

Schlussbericht vom 01.12.2024

zu IGF-Vorhaben Nr. 22511 BG

1 Thema

BIM gekoppelter Baumaschinen Werkzeugbedarf beim Einsatz maschineller instationärer Prozesse zur Verifikation des Baufortschrittes

2 Berichtszeitraum

01.07.2022–30.06.2024

3 Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V., Schlachte 31, 28195 Bremen

4 Forschungseinrichtung(en)

Forschungseinrichtung 1: Technische Universität München
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml)
Boltzmannstraße 15
85748 Garching

Forschungseinrichtung 2: Technische Universität München
Lehrstuhl für Automatisierung und Informationssysteme (AIS)
Boltzmannstraße 15
85748 Garching

Gefördert durch:

Inhalt

1	Thema.....	1
2	Berichtszeitraum.....	1
3	Forschungsvereinigung.....	1
4	Forschungseinrichtung(en).....	1
1	Einleitung.....	3
1.1	Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	3
1.2	Zielsetzung des Projekts.....	4
1.3	Methodik und Lösungsweg.....	5
2	Technische Grundlagen.....	7
3	AP 1: Anforderungs- und Komponentenspezifikation der relevanten Anbaugeräte.....	11
4	AP 2: Sensorische Ausstattung Baumaschinenwerkzeuge.....	18
5	AP 3: Aufbau Human-Machine-Interface für die Fahrerkabine.....	34
6	AP 4: Entwicklung robuster Algorithmen zur Sensordatenauswertung.....	44
7	AP 5: Verfahrensentwicklung Baufortschrittsermittlung.....	47
8	AP 6: Umsetzung und Evaluierung.....	57
9	AP 7: Projektmanagement und Transfer der Ergebnisse.....	60
10	Fazit und Ausblick.....	61
10.1	Ableich von Anforderungen und Ergebnissen.....	61
10.2	Fazit und Ausblick vorallem für KMU Baufirmen.....	63
11	Ressourcenverwendung und Ergebnistransfer.....	69
11.1	Verwendung der zugewendeten Mittel.....	69
11.1.1	Wissenschaftlich-technisches Personal und studentische Hilfskräfte (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans).....	69
11.1.2	Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans).....	70
11.1.3	Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans).....	70
11.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	70
11.3	Weiterer Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	71
11.4	Veröffentlichungen.....	73
11.5	Studienarbeiten.....	74
12	Literaturverzeichnis.....	75

1 Einleitung

1.1 Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung

Die Notwendigkeit einer effizienteren Gestaltung von Bauausführung und -logistik geht einher mit der steigenden Komplexität und den wirtschaftlichen Anforderungen an die Bauindustrie. Dem gegenübergestellt stehen unverändert die besonderen Herausforderungen dieser Industrie, z. B. durch die starke Fragmentierung und Segmentierung der Baustelle mit ihren individuell, aber arbeitsteiligen Auftragnehmern entlang der Prozesskette [1, 2]. Der zunehmende Fachkräftemangel, speziell bei den Maschinenführern, infolge der Demographie stellt die Maschinen- und Geräteentwicklung vor besondere Herausforderungen im Sinne einer einfachen Handhabung der Gerätschaft.

Es ist erwiesen, dass die Beeinflussbarkeit der Kosten mit Fortlauf des Bauvorhabens sinkt, wodurch die Anforderungen an die Effizienz der Ausführungsphase erhöht werden [1, 2].

Baumaschinen haben sich in der Sparte Tiefbau von klassischen Einzweck- zu Mehrzweckmaschinen gewandelt. Dieser Umstand resultiert in der wachsenden Anzahl an Anbaugeräten, die an die Trägermaschine über Schnellwechselsysteme angebunden werden und damit Baumaschinen zu Multifunktionswerkzeugen umrüsten [3, 4].

Ein Stufenplan für die Digitalisierung des Anbaugerätemanagements ist in Bild 1 ersichtlich. Die meisten Managementsysteme für die Anbaugeräte in der Praxis befinden sich auf Stufe 1 und 2: Mit der steigenden Anzahl und Vielfalt an Anbaugeräten steigt die Komplexität in den Prozessen wie z. B. in der Anbaugerätelogistik.

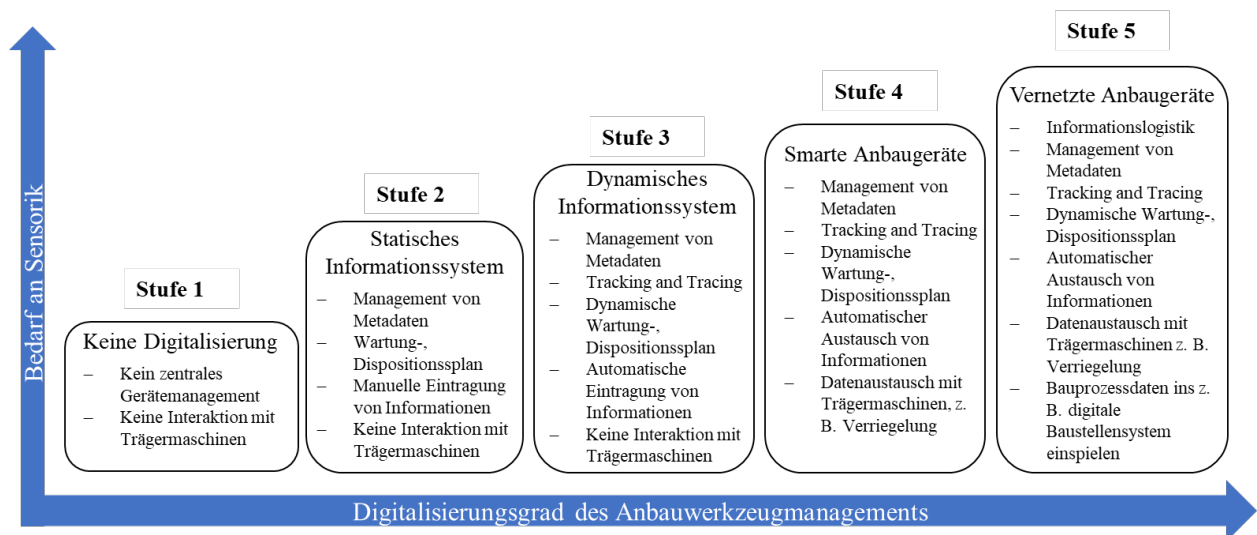


Bild 1: Stufenplan für die Digitalisierung des Anbaugerätemanagements (Quelle: Lehrstuhl fml)

Demgegenüber steht, dass Anbaugeräte heutzutage häufig noch mündlich abgerufen und disponiert werden, gerade bei KMUs. Sie werden nach starren Wartungsplänen gepflegt und manuell verwaltet. Darauf aufbauend wird in Stufe 3 der Datenaustausch zwischen den Anbaugeräten und dem Managementsystem dynamisiert. Die Herausforderung ist es, die

Stillstandszeiten auf der Baustelle, Überkapazitäten in den Werkzeuglagern und erhöhte Wartungs- und Verwaltungskosten zu minimieren. Potenziale zur frühzeitigen Einsatzplanung und kontinuierlichen Steuerung und zur Kontrolle durch die Bauunternehmen werden heute noch nicht genutzt. Für die Stufe 4 müssen Anbaugeräte zunächst digitalisiert werden, da heute keine ausreichende Sensorausrüstung und Integration in das digitale Baustellensystem besteht. Dies ist nicht nur eine Frage der Prozesseffizienz, sondern hat auch direkte Auswirkungen auf die Sicherheit von Baustellen. Eine Auswertung von Unfallursachen im Zeitraum von 2006 bis 2013 der BG Bau ergab, dass 10 % der Unfälle auf Baustellen in Verbindung mit Anbaugeräten verursacht wurden [5]. In den Jahren 2010 bis 2016 wurden 45 schwere oder tödliche Unfälle gemeldet [6], die durch eine Verbesserung der Sensortechnik vermieden werden können, z. B. über Näherungssensor kann die korrekte Lage des Anbaugeräts in der Verriegelungsposition überwacht werden [7].

Stufe 5 baut auf den aufgerüsteten Anbaugeräten auf und fokussiert die Vernetzung der Anbaugeräte und damit auch der Informationslogistik. Hierzu sind optische Sensoren besonders geeignet, z. B. industrielle LiDAR Kameras, die die 3D Modellierung in BIM für eine Qualitätskontrolle in Echtzeit unterstützen [8]. Dabei ist weder die Erhebung, noch der Umfang dieser Daten standardisiert und darüber hinaus durch die dokumentenbasierte Informationsrepräsentation nicht zur Weitergabe geeignet. Es handelt sich um eine isolierte unidirektionale Lösung. Demgegenüber eröffnet eine modellbasierte Erhebung und Verarbeitung von Baufortschrittsdaten über die Anbaugeräte die horizontale Integrationsmöglichkeit der Informationen mit weitreichenden Effizienzpotenzialen. Aufgrund der Variantenvielfalt an Anbaugeräten und Trägermaschinen, ist eine geeignete Schnittstellendefinition sowie eine passende modulare Softwarearchitektur mit Unterstützung verschiedener Hardwareplattformen zur Codeausführung notwendig. Während die Steuerungssoftware und -plattformen der Trägermaschinen oftmals Ähnlichkeiten zu Eingebetteten Systemen aus dem Automotive-Bereich aufweisen (Programmierung in Hochsprachen, z. B. C, eingebettete Steuerung), ähnelt die Softwarestruktur, die die Bauunternehmen zur Planung und Ausführung nutzen, der von Produktionsanlagen (hohe Komplexität in Struktur und Umfang, zyklische Abarbeitung). Weiterhin müssen für neue Anbaugeräte oder Funktionalitäten auch nach Jahren des Betriebs noch die Möglichkeit zum Update der Software /Hardwarearchitektur gegeben sein, was zu einer hohen Variantenvielfalt führt.

Das Projekt konzentriert sich auf die Umsetzung der Stufen 4 und 5 zur Steigerung der Prozesseffizienz der Informationslogistik während der Bauausführung, fokussiert auf das Werkzeug, das Anbaugerät der Baumaschine.

1.2 Zielsetzung des Projekts

Im Rahmen des Forschungsprojektes ToolFlott soll die Forschungsfrage untersucht werden, wie Anbaugeräte als Schlüsselschnittstelle der Baulogistik zwischen Planung und Bauausführung durch den Einsatz digitaler Technologien zur effektiven und effizienten Abwicklung von Bauprojekten beitragen können. Um diese Forschungsfrage zu untersuchen, werden folgende drei Teilziele bei der Verwendung von Anbaugeräten verfolgt:

1. Planung in der Baulogistik: Erhöhte Planungsqualität in der Baulogistik durch die Nutzung geeigneter Info-Datenbanken mit Suchfunktion und passender Managementsysteme. Ableitung

und Beauftragung der Disposition für die Anbaugeräte Bereitstellung. Eine BIM gestützte Zuordnung der Anbaugeräte Einsatzplanung mit folgender Auftragsableitung.

2. Ausführung in der Baulogistik: Die datentechnische Verbindung zwischen dem Anbaugerät und der Trägermaschine muss für den smarten Werkzeugeinsatz hergestellt werden. Die Ausstattung der Sensortechnik des Anbaugerätes ist generell zu bewerten und robust nach der Verwendung zu konfektionieren. Der Fahrer muss durch geeignete HMI Technik beim Einsatz der Werkzeuge entlastet werden.

3. Auswertung in der Baulogistik: Der Verschleiß und Wartungsbedarf des Anbaugerätes soll aufgezeigt werden. Der Diebstahlschutz muss gewährleistet sein. Die Bauergebnisse des Anbaugeräte Einsatzes „as built“ müssen dem backoffice der Baufirma zugespielt werden. Optimal wäre der automatische Eintrag in die BIM basierte Baustellen Planung. Damit wird die Planung mit „Soll-Daten“ zur Ergebnisdarstellung der „Ist-Daten“.

Ziel ist die Verbesserung der gesamten Informationslogistik durch die vollständige und durchgängige informationstechnische Einbindung der Anbaugeräte in den Bauprozess.

Das folgende Bild 2 zeigt graphisch übersichtlich diese Zusammenhänge.

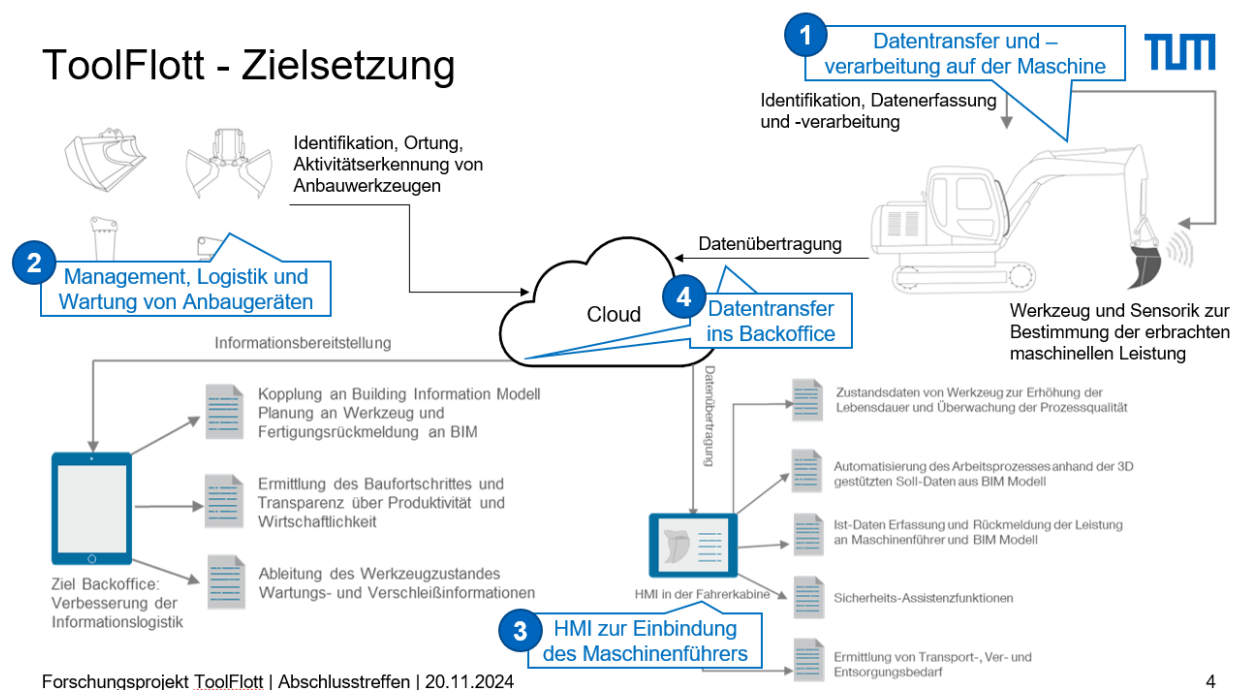


Bild 2: Übersicht Datenfluss Anbaugerät – Trägermaschine – Fahrer – Managementsystem – Backoffice (Quelle: Lehrstuhl fmI)

1.3 Methodik und Lösungsweg

Bei diesem anwendungsorientierten Problem mußten Methoden der Recherche, der Analyse und der Entwicklung kombiniert werden. Es kamen zum Einsatz:

Recherche Methoden: Literaturrecherche, Umfragen über Verbände, Marktrecherchen, Experteninterviews, Workshops, Prozessaufnahmen

Analyse Methoden: Beschreibung von Use Cases, Szenarienanalysen auf der Baustelle, Sensitivitätsanalysen

Entwicklungsmethoden: Lastenheft Erstellung, Komponentendesign /-entwicklung, Expertengespräche, Anwendung von V-Modell und UML-Diagrammen, Agile Softwareentwicklung (Scrum) mit datenorientierten Programmiersprachen und Toolkits (Python, Matlab), Klassifikation und Auswahl von Datenaustauschformaten und -strukturierungen (XML, JSON, RDL) sowie CANbus SAE J 1939 und OPC UA Datenverarbeitung und die Prozeßsimulation

Die Erfassung des Einsatzes von Anbaugeräten kann die Produktivität und Qualität der Ausführung über den Baufortschritt transparent machen. Bisher fehlt eine umfassende Untersuchung zu den Möglichkeiten von sensortechnischen Aufrüstungen bei Anbaugeräten in Kombination mit der Trägermaschine, um maschinelle, instationäre Bauprozesse unter den gegebenen Randbedingungen optimal zu erfassen. Ebenso stellt das Design einer modularen und erweiterbaren Hardware-/Softwarearchitektur inkl. Schnittstellendefinition eine Herausforderung dar. Die digitale BIM Planung als zentrale Plattform kann zur Koordination und Verarbeitung dieser Informationen mit Hilfe von geeigneten Algorithmen dienen. Damit kann zum einen der Bediener bei der Maschinenoperation unterstützt werden, zum anderen kann das Backoffice mithilfe einer Fertigungsrückmeldung „as built“ den Baufortschritt verfolgen sowie den Werkzeugzustand remote bestimmen.

Dabei bauen die Ergebnisse der Teilziele aufeinander auf und ergeben in Summe die Antwort auf die handlungsleitende Forschungsfrage. Grundsätzlich liegt der Fokus darauf praxistaugliche Lösungen aufzuzeigen, die von allen Bauteilnehmern (überwiegend KMU) zukünftig gewinnbringend eingesetzt werden könnten. Der vorgesehene Lösungsansätze konzentrieren sich auf den Tiefbau, da hier aufgrund der maschinenlastigen, instationären Prozesse mit dem größten Potenzial für den zu erforschenden Ansatz zu rechnen ist. Als Beispiel bietet sich der kommunale Tiefbau mit Baugrubenaushüben, Kanalbau für Rohrleitungen und Kabeltrassen für exemplarische Anwendungsfälle an, da hier eine Vielzahl von Anbaugeräten im stetig wechselndem Einsatz verwendet werden und der Fahrer gefordert ist. So befinden sich auf einer üblichen Tiefbaustelle mit Tieflöffel, Zweischalengreifer, Anbauverdichter, Palettengabel und ggfs. einem Bodenrecycler fünf Anbaugeräte, welche ca. zehnminütig gewechselt werden (ca. 48 Anbaugerätewechsel pro Schicht).

Insgesamt birgt dieser ganzheitliche Ansatz der Anbaugeräteerfassung insbesondere für KMUs die Chance am Trend der Digitalisierung im Bauwesen teilzuhaben und mitzuwirken. Der Ansatz einer Aufrüstung von Anbaugeräten ermöglicht einen aufwandsarmen Einstieg. Der Einsatz von BIM ist weiterhin von wirtschaftlicher und wettbewerblicher Bedeutung für KMUs, da hier kaum Expertise vorliegt [12], die öffentliche Hand die Anwendung in Zukunft aber vorschreibt [13]. Mit dem hier gewählten Forschungsansatz werden die KMU entlastet. Weiterhin können sie den Mehrwert der Digitalisierung, wie Erhöhung der Transparenz und Produktivität erfahren.

Damit ergibt sich folgender Untersuchungsraaster und Lösungsweg für das Forschungsprojekt:

- **1** Begleitung der Entwicklung des MiC4.0-BUS, der nun Hersteller übergreifend Anbaugerät und Baumaschine verbindet und OPC UA als Ergänzung zur Datenerfassung und Weiterverarbeitung
- **2** Info – und Mangementsysteme für Anbaugeräten und zur Ortung
- **3** HMI – Human Machine Interface , Thema wie binde ich den Fahrer ein ?
- **4** BIM und BIMsite – Baustellenplanung, Beauftragung der Maschineneinsätze, Ergebnis Darstellung „as built“

Beim ToolFlott Projekt waren zahlreiche Partner beteiligt und brachten sich ein. Wir hatten als Baumaschinen Hersteller Liebherr und Wacker Neuson, als Anbaugeräte Hersteller die MTS und Epiroc, Fritzmeier als Kabinen Hersteller, Vemcon als Drittanbieter für Steuerungs- und Identtechnik, Frenz Engineering als Drittanbieter für Softwareentwicklungen, die Lectura als Infosystem Anbieter. HoloLight und Abaut waren unsere Partner bei Bilderkennung und Verarbeitung. Die Baufirmen Max Bögl, Strabag, Leonhard Weiss, die Reif Bau und Puschbau waren unsere Diskussionspartner. Die großen Verbände, der VDMA speziell die Ausgründung MiC4.0, der VDBUM, der HDB und die Bayerische Bauakademie für den Zentralverband des deutschen Baugewerbes [12, 33, 51] unterstützten das Projekt.

An dieser Stelle sagen wir unseren Partnern einen herzlichen Dank für ihre Mitarbeit und Unterstützung !

2 Technische Grundlagen

2.1 Baulogistik im Zeitalter der Digitalisierung

Die Baulogistik entwickelte sich in den letzten Jahren von einer singulären Betrachtung von Ver- und Entsorgung der Baustellen [23] zu einem prozessorientierten Logistikmanagement [2, 24]. Die revolvierenden Elemente des Managementprozesses sind Planung, Steuerung und Kontrolle [25]. Übertragen auf die Phasen eines Bauprojekts ergibt sich damit die Berücksichtigung der Logistik bereits in der Planung mit der Festlegung der Anliefer- und Ablieferungsstrategie. Die Steuerung verknüpft die Planungs- und Ausführungsphase und sieht eine Synchronisation der Prozessabläufe für eine optimale Bereitstellung von Materialien und Gütern und damit der Gewährleistung eines optimalen Baufortschritts vor. Die Kontrolle steht für den kontinuierlichen Soll-Ist-Abgleich der Prozesse.

Im Zuge der Digitalisierung können hier Technologien, wie Auto-ID-Systeme, Maschinensensoren, Photogrammetrie oder Bildanalyse genutzt werden, um Material- und Güterflüsse (auch in Echtzeit) zu verfolgen, aber auch um den Baufortschritt automatisiert aufzunehmen und mit Soll-Daten abzugleichen. Alizadeh et al. [26] haben die Felddatenerfassungstechnologien zur automatisierten Projektfortschrittsüberwachung zusammengefasst und analysiert. Zhai et al. [21] stellen eine 30 %-ige Leistungssteigerung beim Einsatz von automatischen Baufortschrittsaufnahmen fest. Auch können Liefer- und Logistikstrategien mittels computergestützter Modelle vorab un-

tersucht werden: Fischer et al. [22] haben in einem Anwendungsfall im Bereich des Spezialtiefbaus mit Hilfe einer Simulation gezeigt, dass durch die Gestaltung einer effizienten Baustellenlogistik die Bauzeit um 28 % reduziert werden kann. Umfragen im Rahmen einer Studie zur Digitalisierung [27] zeigten auf, dass das prozessorientierte Logistikmanagement aber noch nicht in der Praxis angekommen ist.

Diese Erkenntnisse werden auch in den Anforderungsanalysen innerhalb des Verbundprojekts „Bauen 4.0“ (BMBF, Förderkennzeichen 02P17D230) bestätigt [28]: Aktuell erfolgt die Abwicklung der Baustellenlogistik noch sehr händisch. Über Telefon, Handy und E-Mail werden Bestellungen für die Baustelle geordert, der Verbleib von Ware kontrolliert und Lieferungen vereinbart. Oft erfolgt die Planung der Baustellenlogistik, der Aufbau von Lagerplätzen auf Zuruf oder erfahrungsbasiert. Im Backoffice setzen große Baufirmen bereits Produktdatenmanagement (PDM) Systeme ein. Die flächendeckende Einführung und Nutzung solcher Systeme hemmt vor allem die Informationsbereitstellung auf und von der Baustelle, da hier viele Medienbrüche vorherrschen. Für die Baustellenplanung und Bewirtschaftung stehen den Bauleitern digitale Bautagebücher zur Verfügung, die aber nach kurzer Zeit nicht mehr aktuell sind, da der Bauleiter nicht die Zeit hat, die Fülle der angefallenen Daten händisch einzupflegen. Eine automatische Datenerfassung von Baulogistik- und Bauleistungsdaten fehlt.

2.2 Anbaugerätemanagement

Das Anbaugerätemanagement ist ein Teilgebiet der Baulogistik. Übertragen auf das Werkzeugmanagement der stationären Industrie [29, 30] bedient das Anbaugerätemanagement die Schnittstelle zwischen der auszuführenden Tätigkeit oder dem auszuführenden Bauobjekt und der Trägermaschine als ausführendes Organ. Das Werkzeugmanagement wird im Bauwesen von maschinentechnischen Abteilungen, kurz MTA, verantwortet. Die MTA ist zuständig für die Flotte des Bauunternehmens, die Planung und Instandhaltung der Maschineneinsätze auf den Baustellen. In größeren Bauunternehmen wird die Disposition separat betrachtet, nicht so bei KMUs. Diese Unterscheidung wird im Folgenden deshalb nicht beachtet. Die MTA betrachtet somit den gesamten Lebenszyklus der Baumaschine samt Anbaugeräte und deckt damit sowohl Werkzeugplanung als auch -logistik ab. In der Bauindustrie unterstützen mittlerweile Flottenmanagementsysteme softwaretechnisch die MTA [31]. Auch kann hardwareseitig mittels GPS-Trackern an Maschinen oder Anbaugeräten die Position bestimmt werden. Erste Ansätze zeigen auch, dass verarbeitete Daten von verbauten Beschleunigungssensoren in den Trackern Hinweise auf den Zustand des Geräts geben [32]. Allerdings sind solche digitalen Ansätze, vernetzter Maschinen und Anbaugeräte, noch nicht in der Praxis angekommen. Gerade die Arbeiten im Arbeitskreis Machines in Construction (MiC) 4.0, Cluster Anbaugeräte [33] zeigen, dass es aus Sicht der MTA keine Übersicht und Einordnung von Anbaugeräten hinsichtlich des Datenmanagements vom Anbaugerät auf die Trägermaschine gibt.

Dieser Bedarf an Zustands- und Baufortschrittsdaten direkt von den Anbaugeräten wird seitens der Bauunternehmen aber bereits deutlich gefordert [4]. Zwar wurden im Verbundprojekt „Bauen 4.0“ Ansätze des Tracking und Tracing diskutiert und für einzelne Bestandteile des Bauprozesses umgesetzt, allerdings sind diese Lösungen technisch noch nicht dazu in der Lage, die Anforderungen des Anbaugerätemanagements umzusetzen.

2.3 Einsatz von Anbaugeräten

Neben dem Anbaugerätemanagement durch die MTA, ist konkret auch der Einsatz von Anbaugeräten Gegenstand der Untersuchungen im Forschungsvorhaben. Der Einsatz von Anbaugeräten

betrifft die Bauausführung aus Bauplanung und Geräteführung. Im Allgemeinen werden Anbaugeräte nach ihrem Einsatzgebiet eingeteilt [34], dazu zählen: Lade- und Grabwerkzeuge, Abbruchwerkzeuge; Werkzeuge zum Fräsen und Sägen, Werkzeuge zum Bohren, Rammen und Verdichten und Einrichtungen zum Heben und Senken von Lasten sowie sonstige Werkzeuge. Tiltrotatoren und Schnellwechsler werden hier als optionale Bedienelemente im Sandwich betrachtet. Als Trägermaschine dient der Hydraulikbagger, welcher in der Literatur die am häufigsten betrachtete Baumaschine ist, siehe Bild 3 [35].

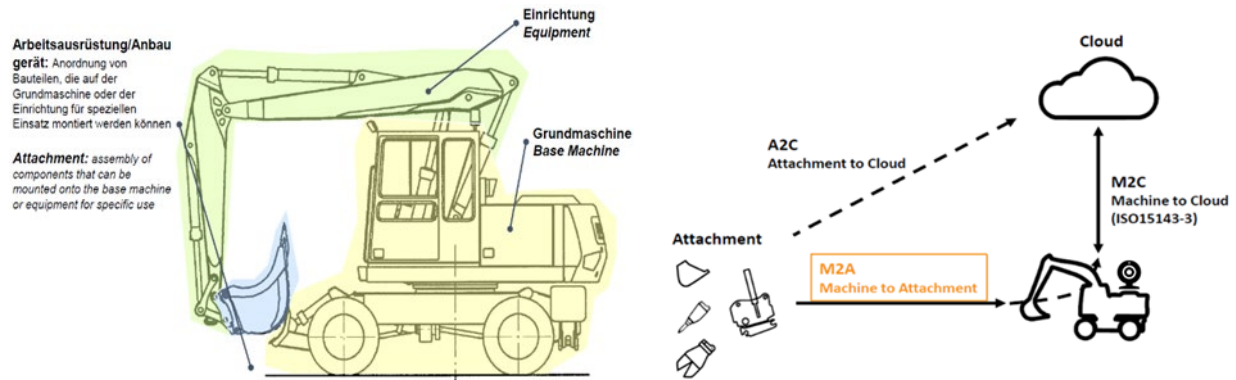


Bild 3: Definition von Trägermaschine und Anbaugerät (links) [35] und die Informationsflüsse zwischen Trägermaschine, Anbaugeräten und Cloud (rechts) [33]

Die Trägermaschine wechselt mehrere Anbaugeräte in einem Bauprozess, um die spezifischen baulichen Anforderungen zu erfüllen. Daher wirken sich die einfachen Daten wie die GPS-Daten des Anbaugeräts schon positiv auf die Produktivität aus, indem lästiges Suchen auf der Baustelle vermieden wird bzw. der Einsatzort als Wirkstelle des Anbaugerätes bekannt ist. Die Trägermaschinen sollten auch komplexe Datenflüssen, die nicht nur von eigenen Sensoren, sondern auch von den Anbaugeräten entstehen, sammeln, auswerten und weiterleiten nach Bedarf. Zum Beispiel können aus den Kameradaten von Trägermaschinen Baufortschrittsdaten erfasst werden [36], die zusammen mit den GPS-Daten aus Anbaugeräten in die Augmented Reality (AR) umgewandelt und für die Geräteführenden visualisiert werden können [38]. Dadurch kann der aktuelle Baufortschritt direkt überprüft werden und nachfolgende Schritte abgeleitet werden. Die Aufzeichnung des Baufortschritts sowie des Ergebnisses durch das Aufmaß erfolgen bis jetzt überwiegend manuell bei KMU und fortschreitend digitalisiert bei größeren Baufirmen durch Drohnenflug Vermessung oder „as built“ aus dem 3D Baggern. Kann der nachgelagerte Informationsfluss in Zukunft zum Backoffice erfolgen, in dem automatisiert die Leistung des Anbaugeräts separat erfasst und weitergegeben werden, so kann die Baufortschrittskontrolle und die Abrechnung digital erfolgen.

2.4 Sensortechnische Ausrüstung

Um die bisher genannten Zielsetzungen zu erreichen, ist eine sensortechnische Aufrüstung der Anbaugeräte erforderlich.

Zur Identifikation von Anbaugerät und Umwelt sowie zur Erfassung des Baufortschritts können Sensoren, wie folgt, klassifiziert werden: Optisch durch optische Codierungen, Laser, Bilderkennung [40]); Audiobasiert durch Tonaufnahmen [17]); Elektromagnetisch durch RFID (Radiofrequenzidentifikation) [41, 42]); Räumlich durch Inertiale Messeinheit (Inertial Measurement Unit - kurz IMU) aus Neigungs-, Winkel-, Rotations- und Beschleunigungssensoren [43]).

Eine umfassende Klassifikation inkl. Funktionalitäten und technischer Limitationen für Anbaugeräte liegt in der Literatur für diesen Zweck allerdings noch nicht vor. Hier kann festgehalten werden, dass, um alle Funktionalitäten abzudecken, ein gemischter Ansatz betrachtet werden muss.

Es gibt bereits erste Ansätze zur Sensortechnik bei Anbaugeräten. Die Verwiegung kann optional für Schaufeln bei den OEMs oder Drittanbietern erworben werden. Hier kommen Wägezellen zum Einsatz mit einer Einpunkt- oder Mehrpunkt-Verwiegung der Schaufel mit Inhalt [44]. Ein Identensystem kann separat über Drittanbieter erworben und installiert werden. Eine Blackbox mit einem GPS-Sensor für die Ortung und ein Gyroskop zur Registrierung ob das Gerät aktiv ist oder nicht [45], ist hier bereits sehr hilfreich. Ein QR-Code System der Firma MTS gestattet das Ident und die Verortung eines Anbaugerätes sowie die Verbuchung in einem Management System mit dem Handy Scan [46].

Das sind erste Ansätze, die auf den Bedarf eines Anbaugeräte Managementsystems für die Anwender reagieren, aber es sind noch nicht die integrierten Systemlösungen, die kombiniert mit dem Bauprozess und dem Bauobjekt in Zusammenhang stehen.

Auch die Analyse des aktuellen Ist-Standes im Rahmen von Experteninterviews im Projekt Bauen 4.0 sowie im Arbeitskreis MiC 4.0 haben gezeigt, dass Anbaugeräte aktuell noch nicht über die gewünschten Sensoren verfügen. Insbesondere weist die Schnittstelle zwischen Anbau- und Trägergerät Lücken auf. Grund dafür sind die Mischflotten und die fehlenden Standards der Branche. Die Telematikanbindung von Anbaugeräten hat noch keine Beachtung in der ISO 15143 gefunden.

Im Zuge der sensortechnischen Ausrüstung und Einbindung ist weiterhin die übergeordnete Software-/Hardwarearchitektur von besonderer Bedeutung. Die speziellen Randbedingungen der Branche zwischen Automotive-Technologien (Hochsprachen, Eingebettete Systeme) und der klassischen Fabrikautomatisierung (Modularität, Nachrüstbarkeit, Variantenvielfalt) erfordern das sorgfältige Design der zugrundeliegenden Architektur, v.a. im Hinblick auf Datenschnittstelle und Unterstützung für eine Vielzahl von Anbaugeräten [47]. Eine Unterstützung könnte hier das übergreifende Datenformat OPC UA sein, das als universeller Datensammler erfolgreich schon in anderen Branchen eingesetzt wird. Das soll neben dem CANbus im Projekt untersucht werden.

2.5 HMI beim Anbaugeräte Einsatz

Der Stand der Technik und Forschung im Bereich des Human Machine Interface (HMI) und der Datenaufbereitung für den Baumaschinen Fahrer wurde in verschiedenen Projekten der Forschungsstelle TUM fml untersucht und kann für den Anbaugerätebetrieb entsprechend dargestellt und bewertet werden. So spielt z.B. die Augmented Reality (AR) Technologie als Head mounted Applikation mit Datenbrille, eine zukunftsweisende Rolle [48], die sich gut digital in die verschiedenen Systeme einbinden lässt als Infosystem für den Fahrer. So wird heute schon an AR-basierten Fahrerleitsystemen und BIM-basierter Positionierung von Baumaschinen geforscht [38, 49]. Jedoch ist festzustellen, dass in der aktuellen Praxis häufig Systeme ohne datentechnische Rückkopplung des Baufortschritts zum Bediener dominieren.

2.6 BIM gekoppelte Anbaugeräte Einsatzplanung

Building Information Modeling, kurz BIM, ist definiert als die "Verwendung einer gemeinsamen digitalen Repräsentation eines gebauten Objekts zur Erleichterung von Entwurfs-, Bau- und Betriebsprozessen, um eine zuverlässige Grundlage für Entscheidungen zu schaffen" [50]. Dabei

betont die Bezeichnung „Modeling“ BIM als Ansatz und nicht als Modell selbst. Ziel von BIM ist es, die Zusammenarbeit zwischen Bauprojektpartnern zu fördern, eine einheitliche sowie einzige Informationsquelle für alle Gewerke anzubieten und damit gleichzeitig die Planungsqualität zu erhöhen und die Baukosten zu senken.

Da BIM selbst ein objektorientierter Ansatz ist, ist es schwierig, alles zu modellieren, was keine objektähnlichen Eigenschaften hat, z. B. Boden. Daher wird BIM hauptsächlich im Hochbau eingesetzt, wo Objekte leicht identifiziert werden können. Für andere Bauarten, z. B. den Tiefbau, ist BIM noch nicht als Standard eingeführt worden, obwohl die Aktivitäten in dieser Richtung in letzter Zeit zugenommen haben [13, 51]. Mit BIM gibt es eine Tendenz zu stärker integrierten Prozessen in der Bauindustrie. So soll zukünftig das Modell beispielsweise den Bestellprozess erleichtern und kann potenziell als digitaler Zwilling (digitales Objekt, das sich im bidirektionalen Informationsaustausch mit seinem physischen Gegenstück befindet [52]) zur Informationsspeicherung und Prozessüberwachung eingesetzt werden. Hier kommt das Anbaugerät als maßgebliche Einflussgröße auf die Bauleistung der Trägermaschine und damit dem Prozess auf der Baustelle ins Spiel. Bspw. fließen in die Leistungsermittlung von Hydraulikbaggern nach Girmscheid [53] direkte Größen des Anbaugeräts, wie Nenninhalt, Löse- und Füllfaktor sowie der Schneiden-/Zahnzustandsfaktor ein. Durch eine direkte Vernetzung von Anbaugerät und BIM kann so eine Darstellung des Baufortschritts in Echtzeit ermöglicht werden, was sich wiederum auf eine optimierte Projektsteuerung und -überwachung auswirkt und damit die Logistik unterstützt.

