

9. Fachtagung Baumaschinentechnik 2022

Automatisierung, Antriebssysteme, Bauverfahren

Bauen 4.0: Vernetzter, automatisierter Tiefbau am Beispiel Mobilbagger

Simon Köhler
Volker Waurich
Denis Ritz
Benjamin Beck
Jürgen Weber
Frank Will

Institut für
Mechatronischen
Maschinenbau
IMD



Dipl.-Ing. Simon Köhler
Institut für Mechatronischen Maschinenbau,
Professur für Fluid-Mechatronische Systemtechnik,
Technische Universität Dresden

Bauen 4.0: Vernetzter, automatisierter Tiefbau am Beispiel Mobilbagger

Die Betrachtung des Status Quo der Digitalisierung im Bausektor zeigt, dass viele Aspekte des digitalen Bauens bereits umgesetzt sind. Diese Lösungen sind jedoch häufig unzureichend kompatibel zueinander. Im Rahmen des Verbundforschungsprojektes Bauen 4.0 wurde daher ein an ISO 15143-1 angelehnter Systemarchitekturansatz entwickelt, bei dem die Bauausführung und die mobilen Arbeitsmaschinen im Fokus liegen. Den Kern des Datenaustausches auf der Baustelle bildet ein lokales 5G-basiertes Campusnetz, welches unabhängig von der oftmals unzuverlässigen öffentlichen Mobilfunkabdeckung ist. Die zentrale Datendrehscheibe auf der Baustelle bildet das sogenannte Baustellenleitsystem.

1. Einleitung

In der Baubranche, die vor zahlreichen Herausforderungen steht, werden viele Hoffnungen mit der Digitalisierung verknüpft. Zum einen besteht ein hoher Bedarf an Wohnungs- und Infrastrukturausbau, den die Baubranchen decken muss, und zum anderen verstärken sich zunehmend Kapazitätsengpässe, mit denen es umzugehen gilt. Diese Kapazitätsengpässe betreffen nicht nur die Verfügbarkeit geeigneter Fachkräfte, sondern auch von Baumaterialien und Bauflächen. Die Hoffnung beruht nun darauf mithilfe der Digitalisierung Bauabläufe zu optimieren. Die Einführung digitaler Prozesse bei Bauunternehmen hängt jedoch stark davon ab, ob dadurch eine Profitabilitätssteigerung zu erwarten ist. Grundsätzlich ist die Gewinnspanne im Baugewerbe im Vergleich zu anderen Branchen unterdurchschnittlich, wohingegen die Implementierung neuer Technologien wie Building Information Modeling (BIM) mit sehr hohen Kosten und damit letztendlich Risiken verbunden ist. [1]

In diesem Kontext stellt sich die Frage, was Digitalisierung im Bausektor bedeutet und bedeuten kann, sowie welche Aspekte eigentlich damit verbunden sind. Eine Studie der TU Wien [2] zu Potenzialen der Digitalisierung im Bauwesen zeigt beispielsweise für den gesamten Lebenszyklus eines Bauprojektes, d.h. Planen, Bauen und Betreiben, digitale Entwicklungspotenziale auf. Ziel ist die Schaffung eines sogenannten digitalen Bauprojektes, dessen Rückgrat ein BIM-Modell bildet. Die Autoren der Studie verstehen unter BIM-Modell ganz allgemein den interdisziplinären Arbeitsprozess auf Basis eines digitalen Gebäudemodells. Des Weiteren listen die Autoren für ein solches Bauprojekt zahlreiche, konkrete Aspekte entsprechend der drei Phasen auf. Dem Bauen werden z.B. digitale Lieferscheine, zentrales Datenmanagement, Tracking von Bauteilen, Robotik oder modulares Bauen, zugeordnet. Neben diesen inhaltlichen Aspekten wird auch auf wichtige Rahmenbedingungen für die Digitalisierung eingegangen. Dazu zählt beispielsweise die Definition geeigneter Schnittstellen für den Datenaustausch oder auch die Beachtung von Datenrechten und Verantwortlichkeiten. Auch die IT-Infrastruktur wird adressiert, welche als wesentlicher Baustein bei der Umsetzung von Digitalisierungsprojekten angesehen wird.

Im Rahmen dieses Beitrages werden Forschungsergebnisse zu einigen der skizzierten Aspekte der Digitalisierung in der Baubranche vorgestellt, welche im Rahmen des

Verbundforschungsprojektes „Bauen 4.0“ erarbeitet wurden. In Kapitel 2 wird zunächst der Status Quo der Digitalisierung auf Baustellen beleuchtet. Nachfolgend werden die implementierten Ergebnisse (Kapitel 4 bis 5) anhand eines typischen Szenarios aus der Bau-durchführungsphase im Tiefbaubereich dargestellt, welches in Kapitel 3 beschrieben wird. Im letzten Kapitel folgt noch einmal eine kompakte Schilderung und Einordnung des durch die Digitalisierungslösungen erzielten Mehrwertes.

2. Status Quo der Digitalisierung auf Baustellen

Vernetzung und Kommunikation

Für den drahtlosen Datenaustausch aller Akteure auf der Baustelle ist eine leistungsfähige Vernetzungslösung auf der Baustelle notwendig. Allgemeine Kriterien an eine solche Funktechnologie, je nach Anwendungsfall unterschiedlich stark ausgeprägt, sind: Datendurchsatz, Latenz, Ausfallsicherheit, Reichweite und Durchdringung, Anzahl an Teilnehmern und Sicherheit. Dabei stellt sich zudem die Frage, wer die Netzwerke zur Verfügung stellt. Mobilfunknetzwerke werden i.d.R. durch Netzbetreiber bereitgestellt, während lokale Netzwerke vom Anwender selbst betrieben werden müssen, womit natürlich ein gewisser Aufwand verbunden ist. Ein Positionspapier des VDE [3] listet aktuell verfügbare Funktechnologien, z.B. Mobilfunk (3G/4G), Wireless Local Area Networks (WLAN), Low Power WAN (LPWAN), Wireless Personal Area Networks (WPAN), oder Nahfeldkommunikation (RFID, Smart Tags), auf und analysiert diese hinsichtlich ihrer Eignung für Industrie 4.0 Anwendungen entsprechend der genannten Kriterien. Die Autoren kommen zu dem Erkenntnis, dass heutige Standards wie 4G im Mobilfunk oder 802.11 mit 2,4GHz Bändern bei WLAN für unkritische Anwendungsfälle, beispielsweise Diagnose und Wartung, häufig genügen. Technologische Weiterentwicklungen, z.B. der 5G Standard im Mobilfunk oder allgemein die Erschließung höherer Frequenzbänder, sind für kritische Anwendungsfälle erstrebenswert. Einen detaillierteren Vergleich von solchen Weiterentwicklungen, nämlich 5G, zu dem aktuellen WIFI 6 Standard (802.11ax) zeigt der Journal Beitrag [4]. Die Autoren bilanzieren in diesem, dass der hauptsächliche Unterschied der beiden Technologien in der sehr großen Flächenabdeckung durch den Mobilfunk darstellt. Im Bausektor haben sich mittlerweile einige Dienstleister darauf spezialisiert private Netzwerke, meist unter Nutzung von WLAN, für die Bauunternehmen auf den Baustellen bereitzustellen, siehe beispielhaft [5], [6], [7].

