

Methode zur Nutzbarmachung von Punktwolken

Digitale Fabrik für KMUs

F. Bermpohl, J. Böck, E. Kacar, H. Etschmann, T. Böck, A. Frank, B. Bräuchler, E. Reihlen, A. Munzke

ZUSAMMENFASSUNG Digitale Fabrikmodelle bringen zahlreiche Potenziale für das produzierende Gewerbe. Allerdings können KMUs nur eingeschränkt von diesen Potenzialen profitieren, da sie die erforderlichen manuellen Modellierungsaufwände nicht leisten können. Dieser Beitrag stellt eine Methode zur direkten Nutzbarmachung von Punktwolken vor, wodurch Punktwolkensegmente direkt attribuiert werden und die aufwändige Nachmodellierung entfällt. Die Methode wird bei drei KMUs beispielhaft angewendet und dabei zukünftige Forschungsbedarfe aufgezeigt.

STICHWÖRTER

Punktwolken, Building Information Modeling (BIM), Fabrikplanung

1 Motivation

Steigender globaler Wettbewerb und anspruchsvollere politische Rahmenbedingungen führen in stetig kürzeren Abständen zu dem Bedarf, neue Produkte oder Technologien in bestehende Fabriken zu integrieren [1]. Kurze Integrationszeiten sind dabei ein Wettbewerbsvorteil [2].

Der größte Aufwand in einem Fabrikumplanungsprojekt entsteht bei der Erstellung, Aufbereitung und Pflege der Planungsgrundlage [3]. Ziel vieler Fabrikbetreiber ist daher, eine kontinuierlich aktuelle, ganzheitliche, digitale Fabrikplanungsgrundlage zu schaffen. Diese soll dabei helfen, hohe Aufwände für immer wieder anstehende Fabrikplanungsprojekte zu reduzieren. 82 % der Fabrikbetreiber stufen laut einer Studie der Firma NavVis die Schaffung dieser Fabrikplanungsgrundlage als wichtig ein [4].

Die Umsetzung erfolgt nach aktuellem Stand der Technik mittels digitalen Fabrikmodellen. Deren Erstellung umfasst folgende Teilschritte (**Bild 1**):

1. Bestandsdigitalisierung der Fabrik durch Aufnahme einer Punktwolke mittels Laserscanner
2. Segmentierung der Punktwolke in einzelne Fabrikobjekte
3. Nachmodellierung der Fabrikobjekte (aufwendigster Teilschritt)
4. Integration der nachmodellierten Fabrikobjekte in ein Gesamtmodell
5. Attribuierung der nachmodellierten Fabrikobjekte im Gesamtmodell
6. Visualisierung des Gesamtmodells in einem Bestandsdatenviewer

Dabei lässt sich feststellen, dass die Bestandsdigitalisierung mittels mobilen Laserscannern in den vergangenen Jahren enorme Fort-

Digital factory for SMEs – Method for utilizing point clouds

ABSTRACT Digital factory models offer significant potential for manufacturing. However, SMEs often fail to benefit because the required manual remodeling effort is prohibitive. This paper presents a method for the immediate utilization of point clouds, where point cloud segments are attributed directly and the labor-intensive remodeling step is eliminated. The method is demonstrated on three SMEs and future research needs are highlighted.

schritte bei Kosten und Qualität erzielt hat. Gleichzeitig läuft der weitere Prozess von der Punktwolke bis zum attribuierten Gesamtmodell weitestgehend manuell ab und erfordert erfahrene Modellierende [5].

Insbesondere in großen Bereichen (zum Beispiel Fabriken) ist dieser manuelle Prozess zeitaufwendig und fehleranfällig. Kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) können diese Aufwände nur begrenzt leisten. Sie profitieren selten von digitalen Fabrikmodellen als Grundlage für kurze Integrationszeiten bei der Fabrikumplanung. In diesem Zusammenhang wird folgende These aufgestellt:

- Es existieren Nutzungsszenarien digitaler Fabrikmodelle, bei welchen auf die manuelle Nachmodellierung in CAD-Tools verzichtet werden kann. Stattdessen können die Punktwolken der Fabrikobjekte bereits direkt attribuiert werden, wodurch der aufwändigste Teilschritt 3 entfallen kann.