Mit der Nutzung der Informationsmöglichkeiten wird auch die visuelle Darstellung des Modells zunehmen. Die Akzeptanz und Bewilligung von Bauprojekten steigen, wenn das Bauwerk für die Beteiligten im Voraus erlebbar ist. Zudem können Abläufe oder Vorgehensweisen durch die Möglichkeit einer virtuellen Interaktion mit der Trägermaschine und dem Anbaugerät vorab untersucht werden, um später Fehler zu vermeiden.

Die Relevanz des Anbaugeräts für die Optimierung der instationären Prozesse innerhalb der Baulogistik konnte bereits offengelegt werden. Erst durch die Ausrüstung mit Sensoren sowie Verknüpfungen mit Software kann auch ein Mehrwert für das Backoffice, den Planer und Controller, geschaffen werden. Im Vergleich zur stationären Industrie kann dieser Ansatz bestätigt werden [54–57].

3 AP 1: Anforderungs- und Komponentenspezifikation der relevanten Anbaugeräte

Umfang: 3 Monate Projektlaufzeit (fml: 3 PM, AIS: 2 PM)

Methoden: Prozessaufnahmen, Experteninterviews, Beschreibung von Use Cases, Literaturrecherche, Umfragen über Verbände, Marktrecherche

Ziel von AP1 war die Aufnahme des Ist-Zustands der Anbaugerätelogistik und die Ableitung der Anforderungen an eine innovative Gestaltung des Anbaugeräteeinsatzes auf Basis der Wünsche der Anwender. Dazu wurden mit den am Anbaugeräteeinsatz Beteiligten, wie MTA, Disposition,

Einsatzplanern, Bauleitern und Geräteführenden Interviews und Diskussionen zum Praxisbedarf durchgeführt. Die so vorgenommene qualitative Anforderungserhebung wurde durch eine quantitative Umfrage in der Breite mit Unterstützung der Verbände ergänzt. Dabei wurde auch die Informationsrückkopplung zwischen den vom Anbaugerät ausgeführten Arbeiten in das BIM-Modell abgefragt. Da hier Bauanwender und Planer verschiedener Domänen beteiligt waren, wurde die Methode der Use Case Modellierung verwendet (fml).

Ausführungen fml - durchgeführte Arbeiten:

Die Arbeiten bzgl. des AP1 waren am fml durch umfangreichen Kontakt in die Praxis zu den Anwendern geprägt. Um typische Use Cases zu erarbeiten, wurden diverse Interviews geführt, bei denen sowohl MTAs, als auch BIM-Planer, Bauleitung, und Geräteführende gehört wurden.

Zur weiteren Modellierung der Use Cases wurden Umfragen durchgeführt, welche die Erkenntnisse aus den Interviews größtenteils bestätigten, aber auch um Details erweiterten. Als Rahmen für diese Interviews und Umfragen wurden verschiedene Formate gewählt. So wurde die Verbandsarbeit VDMA - MiC4.0 Cluster7 Anbaugeräte genutzt, aber auch branchenspezifische Veranstaltungen wie das VDBUM Seminar. Auch neue Formate, wie ein BauCamp der Bayerischen Bauakademie wurden genutzt.

Erzielte Ergebnisse / Wünsche der Betreiber von Anbaugeräten:

Identifikation des Anbaugerätes beim Ankoppeln an die Trägermaschine

Ausweisung von Eigenlast, Nutzlast und kennzeichnenden Einsatzgrößen wie z.B. Öffnungsweite eines Greifers oder zulässige Traglast einer Gabel

Prüfen der Kompatibilität von Anbauwerkzeug und Trägergerät , z.B. hinsichtlich Gewichtsklasse, Hydraulik , Schnellwechsler und Tiltrotator Kompatibilität

Einstellung des Trägergerätes mit dem passenden Druck und Volumenstrom der angeschlossenen Hydraulikleitungen. Am Besten automatisch, zumindest sollte es dem Fahrer auf dem Monitor angezeigt werden.

Grenzlasten sollten berücksichtigt werden, um Überlastungen des Anbaugerätes zu vermeiden

Sicherheit: Die Verriegelung des Anbaugerätes soll dem Fahrer auf dem Monitor angezeigt werden oder eindeutig auf dem Maschinenpanel.

Der Fahrer möchte eine einfache selbstführende Anzeigekontrolle bei der Nutzung seiner Anbaugeräte. Das HMI ist zu verbessern , nicht 6 Monitore in der Kabine, sondern nur noch ein intelligenter Monitor ist der Bedarf.

Übergabe von Geometriedaten des Anbaugerätes, um z.B. für Reichweitenbegrenzung bei Arbeiten unter dem Fahrdraht, unter einer Brücke, neben einer historischen Gebäudewand, die nicht beschädigt werden darf, vorab einstellen zu können, d.h. das Arbeiten mit Fencing soll unterstützt werden.

Lokalisierung des Anbauwerkzeuges, z.B. zum Finden des Werkzeuges auf der Baustelle, damit das Suchen entfällt.

Der Diebstahlschutz des Anbaugerätes soll während der Einsatzzeit auf der Baustelle gewährleistet werden mit Alarmmeldung bei einem unautorisierten Verlassen der Baustelle und nicht geplanten Nutzungszeiten

Bestätigung der Einsatzbereitschaft und Verfügbarkeit des Anbaugerätes

Die Serviceplanung soll berücksichtigt werden mit Verfolgung der Betriebsstunden und eine Anzeige des bevorstehenden Wartungsbedarfes wird gewünscht

Die Bereitstellung von Anbaugeräten auf einer BIM-Plattform im Rahmen der Baustellenplanung in Zusammenhang und lokalisiert mit Bauobjekten wird gewünscht, um daraus einen Einsatz Auftrag ableiten zu können

Bei der 3D – Geländebearbeitung wünscht sich der Fahrer sofort nach dem Ankoppeln des Werkzeuges starten zu können, ohne zusätzliche Einmessarbeiten am Werkzeug

Datenrückkopplung der Bauergebnisse von Anbaugeräten direkt auf die BIM-Plattform bzw. dem DGM mit „as built“ Daten wird sehr gewünscht, aber ist noch nicht in der Praxis realisiert und wird noch als futuristisch angesehen.

Diese Use Cases und Wünsche bilden somit die Grundlage für die weiteren Arbeiten des Forschungsprojekts. Darüber hinaus gingen noch einige Hinweise aus der Praxis ein, die für die weitere Bearbeitung der folgenden Arbeitspakete von Interesse waren.

Info-Systeme zur Einsatz Auswahl von Anbaugeräten

Die Recherche in AP1 zeigte, dass die Nutzung von Info-Systemen für die Anbaugeräte Einsatz Auswahl als Stand der Technik angesehen werden kann. Hier kommen relationale Datenbanksysteme im Intranet und Internet zur Anwendung, wie vorbildlich das EIS – Equipment Information System des Projekt Partners Thorsten Frenz GmbH & CoKG oder Web Applikationen wie das Lectura - Infosystem , das gerade KMUs mit Einfachheit und Übersichtlichkeit anspricht und beim Anbaugerätebetrieb unterstützt.

EIS sehen wir als gutes Beispiel was nun so ein Infosystem für Anbaugeräte alles können sollte:

- Gliederung nach Gerätegruppen
- Technische Grunddaten wie Abmessungen, Gewicht und Leistungsdaten
- Ja/Nein Informationen zu besonderen Eigenschaften
- Graphiken bzw. Arbeitsdiagramme
- Zusatzausstattung
- BGL-Nummer
- Infofeld für zusätzliche Anmerkungen
- Internet – Link zur MTA oder Gerätebeauftragten
- Bei Bedarf Zertifikate hinterlegt
- Bei Bedarf Filmclips zum Aufbau oder Betrieb

Zielsetzung: Infosystem zur Bestandsübersicht und Einsatzplanung von Anbaugeräten

EIS – Datenarten

- relationale Datenbank
- Suchfunktion
- Warenkorbfunktion
- Kenngrößen
- individuelle Ergänzungen
- Relevante Links
- Digitale Bedienungsanleitung
- Zulassungen


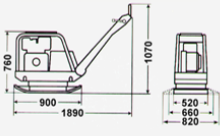
Grunddaten		Betrieb		Infocenter	
Hersteller	BOMAG	Plattengröße	Länge/Breite [mm]	900/520	Besonderheiten / Zusatzinfos
	www.bomag.de	Arbeitsgeschwindigkeit max. [m/min]		24	
Typ	SPR 50/52 D-3	Flächenlast [kg/m ²]		1906	Bedienungsanleitung pdf
Abmessungen und Gewicht		Zusatzausstattung		Grafik	
Länge [mm]	1890	Max. Steigfähigkeit [%]		30	 Grafiken
Breite [mm]	520	Max. Tiefenwirkung [mm]		-	
Höhe [mm]	760	Zentrifugalkraft [kN]		50	
Gewicht [kg]	446	Frequenz [Hz]		62	
Antrieb		Vorwärtslaufend		<input checked="" type="checkbox"/>	Ja/Nein- Informationen
Motorleistung [kW]	5,8	Rückwärtslaufend		<input type="checkbox"/>	
Motorart	Diesel	BGL-Daten		Zusatz-	
Kühlsystem	Luft	BGL-Nr.	D 8,61.4060	ausstattung	
Startsystem	Kurbel	Neuwert	8.950,00 €	-	
Betriebsdrehzahl [1/min]	3400	Monatliche Reparatur	233,00 €	-	
Tankinhalt [l]	4	Monatliche AFA	340,00 €	-	
Kraftstoffverbrauch [l/h]	1			-	
Laufzeit [h]	4			-	
Schallpegel [dB (A)]	98			-	

Bild 4: EIS handgeführter Verdichter (Quelle:Thorsten Frenz GmbH & CoKG)

Damit steht ein DV Katalog fürs Intra- bzw. Internet zur Verfügung, der die Papierkatalog Recherchen ablöst und für jeden verfügbar ist. Die Eingabe erfolgt einfach geführt über Masken damit selbst eine Sekretärin ohne große Fachkenntnisse die Datenblätter ausfüllen kann.

Der Planer oder Bauleiter bzw. Polier kann sich nun gezielt am Desktop bzw. mit Handy App die benötigten Maschinen bzw. Anbaugeräte aussuchen und schickt die Anfrage an die Disposition bzw. MTA. Diese reserviert dann die Geräteeinsätze für die benötigte Zeit – Anlieferung an die Baustelle und Abrechnung erfolgen über die mitgeschickte Kostenstelle.

Die Vorteile liegen auf der Hand – zentral gepflegt – weltweit mehrsprachig verfügbar.

Auch Geräte Verleiher benutzen solche Info-Plattformen bzw. bietet es sich an, dass ARGEN , Baufirmen, die zusammenarbeiten, gegenseitig mit Maschinen und Geräten mit Verleih unterstützen.

Noch kurz erwähnt, eine große EIS Anwendung entstand bei Berger International, die ca. 12.000 Baumaschinen mit ihren Stammdaten in einem SAP – ERP führten. Hier fungierte dann das EIS als Frontpanel als Human Schnittstelle für die gezielte Geräte Auswahl und Dispositions Anfragen.

Bei den „Infosystemen für Anbaugeräte“ sehen wir auch die Lectura als „best practice“, die einfach und übersichtlich die Anbaugeräte für KMU Firmen listet, wenn dort Bedarf nach neuem Equipment besteht.

**Technische Daten für Anbaugeräte**

Typen
 Bewertung
 Transport
 Ersatzteile

Versicherung
 Kontakte & Hilfe

Hersteller

- VTN (254)
- FRD (456)
- Atlas Copco (266)
- Hydra Ram (421)
- INDECO (288)
- Caterpillar (226)
- HPK (272)
- Alle Hersteller

Kategorien

- Anbaugeräte / Abbruch-Sortiergreifler (123)
- Anbaugeräte / Anbaufächensplitter (34)
- Anbaugeräte / Anbaufäsköpfe (Hydr.) (56)
- Anbaugeräte / Beton-Abbruchzangen (102)
- Anbaugeräte / Beton-Palmsägen (115)
- Anbaugeräte / Beton-Stahlscheren (25)

	FP18	VTN	1.99 t	18-27	780 mm	mehr
	FB250	VTN	2720 kg	16-24	700 mm	mehr
	FB350	VTN	3500 kg	22-40	700 mm	mehr
	FP 10	VTN	1.54 t			mehr
	MT20 D	VTN	1.998 t	21-28	982 mm	mehr
	VF23	VTN	2.4 t	20-28	900 mm	mehr
	FP24	VTN	2.525 t	25-38	900 mm	mehr
	FP 20	VTN	2.2 t			mehr
	MD 1100	VTN		17-22		mehr
	MD210 D	VTN		15-21		mehr
	PD 02	VTN	0.284 t	2-6	350 mm	mehr

- Hersteller
- Anbaugerätetyp
- Eigengewicht
- Maschinengewichtsklasse
- kennzeichnende Arbeitsgröße
- usw. ergänzbar

Bild 5: Lectura Seite - Anbaugeräte Zangen (Quelle : Lectura)

Eine Abbildung wird jeweils vom Gerät gezeigt und die Hauptdaten wie Maße, Gewicht und Leistungsdaten. Weiterhin wird der Kostenverlauf im Kapitaldienst angezeigt im Vergleich zu den durchschnittlichen Reparaturkosten über der Zeit. Größere Firmen können sich hier im vorderen Bereich orientieren unter dem Aspekt „wann sollte ich verkaufen und erneuern“ und kleine Baufirmen bei Bedarf im hinteren Bereich, „wann kann ich mir das leistungsfähigere Anbaugerät“ leisten. Die Lectura verfolgte auch frühzeitig einen CO2 Rechner für die verschiedenen Gerätschaften und ist damit sehr zeitaktuell.

Managementsystem für Anbaugeräte

Damit haben wir für die erste Stufe Anbaugeräte Management, das Infosystem für die Planung abgehakt und kommen nun zum „Betriebsmanagement der Anbaugeräte“. Was brauchen wir hier? Das war auch schon Thema der Forschungsstelle TUM fml im Bundesprojekt Bauen 4.0 , das wir Ende 2022 abschlossen haben. In zahlreichen Interviews mit Planern, Bauleitern, den MTAs und ProfiFahrenern trugen wir die Bedürfnisse bei Maschinen- und Anbaugerätebetrieb zusammen. Folgende Punkte wurden uns genannt:

- Ortung und Ident des Anbaugerätes am Besten mit Kartenansicht und Tracing als IOT.
- Lokale Verbuchung des Anbaugerätes im Bestand der Baustelle
- Diebstahlschutz durch Fencing
- Automatische Einsatzverrechnung im BackOffice
- Bei Schaden - Memo und Bilder Meldung an die MTA
- Kontakt zum Geräte Ansprechpartner hinterlegen
- Geräte Übersicht für die Disposition
- Bei Bedarf Einsicht ins Digitale Benutzerhandbuch
- Bei Bedarf Videoclips für empfohlene Einstellungen und Handhabung
- Nächsten Wartungstermin kenntlich machen
- Bei Bedarf Einsichtnahme in die Geräte Historie und TaT Historie
- Sofortige Freigabe nicht mehr benötigter Anbaugeräte für den weiteren Baubetrieb

Das sind alles wichtige User Punkte !

Unser langjähriger Entwicklungspartner ist die MTS – Maschinentechnik Schrode und zusammen waren wir in vielen Forschungsprojekten gemeinsam unterwegs, so z.B. in Bauen 4.0 und jetzt in ToolFlott.

Bei der MTS entstand das MTS-Smart, das wir hier als „best practice“ für das Anbaugeräte Management sehen, es erfüllt alle oben genannten Punkte.

MTS-Smart ist wie folgt konfektioniert:

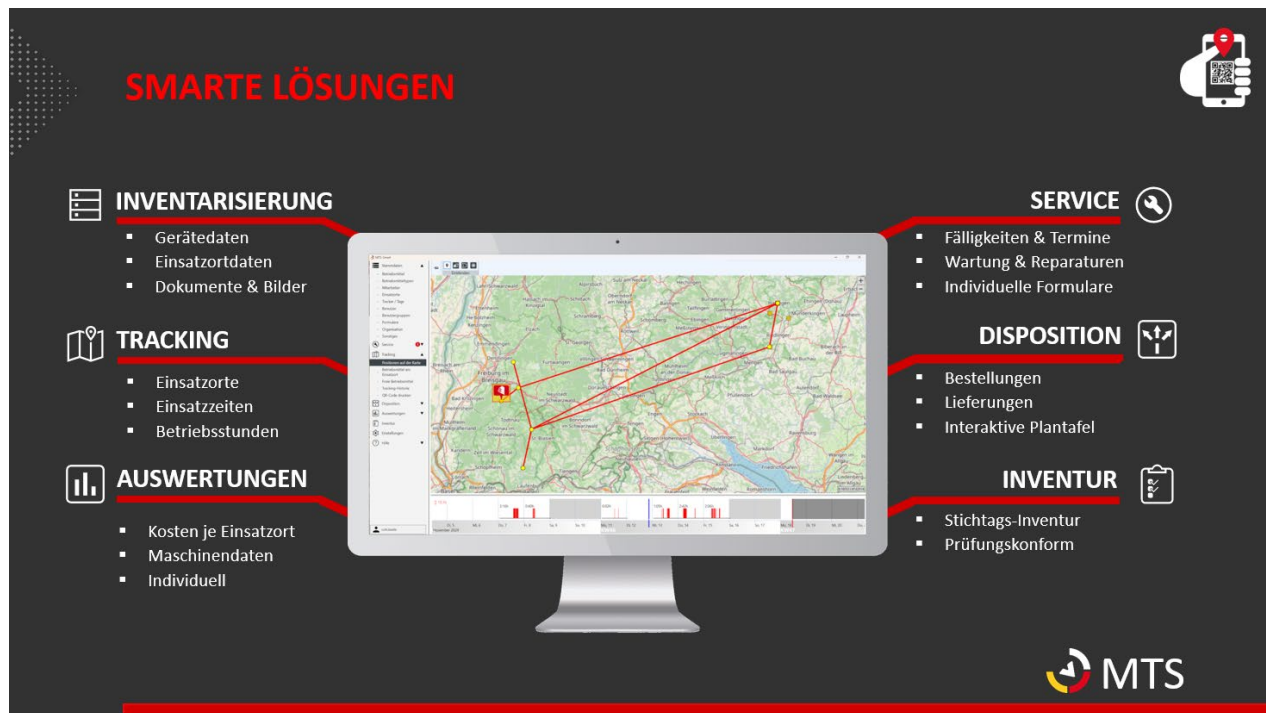


Bild 6: MTS-Smart Übersicht (Quelle: MTS Schrode / Hayingen)

Untersuchung geeigneter Sensortechnik für den Anbaugeräte Einsatz (AIS):

Parallel wurde im Projekt durch die Forschungsstelle TUM AIS die aktuell auf dem Markt vorhandene Sensortechnik auf ihre Anwendung auf der Baustelle analysiert. Für die Baustelle werden robuste, schlanke und kostengünstige Technologien gesucht. In AP 1 sollen verfügbare Technologien für die jeweiligen Wertegruppen betrachtet, bewertet und adaptiert werden. Die Bewertungskriterien basieren dabei auf den Anforderungen an Wirtschaftlichkeit, Robustheit, Konnektivität, Interoperabilität zum bestehenden Anwendungsbedarf und Datensicherheit. Weiterhin wurden Anforderungen an die zugrundeliegende Softwarearchitektur inkl. der Schnittstelle zur Sensortechnik untersucht.

Folgende Sensorgruppen wurden für den Anbaugeräte Einsatz untersucht:

- Beschleunigungs- und Neigungssensoren sowie inertielle Messeinheiten (IMUs) die z.B. bei Vemcon [86] oder Kiesel [78] bereits teilweise zur Erfassung des Gerätezustands zum Einsatz kommen bzw. die Positionierung des Anbaugerätes bestimmen.

- Temperatursensoren z.B. zur Parametrisierung temperaturabhängiger Arbeitskurven in hydraulischen Aktuatoren oder die Belastung von Abbruchgeräten kontrollieren
- Mikrofone (Luftschall, Körperschall), z.B. zur Lokalisierung (z.B. [79]), Verschleißerkennung oder Leistungsmessung (z.B. zur Erkennung von Arbeitszyklen [75]).
- Hallensoren, Planarsensoren und Wegmesssysteme zur Positions- und Leistungsmessung der Anbaugeräte
- Induktive Näherungsschalter und -sensoren sowie Lichtschranken zur Erkennung von Anbaugeräten und Gerätewechseln, z.B. für den gesicherten und verriegelten Anbaugeräte Einsatz.

Für die verschiedenen Sensortechnologien wurden Klassifikationstabellen erarbeitet und spezifische Vergleichs- und Bewertungskriterien festgelegt, die eine Klassifizierung der Sensoren in verschiedenen Kategorien ermöglichen. Insgesamt erfolgte eine Bewertung von 35 Sensormodellen in vier Kategorien anhand von jeweils 16 Kriterien. Neben Sensortyp und Funktionalität wurden aus den jeweiligen Datenblättern die Anzahl Messachsen, Messbereich, Messtoleranzbereich, Messgenauigkeit, Schnittstellen und Anschlussarten, Temperaturbereich, Schockbeständigkeit, Auflösung, Schutzarten, Größe, Gewicht, Material, Energieverbrauch für die Übersicht extrahiert. Im Folgenden ist ein Auszug der Übersichtstabelle für die Neigungssensoren zu sehen.

Tabelle 1: Übersicht Vergleich von Sensoreigenschaften - Auszug: Neigungssensoren zur Gerätezustandserfassung

Quelle: Lehrstuhl AIS

Sensorname	TMS/TMM22 (49 Produkte)	TMS/TMM88 Dynamic (9 Produkte)	TMS/TMM61 (2 Produkte)	TMS/TMM88 (17 Produkte)	TMM55 (6 Produkte)
Anzahl Messachsen	1 / 2	1 / 2	1 / 2	1 / 2	2
Messbereich	5° ... 360° (1-achsig), ±10° ... ±90° (2-achsig)	360° (1- achsig), ±90° (2-achsig),	360° (1- achsig), ±90° (2-achsig)	360° (1-achsig), ±90° (2-achsig)	±10°, ±45°, ±60° (fest eingestellt)
Messgenauigkeit	±0,25°		1-achsig: ± 0,25° 2-achsig: je Typ ± 0,2° bis ± 0,3°	1-achsig: je Typ ± 0,12° bis ± 0,4° 2-achsig: je Typ ± 0,05° bis ± 0,48°	
Schnittstellen	Analoge Strom- oder Spannungsschnittstelle (0-10V und 4-20mA)	CANopen, SAE J1939	CANopen	Analoge Strom- oder Spannungsschnittstelle; CANopen	Analoge Strom- oder Spannungsschnittstelle
Temperaturbereich		-40°C...+80°C			
Schockbeständigkeit		100g			
Auflösung			0,01°		bis zu 0,01°
Schutzarten	IP66, IP68 und IP69K	IP67/69			bis IP67
Material Gehäuse	Kunststoff (PA12) glasfaserverstärkt	Kunststoff (PBT) / Aluminium	Kunststoff (ABS)	Kunststoff (PBT) / Aluminium	Kunststoff (ABS)
Anschlussart	Leitung, 5-adrig (0.3m, 1.5m, 3m, 5m, 10m) ohne Stecker; Leitung 5-adrig (0.3m, 1m, 5m) mit Stecker M12, 5-polig	Stecker, 1x, M12, 5-polig Dose, 1x, M12, 5-polig	Leitung, 5- adrig, mit Stecker, M12, 5-polig, 0.2 m	Stecker, M12, 5-polig Stecker, 1x, M12, 5- polig Dose, 1x, M12, 5-polig Stecker, M12, 5-polig	Leitung, 5-adrig, mit Stecker, M12, 5-polig, 0.2 m
Parametrier- oder Programmierbar		Über PGT-12- Pro	Über PGT-12- Pro	Über PGT-12-Pro	

Um die Anforderungen an die zugrundeliegende Softwarearchitektur zu analysieren, wurden verschiedene softwaretechnische Anschlussarten für Sensoren untersucht. Es zeigt sich, dass

viele Sensoren mittlerweile mit eigenen Steuereinheiten (CU) ausgestattet sind und so ein Trend hin zu intelligenten Messsystemen im Gegensatz zu einfachen, analogen Sensoren besteht. Der ODX ISO 22901-1-Standard [77] liefert erste Hinweise, wie zwischen diesen CUs standardisiert kommuniziert werden kann. Daher wird ODX im weiteren Projektverlauf berücksichtigt und abstrahiert, um eine einheitliche Beschreibung der Daten und Informationen von Anbaugeräten und Sensoren zu ermöglichen.

4 AP 2: Sensorische Ausstattung Baumaschinenwerkzeuge

Umfang: 5 Monate Projektlaufzeit (fml: 2 PM, AIS: 5 PM)

Methoden: Lastenheft, Komponentendesign/-entwicklung

Um die in AP 1 erhobenen Anforderungen aus den Use Cases zu erfüllen und die Potenziale in der Werkzeug-, Informations- und Baulogistik zu heben, soll in AP 2 die sensortechnische Ausstattung von im maschinellen Tiefbau eingesetzten Anbaugeräten erweitert werden. Ziel ist es, die grundlegende Datenbasis für die Weiterverarbeitung in den folgenden Arbeitspaketen für die Anbaugeräthersteller zu legen. Dazu wird zunächst ein Lastenheft bestehend aus Informationsbedarfen erstellt. Diese Bedarfe orientieren sich an den BIM-Standards, um alle praxisrelevanten Daten aufzunehmen. Anschließend werden mögliche Geräte- und Bewegungsdaten zur Ableitung der Informationen diskutiert, bewertet und ausgewählt (fml).

Aus dem Lastenheft werden die gewünschten Funktionalitäten unter Berücksichtigung der technischen Anforderungen an die sensorische Ausstattung von Anbaugeräten abgeleitet. Bei der Auswahl geeigneter Sensoren soll auf eine Generalisierung der Informationen geachtet werden, d. h. welche Informationen kann man geräteunabhängig durch welche Sensorik erhalten, um eine einfache Übertragung auf andere Anbaugeräte oder Trägermaschinen zu schaffen. Auf dieser Basis und unter Berücksichtigung der Kommunikationsarten sowie -standards zur Datenübermittlung zwischen Trägermaschine bzw. Backoffice erfolgt die Gestaltung und Entwicklung des Sensorsystems inkl. Systemarchitektur und Schnittstellendefinition. Ziel ist weiterhin die einfache und wiederverwendbare Einbindung der Kommunikationsfunktionalitäten durch definierte Schnittstellen und das Design einer adaptierbaren, modularen Softwarearchitektur, welche die spezifischen Randbedingungen von Baumaschinen berücksichtigt. Diese Architektur ist auf verschiedenen etablierten Laufzeitumgebungen nutzbar (z. B. CODESYS oder STW-Steuerungen) und beinhaltet Strategien zur Verwaltung der auftretenden Softwarevarianten zur Unterstützung verschiedener Anbaugeräte (AIS).

Durchgeführte Arbeiten in AP 2 durch die Forschungsstelle TUM fml

Die Use Cases des AP1 wurden analysiert und geclustert, welche Daten für die Umsetzung dieser nötig sind. Es erfolgte die Zuordnung zu den Projektthemen:

Entwicklung eines notwendigen Internbusses zwischen Anbaugerät und Trägermaschine zum kompatiblen und gesicherten Einsatz des Anbaugerätes – Begleitung der MiC4.0-BUS Entwicklung

Der Bedarf der Ortung des Anbaugerätes – Betrachtung verschiedener eingesetzter Techniken nach Möglichkeiten und Genauigkeiten.

Untersuchung zu Möglichkeiten für das backoffice für Planung und Beauftragung von Anbaugeräte Einsätzen mittels Datenbank Infosystemen, Geräte Management Tools und graphisch auf einer möglichen BIM-Plattform.

Benötigte Daten und Möglichkeiten zur Unterstützung des Fahrers mit geeigneter HMI beim Anbaugeräte Betrieb, speziell bei der 3D Geländebearbeitung.

Datenbedarf und Möglichkeiten im Backoffice zur Darstellung von Bauleistung, erbracht durch den Anbaugeräte Einsatz gekoppelt an BIM Anwendungen.

Gerade der Abgleich mit den Datenformaten für BIM-Systeme war hier der wesentliche Punkt, der mögliche Restriktionen aufzeigte und eine Herausforderung.

Wesentliche Hinweise für die typischen Daten, welche auf der Baustelle benötigt werden und von Baumaschinen zu liefern sind, ist die ISO15143-3 [59]. Diese Norm, an deren Erstellung der Lehrstuhl TUM fml selbst in Teilen beteiligt war, dient als Ausgangspunkt für die Schaffung eines möglichen ISO-Datenstandards für die Anbaugeräte, um deren Nutzung Hersteller übergreifend zu harmonisieren und zu vereinfachen, im Sinne der Anwenderwünsche.

Begleitung der Entwicklung des MiC4.0-BUS

In Zusammenhang bei der Bearbeitung von AP2 soll als maßgebliches Element die Entwicklung des MiC4.0-BUS dargestellt werden, die Forschungsstelle TUM fml begleitete. Es erfolgte frühzeitig eine Arbeitsteilung mit der Forschungsstelle TUM AIS, die alternativ die Möglichkeiten des Multiformates OPC UA untersuchen und als Ergänzung im Projekt aufzeigen sollte, für die weitere Sensorsignal Verarbeitung und den Datenanschluß in die Cloud bzw. an das backoffice.

Der MiC4.0-BUS wurde in Cluster 7 Anbaugeräte MiC4.0 entwickelt. MiC4.0 wurde vom VDMA auf der bauma 2019 gegründet, um die bestehenden Maschinen Zustandsdaten nach ISO 15143 – 3 zu schärfen und Prozessdaten zu ergänzen. Diese Standarddaten sollten auch auf andere Maschinengruppen (Cluster) übertragen werden, d.h. neben den Erdbaumaschinen und Straßenbaumaschinen auf die Krane, Tiefbohrgeräte und Betonmaschinen [82]. HMI, Datensicherheit und Daten Systemarchitektur in und um die Maschine bildeten Sondercluster. Frühzeitig hat die Forschungsstelle TUM fml gedrängt, dass wir für die Anbaugeräte einen eigenen Entwicklungscluster brauchen. Das wurde letztendlich anerkannt mit der Schaffung von Cluster 7. Liebherr übernahm die Leitung und Obmannschaft. Liebherr war jetzt gemeinsam mit Volvo und Wacker-Neuson, den Anbaugeräte Herstellern MTS und Epiroc und den Sandwichbauern für Schnellwechsler und Tiltrotatoren, wie z.B. OilQuick, Rototilt, Lehnhoff Hartstahl und vielen anderen Firmen unterwegs den MiC4.0-BUS zu entwickeln, der nun in der Maschine die Kommunikation zwischen Anbaugerät und Trägermaschine unterstützt.

Forschungsstelle TUM fml übernahm die Sprecherrolle bei den Baufirmen, die sich zur User-Group formierte und den User Bedarf für die Kommunikation Anbaugeräte – Trägermaschine gut formulieren konnte. Zur User-Group gehören STRABAG BMTI, die Reif-Bau, Leonhard Weiss, Porr, Wolf und Müller und Puschbau von der Geiger-Gruppe. Auch die Anbaugerätehersteller MTS und Epiroc und die Vemcons waren aktiv in der Usergruppe. Alles treue Wegbegleiter und dann auch Partner im ToolFlott Projekt. So konnten wir frühzeitig die Bedürfnisse der User den Entwicklungsgruppen OEM, CANbus und Quickkoppler in Cluster 7 Anbaugeräte übermitteln. Folgender Kerndatensatz wurde nun der Entwicklung des MiC4.0-Bus zugrunde gelegt – siehe Tabelle 2:

Tabelle 2: Kerndatensatz Anbaugeräte

Datensatz	Erklärung
Ident des Anbaugerätes	Hersteller Ident / Nutzer Ident für User Katalogisierung, BGL Nummer,...
GPS-Daten (Hinweis Genauigkeit)	Lokalisierung des Anbaugerätes
Masse	Eigenlast plus Nutzlast (Kopflast der Maschine bzw. Transportlast)
Abmaße des Anbaugerätes und kennzeichnende Größen	<ul style="list-style-type: none"> - Um z.B. bei Arbeiten mit Oberbegrenzungen (wie Tunnel, Tiefgarage, unter Oberleitung, ...) einen oberen Totpunkt einstellen zu können – Arbeiten im Fencing - Volumen (z. B. beim Löffel) - Öffnungsweite (z. B. beim Greifer) - Schwerpunktlage des Anbaugerätes
Referenzpunkt, -linie, -fläche vom Anbaugerät	Referenz für 3D-Geländebaggern, Verdichtung. Nullpunkt Anbaugerät zur Maschinenkopplung definieren und Arbeitspunkt vermaßen.
Betriebsstunden	Verschleiß, Wartungsbedarf
Betriebsöldruck	Hinweise zur richtigen Einstellung – Grenzdruck limitiert
Ölflussvolumenstrom	Hinweise zur richtigen Einstellung – Grenzvolumenstrom limitiert
Grenzlasten des Anbaugerätes	Um Überlastung vorzubeugen

Auf dieser von den Usern gewünschten Datengrundlage wurde dann der MiC4.0-BUS entwickelt.

Die wichtigsten Attribute des MiC4.0-BUS für den Betrieb sind nun:

Das eindeutige Ident des Anbaugerätes auch mit einem Header von 200 Strings, die nun der User nach Bedarf mit seiner Kennzeichnung für das Anbaugerät belegen kann und mit der BGL-Nummer, wenn er möchte.

Die Ortung wird unterstützt mit dem Anschluß ans Kabinen CPX Terminal. Es gibt hier mittlerweile viele Ortungssysteme die im Einsatz sind, da wollten wir nicht einschränkend sein. Der MiC4.0-Bus unterstützt diese anschließbaren Systeme. Bei einfachen Anbaugeräten ohne Sensorik, erfolgt die Ortung über die Trägermaschine.

Wichtig ist die Einstellung der richtigen Hydraulik Versorgung für das Anbaugerät, d.h. der richtige Hydraulikdruck und Volumenstrom werden eingestellt, zumindest der Bedarf dem Fahrer angezeigt. Die meisten Anbaugeräte gingen bisher immer noch durch falsche Einstellung kaputt, das sollte jetzt der Vergangenheit angehören.

Wichtig auch die Anzeige der Verriegelung und Sicherung des Anbaugerätes. Denn unsere Studie „ Risikobereich Baumaschine“ , die wir im Auftrag der FVB zusammen mit den Dresdner Kollegen durchführten zeigte, bei BG-Bau und den Zentralen Unfallversicherern, dass die meisten tödlichen Unfälle mit Anbaugeräten durch herabfallende und umherfliegende Anbaugeräte geschieht. Auch das sollte jetzt ein Punkt der Vergangenheit sein.

Weiterhin einigten wir uns auf einen Anbaugeräte Nullpunkt und einen dazu vermaßten Arbeitspunkt , Arbeitslinie oder Fläche. Damit ist nun automatisch bei Koppelung die Maßkette für das 3D Geländearbeiten geschlossen. Da muss jetzt nichts mehr nachgemessen oder justiert werden. Der Fahrer kann gleich loslegen.

Auch die Umbaumaße eines Anbaugerätes werden mitgeteilt und ein Sicherheitskubus für die mögliche Kinematik. Damit wird nun das Arbeiten im Fencing unterstützt z.B. unter einem Fahrdraht, unter einer Brücke, in einer Tiefgarage , zwischen den historische Säulen, die man nicht beschädigen darf usw.

Natürlich werden für die Kennung und Charaktersierung eines Anbaugerätes dessen Eigenlast, Traglast, Greifervolumen und Greiferweite z.B. als kennzeichnende Größen offengelegt und stehen dem Fahrer zur Verfügung.

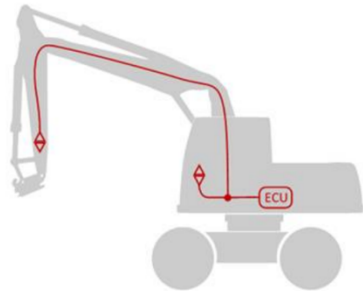
Die Kompatibilität Anbaugerät zu Trägermaschine und MiC4.0-BUS Funktionalität wird dem Fahrer beim Koppeln angezeigt

Der MiC4.0-Bus verbindet nun Trägermaschine und Anbaugerät in der Kommunikation. Man einigte sich schnell auf den CANbus auf Grundlage SAE J 1939 – unserem alten LKW Standard – das ist der gängige Bus in der Branche, den jeder kennt und eigentlich alle mit arbeiten.