Datenaustausch und -verwaltung

Das Thema Datenaustausch und -verwaltung ist auf Baustellen ein sehr breitgefächertes Feld, weshalb hier der Fokus entsprechend dem Demonstrationsszenario einschränkend auf Bauausführungsunterlagen und Maschinenzustandsdaten gelegt wird. Ausführungsunterlagen werden laut einer aktuellen Umfrage im Rahmen einer Dissertation [8] oft über zweidimensionale Zeichnungen ausgetauscht (59%). Die häufig angewandten 3D-Maschinensteuerungen, welche den Bediener z.B. im Bagger bei der Erledigung von Erdbewegungsaufgaben unterstützen und im nachfolgenden Abschnitt näher beleuchtet werden, besitzen die Möglichkeit 3D-Daten für die Arbeitsaufgabe z.B. in Form von *.dxf, oder *.landxml Dateien zu importieren. Hierdurch ist prinzipiell eine Anbindung an BIM-

Softwarelösungen möglich. Der Normungsentwurf ISO 15143-4 [9] schlägt beispielsweise die Verwendung von *.landxml Dateien zum standardisierten Austausch der digitalen Geländemodell(DGM)-Auftragsdaten an mobile Arbeitsmaschinen vor. Der gezielte Datenrückfluss von Ergebnisgrößen in Form des sogenannten As-Built-Zustandes wird im Entwurf noch nicht berücksichtigt. Das empfohlene XML-Schema ist jedoch prinzipiell in dieser Hinsicht erweiterbar.

Mobile Arbeitsmaschinen nutzen zur Bereitstellung ihrer Maschinenzustandsdaten häufig eigene Connectivity-Gateways, siehe exemplarisch die Produkte der Firmen STW [10] oder Liebherr [11]. In der Regel funken diese Gateways über öffentlichen Mobilfunk allgemeine Zustandsdaten, wie die aktuelle Position der Maschine, welche die Maschinenhersteller aggregieren und aufbereiten. Schließlich integrieren die Hersteller diese Daten entweder in eigene Flottenmanagementsysteme, vgl. exemplarisch CareTrack [12] oder stellen diese über eine webbasierte Schnittstelle, nähere Erläuterungen hierzu in einer vorherigen Veröffentlichung [13], für externe Flottenmanagementsysteme bereit.

Allgemein zeigt sich bei der Betrachtung des Datenaustausches und der -verwaltung, dass viele einzelne Aspekte des digitalen Bauprojektes bereits umgesetzt sind. Diese Lösungen sind jedoch teilweise Insellösungen, die unzureichend zueinander kompatibel sind. Aufgrund der Vielzahl an beteiligten Softwarelösungen ist ein zentrales Datenmanagementsystem notwendig, wie auch die Studie der TU Wien [2] anmerkt. Die in der Studie aufgelisteten aktuellen Umsetzungen folgen dabei hauptsächlich dem in einer vorherigen Veröffentlichung [13] skizzierten Ansatz des Common Data Space Approach. Aspekte der Maschinenautomatisierung, die häufig performance-relevant sind, finden hier kaum Berücksichtigung und sind ferner schwierig in diesen Ansatz integrierbar. Generell fehlt oftmals die Berücksichtigung der mobilen Arbeitsmaschinen sowie der Bauausführung allgemein, wie auch in der bereits erwähnten Dissertation [8 S.34] kritisch angemerkt wird. Eine Beschreibung einer notwendigen Systemarchitektur für den Datenaustausch auf einer Baustelle mit Fokus auf der Bauausführung zeigt beispielsweise ISO 15143-1 [14].

Maschinenautomatisierung

Die bereits erwähnten 3D-Maschinensteuerungen sind seit geraumer Zeit für Hydraulikbagger am Markt erhältlich, siehe exemplarisch die Produkte der Firmen Leica [15], Trimble [16] und Topcon [17]. In erster Linie zeigen diese dem Maschinenbediener auf einem Display in der Baggerkabine den realen Bagger inklusive aktueller Position und Neigung in einem DGM an. Die Geländemodelle können dabei bereits die zu erledigenden Arbeitsaufträge, wie z.B. eine zu ziehende Böschung, enthalten oder aber diese können dort interaktiv erstellt werden. Die Steuerungen ermöglichen einerseits dem Bediener in Echtzeit sein Arbeitsergebnis, beispielsweise den aktuellen Böschungswinkel, zu betrachten und zu überwachen. Andererseits bieten diese zum Teil auch schon Automatisierungslösungen für leichte Erdbewegungsarbeiten an, so dass der Bediener z.B. zum Abziehen einer Böschung lediglich den linken Joystick zur Geschwindigkeitsvorgabe bedienen muss. Das automatisierte Leistungsbaggern ist dagegen ein Themenbereich, welcher noch aufgrund diverser Herausforderungen wie der Erkennung und der Umgang mit Hindernissen, in der Forschung intensiv bearbeitet wird. Einige Forschungsdemonstratoren hierzu finden sich in einem Fachartikel [18].

3. Beispielszenario Entwässerungsleitung

Das beispielhafte Szenario, die Herstellung einer Entwässerungsleitung entsprechend DIN EN 1610 [19], stammt aus dem Kommunalbau, und wird aus Anschaulichkeitsgründen folgendermaßen vereinfacht. Grundsätzlich sind fünf Arbeitsschritte notwendig:

- **Rohrgrabenaushub:** Initial muss zur Herstellung der Entwässerungsleitung ein Rohrgraben mit entsprechender Rohrgabengeometrie, beispielsweise 5x0,8x1,25 m mit Gefälle 0,5% ausgehoben werden.
- **Bettungsschicht:** Im Anschluss an den Aushub erfolgt die Herstellung einer Bettschicht für das Rohr, indem beispielsweise Sand eingefüllt und verdichtet wird.
- **Rohreinbau:** Das Rohr muss zuerst im Graben grob positioniert und im Anschluss daran in die bestehende Leitung eingefädelt werden.
- **Bettungsschicht und Seitenverfüllung:** Für eine stabile Rohrposition muss eine Erdschicht mit einer definierten Schichtdicke um das Rohr herum verdichtet werden. Es folgt eine lokale, mehrstufige Verdichtung unter Beachtung der Einhaltung der Rohrposition.
- **Abdeckung:** Am Ende ist eine entsprechend zur Erreichung der initial vorgegebenen Erdhöhe finale Abdeckschicht herzustellen.

