adaptive-Kellyeinfahrassistent-von-Bauer-ueberzeugt-auf-der-Baustelle-One-Bangkok/. - abgerufen am 2019-10-30

[14] BAUER AG: *Assistenzsysteme*. URL https://www.bauer.de/export/shared/documents/pdf/bma/datenblatter/Assistenzsysteme_DE_EN_905_806_1_2.pdf. - abgerufen am 2019-10-30

[15] BAUER AG: *BAUER Maschinen Gruppe präsentiert State-of-the-Art-Technologie für den Spezialtiefbau*. URL https://www.bauer.de/bma/company/bauer-newsletter/BAUER-Maschinen-Gruppe-praesentiert-State-of-the-Art-Technologie-fuer-den-Spezialtiefbau/. - abgerufen am 2019-10-30

[16] BAUER MASCHINEN GMBH: *Schlitz- und Dichtwände* (Broschüre). Schrobenhausen, 2015

[17] 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

[18] BAUER, ULRICH ; WINZ, GERALD: *Ermittlung des Baumaschinenbestandes in Deutschland*, *Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen e. V.* (Studie Nr. 47). Frankfurt/Main, 2015

[19] BAUMAGAZIN-ONLINE.DE: *MOBA: Deckeneinbau entscheidet oft darüber, was am Ende übrigbleibt*. URL https://www.baumagazin-online.de/d/moba-deckeneinbau-entscheidet-oft-darueber-was-am-ende-uebrigbleibt/. - abgerufen am 2019-10-21

[20] BAYERISCHE FORSCHUNGSSTIFTUNG: *BIM-gestützte Planung, Simulation und Monitoring von Baustellen – BIMsite > Förderprojekte > Bayerische Forschungsstiftung*. URL https://www.forschungsstiftung.de/Projekte/Details/BIM-gestuetzte-Planung-Simulation-und-Monitoring-von-Baustellen-BIMsite.html. - abgerufen am 2019-10-08

[21] BENDER, FRANK A. ; SONNTAG, MARCUS ; SAWODNY, OLIVER: Nonlinear model predictive control of a hydraulic excavator using Hammerstein models. In: *The 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*. Queenstown, New Zealand : IEEE, 2015, S. 557–562

[22] BENNTEC SYSTEMTECHNIK GMBH: *Virtual Reality: Eine neue Dimension für Training und Lernen*. URL https://www.benntec.de/taetigkeitsfelder/lernmanagement-und-trainingstechnologie/leistungen/virtual-reality-training. - abgerufen am 2019-12-03

[23] BERDING BETON: *Transportbeton*. URL https://www.berdingbeton.de/produkte/produkte-oeffentlicher-bereich/transportbeton/transportbeton/. - abgerufen am 2019-10-07

[24] 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

[25] BERNER, FRITZ ; KOCHENDÖRFER, BERND ; SCHACH, RAINER: *Baubetriebsführung*, *Grundlagen der Baubetriebslehre*. 2. Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2015

[26] BERNSHAUSEN, JENS: *Integration von 3D-„Time-of-Flight“-Kameras in Applikationen zur sicheren Steuerung autonomer Roboter*. Siegen, Universität Siegen - Department Elektrotechnik und Informatik, Dissertation, 2011

[27] BETTENHAUSEN, KURT ; WESTERKAMP, DIETER: *Künstliche Intelligenz* (VDI-Statusreport). Düsseldorf : VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2018

[28] BEUTINGER, PETER HANS: *Ein geotechnischer Beitrag zur Standsicherheit mobiler Baumaschinen*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Dissertation, 2005

[29] BG BAU: *Arbeitsunfälle in der Bauwirtschaft leicht gestiegen, Hautkrebs häufigste Berufskrankheit*. URL https://www.bgbau.de/mitteilung/arbeitsunfaelle-berufskrankheiten-in-der-bauwirtschaft/. - abgerufen am 2019-10-29

[30] BI BAUMAGAZIN: *Vemcon: Teilautomatik für Kompaktbagger*. URL https://www.bi-medien.de/artikel-30221-bm-vemcon-copilot-nachruestloesung.bi. - abgerufen am 2019-10-29

[31] BLOCHWITZ, TORSTEN ; OTTER, MARTIN ; ARNOLD, MARTIN ; BAUSCH, CONSTANZE ; CLAUSS, CHRISTOPH ; ELMQVIST, HILDING ; JUNGHANNS, ANDREAS ; MAUSS, JAKOB ; U. A.: The Functional Mockup Interface for Tool independent Exchange of Simulation Models. In: *Proceedings of the 8th International Modelica Conference*. Dresden, 2011, S. 105–114

[32] BMBF-INTERNETREDAKTION: *Industrie 4.0 - BMBF*. URL https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html. - abgerufen am 2019-10-23

[33] BOBCAT: *E10z*. URL https://bobcat.de/bobcat-e10z. - abgerufen am 2019-10-30

[34] BOCK, THOMAS: Von der automatisierten Vorfertigung zum Robotereinsatz auf der Baustelle. In: *IBR - Information zur Bau-Rationalisierung* (2011), S. 3

[35] BOCK, THOMAS: Automatisierte Hochbaustellen. In: *IBR - Information zur Bau-Rationalisierung* (2012), S. 6

[36] BOMAG GMBH: *BOMAG Verdichtungsmess- und Dokumentationssysteme* (Firmenschrift). Boppard, 2012

[37] BOMAG GMBH: *Verdichten mit Durchblick – Mess- und Dokumentationssysteme von BOMAG* (Broschüre). Boppard, 2017

[38] VON BORCK, FELIX: The electric construction machine: possibilities, opportunities and risks from the point of view of a battery manufacturer. In: *Construction Equipment Forum*. Mannheim, 2019

[39] BOSCH BLUEHOUND: *Bluehound_LP*. URL https://bluehound.boschtools.com/bluehound_lp/. - abgerufen am 2019-10-18

[40] 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

[41] BOSLE, FABIENNE: *Innovative Technologien auf der Baustelle*. URL https://kompetenzzentrum-kaiserslautern.digital/innovative-technologien-auf-der-baustelle/. - abgerufen am 2019-08-14

[42] BRAMANN, HELMUT ; MAY, ILKA: *Stufenplan Digitales Planen und Bauen* (Broschüre). Berlin : Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015

[43] BREITKOPF, A.: *Umsatz im deutschen Maschinenbau nach Sektoren 2018*. URL https://de.statista.com/statistik/daten/studie/173637/umfrage/branchenumsatz-des-maschinenbaus-in-deutschland-nach-sektoren/. - abgerufen am 2019-10-29

[44] 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

[45] BROKK DEUTSCHLAND: *Unser Konzept*. URL https://www.brokk.com/de/our-concept/. - abgerufen am 2019-10-30

[46] BROKK DEUTSCHLAND: *About Brokk*. URL https://www.brokk.com/. - abgerufen am 2019-09-30

[47] BRUCKMANN, TOBIAS ; MATTERN, HANNAH ; SPENGLER, ARNIM ; REICHERT, CHRISTOPHER ; MALKWITZ, ALEXANDER ; KÖNIG, MARKUS: Automated Construction of Masonry Buildings using Cable-Driven Parallel Robots. In: *33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2016)*. Auburn, USA, 2016

[48] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ: *Anlage 1 BKV - Einzelnorm*. URL http://www.gesetze-im-internet.de/bkv/anlage_1.html. - abgerufen am 2019-09-30

[49] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG: *AWIMAS – Maschinensimulationen in virtuellen Umgebungen*. URL https://www.qualifizierungdigital.de/de/awimas-57.php. - abgerufen am 2019-10-29

[50] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG: *AMMCOA — KIS Website*. URL https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/ammcoa. - abgerufen am 2019-10-08

[51] BUNDESMINISTERIUM FÜR FINANZEN: *Einzelpläne 2019 - Übersicht Soll Ausgaben*. URL https://www.bundeshaushalt.de/#/2019/soll/ausgaben/einzelplan.html. - abgerufen am 2020-01-30

[52] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR: *Autonom arbeitende Maschinen im Straßenbau 4.0 - ROBOT-Straßenbau 4.0*. URL https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/KI-Projekte/robot4-0.html. - abgerufen am 2019-10-24

[53] BUNDESNETZAGENTUR: *Grundlegende Rahmenbedingungen des zukünftigen Antragsverfahrens für den Bereich 3.700 MHz – 3.800 MHz für Anwendungen des drahtlosen Netzzugangs* (Entwurf). Bonn, 2020

[54] CAB CONCEPT CLUSTER: *Smart Cab – CCC*. URL http://www.cabconceptcluster.com/smart-cab/. - abgerufen am 2019-10-17

[55] CADENA, CESAR ; CARLONE, LUCA ; CARRILLO, HENRY ; LATIF, YASIR ; SCARAMUZZA, DAVIDE ; JOSE NEIRA ; IAN REID ; JOHN J. LEONARD: Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age. In: *IEEE Transactions on Robotics* Bd. 32 (2016), Nr. 6, S. 1309–1332

[56] CAO, VEANNE: *Digitizing construction sites with Scaled Robotics – TechCrunch*. URL https://techcrunch.com/2019/08/02/digitizing-construction-sites-with-scaled-robotics/amp/?xing_share=news. - abgerufen am 2019-10-29