Ein Nutzungsszenario beschreibt in diesem Zusammenhang die Art und Weise, wie ein Nutzer eine konkrete Aufgabe mithilfe eines Systems erledigt. Die Umsetzung eines Nutzungsszenarios in die Realität erfolgt durch die Anwendung in einem tatsächlichen Anwendungsfall.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Der Prozess zur Erstellung digitaler Modelle bei der Umplanung bestehender Fabriken von der Bestandsdigitalisierung bis zum attribuierten Modell wird auch als Scan-to-BIM bezeichnet [6]. Building Information Modeling (BIM) beschreibt in diesem Zusammenhang eine kooperative Arbeitsmethodik, bei welcher in digitalen Modellen über den Lebenszyklus eines Bauwerks hinweg relevante Informationen konsistent erfasst, verwaltet und

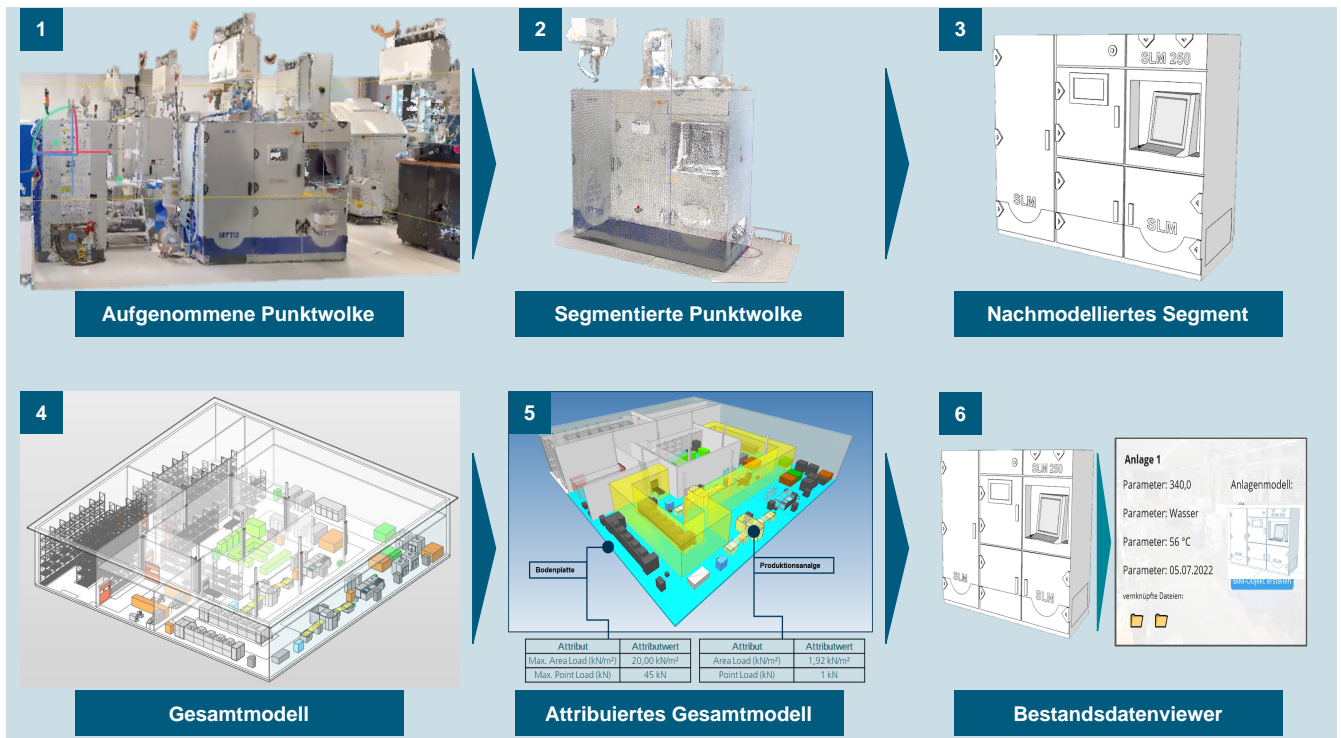


Bild 1 Manueller Prozess von der Punktwolke zum attribuierten Modell. Grafik: Fraunhofer IGCV

allen Beteiligten transparent zugänglich gemacht werden [7]. Diese digitalen Modelle bestehen aus geometrischen 3D-Daten einzelner Bauwerksobjekte, welche um alphanumerische Informationen (Attribute) ergänzt werden [7]. Der Scan-to-BIM-Prozess umfasst bislang zwingend die manuelle Nachmodellierung von zuvor aufgenommenen Punktwolken mittels Computer Aided Design (CAD)-Tools [8]. Das Eliminieren der Aufwände für die manuelle Nachmodellierung durch direkte Attribuierung der Punktwolkensegmente wird nachfolgend als direkte Nutzbarmachung von Punktwolken beschrieben. Diese muss ähnlich zum Scan-to-BIM-Prozess die folgenden Schritte enthalten:

1. Bestandsdigitalisierung durch Aufnahme einer Punktwolke mit Laserscanner
2. Segmentierung der Punktwolke in einzelne Fabrikobjekte
3. Integration der Punktwolkensegmente in ein Gesamtmodell
4. Attribuierung der Punktwolkensegmente im Gesamtmodell
5. Visualisierung des attribuierten Gesamtmodells in einem Bestandsdatenviewer

Zur Erzeugung digitaler Modelle einzelner (Bauwerks-)Objekte im Zuge der Bestandsdigitalisierung werden in der Regel Punktwolken als Grundlage verwendet. Die Aufnahme dieser Punktwolken kann sowohl durch 3D-Laserscanning, als auch Photogrammetrie erfolgen [9].

Es existieren weitere Techniken der Datenaufnahme wie zum Beispiel Fotografie und das manuelle Aufmaß sämtlicher Objekte mittels Messwerkzeugen (etwa Lasermessgerät) [6]. Dabei entstehen jedoch keine Punktwolken, sodass diese für den Prozess der Modellerstellung auf Basis von Punktwolken nicht zum Einsatz kommen. Dabei können sich je nach verwendeter Technik Genauigkeit und Effizienz unterscheiden [10]. Im Kontext der Bestandsdigitalisierung von Fabriken bestehend aus Gebäude und Produktionssystem hat sich die Nutzung mittels mobiler Laserscanner erzeugter Punktwolken als Standard etabliert [11]. Zur

Steigerung der Ergebnisqualität können diese durch Punktwolken von terrestrischen Laserscannern ergänzt werden [12]. Dies ist aber meist mit stark ansteigenden zeitlichen Aufwänden und Kosten verbunden [13]. Die Aufnahme großer Fabrikhallen erfolgt oft in mehreren Scans, weshalb mehrere Punktwolken zusammengeführt werden müssen. Dieser Schritt wird als Punktwolkenregistrierung bezeichnet. Dabei werden die einzelnen Scans kombiniert und innerhalb eines Koordinatensystems zu einem gemeinsamen Ursprung ausgerichtet [14].

Anschließend werden Fabrikobjekte innerhalb der Punktwolke identifiziert. Für jedes zu attribuierende Fabrikobjekte müssen Ausschnitte der Punktwolke erzeugt werden. Dieser Prozess wird als Segmentierung der Punktwolke beschrieben. Bei der Segmentierung werden aus der erzeugten Punktwolke einzelne zusammengehörende Mengen an Punkten zu Segmenten zusammengefasst, welche wiederum separate Objekte repräsentieren können.

Es existieren bereits verschiedene Machine-Learning (ML)-Algorithmen zur (teil-)automatisierten Segmentierung von Punktwolken [15]. Durch ML-Algorithmen werden zusammenhängende Punkte anhand Farb-, Entfernungsmerkmalen oder geometrischer Ausprägung erkannt und anschließend segmentiert [16, 17]. Diese ML-Algorithmen finden bisher als Alternative zur manuellen Nachmodellierung kaum Anwendung. Dies liegt unter anderem daran, dass die Algorithmen für große planare Flächen optimiert wurden. Fabrikobjekte (Maschinen und Anlagen) sind in der Regel geometrisch deutlich komplexer als große planare Flächen. Bei komplexen Fabrikobjekten ist anschließend an eine automatische Segmentierung eine Kontrolle und manuelle Korrektur der Zuordnung einzelner Punkte und Ausreißer notwendig [15]. Eine vollständig manuelle Segmentierung ist eine alternative Möglichkeit zur teilautomatisierten Vorgehensweise, jedoch mit deutlich höherem Aufwand verbunden.