Zur Erledigung der Bauaufgabe „Entwässerungsleitung“ wird im einfachsten Fall ein Hydraulikbagger inkl. Maschinenbediener und diverser Anbauwerkzeuge, d.h. Grablöffel, Anbauverdichter, Universalverdichter, Rohrgreiferzange und Rohrschiebeadapter, sowie einen Hilfsarbeiter, der bei der Positionierung der Rohre unterstützt, benötigt. Für die Qualitätssicherung wird die Einbaulage der verbauten Rohrleitung vermessen sowie benötigte Zeit, bewegte Massen und ggf. Verdichtungskennwerte ermittelt.

Für die digitale und modellbasierte Bauausführung unter Berücksichtigung des Einsatzes automatisierter Maschinen ist jedoch eine formalisierte Beschreibung der Arbeitsaufgabe notwendig, welche die eben skizzierten spezifischen Aspekte prinzipiell umfassen muss. Ein Modell für eine allgemeingültige Aufgabenbeschreibung einer Bauaufgabe umfasst in Anlehnung an ISO 15143-1 [14] folgende Daten:

- **Basic Project Data:** Allgemeine Daten für die Projektzuordnung wie Name, Ort, Laufzeit, Auftraggeber, Stationsnummer
- **Design Data:** Daten für die zu erzeugende Geometrie zum Planungsstand wie bspw. CAD- oder BIM-Modelle
- **Construction Planning Data:** Informationen zur Geometrie, technischen Umsetzung, Qualitätskontrolle, Fortschrittskontrolle, Materialien, Einrichtung von Maschinen und Material zum Zeitpunkt mit Beginn des Bauvorhabens
- **Mission Data:** Teil der Construction Planning Data zur Spezifikation des vollständigen Maschineneinsatzes über alle Einzelarbeitsschritte (Beispielhafte Daten sind: zu verwendende Maschinen, Werkzeuge und Personal, Arbeitsbereiche, Fahrstrecken Sperrbereiche, Lagerbereiche, Materialeigenschaften etc.)

- **Target Data:** aufbereitete Geometrie-, Material- und Qualitätsvorgaben für die Durchführung der Bauaufgabe durch eine Maschine oder manuelle Arbeit, bspw. Verdichtungsvorgaben oder Informationen zum Schichtaufbau

Zur Qualitätssicherung und allgemein zum Projektcontrolling werden folgende Informationen hinsichtlich des Bauprojektes benötigt und unter dem Begriff **Achieved Work Data** zusammengefasst:

- **Construction Checking Data:** Arbeitsprotokoll über eingesetzte Maschinen, Personal, Werkzeuge, etc., welches mit der Mission Data abgeglichen wird
- **As-Built Data:** Tatsächlich umgesetzte Geometrie und Qualität, welche mit der Target-Data verglichen wird
- **Machine Working Record:** Protokoll des spezifischen Maschinenzustands während der Arbeitsaufgabe, bspw. bewegte Masse, Kraftstoffverbrauch, zurückgelegte Distanz, etc.
- **Measurement Record:** Protokoll des Zustands des Bauobjekts während der Arbeitsaufgabe, bspw. Massenbilanz, DGM, Höhenprofil, gemessene Schichtdicken, Verdichtungswerte

4. Systemarchitektur digitaler, automatisierter Tiefbau

Vernetzung und Kommunikation

Als leistungsfähige Lösung für die lokale und mobile Vernetzung einer Baustelle ohne Notwendigkeit einer öffentlichen Mobilfunkabdeckung, wurde ein 5G-basiertes Campusnetz eingesetzt. Ein solches Campusnetz verspricht wie im Stand der Technik geschildert zudem im Vergleich zu WLAN-Lösungen eine höhere Baustellentauglichkeit aufgrund einer zuverlässigeren Signalübertragung im Outdoor-Einsatz. Alle vorhandenen Teilnehmer müssen folglich in der Lage sein sich mit dem Campusnetz zu verbinden. Endgeräte, wie Tablets oder Smartphones, benötigen dazu einen 5G-fähigen Mobilfunkchip und eine spezielle SIM-Karte um sich mit dem „privaten“ Mobilfunknetzwerk zu verbinden. Für mobile Arbeitsmaschinen, wie dem Mobilbagger aus dem Beispielszenario, ist im Rahmen des Verbundprojektes ein 5G-basiertes Connectivity-Modul (Telematikeinheit) entstanden, mit dem auch die weiteren Demonstratormaschinen ausgerüstet sind. Das Connectivity-Modul besitzt außerdem Schnittstellen wie CAN und Ethernet, um wiederum mit den lokalen Teilnehmern auf den mobilen Arbeitsmaschinen, z.B. der 3D-Maschinensteuerung des Mobilbaggers, zu kommunizieren. Das zentrale Datenmanagementsystem auf der Baustelle, welches im Verbundprojekt als Baustellenleitsystem (BLS) bezeichnet und auf einem Edge Cloud Server ausgeführt wird, ist per LAN mit dem Core-Netzwerk verbunden und hat so Zugriff auf alle Teilnehmer im Campusnetz. Das BLS besitzt zudem eine Internetanbindung, um Anwendungen wie das Flottenmanagement auf Basis der ISO 15143-3 [20] zu integrieren.

Middleware-Ansatz

Grundsätzlich wurde für die Vernetzung der Maschinen auf der Baustelle ein Middleware-Ansatz unter Nutzung von OPC Unified Architecture (OPC UA) gewählt. Dies ermöglicht

einerseits eine interoperable Kommunikation auf der Baustelle zwischen den Teilnehmern, d.h. vorrangig den mobilen Arbeitsmaschinen und dem Baustellenleitsystem. Andererseits wird aber hierdurch auch Interoperabilität auf den mobilen Arbeitsmaschinen selbst ermöglicht, was wiederum für die Maschinenautomatisierung vorteilhaft ist, siehe Kapitel 5. Weitere Erläuterungen zur Nutzung von OPC UA als Middleware-Technologie finden sich in einer vorherigen Veröffentlichung [21]. Die OPC UA basierte Vernetzung zeigt Abbildung 1.