[57] CASE CONSTRUCTION EQUIPMENT: *Lösungen für Maschinensteuerungen - SiteControl* (Broschüre), 2015

[58] 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

[59] CATERPILLAR: *CAT® Grade Control* (Broschüre), 2012

[60] CATERPILLAR: *Cat GRADE mit e-Fence*. URL https://www.cat.com/de_DE/products/new/technology/detect/detect/2661581332358077.html. - abgerufen am 2019-10-09

[61] CATERPILLAR: *Assistenzsysteme*. URL https://www.zeppelin-cat.de/produkte/technologie/assistenzsysteme.html. - abgerufen am 2019-10-02

[62] 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
[63] CATERPILLAR: *Hybrid-Hydraulikbagger Cat 336E H*. URL https://www.cat.com/de_DE/news/machine-press-releases/cat-336e-h-hydraulichybridexcavatordeliversnocompromisefuelsavin.html. - abgerufen am 2019-10-29
[64] 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
[65] 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
[66] 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
[67] CNH ITALIA: CASE WX 145, WX 165, WX 185 Betriebsanleitung (2007)
[68] COHRS, HEINZ-HERBERT: Gute Fertiger machen's eben. In: *BPZ Baumaschinen Straßenbau und -sanierung* (2017), Nr. 5/6, S. 20–27
[69] 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
[70] COHRS, HEINZ-HERBERT: *Der Mensch ist alternativlos*. URL https://www.baumaschinen-dienst.de/artikel/der-mensch-ist-alternativlos-6025/. - abgerufen am 2019-10-21
[71] CONSTRUCTION PLANT NEWS: *The Latest Control Technology from Engcon*. URL https://cpnonline.co.uk/features/latest-control-technology-engcon/. - abgerufen am 2019-10-29
[72] CONTINENTAL AG: *Blind Spot Detection*. URL https://www.continental-automotive.com/. - abgerufen am 2019-12-03
[73] 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
[74] DADHICH, SIDDARTH ; BODIN, ULF ; ANDERSSON, ULF: Key challenges in automation of earth-moving machines. In: *Automation in Construction* (2016), Nr. 68, S. 212–222
[75] DEMAG MOBILKRANE: *Demag Technologie*. URL https://www.demagmobilecranes.com/de/products/demag-technology. - abgerufen am 2019-10-30
[76] DEUTSCHE GESETZLICHE UNFALLVERSICHERUNG: *DGUV: Meldepflichtige Arbeitsunfälle je 1.000 Vollarbeiter*. URL https://www.dguv.de/de/zahlen-fakten/au-wu-geschehen/au-1000-vollarbeiter/index.jsp. - abgerufen am 2019-10-29
[77] DEUTZ AG: *Kraftstoffe der Zukunft*. URL https://www.deutz.com/produkte/technologien-loesungen/kraftstoffe-der-zukunft/. - abgerufen am 2019-10-29
[78] DIN 18710-1: Ingenieurvermessung – Teil 1: Allgemeine Anforderungen, DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2010)
[79] DIN EN 474-1:2018-08: Erdbaumaschinen- Sicherheit- Teil_1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN_474-1:2006+A5:2018, Beuth Verlag GmbH (2018)
[80] 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)
[81] 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)
[82] DIN EN ISO 6682:2008: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 3: Stellteile, Beuth Verlag GmbH (2009)
[83] DOXEL: *Artificial Intelligence for Construction Productivity*. URL https://www.doxel.ai/. - abgerufen am 2019-10-29

[84] DUBAI FUTURE FOUNDATION: *3D PRINTED OFFICE - DUBAI FUTURE FOUNDATION*. URL http://www.officeofthefuture.ae/. - abgerufen am 2019-12-12

[85] 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

[86] DÜRIG, WOLFGANG ; WEINGARTEN, JÖRG: *Das Handwerk wird digital - Bedeutung für Betriebe, Beschäftigte und Marktstrukturen*, *Wiso Diskurs*. Bonn : Friedrich-Ebert-Stiftung, 2019

[87] DYNAPAC GMBH: *Dynapac City Fertiger* (Broschüre). Wardenburg, 2018

[88] DYNAPAC GMBH: *Grosse Kettenfertiger von Dynapac* (Broschüre). Wardenburg, 2018

[89] ECHORD: *dimRob - Robotics on construction site - dimensional tolerance handling*. URL http://www.echord.info/wikis/website/dimrob.html. - abgerufen am 2019-09-30

[90] EDWARDS, DAVID: *Scaled Robotics integrates mobile robot into construction site*. URL https://roboticsandautomationnews.com/2019/09/03/scaled-robotics-integrates-mobile-robot-into-construction-site/25325/. - abgerufen am 2019-09-30

[91] ELGO ELECTRONIC GMBH & CO KG: *Wegmessung an Hydraulikzylindern*. URL https://www.elgo.de/produkte/messsysteme/wegmessung-an-hydraulikzylindern/. - abgerufen am 2019-09-17

[92] EMC (LLC): *Voice InterActive Controls® – EMC – Electronic Mobility Controls*. URL http://emc-digi.com/voice-interactive-controls/. - abgerufen am 2019-12-03

[93] ENGCON: *Efficiency, Profitability, Safety*. URL http://www.digrite.com.au/content/pdfs/Engcon.pdf. - abgerufen am 2019-10-29

[94] ESI ITI GMBH: *Mobile Arbeitsmaschinen*. URL https://www.simulationx.de/branchen/simulation-arbeitsmaschinen.html. - abgerufen am 2019-12-03

[95] ETH ZÜRICH: *HEAP – Robotic Systems Lab*. URL https://rsl.ethz.ch/robots-media/heap.html. - abgerufen am 2019-10-18

[96] ETH ZÜRICH: *Mobile Robotic Tiling*. URL https://fcl.ethz.ch/research/research-to-application/mobile-robotic-tiling.html. - abgerufen am 2019-09-30

[97] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION: *CEN - Technical Bodies - CEN/TC 151*. URL https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:7:0::::FSP_ORG_ID:6133&cs=1978DE9E6AC73CA8409723CA4A3D20BB8. - abgerufen am 2019-10-29

[98] FABRICIUS, MICHAEL: *Bauroboter: Maschine könnte bald den Menschen am Bau ersetzen - WELT*. URL https://www.welt.de/finanzen/immobilien/article181895232/Bauroboter-Maschine-koennte-bald-den-Menschen-am-Bau-ersetzen.html. - abgerufen am 2019-10-30

[99] FASSI: *F385A e-dynamic Fassi Ladekran*. URL https://www.fassi.com/de/fassi-lkw-ladekrane/schwere-krane/f385a-e-dynamic-f385ra-e-dynamic/f385a-e-dynamic-fassi-ladekran.html. - abgerufen am 2019-10-30

[100] FBR: *Hadrian X | Outdoor Construction & Bricklaying Robot from FBR*. URL https://www.fbr.com.au/view/hadrian-x. - abgerufen am 2019-10-24

[101] FELDMANN, SEBASTIAN ; ROLAND BERGER GMBH (Hrsg.): *PREDICTIVE MAINTENANCE Service der Zukunft – und wo er wirklich steht* (Studie). München, 2017

[102] FERGUSON, MAX ; LAW, KINCHO: A 2D-3D Object Detection System for Updating Building Information Models with Mobile Robots. In: *2019 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*. Waikoloa Village, USA : IEEE, 2019, S. 1357–1365

[103] FILLA, RENO ; OLSSON, ERIK ; SCHÉELE, BO VON ; OHLSSON, KJELL: A Case Study on Quantifying the Workload of Working Machine Operators by Means of Psychophysiological Measurements. In: *13th Scandinavian International Conference on Fluid Power*. Linköping, Sweden, 2013, S. 293–304

[104] FINZEL, KLAUS: *Ferndiagnose und -wartung gehört die Zukunft* (Pressemitteilung). Garching bei München : Zeppelin Baumaschinen GmbH, 2019

[105] 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

[106] 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

[107] FRITZMEIER ; CAB CONCEPT CLUSTER: *Der Diamant unter den Kabinen*. URL http://www.cabconceptcluster.com/genius-cab-bauma/. - abgerufen am 2019-10-09

[108] 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

[109] GAO RFID INC.: *People Tracking System for Construction Sites*. URL https://gaorfid.com/people-tracking-for-construction-sites/. - abgerufen am 2019-09-17

[110] GASSMANN, MICHAEL: *Die Baubranche buhlt um Nachwuchs: Das Geschäft blüht, aber das Personal wird knapp - WELT*. URL https://www.welt.de/wirtschaft/article165249782/So-buhlt-die-deutsche-Bauindustrie-um-Nachwuchs.html. - abgerufen am 2020-01-30

[111] GESE, HELMUT ; KELLER, STEFAN ; DELL, HARRY: Verbesserte Plastizitäts- und Versagensmodelle in der Umformsimulation. In: *Numerische Simulation - Verarbeitungsprozesse und prozessgerechte Bauteilgestaltung, Fokus Metalle*. Bayreuth, 2004, S. 139–150