Da der bisherige Scan-to-BIM-Prozess die manuelle Nachmodellierung in CAD-Tools umfasst [5, 8], wurde eine Integration von Punktwolkensegmenten in ein Gesamtmodell bisher kaum untersucht. Eine Ausnahme ist die Arbeit von *Dürr* und *Kuhlmann* aus dem Jahr 2008: Die Autoren haben in Ihrer Arbeit ein aus proprietären Dateiformaten basierendes System entwickelt, das die Zusammenfassung von manuell erstellten Punktwolkensegmenten in ein Gesamtmodell für die Layoutplanung ermöglicht [18]. Die Integration von Punktwolkensegmenten in ein Gesamtmodell unterscheidet sich dabei von der Integration von CAD-Dateien vor allem durch den Dateityp. Grundsätzlich bieten moderne Punktwolkenviewer mittlerweile die Möglichkeit, ein oder mehrere Punktwolkensegmente zu einem gemeinsamen Koordinatensprung zu registrieren, ohne dabei auf proprietäre Dateiformate angewiesen zu sein. Dabei entsteht aber erneut eine Gesamtpunktwolke. Auf diese Weise wird der Schritt der Punktwolkensegmentierung rückgängig gemacht. Eine anschließende Attribuierung der Punktwolkensegmente ist nicht möglich. BIM-Tools bieten teilweise die Möglichkeit, neben CAD-Modellen auch Punktwolken zu importieren. Größere Punktwolkendateien führen dabei jedoch zu starken Performance-Einbrüchen.

Die Attribuierung der Fabrikobjekte in einem Gesamtmodell ist für CAD-Modelle in Product-Life-Cycle-Management (PLM)-Tools möglich. In dem aus der Produktentwicklung stammenden PLM wird das Produkt in der Regel über mehrere Ebenen in Baugruppen zerlegt und diese hierarchisch in einer Stückliste geordnet. Zu jedem dieser Objekte können alphanumerische Informationen und geometrische Informationen mittels PLM-Software über den gesamten Produktlebenszyklus verwaltet und visualisiert werden [19]. Dabei geht der Layoutbezug der Fabrikobjekte verloren, welcher für die Fabrikplanung wichtig ist, da durch diesen jeweils die zentralen Zwischenergebnisse einzelner Planungsphasen und -beteiligten zusammengeführt werden [20].

Dieser Layoutbezug ist hingegen in BIM-Tools gegeben. Bestehende BIM-Tools sind in der Regel an den Datenstandard der Industry Foundation Classes (IFC) gebunden [21]. Derzeit gibt es intensive Bestrebungen in Wissenschaft und Industrie, BIM und den IFC-Standard auf Fabrikobjekte zu erweitern, sodass die Modelle künftig für Umplanungen auf Produktionssystemebene herangezogen werden können [22–25]. In BIM-Tools bestehen verschiedene Vorgehensweisen für die Kombination geometrischer mit alphanumerischen Informationen. Diese Vorgehensweisen unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der verwendeten Datenquellen und dem manuellen Aufwand. Eine Anwendung zur Attribuierung von Punktwolkensegmenten findet bisher weder bei PLM- noch bei BIM-Tools statt.

Bisher werden ausschließlich CAD-Modelle in einem Gesamtmodell zusammengefügt und dort mit alphanumerischen Daten attribuiert. Die gemeinsame Visualisierung der geometrischen Informationen mit den alphanumerischen Daten des Bestands wird nachfolgend als Visualisierung im Bestandsdatenviewer beschrieben. Eine Visualisierung von attribuierten Punktwolkensegmenten findet bisher nicht statt.

Zudem existiert keine ganzheitliche Methode zur Erstellung digitaler Fabrikmodelle durch die direkte Attribuierung von Punktwolkensegmenten und Visualisierung in einem Bestandsdatenviewer. Jedoch gibt es erste Lösungsansätze für die einzelnen dafür notwendigen Schritte:

1. Die Aufnahme von Punktwolken mittels mobiler Laserscanner ist kostengünstig und in hoher Qualität möglich.

2. Es existieren Lösungsansätze zur (teil-)automatisierten Punktwolkensegmentierung. Bisher findet fast ausschließlich manuelle Segmentierung im Rahmen der manuellen Nachmodellierung statt. Die Anwendbarkeit bestehender ML-Algorithmen für komplexe Fabrikobjekte wurde bisher nicht untersucht.
3. Es existieren Lösungsansätze zur Integration einzelner Punktwolkensegmente in ein Gesamtmodell. Diese sind auf CAD-Dateien optimiert. Eine spezifische Untersuchung der Anwendung für viele Punktwolkensegmente wurde bislang nicht untersucht.
4. Die Punktwolkenattribuierung wird bisher nicht durchgeführt, da nahezu ausschließlich nachmodellerte CAD-Dateien im BIM-Prozess verwendet werden. Es existieren Lösungsansätze für die CAD-Attribuierung, deren Anwendbarkeit für Punktwolkensegmente noch nicht untersucht wurde.
5. Die Visualisierung im Bestandsdatenviewer wird bislang ausschließlich für CAD-Modelle umgesetzt. Die Anwendbarkeit bestehender Lösungsansätze zur Attribuierung von CAD-Modellen für die Attribuierung von Punktwolkensegmenten wurde noch nicht untersucht.