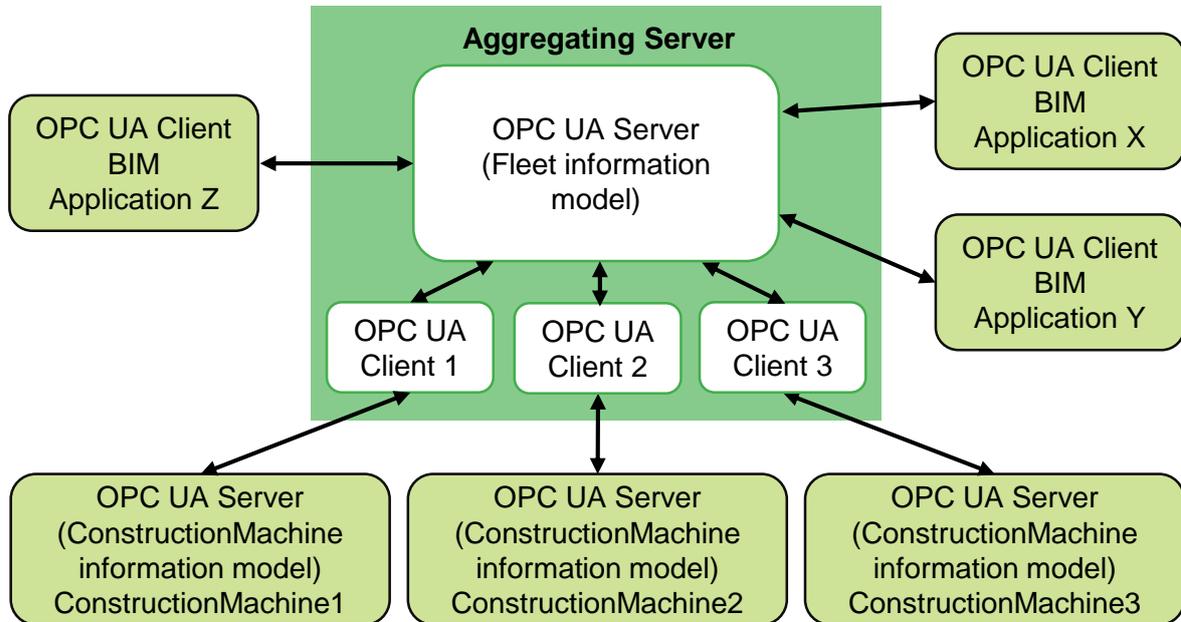


Abbildung 1: Aggregation Server Architektur mit verbindungsorientiertem OPC UA

Grundsätzlich bietet jede mobile Arbeitsmaschine ihre Informationen und Services über einen OPC UA Server an, der auf dem Connectivity-Modul gehostet wird. Das Baustellenleitsystem wiederum nutzt einen sog. Aggregating Server, der über OPC UA Clients die Daten aller mobilen Arbeitsmaschinen aggregiert und als Schnittstelle zu den einzelnen BIM-Anwendungen fungiert. Dieser Ansatz ermöglicht eine zuverlässige, geschützte und lokale Verarbeitung von Informationen in Echtzeit und er ist darüber hinaus flexibel anpassbar und skalierbar.

Baustellenleitsystem (BLS)

Das BLS ist die zentrale Datendrehscheibe auf der Baustelle und ist stark an dem in ISO 15143-1 [14] eingeführten Site Information System angelehnt. In erster Linie ist das BLS eine Micro-Service-basierte Softwareumgebung, welche im lokalen Edge Cloud Server ausgeführt wird. In einer Umgebung von virtuellen Maschinen mit definiertem Zugangsrechten befinden sich grundlegende Micro-Services wie das Abrufen der Maschinendaten. Darüber hinaus sind auch individuelle Micro-Services möglich, so dass auf Basis der Maschinendaten Funktionen wie Verbundautomatisierung, Logistikoptimierung oder Entscheidungshilfen für die Bauleitung umgesetzt werden können. Eine Kategorisierung von Funktionalitäten zeigt Abbildung 2.

Funktional kann das BLS in drei Bereiche eingeteilt werden:

1. die Anbindungen an das Projektmanagement (orange im Bild 2),

2. die Anbindung an die mobilen Arbeitsmaschinen (blau im Bild 2) und
3. einen internen Bereich zur Datenverarbeitung sowie die Orchestrierung bestehend aus mehreren Micro-Services (grün im Bild 2).

Die mobilen Arbeitsmaschinen bieten ihre jeweiligen Betriebsdaten an, die vom BLS über den bereits erwähnten Mechanismus aggregiert werden. Außerdem besteht die Möglichkeit des FileTransfer auf Grundlage der OPC UA Core Specification [22]. Dies wird für das Hochladen von Auftragsdaten oder das Abfragen der As-Built-Daten genutzt. Für die Definition einer Arbeitsaufgabe wird das Format LandXML verwendet. Ursprünglich zur Definition von Digitalen Geländemodellen und Geometriedaten für den Infrastrukturbereich gedacht, wird das Format entsprechend den Erkenntnissen aus Kapitel 3 um aufgabenspezifische Daten wie Arbeitsbereiche, Sperrbereiche oder Lagerplätze sowie Informationen für den automatisierten Betrieb der Maschine ergänzt. Nähere Erläuterungen zur (teil-) automatisierten Bearbeitung der Auftragsdaten sowie Generierung der Ergebnisdaten finden sich in Kapitel 5.

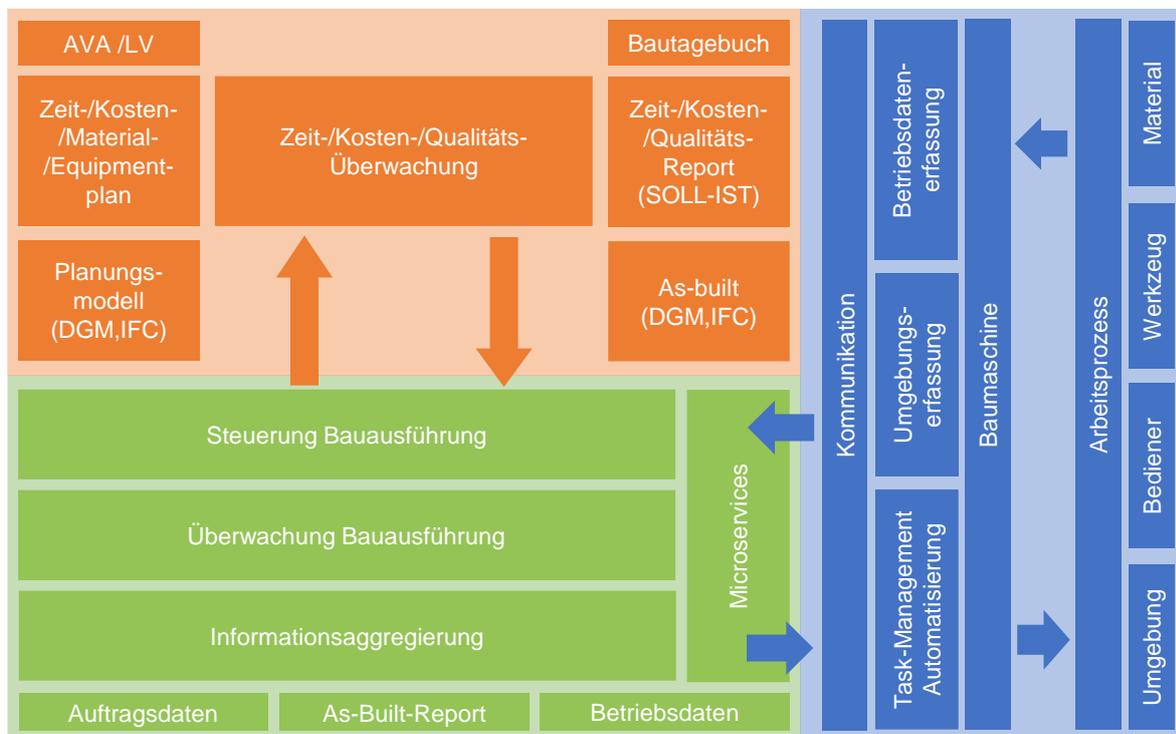


Abbildung 2: Funktionaler Aufbau des Baustellenleitsystems (BLS)