Wir haben hier einen normierten Stecker zwischen Anbaugerät und Bagger Ausleger

Die PIN-Belegung ist offengelegt - siehe Bild 7.

Verlauf in der Maschine



Steckerbelegung normiert

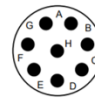


Figure 4: Pin layout of the MIC 4.0 BUS stick connector

	12V Systems	24V Systems
A	VCC (voltage common collector)	VCC (voltage common collector)
B	VCC (voltage common collector)	Optional: IGN for 2nd Power supply, switchable
C	GND (ground)	GND (ground)
D	GND (ground)	Optional: GND for 2nd Power supply, switchable
E	CAN High	CAN High
F	CAN Low	CAN Low
G	CAN_TERM (Termination line)	CAN_TERM (Termination line)
H	Not used	Not used

Table 2: Pinout for the MIC 4.0 BUS stick connector

Bild 7: MiC4.0-BUS Verlauf und Steckerbelegung (Quelle: Beschreibung MiC4.0-BUS Version 1.0)

Wichtig, dass auch der Anschluß zum Kabinenmonitor vereinheitlicht ist, um den Fahrer über HMI mitzunehmen und die Ortungssysteme schalten zu können. Auch die Steuerung bzw. Anzeige der Sandwichkomponenten erfolgt über das an den MiC4.0-BUS angeschlossene Kabinenterminal.

Wichtig ist auch, dass nun verschiedene Kombinationen von Sandwiches aus Schnellwechslern und Tiltrotator diskrimierungsfrei herstellerübergreifend integriert werden können – siehe Bild 8.

Kombination Werkzeug – Tiltrotator - Schnellwechsler

Anbaugerät inklusive Sandwich

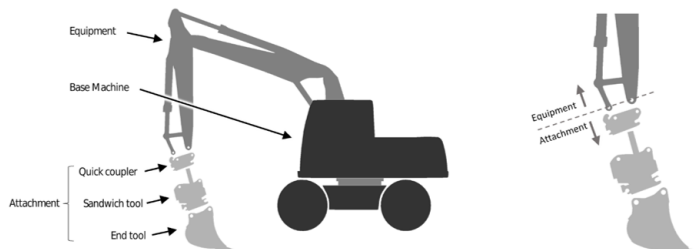


Bild 8: Das Sandwich mit Schnellwechsler und Tiltrotator zwischen Maschinen Ausleger Koppelpunkt und Anbaugerät (Quelle: Beschreibung MiC4.0-BUS Version 1.0)

Alle Anbaugeräte haben einen bekannten Nullpunkt und einen dazu vermaßten Arbeitspunkt, Arbeitslinie oder Fläche. Damit ist nun automatisch bei Koppelung die Maßkette für das 3D Geländearbeiten geschlossen. Das dazwischenliegende Sandwich wird ebenfalls maßlich erfasst – siehe Bild 9.

Definierte Nullpunkte und Arbeitspunkt

Nullpunkt Maschine

Koppelpunkt Schnellwechsler

Nullpunkt Werkzeug

Arbeitspunkt Werkzeug

➔ Kinemattkette geschlossen und bekannt für 3D - Geländearbeit

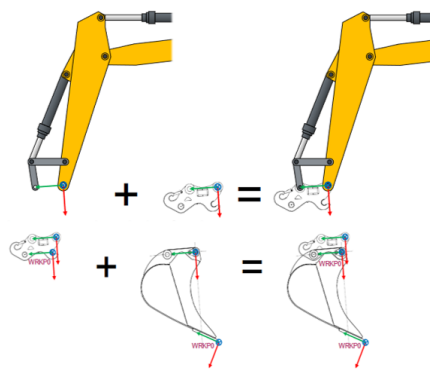
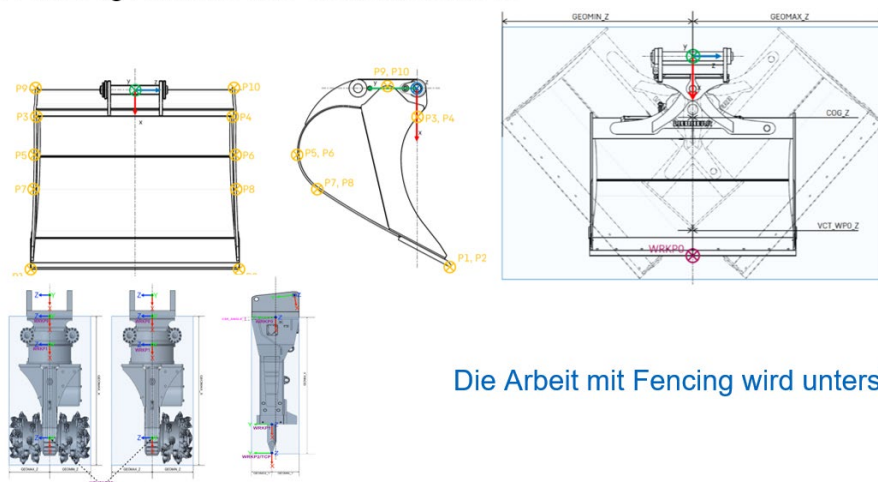


Bild 9: Maßkette Nullpunkt – Arbeitspunkt (Quelle: Beschreibung MiC4.0-BUS Version 1.0)

Auch die Umbaumaße eines Anbaugerätes werden mitgeteilt und ein Sicherheitskubus für die mögliche Kinematik – siehe Bild 10. Damit wird nun das Arbeiten im Fencing unterstützt bei geometrischen Umgebungseinschränkungen.

Werkzeug Abmaße und Sicherheitskubus



Die Arbeit mit Fencing wird unterstützt

Bild 10: Umbaupunkte am Anbaugerät und Sicherheit Kinematik – Kubus (Quelle: Beschreibung MiC4.0-BUS Version 1.0)

Der MiC4.0-Bus in der Version 1.0 wurde im Juli 2024 beschlossen und freigegeben. Die Beschreibung hierzu – über 200 Seiten, sehr detailliert – liegt als Druckexemplar und zum DownLoad beim VDMA MiC4.0 der Öffentlichkeit zur Verfügung – seit September 2024. Die positive Zertifizierung seitens der IFA liegt vor – siehe Bild 11.

Technical Report 09/2024 und IFA Research Report



Bild 11: Technical Report MiC4.0-BUS und Gutachten der IFA (Quelle: VDMA MiC4.0)

Im Rahmen MiC4.0 Cluster 7 Weiterentwicklung zu MiC4.0-BUS „Next Steps“, wurde über die User Group und Projektpartnern aus ToolFlott noch Folgendes angemeldet – siehe Bild 12.

User Group “Next Steps“

- Wir brauchen eine kurze Beschreibung des MiC4.0 BUS aus der Sicht des Anwenders.
- Wir brauchen ein RetroKIT und RetroFIT für Bestandsmaschinen der letzten 10 Jahre.
- Wir brauchen bestimmte MiC4.0-Bus Daten auch im BackOffice der Baufirma
➡ Idee vom Datentaxi Trägermaschine

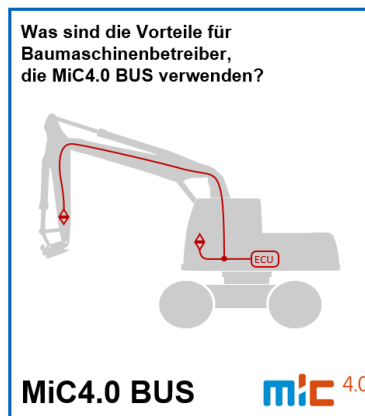


Bild 12: „Next Steps“ – User Group (Quelle: MiC 4.0 Cluster7 Protokoll)

Das Ergebnis und die Vorteile des MiC4.0-BUS soll nun verständlich für die Baufirmen, die MTAs und die Fahrer beschrieben und in Bekanntheit und Kenntnis gebracht werden. Wir müssen jetzt an die Baufirmen, die MTAs , die Baumaschinenmeister herantreten und die mitnehmen, das soll noch im Rahmen des ToolFlott Projektes „die Zeit danach“ über geeignete Veröffentlichungen erfolgen.

Wir brauchen ein RetroKIT und RetroFIT für die Bestandsmaschinen, z.B. bis 10 Jahre alt zur Nachrüstung , also nicht nur für Neumaschinen. Das ist angemeldet und soll geschehen. ToolFlott Partner Vemcon ist da bereits aktiv und hat schon mehrere Maschinen mit MiC4.0-BUS nachgerüstet.

Es besteht die Initiative der User-Group, stellvertretend die Forschungsstelle TUM fml mit den ToolFlott Partnern MTS und Epiroc, dass bestimmte Anbaugerätedaten über die Trägermaschinen Telematik dem Backoffice der Baufirma zukommen zu lassen. Zumindest die MiC4.0-BUS Daten:

- Ident des Anbaugerätes
- Verortung des Anbaugerätes über die Trägermaschine
- Zeitstempel
- Betriebsstunden des Anbaugerätes kumuliert
- Sandwich Zusammensetzung

Dieser Datensatz des Anbaugerätes soll dem Datensatz ISO 15143-3 der Trägermaschine als Block angehängt und mit der Telematik der Trägermaschine als „Datentaxi“ zum Server des OEM gesendet werden und dort dem User nun ebenfalls zum Download zur Verfügung stehen.

Davon profitieren vorallem die KMU Baufirmen, die nun ohne zusätzlichen technischen Aufwand die Anbaugerätedaten aus dem MiC4.0-BUS erhalten. Damit besteht nun Transparenz zum Einsatz des Anbaugerätes für die MTA und Disposition, der Einsatz kann automatisch im backoffice verrechnet werden und der Wartungsbedarf kann zumindest über die Betriebsstunden verfolgt werden.

Der MiC4.0-BUS Datensatz wurde Mitte September 2024 in Tokio bei der ISO WorkingGroup 15143 als - **Entwurf** – angemeldet und soll bei der Weiterentwicklung der ISO 15143 beachtet werden – siehe Bild 13.

- Kontakt mit der ISO WorkingGroup 15143 – Der Teil 3 geht in die Revision
- Entwurf Datenstandard Anbaugeräte auf Grundlage des MiC4.0-BUS angemeldet

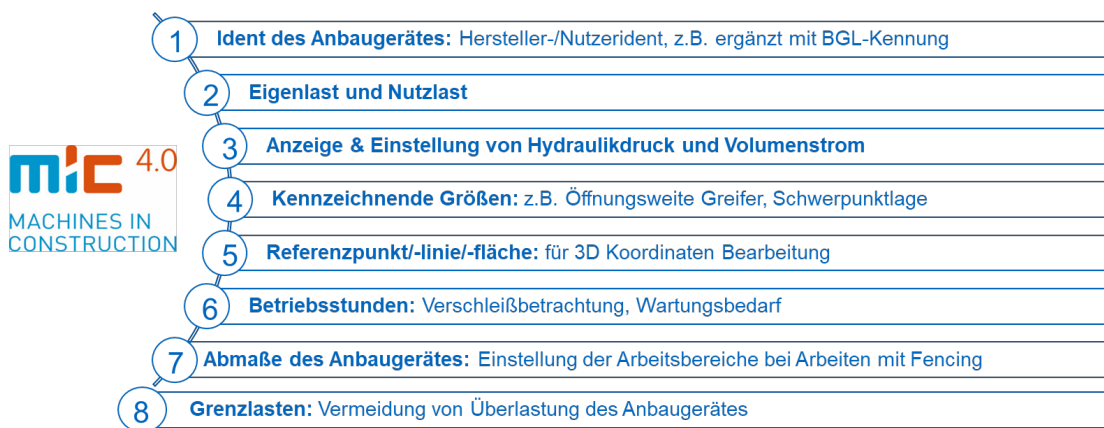


Bild 13: Entwurf zum Datenstandard Anbaugerät für ISO 15143 auf Grundlage des MiC4.0-BUS (Quelle MiC4.0)

Die Verortung des Anbaugerätes läuft hier über die Trägermaschine bei einfachen Anbaugeräten ohne Sensorik bzw. über die verbaute Verortung bei aktiven Anbaugeräten.

Damit hätten die User , vorallem auch die KMUs, einen erheblichen Mehrwert beim Anbaugeräteeinsatz, als bisher.

Ortung von Anbaugeräten

Da das Thema Verorten von Anbaugeräten zwar durch den MiC4.0-BUS über den Anschluss des Datenterminals in der Fahrerkabine unterstützt wird, aber explizit kein Entwicklungsthema ist, beschäftigte sich das Projekt ToolFlott im Rahmen der Sensorik mit dieser Thematik.

Die Ortung von Anbaugeräten ist ein wichtiges Thema, das wir im Rahmen der TaT Technologien im Bundesprojekt Bauen 4.0 näher untersucht haben.

Ziel war hier, dass neben den Maschinen und Anbaugeräten auch Beistellgeräte wie Container, Stapler und Wassertankwagen, das Baumaterial in Form von Fertigteilen, Bundle, Paletten, Gitterboxen und auch Schüttgüter transparent im Transport, der Lagerung und im Verbau erfasst werden- siehe Bild 14.

Lehrstuhl für
Fördertechnik,
Materialfluss, Logistik

Die Ortung von Anbaugeräten



Materialflüsse und Logistik werden transparent auf der Baustelle



- Baumaschinen Einsätze
- Anbaugeräte Einsatz und Vorhaltung
- Beistellgeräte vor Ort wie Container, Stapler, Beleuchtungsanlagen ...
- Baumaterialien vor Ort geliefert, gelagert und verbaut

Bild 14: Die Baustellen Aktivisten werden über die TaT Technologie zu IOTs (Quelle: Lehrstuhl fml)

Eine Umfrage beim VDBUM Großseminar 2020 mit ca.100 Teilnehmern zeigte zur Ortung bei den Anbaugeräten folgenden Bedarf mit hoher Wertigkeit:

Die Listung erfolgt nach abnehmenden Ranking:

- Dispositionsplanung -> Verfügbarkeit
- Diebstahlschutz
- Verfolgung und Kontrolle der Lieferung auf die Baustelle -> Termintreue
- Ortung auf der Baustelle -> keine Suchzeiten
- Ident der Einsatzzeiten -> automatische Verrechnung
- Bestandsmanagement und -überwachung -> Transparenz
- Kontrolle der Gerätebetriebsstunden -> Wartungsbedarf

Die Genauigkeit der Anbaugeräte Ortung kann in 4 Stufen beschrieben werden mit steigender Anforderung – siehe Bild 15.

Lokalisierung des Anbaugerätes

Anforderungsniveau

- Niveau 1: einmalige Meldung der Ortungsdaten und keine GPS-Koordinaten nötig
- Niveau 2: tägliche Datenaktualisierung der Positionen, ggf. mit GPS-Koordinaten
- Niveau 3: Datenaktualisierung in Stunden bzw. Minuten-Takten, genauere GPS-Koordinaten
- Niveau 4: Datenaktualisierung in Echtzeit, hohe Genauigkeit bei GPS-Koordinaten

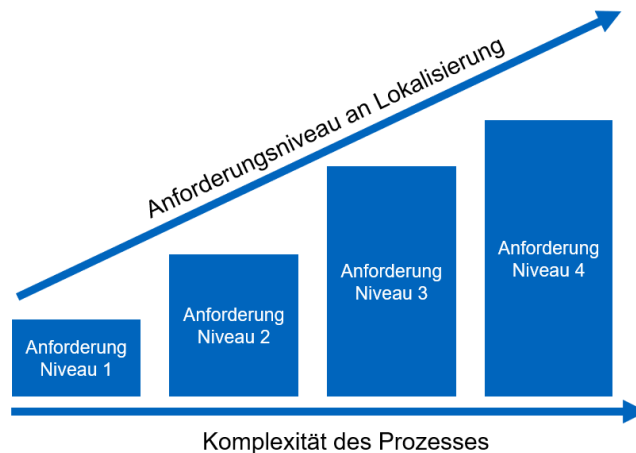


Bild 15: 4 Level zur Ortungsgenauigkeit von Anbaugeräten (Quelle: Lehrstuhl fml)

Bei der Ortung kommen verschiedene Techniken zum Einsatz, die in Bild 16 den Leveln zugeordnet sind. In Tabelle 3 ist der Vergleich der Systeme dargestellt.

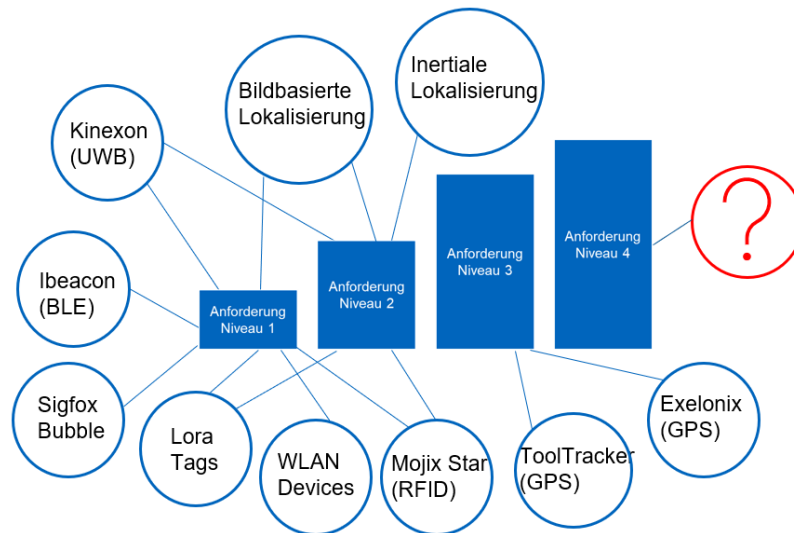


Bild 16: Spiegelung eingesetzter Technik an der Levelstruktur (Quelle: Lehrstuhl fml)

Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik TUM

Ortung des Anbaugerätes auf der Baustelle Systemvergleich Positionierungssystem

Zielsetzung: Lokalisierung des Anbauwerkzeuges z.B. zum Finden des Werkzeuges auf der Baustelle, Diebstahlschutz

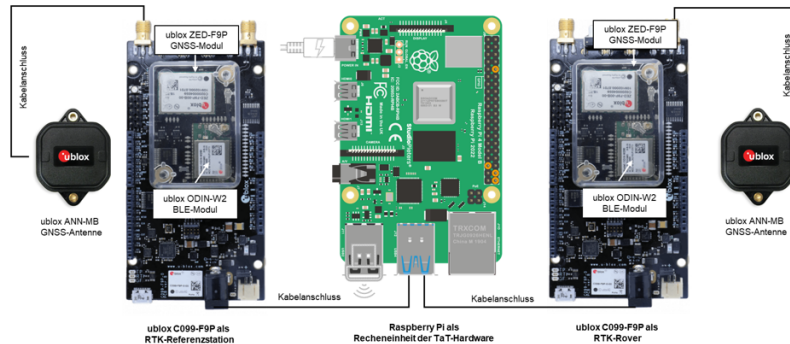
Outdoor Lokalisierung- Bestandserfassung							
Technologie	Direkte Ortung GPS	Ultra Wide Band	RFID	Wlan	Bluetooth	LoRa	Sigfox
Einsatzgebiet							
- Anwendungsfälle Indoor	k.A.	+++	+++	+++	+++	+++	+
- Anwendungsfälle Outdoor	++++	+	+	+	+++	+++	+++
Genauigkeit							
- Indoor	k.A.	cm- Bereich; m-Bereich	1m	10m	1 bis 10m	1 bis 10m	m-Bereich
- Outdoor	cm- Bereich; m-Bereich	cm- Bereich; m-Bereich	1m	10m	1 bis 10m	über 10m	m-Bereich
Energieverbrauch	niedrig	niedrig	niedrig	mittel	niedrig	niedrig	mittel
Vorteil	Reife Technik für Outdoor Ortung mit verschiedenen Kommunikationsmodulen kombinierbar	Hohe Genauigkeit Echtzeit zusätzliche Informationen möglich	kostengünstig (RFID Tag)	zusätzliche Informationen möglich	einfach einsetzbar	geeignet für Outdoor und Indoor	geeignet für Outdoor und Indoor
Nachteil	hohe Investition	hohe Investition	Störung durch Radiowelle	wenige Anwendungsfälle	geringe Reichweite jeder Basisstation	begrenzte Genauigkeit	neue Technologie
Beispiel	ToolTracker Lite	Kinexon	Mojix Star	WLAN-fähige Devices, z.B. Tags von Skyhook Wireless	ibeacon	Lora Tags	Sigfox Bubble

Tabelle 3: Vergleich der Positioniersysteme (Quelle: Lehrstuhl fml)

Es zeigt sich, dass der **Level 4 mit dem hohen Anspruch: Datenaktualisierung in Echtzeit mit hoher Genauigkeit bei GPS-Koordinaten**, noch ein technisches Defizit darstellt. Mit diesem Ortungslevel könnte man aber zukünftig die „genaue Aktivitätserkennung des Anbaugerätes“ online erkennen und interpretieren, wenn man die Signale über KI auswertet. D.h. Zustand Betrieb, Leerlauf gekoppelt, Transport und abgelegt, lassen sich so genau zuordnen und unterscheiden bei einer hohen Positioniergenauigkeit. Dazu wurde von der Forschungsstelle TUM fml ein DGNSS Sensor – siehe Bild 17 - als Demonstrator entwickelt und getestet. Die Ortungsgenauigkeit lag bei +/- 1 cm.

Tracker-Hardware

- Zwei ublox GPS-Sensoren als Ortungskomponenten
- Raspberry-Pin als zentrale Recheneinheit
- Kommunikation über WLAN oder 5G-Netz zwischen Tracker und weiteren Computer, z. B. Boardcomputer auf Trägermaschine



Aufbau der für Anwendungsszenario 4 entwickelten TaT-Hardware

Bild 17: Ansatz eines Doppel GNSS – Sensors mit Raspberry Pi für Level 4 (Quelle: Lehrstuhl fml)

Ziel ist die sensorbasierte online Ortung eines Anbaugerätes zukünftig mit Level4 zu erhalten, damit die „Werkzeug Aktivität“ direkt erkennbar ist und weiterverarbeitet werden kann nach dem Motto: „wenn wir wissen was unsere Anbaugeräte auf der Baustelle machen, dann wissen wir wo der Baufortschritt aktuell steht.“

Hierzu wurden nun verschiedene KI Ansätze mit Trainee im Versuch für gängige vier Anbaugeräte getestet – siehe Bild 18.

Zielsetzung

- Entwicklung einer Methode zur automatischen Erfassung der Bewegung verschiedener Anbaugeräte mittels Sensorik für weitere Anwendungen wie Flottenmanagement und Prozessverfolgung
- KI soll zum Einsatz kommen um deren Eignung hierfür zu testen.
- Die verwendeten Algorithmen des Maschinellen Lernens sind vor allem

K-Nächste-Nachbarn (KNN), Lineare Regression (LR), Mehrlagiges Perzeptron (MLP), Entscheidungsbäume (DT), Support Vector Machine (SVM) usw.



Bild 18: Einsatzvergleiche bei Löffel , Anbauverdichter, Greifer und Separator (Quelle: Lehrstuhl fml)

KI soll zum Einsatz kommen, um deren unterstützende Eignung hierfür zu testen.

Als verwendete Algorithmen des Maschinellen Lernens wurden vorausgewählt:

- K-Nächste-Nachbarn (KNN)
- Lineare Regression (LR)
- Mehrlagiges Perzeptron (MLP)
- Entscheidungsbäume (DT)
- Support Vector Machine (SVM)

Vorgehensweise und Test Beschreibung:

Die Bewegungstypen werden in die Klassen: Betrieb, Transport und Ruhe unterschieden und für die Anbaugeräte: Löffel, Anbauverdichter, Greifer und Separator exemplarisch untersucht.

Zur Datensammlung auf dem Anbaugerät kommt der ToolTracker von Fa. Vemcon zum Einsatz. Dieser verfügt über einen GPS-Sensor, eine Inertiale Messeinheit (IMU) und ein Kommunikationsmodul, d.h. Datentransfer per LTE in die Cloud oder per Bluetooth an die mobile Maschine.

Insgesamt werden ca. 200 min Daten für alle Anbaugeräte gesammelt, davon 150 min Daten für das Training und 50 min für die Validierung

Die Genauigkeit der KI Verfahren sind im Vergleich in Bild 19 dargestellt

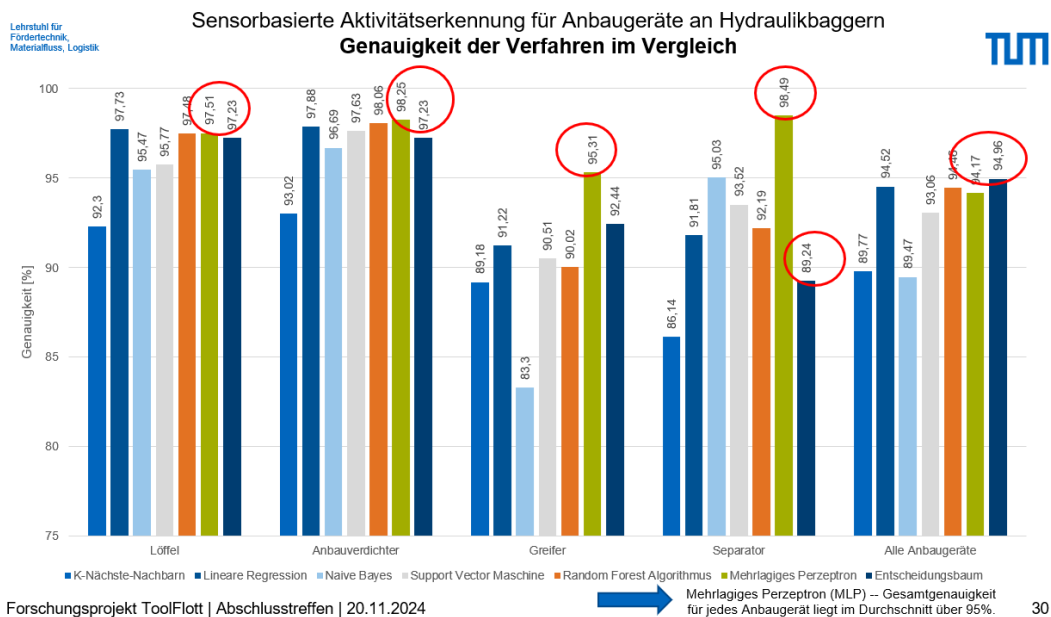


Bild 19: Genauigkeit der KI Verfahren im Vergleich (Quelle: Lehrstuhl fml)

Das mehrlagige Perzeptron (MLP) schneidet hier als angesetzte KI – Methode sehr erfolgreich ab. Gesamtgenauigkeit für jedes Anbaugerät liegt im Durchschnitt über 95%. Weitergehendes Trainee sollte den Wert noch verbessern.

Durch diesen Demonstrator Test ist gezeigt, dass die hochgenaue Ortung und Aktivitätserkennung von Anbaugeräten in Zukunft bei Bedarf auch online erfolgen kann.

Es folgt nun eine Betrachtung zum Thema robuster Sensordatentechnik beim Betrieb von Anbaugeräten im Rahmen AP2 sowie die Betrachtung, wie kann der MiC4.0-BUS mit zusätzlicher Datenverarbeitung noch weiter unterstützt werden – Stichwort OPC UA Anwendungen (AIS)

Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse in AP 2 durch die Forschungsstelle TUM AIS

Im Arbeitspaket 2 wurden die Vorarbeiten für die Sensor Hardware- und Software-Systemarchitektur für den bidirektionalen Datenaustausch (vgl. AP3) geleistet. Die Ergebnisse des Arbeitspakets umfassen die Auswertung der in AP1 identifizierten Sensoren, die Generalisierung der Sensorinformationen für eine geräteunabhängige Datenerfassung und -übertragung, die Analyse bestehender Protokollarten sowie die Entwicklung einer Plug-and-Play-Lösung für die Umsetzung der Kommunikationsfunktionalität – siehe Bild 20.

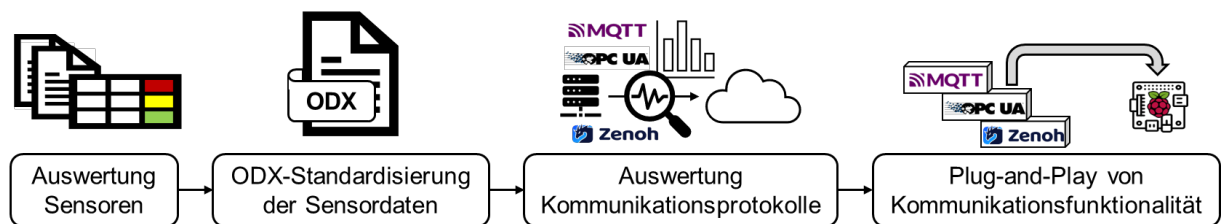


Bild 20: Auswertung von Sensoren und Kommunikationsprotokollen zur Plug-and-Play Anbindung verschiedener Anbaugeräte und Sensoren an die mobile Maschine (Quelle: Lehrstuhl AIS)

1. Auswertung der Sensoren

Die identifizierten Sensortechnologien (vgl. Tabelle 1 aus AP1) wurden auf ihre Eignung für die sensorische Ausstattung von Anbaugeräten und mobilen Maschinen zur Adressierung der in Arbeitspaket 1 vom fml identifizierten Use-Cases bewertet. Die Bewertung der Einsatzfähigkeit der einzelnen Sensoren an Anbaugeräten erfolgte anhand einer Ampel-basierten Farbcodebewertung. Zusätzlich wurden die Hardware-Sensorschnittstellen (Legs, PINs etc.) und die Anbindung an die elektro-mechanische Infrastruktur des Anbauwerkzeugs (Supply Voltage, mechanische Abmessungen) sowie Software-Sensorschnittstellen zum Auslesen der Daten berücksichtigt. Die Sensortechnik-Übersicht (AP1) inklusive der detaillierten Sensormodellbewertung (AP2) wurde im Projektkonsortium diskutiert, ergänzt und abgenommen.

2. ODX-Standardisierung der Sensordaten

Ziel des Arbeitspakets war es, Sensorinformationen so aufzubereiten, dass sie quelloffen erfasst und zwischen Anbaugerät und Trägermaschine übertragen werden können. Wenn neue Sensoren verbunden werden, muss die Maschine entsprechend des technischen Sensordatenblatts konfiguriert werden, sodass sie die Sensordaten korrekt auslesen und interpretieren kann. Um diesen manuellen Aufwand bei der Sensoranbindung zu reduzieren, wurde das Sensordatenblatt in eine formale, maschinenlesbare Beschreibung überführt. Hierfür wurde das *Open Diagnostic Data eXchange* (ODX)-Format der ISO 22901-1 [77] verwendet, welches auf xml basiert und als formale Beschreibungssprache für einen standardisierten Datenaustausch von Diagnosedaten entwickelt wurde. ODX ist im Automotive-Bereich sowie bei Steuerungstechnikherstellern etabliert, zertifiziert und standardisiert. Daher wurde ODX in diesem Projekt verwendet, um Sensorinformationen wie Maximalwerte, Messtoleranzbereiche oder Genauigkeit, abzubilden. Zusätzlich können im ODX-Format Flashdaten abgebildet werden, mittels derer direkt Funktionen der Software der Steuereinheit parametrisiert werden können, was im Plug-and-Play-Betrieb den manuellen Konfigurationsaufwand reduziert.

Am Beispiel von drei repräsentativen Sensoren – einem Temperatursensor, einem Drucksensor und einer Inertialen Messeinheit (IMU) – wurde ein Übersetzungsschema vom Datenblatt ins ODX-Format hergeleitet. Das technische Datenblatt einer IMU im ODX-Format ist beispielhaft in Bild 21 dargestellt. Durch die Überführung der Datenblätter in das ODX-Format kann die Steuerung diese automatisiert lesen und die Daten direkt verarbeiten. Ein per Plug-and-Play angeschlossener Sensor kann so ohne zusätzliche manuelle Konfiguration genutzt werden, da die Steuerung alle für die Sensorschnittstelle notwendigen Informationen zur Datenverarbeitung direkt aus der ODX-Datenbeschreibungsdatei extrahieren kann. Steuereinheiten können aus dem ODX-Format zudem variantenspezifische Konfigurationen von Anbaugeräten auslesen, was eine einfache Anpassung an verschiedene Anbaugeräte oder deren Softwarevarianten ermöglicht.

TECHNICAL DATA	
Sensor	
Parameter	SMX.igs-e
Acceleration measuring range	±2 g
Acceleration resolution	1 µg
Gyroscope measuring range	±1000°/s
Gyroscope resolution	0.001°/s
Angle measuring range (configurable)	±90° or 360°
Angle resolution	0.01°
Angle accuracy	static ±0.3° dynamic ±0.5°
Temperature coefficient	0.01°/K
Filter options (configurable)	Butterworth filter 8 th order Critical damped filter 8 th order Kalman filter
CAN Interface	
Feature	Properties
Output signal	CAN, bit rate 100 ... 1000 kBit/s
Interface (configurable)	CAN, CANopen or SAE J1939
Electrical protection	Short circuit protected (signal on GND/VCC)
Two-Colour-Status LED	Green / Red

```

<Sensor CAN-ID="0x04" Status="0" StatusDescription="Normal Operation" Type="IMU Sensor"
  <OutputProtocol>CANopen</OutputProtocol>
  <IMUFormat>IEEE 754 32-Bit floating-point Format</IMUFormat>
  <Description>IMU SMX.igs-e</Description>
  <Location>Driver Platform</Location>
  <Frequency>
    <Value>100</Value>
    <Unit>Hz</Unit>
  </Frequency>
  <AngleAccuracy>
    <Static>
      <Min>-0.3</Min>
      <Max>0.3</Max>
      <Unit>Degrees</Unit>
    </Static>
    <Dynamic>
      <Min>-0.5</Min>
      <Max>0.5</Max>
      <Unit>Degrees</Unit>
    </Dynamic>
  </AngleAccuracy>
  <AccelerationSensor>
    <Arbitration-ID>0x14</Arbitration-ID>
    <MeasurementDirection>X</MeasurementDirection>
    <MeasuringRange>
      <Min>-2</Min>
      <Max>2</Max>
      <Unit>g</Unit>
    </MeasuringRange>
    <Resolution>
      <Value>1</Value>
      <Unit>micro_g</Unit>
    </Resolution>
  </AccelerationSensor>
  <AccelerationSensor>
    <Arbitration-ID>0x24</Arbitration-ID>
    <MeasurementDirection>Y</MeasurementDirection>
    <MeasuringRange>
      <Min>-2</Min>
      <Max>2</Max>
      <Unit>g</Unit>
    </MeasuringRange>
    <Resolution>
      <Value>1</Value>
      <Unit>micro_g</Unit>
    </Resolution>
  </AccelerationSensor>
  </Sensor>
  
```

Ausschnitt aus Datenblatt von STW IMU-Sensor: https://www.stw-mobile-machines.com/fileadmin/user_upload/content/STW/Produkte/Datenblaetter/94166_SMX.igs-e.pdf

Bild 21: Übersetzung eines technischen Datenblatts (links) ins ODX-Format zur Datenverarbeitung von via Plug-and-Play verbundenen Sensoren (hier: am Beispiel eines IMU-Sensors des Herstellers STW)

3. Auswertung möglicher Kommunikationsprotokolle

Für die Datenübermittlung zwischen Anbaugerät, Trägermaschine und Backoffice (Cloud) wurden verschiedene Kommunikationsprotokolle und -standards auf ihre Eignung untersucht. Die Kommunikationsarten wurden hinsichtlich funktionaler und nicht-funktionaler Anforderungen wie Übertragungsmethode, Robustheit (Schutz vor Datenverlust), kommunizierbare Datenmenge und -typ, Kompatibilität mit bestehender Infrastruktur (z.B. SPS-Kompatibilität) und Echtzeitverhalten evaluiert. Die Vergleichsergebnisse sind in einer Tabelle zusammengefasst, die die etablierten Kommunikationsprotokolle und -standards auflistet und deren Bewertung anhand der acht o.g. Kriterien detailliert darstellt – siehe Tabelle 4.