[112] GESTRATA: *Intelligente Asphaltverdichtung*. URL http://www.gestrata.at/publikationen/archiv-journal-beitrage/gestrata-journal-130/intelligente-asphaltverdichtung. - abgerufen am 2019-10-30

[113] GETFPV LLC: *Digital FPV: Is it the Future of Drone Racing?* URL https://www.getfpv.com/learn/fpv-essentials/digital-fpv-is-it-the-future/. - abgerufen am 2019-12-03

[114] GGR GROUP: *Oscar 1000*. URL https://www.ggrgroup.com/products/glazing-robots/oscar-1000/. - abgerufen am 2019-10-30

[115] GIFTTHALER, MARKUS ; SANDY, TIMOTHY ; DÖRFLER, KATHRIN ; BROOKS, IAN ; BUCKINGHAM, MARK ; REY, GONZALO ; KOHLER, MATTHIAS ; GRAMAZIO, FABIO ; U. A.: Mobile robotic fabrication at 1:1 scale: the In situ Fabricator: System, experiences and current developments. In: *Construction Robotics* Bd. 1 (2017), Nr. 1–4, S. 3–14

[116] GIRMSCHEID, GERHARD: *Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse*. 4. Aufl. Heidelberg : Springer [u.a.], 2010

[117] GRAMAZIO KOHLER RESEARCH: *Robotic Fabrication Laboratory, 2010-2016*. URL http://gramazio-kohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/186.html. - abgerufen am 2019-09-30

[118] 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

[119] HÄGELE, MARTIN ; BENGEL, MATTHIAS ; BLÜMLEIN, NIKOLAUS ; CONNETTE, CHRISTIAN P. ; FISCHER, JAN ; GRAF, BIRGIT ; HÖPF, MICHAEL ; JACOBS, THEO ; U. A.: *Wirtschaftlichkeitsanalysen neuartiger Servicerobotik - Anwendungen und ihre Bedeutung für die Robotik-Entwicklung* (Studie) : Fraunhofer Gesellschaft, 2011

[120] HAMME, ULRICH ; HENKEL, JOACHIM: Neue Konzepte im Leichtbau - Innovativer Teleskopausleger eines Mobilkrans. In: *Stahlbau* Bd. 82 (2013), Nr. 4, S. 246–249

[121] HANH, DUC LE ; AHN, KYOUNG KWAN ; KHA, NGUYEN BAO ; JO, WOO KEUN: Trajectory control of electro-hydraulic excavator using fuzzy self tuning algorithm with neural network. In: *Journal of Mechanical Science and Technology* Bd. 23 (2009), Nr. 1, S. 149–160

[122] HARRY, RACHEL: *World first: Doosan uses 5G for long-distance remote control of construction machine*. URL https://www.ivtinternational.com/news/operator-assist-systems/world-first-doosan-uses-5g-for-long-distance-remote-control-of-construction-machine.html. - abgerufen am 2019-10-09

[123] HAUPTVERBAND DER DEUTSCHEN BAUINDUSTRIE E.V.: *QR-Code - Die Deutsche Bauindustrie*. URL https://www.bauindustrie.de/akim/qr-code/. - abgerufen am 2019-12-03
[124] HAWE HYDRAULIK: *Ultraschall-Wegmessung*. URL https://www.hawe.com/de-de/fluidlexikon/ultraschall-wegmessung/. - abgerufen am 2019-09-17
[125] HEIL, OLIVER: *bauma 2019: Continental macht die Kabine digital und dem Maschinenführer das Leben leichter* (Pressemitteilung Continental). Frankfurt/Main, 2019
[126] HEISTER, REINHARD: *OPC UA Companion Specification Robotics - Part 1: Condition monitoring, asset management, predictive maintenance, vertical integration - Draft* (VDMA Specification). Frankfurt/Main : VDMA Verlag GmbH, 2018
[127] HELLA GMBH & CO. KGAA: *Technik & Produkte*. URL https://www.hella.com/press/de/Technik-Produkte-12-09-2017-15966.html. - abgerufen am 2019-10-17
[128] HENGSTLER GMBH: *Baumaschinen*. URL https://www.hengstler.de/de/anwendungen/drehgeber/heavy_duty/baumaschinen.php. - abgerufen am 2019-08-28
[129] HENIKL, JOHANNES: *Regelungsstrategien für den Ausleger einer Autobetonpumpe*. Wien, TU Wien - Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik, Dissertation, 2016
[130] HERBIG, DANIEL: *DJI FPV System: Headset für Drohnenrennen aus der Ego-Perspektive*. URL https://www.heise.de/newsticker/meldung/DJI-FPV-System-Headset-fuer-Drohnenrennen-aus-der-Ego-Perspektive-4485278.html. - abgerufen am 2019-10-09
[131] HEUBNER, WILHELM ; ECKARDT, JULIA ; MÜLLER, STEFAN: Ultraschall-Wegsensorik in Hydraulikzylindern. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* Bd. 118 (2016), Nr. 6, S. 44–47
[132] HILTI DEUTSCHLAND: *DD 250 - Diamantbohrgeräte*. URL https://www.hilti.de. - abgerufen am 2019-10-30
[133] HILTI DEUTSCHLAND: *DST 10-CA - Diamantwandsägen*. URL https://www.hilti.de. - abgerufen am 2019-10-30
[134] HITACHI CONSTRUCTION MACHINERY: *Hitachi ZW 180 Wheel Loader* (Broschüre), 2007
[135] HITACHI CONSTRUCTION MACHINERY: *ZH210-5 Hybrid*. URL https://www.hitachicm.eu/de/maschinen/bagger/mittelgrosse-bagger/zh210-5-hybrid/. - abgerufen am 2019-10-29
[136] HMI CLUSTER: *HMI Cluster*. URL https://www.hmi-cluster.com/konzept. - abgerufen am 2019-10-09
[137] HOEFLON INTERNATIONAL B.V.: *Producent en ontwikkelaar van minihijskranen*. URL https://www.hoeflon.com/nl. - abgerufen am 2019-10-30
[138] HUFENBACH, WERNER ; LANGKAMP, ALBERT ; KROLL, LOTHAR: Bruchmodebezogene Versagensmodelle für gewebeverstärkte Verbundwerkstoffe. In: *14. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde*. Weinheim, New York : Wiley-VCH, 2003, S. 569–574
[139] HUSQVARNA CONSTRUCTION PRODUCTS: *Abbruchroboter mit Fernbedienung*. URL https://www.husqvarnacp.com/de/maschinen/abbruchroboter/. - abgerufen am 2019-10-30
[140] 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
[141] IBG AUTOMATION GMBH: *AKW-Rückbau sicher & effizient durch Roboter gestalten - IBG*. URL https://www.goeke-group.com/de/rueckbau-akw. - abgerufen am 2019-09-30
[142] IHM: *Trendentwicklung Automatisierung im Handwerk*. URL https://www.ihm.de/fachbesucher/trendthema-automation/trendentwicklung-automatisierung-im-handwerk/. - abgerufen am 2019-10-30
[143] ISO 5006:2017 (E): *Earth-moving machinery — Operator's field of view — Test method and performance criteria*, 2017
[144] ISO 6011: *Earth-moving machinery — Visual display of machine operation*, 2003
[145] ISO 10968: *Earth-moving machinery — Operator's controls*, 2004
[146] JÄNSCH, DANIEL: *Thermoelektrik: eine Chance für die Automobilindustrie*, *Haus der Technik Fachbuch*. Renningen : expert-Verl, 2009
[147] JEKKO S.R.L.: *Product Catalog Vacuum & Tools* (Katalog). Colle Umberto, Italy, 2019
[148] JOSEPH VÖGELE GMBH: *WITOS Paving Plus Prozessoptimierung und Dokumentation* (Broschüre). Ludwigshafen, 2019

[149] JOSEPH VÖGELE GMBH: *„Offene Schnittstelle“ für 3D-Positionierungssysteme*. URL https://www.voegele.info/de/technologien/nivelliertechnik/voegele-navitronic-plus.html. - abgerufen am 2019-10-30

[150] JOSEPH VÖGELE GMBH: *VÖGELE RoadScan, ein kontaktloses Temperatur-Messsystem macht die Einbauqualität mess- und beweisbar*. URL https://www.voegele.info/de/aktuelles-presse/presseberichte/detailansicht.104789.php. - abgerufen am 2019-10-30

[151] KADEN, ROBERT ; CLEMEN, CHRISTIAN ; SEUß, ROBERT ; BLANKENBACH, JÖRG ; EICHHORN, ANDREAS ; DONAUBAUER, ANDREAS ; GRUBER, ULRICH ; FRITSCH, MARTIN: *Leitfaden Geodäsie und BIM. Version 2.0* (Leitfaden). Bühl/München, 2019

[152] KAPPEL, MARC: *Angewandter Straßenbau: Straßenfertiger im Einsatz*. 2. Aufl. 2016. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2016

[153] KATZENBACH, R. ; LEPPLA, S. ; BAUER, S. ; BUJA, H.-O. (Hrsg.): *Handbuch des Spezialtiefbaus: Geräte und Verfahren*. 3., überarb. Aufl. Köln : Bundesanzeiger-Verlag, 2015