Das Projektmanagement wird über eine webbasierte Schnittstelle (REST-API) angebunden. Hierüber können Dateien angefordert werden, die zuvor von einem Micro-Service aufbereitet wurden. Beispielsweise werden aus dem OPC UA Datenmodell des Baggers die in ISO 15143-3 [20] definierten Telematikdaten als JSON-codiert und in ein Flottenmanagementsystem (Onestop Pro®) integriert. Das BLS kann somit eine Verknüpfung von formalisierten Arbeitsaufgaben zur automatisierten Maschinenfunktionen schaffen. Über ein Echtzeitabbild der Maschinenzustände ist eine Prozesssteuerung auf minimalen Zeitskalen möglich um bspw. Logistik und Disposition zu optimieren. Durch das auftragsbezogene Arbeiten können alle Arbeitsergebnisse den Planungsdaten sowie den Posten im Leistungsverzeichnis zugeordnet und abgerechnet werden.

Workflow Beispielszenario

Abbildung 3 illustriert den grundsätzlichen Workflow von **Mission Data** und **As-Built Data** anhand des Beispielszenarios. Die grauen Ebenen zeigen die verschiedensten Netzwerkschichten, wobei die jeweiligen Schnittstellen dazwischen beschrieben sind. Vom Projektmanagement im oberen Abschnitt der Abbildung bis hin zur Ausführung mit dem Mobilbagger im unteren Abschnitt wird der Signalfluss aufgezeigt. Die grün umrandeten Boxen weisen auf Softwarefunktionen bzw. Micro-Services hin. Liegt ein aktuelles Planungsmodell vor, so wird dieses vom Server des Planers abgeholt. Hierbei wird bevorzugt auf das im BIM-Bereich weit verbreitete *.ifc Dateiformat gesetzt. Im BLS muss die meist sehr umfangreiche *.ifc Datei in einen Auftrag für den Bagger im lokalen Baustellenkoordinatensystem umgerechnet werden. Im Ergebnis steht eine annotierte *.landxml Datei, welche die topographischen Auftragsdaten inkl. zusätzlicher Informationen wie Qualitätsvorgaben für die Herstellung des Rohrgrabens enthält (**Target Data**). Via OPC UA FileTransfer wird diese Datei vom BLS zum Connectivity Modul auf dem Bagger gesendet. Dort findet eine Weiterverarbeitung in Einzeltrajektorien statt, die der Bagger dann nach Bestätigung und Initiierung des Bedienpersonals automatisch ausführt. Ist der Auftrag abgearbeitet, wird der As-Built Zustand folgendermaßen aufgenommen. Zum einen wird der Rohrgraben optisch mit einer Time-of-Flight Kamera erfasst und zum anderen werden über ein RTK-GNSS-System Punkte des verlegten Rohrs mit der Löffelspitze des Baggers aufgenommen. Beide Ergebnisse liegen dann wiederum als *.landxml Datei für den FileTransfer des As-Built Zustandes (**As-Built Data**) auf dem OPC UA Server bereit und werden bei Bedarf über das BLS dem Planer übermittelt. Nach Beendigung der Arbeitsaufgabe werden die Verläufe der Maschinenzustandsdaten während der Bauaufgabe der Aufgabenbeschreibung zugewiesen. Somit können bewegte Massen, Kraftstoffverbräuche, Betriebsstunden etc. den Aufträgen zugeordnet werden (**Machine Working Record**).

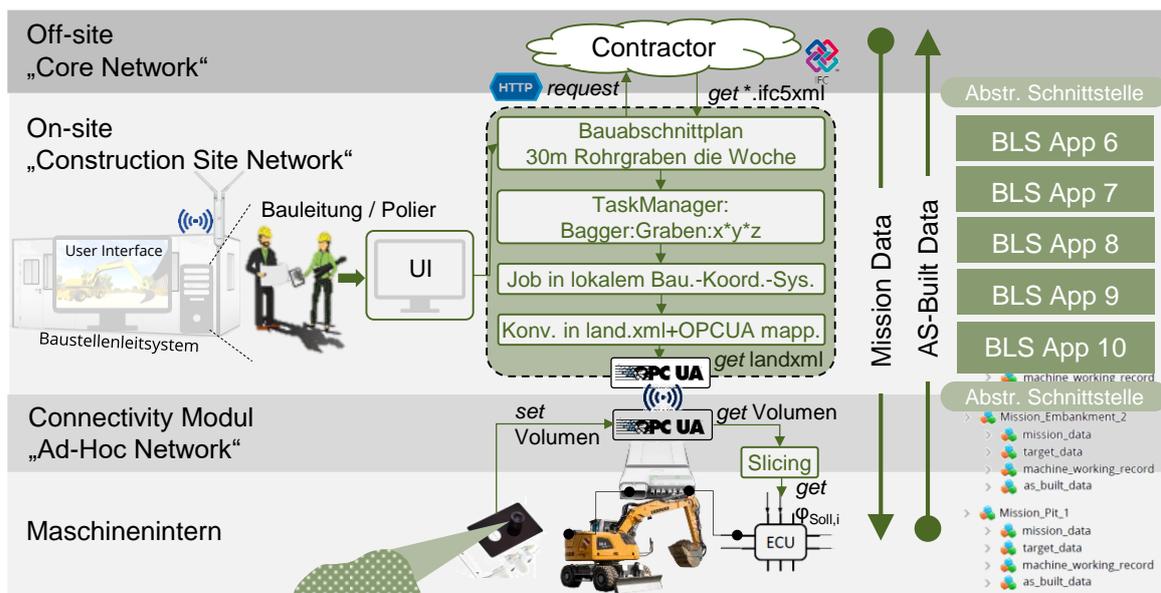


Abbildung 3: Funktionaler Aufbau des Baustellenleitsystems (BLS)

5. Maschinenautomatisierung

Für die Automatisierung des im Projekt verwendeten Mobilbaggers wurde eine modulare und erweiterbare Architektur entwickelt, siehe Abbildung 4. Prinzipiell besteht diese aus den drei Subkomponenten Hydraulikansteuerung, 3D-Maschinenautomatisierung und Maschinen-Server, welche die vollumfängliche Automatisierung der mobilen Arbeitsmaschine ermöglichen und damit über den Stand der Technik aktueller 3D-Maschinensteuerungen hinausgeht. Die Subkomponenten kommunizieren dabei hauptsächlich via Ethernet bzw. OPC UA und proprietären CAN.