Daher besteht der Bedarf für eine Methode zur direkten Nutzbarmachung von Punktwolken. Diese soll die Potenziale digitaler Fabrikmodelle für KMUs einfacher zugänglich machen.

3 Wissenschaftliche Vorgehensweise

Um Potenziale digitaler Fabrikmodelle für KMUs zugänglich zu machen, soll eine Methode zur direkten Nutzbarmachung von Punktwolken erforscht werden. Dafür sollen Nutzungsszenarien digitaler Fabrikmodelle identifiziert werden, welche ohne manuell nachmodellerte Fabrikobjekte umsetzbar sind. Aus den Nutzungsszenarien ergeben sich funktionale Anforderungen an die Umsetzung der Prozessschritte Punktwolkensegmentierung und -attribuierung sowie Visualisierung des Gesamtmodells im Bestandsdatenviewer. Die Punktwolkenaufnahme ist dabei explizit nicht Bestandteil der Methode. Im Stand der Technik wurde gezeigt, dass bereits effiziente Möglichkeiten zur Aufnahme von Punktwolken existieren.

Die Nutzungsszenarien werden in Form von Steckbriefen in einem Katalog zusammengefasst. Darin werden unter anderem Stakeholder und Informationsquellen der alphanumerischen Informationen je Nutzungsszenario festgehalten. Stakeholder und Informationsquellen werden dabei ebenfalls in zusätzlichen Steckbriefen definiert.

Das methodische Vorgehen umfasst in diesem Zusammenhang zunächst eine Literaturrecherche in Bezug auf den Scan-to-BIM-Prozess (Kapitel 2). Darauf aufbauend werden Kategorien für Nutzungsszenarien für Punktwolken als digitale Fabrikmodelle abgeleitet. Gleichzeitig werden Workshops (Gruppendiskussion) durchgeführt, in denen Experten aus Industrie, Softwareentwicklung und Beratung Nutzungsszenarien zunächst in Einzelarbeit sammeln. Danach werden diese Nutzungsszenarien in einem Workshop gemeinsam diskutiert, strukturiert und priorisiert. Der Methode des World-Cafés nach *Löhr* [26] folgend, werden anschließend zu diesen Nutzungsszenarien Stakeholder und Informationsquellen erarbeitet.

Die Auswertung dieser Datenbasis folgt dem Schema nach *Bogner* zur qualitativen Inhaltsanalyse, wobei die Kernaussagen extrahiert und gelabelt werden [27]. Somit können die Aussagen zu den Kategorien der Literatur gezählt werden. Die Zusammen-