[154] KESSLER, STEPHAN: *ISO Telematikdatenstandard für Baumaschinen und sein Beitrag zur Digitalisierung der Baumaschineneinsätze*, *Bauma 2016* (Präsentation). München, 2016

[155] KESSLER, STEPHAN ; WIMMER, JOHANNES ; GÜNTHNER, WILLIBALD: Baumaschinen Flottenmanagement mit Telematik – Benefit für den Betreiber. In: *41. VDBUM Seminar - Seminarband 2012*. München, 2012, S. 13

[156] KEYOU: *Technologie*. URL https://www.keyou.de/technologie/. - abgerufen am 2019-10-29

[157] KHOSHNEVIS, BEHROKH ; HWANG, DOOIL ; YAO, KE THIA ; YEH, ZHENGHAO: Mega-scale fabrication by Contour Crafting. In: *International Journal of Industrial and Systems Engineering* Bd. 1 (2006), Nr. 3, S. 301

[158] KING, NATHAN ; BECHTHOLD, MARTIN ; KANE, ANTHONY ; MICHALATOS, PANAGIOTIS: Robotic Tile Placement: Tools, Techniques and Feasibility. In: *Automation in Construction* (2014), Nr. 39, S. 161–166

[159] KINSHOFER: *SmartTag Tool Tracker*. URL https://www.kinshofer.com/de/images/pdf_bagger_ger/Smarttag_ger.pdf. - abgerufen am 2019-10-30

[160] KLEMM BOHRTECHNIK: *MBS 5 Bohrdatenerfassungssystem* (Broschüre). Drolshagen, 2018

[161] KLEMM BOHRTECHNIK: *Lieferprogramm*. URL https://www.klemm-bohrtechnik.de/fileadmin/templates/img/content/produkte/Lieferprogramm_Product_Range.pdf. - abgerufen am 2019-10-30

[162] 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

[163] KOBELCO: *SK219HLY-10 Hybrid*. URL https://www.kobelco-europe.com/innovation/hybrid/. - abgerufen am 2019-10-29

[164] KOMATSU: *Hydraulikbagger PC210LCi-10* (Broschüre), 2015

[165] KOMATSU: *Komatsu Hybridsystem*. URL https://www.komatsu.eu/de/komatsu-hybridsystem. - abgerufen am 2019-10-29

[166] KOMATSU: *Komatsu intelligent Machine Control*. URL https://www.komatsu.eu/de/komatsu-intelligent-machine-control. - abgerufen am 2019-10-28

[167] KÖNIG, HORST: *Maschinen im Baubetrieb: Grundlagen und Anwendung*, *Leitfaden des Baubetriebs und der Bauwirtschaft*. 4., aktualisierte Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014

[168] KRÄCKMANN, ANDRE: *Temperaturmessung im Straßenbau*. URL https://pave-news.de/temperaturmessung-im-strassenbau/. - abgerufen am 2019-10-02

[169] 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

[170] KRAUSE, MARTIN ; OTTO, JENS: Digitales Prozessmodell beim Beton-3D-Druck. In: *Bauingenieur* Bd. 94 (2019), Nr. 5, S. 171–178

[171] KRZYWINSKI, JENS ; WILL, FRANK: Concepts of FUTURE DIGITAL WORKSPACEs for industrial Vehicles. In: *International VDI Conference - HMI in Off-Highway Machines*. Berlin, 2019

[172] KUENZEL, ROBIN ; TEIZER, JOCHEN ; MUELLER, MARCUS ; BLICKLE, ALEXANDER: SmartSite: Intelligent and autonomous environments, machinery, and processes to realize smart road construction projects. In: *Automation in Construction* Bd. 71 (2016), S. 21–33

[173] KUNZE, GÜNTER ; GÖHRING, HELMUT ; JACOB, KLAUS ; SCHEFFLER, MARTIN: *Baumaschinen: Erdbau- und Tagebaumaschinen*, *Fördertechnik und Baumaschinen*. 1. Aufl [Nachdr.]. Wiesbaden : Vieweg, 2002

[174] KURMANN, FABIAN: Schritt für Schritt zur Roboterbaustelle. In: *VDI nachrichten* (2019), Nr. 21/22

[175] KURMANN, FABIAN: Lieferschein am Bau per App scannen. In: *VDI nachrichten* (2019), Nr. 38, S. 17

[176] LANDAU, KURT: Rationalisierungseffekte und Ergonomie des Ein-Mann-Mauerns. In: *Mauerwerk* Bd. 5 (2001), Nr. 1, S. 24–30

[177] LANDESHAUPTSTADT DRESDEN: *Baugenehmigung Stadt Dresden*. URL https://www.dresden.de/de/rathaus/dienstleistungen/baugenehmigung_d115.php. - abgerufen am 2019-08-14

[178] LATEGAHN, HENNING ; GEIGER, ANDREAS ; KITT, BERND: Visual SLAM for autonomous ground vehicles. In: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Shanghai, China : IEEE, 2011, S. 1732–1737

[179] LEICA GEOSYSTEMS: *Maschinensteuerungssysteme Bagger*. URL https://leica-geosystems.com/de-DE/products/machine-control-systems/excavator. - abgerufen am 2019-10-28

[180] LEICA GEOSYSTEMS AG: *Icon Baumaschinenteuerungen* (Broschüre). Heerbrugg, Suisse, 2017

[181] LEICA GEOSYSTEMS AG: *Leica iCON gps 80 – Maschinenempfänger*. URL https://leica-geosystems.com/de-DE/products/construction-tps-and-gnss/receivers/leica-icon-gps-80. - abgerufen am 2019-08-28

[182] LEICA GEOSYSTEMS AG: *Leica PaveSmart 3D System*. URL https://leica-geosystems.com/de-de/products/machine-control-systems/pavers-and-cold-planers/leica-icon-pave-asphalt. - abgerufen am 2019-10-30

[183] LIEBERMANN, MARVIN. B. ; MONTGOMERY, DAVID. B.: First-Mover Advantages. In: *Strategic Management Journal* (1988), S. 41–58

[184] LIEBHERR: *Intelligente Assistenzsysteme für Liebherr-Baumaschinen*. URL https://www.liebherr.com/de/deu/aktuelles/news-pressemitteilungen/detail/intelligente-assistenzsysteme-für-liebherr-baumaschinen.html. - abgerufen am 2019-10-09

[185] LIEBHERR: *Liebherr-Turmdrehkrane mit Virtual Reality erleben*. URL https://www.liebherr.com/de/deu/aktuelles/news-pressemitteilungen/detail/liebherr-turmdrehkrane-mit-virtual-reality-erleben.html. - abgerufen am 2019-10-09

[186] LIEBHERR: *Kransimulator LiSIM*. URL https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/maritime-krane/maritime-technologie/kransimulatoren-lisim/lisim-special-page.html. - abgerufen am 2019-12-03

[187] 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

[188] LIEBHERR: *Bohrende Verfahren im Spezialtiefbau*. URL https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/baumaschinen/spezialtiefbau/verfahren/bohren/bohrverfahren.html. - abgerufen am 2019-10-30

[189] LIEBHERR: *Datenblatt Hydraulischer Schlitzwandgreifer HSG 5-18.pdf*. URL https://www.liebherr.com/external/products/products-assets/558356-4/Datenblatt%20HSG%205-18.pdf. - abgerufen am 2019-10-30

[190] 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

[191] 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

[192] LIEBHERR: *LICCON Kransteuerung - Speziell für Liebherr-Mobilkrane entwickelt*. URL https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/mobil-und-raupenkrane/mobilkrane/mobil-krantechnologie/details/liccon.html. - abgerufen am 2019-10-30

[193] LIEBHERR MINING: *Elektrisierend*. URL https://www.liebherr.com/de/deu/aktuelles/news-pressemitteilungen/detail/elektrisierend-liebherr-mining.html. - abgerufen am 2019-10-29

[194] LIEBHERR-COMPONENTS AG: *Intelligenz für Hydraulikzylinder - LiView Wegmesssystem* (Broschüre). Nussbaumen, Suisse, 2019

[195] LIEBHERR-WERK BISCHOFSHOFEN GMBH: *Aktive Personenerkennung für Liebherr-Radlader mit EuroTest-Preis der BG Bau ausgezeichnet*. URL https://www.liebherr.com/de/deu/aktuelles/news-pressemitteilungen/detail/aktive-personenerkennung-fuer-liebherr-radlader-mit-eurotest-preis-der-bg-bau-ausgezeichnet.html. - abgerufen am 2019-10-25

[196] LIEBICH, THOMAS ; BORRMANN, ANDRÉ ; ELIXMANN, ROBERT ; ESCHENBRUCH, KLAUS ; HAUSKNECHT, KERSTIN ; HÄUßLER, MARCO ; HOCHMUTH, MARKUS ; KÖNIG, MARKUS: *Wissenschaftliche Begleitung der BMVI Pilotprojekte zur Anwendung von BIM im Infrastrukturbau* (Endbericht), 2018

[197] 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

[198] LOGSET: *12H GTE Hybrid*. URL https://www.logset.com/de/harvester/logset-12h-gte-hybrid. - abgerufen am 2019-10-29