Abbildung 4: Automatisierungsarchitektur des Mobilbaggers

3D-Maschinenautomatisierung

Die 3D-Maschinenautomatisierung wiederum besteht aus den drei Teilfunktionalitäten Aufgabenplanung, Trajektoriengenerator und Baufortschrittskontrolle, siehe Abbildung 5. Die drei genannten Module sind dabei so gekapselt, dass Sie unabhängig voneinander ihre jeweils spezifische Aufgabe erfüllen und lediglich zu Berechnungsende bzw. -anfang definierte Daten miteinander austauschen.

Die Aufgabenplanung stützt sich in der verwendeten Umsetzung rein auf geometrische Parameter der verwendeten Maschine. Genauer gesagt wird ein definierter, maschinenspezifischer Arbeitsbereich für die Planung der Grabaufgaben verwendet, welcher vorher als 3D-Körper anhand der Kinematik der Maschine und der verwendeten Werkzeuge erstellt wird. Das Ergebnis der Aufgabenplanung sind die anhand der aktuellen, georeferenzierten Position der Maschine, dem konkreten Arbeitsbereich und der konkreten Grabaufgabe erstellten Bahnkurven für den Tool-Center-Point (TCP) des Löffels. Das sequentielle Abfahren dieser Bahnkurven durch die Maschine ermöglicht im Idealfall die Umsetzung der Bauaufgabe, ähnlich des sogenannten G-Codes für Werkzeugmaschinen.

Der Trajektoriengenerator berechnet mittels der theoretischen Bahnkurven die konkreten Bewegungsbahnen für die Maschine. Dabei wird die Dynamik des gesamten Antriebsstrangs berücksichtigt, welche maßgeblich durch die Stelldynamik des Hydrauliksystems

und der Hydraulikansteuerung beeinflusst wird. Die hier hinterlegten Algorithmen sind auf die spezifische kinematische Konfiguration aus Arbeitsmaschine und Anbauwerkzeug abgestimmt. Dies kann zwar für die entsprechenden Konfigurationen generalisiert erfolgen, jedoch variiert hier die Anzahl der Freiheitsgrade der Kinematik je nach Maschine stark. Beispielsweise erhöht sich der Freiheitsgrad bei einem Bagger durch Nutzung eines Verstell- statt eines Monoblockauslegers oder dem Einsatz von Schwenk- statt konventionellen Löffeln. Als Ausgangssignale des Trajektoriengenerators werden Sollzylinderlängen und -geschwindigkeiten zur Ansteuerung der Arbeitshydraulik berechnet, welche via CAN an die entsprechende ECU zur Hydraulikansteuerung versendet werden.

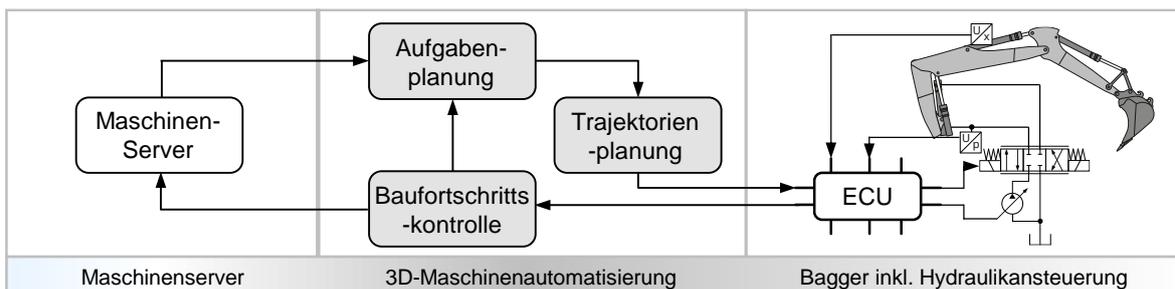


Abbildung 5: 3D-Maschinenautomatisierung

Der letzte Baustein, die Baufortschrittskontrolle, ist während der Erstellung dieser Veröffentlichung noch nicht final implementiert. Das grundsätzliche Ziel dieses Bausteins ist die Erfassung des Baufortschritts. Dieser soll entweder als Grundlage für entsprechende Aktualisierungen der Grabaufgabe oder für die Dokumentation des As-Built Zustandes dienen. Zur Erfassung kann einerseits die auf der Maschine verwendete Sensorik der Achsansteuerung genutzt werden, um anhand der tatsächlich abgefahrenen Bahnkurve z.B. die geplante Fläche oder ausgehobene Grube zu berechnen. Nachteilig ist, dass das reale Verhalten des Materials nicht berücksichtigt wird. Des Weiteren kann zur Erfassung des Baufortschrittes 3D-Sensorik wie z.B. eine Time-of-Flight-Kamera oder ein LiDAR-System zum Einsatz kommen. Nachteilig ist hierbei meist das eingeschränkte Sichtfeld der Sensoren. Idealerweise wird anhand der Rohdaten der Achs- und 3D-Sensoren eine Sensordatenfusion durchgeführt um die prinzipbedingten Nachteile beider Systeme auszugleichen.

Zur Interaktion des Maschinenbedieners mit der 3D-Maschinenautomatisierung wurde eine GUI implementiert. Diese ist prinzipiell so strukturiert, dass die eben beschriebenen einzelnen Bausteine entsprechend angesteuert werden können. Genauer gesagt lassen sich über die Bedienungselemente die topographischen Daten der Grabaufgabe vom BLS einlesen, ein Trajektorienplan daraus ableiten, die Automatisierung der Maschine starten und schließlich der As-Built Zustand an das BLS zurückschicken. Abbildung 6 zeigt die GUI mit dem für das Beispielszenario definierten Rohrgraben.