Tabelle 4: Auszug aus Vergleich der Kommunikationsprotokolle (Quelle: Lehrstuhl AIS)

Protokoll	Übertragungs- methode	Empfangs- bestätigung	Schutz vor Datenverlust	Max Paketgröße	Direkt in TIA verwendbar	Datentyp	Erhaltung der Reihenfolge	Latenz SPS
TIA Com	Server/Client 1 <-> 1	Bedingt	Nein	16MB	Ja	Bytearray	Ja	
HTTP	Server/Client 1..* <-> 1	Ja - Statuscode	Nein	Unbekannt	Ja	String in HTML	Ja	10ms (= 1 Zyklus)
MQTT	Pub/Sub 1..* <-> 1..*	Ja – QoS{0,1,2}	Ja	260MB	Ja	String	Ja	5µs
OPC UA	Pub/Sub 1..* <-> 1..* oder Server/Client	Ja	Unbekannt	Unbekannt	Ja	Komplexe Datentypen	Unbekannt	20ms (= 2 Zyklen)
SNMP	Server/Client 1..* <-> 1	Nein	Unbekannt	486 Byte	Ja	Bytearray	Unbekannt	
AMQP	Pub/Sub 1..* <-> 1..* Server/Client 1..* <-> 1	Ja	Ja	>1GB	Nein	String + Metadaten	Nein	
Kafka	Pub/Sub 1..* <-> 1..*	Ja	Ja	>1GB	Nein	String + Metadaten	Nein	

OPC UA ist in der Automatisierungstechnik bereits etabliert und wird dort erfolgreich in Plug-and-Play-Anwendungen eingesetzt. Durch seine einheitliche, plattformübergreifende Kommunikationsarchitektur ermöglicht OPC UA eine nahtlose Verbindung vom Sensor oder Anbaugerät bis hin zur Cloud (Backoffice), was eine effiziente und flexible Datenübertragung gewährleistet. Diese Struktur erleichtert die einfache und wiederverwendbare Integration von Kommunikationsfunktionen, da OPC UA auf einem klar definierten Datenmodell und standardisierten Schnittstellen basiert. Dies trägt nicht nur zur Interoperabilität verschiedener Systeme bei, sondern unterstützt auch eine langfristige Skalierbarkeit und Anpassungsfähigkeit der Lösungen, die für den Einsatz in mobilen Baumaschinen notwendig sind. OPC UA wird bereits in einigen Baugremien diskutiert, weshalb es hier, neben dem in der Baubranche etablierten CAN-Bus, ebenfalls implementiert und evaluiert wird.

4. Plug-and-Play von Kommunikationsfunktionalität

Wenn Anbaugeräte gewechselt werden, müssen die mobilen Maschinen entsprechend neu konfiguriert und softwaretechnisch angepasst werden. Um den Konfigurationsaufwand gering zu halten, kommen aktuell Steuerungsplattformen auf den Markt, die eine einfache Konfiguration per Drag-and-Drop ermöglichen (vgl. z.B. Node-Red von IBM, openSyde von STW). Der Vergleich der verschiedenen Kommunikationsprotokolle und -standards zeigte, dass jedes Protokoll verschiedene Vor- und Nachteile hat, beispielsweise MQTT mit seiner hohen Zuverlässigkeit, Echtzeitfähigkeit sowie geringem Ressourcenverbrauch sowie OPC UA mit seiner Interoperabilität und Sicherheit [76]. Um je nach Anforderungen (zugrundeliegender Hardware, Echtzeitanforderungen, Datenformate und -mengen) flexibel zu sein, wurde im AP2 untersucht, ob und wie auch die Kommunikationsfunktionalität einfach und wiederverwendbar ausgetauscht werden kann.

Als Lösung wurde ein Konzept basierend auf Docker entwickelt. Docker ist eine frei verfügbare Software, die es ermöglicht, lauffähige Anwendungen in Form von Containern zu kapseln und so die Anwendungen leicht transportieren und austauschen zu können. Im AP2 wurden beispielhaft die Kommunikationsprotokolle MQTT, OPC UA und Zenoh in Docker gekapselt. Zenoh wurde aufgrund seiner Skalierbarkeit bei gleichzeitig geringem Ressourcenverbrauch ausgewählt. Es wurde 2022 als open-source Pub/Sub/Query-Kommunikationsprotokoll entwickelt. Die drei Kommunikationsprotokolle wurden prototypisch implementiert und anschließend in Container verpackt. Die Container umfassen jeweils die Implementierung für Publisher/Subscriber bzw. Server/Client, wobei die Rolle je nach Konfiguration ausgewählt wird. Die Plug-and-Play-

Kommunikation wurde prototypisch mithilfe von Raspberry-Pis getestet. Raspberry Pis wurden gewählt, da sie viele vorkonfigurierte Bibliotheken bieten, wodurch der manuelle Implementierungsaufwand geringgehalten und geringe personelle und zeitliche Engpässe kompensiert und Projektverzögerungen aufgeholt werden konnten. Mithilfe einer Auswahlmatrix wurde das benötigte Kommunikationsprotokoll ausgewählt und für die Kommunikation mit einem zweiten Raspberry-Pi verwendet (vgl. Bild 22). Erste Tests zum flexiblen Austausch der Kommunikationsprotokolle mithilfe von Docker liefen erfolgreich und bestätigten das Potenzial der Docker-Kapselung. Die Ergebnisse legen nahe, dass Container mit Kommunikationsprotokollen in eine Steuerungsplattform (z.B. COMM-Bereich in openSyde) per Drag-and-Drop eingefügt und je nach Bedarf auf CPU oder GPU verteilt werden können. So kann das Kommunikationsprotokoll mithilfe von Docker flexibel je nach angeschlossenem Anbaugerät oder mobiler Maschine oder abhängig von den aktuellen Anforderungen (Datenmenge, Ressourcenauslastung) ausgetauscht werden, ohne die Plattform neu zu implementieren. Die Einbettung der gekapselten Kommunikationsprotokolle in die Steuerungsplattformen wurde im Projekt nur konzeptionell betrachtet, u.a. da die notwendigen Toolkits in Entwicklung sind und daher mit hohem manuellen Implementierungsaufwand verbunden sind. Eine Implementierung und Evaluation auf mobilen Steuerungen konnte daher zeitlich nicht mehr umgesetzt werden. Die Autoren erwarten aber, dass das Konzept direkt auf alle Linux-fähigen Embedded-Steuerungen übertragbar ist, da es erfolgreich mit Raspberry-Pis getestet wurde.

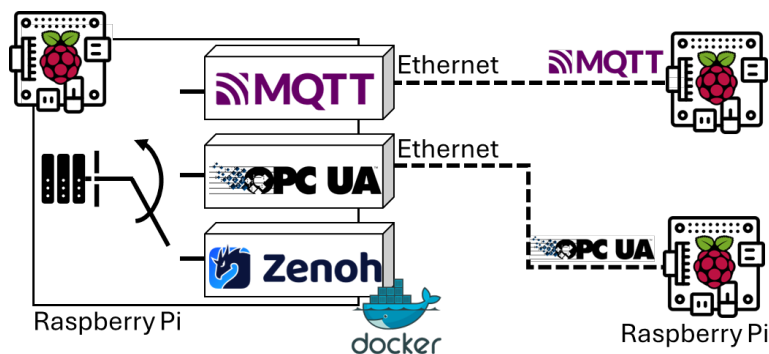


Bild 22: Prototypische Implementierung der Kommunikation mit verschiedenen Geräten mithilfe eines Auswahlmechanismus für die in Docker-Containern integrierten Kommunikationsprotokolle auf Raspberry-Pis (Quelle: Lehrstuhl AIS)

Die vier Analyseschritte (vgl. Bild 20) bilden die Grundlage für die anschließende Konzeption der Hardware- und Software-Systemarchitektur (AP3). Die Architektur wurde so konzipiert (vgl. AP3), dass sie auf verschiedenen etablierten Laufzeitumgebungen nutzbar ist. Die Evaluation (vgl. AP6) erfolgte anhand eines prototypischen Aufbaus mit STW-Steuerungen. Aufgrund des hohen zu erwartenden Aufwands wurde die Evaluation auf andere Laufzeitumgebungen im Projekt nicht durchgeführt und ist für zukünftige Transferarbeiten vorgesehen.

5 AP 3: Aufbau Human-Machine-Interface für die Fahrerkabine

Umfang: 6 Monate Projektlaufzeit (fml: 5 PM, AIS: 4 PM)

Methoden: Expertengespräche, Sensitivitätsanalyse, Szenarienanalyse auf der Baustelle, Probandenstudie

In AP3 rückte der Fahrzeugführerarbeitsplatz, die Fahrerkabine, in den Mittelpunkt, um den wichtigsten Akteur im Bauprozess, den Mitarbeiter, unmittelbar in die Informationsrückkopplung zwischen Bauausführung mit den Anbaugeräten und der Ergebnis Dokumentation, oft das BIM, im Backoffice optimal einzubinden. In Expertengesprächen mit den Geräteführern wurde durch die Forschungsstelle TUM fml hierfür mögliche Darstellungs- und Interaktionskonzepte für das Human-Machine-Interface (HMI) der Fahrerkabine gesammelt und bewertet. Weiterhin wurde die Möglichkeit der aktiven Mitarbeit in der Arbeitsgruppe HMI bei MiC 4.0, einer Initiative des VDMA genutzt [33]. Auf eine Standardisierung der heute vielfältigen Informationsdarstellungen und eine dem Fachkräftemangel entlastende, möglichst intuitive Bedienweise wurde geachtet (fml).

Für ein modernes HMI in der Fahrerkabine bieten sich mehrere Techniken an:

- Vereinheitlichung der Symbolik auf Tasten und in der Anzeige - Maschinen und Hersteller übergreifend, hierzu existieren bereits Standards
- Das Head up Display. Relevante Informationen werden dem Fahrer in die Scheibe projiziert
- Sprachsteuerung
- Die Funktion von Bottoms an Steuerungsticks werden vorab dem Fahrer angezeigt, bevor er sie aktiviert – Previewing
- Das Head mounted Display ermöglicht dem Fahrer über die Vereinigung von realer und virtueller Welt Informationen, Anweisungen, SOLL-IST Vergleiche bei der Bearbeitung, wichtige Hinweise zum Maschinen- und Anbaugeräte Betrieb über die Augmented Reality Technologie (AR) im Sinne eines Fahrerleitsystems zu nutzen.
- Die intuitive Steuerung und Aktions begleitende Anzeige mit nur einem Smart Display in der Fahrerkabine

Wir haben das Problem , dass die Baumaschinen immer leistungsfähiger und komplexer werden und auf der anderen Seite sind wir mit Fachkräftemangel und Demographie konfrontiert. D.h. das Thema HMI – Human Machine Interface – die Schnittstelle Mensch zu Maschine muss immer einfacher werden. Die Maschinen müssen hier auf den Menschen zukommen und ihn mitnehmen und entlasten.

Hierzu gibt es verschiedene Möglichkeiten, die an den Entwicklungen der Forschungsstelle TUM fml aufgezeigt werden können:

Ansatz : Head up Display

D.h. wir schreiben dem Fahrer Infos in die Frontscheibe in sein Sichtfeld, z.B. Maschinen- und Anbaugeräte-Infos , Warnungen, Aufträge, Navigationsunterstützung. Partner Fritzmeier initiierte in diesem Zusammenhang die „Entwicklung der Kabine der Zukunft als Concept CAB“ bereits zur bauma 2016. Hier waren namhafte Komponenten Lieferanten wie Hela oder Bosch Automotive,

die Baufirma Max Bögl als Anwender und als begleitende Forschungsstelle TUM fml mit dem damaligen StartUp Vemcon u.a. gemeinsam in der Entwicklung.

Mit der Head up Display Technologie Blaulaser beschäftigte wir uns schon vor über 10 Jahren in Zusammenhang mit der Unterstützung des Staplerfahrers. Mit einem Blaulaser bekam er Pfeile zur Navigation im Regallager in die Scheibe geschrieben (vergl. Bild 23) und z.B. die Platzverhältnisse, Stellung von Palette bzw. Gitterbox in 12m Höhe im Verhältnis zum Lagerfach angezeigt zu bekommen, zur sicheren Einlagerung . Dieser Blaulaser war dann unser Beitrag bei der Concept CAB – der Kabine der Zukunft- mit der Fa.Fritzmeier bei der bauma 2016 antrat. Unsere Vemcons – damals noch StartUp – brachten als Beitrag den Smart Button. Was ist der Smart Button? Nun auf den Sticks, mit denen man die Antriebe der Maschine bedient sind auch etliche Knöpfchen, die was ansteuern und auslösen , wenn man da draufdrückt. Der Fahrer muss entsprechend geschult und eingewiesen sein. Der Smart – Button entlastet den Fahrer nun so, wenn er leicht angedrückt wird, erscheint auf dem Kabinenmonitor was passiert, z.B. Teleskop wird ausgefahren wird angezeigt und wenn der Fahrer nun durchdrückt , dann fährt der Ausleger real aus (vergl. Bild 23). D.h. die Maschine zeigt dem Fahrer über Smart-Button im Previewing an wie sie reagiert und kommt ihm so entgegen, das ist HMI. Die Concept Cab hatte z.B. auch eine Drohne auf dem Dach, die aufsteigen konnte, wenn es für den Fahrer unübersichtlich im Gelände wurde, z.B. beim Einfahren von langen Gespannen auf eine Verkehrsstraße.

Wir regten vom Lehrstuhl damals bereits die Sprachsteuerung in der Kabine an, denn es gab bereits CANbus Module , die Sprachbefehle in Maschinenbefehle wandelten und umgekehrt Maschinenbefehle in Sprache. Da konnten wir uns aber nicht durchsetzen. Die Störgeräusche auf der Baustelle wurden hier als zu gefährlich angesehen, deshalb erfolgte keine weitere Verfolgung dieses Ansatzes für die Concept CAB. Heutzutage kann man sich eine Sprachsteuerung, zumindest für die Kabinenfunktionen , wie z.B. die Licht und Temperatur Einstellung, jedoch gut vorstellen. Die Kabinendämmung wurde immer besser, zusätzlich gibt es Geräusch Reduktion Technologie durch Gegenschall und mit Sprachbefehlen, ähnlich „ROBOLingo“ [87] , die eindeutige Steuerbefehle wie LICHT oder TEMPERATUR dem Einstellungswunsch voranstellt , sollte das heutzutage gut möglich sein. Für die Concept Cab erhielt dann Fa.Fritzmeier auf der bauma 2016 den Innovationspreis stellvertretend für die Entwicklergruppe.

Es ging weiter mit dem Ansatz Head up Display zusammen mit Fa.Liebherr. Hier zeigte sich aber, die starke Krümmung der modernen Frontscheiben als nachteilig wegen Verzerrung und weiterhin die Schwingungen der Baumaschine beim Einsatz als nachteilig. Man könnte nun mit einem Visier arbeiten. D.h. eine flache Scheibe die der Fahrer runterklappen kann auf Anschlag arretiert, in die nun die Infos eingespielt werden. Aber das nimmt wieder Bauraum in der Kabine weg und wurde nicht weiterverfolgt. Ein Auftrag der RWE – Head up Display beim Schaufelrad Bagger einzusetzen als HMI für den Fahrer, scheiterte damals an den starken Schwingungen der Maschine, aufwändige Technik wäre nötig gewesen, um das zu dämpfen bzw. schwingungs zu tilgen.

Dennoch ist Head up Display ein möglicher HMI Ansatz. Aktuell verfolgen unsere Dresdner Kollegen von der Professur für Baumaschinen den Ansatz weiter mit neuer Technik.

- Wir schreiben dem Fahrer die Infos in die Frontscheibe in sein Sichtfeld
- Entwicklung der Concept CAB / fritzmeier zur bauma 2016



- Beitrag TUMfml Blau Laser Navigation
- Beitrag Vemcon Smart Button



Bild 23: Blaulaser Einsatz / Navigation, Stapler bei Hallenfahrt und Smartbutton / Animation ausfahrendes Teleskop (Quellen: Fa Fritzmeier, Lehrstuhl fml und Fa.Vemcon)

Unsere Erkenntnis war, wir müssen dem Fahrer die Infos auf die Nase setzen, so ist eine AR-Brille mit Kopf und Nase verbunden, da schwingt nichts mehr.

Ansatz : Head mounted Display – AR Datenbrille

Wir verfolgten diesen Ansatz weiter mit der HoloLens2 und das funktionierte sehr gut. Auf dieser Grundlage entwickelten wir das Fahrer Leitsystem 4.0, zusammen mit den Partnern HoloLight, MTS, Fritzmeier und den Vemcons. Dem Fahrer kann nun beim 3D Geländebaggern einfach die Maßhaltigkeit angezeigt werden z.B., rotes Netz Abtrag erforderlich – grünes Netz Maß ist erreicht, bzw. der Verdichtungsgrad wird angezeigt beim Verdichten – siehe Bild 24. Es wird angezeigt ob das Anbaugerät verriegelt ist oder nicht, Sparten im Untergrund können angezeigt werden, dann werden keine Rohre und Leitungen versehentlich rausgerissen.

- Entwicklung des Fahrerleitsystems mit AR-Datenbrille HoloLens
- Team: TUM fml, HoloLight, MTS, fritzmeier und Vemcon
- Ansatz: Die Infos sitzen dem Fahrer auf der Nase – keine Schwingungsprobleme – Bild Zentrierung über Marker
- - Unterstützung beim 3D – Gelände Baggern
- - Sparten im Untergrund werden angezeigt
- - Auftragserteilung
- - Navigation

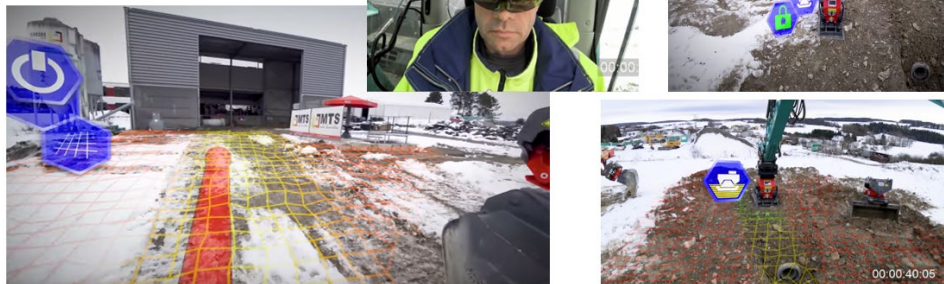


Bild 24: HMI Ansatz Datenbrille mit AR Technologie (Quelle: bauma Innovationspreis 2019 – Fahrerleitsystem 4.0)

Über den Sprechfunk der Hololens sind Fahrer , Polier und Bauleiter sofort miteinander verbunden bei einem Problem. Mit dieser Entwicklung traten wir bei der bauma 2019 an und dafür gabs dann wieder den bauma Innovationspreis. Das ist HMI. Das Fahrerleitsystem entwickelte dann Robin Popelka von der MTS im Rahmen Bauen 4.0 weiter und machte das System Praxis robust [88]. Das System wird dennoch noch nicht angeboten, das liegt an der Hololens2, die ist noch zu schwer für den Fahrer bei längerem Einsatz und wenn es diesig oder dämmerig ist, ist die Hololens2 noch zu lichtschrach. Wenn hier eine bessere Datenbrillentechnik angeboten wird, dann ist das System robust Praxis tauglich. Aber für das ToolFlott Projekt liegt damit ein HMI Demonstrator vor, der die Daten und Infos zum Anbaugerätebetrieb gut in das Sichtfeld des Fahrers einspielen kann.

Auf der bauma 2019 wurde auch MiC4.0 vom VDMA gegründet, wobei HMI wegen der Wichtigkeit gleich ein eigener Cluster zugeordnet wurde. Die Baufirma Leonhard Weiss (LW) und der Hauptverband der deutschen Bauindustrie (HDB) gingen da gleich mal in Vorlage mit einer Demo Kabine, in der gezeigt wurde, dass man die Symbole auf den Schaltern bei den verschiedenen Baumaschinen gut harmonisieren kann, denn da gibt's bereits eine ISO Harmonisierung. D.h. der Fahrer tut sich leichter, wenn er verschiedene Maschinen fahren muss, er braucht da keine besondere Einweisung mehr, er lernt das in seiner Grundausbildung.

Über die Jahre gab es immer mehr Monitore in der Fahrerkabine im Rahmen HMI, denn zu jeder neuen Entwicklung gabs einen eigenen Monitor. Zeitweise sahen wir 6 – 7 Monitore in der Kabine und der Fahrer hatte viel zu kontrollieren, aber er sollte eigentlich auf das Baufeld schauen und sich nicht ablenken lassen. Da mußte das HMI verbessert werden und die Idee und Entwicklung kam hier von unserem Partner Vemcon.

Ansatz : Nur noch ein Display als smartes Terminal in der Kabine mit intuitiver Touch Screen Steuerung

So entstand der Bagger CoPilot, was wir momentan als „Best Practice“ beim HMI im Projekt ToolFlott sehen. Der Einmonitor mit intuitiver Touchscreen Steuerung ist sehr robust und einfach zu nutzen vom Fahrer. Entsprechend läßt sich hier auch die Anbaugeräte Steuerung und Anzeige integrieren - siehe Bild 25.

- > Vemcon entwickelt den Bagger CoPilot



Bild 25: Vemcon CoPilot – CPX Terminal mit intuitiver Touchscreen Steuerung (Quelle: Vemcon)

Die Anbaugeräte Datenverbindung erfolgt mit dem ToolTracker über Bluetooth direkt mit dem CPX Terminal des Fahrers im Modus „onSite Connectivity“ oder mit eigener Telematik und GPS Ortung im Modus „Cloud Connectivity“ in die Cloud zur Anbindung des backoffice zur Beobachtung und Auswertung des Bagger Einsatzes mit dem Anbaugerät. Bild 26 stellt die Verhältnisse grafisch dar.

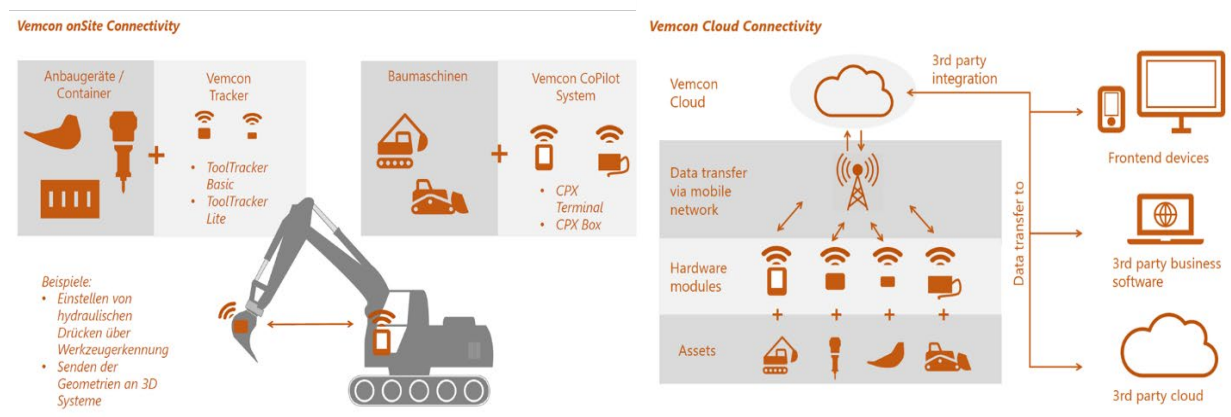


Bild 26: Datenverbindung Anbaugerät zur Trägermaschine direkt im Modus onsite Connectivity bzw. über die Cloud ins backoffice im Modus Cloud Connectivity (Quelle: Vemcon)

Der CoPilot unterstützt nun, wie die Icons in Bild 25 intuitiv erahnen lassen, folgende wichtige Funktionen:

Ident des Anbaugerätes und entsprechend wird der Volumenstrom und Hydraulikdruck bereits richtig eingestellt, zumindest dem Fahrer angezeigt.

Die Bedienung des Schnellwechslers erfolgt einfach über Doppelknopfdruck und sicher mit der Kontrolle der Verriegelung

Bei der Verladung kann die Verriegelung des Ladegutes zugeschaltet werden. Damit läßt sich die Überlastung der Transportfahrzeuge vermeiden und zulässige Achslasten einhalten.

Aus Last und Ausladungsvermessung wird die Standsicherheit der Maschine automatisch kontrolliert und geht im Grenzfall in den Warnzustand.

Das Arbeiten mit „Fencing“ wird unterstützt. Ist der Arbeitsbereich der Maschine eingeschränkt, z.B. bei Arbeiten unter einem Fahrdrabt einer Oberleitung, wird der Fahrer vor Kontakt gewarnt bzw. die Bewegung abgeriegelt.

Die Betriebsstunden des Anbaugerätes werden erfasst für die prädiktive Wartungsanzeige

Die Z-Achsen Vermessung kann beim Bohren und Rammen zugeschaltet werden. Die Aufzeichnung von Ramm- Bohr- und Verdichtungsprotokollen kann als Bau – Doku erfolgen.

Eine 2D – Maschinensteuerung zum Planum - und Schräghang – Ziehen ohne zusätzliche Vermessung, unterstützt den Fahrer. Die Graphische Anzeige erfolgt über das HMI CPX – Terminal.

Die 3D – Geländebearbeitung kann z.B. mit einem Leica – Meßsystem durch den Fahrer erfolgen. Die graphischen Anzeigen hierfür erfolgen über das HMI CPX – Terminal. Damit lassen sich Produktivitätssteigerungen bis zu 50% erzielen, wie Vergleichsmessungen zur konventionellen Geländebearbeitung mit separater Vermessung zeigten.

Das open Telematic System im Modus Cloud Connectivity verbindet zum backoffice und gestattet die Auswertung wichtiger Information zum Einsatz Trägermaschine mit Anbaugerät, wie z.B. Standort der Maschine / Anbaugerät für MTA und Disposition, Betriebszustand der Maschine (aktiv / Leerlauf / außer Betrieb) die Protokollierung der erbrachten Bauleistung.

Bewertung nach ToolFlott Zielen:

Probanden Versuche mit Studenten konnten die Funktionen der intuitiven Baggersteuerung mit einer Güte von 90 % aufrufen. Der Schulungsaufwand für die Fahrer sinkt mit so einer HMI Technologie bzw. macht den Bagger und Anbaugeräte Einsatz effektiver und sicherer. Damit stellt der CoPilot einen digitalen Assistenten dem Fahrer zur Seite, der Hersteller unabhängig ist. Er ist einfach nachzurüsten. Der CoPilot integriert den Mic4.0-BUS und erfüllt entsprechend dem ToolFlott Projekt Ziel die Datenverbindung zwischen Anbaugerät und der Trägermaschine unter Berücksichtigung einer hochwertigen HMI für den Fahrer. Das Controlling und Bewertung des Einsatzes durch das backoffice ist gegeben. Die Voraussetzung zur Nutzung des BIM Elementes

für die Ergebnis Darstellung liegt damit ebenfalls vor. Damit ist auch der Ansatz bereits erfüllt, den MiC4.0 – Systemarchitektur verfolgt [82].

Ziel der Forschungsstelle TUM AIS in AP3 war die Konzeption einer Hardware- und Software-Systemarchitektur, die den bidirektionalen Datentransfer zwischen Sensoren (Komponente z.B. Anbaugerät), BIM und HMI der Fahrerkabine (Trägermaschine) ermöglicht. Im Stand-der-Technik konnten keine Richtlinien oder Standards identifiziert werden, wie eine IIoT-Systemarchitektur in der Baubranche im Allgemeinen oder im Anwendungsfall „Trägermaschine mit wechselnden Anbaugeräten“ im speziellen aufgebaut werden soll. Es existiert lediglich eine vom MiC4.0-AK-Systemarchitektur definierte, technische Referenzarchitektur für mobile Baumaschinen [82], die die Anforderung nach Schnittstellen für die Kommunikation zwischen Maschinen, zwischen Maschine und Anbaugerät sowie zwischen beiden und der Cloud stellt. Der ODX-Standard (vgl. AP2) liefert eine geeignete Grundlage zur Standardisierung des Datenaustauschs zwischen Steuerungsgeräten. Es fehlt jedoch eine Erweiterung der Architektur zu einem IIoT-System.

Bild 27 zeigt eine Systemarchitektur, die die Verbindung von Sensoren und Anbaugeräten innerhalb der mobilen Baumaschine sowie die Anbindung der Baumaschine an die Cloud über verschiedene Kommunikationswege darstellt. Dies ermöglicht den bidirektionalen Austausch von Daten sowohl innerhalb der Maschine, vom Anbaugerät zur Maschine sowie zwischen der Maschine und der Cloud. Die mobile Baumaschine weist eine zentrale Steuereinheit (CU) sowie ggfs. mehrere dezentrale Steuereinheiten auf. An die Steuereinheiten können verschiedene Sensorik und Aktorik angeschlossen sein. Beim Ankoppeln eines Anbaugeräts können weitere Steuereinheiten oder Sensoren mit der zentralen Steuereinheit gekoppelt werden. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten erfolgt klassischerweise über CAN-Bus, basierend auf obigen Projektergebnissen kann die Kommunikation auch mit MiC4.0-BUS oder Ethernet (ETH), z.B. mit den via Docker gekapselten Kommunikationsprotokollen MQTT, OPC UA oder Zenoh (vgl. AP2) erfolgen. Für die Kommunikation der Baumaschine mit der Cloud (BIM) ist ein IIoT-Gateway erforderlich, dass mit der Cloud bidirektional via LTE oder WLAN kommuniziert. Die Kommunikation des Anbaugeräts mit der Cloud kann je nach Telematik-Ausstattung entweder direkt oder über die Trägermaschine erfolgen. Das HMI in der Fahrerkabine muss sowohl mit der zentralen CU als auch mit der Cloud (je nach Datenlast direkt oder über Gateway der Trägermaschine) kommunizieren, um dem Operator sowohl aktuelle Maschinendaten sowie fortgeschrittenere Daten aus der Cloud anzeigen zu können.

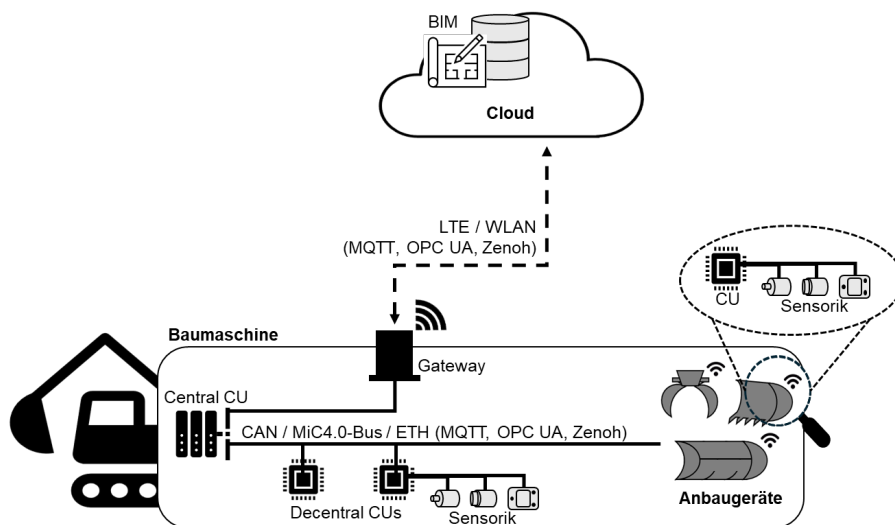


Bild 27: Konzeption der Hardware- und Software-Systemarchitektur (Quelle: Lehrstuhl AIS)

Die konzipierte Hardware- und Software-Systemarchitektur sieht Schnittstellen zum HMI sowie zum BIM vor. Diese Schnittstellen wurden im Projekt jedoch nur konzeptionell betrachtet und nicht umgesetzt. Der Grund dafür liegt in der fehlenden Verfügbarkeit vorkonfigurierter Schnittstellen für BIM und HMI. Über den ODX-Standard sind alle benötigten Informationen einheitlich und direkt verfügbar und müssen nur noch geparkt werden, um im HMI visualisiert oder in BIM integriert werden zu können. ODX ist standardisiert und das Datenmodell in UML verfügbar, sodass das Schreiben eines Parsers technisch machbar ist und lediglich Implementierungsaufwand erfordert. Da jeder Hersteller aber unterschiedliche HMI-Lösungen verwendet, würde die Implementierung einer konkreten Schnittstelle nur eine Insellösung darstellen. Die zeitaufwändige Implementierung wurde aufgrund des Personalengpasses nicht umgesetzt, um den Projektfortschritt nicht zu gefährden.

Wie oben beschrieben, kann der Datentransfer vom Anbaugerät in die Cloud (für spätere Integration ins BIM) entweder direkt (Pfad B in Bild 28) oder über die Trägermaschine (Pfad A in Bild 28) erfolgen. Um die Performance dieser beiden Datenübermittlungspfade zu bewerten, wurde ein Prüfstand für Laufzeitmessungen aufgebaut [80]. Der Prüfstand (vgl. Bild 28) besteht aus drei CUs, stellvertretend für die zentrale CU der Trägermaschine, die CU des Anbaugeräts, sowie für das Backoffice (Cloud).

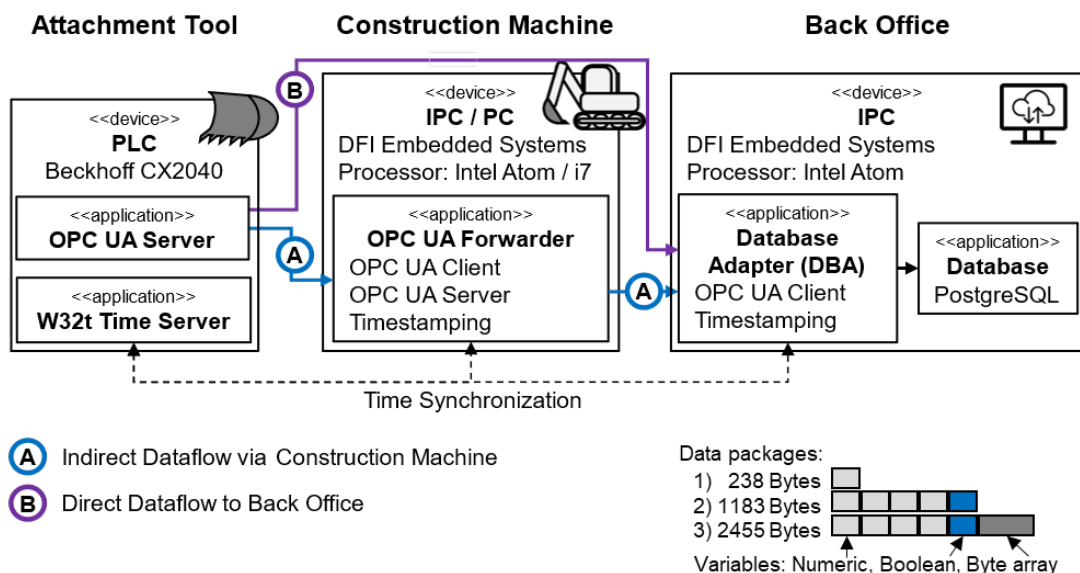


Bild 28: Experimenteller Hardwareaufbau für Performance-Messungen in der Datenübertragung mit OPC UA [80]

Für die experimentellen Laufzeitmessungen wurde am Lehrstuhl AIS exemplarisch ein Prüfstand mit abstrahierter Hardware realisiert: Für das Anbaugerät eine Beckhoff CX2040 SPS, für die Trägermaschine im Vergleich einmal ein Industrie-PC (IPC) mit Intel Atom Prozessor und ein leistungsstärkerer PC mit i7-4850HQ-Prozessor, und für das Backoffice ein IPC. Für die Laufzeitmessungen wurden die Übertragungszeit und der Datenverlust der Kommunikation unter Berücksichtigung verschiedener PLC-Zykluszeiten und Datengrößen bewertet. Hierbei wurden neben den zwei unterschiedlichen Hardware-Plattformen für die Trägermaschine (IPC / PC), verschiedene Größen und Arten von Datenpaketen (vgl. Übersicht in Bild 28, rechts unten) sowie variierende Zykluszeiten (10, 20, 30ms) der SPS des Anbaugeräts evaluiert. Bild 29 zeigt die Messergebnisse für die Übertragungszeit (links) und den durchschnittlichen Datenverlust (rechts). Die Ergebnisse sind mit Mittelwerten (Punkte) und skalierten Standardabweichungen (Rechtecke, Faktor 0.25) dargestellt. Die Farben zeigen die zwei Übermittlungspfade: direkt vom

Anbaugerät in die Cloud (grün) oder über die Trägermaschine (mit IPC (blau) oder mit PC (orange) als Hardwareplattform).