[199] LUDWIG, LUITGARD: *Positionserfassung in Hydraulikzylindern*. URL https://www.fluid.de/unbekannte-kategorien/positionserfassung-hydraulikzylindern-117.html. - abgerufen am 2019-12-13

[200] MAGICMAPS: *Wie funktioniert GPS ?* URL https://www.magicmaps.de/produktinfo/gps-grundlagen/wie-funktioniert-gps.html. - abgerufen am 2019-08-28

[201] MAGICMAPS: *Präzise GPS-Messungen mit Hilfe von DGPS und RTK*. URL https://www.magicmaps.de/produktinfo/gps-grundlagen/praezise-gps-messungen-mit-hilfe-von-dgps-und-rtk.html. - abgerufen am 2019-12-13

[202] MAHFOUZ, MOHAMED R. ; KUHN, MICHAEL J. ; WANG, YAZHOU ; TURNMIRE, JONATHAN ; FATHY, ALY E.: Towards Sub-Millimeter Accuracy in UWB Positioning for Indoor Medical Environments. In: *2011 IEEE Topical Conference on Biomedical Wireless Technologies, Networks and Sensing Systems*. Phoenix, USA : IEEE, 2011, S. 83–86

[203] MAYBAUM, GEORG ; MIETH, PETRA ; OLTMANNS, WOLFGANG ; VAHLAND, RAINER: *Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau* : Vieweg+Teubner Verlag, 2009

[204] MCDONALD, GLENN: *Construction Robot Can 'Print' a Building in 14 Hours*. URL https://www.seeker.com/tech/robotics/construction-robot-can-print-a-building-in-14-hours. - abgerufen am 2019-09-30

[205] MECALAC: *MECALAC e12: 100 % Elektrobagger*. URL https://www.mecalac.com/de/e12-electric-wheel-excavator.html. - abgerufen am 2019-10-29

[206] MECHTCHERINE, VIKTOR ; NERELLA, VENKATESH NAIDU ; WILL, FRANK ; NÄTHER, MATHIAS ; OTTO, JENS ; KRAUSE, MARTIN: Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. In: *Automation in Construction* Bd. 107 (2019), S. 14

[207] MERKER, G. P. ; TEICHMANN, R. (Hrsg.): *Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise, Simulation, Messtechnik*, *ATZ/MTZ-Fachbuch*. 7., vollst. überarb. Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014

[208] MEYER, PIUS: *Kranumsturz durch Grundbruch, glücklicherweise ist nur Sachschaden entstanden*. URL https://docplayer.org/20243349-Kranumsturz-durch-grundbruch-gluecklicherweise-ist-nur-sachschaden-entstanden.html. - abgerufen am 2019-12-13

[209] MINISTERIUM FÜR VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG: *Qualitätsstraßenbau Baden-Württemberg 4.0*, *Version 1.0* (Handbuch), 2018

[210] MOBA MOBILE AUTOMATION AG: *Nivellierung auf höchstem Niveau* (Broschüre). Limburg, 2013

[211] MOBA MOBILE AUTOMATION AG: *Xsite Baggersteuerungen* (Broschüre). Limburg, 2019
[212] MOBA MOBILE AUTOMATION AG: *MCA – Compaction Assistant* (Broschüre). Limburg, 2019
[213] MOBA MOBILE AUTOMATION AG: *Schichtdickenmesssystem PAVE-TM* (Broschüre). Limburg, 2019
[214] MOBA MOBILE AUTOMATION AG: *Pave IR Solutions* (Broschüre). Limburg, 2019
[215] MOBA MOBILE AUTOMATION AG: *Thermale Visualisierung der Asphalttemperatur in Echtzeit innovatives System zur Prozessoptimierung und Dokumentation im Straßenbau PAVE IR*. URL https://moba-automation.de/maschinen-applikationen/asphaltfertiger/pave-ir/. - abgerufen am 2019-10-02
[216] MOBA MOBILE AUTOMATION AG: *Bohrsystem für exakte Messung*. URL https://moba-automation.de/maschinen-applikationen/bohrer/. - abgerufen am 2019-10-30
[217] MOBA MOBILE AUTOMATION AG: *Erweiterte und neue Assistenz- sowie Automationssysteme*. URL https://www.baumagazin-online.de/d/moba-mobile-automation-erweiterte-und-neue-assistenz-sowie-automationssysteme/?L=0eines. - abgerufen am 2019-10-30
[218] MOBA MOBILE AUTOMATION AG: *Moba and Volz Consulting set up new joint venture for process optimization in road construction*. URL https://moba-automation.com/news-press/moba-and-volz-consulting-set-up-new-joint-venture-for-process-optimisation-in-road-construction/. - abgerufen am 2019-10-30
[219] MOHAMMADY, FRANCIS KAHWE: *So revolutioniert Virtual Reality Ausbildung und Studium*. URL https://www.abendblatt.de/wirtschaft/article214096329/So-revolutioniert-Virtual-Reality-Ausbildung-und-Studium.html. - abgerufen am 2019-12-03
[220] MTS MASCHINENTECHNIK SCHRODE AG: *Mustererkennendes Verfahren zur Verdichtungskontrolle und automatischen Bodenarterkennung für Baggeranbauverdichter* (Projektblatt), 2015
[221] MTS MASCHINENTECHNIK SCHRODE AG: *Verdichtungsassistent* (Broschüre), 2019
[222] MÜLLER-HOFSTETTER, SABINE: Die digitale Baustelle. In: *A3BAU* (2017), Nr. 01–02, S. 24–27
[223] NÄTHER, MATHIAS ; NERELLA, VENKATESH NAIDU ; KRAUSE, MARTIN ; KUNZE, GÜNTER ; MECHTCHERINE, VIKTOR ; SCHACH, RAINER: *Beton-3D-Druck - Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton*, *Forschungsinitiative Zukunft Bau*. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2017
[224] NEGRI, ELISA ; FUMAGALLI, LUCA ; MACCHI, MARCO: A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. In: *Procedia Manufacturing 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*. Modena, Italy, 2017, S. 939–948
[225] NETZWERK BAUMASCHINEN DER OFFENSIVE GUTES BAUEN: *Personen-/Objekterkennung, Warnung in Gefahrenbereichen* (Leitfaden). Kassel, 2019
[226] NEUGEBAUER, THOMAS: Ein Radlader wird selbstständig. In: *Hebezeuge und Fördermittel* (2004), Nr. 44, S. 144–145
[227] NEUMANN, EVA ; HIRSCH, KEVIN ; WESTERMEIER, UWE: Intelligente Assistenzsysteme für Gelände- und Objekterkennung. In: *ATZoffhighway* Bd. 11 (2018), Nr. 1, S. 38–43
[228] NIEDERDRENK, RALPH ; SEEMANN, RALPH: *Wachstum 2020 – Digitalisierung und BIM*, *Baubranche aktuell* (Kurzstudie) : PricewaterhouseCoopers GmbH, 2018
[229] NIGGEMANN, OLIVER ; JASPERNEITE, JÜRGEN: *Industrie 4.0 Kommunikation mit OPC UA* (Leitfaden). Frankfurt/Main : VDMA Verlag GmbH, 2017
[230] NLINK: *The ceiling drilling robot*. URL https://www.nlink.no. - abgerufen am 2019-09-30
[231] NOHLEN, ULRIKE ; POPELKA, ROBIN ; BERQUIN, YANN: Einsatz künstlicher Intelligenz bei Baumaschinen am Beispiel der Bodenarterkennung. In: *7. Fachtagung Baumaschinentechnik 2018*, *Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen e.V. (FVB)*. Dresden, 2018
[232] OEBBEKE, ALFONS: *QR-Codes und ZUGFeRD: Bauindustrie setzt auf einheitliches Lieferschein- und elektronisches Rechnungsformat*. URL https://www.baulinks.de/bausoftware/2018/0061.php4. - abgerufen am 2019-12-03
[233] OK, SEUNG C. ; SINHA, SUNIL K.: Construction equipment productivity estimation using artificial neural network model. In: *Construction Management and Economics* Bd. 24 (2006), Nr. 10, S. 1029–1044