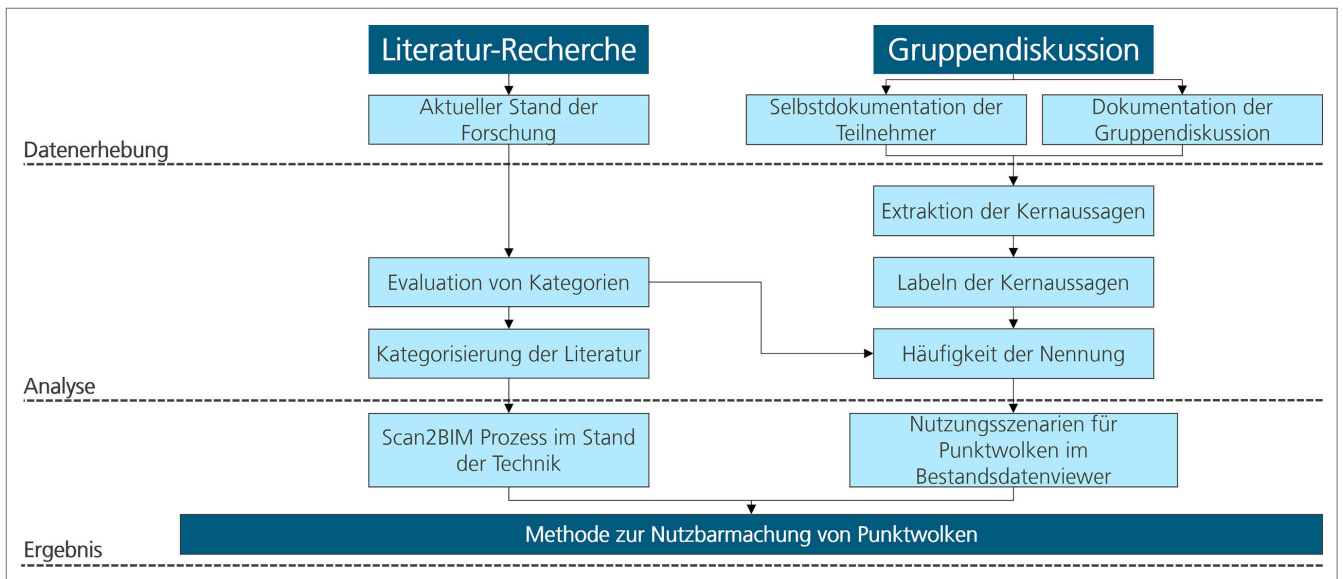


Bild 2 Methodische Vorgehensweise. Grafik: Fraunhofer IGCV

führung von Scan-to-BIM-Prozess in der Literatur und Nutzungsszenarien stellt die Basis für die Entwicklung der Methode zur Nutzbarmachung von Punktwolken dar. Dieses Vorgehen wird in **Bild 2** dargestellt.

4 Datenerhebung und Analyse

Da im Stand der Wissenschaft und Technik (Kapitel 2) gezeigt wurde, dass die Nutzung von attribuierten Punktwolken als digitale Fabrikmodelle bislang nicht stattfindet, existieren auch keine direkten Nutzungsszenarien in der Literatur. Vielmehr existieren Nutzungsszenarien digitaler Fabrikmodelle im Zusammenhang mit bisher häufig genutzten Technologien. Die für digitale Fabrikmodelle relevanten Technologien sind nach einer Studie von *Bermpohl et al.* aus dem Jahr 2025 BIM, digitaler Zwilling und das Industrial Metaverse [28].

Dabei sind Nutzungsszenarien im Kontext von BIM meist auf die (Um-)Planung des Layouts von Fabriken fokussiert [29]. In diesem Zusammenhang spielt auch die Koordination der Planungsergebnisse einzelner Fachplaner eine große Rolle [29, 30], die in der Regel sowohl geometrische als auch alphanumerische modellbasierte Regelprüfungen umfasst [31]. Ein weiteres Nutzungsszenario ist die Verbindung von BIM und Simulation [29, 32], sodass auf Basis der digitalen Fabrikmodelle aufwandsarm Simulationsstudien durchgeführt werden können, welche zum Beispiel in der Dimensionierung von Logistikressourcen zum Einsatz kommen.

Demgegenüber sind Nutzungsszenarien des digitalen Zwillings eher der Betriebsphase einer Fabrik zuzuordnen [33]. Kernelement dieser Nutzungsszenarien ist die Erfassung von Zustandsdaten einzelner Fabrikobjekte und die darauf basierende Erfüllung von Funktionen [34]. Diese Funktionen reichen von der Generierung von Kennzahlen und deren Visualisierung (zum Beispiel in Dashboards) bis zur Produktionsplanung und -steuerung [34].

Ergänzend dazu fokussiert das Industrial Metaverse vor allem Nutzungsszenarien für die Visualisierung der digitalen Fabrikmodelle, zum Beispiel mit Virtual oder Augmented Reality [28].

Parallel zur Identifikation der Kategorien für Nutzungsszenarien in der Literatur ergab die Gruppendiskussion eine Liste mit

Nutzungsszenarien, welche in der Praxis relevant sind. Die Teilnehmer stammten dabei zu 60 % direkt aus dem produzierenden Gewerbe (Fabrikbetreiber) sowie jeweils zu 20 % aus der Beratung (Generalplanung Industriebau) und der Softwarebranche. Insgesamt wurden initial im Rahmen der Selbstdokumentation der Teilnehmenden 32 Nutzungsszenarien identifiziert und in einer gemeinsamen Diskussion detailliert. Darüber hinaus wurden im Rahmen eines World-Cafés Stakeholder und Datenquellen identifiziert, die im Rahmen dieser Nutzungsszenarien relevant sind.