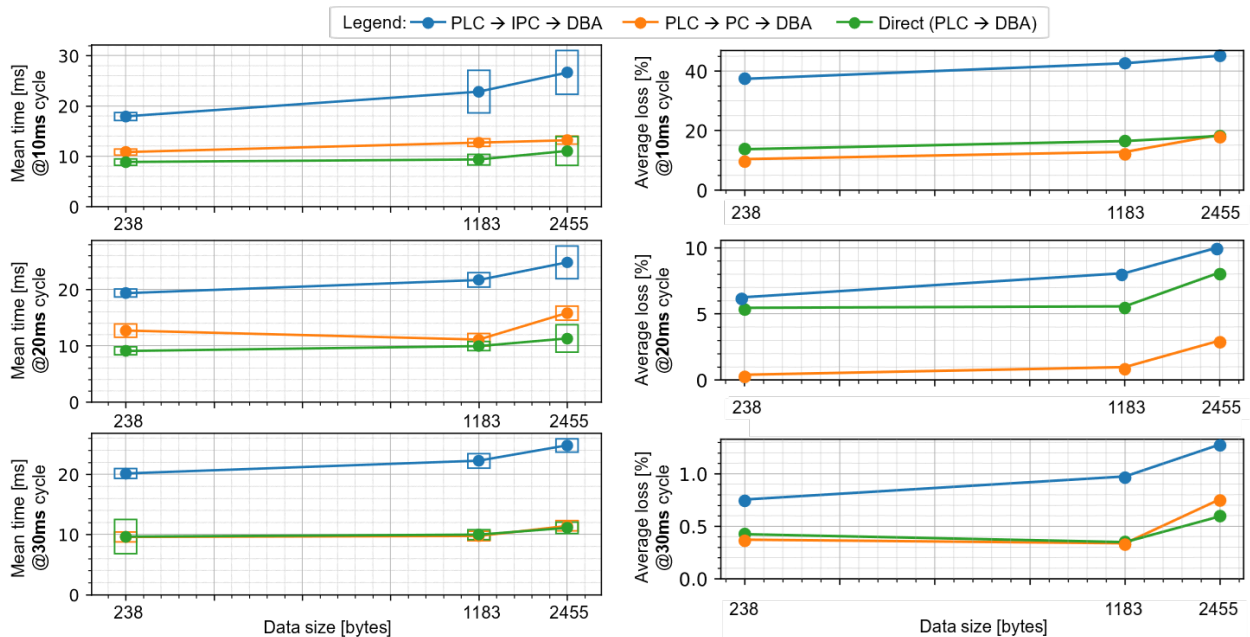


Bild 29: Ergebnisse der Laufzeitmessungen (Übertragungszeit: links, durchschnittlicher Datenverlust: rechts) für die zwei verschiedenen Datenübermittlungspfade A, B (Quelle: Lehrstuhl AIS)

Die Laufzeitmessungen ergeben, dass die Übertragungszeiten mit der Größe der Datenpakete steigen, aber kaum mit der Zykluszeit. Der Datenverlust aufgrund von Unterbrechungen nimmt mit kürzerer Zykluszeit als auch mit steigender Paketgröße zu. Bei einer Zykluszeit von mindestens 30ms ist der Datenverlust vernachlässigbar klein, was für Steuereinheiten in der Baubranche relevant ist, da diese klassischerweise im Bereich von wenigen hundert Millisekunden arbeiten. Der leistungsfähigere PC (orange) reduziert die Übertragungszeit und den Datenverlust zudem erheblich. Die Ergebnisse wurden im Oktober 2023 auf der CLEaR-Konferenz präsentiert sowie als Konferenzpaper im zugehörigen Tagungsband veröffentlicht [80].

Die Prüfstandkomponenten kommunizieren über OPC UA nach dem Client-Server-Schema (CS), das eine (feste) Point-to-Point-Kommunikation zwischen einem Client und einem Server darstellt. Insofern mehrere Komponenten einer Maschine untereinander sowie gleichzeitig in die Cloud an eine oder mehrere Backoffices oder andere Maschinen (Machine-to-Machine (M2M)-Kommunikation) kommunizieren sollen, bietet sich OPC UA nach dem Publish-Subscribe-Schema (PubSub) an. Im PubSub-Schema sind Publisher und Subscriber nicht mehr direkt miteinander verbunden, sondern mit einem sogenannten Broker. Die Publisher stellen ihre Daten dem Broker zur Verfügung, der dann die für die Subscriber relevanten Daten an die jeweiligen Subscriber weiterleitet. Die Literaturrecherche zeigt, dass OPC UA PubSub besser skalierbar und performanter gegenüber OPC UA CS ist, falls Nachrichten an viele Empfänger verteilt werden müssen [74]. PubSub (via MQTT oder UDP) ist, gemäß [84], zudem schneller in der Übertragung als OPC UA CS. Insbesondere für Plug-and-Play-Anwendungsfälle oder wenn (Sensor-)Daten von Komponenten der Feldebene direkt in die Cloud übertragen werden sollen, wird OPC UA PubSub vermehrt eingesetzt [81, 83].

Um ein Kommunikationsnetzwerk für mobile Baumaschinen mit Cloud-Anbindung nach dem OPC UA PubSub-Schema zu entwerfen, muss die Positionierung des Brokers berücksichtigt werden, um die Netzwerkauslastung der Drahtlosverbindung gering zu halten. Es wurden drei Positionierungsansätze hergeleitet: Eine lokale Positionierung des Brokers direkt auf der

Maschine eignet sich insbesondere, wenn die Kommunikation überwiegend maschinenintern (lokal L) erfolgt und nur wenige externe (remote R) Publisher (P) oder Subscriber (S) auf die Daten zugreifen (siehe Bild 30a). Alternativ kann der Broker remote (Backoffice, Cloud) positioniert werden, was vorteilhaft ist, wenn die mobile Maschine hauptsächlich Daten sendet (Publisher) und sich mehrere Empfänger (Subscriber) in der Cloud befinden (siehe Bild 30b). Die dritte Möglichkeit umfasst verteilte Broker, die sowohl lokal als auch remote genutzt werden, um die Netzwerklast zu minimieren und eine einfache Skalierbarkeit zu gewährleisten (siehe Bild 30c). Die Übersichtstabelle (vgl. Bild 30, rechts unten) zeigt, welcher Ansatz abhängig von Anzahl und Position der Publisher und Subscriber geeignet ist. Die letzte Zeile der Tabelle bietet eine Abschätzung, wie die Netzwerkauslastung durch die Anzahl der Publisher und Subscriber skaliert. So wird beispielsweise im Ansatz a) die Netzwerkauslastung primär durch die Anzahl der remote Publisher ($\#P_R$) und Subscriber ($\#S_R$) beeinflusst. Die gezielte Verringerung der Netzwerkauslastung ist insbesondere in der Baubranche kritisch, da dort noch überwiegend mobile Funknetze aufgrund fehlender Breitband-Infrastruktur eingesetzt werden, wodurch den Unternehmen bei hoher Datenmenge oder Netzwerkauslastung hohe Kosten entstehen.

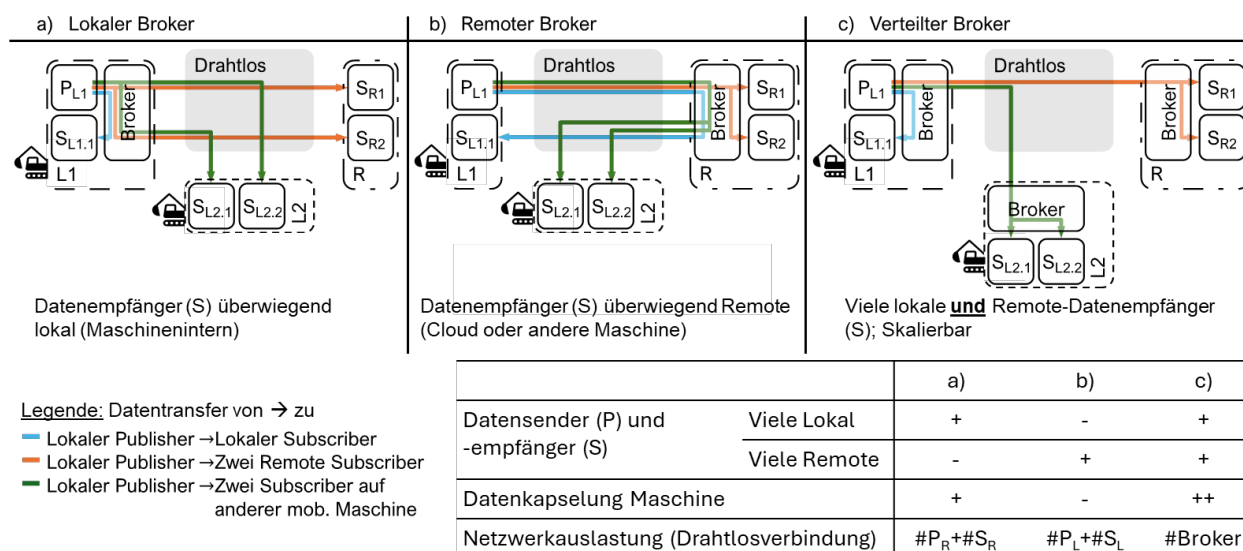


Bild 30: Vergleich von Broker-Positionierungen für OPC UA PubSub-Kommunikation: lokal (L), remote (R) oder verteilt. Übersicht (rechts unten) zeigt Skalierung der Netzwerkauslastung mit der Anzahl von lokalen (L) oder remote (R) Publisher ($\#P$), Subscriber ($\#S$) und Brokern ($\#Broker$).

Basierend auf dem Ansatz verteilter Broker wurde im Forschungsprojekt eine Systemarchitektur zur Kommunikation der Maschinen intern, untereinander sowie in die Cloud entworfen (vgl. Bild 31). Die CUs (hier SPS1, SPS2, ...) jeder Maschine stellen ihre Sensordaten als Publisher dem lokalen Gateway zur Verfügung, das hier als Broker fungiert. Lokale Subscriber, z.B. die zentrale CU der Maschine, können die gewünschten Daten direkt vom lokalen Gateway abfragen. Dezentrale Subscriber, z.B. CUs anderer Maschinen oder der BIM-Server in der Cloud, fragen die Daten indirekt über einen jeweils eigenen Broker (z.B. EMMA-Broker in der Cloud, vgl. Bild 31 rechts) ab. Das Gesamtnetz (ESS) setzt sich dabei aus mehreren Teilnetzen (BSS) zusammen. Eine Publikation zur OPC UA PubSub-Systemarchitektur und der Brokerpositionierung zur Reduktion der Datenflut im Drahtlosnetzwerk ist für die WFCS-Konferenz 2025 geplant.

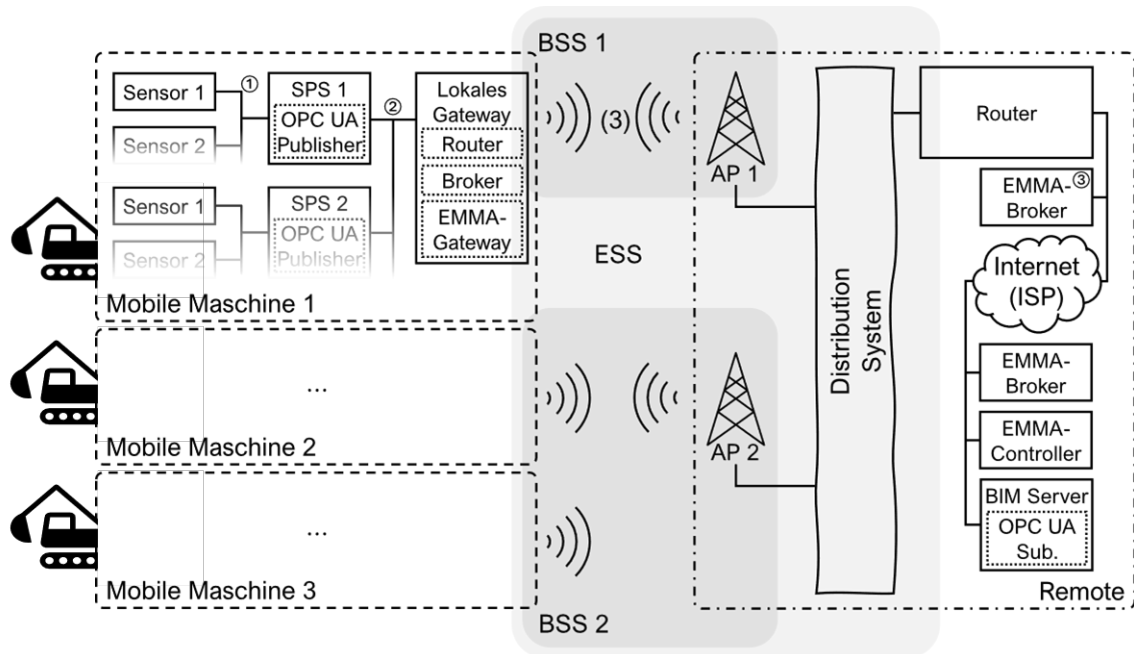


Bild 31: Entwurf einer broker-basierten OPC UA PubSub-Systemarchitektur für many-to-many-Kommunikation zwischen mobilen Maschinen untereinander (M2M-Kommunikation) sowie in die Cloud.

6 AP 4: Entwicklung robuster Algorithmen zur Sensordatenauswertung

Umfang: 6 Monate Projektlaufzeit (fml: 3 PM, AIS: 5 PM)

Methoden: Agile Softwareentwicklung (Scrum) mit datenorientierten Programmiersprachen und Toolkits (Python, Matlab), Klassifikation und Auswahl von Datenaustauschformaten und -strukturierungen (XML, JSON, RDL) sowie CANbus SAE J 1939 Datenverarbeitung

Aufbauend auf den in AP 2 und AP 3 erhobenen und angeordneten Daten, entstehen in AP 4 robuste Algorithmen zu deren Auswertung und Extraktion von für die Stakeholder nützliche Informationen. Aufbauend auf der Systemarchitektur in AP 3, wird ein Konzept zur dezentralen Datensammlung und -verarbeitung integriert. Diese Analysefunktionalitäten müssen an die Gesamtsoftwarearchitektur adaptierbar und auf verschiedenen Laufzeitumgebungen ausführbar sein (AIS).

Anschließend werden in agiler Entwicklungsweise die Algorithmen und Informationssysteme zur Deckung der Informationsbedarfe aus AP 1 entwickelt und umgesetzt (fml+AIS).

Dabei tritt der Lehrstuhl fml im Scrum-Prozess als sogenannter Product Owner auf, der die Nutzerbedürfnisse repräsentiert und die Zielrichtung der Entwicklung vorgibt. Der Lehrstuhl AIS, tritt als Entwickler, welcher das informationstechnische Fachwissen und die nötigen Programmier- und Entwicklungsfähigkeiten besitzt, auf. In sog. Sprints werden so die Daten zu Informationen über den Werkzeugzustand, die Fertigungsrückmeldung sowie weitere Informationen zum Anbaugeräteinsatz verarbeitet. Als Ergebnis entstehen robuste Auswertalgorithmen, welche aus den vorhandenen Sensordaten die gewünschten

Informationen für die Steakholder des Bauprojekts erzeugen (RAMI 4.0 Layer Information). Robust bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Algorithmen dazu in der Lage sein sollen, mit etwaigen Unsicherheiten der Erfassung umzugehen und auch bei schwankender Datenqualität zuverlässige Ergebnisse zu produzieren. Die Herausforderung liegt an dieser Stelle in einer Abwägung, wie sensibel die Logiken reagieren sollen und wie unsensibel diese gleichzeitig auf problematische Einflüsse reagieren dürfen. Die Erfassung der nötigen Sensordaten bedient sich an dieser Stelle den Methoden der Sensorfusion und multimodaler Erfassung, um einen möglichst umfassenden Datenstand zu erzeugen.

Die Forschungsstelle TUM fml verfolgt hier zusammen mit MiC4.0 Cluster 7 des VDMA den klassischen Datentransfer über CANbus weiter mittels PA online Web Meetings. Hier entstand mit den Firmenpartnern Liebherr, Volvo und Wacker Neuson der MiC4.0-BUS. Für diese Entwicklung zur Datenanbindung Anbaugerät zur Trägermaschine wurde der Gruppe der bauma Innovationspreis 2022 verliehen. Anschließend wurden im ToolFlott Projekt in agiler Entwicklungsweise die Algorithmen und Informationssysteme zur Deckung der Informationsbedarfe aus AP1 entwickelt und umgesetzt (fml+AIS). Dabei tritt der Lehrstuhl fml im Scrum-Prozess als sogenannter Product Owner auf, der die Nutzerbedürfnisse repräsentiert und die Zielrichtung der Entwicklung vorgibt und der Lehrstuhl AIS, als Entwickler, welcher das informationstechnische Fachwissen und die nötigen Programmier- und Entwicklungsfähigkeiten besitzt. Aufbauend auf den in AP2 und AP3 erhobenen und angebundnen Daten der Sensortechnik, entstehen in AP4 robuste Algorithmen, entwickelt vom Forschungspartner AIS, für die Auswertung und Extraktion für den Nutzer. Aufbauend auf der Systemarchitektur in AP3, wird hierzu ein Konzept zur dezentralen Datensammlung und -verarbeitung integriert. Nach Absprache zeigt hier das AIS den möglichen Ansatz über OPC UA , der für die Baubranche als futuristisch gesehen werden kann, obwohl in anderen Technikbranchen längst etabliert. Das Prinzip der OPC UA Datensammler ist in der Baumaschinenteknik noch Neuland.

Arbeiten und Ergebnisse der Forschungsstelle AIS in AP4

Auf Baustellen wird bei der Bauausführung eine große Menge an Daten erhoben, die in einer IIoT-Architektur an die Cloud und in das BIM zur Baufortschrittserkennung übertragen werden müssen. Die Übertragung großer Datenmengen kann für Bauunternehmen hohe Kosten verursachen, da aufgrund fehlender Breitband-Infrastruktur häufig mobile Funknetzwerke genutzt werden müssen. Mit einer Analyse der auf der Maschine anfallenden Daten sowie deren Vorverarbeitung zur Reduktion der Datenmenge, die in die Cloud geschickt wird, können erhebliche Kosten eingespart werden.

Ein erhebliches Einsparpotenzial liegt in der effizienten Handhabung **fehlerhafter** Daten. Derzeit werden Daten aufgezeichnet und vollständig in die Cloud übertragen. In der Cloud erfolgt dann eine Analyse der Daten, um Sensoranomalien zu identifizieren und herauszufiltern, bevor die Daten nutzbar sind. Dies führt dazu, dass viele, auch fehlerhafte Daten teuer in die Cloud übertragen und dort dann gelöscht werden. In diesem AP wurde daher ein Ansatz entwickelt, Sensoranomalien bereits auf der Maschine zu erkennen und herauszufiltern, sodass nur noch die von den Stakeholdern nutzbaren Daten in die Cloud übertragen werden.

Für die drei in AP2 als repräsentativ ausgewählte Sensoren (Drucksensor, Temperatursensor, IMU-Sensor) aus der Sensortechnologieübersicht (vgl. AP1, Tabelle 1) wurden mithilfe des in AP2 erstellten ODX-Datenbeschreibungsblatts die Wertebereiche und Eigenschaften der

Sensoren analysiert und daraus sowie aus dem Stand-der-Technik typische Sensoranomalien identifiziert (vgl. Tabelle 5).

Die identifizierten Sensoranomalien können in vier Kategorien unterteilt werden:

1. Physikalische Fehler, die in den Sensordaten aufgrund von Verbindungsabbrüchen zum Sensor oder Beeinträchtigungen der Datenübertragung detektiert werden können.
2. Inkonsistenzen der erfassten Sensorwerte zu gemäß Sensordatenblatt erwartbaren Sensorwerten (z.B. Werte außerhalb der spezifizierten Wertebereiche, falsche Auflösung)
3. Ausreißer, d.h. Datenpunkte, die sich deutlich von den anderen Datenpunkten eines Datensatzes unterscheiden und durch Messfehler oder Sensorfehlfunktionen entstehen.
4. Trend-Anomalien, d.h. über einen längeren Zeitraum eindeutig steigende oder sinkende Sensorwerte. Identifizierte, ungewöhnliche Trends können ein Hinweis auf z.B. Verschleiß sein und zum proaktiven Melden von Wartungsbedarf genutzt werden.

Tabelle 5: Übersicht der identifizierten Arten von Sensoranomalien (Quelle: Lehrstuhl AIS)

Sensoranomalie	Beschreibung
Fehlende Sensornachricht	Wenn der Sensor keine Nachrichten überträgt, wird eine Warnung ausgegeben, die das Fehlen von Sensoraktivität anzeigt.
Messung außerhalb des zulässigen Wertebereichs	Wenn der gemessene Sensorwert (z.B. Druck) außerhalb des in der Datenbeschreibungsdatei angegebenen zulässigen Wertebereichs liegt.
Überlastdruck	Wenn der gemessene Drucksensorwert den für den Drucksensor festgelegten maximalen Überlastdruckgrenzwert („Overload Pressure“) überschreitet.
Berstdruck	Wenn der gemessene Druckwert den für den Drucksensor festgelegten Berstdruckgrenzwert („Bursting Pressure“) überschreitet.
Abnormale Druckvariation	Wenn die Druckwerte über einen längeren Zeitraum (z.B. eine Stunde) eine Abweichung vom spezifizierten Langzeitstabilitätsgrenzwert überschreiten.
Sprünge in den Druckwerten	Wenn die Differenz zwischen aufeinanderfolgenden Druckwerten einen vordefinierten Schwellenwert überschreitet (z.B. Sprünge im Sensorwertverlauf).
Ungenauigkeit in der Messauflösung	Wenn der gemessene Sensorwert nicht der in der Datenbeschreibungsdatei festgelegten Auflösung entspricht.
Abweichung von der erwarteten Frequenz	Wenn die Zeitdifferenz zwischen aufeinanderfolgenden Messungen von der erwarteten Frequenz abweicht.
Ausreißer	Wenn ein einzelner Messwert signifikant von den übrigen Messwerten abweicht.
Trendanalyse	Wenn die Sensorwerte (z.B. Temperatur) über die letzten 10 Messungen hinweg einen steigenden, fallenden oder konstanten Trend aufweisen.

Es wurden verschiedene Algorithmen evaluiert, um die o.g. Sensoranomalien automatisiert zu identifizieren und in der Vorverarbeitung der Daten zu berücksichtigen. Die Algorithmen wurden so entworfen oder ausgewählt, dass sie auch auf ressourcenbeschränkter Hardware, wie z.B. CUs innerhalb mobiler Baumaschinen, ausgeführt werden können.

Um physikalische Ausfälle wie Verbindungsabbrüche zu Sensoren (vgl. 1.) zu erkennen, wird regelmäßig überprüft, ob von den angeschlossenen Sensoren Daten gesendet werden. Bei Abwesenheit von Daten wird eine Warnung ausgegeben, die Operatoren als Hinweis dienen kann, z.B. die Verkabelung des entsprechenden Sensors zu überprüfen.

Um Inkonsistenzen (vgl. 2.) in den Sensordaten zu entdecken, wird die ODX-Datenbeschreibungsdatei verwendet. Für die empfangenen Sensordaten wird überprüft, ob die Werte in dem gemäß ODX-Datenbeschreibungsdatei spezifizierten Wertebereich liegen, ob sie die erwartete Auflösung haben sowie ob sie kritische Grenzwerte überschreiten.

Für die Erkennung von Ausreißern (vgl. 3.) wurden mehrere existierende Algorithmen analysiert und der Isolation Forest Algorithmus ausgewählt, da er selbst hohe Datenmengen bei kleinem Ressourcenbedarf analysieren kann, robust gegenüber Sensorrauschen ist und aufgrund

weniger Hyperparameter einfach an verschiedene Anwendungsfälle anpassbar ist. Der Algorithmus wurde anhand mehrerer Sensorverläufe mit verschiedenen Arten von Ausreißern (vgl. Bild 32) evaluiert und zeigte dabei eine hohe Genauigkeit. Nur wenn Ausreißer dicht mit normalen Sensorwerten geclustert sind, werden diese vom Algorithmus übersehen.

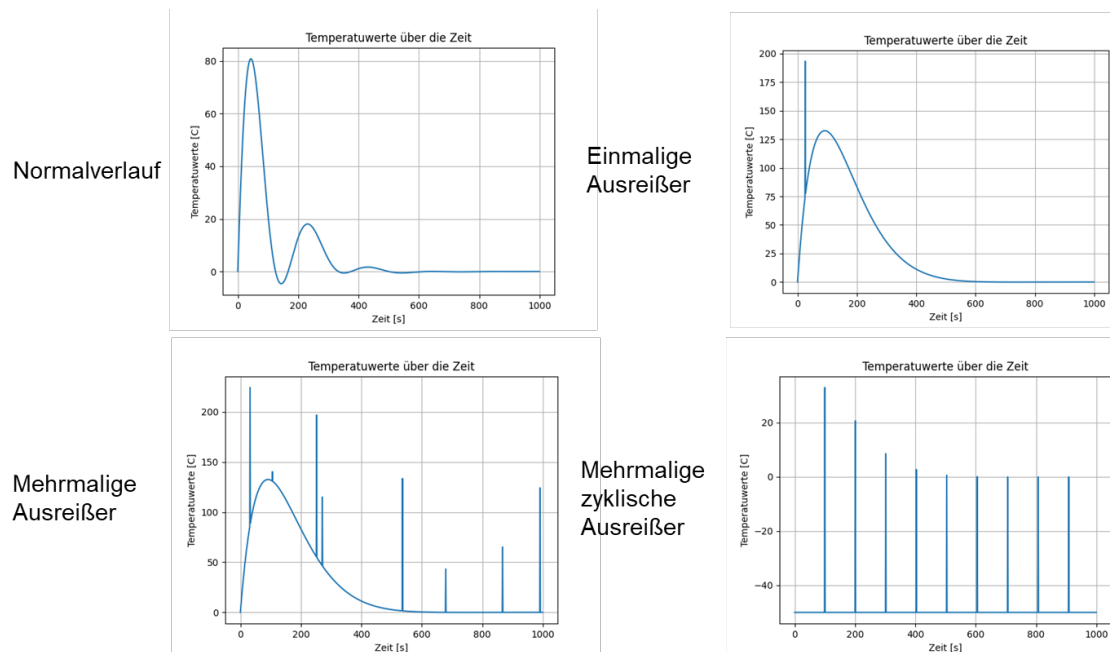


Bild 32: Erkennung von Ausreißern in Sensordatenverläufen mithilfe des Isolation Forest Algorithmus

Die Trendanalyse (vgl. 4.) überwacht die letzten 10 Messwerte, um untypische Trends wie z.B. einen plötzlichen Temperaturanstieg oder -abfall zu erkennen. Entsprechende Trends können den Operator frühzeitig über möglicherweise Anomalien (veränderte Umgebungsbedingungen, Ausfall von Bauteilen, Verschleiß, Überhitzung) informieren, sodass er geeignete Gegenmaßnahmen treffen kann.

Im AP4 wurden für die identifizierten Sensoranomalien geeignete Algorithmen ausgewählt, die eine robuste Auswertung der Sensordaten ermöglichen. Die Softwarearchitektur wurde so entworfen, dass diese Algorithmen modular mithilfe einer regelbasierten Auswahlmatrix ausgeführt werden können, je nach zu erwartenden oder identifizierten Sensoranomalien. Eine Publikation zur dezentralen Identifikation und Handhabung von Sensoranomalien auf Baumaschinen ist für die WFCS-Konferenz 2025 geplant.

7 AP 5: Verfahrensentwicklung

Baufortschrittsermittlung

Umfang: 5 Monate Projektlaufzeit (fml: 5 PM, AIS: 2 PM)

Methoden: Lastenheft, V-Modell, UML-Diagramme, Workshops mit Spezialisten der Bauplanung und Baudokumentation

Durchgeführte Arbeiten der Forschungsstelle TUM fml in AP5

Parallel zur Entwicklung robuster Algorithmen in AP4, werden in AP5 Verfahren zur Ermittlung des Baufortschritts auf Basis von Anbauwerkzeug- und Maschinendaten entwickelt. Die Kenntnis des Baufortschritts ist für alle Beteiligten am Bau, ob Auftraggeber, Auftragnehmer oder Subunternehmen, von allergrößter Bedeutung, um die Wirtschaftlichkeit des Bauprojekts zu gewährleisten. Im Projekt ToolFlott sehen wir die Baumaschine mit ihren Werkzeugen (Anbaugeräten) als den Akteur und Leistungserbringer auf der Baustelle. Das impliziert der Standpunkt der Erdbaumaschine (Verortung) ist der Arbeitspunkt auf der Baustelle. Das Arbeitsergebnis der Anbaugeräte bildet das lokale Bauergebnis ab (Aufmaß). Das Forschungsvorhaben sieht hier den Pilotcharakter ein verallgemeinertes Verfahren abzuleiten, basierend auf Anforderungserhebung (Planung), Informationsverarbeitung bei der Bearbeitung (SOLL – IST Vergleiche) zur Bestimmung des Baufortschritts auf Basis von Anbauwerkzeug- und Maschinendaten zu entwickeln. Das Ergebnis sind dann die vom User gewünschten „as-built Daten“, die nun in der Aufmaß-Software bzw. dem BIM dargestellt werden können. Weiterhin steht dabei zusätzlich im Fokus, auch die horizontale Einbindung dieser Baufortschrittsdaten in die Geschäfts- und Logistikprozesse der Unternehmen, z. B. automatisierte Abrechnung des Maschineneinsatzes, die Vorhersage von Werkzeugverschleiß über Betriebsstunden und Bodenqualität sowie eine zustandsbezogene Instandhaltung und die Bestimmung der Werkzeugverfügbarkeit für die Disposition. All diese Erkenntnisse und Möglichkeiten erhöhen die Produktivität auf der Baustelle erheblich.

Es liegt nun nahe das BIM als Grundlage für die Planung und „as built“ Dokumentation für den Anbaugeräte Einsatz zu nutzen !

Da muß zunächst einmal zwischen BIM im Hochbau und BIM im Tiefbau unterschieden werden. Bei BIM im Hochbau haben wir einen eindeutigen Standard vorliegen. Wir haben hier eine Objekt orientierte Darstellung und Modellierung. Entsprechend können an die BIM Objekte die Maschinen- und Anbaugeräte Planung drangehängt werden.

So kann z.B. wie im Beispiel Bild 33 gezeigt, der Einhub von Fassadenteilen als Gruppe gekennzeichnet und einem Kranauftrag zugeordnet werden. Der Objektgruppe wird der Kraneinsatz mit Datum, Krantyp und Rüstzustand, Kostenstelle wenn benötigt, zugeordnet und bei Bedarf angezeigt. Nach Durchführung wird der Auftrag geschlossen und als „as built“ dokumentiert. Das zeigten wir schon im BMBF Bundesprojekt Bauen 4.0 [88]. Manche sahen hier das BIM schon als FIM, als „Fabrikation Information Modell“. BIM wird zum FIM. Das ist ein Beispiel für die Montage. Ein anderes Beispiel zum Abbruch im Bestandsbau angeführt. Hier können den abzureißenden Objekten die Abbruch Werkzeuge mit Handhabungshinweisen angehängt werden. Z.B. wenn der Abbruch schonend sein soll, wird die Fräse vorgeschrieben, der Hammer ist nicht gestattet.

Forschungsstelle TUM fml hat historisch bedingt, durch seinen CAD Ausbildungsauftrag im Grundstudium der TUM einen sehr guten Kontakt zu Autodesk, die sich bei Bedarf als Projekt Partner einbringen und uns bei unseren Forschungsaktivitäten unterstützen. Wir konnten feststellen, dass die „Autodesk Platform Services“ als passende Plattform z.B. die Geräteplanung unterstützt. Über „Property Sets“ können nun Anbaugeräte mit Hinweisen zur Rüstung und zum Einsatz den zu bearbeitenden Objekten zugeordnet werden. Der Property Set kann ausgelesen werden und daraus der Einsatz Auftrag abgeleitet werden.

Autodesk Platform Services bietet auch die Möglichkeit Sensordaten der Maschinen und Anbaugeräte zu erfassen und zu dokumentieren. Damit ließe sich der Bauzustand verfolgen.

D.h. für den Hochbau kann das BIM für Maschinen und Anbaugeräte Einsätze in der Planung, Auftragsableitung und Ergebnisdarstellung gut genutzt werden durch seine Objekt Orientierung und LOI Fähigkeit – siehe Bild 33.

Erste Schritte durchgeführt:

- Kontakt zu Autodesk
- Feststellung: „Autodesk Platform Services“ als passende Plattform für die Geräteplanung geeignet
- Autodesk Platform Services bietet Möglichkeit Sensordaten der Maschinen zu erfassen und weiter in die Auswertung zu spielen. Live-Visualisierung ist denkbar.

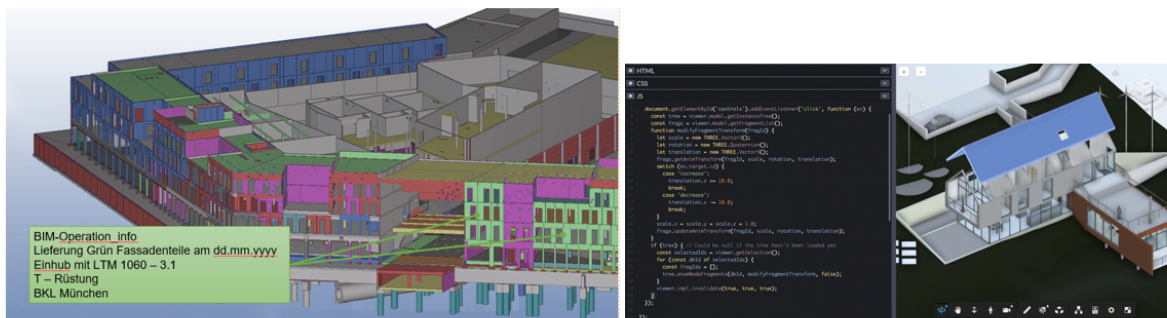


Bild 33: BIM Hochbau – Beispiel Kraneinhub Fassadenteile und Hausbau (Quellen: Lehrstuhl fml, Max Bögl, BIM Autodesk)

Anders sieht das beim BIM im Tiefbau aus.

Hier ist man in der Praxis mit zwei BIM Ansätzen unterwegs, eine Einigung erfolgte bisher nicht. Die großen Baufirmen entwickelten Firmen - BIMs , wie die Bauer Tiefbaugrube, auch die Implenia hat ein sehr mächtiges DGM – Digitales Geländemodell. Aber der Allgemeinheit, vorallem den KMU Baufirmen, steht das nicht zur Verfügung. MTS erkannte die Lücke und ist mit MTS Navi und Pilot gut im kommunalen Bereich und bei den KMU Baufirmen unterwegs, die nun beim Anlegen ihrer Baugruben und dem 3D – Geländebaggern unterstützt werden mit MTS – Navi und – Pilot [89].

In Kürze könnte sich etwas durch die neue ISO 15143 - Teil 4 bewegen. Unabhängig von der eingesetzten Meßtechnik Topcon, Trimble oder Leica wird ein harmonisiertes DGM auf LandXML Basis erzeugt und über die Server der OEMs zur Verfügung gestellt.

Aktuell ist der Entwurf zum Teil 4 der ISO geschlossen worden und liegt momentan den nationalen Normungskomitees zur Abstimmung vor. Der Weißdruck in Genf wird 2025 erwartet. Diese Harmonisierung beim DGM auf LandXML Basis kommt vorallem den KMU Baufirmen zugute.

Ein weiteres Problem bei der Darstellung von Maschinen und Anbaugeräte Modellen / Einsätzen ist die Inkompatibilität zum BIM .ifc Format. Die 3D – CAD Maschinenbauformate wie .dwg, .step, .iges, oder .jt harmonisieren nicht mit dem .ifc Format des BIM. Transformiert man unbedarft 3D-CAD Baumaschinen oder Anbaugeräte Modelle auf .ifc, dann bekommt man Monsterseeigel mit langen Stacheln und riesen Dateigrößen. Das liegt an den LOIs des .ifc Formates, damit kommen die Maschinenbau CAD Formate nicht zurecht. Wir hatten hierzu eine Studie im Rahmen Bauen 4.0 durchgeführt – siehe Bild 34. Die gängigen CAD Pakete bieten nun .ifc Gates an, die aber bis ifc.3 noch unbefriedigend sind. Einzig Dassault System bietet mit .ifc 4 einen ersten

Lösungsansatz an für SolidWorks und SolidEdge bei dem anschauliche Maschinen Modelle geschaffen werden können im .ifc Format, wenn die Modellierung der Maschine ifc kompatibel erfolgt. Hier ist knowhow erforderlich, die Baumaschinen und Anbaugeräte sind ähnlich den Bauobjekten kantig zu modellieren. Ein Laie ist hierbei jedoch überfordert ...