[234] OLIVETTI, ELSA A. ; CEDER, GERBRAND ; GAUSTAD, GABRIELLE G. ; FU, XINKAI: Lithium-ion battery supply chain considerations: analysis of potential bottlenecks in critical metals. In: *Joule* Bd. 1 (2017), Nr. 2, S. 229–243
[235] OPC FOUNDATION: *Unified Architecture*. URL https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/. - abgerufen am 2019-10-23
[236] OPC FOUNDATION: *Markets & Collaboration*. URL https://opcfoundation.org/markets-collaboration/. - abgerufen am 2019-10-23
[237] O.V.: Erster Komatsu-Hybridbagger im Einsatz. In: *Steine+Erden* (2011), Nr. 6/11
[238] O.V.: Kommunikative Krane. In: *Hub-, Hebe-, und Krantechnik* (2015), Nr. Dezember 2014/Januar 2015, S. 64–65
[239] O.V.: *RTK-Vermessung*. URL https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=RTK-Vermessung&oldid=182309034. - abgerufen am 2019-08-28
[240] O.V.: Per Datenbrille in die Maschine schauen. In: *B_I galabau* (2019), Nr. 7, S. 27
[241] O.V.: Neue Vorbereitung für Leica, Trimble and Xsite für Doosan Bagger. In: *VDBUM Info* (2019), Nr. 3, S. 4
[242] O.V.: Auf Knopfdruck-Automatische Baggersteuerung erhöht die Produktivität und senkt die Kosten. In: *VDBUM Info* (2019), Nr. 3, S. 37
[243] O.V.: Effizienz durch Aus- und Weiterbildung. In: *VDBUM Info* (2019), Nr. 5, S. 30
[244] O.V.: *Magnetostriktion*. URL https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetostriktion. - abgerufen am 2019-12-13
[245] 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
[246] PALFINGER AG: *Virtuelles Kranerlebnis*. URL https://www.palfinger.com/de-de/news/virtuelles-kranerlebnis_n_181779. - abgerufen am 2019-12-03
[247] PALFINGER AG: *Mit Innovation stets an ihrer Seite-Lifetime Service* (Broschüre). Bergheim, Austria, 2019
[248] PALFINGER AG: *Die digitalen Lösungen von Palfinger*. URL https://www.palfinger.com/de-de/ueber-palfinger/digitalisierung. - abgerufen am 2019-10-30
[249] PALFINGER AG: *P-Fold*. URL https://www.palfinger.com/de-de/produkte/ladekrane/highlights/p-fold_h_47181. - abgerufen am 2019-10-30
[250] PARK, JAEMANN ; LEE, BONGJU ; KANG, SEONHYEOK ; KIM, PAN YOUNG ; KIM, JIN: Online Learning Control of Hydraulic Excavators Based on Echo-State Networks. In: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* Bd. 14 (2017), Nr. 1, S. 249–259
[251] PARKER: *Mobile Directional Control Valve*. URL https://www.parker.com/literature/HY17-8537-UK_K220.pdf. - abgerufen am 2019-10-29
[252] PARROTT, AARON ; WARSHAW, LANE: *Industry 4.0 and the digital twin – Manufacturing meets its match*. URL https://www2. deloitte. com/insights/us/en/focus/industry-4-0/digitaltwin-technology-smart-factory. html. - abgerufen am 2019-10-09
[253] PAYER, JOHANN: Entwicklung eines Assistenzsystems für Baufahrzeuge zur Lokalisierung von gefährdeten Personen im Untertagebau. In: *5. Fachtagung Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen*. Karlsruhe, 2015
[254] PENDLETON, SCOTT ; ANDERSEN, HANS ; DU, XINXIN ; SHEN, XIAOTONG ; MEGHJANI, MALIKA ; ENG, YOU ; RUS, DANIELA ; ANG, MARCELO: Perception, Planning, Control, and Coordination for Autonomous Vehicles. In: *Machines* Bd. 5 (2017), Nr. 1, S. 1–54
[255] PETER, NORBERT: *Lexikon der Bautechnik: 10.000 Begriffsbestimmungen, Erläuterungen und Abkürzungen*. Heidelberg : C.F. Müller, 2001
[256] PFREUNDT GMBH: *Die WK60 Radladerwaage* (Broschüre). Südlohn, 2019
[257] PFREUNDT GMBH: *Radladerwaage*. URL https://www.pfreundt.de/produkte/radladerwaage/. - abgerufen am 2019-10-02
[258] PLANRADAR: *Baudokumentation und Mängelmanagement mit PlanRadar*. URL https://www.planradar.com/de. - abgerufen am 2019-08-14

[259] PLIENINGER, RALF ; BIEBACH, JENS ; BREHMER, THOMAS ; BAASKE, MICHAEL: Hybrid-Antriebe für Off-highway-Anwendungen. In: *ATZoffhighway* Bd. 11 (2018), Nr. 4, S. 24–31

[260] PON CAT: *Cat 323F Z-line*. URL https://www.pon-cat.com/no/nyheter/z-line. - abgerufen am 2019-10-29

[261] POPPY, WOLFGANG: Bauautomatisierung und Robotik. In: *Arch+* (1995), Nr. 128, S. 93–99

[262] PRAKLA BOHRTECHNIK: *Lieferprogramm*. URL http://www.prakla-bohrtechnik.de/export/shared/documents/pdf/bma/prakla/downloads/PRAKLA_Product_Range_DE-EN_905_782_1_2.pdf. - abgerufen am 2019-10-30

[263] PRITSCHOW, GÜNTHER ; KURZ, JÜRGEN ; DALACKER, MICHAEL: Mobile Mauerroboter für den Baustelleneinsatz: Programmierung, Wirtschaftlichkeit und erste experimentelle Ergebnisse. In: *Autonome Mobile Systeme 1995*, *Informatik aktuell*. Berlin, Heidelberg : Springer, 1995, S. 10–19

[264] PROFESSUR FÜR AUFBEREITUNG VON BAUSTOFFEN UND WIEDERVERWERTUNG: *Vorlesung C/Kapitel 6: Abbruchverfahren* (Präsentation). Weimar : Bauhaus Universität Weimar, 2013

[265] PROPELLERAERO: *The Drone Data & Analytics Platform for Worksites*. URL https://www.propelleraero.com/. - abgerufen am 2019-12-16

[266] PUTZMEISTER: *Ergonic 2.0 Systeme* (Broschüre). Aichtal, 2017

[267] RADIODETECTION SACHSEN: *Mit dem Bodenradar können alle Hohlräume geortet werden.* URL http://www.bodenradar.net/bodenradar-hohlräume/. - abgerufen am 2019-12-13

[268] REHMAN, ASIF: *Predictive Maintenance: The Untapped Advantages of Telematics for Construction*. URL https://blog.orbcomm.com/predictive-maintenance-the-untapped-advantages-of-telematics-for-construction/. - abgerufen am 2019-12-03

[269] REIN, STEFAN: *Kapazitätsauslastung im Baugewerbe* (Online-Publikation Nr. 14/2017). Bonn : Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), 2017

[270] REIN, STEFAN: *Bauwirtschaft kommt an Kapazitätsgrenze - BundesBauBlatt*. URL https://www.bundesbaublatt.de/artikel/bbb_Bauwirtschaft_kommt_an_Kapazitaetsgrenze_3116979.html. - abgerufen am 2020-01-30

[271] RINNEBERG, SUSANNE MIRIAM: *Assistenzfunktionen für Erdbaumaschinen mittels Identifikationstechnologie*. München, TU München - Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik, Dissertation, 2016

[272] ROBDEKON: *Robotersysteme für die Dekontamination in menschenfeindlichen Umgebungen*. URL https://robdekon.de/. - abgerufen am 2019-10-09

[273] ROBERT BOSCH GMBH: *Auto, wir müssen reden! Bosch bringt den Sprachassistenten hinters Steuer*. URL https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/auto-wir-muessen-reden-bosch-bringt-den-sprachassistenten-hinters-steuer-137856.html. - abgerufen am 2019-12-03

[274] ROBERT BOSCH GMBH: *Predictive Maintenance*. URL https://www.bosch-connected-industry.com/connected-manufacturing/nexeed-production-performance-manager/predictive-maintenance/. - abgerufen am 2019-12-03

[275] ROHLEDER, BERNHARD: *Digitalisierung des Handwerks* (Präsentation). Berlin : Zentralverband des deutschen Handwerks, 2017

[276] ROHRS, W. ; HAMME, T. VAN: Hydrauliksysteme in Standard-Baggern. In: *BMT. Baumaschine+ Bautechnik* Bd. 34 (1987), Nr. 7–8, S. 315–323

[277] ROPER, JACK: Magic touch. In: *IVTInternational* Bd. 27 (2019), Nr. 2, S. 30–36

[278] ROSE, STEFFEN: *Modellbildung und Simulation von mobilen Arbeitsmaschinen - Untersuchungen zu systematischen Modellvereinfachungen in der Simulation von Antriebssystemen am Beispiel Bagger*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Dissertation, 2017

[279] SAE J 3016:2018-06-15: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, Beuth (2018)

[280] SANDVIK AB: *Automine® Maschinenautomatisierung und Teleoperationssysteme — Sandvik Mining and Rock Technology*. URL https://www.rocktechnology.sandvik/de/produkte/automatisierung/automine-maschinenautomatisierung-und-teleoperationssysteme/. - abgerufen am 2019-10-09

[281] SCHACH, RAINER ; SCHUBERT, NADINE: Logistik im Bauwesen. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* Bd. 58 (2009), Nr. 1–2, S. 59–63

[282] SCHEDER, SILKE: *Kran kracht auf Wohnhaus*. URL https://www.merkur.de/lokales/bad-toelz/kran-umgekippt-wohnhaus-lenggries-5929279.html. - abgerufen am 2019-12-13

[283] SCHMIDT, HANS-HENNING ; BUCHMAIER, ROLAND F. ; VOGT-BREYER, CAROLA: *Grundlagen der Geotechnik: Geotechnik nach Eurocode*. 4., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014

[284] SCHMITT, ROLAND: *Die Schalungstechnik: Systeme, Einsatz und Logistik* : John Wiley & Sons, 2001

[285] SCHWAMBORN: *HiTech-Baumaschinen und Zubehör zum Schleifen, Fräsen, Glätten und Reinigen von Fußboden*. URL https://www.schwamborn.com/wds. - abgerufen am 2019-10-18