Hydraulikansteuerung

Zur automatisierten Erledigung von Erdbewegungsaufgaben ist eine entsprechende Ansteuerung des Antriebssystems notwendig, welche die geforderte Positionierung der Arbeitsausrüstung ermöglichen soll. Theoretisch sind für diese Ansteuerung zwei Varianten denkbar, zum einen die Vorgabe der Position und Orientierung des TCP des aktuellen

Anbaugerätes und zum anderen die Vorgabe von Stellwerten für die einzelnen Aktoren. Der entscheidende Unterschied dabei ist die Stelle, an welcher die inverse Kinematik berechnet wird. Aus zwei Gründen wurde sich für letztere Variante entschieden. Zum einen weisen mobiltaugliche Steuergeräte, welche die Sicherheitsnormserie IEC 61508 [23] erfüllen, immer noch eingeschränkte Rechenkapazitäten auf. Die aufwändige Berechnung der inversen Kinematik auf dem Steuergerät würde daher die Einhaltung der Taktrate stark gefährden. Zum anderen erfolgt die konventionelle Bedienung der Maschinen klassischerweise durch Vorgabe von Aktorgeschwindigkeiten mit Joysticks. Die Hydraulikansteuerung bietet somit eine CAN-basierte Schnittstelle nach außen an, die beliebig von der 3D-Maschinenautomatisierung oder der Grundsteuerung des Baggers genutzt werden kann. Des Weiteren lassen sich dadurch auch Fernhantierungssysteme leicht integrieren. Diese müssen lediglich bestimmte Rahmenbedingungen der CAN-Kommunikation einhalten.

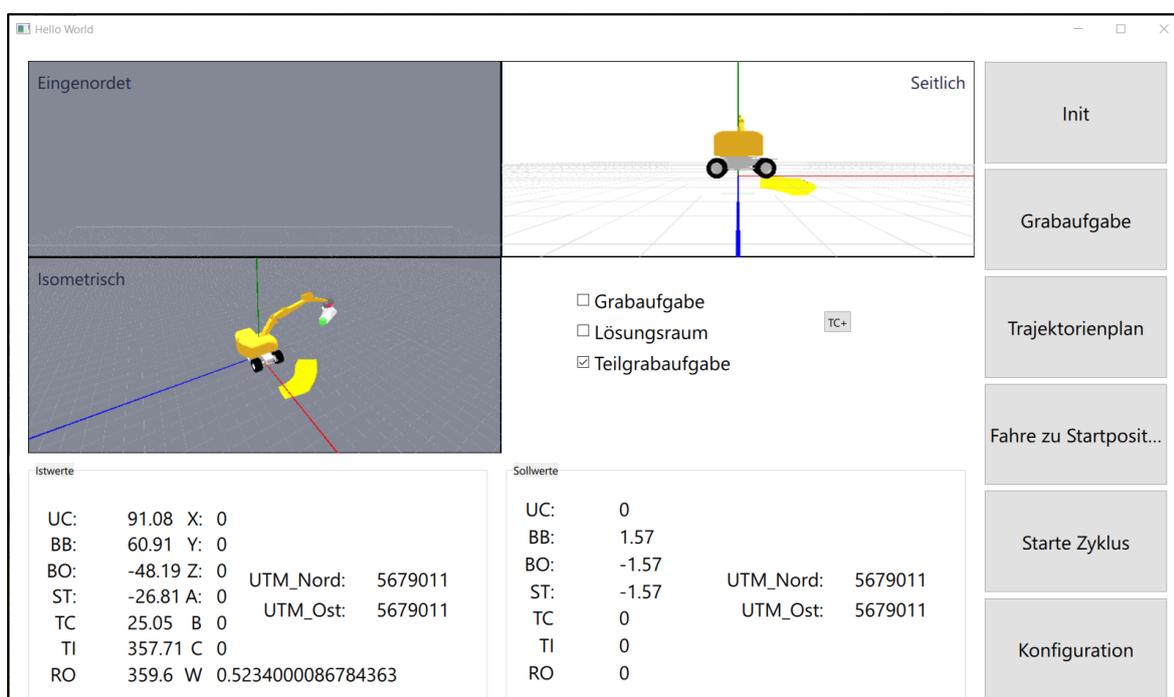


Abbildung 6: GUI der 3D-Maschinenautomatisierung

Für den im Rahmen des Projektes genutzten Mobilbagger sind die verwendeten Algorithmen in einer vorherigen Veröffentlichung [24] ausführlich erläutert. Der Grundgedanke der Ansteuerung ist es, die spezifischen Eigenschaften des Hydrauliksystems in einer nichtlinearen, statischen, modellbasierten Steuerung abzubilden. Als Eingangssignale der Steuerung dienen grundsätzlich die Sollaktorgeschwindigkeiten, wobei zusätzlich die Sollpositionen der einzelnen Aktoren in einem überlagerten Regelkreis berücksichtigt werden können. Somit kann ein genaueres, adaptiveres Stellverhalten als mit einer reinen Steuerung erzielt werden.

Maschinen-Server

Zur zentralen Datenhaltung auf der Maschine kommt ein OPC UA Server, welcher auf dem Connectivity-Modul gehostet wird, zum Einsatz. Dieser dient wie eben geschildert haupt-

sächlich der Kommunikation zwischen 3D-Maschinenautomatisierung und dem Baustellenleitsystem zum Austausch der **Target Data** und der **As-Built Data**. Des Weiteren bietet dieser auch über den aktuellen Standard für Erdbewegungsmaschinen [20] hinausgehende Informationen an (**Machine Working Record**). Ausführlichere Erläuterungen bzgl. der bereitgestellten Daten und Services im Hinblick auf die Maschinensicherheit und das Hydrauliksystem der Arbeitsausrüstung finden sich in der Veröffentlichung [25].

6. Zusammenfassung und Ausblick

In der Baubranche beruht die Hoffnung darauf mithilfe der Digitalisierung Bauabläufe zu optimieren. Die Implementierung neuer Technologien wie Building Information Modeling (BIM) ist jedoch mit sehr hohen Kosten und folglich Risiken verbunden. Allgemein zeigt sich bei der Betrachtung des Status Quo der Digitalisierung, dass viele einzelne Aspekte des digitalen Bauens bereits umgesetzt sind. Diese Lösungen sind jedoch häufig Insellösungen und unzureichend kompatibel zueinander. Aktuelle Datenmanagementsysteme folgen beispielsweise mehrheitlich dem Ansatz des Common Data Space Approach, wobei Aspekte der Maschinenautomatisierung nur schwer integrierbar sind. Im Rahmen des Verbundforschungsprojektes „Bauen 4.0“ wurde daher ein auf ISO 15143-1 beruhender Systemarchitekturansatz entwickelt, bei dem die Bauausführung und die mobilen Arbeitsmaschinen in den Fokus gestellt werden. Den Kern des Datenaustausches auf der Baustelle bildet dabei ein lokales 5G-basiertes Campusnetz, welches unabhängig von der oftmals unzuverlässigen öffentlichen Mobilfunkabdeckung ist. Die zentrale Datendrehscheibe auf der Baustelle bildet das sogenannte Baustellenleitsystem (BLS). Das BLS ist eine Micro-Service-basierte Softwareumgebung, welche in einem lokalen Edge Cloud Server innerhalb des 5G-Campusnetzes ausgeführt wird. Mit Hilfe von Micro-Services werden einerseits Anbindungen an Projektmanagementsysteme und an mobile Arbeitsmaschinen ermöglicht und andererseits Daten verarbeitet sowie ihr Austausch orchestriert. Dadurch wird ein durchgängiger Datenfluss von der digitalen Erstellung des Bauobjektes, d.h. die Entwässerungsleitung im Beispielszenario, bis hin zur digitalen Repräsentation des tatsächlich gebauten Objektes ermöglicht. Grundsätzlich wurde für die Vernetzung auf der Baustelle die Middleware OPC Unified Architecture (OPC UA) verwendet, wodurch eine interoperable Kommunikation zwischen den mobilen Arbeitsmaschinen und dem BLS, aber auch Interoperabilität auf den mobilen Arbeitsmaschinen selbst gewährleistet wird. Für die Automatisierung des im Projekt verwendeten Mobilbaggers wurde eine modulare und erweiterbare Architektur entwickelt, welche eine vollumfängliche Automatisierung ermöglicht und den aktuellen Stand der Technik von 3D-Maschinensteuerungen übersteigt.