Problem der Inkompatibilität .ifc Formates mit 3D – CAD Maschinenformaten – Studie 2021

Quelle	IFC2x3 ^{1.)}	IFC4 ^{2.)}	Qualifikation	Zertifizierung ^{3.)}
AutoCAD 2021	---	---	0	---
Inventor 2021	x	---	+	---
SolidWorks 2019	x	x	++	---
Solid Edge 2021	x	x	++	---
NX 1926	---	---	0	---
CATIA V5	---	---	0	---
Creo 7.0	---	---	0	---

^{1.)} : 2008-2017 – begrenzte Modellierung

^{2.)} : ab 2017 – tessellierte Geometrie (Dreiecksgeometrie)

^{3.)} : Zertifizierung durch building SMART International

Bild 34: BIM .ifc Format <-> 3D – CAD Maschinenmodell Formate (Quelle: Lehrstuhl fml)

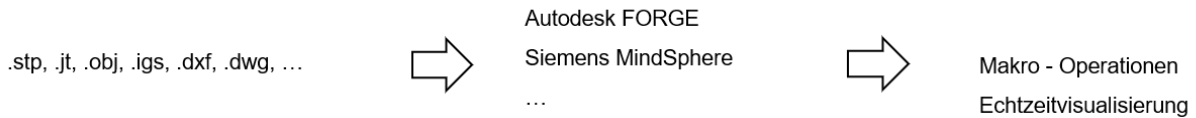
Entsprechend reagierten die CAD – Anbieter mit speziellen Lösungsansätzen

Man kann hier zwei prinzipielle Wege erkennen, um nun die Maschinen und Gerätemodelle BIM kompatibel zu nutzen – siehe Bild 35.

- a) Multiformat-Plattformen wie Autodesk Forge oder Siemens Mind Sphere werden genutzt. Wir haben hier Cloudbasierte Vernetzungen. Die nehmen alle Graphik Formate diskriminierungsfrei auf. Hier kann man schicke Baumaschinen und Anbaugeräte in 3D – CAD Formaten mit dem BIM.ifc gemeinsam darstellen und Makrooperationen durchführen, d.h. verschieben, drehen, verkleinern und vergrößern. Für viele Baustellenplanungen ist das ausreichend. Z.B. kam beim PA folgender Einsatzfall als use-case Wunsch. Wir ziehen mit dem Bagger einen Graben, verlegen die bereitgelegten Rohre, Verfüllen und Verdichten den Graben wieder. Längs des Aushubs möchte der Planer die verschiedenen Anbaugeräte dafür bereitstellen. Nun, das ist mit einer Multiformat Plattform gut möglich . Die 3D -CAD Anbaugeräte lassen sich längs des BIM Grabens positionieren, der Auftrag kann abgeleitet werden, der Bauprozess in seinen Stufen Verfüllen und Verdichten lässt sich abbilden und dokumentieren „as built“.
- b) Ein anderer Ansatz ist Bauingenieur getrieben über Autodesk Revit oder Nemetschek Allplan. Hier werden 3D CAD Maschinenbau Formate über open BIM verarbeitet und bereitgestellt als .ifc. Ob diese Modelle dann schön sind, ist Geschmack Sache. Schaut man die sich genauer an, fallen Porosität und Fehlstellen auf und die Objekte sind nur statisch.

Workflow - Status quo

Cloudbasierte Vernetzung mittels Multiformat-Plattformen



Migration über Vertikalsoftware zum openBIM-Austausch



Bild 35: Workflow im status quo zur Integration des BIM.ifc Formates mit 3D-CAD-Maschinenmodell Planungen (Quelle: Lehrstuhl fml)

Uns hat das als CAD ausbildender Lehrstuhl der TUM nicht gefallen und die planerischen Möglichkeiten waren uns zu eingeschränkt. Deshalb entwickelten wir die BIMsite zur Baustellen Beplanung und Prozeßführung – siehe Bild 36.

BIMsite zur Planung der Baustelleneinrichtung und Prozeßführung

Import der Baustellenumgebung
3D-Objekte der umliegenden Gebäude
Quelle Open Street Map
Kartenmaterial sehr aktuell

Ergänzung Baustellen Einrichtung

Ergänzung BIM und Definition der Funktionsflächen und Baustellenwege

Ergänzung Baustellen Maschinen

Bild 36: Die BIMsite

Mit der BIMsite kann nun Menue geführt schnell eine Baustelle aufgebaut und geplant werden.

- Zunächst holt man sich aus Street Map den Stadtteil , in dem gebaut werden soll und markiert mit dem Cursor , auch vermaßt, sein Baufeld.
- Das BIM wird eingesetzt, maßgerecht

- Dann platziert man Arbeits-, Montage- und Lagerflächen als „Funktionsflächen“. Diese Funktionsflächen haben Eigenschaften. Z.B. bei einer „Lagerfläche“ kann eine gerasterte Blocklagerfläche adressiert genutzt werden, für definierte Belegungen mit einer Lagerverwaltung.
- Die Baustraßen werden entsprechend Zufahrtmöglichkeiten und Baubedarf festgelegt. Prinzip „Die schwersten Bauteile auf dem kürzesten Weg zur Einbaustelle“
- Für die Baustellen Einrichtungsbeplanung stehen 3D-CAD Modelle für Container, Mulden, Stromversorgungsanschlußkästen, Dixis, Bauzaun, Paletten und Gitterboxen Bundle, Stangen und Rohr Bundle zur Verfügung, alles was man sinnvoll im Baustellenbetrieb so braucht.
- Ein 3D-CAD Baumaschinen Park und Anbaugeräte stehen für die Baumaschinen und Anbaugeräte Einsatzplanung des Baustellenbetriebes zur Verfügung. Die Krane haben Traglastkreise, um die benötigten Einhübe kontrollieren zu können.

Mit Kennzahlen kann z.B. die Kranüberdeckung oder Betriebssicherheit des Baustellen Layouts bewertet werden, wenn man Varianten vergleichen möchte.

Das Ganze läuft auf einem großen Planungstisch, den man zur Montagsbesprechung im Container mit auf der Baustelle hat, aber auch über den Desktop oder auf einem Laptop kann man die BIMsite betreiben.

Die BIMsite ursprünglich, entsprechend Hochbau BIM auf einer Platte aufgesetzt, wurde mit einem DGM auf LandXML Basis unterlegt und ist damit kompatibel zum Entwurf der ISO 15143 – Teil 4.

Die Besonderheit der „Funktionsflächen“ der BIMsite, sollte noch einmal hervorgehoben und erklärt werden:

„Lagerfläche“, das ist eine temporäre Baustellenfläche, die zeitweise zur Lagerung von Baumaterial oder vorgefertigten Bauelementen genutzt wird und dann später in der Regel überbaut wird. Hier kann ein Gitterraster mit adressierbaren Feldern für eine Blocklagerfläche genutzt und entsprechend belegt werden. Das einfache Blocklagerverwaltungsprogramm macht nun transparent, was auf der Baustelle gelagert ist und für den Verbau bereit steht.

„Arbeitsfläche“, hier wird der Planer unterstützt Baugruben anzulegen. Hierfür kann sehr gut und einfach MTS-Navi für das Anlegen der Baugrube benutzt werden. Mit diesen Plandaten kann nun der Baggerfahrer für das 3D – Geländebaggern navigiert werden, z.B. über den MTS-Piloten oder den CoPiloten von Vemcon. D.h. auf der „Arbeitsfläche“ werden Plandaten generiert für den späteren Maschinenauftrag. Mit diesen Plandaten kann der Baggerfahrer entsprechend dem Fahrerleitsystem 4.0 über die AR-Datenbrille, entsprechend Head mounted Display unterstützt werden. Als Demonstrator wurde das umgesetzt. Für die Praxis warten wir hier noch auf eine leichtere und lichtstärkere Datenbrille.

Weiterhin kann auf der „Arbeitsfläche“ die Prozesssimulation aktiviert werden, um z.B. bei der Planung abzuchecken, ob ein größerer Bagger mit größerer Schaufel und weniger Drehspielen effektiver ist, d.h. schneller und kostengünstiger als der Einsatz von zwei kleineren Maschinen. Der Planer wird hier mit Menue geführt, da nicht vorausgesetzt werden kann, dass er in der Prozesssimulation kundig ist. D.h. für die verschiedenen Planungsoptionen sind Prozesssimulationsmodule vorbereitet und hinterlegt und lassen sich von der beplanten „Arbeitsfläche“ aufrufen. Prozesssimulationssoftware ist nicht billig, aber vorkonfektioniert als Runtime Version, ist auch diese Option gut machbar und überschaubar.

Bei den „Funktionsflächen“ der BIMsite liegen nun intelligente Flächen für den Planer vor, die er nutzen kann, um die Plandaten zu speichern und für den folgenden Maschinenauftrag abrufbar sind.

Uns war schnell klar, wenn wir bewegliche Baumaschinenmodelle für die Maschinen Einsatz Planung haben wollen und auch dynamische Animationen, dann müssen wir die klassischen 3D-CAD Formate und das .ifc Format verlassen. Wir müssen in die Spielwelt und so landeten wir beim Unity Format, mit dem das jetzt alles sehr gut mit beweglichen Modellen planbar und animierbar ist.

So wurde der Rüssel der Betonpumpe als Anbaugerät mit dem Auslegerarm beweglich – siehe Bild 37 links oben. Der Planer packt sich nun den Rüssel mit seinem Mauscursor und zieht den über die Geschossdecke, d.h. er plant seinen Betonpumpeneinsatz. Er kann vorab checken , wo ist der beste Stellplatz für seine Betonpumpe, um eine möglichst große Fläche der Geschoßdecke betonieren zu können. Kollidiert bei seiner Trockenübung der Ausleger mit der Gebäudekante, dann wird er rot. Das war ein gewünschter Usecase von Schwing für die Maschinen Einsatz Planung der Betonpumpe.

BIMsite im Unity Format (Spielwelt)

- BIM als Parser
 - Baustelle mit Funktionsflächen (Lagerplätze, Maschinen Arbeitsflächen, Motageflächen, Baustraße)
 - Boden 3D – LandXML / ISO Teil4
 - Baustelleneinrichtung mit beweglichen Maschinenmodellen für die Einsatzplanung
- > Auftragsableitung für die Maschineneinsätze

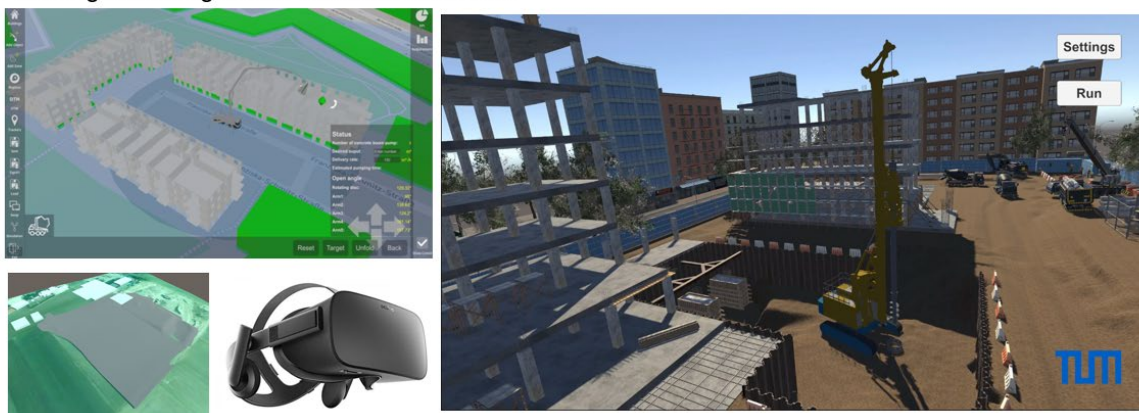


Bild 37: BIMsite – Unity – Spielwelt (Quelle: Lehrstuhl fml)

Dass die Planung sehr realitätsnah mit dem Unity-Format dargestellt werden kann, sieht man an der Beispiel Animation mit dem Tiefbohrgerät von Bauer. Das Problem ist hier ja oft das Einfahren mit dem Spezialtiefbohrgerät in diese engen innerstädtischen Baustellen. Köln Bühnen, der Umbau der Kölner Oper war so eine Muster Baustelle für uns. Nun man schiebt das Bohrgerät entsprechend dem geplanten Anfahrweg durch die Baustelle und wenn es eng wird , dann setzt man sich die VR-Datenbrille auf und schaut sich die Engstelle 1:1 genau an, wieviel Platz da noch ist. Und ist die irgendwo da oben , dann fliegt man mit seinem Flystick dorthin und schaut sich das vor Ort an.

So kann der Baustellenbetrieb mit der BIMsite vorab sehr gut geplant, die Maschinenaufträge daraus abgeleitet werden, verfolgt werden, wenn das erforderlich und gewünscht ist und

vor allem die Ergebnisse „as built“ abgespeichert werden. D.h. am Schluss nehmen die „Funktionsflächen“ der BIMsite den Bauzustand „as built“ auf.

Ein Beispiel hierzu setzten wir mit Wacker Neuson beim Bauen 4.0 Projekt um. Aus einer quasi BIMsite wird der vorgeplante Maschinenauftrag gestartet und ausgeführt. Eine Fläche war in verschiedenen Zonen unterschiedlich zu verdichten. Das Ergebnis dann „as built“ abgelegt und die verschiedenen Verdichtungszone farblich nach Grad dokumentiert – siehe Bild 38.

BIMsite als Medium für Aufträge, Ergebnisse und Visualisierung

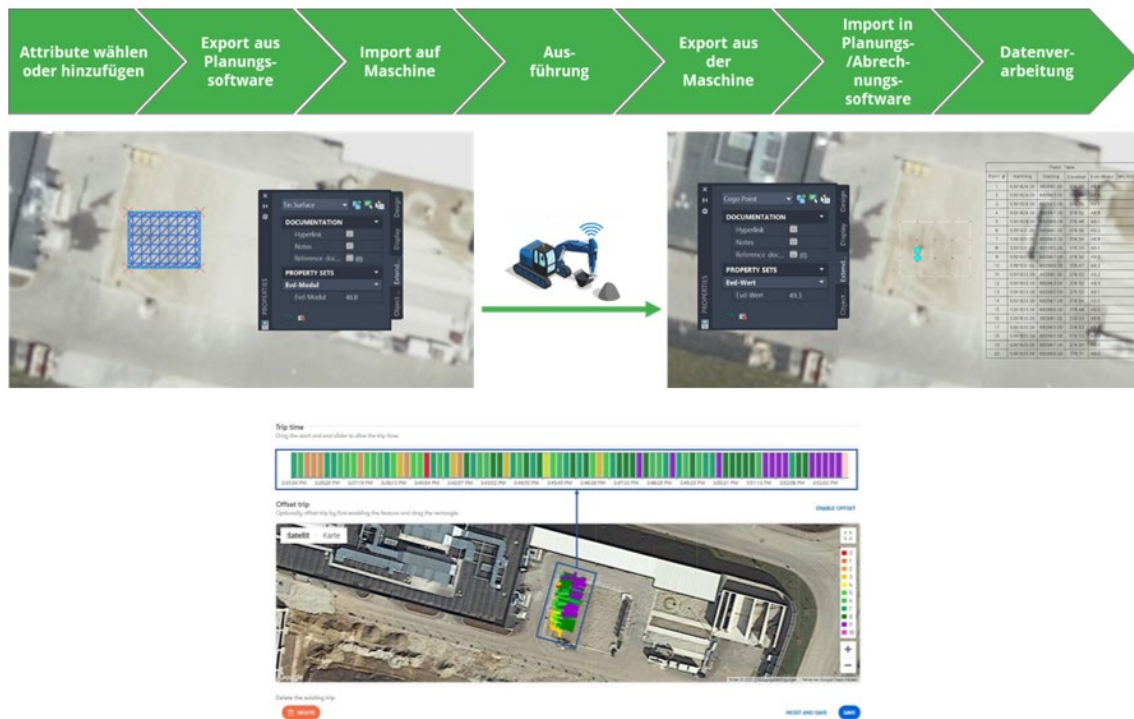


Figure 9: Compaction quality and progress of Wacker Neuson Compamatic in the telematics platform EquipCare.

Bild 38: Wacker Neuson Verdichterfeld – Planung über eine BIMsite (Quelle: Wacker Neuson)

Für die notwendige genaue Anbaugeräte Positionen beim Einsatz entwickelte die Forschungsstelle TUM fml einen geeigneten experimental DGNSS Sensor mit hoher Genauigkeit für den Echtzeit Betrieb auf der Grundlage des Entwicklungsboards C099-F9P– siehe Bild 39, der nun die Anbaugeräte Position auf + / - 1 cm Genauigkeit für OPC UA bestimmt.

Vorgehensweise

- Als DGNS-Sensor wurde das Entwicklungsboard C099-F9P gewählt, dessen Positionsgenauigkeit im RTK-Modus im Bereich +/- 1cm liegt.
- Die folgenden Datenpunkte sind berücksichtigt:
 - Latitude
 - Longitude
 - Höhe
 - Horizontale Genauigkeit in [mm]
 - Vertikale Genauigkeit in [mm]
 - GNSS Modus
- Ziel ist es, eine Lösung zu finden, um die Sensordaten eines Anbaugerätes mit einer BIM-Anwendung (BIMSite) zu verknüpfen.

C099-F9P application board

Easy evaluation of ZED-F9P with multi-band RTK

Highlights

- Application board for ZED-F9P
- Flexible connectivity options, including Wi-Fi and Bluetooth
- Arduino Mega shield connections for host expansion



Bild 39: OPC UA zum Datentransfer in eine BIMsite – DGNS Sensor +/- 1 cm (Quelle: Lehrstuhl fml)

In Bild 40 ist nun die weitere Datenverarbeitung der Anbaugeräte Position über OPC UA in das Unity Format der BIMsite dargestellt. So bekommen wir die aktuellen Anbaugeräte Positionen online ins Unity der BIMsite und das mit einer Genauigkeit von + /- 1 cm im Versuch.

Vorgehensweise

- Die Daten werden in den OPC UA Datenstandard transformiert und über den OPC UA Server auf einem Raspberry Pi zur Verfügung gestellt.
- Die Daten im OPCUA Format können dann in Unity über ein in Unity integriertes OPC UA Client Modul abgerufen und in der Unity Anwendung wie z.B. BIMSite angezeigt werden.

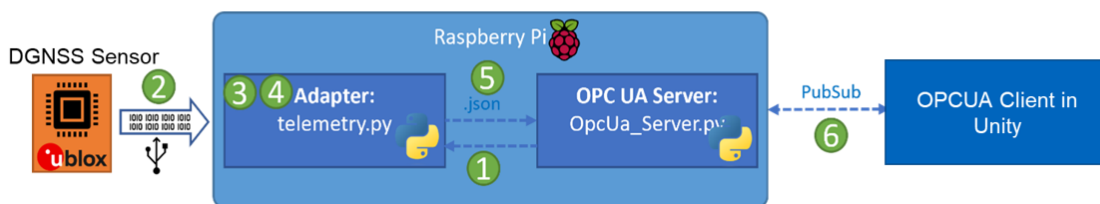
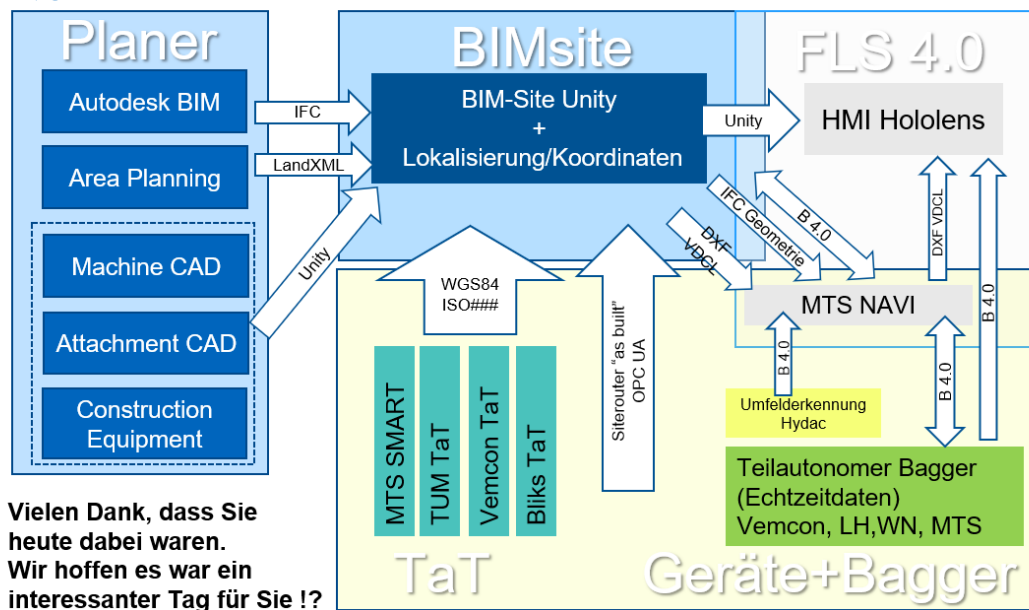


Bild 40: OPC UA zum Datentransfer in eine BIMsite – Raspberry Pi Server – Unity Format Darstellung (Quelle: Lehrstuhl fml).

Bild 41 zeigt nun die Übersicht, wie die Tools bei der Maschinen und Anbaugeräte Einsatzplanung, Beauftragung und Verfolgung, sowie der Bau Ergebnisdarstellung mit einer BIMsite erfolgen kann.

BIMsite in der Vernetzung mit den Komponenten**Bild 41:** BIMsite in der Vernetzung mit den Komponenten (Quelle: MTS/Haying und Lehrstuhl fml)

- Auf der Planer Seite stehen das BIM, das Gelände, die Baustellen Funktionsflächen, die Maschinen, die Anbaugeräte und die Baustellen Einrichtungsgegenstände zur Verfügung
- Die BIMsite wird in Baustellen Koordinaten beplant
- Über Unity kann die HMI Datenbrille den Fahrer beauftragen
- Ebenso kann das MTS Navi versorgt werden mit Daten, das den Fahrer mit Datenbrille beim 3D – Geländebaggern unterstützt mit MTS-Pilot oder den CoPiloten von Partner Vemcon über das CPX Terminal
- Ein Teilautonomer Bagger kann mit Daten aus der BIMsite versorgt werden und seine „as built“ Daten auf der dazugehörigen Funktionsfläche in der BIMsite ablegen – das war unser Bauen 4.0 Demo Beispiel (B4.0)
- Die TaT Elemente ver- und entsorgen die Baustelle mit Gerätschaft und Material.
- MTS Smart kann man als einen Controller sehen und Mensch-Maschine Schnittstelle

Der Siterouter aus dem IGF-Projekt [90] könnte die „as built“ Daten der Maschinen und Anbaugeräte über OPC UA auf die BIMsite Funktionsflächen schreiben und damit die BIMsite als Bau Ergebnisspeicher und Medium nutzen.

Unterstützung durch die Forschungsstelle AIS

Um den Baufortschritt in der Cloud (BIM bzw. BIMsite) kontinuierlich zu aktualisieren, wurde die Kommunikation von Sensor/ Anbauwerkzeug über Trägermaschine bis in die Cloud als Prüfstand konzipiert (vgl. AP6). Der automatisierte Abgleich der Daten in der Cloud (BIM bzw. BIMsite) mit den neu empfangenen Sensordaten (z.B. von Anbauwerkzeug) erfolgt mithilfe der Sensoreigenschaften sowie der Algorithmen aus AP4 und wird am konzeptionierten Prüfstand als Demonstrator (vgl. AP6) evaluiert.

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde basierend auf den bisherigen Ergebnissen aus den APs 1-4 die demonstrative Umsetzung der in AP3 konzipierten Systemarchitektur für AP6 geplant.

Der resultierende Demonstrator wurde im Rahmen von AP6 aufgebaut und ist in Kapitel 8 im Detail beschrieben.

Für die BIM-Schnittstelle verfolgt Forschungsstelle AIS das ODX-Datenmodell, wegen guter Erfahrungen und in Rücksprache mit der Partner Forschungsstelle TUM fml. Das ODX-Datenmodell ist in einem UML-Klassendiagramm spezifiziert und für den Datentransfer zwischen verschiedenen Werkzeugen und Datenbanken im XML-Format abbildbar. Wie in AP3 beschrieben, müssen die Daten aus dem ODX-Format extrahiert und mithilfe eines Parsers in das BIM-Datenmodell transferiert werden, um Baufortschrittsdaten direkt im BIM zu aktualisieren. Die Umsetzung dieser konzeptionell entworfenen BIM-Kopplung hat aus den in AP3 genannten Gründen (hoher Mehraufwand für Implementierung eines Parsers) nicht mehr stattgefunden, da der Projektträger unserem Antrag auf KNV – Kostenneutrale Verlängerung - nicht stattgegeben hat. Auch die reale Bereitstellung von Baustellen-, Maschinen- und Anbaugerätedaten von einer Musterbaustelle, den Forschungspartner TUM fml mit einer der beteiligten Baufirmen vereinbart hatte, kam deshalb nicht mehr zu Stande.

8 AP 6: Umsetzung und Evaluierung

Umfang: 5 Monate Projektlaufzeit (fml: 5 PM, AIS: 5 PM)

Methoden: Objekt orientierte Konfektionierung und Programmierung, Hardware-in-the-Loop Simulation, begleitende Fallstudien im Baubetrieb, praktische Maschinentests, Ortungsmeßversuche, Probanden Versuche, Marktrecherche

Im Rahmen der Validierung in AP 6 soll die praktische Anwendbarkeit der Lösungen überprüft werden. Dazu werden bei den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses Fallstudien durchgeführt, in deren Rahmen die Tätigkeiten der Use Cases aus AP1 und 2 betrachtet und analysiert werden. Neben der Bedienfreundlichkeit des HMI, der Robustheit der Sensoreinheit sowie Algorithmen und der Anwendbarkeit des Verfahrens zur Baufortschrittsermittlung werden die Anforderungen aus AP 1 verifiziert. Darüber hinaus wird die, ebenfalls in AP 1, getroffene Potenzialabschätzung mit den über das Projekt gesammelten Erkenntnissen angepasst (fml).

Zudem soll die grundsätzliche Funktionalität der Integration von Sensordaten in BIM zuerst in einem HiL-Aufbau am Lehrstuhl AIS unter Laborbedingungen getestet werden. Somit kann die grundsätzliche Funktionsweise der Sensordaten aus AP 2 mit den Auswertalgorithmen aus AP 4 überprüft und anhand der Baufortschrittsentwicklung aus AP 5 validiert werden, bevor das System unter realen Bedingungen bei einem KMU-Betreiber getestet wird (AIS).

Arbeiten und Ergebnisse des Lehrstuhls fml

- Entwicklung des MiC4.0 BUS erfolgreich abgeschlossen – Plugtests mit unterschiedlichen Kombinationen von Maschinen, Anbaugeräten und Sandwichkombinationen durch die Partner durchgeführt. Die Version 1.0 ist veröffentlicht.
- Ortungsuntersuchungen abgeschlossen und eine eigene DGNS Technik mit Genauigkeit +/- 1 cm zur aktuellen Aktivitätserkennung Anbaugerät, KI unterstützt, entwickelt und getestet

- HMI HeadMountedDisplay auf Demonstrateurebene abgeschlossen. Partner MTS hält Technik auf dem Level Praxis ready vor– Einsatz durch aktuelle Hardware Defizite der Hololens noch eingeschränkt.
- Bagger CoPilot von Vemcon als „best practice“ HMI, als ein Terminal Technologie mit Touchscreen Steuerung eruiert für den Anbaugeräteinsatz. Im Einsatz getestet. Eine Probanden Studie bestätigte die intuitive Handhabung der Anbaugeräte Möglichkeiten über das zentrale CPX-Terminal.
- BIM im Hochbau mit Partner Autodesk für Anbaugeräte Planung, Auftragsableitung, Prozessverfolgung und „as built“ Ergebnisablage als Demonstrator bewertet.
- Multiformat Plattform Autodesk Forge als Demonstrator für Makroobjekte Planung für Anbaugeräte und Maschinen geeignet und getestet.
- BIMsite ist als Demonstrator nutzbar zur Maschinen und Geräte Einsatzplanung. Bsp Einfahren Tiefbohrgerät in innerstädtische Baustelle, Geschoßdecken Betonierung mit Betonpumpe, Arbeiten eines Kurzheckbaggers im Fencing.
- BIMsite Auftragsableitung für Logistik Bereitstellung von Anbaugeräten, Beauftragung des Fahrers über das Fahrerleitsystem mit der Hololens, Unterstützung beim 3D-Geländebaggern mit MTS Navi und Pilot bewertet.
- BIMsite Dokumentation der „as built“ Daten auf den Funktionsflächen, z.B. Baugruben IST-Maße aus dem MTS-Navi ablegen als Doku geeignet. Dynamische Lagerplatz Führung über Blocklager Flächen Verwaltung. Die BIMsite als Ergebnisspeicher. Beispiel WN Verdichterfläche mit unterschiedlichen Feldern.

Arbeiten und Ergebnisse des Lehrstuhls AIS

Am Lehrstuhl AIS wurde ein Hardware-Software-Demonstrator aufgebaut, um den bidirektionalen Datenfluss zwischen Sensoren und Anbaugerät über die Trägermaschine bis in die Cloud zu evaluieren, um damit die Integration von Sensordaten in BIM zu evaluieren. Der Aufbau des Demonstrators (vgl. Bild 42) orientiert sich an der in AP3 konzipierten Hardware-Software-Architektur (vgl. Bild 27) mit CAN-Bus als in der Baubranche etablierten Kommunikationsart. OPC UA, als vielversprechende Zukunftslösung, wird von dem aufgebauten Hardware-Software-Demonstrator ebenfalls unterstützt. Die Teilevaluationen wurden parallel bei der Bearbeitung der obigen Arbeitspakete durchgeführt und mit der Partner Forschungsstelle TUM fml abgeglichen.

Der Demonstrator wurde mit drei unterschiedlich leistungsfähigen Steuerungen der Firma Sensor-Technik Wiedemann (STW GmbH) aufgebaut, konkret mit einer HPX als zentraler CU, einer 3CM sowie einer 3CS, die speziell für mobile Maschinen konzipiert sind. Der Datentransfer in die Cloud erfolgt über eine TCG von STW, die via Ethernet an die HPX angeschlossen ist und via LTE (repräsentativ für Funknetzwerke auf Baustellen) in die Cloud kommuniziert. Der Demonstrator wurde aufgrund fehlender personeller und zeitlicher Ressourcen nur mit Technologien aus dem STW-Ökosystem umgesetzt, weil das STW-Ökosystem vorkonfigurierte Module zur zeiteffizienten Inbetriebnahme bietet. Dadurch sowie durch den frühzeitig verfügbaren Demonstrator zur Evaluation von Zwischenergebnissen aus den APs 2-5 konnte ein Teil der Verzögerung im Projekt aufgeholt werden. Die prototypische Umsetzung mit den STW-

Technologien zeigt die Realisierbarkeit der konzipierten Systemarchitektur. Ein Transfer auf andere Steuerungstechniken konnte im Projekt nur theoretisch angeschnitten werden und wird daher als Ausblick auf zukünftige Arbeiten betrachtet.

Um die in AP4 entwickelten Algorithmen zu evaluieren, ist ein separater PC an die 3CS angeschlossen, der die synthetischen Daten (verschiedene Sensortypen: Temperatur, Druck, IMU, Sensordatenverläufe und Anomalien) generiert. Die in AP2 erstellten ODX-Datenbeschreibungsdateien für die drei Sensortypen stehen der HPX zur Verfügung, sodass diese die angeschlossenen Sensoren kennt und die von der 3CS erhaltenen Sensordaten mit den in AP4 ausgewählten Algorithmen auf Anomalien untersuchen und vorverarbeiten kann.

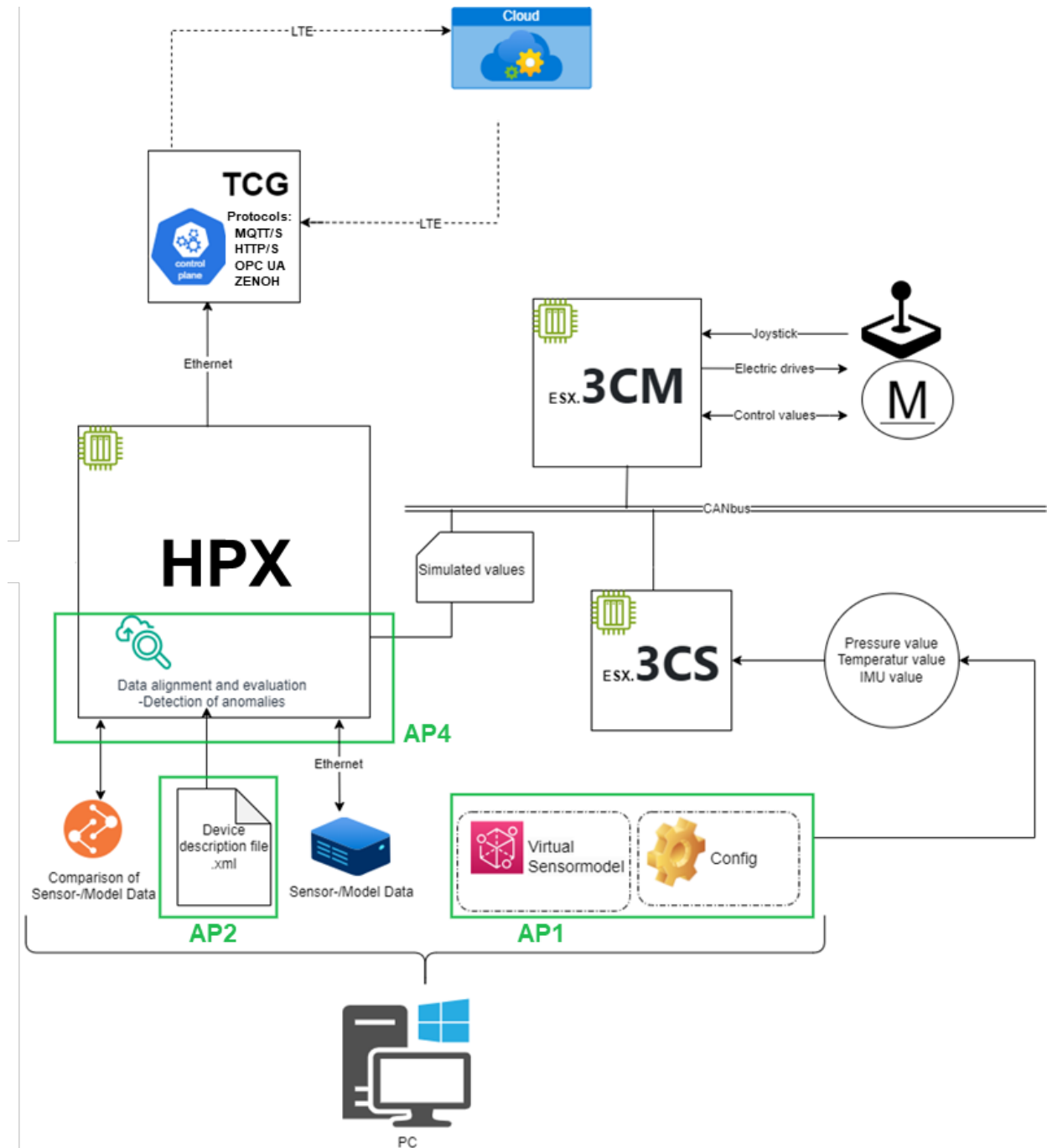


Bild 42: Aufbau des Demonstrators für den bidirektionalen Datenaustausch (Quelle: Lehrstuhl AIS)

Softwareseitig wurde die openSYDE open-source Software-Plattform [85] von STW verwendet, um auf verschiedenen Hierarchieebenen die Kommunikation der einzelnen Komponenten untereinander sowie den Datenfluss durch das System zu definieren. Bild 43 zeigt die erste Ebene mit der Definition der Kommunikation zwischen den CUs, hier der HPX, der 3CM und der 3CS. In der zweiten Ebene wurden der Datenfluss und die Art der auszutauschenden Nachrichten festgelegt.

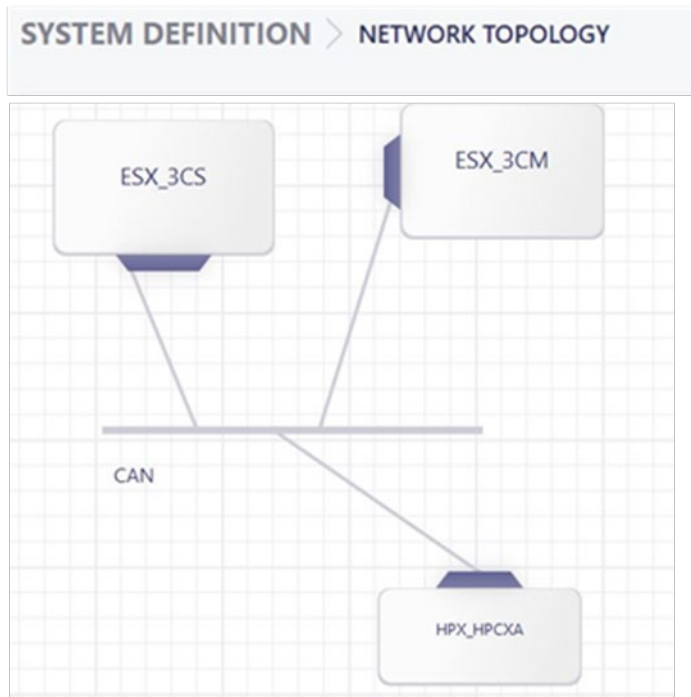


Bild 43: Erste Ebene der Netzwerktopologie zur Definition der Verbindung zwischen den CUs (Quelle: Lehrstuhl AIS und STW)

Der Datentransfer in die Cloud über die TCG wurde aufgrund zeitlicher Engpässe zwar realisiert, aber nicht mehr evaluiert (vgl. AP5). Eine KNV – kostenneutrale Verlängerung – zum Projekt wurde zwar beantragt, um den Test mit den realen Daten aus einer laufenden Musterbaustelle durchführen zu können, wurde aber vom Projektträger DLR leider nicht mehr zugestanden.