[286] SCHWING STETTER: *Ultra Eco/Ultra Life* (Broschüre). Herne, 2019

[287] SHARRY, ZOE: *Top Ten Heavy Equipment Manufacturers (2017/2018)*. URL https://blog.iseek-plant.com.au/blog/top-ten-heavy-equipment-manufacturers-2017-2018. - abgerufen am 2019-10-29

[288] SHIMIZU: *New SMART System*. URL http://www.shimz.com.sg/techserv/tech_con1.html. - abgerufen am 2019-09-30

[289] SIEGEMUND, STEFAN ; TROMMLER, MARCUS ; KOLB, OLE ; ZINNECKER, VALENTIN: *The Potential of Electricity-Based Fuels for Low-Emission Transport in the EU* (Studie). Berlin : Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2017

[290] SINGH, KAI ; CLOS, RAINER ; SCHREPPEL, ULRICH ; VEIT, PETER ; HAMANN, ANDREAS ; KLINGBEIL, DIETMAR ; SIEVERT, RAINER ; KÜNECKE, GEORGIA: Versagenssimulation dynamisch belasteter Proben mit unterschiedlichen Mehrachsigkeitszuständen unter Verwendung des Johnson-Cook-Versagensmodells für eine Nickelbasislegierung. In: *Technische Mechanik* Bd. 23 (2003), Nr. 2–3, S. 11

[291] SITECH DEUTSCHLAND GMBH: *Maschinensteuerungen für Bagger, Dozer und Grader von Caterpillar* (Broschüre). Oberhausen, 2012

[292] SITECH DEUTSCHLAND GMBH: *Maschinensteuerung DPS900 für Bohr- und Rammarbeiten*. URL https://www.sitech.de/produkte/maschinensteuerung/maschinensteuerung-dps900-fuer-bohr-und-rammarbeiten/. - abgerufen am 2019-10-30

[293] SOMMER, HANS: *Projektmanagement im Hochbau: 35 Jahre Innovationen bei Drees & Sommer*. 3., überarb. und erg. Aufl. Heidelberg : Springer, 2009

[294] SOßDORF, DARIUS: *MiC 4.0 startet mit ihren konkreten Arbeiten*. URL https://opcua.vdma.org:443/viewer/-/v2article/render/36050412. - abgerufen am 2019-10-29

[295] STAHN, BENNO: *Fachkräftemangel am Bau: Wer packt mit an?* URL https://www.bi-medien.de/artikel-35462-bm-fachkraeftemangel-baubranche-stahn.bi. - abgerufen am 2020-01-15

[296] 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

[297] STERN, SEBASTIAN ; STRUBE, GERNOT ; LOTZ, CARSTEN ; KUTZ, ANDRÉ: *Infrastruktur & Wohnen: Deutsche Ausbauziele in Gefahr* (Studie) : McKinsey & Company, 2018

[298] STUTTGARTER UNIKURIER: *Stuttgarter Unikurier Nr. 79/Juni 1998 - Wissenschaft & Praxis*. URL https://www.uni-stuttgart.de/presse/archiv/uni-kurier/uk79/wissen/a_s55.html. - abgerufen am 2019-10-24

[299] SUNFIRE: *Energy Everywhere*. URL https://www.sunfire.de/de/. - abgerufen am 2019-10-29

[300] TADANO DEMAG GMBH: *IC-1 Plus - Das Demag Traglast-Ermittlungs-System* (Broschüre). Zweibrücken, 2019

[301] TATA HITACHI: *Excavator | Construction & Mining Excavators from TATA Hitachi*. URL https://www.tatahitachi.co.in/. - abgerufen am 2019-10-29

[302] 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/tu-dresden/newsportal/news/tu-dresden-errichtet-erste-5g-baustelle-deutschlands-ingenieurwissenschaftler-koordinieren-9-mio-euro-verbundprojekt-zur-zukunft-des-bauens. - abgerufen am 2019-10-29

[303] TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN - PROFESSUR FÜR FLUID-MECHATRONISCHE SYSTEMTECHNIK: *Bauen_4.0*. URL http://vbp-b40.webspace.tu-dresden.de/. - abgerufen am 2019-10-29

[304] TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN - STIFTUNGSPROFESSUR FÜR BAUMASCHINEN: *Maschinen- und Prozesssimulation*. URL https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/imd/bm/forschung/forschungsschwerpunkte/index. - abgerufen am 2019-12-03

[305] TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN - STIFTUNGSPROFESSUR FÜR BAUMASCHINEN: *Arbeitsprozesse*. URL https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/imd/bm/forschung/forschungsschwerpunkte/arbeitsprozesse/index. - abgerufen am 2019-10-28

[306] TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN - STIFTUNGSPROFESSUR FÜR BAUMASCHINEN: *Smart Loader*. URL https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/imd/bm/forschung/forschungsschwerpunkte/bediener-und-assistenz/smart-loader. - abgerufen am 2019-10-08

[307] TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN - STIFTUNGSPROFESSUR FÜR BAUMASCHINEN: *CONPrint3D-Ultralight*. URL https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/imd/bm/forschung/forschungsschwerpunkte/arbeitsprozesse/conprint3d-ultralight/index. - abgerufen am 2019-10-08

[308] TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN - STIFTUNGSPROFESSUR FÜR BAUMASCHINEN: *digiCON^2 – digital concrete construction*. URL https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/imd/bm/forschung/forschungsschwerpunkte/arbeitsprozesse/digicon2. - abgerufen am 2019-10-08

[309] TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN - STIFTUNGSPROFESSUR FÜR BAUMASCHINEN: *BIMDrill*. URL https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/imd/bm/forschung/forschungsschwerpunkte/arbeitsprozesse/bimdrill. - abgerufen am 2019-10-08

[310] 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

[311] THURING, PATRIK: *Model Predictive Control Based Energy Management Algorithm for a Hybrid Excavator*. Lund, Sweden, Lund University - Department of Automatic Control, MSc Thesis, 2008

[312] THUY, TRANG NGUYEN HOANG ; SHYDLOUSKI, STANISLAV: Situations in Construction of 3D Mapping for Slam. In: *MATEC Web of Conferences*. Bd. 155, 2018

[313] TOPCON DEUTSCHLAND POSITIONING GMBH: *3D-Bau-Lösungen* (Broschüre). Hamburg, 2018

[314] TOPCON DEUTSCHLAND POSITIONING GMBH: *mmGPS für Fertiger*. URL https://www.topconpositioning.com/de/support/products/mmgps-f%C3%BCr-fertiger. - abgerufen am 2019-10-30

[315] TOYOTA: *Toyota Mirai*. URL https://www.toyota.de/automobile/mirai/index.json. - abgerufen am 2019-10-29

[316] TRENDS DER ZUKUNFT: *Hadrian X: Roboter baut ein komplettes Haus in zwei Tagen*. URL https://www.trendsderzukunft.de/hadrian-x-roboter-baut-ein-komplettes-haus-in-zwei-tagen/. - abgerufen am 2019-12-17

[317] TRIMBLE: *Trimble Earthworks Vers. 1.10: Bagger*. URL https://www.sitech.de/medien/aktuelles/neue-version-tew-uts-steuerung-und-swing-boom-support/. - abgerufen am 2019-12-13

[318] TRIMBLE CIVIL ENGINEERING AND CONSTRUCTION: *Maschinensteuerung für Bagger*. URL https://construction.trimble.com/de/Produkte-und-L%C3%B6sungen/Maschinensteuerung-Bagger. - abgerufen am 2019-10-28

[319] TU KAISERSLAUTERN: *AsiMAT – Assistenzsysteme zum sicheren und zuverlässigen Verrichten typischer Aufgaben im Tiefbau und im kommunalen Bereich*. URL https://agrosy.informatik.uni-kl.de/forschung/projects/archive/details/asimat-assistenzsysteme-zum-sicheren-und-zuverlaessigen-verrichten-typischer-aufgaben-im-tiefbau/. - abgerufen am 2019-10-29

[320] TU KAISERSLAUTERN: *Autonomer Fahrbetrieb von Nutzfahrzeugen im Off-Road-Bereich am Beispiel des Unimogs*. URL https://agrosy.informatik.uni-kl.de/forschung/projekte/?tx_researchproject_projectview%5Bproject%5D=106&tx_researchproject_projectview%5Baction%5D=show&tx_researchproject_projectview%5Bcontroller%5D=Project&cHash=8e893dd1ce56349ca883582beb1cffce. - abgerufen am 2019-10-29

[321] TU KAISERSLAUTERN: *SAFEGUARD - Verbundprojekt: Nutzfahrzeug-Assistenzsystem zur Steigerung des Sicherheitsniveaus auf Basis von Augmented Reality*. URL https://agrosy.informatik.uni-kl.de/forschung/projekte/details/safeguard-verbundprojekt-nutzfahrzeug-assistenzsystem-zur-steigerung-des-sicherheitsniveaus-auf-b/. - abgerufen am 2019-10-08