Einen wesentlichen Bestandteil weiterführender Arbeiten, stellt die Erprobung, Optimierung und damit der Nachweis der Tauglichkeit der entwickelten Lösungen dar. Hierfür mangelt es aktuell an geeigneten und qualifizierten Test- und Prüfmöglichkeiten. Daher hat eine Expertengruppierung von 5 Professuren ein neuartiges Forschungskonstrukt ins Leben gerufen, das Construction Future Lab (CFLab). Das CFLab“ ist eine unabhängige, außeruniversitäre Forschungs- und Entwicklungseinrichtung, welche sich auf die Kernfelder des digitalisierten Bauens konzentriert. Den Kern bildet ein umfangreiches Großdemonstrations- und Testareal mit entsprechender infrastrukturellen Ausrüstung. Neben einem

leistungsfähigen Kommunikations- und Testequipment sollen baustellentypische Arbeitsstationen und Wegstrecken abgebildet werden, ohne jedoch die Risiken und Einschränkungen eines realen Baustellenbetriebs aufzuweisen.

7. Förderhinweis

Das diesem Bericht zugrundeliegende Verbundprojekt „Bauen 4.0“ wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02P17D230 gefördert.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Literaturverzeichnis

- [1] Kocijan, M., „Digitalisierung im Bausektor“, ifo Schnelldienst, ISSN 0018-974X, ifo Institut - Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München, München, Vol. 71, Iss. 01, pp. 42-45.
- [2] Goger, G., Pisternik, M., Urban, H., „Studie: Potenziale der Digitalisierung im Bauwesen“, Berichte aus Energie- und Umweltforschung, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2017.
- [3] Ismet, A. et al., „Funktechnologien für Industrie 4.0“, VDE Positionspapier, 2017.
- [4] Oughton, Edward J., et al., „Revisiting wireless internet connectivity: 5G vs Wi-Fi 6“, Telecommunications Policy, 2021.
- [5] ASCEND GmbH, „Baustellenkommunikation / Baustellen WLAN / Baustelleninternet“, <https://www.ascend.de/wlan-auf-dem-bau/>, (zugegriffen Sep. 02, 2022).
- [6] German Hotspot, „WLAN für Baustellen – Internetzugang auch unter rauen Bedingungen“, <https://germanhotspot.de/ratgeber/wlan-fuer-baustellen-internetzugang-auch-unter-rauen-bedingungen/>, (zugegriffen Sep. 02, 2022).
- [7] CN GmbH + Co. KG, „Die mobile ICN-Baustellenanbindung“, <https://www.icn.de/bauwirtschaft/mobile-baustellenanbindung/>, (zugegriffen Sep. 02, 2022).
- [8] Kölzer, T., „Einflüsse der Digitalisierung auf Baustellenarbeitsprozesse“, Technischen Universität Hamburg, 2021.

- [9] ISO, „ISO 15143-4 - Model View Definition for LandXML version 1.2“, 2021.
- [10] Sensor-Technik Wiedemann GmbH, „TCG MODULE ZUR DATENVERARBEITUNG“, <https://www.stw-mobile-machines.com/produkte/connectivity-gateways/tcg-datenmodule/>, (zugegriffen Sep. 02, 2022).
- [11] Liebherr, „IoT-Gateways für Telematikanwendungen“, <https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/komponenten/steuerungstechnik-elektronik/mensch-maschine-schnittstellen-und-gateways/gateways/iot-gateways-fuer-telematik.html>, (zugegriffen Sep. 02, 2022).
- [12] Volvo CE, „CareTrack jetzt serienmäßig bei ausgewählten Volvo Kompaktmaschinen“, <https://www.volvoce.com/deutschland/de-de/about-us/news/2019/caretrack-kompaktmaschinen/>, (zugegriffen Sep. 02, 2022).
- [13] Waurich, V., Will, F., „The Role of Construction Machinery on an Automated and Connected Construction Site“, 4th International VDI Conference Smart Construction Equipment, 2020.
- [14] ISO, „ISO 15143-1 - Earth-moving machinery and mobile road construction machinery - Worksite data exchange Part 1: System architecture“, 2010.
- [15] Leica, „Leica iCON iXE3 – 3D-System“, <https://leica-geosystems.com/de-de/products/machine-control-systems/excavator/leica-icon-ixe3---3d-system>, (zugegriffen Sep. 02, 2022).
- [16] Trimble, „Grade Control for Excavators“, <https://heavyindustry.trimble.com/en/products/grade-control-excavators> (zugegriffen Sep. 02, 2022).
- [17] Topcon, „3D-Baggersteuerung“, <https://www.topconpositioning.com/de/excavating-and-mass-hauling/3d-excavator-systems/3d-baggersteuerung>, (zugegriffen Sep. 02, 2022).
- [18] Waurich, V. et al., „Automatisierung von hydraulisch angetriebenen Erdbewegungsmaschinen – Teil 2“, O+P Fluidtechnik 2021, 01-02/2021, 52-57.
- [19] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen“, 2015.
- [20] ISO, „ISO 15143-3 - Earth-moving machinery and mobile road construction machinery - Worksite data exchange Part 3: Telematics Data“, 2010.
- [21] Köhler, S. et al., „Netzwerkschnittstellen für mobile Arbeitsmaschinen im Kontext der digitalisierten Baustelle“, 8. Fachtagung Baumaschinentechnik, Dresden, 2020.
- [22] OPC Foundation, „OPC 10000-5 - OPC Unified Architecture Part 5: Information Model“, 2017.
- [23] IEC, „IEC 61508 - Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme“, 2010.
- [24] Ritz, D., Weber, J., „On the qualification of common off-road hydraulic systems for upcoming automation“, 13th International Fluid Power Conference, Aachen, 2022.
- [25] Köhler, S., Weber, J., „Integration of fault detection and diagnosis methods into OPC UA for mobile machinery“, 13th International Fluid Power Conference, Aachen, 2022