Dennoch kann gesagt werden, dass der mit den STW Modulen aufgebaute Demonstrator die Anforderungen erfüllt, wie die analytischen Tests zeigen. Der gewählte Ansatz hat ein hohes Potential für weitere Entwicklungen.

9 AP 7: Projektmanagement und Transfer der Ergebnisse

Umfang: 1 Projektmonat (fml: 1 PM, AIS: 1 PM)

Methoden: Homepage, Zeitschriften, Konferenzen, Pressearbeit, Veranstaltungen

Projektmanagement: Die bilateralen Arbeitstreffen mit Projektpartnern zur Diskussion spezieller Projektthemen und Sitzungen des PA zur Diskussion und Validierung der Ergebnisse erfolgt im Rahmen des Projektmanagements über die gesamte Projektlaufzeit. Eine Besonderheit stellen

hier die PAs in Cluster 7 MiC4.0 Anbaugeräte VDMA dar. Hier konnte das Projekt ToolFlott mit der User-Group (beteiligte Partner Baufirmen) den Bedarf der Nutzer für den Datentransfer des MiC4.0-BUS zwischen Anbaugerät und Trägermaschine mitgestalten Die Ergebnisse des Projektes wurden in einem Technical Report zusammengefasst – siehe Bild 11.

Transfer: Während der Projektlaufzeit werden zahlreiche Möglichkeiten genutzt, um interessierte Unternehmen über (Teil-)Ergebnisse von ToolFlott zu informieren. Durch die Nutzung verschiedener Informationskanäle (Printmedien, Vorträge, Seminare, etc.) ist für die betriebliche Praxis ein Zugang zu den Forschungsergebnissen während der Projektlaufzeit und danach sichergestellt. Transfermaßnahmen unterstützen die Verbreitung der Forschungsergebnisse. Besonders zu erwähnen ist hier das VDBUM Großseminar bei dem ca. 1000 Baufirmen und Baumaschinen Anwender sich eine Woche in Willingen / Sauerland zentral in Deutschland treffen, um sich auszutauschen. Auch das BauCamp der bayerischen Bauakademie sei hier exemplarisch genannt, bei dem vor allem KMU Baufirmen vom Zentralverband des deutschen Baugewerbes sich treffen zum Gedanken- und Wissensaustausch. Der internationale CLEaR Kongress (Construction Logistics Equipment and Robotics), den die Forschungsstelle TUM fml im Oktober 2023 ausgerichtet informierte auch die ausländischen Forschungspartner , wie Fraunhofer Italia, Berkeley California, Arhus Dänemark, Budapest Ungarn und andere Kollegen von den Untersuchungen und Ergebnissen des ToolFlott Projektes. Gezielte Veröffentlichungen in Printmedien mit großer Reichweite (z.B. in der VDBUMinfo) sind noch nach Projektabschluss vorgesehen, um die Community von den ToolFlott Ergebnissen zu informieren. Auch auf dem bauma Stand 2025 des Lehrstuhles fml im ScienceHub, wird das ToolFlott Projekt Thema sein und den Besuchern vorgestellt.

10Fazit und Ausblick

10.1 Abgleich von Anforderungen und Ergebnissen

10.1.1 Inhaltliche Abweichung von der ursprünglichen Planung

In den Arbeitspaketen des Lehrstuhl fml gab es keine inhaltlichen Abweichungen von der Antragstellung. Es zeigte sich aber, dass die Nutzung des BIM für Anbaugeräte Planung, Auftragsableitung, Prozessdurchführung und Bau Ergebnisdarstellung wegen dem verwendeten .ifc Format eine Herausforderung darstellt. Verschiedene Lösungen, welche die Praxis hierzu nutzt, wurden vorgestellt und diskutiert. Ein eigener Vorschlag die BIMsite zur Beplanung von Baustellen mit ihren Vorteilen und Möglichkeiten ist erarbeitet worden und wird vorgestellt.

Da die beantragte KNV vom Projektträger DLR nicht bewilligt wurde, konnte am Schluss der vorgesehene Vergleich mit Praxisdaten von Anbaugeräten aus einer Musterbaustelle eines Baufirmen Partners, leider nicht mehr durchgeführt werden. Das behinderte vor allem unseren Forschungspartner AIS beim Test des Vernetzungsansatzes mit ODX.

In den Arbeitspaketen des Lehrstuhl AIS gab es die folgenden inhaltlichen Abweichungen:

1. Kommunikationsfunktionalitäten für Embedded-Steuerungen (AP2, AP6)

Implementierung einer Docker-Plattform zur Plug-and-Play-Auswahl von Kommunikationsprotokollen wurde auf Raspberry-Pis mit Linux-Betriebssystem umgesetzt (vgl.

AP2). Ein Transfer auf Steuerungsplattformen für mobile Arbeitsmaschinen fand nicht statt. Steuerungssysteme für mobile Arbeitsmaschinen verwenden in der Regel Embedded Linux Systeme, die von den Herstellern manuell vorkonfiguriert werden. Ein nachträgliches Hinzufügen von Software, wie z.B. Docker, erfordert seitens der Endkunden einen sehr hohen manuellen Implementierungs- und Integrationsaufwand, sodass in diesem Projekt auf eine Implementierung von Docker auf mobilen Steuerungssystemen (vgl. AP6) verzichtet werden musste. Sofern Steuerungstechnikhersteller die Verwendung von Docker beim Deployment ihrer Embedded Linux OS vorsehen, kann die auf Raspberry-Pis umgesetzte Docker-Lösung direkt auf mobilen Steuerungsplattformen deployed werden. Strukturierte Interviews mit zwei Steuerungstechnikherstellern für mobile Arbeitsmaschinen ergaben, dass die Hersteller bereits an einem Docker-Support für ihre Steuerungsplattformen arbeiten und Docker daher in naher Zukunft bei Praxisanwendungen zur Verfügung stehen wird.

2. Verwertung von Daten im HMI und BIM (AP3, AP5)

Für die automatisierte Datenaktualisierung im BIM (vgl. AP5) und den Datentransfer ins HMI (vgl. AP3) wurden Schnittstellen zur Datenübertragung in die Cloud konzipiert sowie eine einheitliche Datenbeschreibung im ODX-Format verwendet. Eine Verwertung der Daten im HMI oder BIM wurde nur konzeptionell betrachtet. Es gibt keine vorkonfigurierten Schnittstellen zur Integration der Daten im ODX-Format in BIM und HMI. Hierfür sind Parser nötig, um die ODX-Datenbeschreibungsdatei auszulesen und entsprechend in das BIM-Format oder für das jeweilige HMI zu parsen. Die Entwicklung eines ODX-Parsers für BIM und HMIs erfordert einen hohen manuellen Implementierungsaufwand und würde im Falle der HMI aufgrund unterschiedlicher HMI-Lösungen nur eine Insellösung darstellen. Aufgrund des hohen Aufwands bei gleichzeitig geringem wissenschaftlichem Mehrwert sowie wegen personeller Engpässe wurde auf die Umsetzung der Parser verzichtet, um den Projektfortschritt sicherzustellen.

3. Evaluation der robusten Auswertalgorithmen (AP4, AP6)

Die Evaluation der in AP4 entwickelten, robusten Auswertalgorithmen erfolgte in AP6 anhand synthetischer Daten. Durch die synthetischen Daten waren schnellere und umfassendere Tests möglich, da viele unterschiedliche Szenarien ohne physische Einschränkungen abgebildet werden konnten. Dem AIS konnten keine Daten realer Sensoren und Maschinen zur Verfügung gestellt werden, sodass das AIS hierfür einen repräsentativen synthetischen Datengenerator entwickelt hat.

4. Prototypischer Aufbau der Hardware- und Software-Systemarchitektur (AP2, AP3, AP6)

Die Anforderung, die Hardware- und Software-Systemarchitektur auf verschiedenen etablierten Laufzeitumgebungen nutzbar zu machen (vgl. AP2), wurde nur teilweise erfüllt. Obwohl die Architektur entsprechend konzipiert wurde (vgl. AP3), erfolgte die Evaluation lediglich anhand eines Demonstrator Aufbaus mit STW-Steuerungen (vgl. AP6). Die STW-Steuerungen ermöglichen eine schnelle Inbetriebnahme auf Entwickler Ebene und wurden daher für dieses Projekt verwendet, um einen Demonstrator frühzeitig entwickeln und zur Evaluierung der Zwischenergebnisse verwenden zu können. Aufgrund des hohen Implementierungsaufwands für andere Laufzeitumgebungen wurde deren demonstratorische Umsetzung und Evaluation im Projekt nicht mehr durchgeführt.

10.1.2 Zeitliche Abweichung von der ursprünglichen Planung

Bei der Forschungsstelle TUM fml konnte der vorgesehene Zeitablaufplan für die Entwicklung eingehalten werden für AP1 – AP5. Außer, wenn bilaterale Gespräche mit Firmenpartnern anstanden, wurde mal der eine oder andere Punkt vorgezogen bzw. nachdiskutiert. Bedingt durch die Personalknappheit kam es jedoch öfters zu einem Wechsel der bearbeitenden wiss.MA. Das konnte aber durch den Projektleiter, der seit ca. 20 Jahren mit dieser Materie vertraut ist, abgeglichen werden, indem er die neuen wiss.MA schnell einarbeitete und auf aktuellen Kenntnisstand brachte. Am Schluss von AP6 im Rahmen der Evaluierung des Systems, war eigentlich noch ein Test mit Praxisdaten von einer Musterbaustelle, eines unser Baufirmen Partner vorgesehen. Dem Antrag einer KNV hierfür folgte der Projektträger DLR aber nicht, weshalb aus Zeitgründen auf den finalen Praxistest verzichtet wurde.

Am Lehrstuhl AIS konnte erst mit Verzögerung geeignetes wissenschaftliches Personal zur Bearbeitung des Projekts akquiriert werden. Das Projekt konnte so, wenn auch nur in Teilzeit, bearbeitet werden. Durch den Einsatz erfahrener, wissenschaftlicher Hilfskräfte, die durch Mitarbeitende angelernt und betreut wurden sowie durch den frühzeitigen Aufbau und die zeiteffiziente Inbetriebnahme des Demonstrators (vgl. AP6) zur Evaluation von Zwischenergebnissen konnte ein Teil der Verzögerung eingeholt werden. Alle Arbeitspakete konnten zeitlich bearbeitet werden, wenngleich aufgrund der fehlenden Projektverlängerung nicht vollumfänglich abgeschlossen werden.

10.2 Fazit und Ausblick vorallem für KMU Baufirmen

Eine herausragende Innovation war die Entwicklung des MiC4.0-BUS, der nun das Anbaugerät mit der Trägermaschine datentechnisch harmonisiert verbindet. Diese Entwicklung ist Hersteller übergreifend und allgemein gültig. Zwischenaggregate , sogenannte Sandwiches aus Schnellwechslern und Tiltrotatoren werden dabei diskriminierungsfrei integriert. Das Forschungsprojekt ToolFlott konnte hier die Entwicklergruppe Cluster 7 MiC4.0 unterstützen und sich mit einbringen im Sinne der IGF. Damit haben nun vorallem KMU Baufirmen die Möglichkeit an der herstellerübergreifenden und geführten Nutzung von Anbaugeräten zu partizipieren. Der Schulungsaufwand für das eigene Personal sinkt erheblich, der Anbaugeräte Einsatz wird sicherer, die Bedienung wird wesentlich vereinfacht.

Das muss aber durch Veranstaltungen und Infos bei den KMUs noch kommuniziert werden, hier bietet sich das VDBUM Großseminar in Willingen 02/2025 , die kommende bauma 2025 in München und das BauCamp der Bayerischen BauAkademie 04/2025 an.

Der MiC4.0-BUS wurde auf europäischer Ebene entwickelt, deshalb sind auch die außereuropäischen großen Baumaschinen Hersteller noch zu gewinnen. Mittlerweile ist auch Hitachi und Komatsu dem Verbund beigetreten und CAT konnte über die UserGroup von ToolFlott gewonnen werden. Entsprechend bekommen wir hier einen internationalen Lösungsansatz. Bereits im September 2024 konnte ein Entwurf zu einem ISO Datenstandard für Anbaugeräte der maßgeblichen ISO 15143 WorkingGroup in Tokio über MiC4.0 vorgestellt werden. Der Entwurf wurde im Rahmen des ToolFlott Projektes in der Usergroup von MiC4.0 Cluster 7 ausgearbeitet. Er basiert auf der gemeinsamen Entwicklung des MiC4.0-BUS und soll, wie wir hörten, nun in der

ISO 15143 in Teil 3 oder separat als Teil 5 eingebaut werden. So kann das ToolFlott Projekt im Sinne der IGF bei der Anbaugeräte Nutzung bei Erdbaumaschinen Geschichte schreiben.

Im Rahmen der „Next Steps“ wurde angeregt, dass der MiC4.0-BUS nicht nur bei Neumaschinen eingebaut wird, sondern dass auch bestehende Standardgeräte nachgerüstet werden können. Dem wurde von den Herstellern bereits zugestimmt. Das kommt nun vor allem den KMU Baufirmen zugute. Weiterhin ist vorgesehen im Sinne von „Next Steps“, dass wichtige Anbaugerätedaten, wie Ident und Verortung für die Disposition, der Betriebszustand für die automatische Verrechnung und die summierten Betriebsstunden für die prädiktive nächste Wartung als Datenblock den Maschinendaten nach ISO 15143 – 3 einfach angehängt und mit den Baumaschinendaten gesendet werden. Davon profitieren hochgradig die KMU Baufirmen, die damit sehr einfach an die MiC4.0-BUS Daten ihres eingesetzten Anbaugerätes kommen.

Die HMI Entwicklung Fahrerleitsystem 4.0 mit AR-Datenbrille wurde zusammen mit der MTS weiterentwickelt zum Demonstrator für den Einsatz beim Anbaugerätebetrieb. Wenn sich hier die Datenbrillentechnik in Zukunft noch verbessert, leichter und lichtstärker wird, dann ist dieser sehr gute HMI Ansatz für die Praxis verfügbar.

Der HMI Ansatz mit der intuitiven Touchscreen Steuerung und CPX Terminal , von Vemcon entwickelt, wurde als „Best Practice“ für den aktuellen HMI Anbaugerätebetrieb eruiert und bewertet. Vorteilhaft ist bei dieser Technik, dass der MiC4.0-BUS sich bereits ganzheitlich nutzen und abbilden lässt. Vorteilhaft ist die Integration verschiedener Ortungstechniken. Die Überprüfung mit einer Probandenstudie ergab, dass die intuitive Steuerung der Anbaugeräte mit dem Vemcon CoPiloten mit über 90% Trefferquote erfolgreich war.

Die BIM Nutzung ist eine Herausforderung wegen dem .ifc Format, das nicht kompatibel mit den Maschinenbau CAD Formaten ist wegen der LOI Stufen. Verschiedene Lösungsansätze der Praxis wurden untersucht und bewertet. Geeignet sind Multiformat Plattformen wie Autodesk Forge oder Siemens Mind Sphere. Wir haben hier Cloudbasierte Vernetzungen. Die nehmen alle Graphik Formate diskriminierungsfrei auf. Hier kann man Baumaschinen und Anbaugeräte in 3D – CAD Formaten mit dem BIM.ifc gemeinsam darstellen und Makrooperationen durchführen, d.h. verschieben, drehen, verkleinern und vergrößern. Für viele Baustellenplanungen ist das ausreichend. Diese Multiformat Plattformen sind jedoch für KMU Baufirmen kostspielig. Ein anderer Ansatz ist Bauingenieur getrieben über Autodesk Revit oder Nemetschek Allplan. Hier werden 3D CAD Maschinenbau Formate über open BIM verarbeitet und bereitgestellt im .ifc.Format. Schaut man sich die genauer an, fallen Porosität und Fehlstellen auf und die Objekte sind nur statisch platzierbar. Als CAD ausbildender Lehrstuhl der TUM gefällt uns das nicht und die planerischen Möglichkeiten sind uns für den Maschinen- und Gerätebetrieb zu eingeschränkt.

Es liegt sicherlich nahe das BIM als Grundlage für die Planung und „as built“ Dokumentation für den Anbaugeräte Einsatz zu nutzen !

Da müssen wir zunächst einmal zwischen BIM im Hochbau und BIM im Tiefbau unterscheiden.

Bei BIM im Hochbau haben wir einen eindeutigen Standard vorliegen. Wir haben hier eine Objekt orientierte Darstellung und Modellierung. Entsprechend können wir an die BIM Objekte unsere Maschinen- und Anbaugeräte Planung dranhängen. Das funktioniert recht ordentlich, wie wir in Beispielen zeigten. An die Bauobjekte kann die Maschinenplanung angehängt werden, die Beauftragung erfolgen und die Ergebnisse „as built“ gespeichert werden. Man kann hier das BIM im Hochbau schon als FIM, als „Fabrikation Information Modell“, sehen. BIM wird zum FIM.

Konkret konnten wir mit unserem Forschungspartner Autodesk feststellen, dass die „Autodesk Platform Services“ als passende Plattform z.B. die Geräteplanung unterstützt. Über „Property Sets“ können nun Anbaugeräte mit Hinweisen zur Rüstung und zum Einsatz den zu bearbeitenden Objekten zugeordnet werden. Der Property Set kann ausgelesen werden und daraus der Einsatz Auftrag abgeleitet werden. Autodesk Platform Services bietet auch die Möglichkeit Sensordaten der Maschinen und Anbaugeräte zu erfassen und zu dokumentieren. Damit ließe sich der Bauzustand verfolgen. D.h. für den Hochbau kann das BIM für Maschinen und Anbaugeräte Einsätze in der Planung, Auftragsableitung und Ergebnisdarstellung eigentlich gut genutzt werden durch seine Objekt Orientierung und mit seiner LOI Fähigkeit. Baufirmen mittlerer Größe können sich Autodesk BIM leisten, kleine Baufirmen eher nicht. Ein anschließendes zu empfehlendes Forschungsprojekt könnte sich mit diesem Ansatz genauer auseinandersetzen , zumal „Run Time Versionen“ in abgespeckter Form, kostengünstige Möglichkeiten auch für kleine KMU Baufirmen eröffnen könnten.

Das BIM im Tiefbau stellt jedoch weiterhin ein Problem dar. Es gibt zwar sehr mächtige DGM – Digitale Gelände Modelle, die wurden aber von großen Baufirmen wie Fa. Bauer und der Fa. Implenia für die Eigennutzung entwickelt und stehen den KMUs nicht zur Verfügung. Eine Harmonisierung zum DGM ist zur Zeit über die ISO 15143 – 4 im Gange, die eine Harmonisierung beim DGM auf LandXML Basis als ISO Entwurf darstellt. Mit der Veröffentlichung des Weißdruckes in Genf ist 2025 zu rechnen.

Forschungsstelle TUM fml entwickelte mit der BIMsite , entsprechend konsequenter Umsetzung von Logistik Ansätzen , ein einfaches Tool für die Baustellenplanung, in das auch die Anbaugeräte Werkzeug Planung, Einsatz Beauftragung, bei Bedarf auch Einsatzverfolgung mit KI gestütztem, selbst entwickelten, hochgenauen DGNSD Aktivitätssensor +/- 1cm erfolgen kann. Aber für die Praxis genügt hier eigentlich die Aussage zum Anbaugeräteinsatz „busy“, das sollte für die meisten use cases genügen. Wichtig ist jedoch die Ablage und Datenspeicherung des Bauergebnis des Anbaugerätes „as built“ in der BIMsite. Das ist auf den „Funktionsflächen“ der BIMsite einfach möglich. Die BIMsite unterstützt auch die testende Einsatzplanung von Maschineneinsätzen über animierte Baumaschinenmodelle und die vergleichende Vorabbewertung von Maschineneinsätzen durch die menuegeführte Prozesssimulation. Die sehr anschauliche Animation mit Unity , dem Format der Spielwelt und der Datensammlung und Weiterverarbeitung bei Bedarf über OPC UA, unterstützt die BIMsite mit sehr anschaulichen Planungsmöglichkeiten die KMU Baufirmen. Damit steht einer KMU Baufirma ein mächtiges visuelles Planungs-, Auftrags- , Prozessverfolgungs und Ergebnis Darstellungsmedium der „as built“ Daten zur Verfügung. Die Weiterentwicklung zu einer „open BIMsite“ für die einfache KMU Baufirmen Nutzung ist gut in einem ToolFlott Folgeprojekt vorstellbar und wird empfohlen. Damit läßt man die KMU Baufirmen an der digitalen Transformation teilhaben und unterstützt sie sehr bei ihrer Produktivitätssteigerung.

Die Forschungsstelle TUM AIS legte im Projekt neue Grundlagen für den plug and play sowie drag and drop Betrieb hinsichtlich Anbaugeräte Sensorik, Kommunikation und Datenverarbeitung offen.

Parallel wurde im Projekt durch die Forschungsstelle TUM AIS die aktuell auf dem Markt vorhandene Sensortechnik für Anbaugeräte auf ihre Anwendung auf der Baustelle analysiert. Die Bewertungskriterien basieren dabei auf den Anforderungen an Wirtschaftlichkeit, Robustheit, Konnektivität, Interoperabilität zum bestehenden Anwendungsbedarf und Datensicherheit.

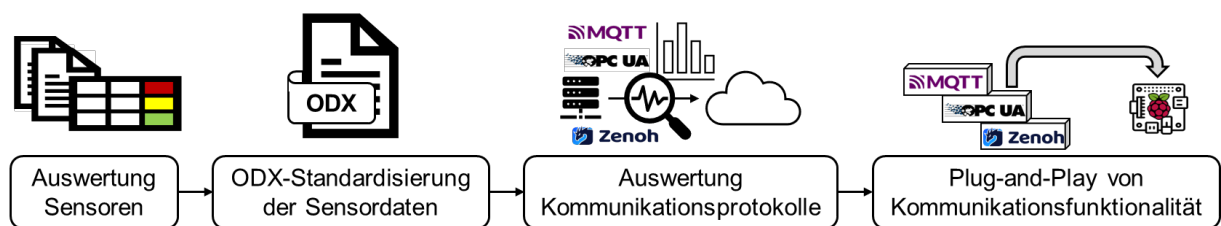
Weiterhin wurden Anforderungen an die zugrundeliegende Softwarearchitektur inkl. der Schnittstelle zur Sensortechnik untersucht.

Im Fokus standen: Beschleunigungs- und Neigungssensoren sowie inertielle Messeinheiten (IMUs), Temperatursensoren, Mikrofone, Hallsensoren, Planarsensoren und Wegmesssysteme, Induktive Näherungsschalter und -sensoren sowie Lichtschranken.

Für die verschiedenen Sensortechnologien wurden Klassifikationstabellen erarbeitet und spezifische Vergleichs- und Bewertungskriterien festgelegt: Neben Sensortyp und Funktionalität wurden aus den jeweiligen Datenblättern die Anzahl Messachsen, Messbereich, Messtoleranzbereich, Messgenauigkeit, Schnittstellen und Anschlussarten, Temperaturbereich, Schockbeständigkeit, Auflösung, Schutzarten, Größe, Gewicht, Material, Energieverbrauch für die Übersicht extrahiert.

Es zeigt sich, dass viele Sensoren mittlerweile mit eigenen Steuereinheiten (CU) ausgestattet sind und so ein Trend hin zu intelligenten Messsystemen im Gegensatz zu einfachen, analogen Sensoren besteht. Der ODX ISO 22901-1-Standard zeigt, wie zwischen diesen CUs standardisiert kommuniziert werden kann. Daher wurde ODX dem Projektverlauf zugrunde gelegt, um eine einheitliche Beschreibung der Daten und Informationen von Anbaugeräten und Sensoren zu ermöglichen.

Die Generalisierung der Sensorinformationen für eine geräteunabhängige Datenerfassung und -übertragung, die Analyse bestehender Protokollarten sowie die Entwicklung einer Plug-and-Play-Lösung für die Umsetzung der Kommunikationsfunktionalität zeigt Bild 20.



wiederholt Bild 20: Auswertung von Sensoren und Kommunikationsprotokollen zur Plug-and-Play Anbindung verschiedener Anbaugeräte und Sensoren an die mobile Maschine

Zu 1: Die Bewertung der Einsatzfähigkeit der einzelnen Sensoren an Anbaugeräten erfolgte anhand einer Ampel-basierten Farbcodebewertung.

Zu 2: ODX-Standardisierung der Sensordaten, um Sensorinformationen so aufzubereiten, dass sie quelloffen erfasst und zwischen Anbaugerät und Trägermaschine übertragen werden können. Um diesen manuellen Aufwand bei der Sensoranbindung zu reduzieren, wurde das Sensordatenblatt in eine formale, maschinenlesbare Beschreibung überführt. Hierfür wurde das *Open Diagnostic Data eXchange* (ODX)-Format der ISO 22901-1 [77] verwendet, welches auf xml basiert und als formale Beschreibungssprache für einen standardisierten Datenaustausch von Diagnosedaten entwickelt wurde. ODX ist im Automotive-Bereich sowie bei Steuerungstechnikherstellern etabliert, zertifiziert und standardisiert. Ein per Plug-and-Play angeschlossener Sensor kann so ohne zusätzliche manuelle Konfiguration genutzt werden, da die Steuerung alle für die Sensorschnittstelle notwendigen Informationen zur Datenverarbeitung direkt aus der ODX-Datenbeschreibungsdatei extrahieren kann. Steuereinheiten können aus dem ODX-Format zudem variantenspezifische Konfigurationen von Anbaugeräten auslesen, was eine einfache Anpassung an verschiedene Anbaugeräte oder deren Softwarevarianten ermöglicht.

Zu 3: Für die Datenübermittlung zwischen Anbaugerät, Trägermaschine und Backoffice (Cloud) wurden verschiedene Kommunikationsprotokolle und -standards auf ihre Eignung untersucht. Die Kommunikationsarten wurden hinsichtlich funktionaler und nicht-funktionaler Anforderungen wie Übertragungsmethode, Robustheit (Schutz vor Datenverlust), kommunizierbare Datenmenge und -typ, Kompatibilität mit bestehender Infrastruktur (z.B. SPS-Kompatibilität) und Echtzeitverhalten evaluiert.

OPC UA ist in der Automatisierungstechnik bereits etabliert und wird dort erfolgreich in Plug-and-Play-Anwendungen eingesetzt. Durch seine einheitliche, plattformübergreifende Kommunikationsarchitektur ermöglicht OPC UA eine nahtlose Verbindung vom Sensor oder Anbaugerät bis hin zur Cloud (Backoffice), was eine effiziente und flexible Datenübertragung gewährleistet und kann deshalb für die Anbaugerätenutzung sehr empfohlen werden.

Zu 4: Plug-and-Play von Kommunikationsfunktionalität. Wenn Anbaugeräte gewechselt werden, müssen die mobilen Maschinen entsprechend neu konfiguriert und softwaretechnisch angepasst werden. Um den Konfigurationsaufwand gering zu halten, kommen aktuell Steuerungsplattformen auf den Markt, die eine einfache Konfiguration per Drag-and-Drop ermöglichen (vgl. z.B. Node-Red von IBM, openSyde von STW).

Als Lösung wurde ein Konzept basierend auf Docker entwickelt. Docker ist eine frei verfügbare Software, die es ermöglicht, lauffähige Anwendungen in Form von Containern zu kapseln und so die Anwendungen leicht transportieren und austauschen zu können. Es wurden beispielhaft die Kommunikationsprotokolle MQTT, OPC UA und Zenoh in Docker gekapselt

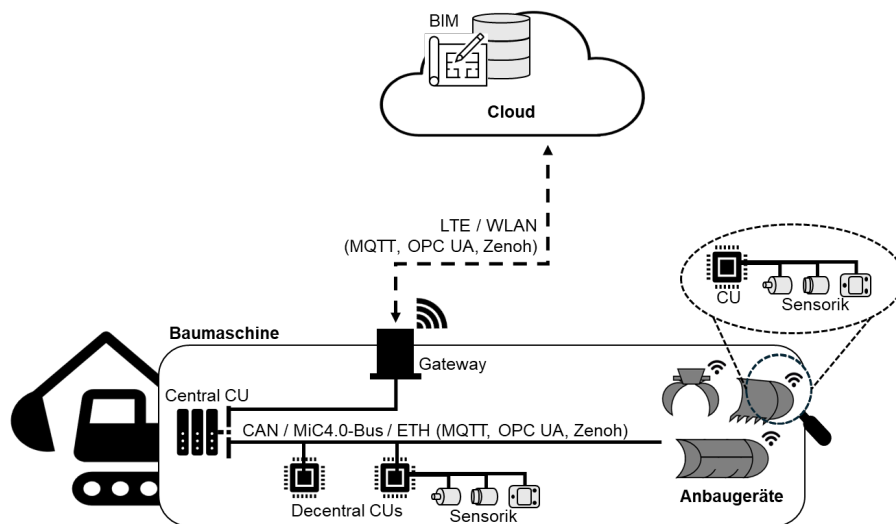
Die Container umfassen jeweils die Implementierung für Publisher/Subscriber bzw. Server/Client, wobei die Rolle je nach Konfiguration ausgewählt wird. Die Plug-and-Play-Kommunikation wurde prototypisch mithilfe von Raspberry-Pis getestet.

Tests zum flexiblen Austausch der Kommunikationsprotokolle mithilfe von Docker liefen erfolgreich und bestätigten das Potenzial der Docker-Kapselung. Die Ergebnisse legen nahe, dass Container mit Kommunikationsprotokollen in eine Steuerungsplattform (z.B. COMM-Bereich in openSyde) per Drag-and-Drop eingefügt und je nach Bedarf auf CPU oder GPU verteilt werden können. So kann das Kommunikationsprotokoll mithilfe von Docker flexibel je nach angeschlossenen Anbaugerät oder mobiler Maschine oder abhängig von den aktuellen Anforderungen (Datenmenge, Ressourcenauslastung) ausgetauscht werden, ohne die Plattform neu zu implementieren.

Diese vier Analyseschritte (vgl. Bild 20) bilden die Grundlage für die anschließende Konzeption der Hardware- und Software-Systemarchitektur.

Bild 27 zeigt die gewählte Systemarchitektur, die die Verbindung von Sensoren und Anbaugeräten innerhalb der mobilen Baumaschine sowie die Anbindung der Baumaschine an die Cloud über verschiedene Kommunikationswege im Projekt darstellt. Dies ermöglicht den bidirektionalen Austausch von Daten sowohl innerhalb der Maschine, vom Anbaugerät zur Maschine sowie zwischen der Maschine und der Cloud. Die mobile Baumaschine weist eine zentrale Steuereinheit (CU) sowie ggfs. mehrere dezentrale Steuereinheiten auf. An die Steuereinheiten können verschiedene Sensorik und Aktorik angeschlossen sein. Beim Ankoppeln eines Anbaugeräts können weitere Steuereinheiten oder Sensoren mit der zentralen Steuereinheit gekoppelt werden. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten erfolgt klassischerweise über CAN-Bus, basierend auf obigen Projektergebnissen kann die

Kommunikation auch mit MiC4.0-BUS oder Ethernet (ETH), z.B. mit den via Docker gekapselten Kommunikationsprotokollen MQTT, OPC UA oder Zenoh erfolgen. Für die Kommunikation der Baumaschine mit der Cloud (BIM) ist ein IIoT-Gateway erforderlich, dass mit der Cloud bidirektional via LTE oder WLAN kommuniziert. Die Kommunikation des Anbaugeräts mit der Cloud kann je nach Telematik-Ausstattung entweder direkt oder über die Trägermaschine erfolgen. Das HMI in der Fahrerkabine muss sowohl mit der zentralen CU als auch mit der Cloud (je nach Datenlast direkt oder über Gateway der Trägermaschine) kommunizieren, um dem Operator sowohl aktuelle Maschinendaten sowie fortgeschrittenere Daten aus der Cloud anzeigen zu können.



wiederholt Bild 27: Konzeption der Hardware- und Software-Systemarchitektur

Die konzipierte Hardware- und Software-Systemarchitektur sieht Schnittstellen zum HMI sowie zum BIM vor.

Der Datentransfer vom Anbaugerät in die Cloud (für spätere Integration ins BIM) entweder direkt oder über die Trägermaschine erfolgen. Um die Performance dieser beiden Datenübermittlungspfade zu bewerten, wurde ein Prüfstand für Laufzeitmessungen aufgebaut. Der Prüfstand (vgl. Bild 28) besteht aus drei CUs, stellvertretend für die zentrale CU der Trägermaschine, die CU des Anbaugeräts, sowie für das Backoffice (Cloud).

Für die experimentellen Laufzeitmessungen wurde am Lehrstuhl AIS exemplarisch ein Prüfstand mit abstrahierter Hardware realisiert: Für das Anbaugerät eine Beckhoff CX2040 SPS, für die Trägermaschine im Vergleich einmal ein Industrie-PC (IPC) mit Intel Atom Prozessor und ein leistungsstärkerer PC mit i7-4850HQ-Prozessor, und für das Backoffice ein IPC. Für die Laufzeitmessungen wurden die Übertragungszeit und der Datenverlust der Kommunikation unter Berücksichtigung verschiedener PLC-Zykluszeiten und Datengrößen bewertet.

Die Prüfstandkomponenten kommunizieren über OPC UA nach dem Client-Server-Schema (CS), das eine (feste) Point-to-Point-Kommunikation zwischen einem Client und einem Server darstellt. Insofern mehrere Komponenten einer Maschine untereinander sowie gleichzeitig in die Cloud an eine oder mehrere Backoffices oder andere Maschinen (Machine-to-Machine (M2M)-Kommunikation) kommunizieren sollen, bietet sich OPC UA nach dem Publish-Subscribe-Schema (PubSub) an. Im PubSub-Schema sind Publisher und Subscriber nicht mehr direkt miteinander verbunden, sondern mit einem sogenannten Broker. Die Publisher stellen ihre Daten

dem Broker zur Verfügung, der dann die für die Subscriber relevanten Daten an die jeweiligen Subscriber weiterleitet

Es wurden drei Positionierungsansätze hergeleitet: Eine lokale Positionierung des Brokers direkt auf der Maschine eignet sich insbesondere, wenn die Kommunikation überwiegend maschinenintern (lokal L) erfolgt und nur wenige externe (remote R) Publisher (P) oder Subscriber (S) auf die Daten zugreifen.

Basierend auf dem Ansatz „verteilter Broker“ wurde im Forschungsprojekt eine Systemarchitektur zur Kommunikation der Maschinen intern, untereinander sowie in die Cloud entworfen. Die CUs jeder Maschine stellen ihre Sensordaten als Publisher dem lokalen Gateway zur Verfügung, das hier als Broker fungiert. Lokale Subscriber, z.B. die zentrale CU der Maschine, können die gewünschten Daten direkt vom lokalen Gateway abfragen.

Um den Baufortschritt in der Cloud (BIM bzw. BIMsite) kontinuierlich zu aktualisieren, wurde die Kommunikation von Sensor/ Anbauwerkzeug über Trägermaschine bis in die Cloud als Prüfstand konzipiert. Der automatisierte Abgleich der Daten in der Cloud (BIM bzw. BIMsite) mit den neu empfangenen Sensordaten (z.B. von Anbauwerkzeug) erfolgte mithilfe der Sensoreigenschaften sowie der Algorithmen aus AP4.

Es zeigt sich, dass die zugrunde gelegten Standardlösungen mit ODC und OPC UA den Anbaugerätebetrieb für KMU Baufirmen im Betrieb und KMU Hersteller in der Entwicklung deutlich vereinfachen und erweitern.

CANbus mit Modulen systematisch strukturiert und konfektioniert, wie im Projekt gezeigt, erhöht die Entwicklungsgeschwindigkeit bei neuen Projektideen. Der Vernetzungsansatz über den ODX Standard der Automotive sieht sehr erfolgversprechend bei mobilen Arbeitsmaschinen und Anbaugeräten aus und wird für die weitere Untersuchung für ein ToolFlott Nachfolgeprojekt empfohlen.