[322] TU MÜNCHEN - LEHRSTUHL FÜR FÖRDERTECHNIK, MATERIALFLUSS, LOGISTIK: *BauFlott - Entwicklung eines Flottenmanagementsystems für Baumaschinen*. URL https://www.mw.tum.de/fml/forschung/2016/bauflott-entwicklung-eines-flottenmanagementsystems-fuer-baumaschinen/. - abgerufen am 2019-10-08

[323] UHLMANN, JONAS ; BECK, BENJAMIN ; FISCHER, ERIK ; WEBER, JÜRGEN ; RICHTER, CHRISTIAN ; WILL, FRANK: Automatisierung von hydraulisch angetriebenen Erdbewegungsmaschinen: Teil 1 - Stand der Technik. In: *Mobile Maschinen* (2019), Nr. Nr. 5, S. 24–33

[324] VARIOHM: *Seilzugsensor Funktionsweise - Variohm EuroSensor Distributor*. URL https://www.variohm.de/news/detail.php?aid=74&did=Seilzugsensor-Funktionsweise. - abgerufen am 2019-12-13

[325] VDMA FACHVERBAND BAUMASCHINEN UND BAUSTOFFANLAGEN: *Daten und Fakten: Die deutsche Baumaschinen- und Baustoffanlagenindustrie Stand März 2018*. Frankfurt : VDMA, 2018

[326] VEMCON GMBH: *Toolmanagement zur Maximierung des Arbeitsmaschineneinsatzes*. URL https://www.vemcon.de/technologieplattform/toolmanagement/. - abgerufen am 2019-09-30

[327] VEMCON GMBH: *CoPilot*. URL https://www.vemcon.de/technologieplattform/bagger-copilot/. - abgerufen am 2019-10-28

[328] 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

[329] VERMESSUNGSTECHNIK ENGELMANN KG: *Bau - Maschinensteuerung - Maschinensteuerung*. URL http://www.vt-engelmann.de/bau/maschinensteuerung/maschinensteuerung.html. - abgerufen am 2019-12-13

[330] VÖLKEL MIKROELEKTRONIK GMBH: *VCC – Völkel Compaction Control®* (Broschüre). Münster, 2018

[331] VOLLMUTH, JAN: *Was Künstliche Intelligenz für die Maschinensicherheit bedeutet*. URL https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/was-kuenstliche-intelligenz-fuer-die-maschinensicherheit-bedeutet-a-859406/?xing_share=news. - abgerufen am 2019-10-29

[332] VOLVO CONSTRUCTION EQUIPMENT: *Volvo Wheel Loaders L110G, L120G* (Broschüre), 2011

[333] 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

[334] 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

[335] 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

[336] 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

[337] 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

[338] VOLZ CONSULTING GMBH: *BPO - Mehr als die Summe seiner Teile*. URL https://volzconsulting.de/bpo/. - abgerufen am 2019-08-15

[339] WACKER NEUSON: *WL20e - Radlader mit Elektroantrieb*. URL https://www.wackerneuson.de/de/produkte/radlader/knickgelenkte-radlader/model/wl20e/. - abgerufen am 2019-10-29

[340] WACKER NEUSON: *DW15e - Elektro-Raddumper*. URL https://www.wackerneuson.de/de/produkte/dumper/raddumper/model/dw15e/. - abgerufen am 2019-10-29

[341] WACKER NEUSON: *EZ17e und EZ26e - Elektro-Minibagger*. URL https://www.wacker-neuson.de/de/aktuelles/news/ez17e/. - abgerufen am 2019-10-29

[342] WANDELBOTS: *wandelbots – Teaching robots made easy*. URL http://www.wandelbots.com/. - abgerufen am 2019-10-09

[343] WANG, XI: *Assessing the Application of the Unmanned Aerial Systems (UAS) in Earthwork Volume Measurement*. Kentucky, USA, University of Kentucky, Dissertation, 2018

[344] WEBER, JÜRGEN: *TEAM - Entwicklung von Technologien für energiesparende Antriebe mobiler Arbeitsmaschinen* (Abschlussbericht). Dresden : Technische Universität Dresden, 2015

[345] WEBER, JÜRGEN ; BECK, BENJAMIN ; FISCHER, ERIK ; IVANTYSYN, ROMAN ; KOLKS, GIACOMO ; KUNKIS, MARCUS ; LOHSE, HARALD ; LÜBBERT, JAN: Novel System Architectures by Individual Drives. In: *10th International Fluid Power Conference*. Bd. 2. Dresden, 2016, S. 29 – 62

[346] WEBER, JÜRGEN ; LAUTNER, ERIK: Intelligente Baumaschinensteuerungen und alternative Antriebssysteme. In: *Fachtagung Baumaschinentechnik 2004: Forschung, Entwicklung, Innovation*. Magdeburg, 2004, S. 41–48

[347] WEBER, MATHIAS: *Cloud Computing - Was Entscheider wissen müssen* (Leitfaden). Berlin : BITKOM - Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V., 2010

[348] WEIMANN, KARIN ; MATYSCHIK, JAN ; ADAM, CHRISTIAN: *Optimierung des Rückbaus/Abbruchs von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RCMaterials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung* (Studie). Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt, 2012

[349] WENDEBAUM, JOCHEN: *Nutzung der Kerntemperaturvorhersage zur Verdichtung von Asphaltmischgut im Straßenbau*. Karlsruhe, Universität Fridericiana zu Karlsruhe - Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Dissertation, 2004

[350] 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

[351] WIENERBERGER: *Die Wienerberger Erfolgsgeschichte*. URL /de/presse/erfolgsgeschichte. - abgerufen am 2019-10-30

[352] WILKE, SIBYLLE: *Luftschadstoff-Emissionen in Deutschland*. URL https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland. - abgerufen am 2019-10-29

[353] WILL, FRANK ; HÄNEL, FRANK ; STENTZEL, CHRISTIAN: Antriebstechnik für Baumaschinen: Wohin geht die Reise? In: *GP GesteinsPerspektiven* (2019), S. 64–69

[354] WILL, FRANK ; WAURICH, VOLKER: *Cloudbasierte Systemarchitektur für Fahrerassistenzsysteme in Mobilen Arbeitsmaschinen*, *47. VDBUM Großseminar* (Präsentation). Willingen, 2018

[355] WINSUN: *Product Center-Yingchuang Building Technique （Shanghai）Co.Ltd. (WinSun)*. URL http://www.winsun3d.com/En/Product/pro_inner_5. - abgerufen am 2019-10-24

[356] WIRTGEN GMBH: *AutoPilot 2.0* (Broschüre). Windhagen, 2018

[357] WIRTGEN GMBH: *VÖGELE präsentiert smarte Lösung für die digitale Baustellen-Dokumentation - WIRTGEN NEDERLAND*. URL https://www.wirtgen-group.com/nederland/de/news-media/presseartikel/presseartikel-detailseite.183622.php. - abgerufen am 2019-12-03

[358] WIRTGEN GMBH: *Zuverlässige Intelligenz: Wirtgen Großfräsen der F-Series*. URL https://www.wirtgen.de/de/news-media/presseberichte/article-detail.178752.php. - abgerufen am 2019-10-25

[359] WIRTGEN GMBH: *WITOS FleetView - Big data für Baumaschinen*. URL https://www.wirtgen-group.com/de/news-media/presseberichte/witos-fleetview-big-data-fuer-baumaschinen.170310.php. - abgerufen am 2019-10-30

[360] WIRTGEN GMBH: *WIRTGEN Nivelliertechnologie*. URL https://www.wirtgen.de/de/technologien/schluesseltechnologien/nivelliertechnologie/nivelliertechnologie.php. - abgerufen am 2019-10-30

[361] WIRTGEN GMBH: *Nivelliersystem LEVEL PRO / LEVEL PRO PLUS*. URL https://www.wirtgen.de/de/technologien/schluesseltechnologien/nivelliertechnologie/nivelliersysteme/nivelliersysteme-levelpro.php. - abgerufen am 2019-10-30

[362] WRIGHT, GUS ; DUFFY, OWEN C. ; HEARD, SCOTT A.: *Fundamentals of Mobile Heavy Equipment* : Jones & Bartlett Learning, 2017

[363] 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

[364] XIMEA: *Remotely Operated Walking Excavator: XIMEA cameras inside. Bauma 2019*. URL https://www.ximea.com/en/exhibitions/excavator-munich-bauma-2019. - abgerufen am 2019-10-17

[365] YAMAZAKI, YUSUKE ; MAEDA, JUNICHIRO: The SMART system: an integrated application of automation and information technology in production process. In: *Computers in Industry* Bd. 35 (1998), Nr. 1, S. 87–99

[366] ZAK ZENTRALE ABFALLWIRTSCHAFT KAISERSLAUTERN: *„Testgelände“ für autonome Straßenwalzen*. URL https://www.zak-kl.de/node/995. - abgerufen am 2019-10-30

[367] ZEPPELIN BAUMASCHINEN GMBH: *AutoDig*. URL https://www.zeppelin-cat.de/produkte/cat-lader/autodig.html. - abgerufen am 2019-10-30

[368] ZORN, SOPHIE: *Modellbasierte aktive Schwingungstilgung eines Multilink-Großraummanipulators*. Dresden, Technischen Universität Dresden, Dissertation, 2018