Die anschließende Extraktion der Kernaussagen und deren Strukturierung zeigte, dass insbesondere die Kategorien (Um-)Planung des Layouts sowie Grundlage für Simulation wie auch die Visualisierung von Zustandsdaten des Betriebs inklusive der Generierung von Kennzahlen in verschiedenen Ausprägungen und Beispielen genannt wurden.

Diese Nutzungsszenarien wurden anschließend mittels standardisierter Steckbriefe detailliert. Jedes Nutzungsszenario wurde einer Lebenszyklusphase (Planung oder Betrieb) zugeordnet und stichpunktartig beschrieben. Darüber hinaus wurden erforderliche Daten- und Informationsquellen getrennt nach geometrisch und alphanumerischen Informationen sowie die beteiligten Stakeholder ausgewiesen. Die Daten- und Informationsquellen und die Stakeholder wurden zusätzlich ebenfalls mittels standardisierter Steckbriefe beschrieben.

Für die Stakeholder waren dabei jeweils die Angaben zu Abteilung oder Unternehmensbereich und deren Aufgaben und Verantwortlichkeiten relevant. Darüber hinaus wurde angegeben, welche Informationsquellen von diesen Stakeholdern genutzt werden und wie die Informationen verwendet werden. Außerdem wurde definiert, welche Schnittstellen zu internen und externen Stakeholdern/Fachbereichen bestehen.

Schlussendlich wurde in Bezug auf die Informationsquellen festgelegt, ob es sich um geometrische oder alphanumerische Informationen handelt. Außerdem wurden Informationsgehalt, Datenformate und Datenursprung definiert.

5 Methode zur Nutzarmachung von Punktwolken

Auf Basis dieser Datenerhebung und -Analyse (Kapitel 4) lässt sich anschließend eine neue Methode zur Nutzarmachung von Punktwolken entwickeln.

Am Beginn des Prozesses steht die Auswahl eines Nutzungsszenarios. Dabei können die Steckbriefe (Kapitel 4) als Unterstützung herangezogen werden. Im Anschluss daran finden vier parallele Aktivitäten statt:

1. Die Festlegung des Fabrikbereiches als konkreter Anwendungsfall. Dies können einzelne Arbeitsplätze, Linien, Produktionsbereiche oder aber auch ein vollständiges Fabrikgebäude sein.
2. Die Definition der für dieses Nutzungsszenario erforderlichen Stakeholder ohne welche die operative Umsetzung nicht möglich wäre. Dabei können erneut die Steckbriefe zur Unterstützung herangezogen werden.
3. Die Bestimmung der relevanten Informationsquellen, welche ebenfalls mithilfe der Steckbriefe umgesetzt werden.
4. Die Auswahl des Level of Development (LoD). Hierbei werden sowohl geometrische Abstraktionsebene (ähnlich zum LoG, Level of Geometry) als auch alphanumerischer Detaillierungsgrad (LoI, Level of Information) festgelegt.

Sind all diese Anforderungen definiert, kann mit der Aufnahme der Punktwolke begonnen werden. Parallel dazu sind digitale Tools für die Umsetzung der Teilbereiche „Segmentierung“, „Attribuierung“ und „Visualisierung“ zu wählen. Dazu wird diese Methode ergänzt durch ein Tool zur Entscheidungsunterstützung, das auf Basis der Anforderungen an die drei Teilbereiche geeignete digitale Tools oder eine Kombination mehrerer dieser Tools vorschlägt. Das Tool zur Entscheidungsunterstützung ist Excel-basiert und in **Bild 3** beispielhaft dargestellt.

Sofern die mithilfe des Entscheidungsunterstützungstools identifizierten digitalen Tools nicht im Unternehmen vorhanden sind, muss gegebenenfalls ein Beschaffungsprozess durchgeführt werden. Anschließend liegen sowohl die Punktwolke des Fabrik-

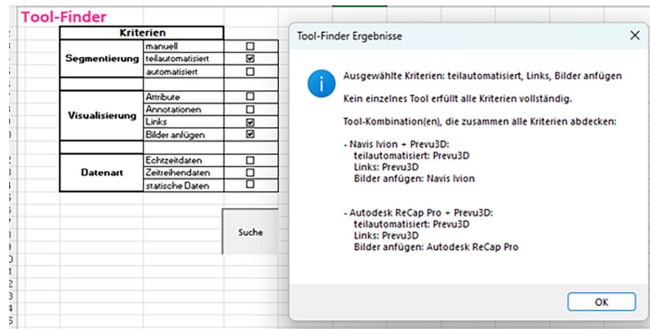


Bild 3 Tool zur Entscheidungsunterstützung. Grafik: Fraunhofer IGCV

bereichs als auch für die folgenden Schritte auf Basis der Anforderungen ausgewählte, geeignete digitale Tools zur Verfügung.