11 Ressourcenverwendung und Ergebnistransfer

11.1 Verwendung der zugewendeten Mittel

11.1.1 Wissenschaftlich-technisches Personal und studentische Hilfskräfte (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

Für die geplante Projektlaufzeit von 24 Monaten waren den Lehrstühlen fml (Projektleitung) und

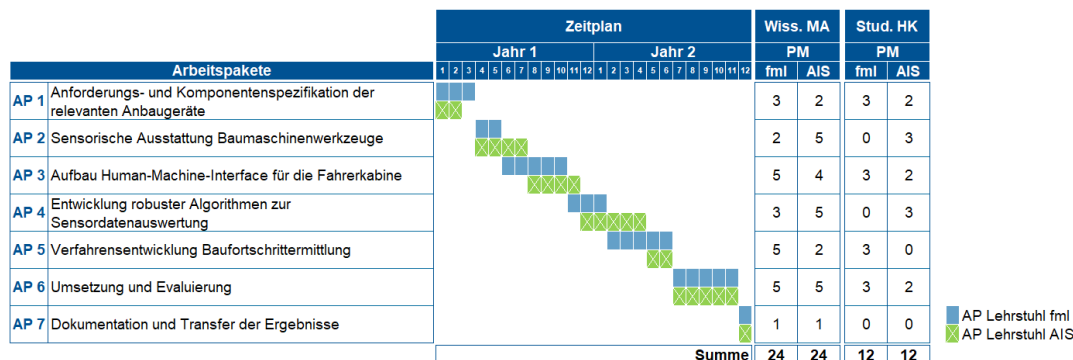


Tabelle 6 : Bewilligter Arbeitsplan für das Forschungsvorhaben ToolFlott (Quelle: Auszug aus der Antragstellung)

AIS ein Personalaufwand von jeweils insgesamt 24 Personenmonaten (PM) für einen wissenschaftlichen Mitarbeitenden (wiss. MA) bewilligt, unterstützt durch insgesamt 24 PM für studentische Hilfskräfte (stud. HK) aus den Fachbereichen Bauleistungs- und Automatisierungstechnik – siehe Tabelle 6.

Am Lehrstuhl fml wurden wissenschaftliche Mitarbeitende im Umfang von 24 Personenmonaten (PM) (40h/Wochen) und studentische Hilfskräfte im Umfang von 12 PM (bei 3.076,00 €/PM, 40h/Wochen) eingesetzt. Damit konnte der ursprünglich geplante Projektumfang erfüllt werden.

Am Lehrstuhl AIS wurden wissenschaftliche Mitarbeitende im Umfang von 20 PM (40h/Wochen) und studentische Hilfskräfte im Umfang von 7 PM (bei 3.076,00 €/PM, 40h/Wochen) eingesetzt. Aufgrund von Personalmangel im Laufe des Projekts und der abgelehnten kostenneutralen Verlängerung konnten insbesondere die Arbeitspakete 5 und 6 nicht im vollen Umfang bearbeitet werden, so konnte z.B. die Evaluation nur eines Steuerungssystems für den Datentransfer umgesetzt werden. Daher sind die ursprünglich beantragten und genehmigten 24 PM wissenschaftliche Mitarbeitende sowie 12 PM stud. Hilfskräfte nicht vollständig verausgabt worden.

11.1.2 Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

Es wurden keine Finanzmittel für Gerätebeschaffungen beantragt und folglich auch nicht beschafft.

11.1.3 Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

Es wurden keine Leistungen für die Arbeit Dritter beantragt und folglich auch nicht beschafft.

11.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Ziel des Forschungsprojekts ToolFlott ist die Informationsgewinnung aus den Anbaugeräten direkt zur Verarbeitung in BIM und Clouddiensten sowie die Verbesserung von HMI im gleichen Zusammenhang. Dieses ambitionierte hochwertige Ziel erfordert methodisch geschulte wissenschaftliche Mitarbeiter mit universitärem Hochschulabschluss in den Fachgebieten Maschinenbau und Informationstechnik. Entsprechend setzten die beteiligten Forschungsstellen vorgebildete Wissenschaftler mit einschlägiger Erfahrung ein. Für Zuarbeiten bei Recherchen, stereotypen Untersuchungen, CAD Modellierungen und Tool Programmierungen kamen studentische Mitarbeiter aus der zweiten Hälfte des Studiums zum Einsatz.

11.3 Weiterer Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Während der Projektlaufzeit wurden verschiedene Maßnahmen zum Transfer der Zwischen- und Endergebnisse in die Wirtschaft durchgeführt. Sie sind in Tabelle 7 aufgelistet.

Tabelle7: Durchgeführte Maßnahmen zum Transfer der Projektergebnisse in die Wirtschaft während der Projektlaufzeit

Ziel	Rahmen	Zeitraum
Maßnahme A: Projektbegleitender Ausschuss (PA)		
Durch den Projektbegleitenden Ausschuss (PA) soll der Praxisbezug sichergestellt werden. Einerseits sollen Anforderungen und Erfahrungen von Anwendern und Bauexperten berücksichtigt werden. Andererseits sollen den Unternehmen laufend Ergebnisse bereitgestellt werden, sodass die Übertragbarkeit und Verbreitung frühzeitig sichergestellt werden. Die Zusammensetzung des PA aus verschiedenen Sparten deckt den Projektbedarf ab.	A1 Vorstellung des Projekts, Erfassung spezifischer Anforderungen, Schärfung gemeinsames Zielbild.	IV. Quartal 2022 <i>Erfolgt</i>
	A2 Vorstellung der Sensoreinheit und des HMI-Konzepts. Vorstellung von HMI Techniken sowie Informationsbedarf an die Algorithmmik.	III. Quartal 2023 <i>Erfolgt</i>
	A3 Abschlussveranstaltung mit Vorstellung und Diskussion der Projektergebnisse.	IV. Quartal 2024 <i>Erfolgt</i>
PAs im Rahmen der MiC4.0-BUS Entwicklungen – online WebKos	Beiträge der UserGroup, Abstimmung mit OEMGroup, AttachmentGroup, CANbusGroup und QuickcopplerGroup	III. Quartal 2022 bis II. Quartal 2024 <i>Erfolgt</i>
Maßnahme B: Präsentationen auf Kongressen und Konferenzen		
Präsentation von (Teil-) Ergebnissen des Projektes auf Fachtagungen von Industrie und Wissenschaft	B1 Präsentation auf der Messe „bauma 2022“	10/2022 <i>Erfolgt</i>
	B2 Präsentation auf der CLEaR-Konferenz 2023	III. Quartal 2023 <i>Erfolgt</i>
	B3 Vortrag auf Konferenzen und Messen, wie dem VDBUM Großseminar oder dem Smart Construction Equipment Forum	I. Quartal 2023 IV. Quartal 2023 <i>Erfolgt</i>
	B4 Vorstellung und Diskussion der Projektergebnisse bei den Verbänden	Ab III. Quartal 2022 <i>Erfolgt</i>
	B5 Vorstellung/Seminar auf dem ASE-Kongress.	III. Quartal 2024
Maßnahme C: Internetdarstellung		
Elektronische Verbreitung der Forschungsinhalte und -ergebnisse zur Gewinnung weiterer interessierter Unternehmen	C1 Vorstellung des Projektes über das Netzwerk der branchenrelevanten Verbände (BVL, HDB, MiC 4.0, VDBUM, ...)	Ab IV. Quartal 2022 <i>Erfolgt</i>
	C2 Internetauftritt des Forschungsvorhabens über die Seiten der Lehrstühle fml & AIS	IV. Quartal 2022 fortlaufend

	C3 BVL Logistik Plattform (Projektblatt und Forschungsbericht)	IV. Quartal 2022 fortlaufend
Maßnahme D: Veröffentlichungen		
Print- und DV-Veröffentlichungen der Forschungsinhalte und -ergebnisse zur Gewinnung weiterer interessierter Unternehmen	D1 Publikationen in einschlägigen Fachzeitschriften wie Allgemeine Bauzeitung, VDBUMinfo, Tiefbau heute, ...	Ab IV. Quartal 2022 <i>vorbereitet</i>
	D2 Veröffentlichungen in Journals und Konferenzen (z. B. Journal Automation in Construction, ISARC, CLEaR-Konferenz)	III. Quartal 2023 <i>Erfolgt</i>
Maßnahme E: Übernahme in die Lehre		
Einbringung der erarbeiteten Ergebnisse in den Lehrbetrieb	E1 Mitarbeit studentischer Hilfskräfte	Gesamte Projektlaufzeit <i>Erfolgt</i>
	E2 Thema von studentischen Qualifikationsarbeiten	Gesamte Projektlaufzeit <i>Erfolgt (vgl. Kapitel 11.5)</i>
	E3 Einbindung der Forschungsinhalte in Lehrveranstaltungen zur Weiterbildung zukünftiger Ingenieur:innen	Gesamte Projektlaufzeit <i>Erfolgt</i> <i>AIS: Einbringung der Erkenntnisse in die Module „Automatisierungstechnik“ (Bachelor) und „Engineering Methods and Data Management for Mobile and Stationary Mechatronics Systems“ (Master)</i>

Die Verbreitung der Forschungsergebnisse wird auch nach Projektende fortgeführt. Die dafür geplanten Maßnahmen sind in Tabelle 8 aufgelistet.

Tabelle 8 : Geplante Maßnahmen zum Transfer der Forschungsergebnisse in die Wirtschaft nach Ende der Projektlaufzeit.

Ziel	Rahmen	Zeitraum
Maßnahme D: Veröffentlichungen		
Print- und DV-Veröffentlichungen der Forschungsinhalte und -ergebnisse zur Information interessierter Unternehmen	D1 Publikationen in einschlägigen Fachzeitschriften wie Allgemeine Bauzeitung, VDBUMinfo,	I. Quartal 2025
	D2 Veröffentlichungen in Journals und Konferenzen (z. B. Journal Automation in Construction, ISARC, CLEaR-Konferenz)	I. Quartal 2025

	D3 Veröffentlichung des Abschlussberichtes auf der BVL Logistik Plattform	IV. Quartal 2024
Maßnahme E: Übernahme in die Lehre		
Einbringung der erarbeiteten Ergebnisse in den Lehrbetrieb	E3 Einbindung der Forschungsinhalte in Lehrveranstaltungen zur Weiterbildung zukünftiger Ingenieur:innen	Gesamte Projektlaufzeit <i>Erfolgt (vgl. Tabelle 7 oben)</i>
Maßnahme F: Beratung, Weiterbildung		
Ergebnistransfer an KMU ohne eigene Forschungsaktivitäten	F1 Beratung von Unternehmen zu konkreten Problemstellungen	ab IV. Quartal 2024
Maßnahme G: Dissertation		
An beiden Lehrstühlen besteht die Möglichkeit einer Promotion zu diesem Projekt	G1 Nach Abschluss wird das Thema in Form einer Dissertation weiterverfolgt.	Ab 07-2024/2025/2026
Maßnahme H: Forschungsbericht		
Ergebnistransfer in die Wirtschaft	H1 Der Abschlussbericht wird digital auf den Webseiten des Lehrstuhls fml und AIS sowie in gedruckter Form veröffentlicht.	ab I. Quartal 2025
	H2 Ergebnisbericht in Seminaren der Verbände; BVL, VDMA, VDBUM, HDB, ...	ab IV. Quartal 2024
Maßnahme I: Konzepttransfer		
Möglichkeit der Nutzung der Ergebnisse	I1 Das entwickelte Konzept inkl. Demonstrator ist allen Interessierten diskriminierungsfrei zur Begutachtung verfügbar	ab IV. Quartal 2024
Maßnahme J: Normungsinitiative		
Initiative zur ISO 15143 Entwurf ISO Datenstandard Anbaugerät Kooperation mit der Working Group	J1 Vorstellung eines Datenstandards für Anbaugeräte beim AEMP	II. Quartal 2025
Wird über Kooperation mit MiC4.0 VDMA weiterverfolgt	J2 Vorstellung eines Datenstandards für Anbaugeräte in Tokio bei der WorkingGroup ISO 15143	III. Quartal 2024 <i>erfolgt</i>

11.4 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden mehrere Schrifterzeugnisse veröffentlicht. Diese sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle9: Liste der Veröffentlichungen des Forschungsprojekts.

Medium / Veranstaltung	Titel	Typ
51. VDBUM Großseminar 2023	Daten Standardisierung bei den Baumaschinen als Voraussetzung für die weitere Digitalisierung der Bauprozesse.	Konferenzpaper Seminarband Artikel
CLEaR 2023 – Construction Logistics, Equipment, and Robotics, Springer-Verlag	Investigation of Data Transmission between Construction Machines and Attachment Tools via OPC UA Technology	Konferenzpaper
21st IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS 2025)	Minimizing Cloud Data Traffic in IoT for Mobile Machines through smart broker positioning	Konferenzpaper (geplant)
21st IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS 2025)	Decentralized anomaly detection of sensors on embedded controllers to support predictive maintenance in mobile machines	Konferenzpaper (geplant)
Fachzeitschrift des Verbandes der Baubranche Umwelt- und Maschinentechnik e.V.	Entwicklung des MiC4.0-BUS - Bedeutung für den Betrieb von Anbaugeräten bei Erdbaumaschinen	VDBUMinfo Fachzeitschrift (geplant)
Handbuch	Management und Betrieb von Anbaugeräten bei Erdbaumaschinen Untertitel: ToolFlott Projekttitle	Paperback Taschenbuch ISBN (geplant)

11.5 Studienarbeiten

Im Forschungsprojekt wurden 7 Studienarbeiten durchgeführt. Sie sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Tabelle10: Liste der im Forschungsprojekt durchgeführten Studienarbeiten.

Person(en)	Typ	Titel	Zeitraum
A. Solikhov (betreut am AIS)	Semesterarbeit	Design and Evaluation of a data exchange architecture for on-demand provision of sensor data for pluggable Programmable Logic Controllers (PLCs) in mobile machines	11-2023 bis 04-2024
Z. Jin (betreut am AIS)	Bachelorarbeit	Design, Implementation and Evaluation of a CAN-BUS-Plugin for OPC UA for Retrofitting Mobile Construction Machines	03-2024 bis 09-2024

A. Steger (betreut am AIS)	Bachelorarbeit	Konzeption einer Systemarchitektur für kontinuierlichen Datenfluss vom Sensor in die Cloud via OPC UA unter Berücksichtigung von Netzwerklatenzen	03-2024 bis 09-2024
Wild Lukas (betreut am fml)	Masterarbeit	Klassifizierung und Komplexitätsbewertung der Anbaugeräte von Baumaschinen	02-2022 bis 08-2022
Sieffert David (betreut am fml)	IDP Interdisziplinäre Projektarbeit der Informatik	Entwicklung eines hochpräzisen Lokalisierungssystems unter Verwendung des OPC UA Standards	03-2022 bis 03-2023
Theobald Marc (betreut am fml)	Masterarbeit	Aktivitätserkennung für Anbaugeräte von Baumaschinen durch KI Entscheidungsbäume	07-2022 bis 12-2022
Yang Liudongnan (betreut am fml)	IDP Interdisziplinäre Projektarbeit der Informatik	Bau4.0-BIM-Baustellengeodatenabfrage und -visualisierung	04-2023 bis 10-2023

12 Literaturverzeichnis

[1] W. Günthner und A. Bormann, Digitale Baustelle innovativer Planen, effizienter Ausführen: Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10448091>

[2] T. Horenburg, Simulationsgestützte Ablaufplanung unter Berücksichtigung aktueller Baufortschrittsinformationen. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2014. München: fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik TUM, 2014.

[3] H. Leisering, „Erdbaumaschinen auf der bauma 2010 - Messe-Check: Was der Fachbesucher wissen sollte!“, BauPortal, Nr. 4, S. 203–209, 2010.

[4] H.-H. Cohrs, „Schnellwechsler für Hydraulikbagger“, Baumaschinendienst, Jg. 34, Nr. 9, S. 12–22, 1998.

[5] BG Bau, „Untersuchte Unfälle Erdbau - 2009-2012“, 2014.

[6] Arbeitsschutz-Portal.de, Anbaugeräte: Gefahr durch Schnellwechsel-Einrichtungen: BG BAU meldet 45 schwere Arbeitsunfälle in 6 Jahren. [Online]. Verfügbar unter: https://www.arbeitsschutz-portal.de/beitrag/asp_news/6596/anbaugeraete-gefahr-durch-schnellwechsel-einrichtungen.html

[7] Liebherr, Schnellwechselsysteme-Produktivität mit Sicherheit. [Online]. Verfügbar unter: https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/anbauwerkzeug/schnellwechsler/likufix/details/385406.html#!/content=table_module_downloads_1

- [8] J. Wang et al., „Integrating BIM and LiDAR for Real-Time Construction Quality Control“, J Intell Robot Syst, Jg. 79, 3-4, S. 417–432, 2015, doi: 10.1007/s10846-014-0116-8.
- [9] Riccardo Viaggi, „CECE ANNUAL ECONOMIC REPORT No.6“, Committee for Europe-an construction Equipment, 2020.
- [10] A. Breilkopf, „Baumaschinenindustrie in Deutschland“, statista, 2020.
- [11] Erik Sjödin, Anna Granskog und Benny Guttman, „Reengineering construction equipment: from operations focused to customer centric“, McKinsey & Company, 2016.
- [12] Sonja Weiße, Branchentreff zur digitalen Standardisierung für Baumaschinen und Baugeräte: VDBUM soll neutrale Schnittstelle vorantreiben. [Online]. Verfügbar unter: <https://allgemeinebauzeitung.de/abz/branchentreff-zur-digitalen-standardisierung-fuer-baumaschinen-und-baugeraete-vdbum-soll-neutrale-schnittstelle-vorantreiben-36115.html>
- [13] H. Bramann und I. May, „Stufenplan Digitales Planen und Bauen: Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken“, Dez. 2015. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile
- [14] W. Apt et al., „Forschungsbericht 522/6: QuaTQQ - Qualität der Arbeit, Beschäftigung und Beschäftigungsfähigkeit im Wechselspiel von Technologie, Organisation und Qualifikation“. Branchenbericht: Baugewerbe, Okt. 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/PDF-Publikationen/Forschungsberichte/fb522-6-quatoq.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- [15] M. Bügler, A. Bormann, G. Ogunmakin, P. A. Vela und J. Teizer, „Fusion of Photogrammetry and Video Analysis for Productivity Assessment of Earthwork Processes“, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Jg. 32, Nr. 2, S. 107–123, 2017, doi: 10.1111/mice.12235.
- [16] K. M. Rashid und J. Louis, „Automated Activity Identification for Construction Equipment Using Motion Data From Articulated Members“, Frontiers in Built Environment, Jg. 5, S. 4014042., 2020.
- [17] C.-F. Cheng, A. Rashidi, M. A. Davenport und D. V. Anderson, „Evaluation of Software and Hardware Settings for Audio-Based Analysis of Construction Operations“, Int J Civ Eng, Jg. 17, Nr. 9, S. 1469–1480, 2019, doi: 10.1007/s40999-019-00409-2.
- [18] A. Fischer, A. Bedrikow Beiderwellen, S. Kessler und J. Fottner, „Equipment data-based activity recognition of construction machinery“, IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), 2021.
- [19] M. May und B. Haines, „Fallbeispiel Xavier University“ in CAFM-Handbuch, M. May, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S. 661–665, doi: 10.1007/978-3-658-21357-232.
- [20] Manuela Chriiti, „Aufnahme des zeitlichen Arbeitsaufwandes und Ermittlung von Stunden-aufwandswerten des technischen Führungspersonals bei Bauvorhaben im Bereich Tiefbau/Infrastrukturbau“. Diplomarbeit, 2015.

- [21] Y. Zhai et al., „An Internet of Things-enabled BIM platform for modular integrated construction: A case study in Hong Kong“, *Advanced Engineering Informatics*, Jg. 42, S. 100997, 2019, doi: 10.1016/j.aei.2019.100997.
- [22] A. Fischer, Z. Li, S. Kessler und J. Fottner, „Importance of secondary processes in heavy equipment resource scheduling using hybrid simulation“ in *38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Dubai, UAE, 2021, doi: 10.22260/ISARC2021/0044.
- [23] A. Kelm, L. Laußat, A. Meins-Becker und M. Helmus, RFID-Bauleistungsstand: Forschungsbericht zum Projekt "RFID-unterstütztes Steuerungs- und Dokumentationssystem für die erweiterte Bauleistung am Beispiel Bauleistungsstand für die Baustelle", 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-8163-2>
- [24] Anne Fischer, Zhuoran Li, Florian Wenzler, Stephan Kessler, Johannes Fottner, „Cyclic Up-date of Project Scheduling by Using Telematics Data“ in *17th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, 2021.
- [25] G. Schreyögg und J. Koch, *Management*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.
- [26] S. Alizadeh Salehi und İ. Yitmen, „Modeling and analysis of the impact of BIM-based field data capturing technologies on automated construction progress monitoring“, *Int J Civ Eng*, Jg. 16, Nr. 12, S. 1669–1685, 2018, doi: 10.1007/s40999-018-0320-1.
- [27] McKinsey Global Institute, „Reinventing Construction: A route to higher productivity“, McKinsey & Company, Feb. 2017.
- [28] S. Kessler, „Bauen 4.0 - die Weiterführung der Digitalisierung der Bauprozesse und des Baustellenbetriebes“ in *49. VDBUM Seminarband*, 2020.
- [29] W. Eversheim et al., „Tool Management: The Present and the Future“, *CIRP Annals*, Jg. 40, Nr. 2, S. 631–639, 1991, doi: 10.1016/S0007-8506(07)61139-1.
- [30] M. Röschinger, *Digitalisierung des Werkzeugmanagements auf Basis einer unternehmensübergreifend durchgängigen Informationslogistik*. München: fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, 2019.
- [31] W. A. Günthner und B. Vogel-Heuser, „BauFlott – Entwicklung eines Flottenmanagementsystems für Baumaschinen: Forschungsbericht zum IGF-Vorhaben“, 2016.
- [32] Vemcon GmbH, *Vemcon Toolmanagement: Zu jeder Zeit das perfekte Werkzeug eingesetzt*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.vemcon.de/wp-content/uploads/2018/10/2018_08_Vemcon_ToolManagement_web.pdf
- [33] D. Soßdorf, *MiC 4.0 Basics und Arbeitskreise*. *MiC 4.0 - Machines in Construction 4.0 (Arbeitsgemeinschaft)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://mic40.vdma.org/viewer/-/v2article/render/45913344>
- [34] G. Kunze, H. Göhring und K. Jacob, *Baumaschinen: Erdbau- und Tagebaumaschinen*. Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag, 2002.
- [35] *Earth-moving machinery — Dozers — Terminology and commercial specifications*, ISO 6747, 2013.

- [36] T. Baumgärtel et al., „Die Umsetzung der Digitalen Baustelle“ in Digitale Baustelle innovativer Planen, effizienter Ausführen, W. Günthner und A. Borrmann, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 291–340, doi: 10.1007/978-3-642-16486-6_6.
- [37] M. Breitfuß, M. Schöberl und J. Fottner, „Safety through Perception: Multi-modal Traversability Analysis in rough outdoor environments“, IFAC-PapersOnLine, Jg. 54, Nr. 1, S. 223–228, 2021, doi: 10.1016/j.ifacol.2021.08.026.
- [38] bauma, Internationaler bauma Innovationspreis: Die Gewinner 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bauma.de/de/messe/rahmenprogramm/innovationspreis/>
- [39] R. Sacks, I. Brilakis, E. Pikas, H. S. Xie und M. Girolami, „Construction with digital twin information systems“, DCE, Jg. 1, 2020, doi: 10.1017/dce.2020.16.
- [40] M. Bügler, G. Ogunmakin, J. Teizer, P. A. Vela und A. Borrmann, „A comprehensive methodology for vision-based progress and activity estimation of excavation processes for productivity assessment“, EG-ICE 2014, European Group for Intelligent Computing in Engineering - 21st International Workshop: Intelligent Computing in Engineering 2014, 2014, doi: 10.13140/RG.2.1.4630.2561.
- [41] S. Rinneberg, S. Kessler und W. A. Günthner, „Attachment identification on excavators – recommendations and a guide on the use of RFID technology“, Building Construction Machinery, 2015.
- [42] S. Rinneberg, S. Kessler und W. A. Günthner, „Conceptual Approach and Evaluation of an Attachment Identification System for Excavators based on Passive RFID“ in IEEE International Conference on RFID, 2015.
- [43] Dagmar Rees, Digitalisierung in Mobilität und Verkehr, 2018.
- [44] Assistenzsysteme für Radlader: Produktinformation. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.liebherr.com/shared/media/baumaschinen/erdbewegung/brochuren/radlader/assistenzsysteme-f%C3%BCr-die-liebherr-radlader/liebherr-radlader-assistenzsysteme.pdf>
- [45] Kiesel GmbH, Leica Assistenzsysteme: 2D & 3D Maschinensteuerung. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kiesel.net/www.kiesel.net/de/Magazin/Technik/2019/Leica%20Assistenzsysteme>
- [46] MTS Maschinentechnik Schrode AG, MTS-SMART. Gerätemanagement mit Smartphone und QR-Codes: Ordnung auf der Baustelle. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mts-online.de/fileadmin/user_upload/bilder/downloads/flyer/Flyer_MTS-SMART-12Seiter_small.pdf
- [47] B. Vogel-Heuser, A. Fay, I. Schaefer und M. Tichy, „Evolution of software in automated production systems: Challenges and research directions“, Journal of Systems and Software, Jg. 110, S. 54–84, 2015, doi: 10.1016/j.jss.2015.08.026.
- [48] S. Azhar, „Role of Visualization Technologies in Safety Planning and Management at Construction Jobsites“, Procedia Engineering, Jg. 171, S. 215–226, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.329.
- [49] C. Richter, „BIMDrill - 3D-Positionsbestimmung und Prozessdokumentation im Spezialtiefbau“ in 49. VDBUM Seminar, 2020.

- [50] Organisation und Digitalisierung von Informationen zu Bauwerken und Ingenieurleistungen, einschließlich Bauwerksinformationsmodellierung (BIM) - Informationsmanagement mit BIM - Teil 2: Planungs-, Bau- und Inbetriebnahmephase, DIN EN ISO 19650-2, ISO Internationale Organisation für Normung, Berlin, Aug. 2019.
- [51] Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V., „BIM im Spezialtiefbau: Technisches Positionspapier der Bundesfachabteilung Spezialtiefbau im Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V.“, Dez. 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bauindustrie.de/documents/2382/BIM_POSPAPIER_5.6_CI60WEH.pdf. Zugriff am: 2. Januar 2020.
- [52] J. Trauer, S. Schweigert-Recksiek, C. Engel, K. Spreitzer und M. Zimmermann, „What is a Digital Twin? – Definitions and Insights from an Industrial Case Study in Technical Product Development“, Proc. Des. Soc.: Des. Conf., Jg. 1, S. 757–766, 2020, doi: 10.1017/dsd.2020.15.
- [53] G. Girmscheid, Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse, 3. Aufl. Berlin: Springer, 2005. [Online]. Verfügbar unter: <http://lib.myilibrary.com/detail.asp?id=62286>
- [54] T. Bauernhansl, M. ten Hompel und B. Vogel-Heuser, Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-04682-8>
- [55] W. A. Günthner et al., „ForBau - Virtuelle Baustelle - Digitale Werkzeuge für die Bauplanung und -abwicklung: Abschlussbericht 2010“, München, Erlangen-Nürnberg, Regensburg, 2010.
- [56] W. A. Günthner und A. Borrmann, „FAUST – Fertigungssynchrone Ablaufsimulation von Unikatbaustellen im Spezialtiefbau: Schlussbericht“, 2015.
- [57] S. Krepp, K. Jahr, S. Bigontina, M. Bügler und A. Borrmann, „BIMsite – Towards a BIM-based Generation and Evaluation of Realization Variants Comprising Construction Methods, Site Layouts and Schedules“, ResearchGate, 2016.
- [58] W. A. Günthner et al., „ForBau - Virtuelle Baustelle - Digitale Werkzeuge für die Bauplanung und -abwicklung: Abschlussbericht 2010“, München, Erlangen-Nürnberg, Regensburg, 2010.
- [59] ISO/TS 15143-3: Erdbaumaschinen und mobile Straßenbaumaschinen - Baustellen-Datenaustausch - Teil 3: Telematikdaten, ISO Internationale Organisation für Normung, 2020.
- [60] W. A. Günthner, S. Kessler, T. Frenz und J. Wimmer, „Transportlogistikplanung im Erdbau – Forschungsbericht des IGF-Vorhabens 15073N der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.“, 2009.
- [61] Fottner, J., Bengler K., F. Top und L. Prash, „Entwicklung eines intuitiven Steuerungskonzepts für Lasthebemaschinen“, Technische Universität München, München, 2020.
- [62] L. Feiner und J. Fottner, „Intuitive Control Concept for Lifting Operations Using the Example of Forklifts“ in Advances in Ergonomics in Design, 2020, S. 309–316, doi: 10.1007/978-3-030-51038-1_43,

- [63] B. Vogel-Heuser, E. Trunzer, D. Hujo und M. Sollfrank, „(Re-)Deployment of Smart Algorithms in Cyber-Physical Production Systems using DSL4hDNCS“, Proceedings of the IEEE, S. 12, tbd, tbd, doi: 10.1109/JPROC.2021.3050860.
- [64] B. Vogel-Heuser und E. Trunzer, AIValve: Selbstlernende und selbstoptimierende Steuerung von Ventilen und Ventilsystemen für hydraulische Maschinen und Aggregate. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mw.tum.de/ais/forschung/aktuelle-forschungsprojekte/aivalve/>.
- [65] E. Trunzer, P. Prata, S. Vieira und B. Vogel-Heuser, „Concept and Evaluation of a Technology-independent Data Collection Architecture for Industrial Automation“ in IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisbon, Portugal, 2019, S. 2830–2836, doi: 10.1109/IECON.2019.8927399.
- [66] E. Trunzer, T. Schilling, M. Müller und B. Vogel-Heuser, „Comparison of Communication Technologies for Industrial Middlewares and DDS-based Realization“ in 21st IFAC World Congress in Berlin, Germany, July 12-17, 2020, 2020.
- [67] F. Loch, S. Bock, M. Zou und B. Vogel-Heuser, „Adapting Virtual Training Systems for Industrial Procedures to the Needs of Older People“ in 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Helsinki, Finland, 22.07.2019 - 25.07.2019, S. 783–788, doi: 10.1109/INDIN41052.2019.8972247.
- [68] V. Villani et al., „The INCLUSIVE System: A General Framework for Adaptive Industrial Automation“, IEEE Trans. Automat. Sci. Eng., S. 1–14, 2020, doi: 10.1109/TASE.2020.3027876.
- [69] E. Bayrhammer et al., „Verteilte Digitale Zwillinge - der Stand der Technik, Anwendungsfälle und Zielstellung“ in VDI-Kongress AUTOMATION 2020, 2020.
- [70] J. Fischer, B. Vogel-Heuser, J. Wilch, F. Loch, K. Land und I. Schaefer, „Variability Visualization of IEC 61131-3 Legacy Software for Planned Reuse“ in IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2020), 2020.
- [71] J. Fischer, B. Vogel-Heuser, E. E. Estevez und M. Male, „VarApp: Variant Management App for IEC 61131-3 Compliant Legacy Software“ in 2020 IEEE Conference on Industrial Cyberphysical Systems (ICPS), Tampere, 6/10/2020 - 6/12/2020, S. 269–276, doi: 10.1109/ICPS48405.2020.9274774.
- [72] E.-M. Neumann, B. Vogel-Heuser, J. Fischer, F. Ocker, S. Diehm und M. Schwarz, „Formalization of Design Patterns and Their Automatic Identification in PLC Software for Architecture Assessment“ in 21st IFAC World Congress in Berlin, Germany, July 12-17, 2020, 2020.
- [73] Association for Standardization of Automation and Measuring Systems (ASAM) “ASAM MCD-2 D”, 2024. Link: <https://www.asam.net/standards/detail/mcd-2-d/> (abgerufen am 01.12.2024)
- [74] Burger, A.; Koziolk, H.; Rückert, J.; Platenius-Mohr, M.; Stomberg, G., "Bottleneck Identification and Performance Modeling of OPC UA Communication Models," Proceedings of the 2019 ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering, pp. 231–242, 2019. doi: 10.1145/3297663.3309670.

- [75] Cheng, C.F.; Rashidi, A.; Davenport, M.A.; Anderson, D.V.; Sabillon, C.A., "Acoustical Modeling of Construction Jobsites: Hardware and Software Requirements", *Computing in Civil Engineering*, 2017. doi:10.1061/9780784480847.044
- [76] Hujo, D.; Berscheit, A.; Krüger, M.; Vogel-Heuser, B., "Benchmark and design support for demand-oriented cloud-communication architectures of Cyber-physical Production Systems", *49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp. 1-8, 2023.
- [77] International Organization for Standardization, "Road vehicles – Open diagnostic data exchange (ODX) Part 1: Data model specification", ISO Standard No. 22901-1:2008, Ed. 1, 2008. Link: <https://www.iso.org/standard/41207.html> (abgerufen am 01.12.2024)
- [78] Kiesel GmbH, „2D & 3D Maschinensteuerung - Leica Assistenzsysteme“, 2019. <https://www.kiesel.net/www.kiesel.net/de/Magazin/Technik/2019/Leica%20Assistenzsysteme> (abgerufen am 01.12.2024)
- [79] Kim, I. -C.; Kim, Y. -J.; Chin, S.-Y., „Sound Localization Framework for Construction Site Monitoring“, *Applied Sciences*, 12(21), 2022. 10783. <https://doi.org/10.3390/app122110783>
- [80] Land, K.; Vogel-Heuser, B.; Krüger, M.; Chen, J.; Fottner, J., "Investigation of Data Transmission between Construction Machines and Attachment Tools via OPC UA Technology", *CLEaR 2023 – Construction Logistics, Equipment, and Robotics*, pp. 89-96, 2023.
- [81] Liu, Z.; Bellot, P., "OPC UA PubSub Implementation and Configuration," *2019 6th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)*, pp. 1063–1068, 2019. doi: 10.1109/ICSAI48974.2019.9010445
- [82] Machines in Construction (MiC) 4.0, "MiC 4.0 Ergebnispapier AK Systemarchitektur“, *VDMA*, 2022. Link: <https://www.vdmashop.de/neuheiten/mic-4.0-ergebnisse/729/mic-4.0-ergebnispapier-ak-systemarchitektur> (abgerufen am 01.12.2024)
- [83] OPC Foundation, "OPC 10000-14: UA Part 14: PubSub, 2023. Link: <https://opcfoundation.org/developer-tools/documents/view/171> (abgerufen am 01.12.2024)
- [84] Raddatz, H.; Mahmoud, E.; Holzke, F.; Danielis, P.; Timmermann, D.; Golatowski, F., "Evaluation and Extension of OPC UA Publish/Subscribe MQTT Binding," *2020 IEEE Conference on Industrial Cyberphysical Systems (ICPS)*, pp. 543–548, 2020. doi: 10.1109/ICPS48405.2020.9274696.
- [85] Sensor-Technik-Wiedemann GmbH (STW), „openSYDE“, 2024. Link: <https://www.stw-mobile-machines.com/produkte/software-solutions/system-development-toolchain/opensyde/> (abgerufen am 01.12.2024)
- [86] Vemcon GmbH, "Vemcon Toolmanagement: Zu jeder Zeit das perfekte Werkzeug eingesetzt" 2018. Link: https://www.vemcon.de/wp-content/uploads/2018/10/2018_08_Vemcon_ToolManagement_web.pdf (abgerufen am 01.12.2024)
- [87] BMWK-IGF-Projekt Nr.: 22234 N, Forschungsbericht RoboLingo, „Entwicklung und Evaluation eines Interaktionsbaukastens für Logistikroboter“, FV-BVL e.V., FoSt TUM Lehrstühle fml + lfe, 02/2022 – 04/2024
- [88] Bauen 4.0 – Forschungsbericht zum BMBF- KZ: 02P1D230-254 „Effizientere und produktivere Bauprozesse durch Vernetzung und Kommunikation mobiler Maschinen“, 07/2019-12/2022.

[89] MTS Navy und Pilot, „Werkzeugkasten für die digitale Bastelle“, MTS-Baugruben Assistent Link: <https://www.youtube.com/watch?v=GS2Rft7ki4g> , MTS-3D Baggersteuerung Link: <https://www.youtube.com/watch?v=c7ZoTW8kDFQ> ,2024

[90] BMWK-IGF-Projekt Nr.: 22517 N, SiteRoute „Datentreuhandmodell für die Optimierung des Informations- und Materialflusses der digitalen Baustelle“, FV-BVL e.V., FoSt. Lehrstuhl TUM fml, 10/2022 – 06/2025