Danach findet eine Segmentierung der Punktwolke entsprechend dem festgelegten geometrischen Abstraktionslevel statt und es werden alphanumerische Daten im erforderlichen LoI aus den Informationsquellen aufgenommen.

Die Verknüpfung und Visualisierung dieser Daten stellt den letzten Schritt der Methode dar. Alle Schritte und deren Zusammenhänge sind nochmals in **Bild 4** visualisiert.

6 Anwendung der Methode bei drei KMUs

Die in Kapitel 5 beschriebene Methode wurde zur Validierung bei drei KMUs aus unterschiedlichen Industriezweigen angewendet. Bei KMU1 handelt es sich um ein Unternehmen aus dem Maschinen- und Anlagenbau, KMU2 ist ein metallverarbeitendes Unternehmen und KMU3 ist Hersteller von Präzisionswerkzeugen. Die drei Anwendungsbeispiele decken Produktionsumgebungen mit unterschiedlicher Komplexität, Anlagenstruktur und Datendichte ab. Im Folgenden werden die drei Anwendungsbeispiele näher vorgestellt und die konkrete Umsetzung der definierten Methode zur Nutzarmachung von Punktwolken aufgezeigt.

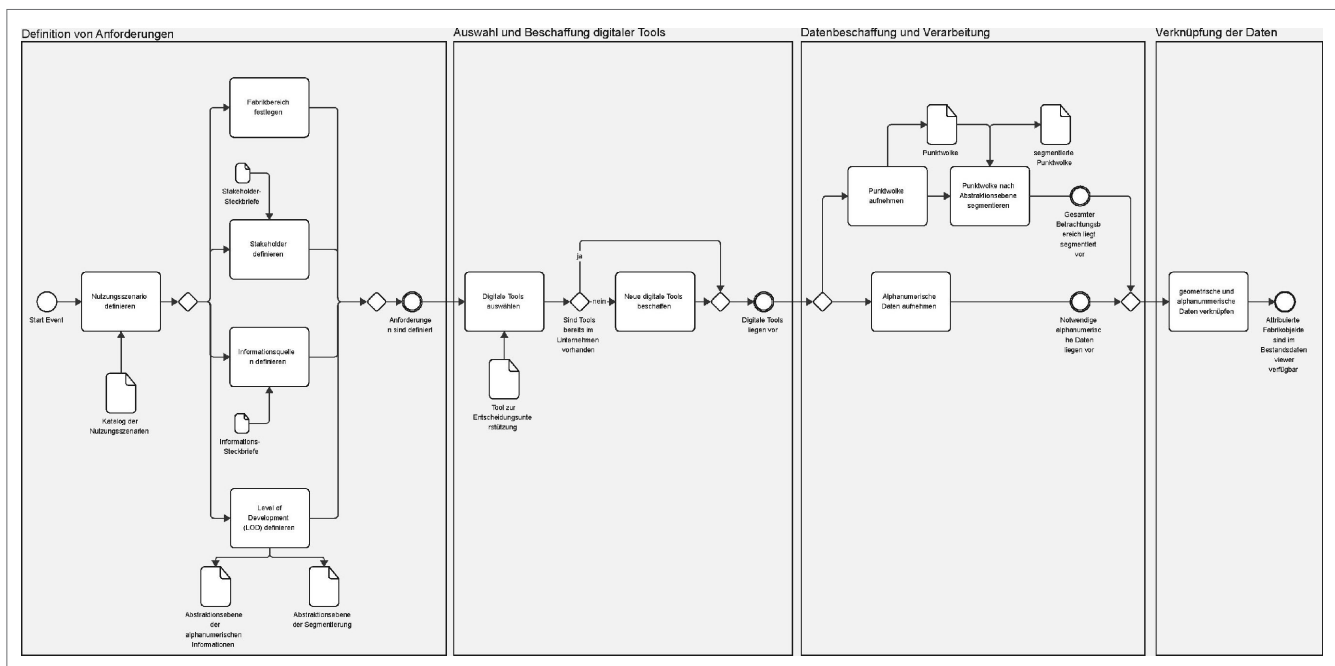


Bild 4 Methode zur Nutzarmachung von Punktwolken. Grafik: Fraunhofer IGCV

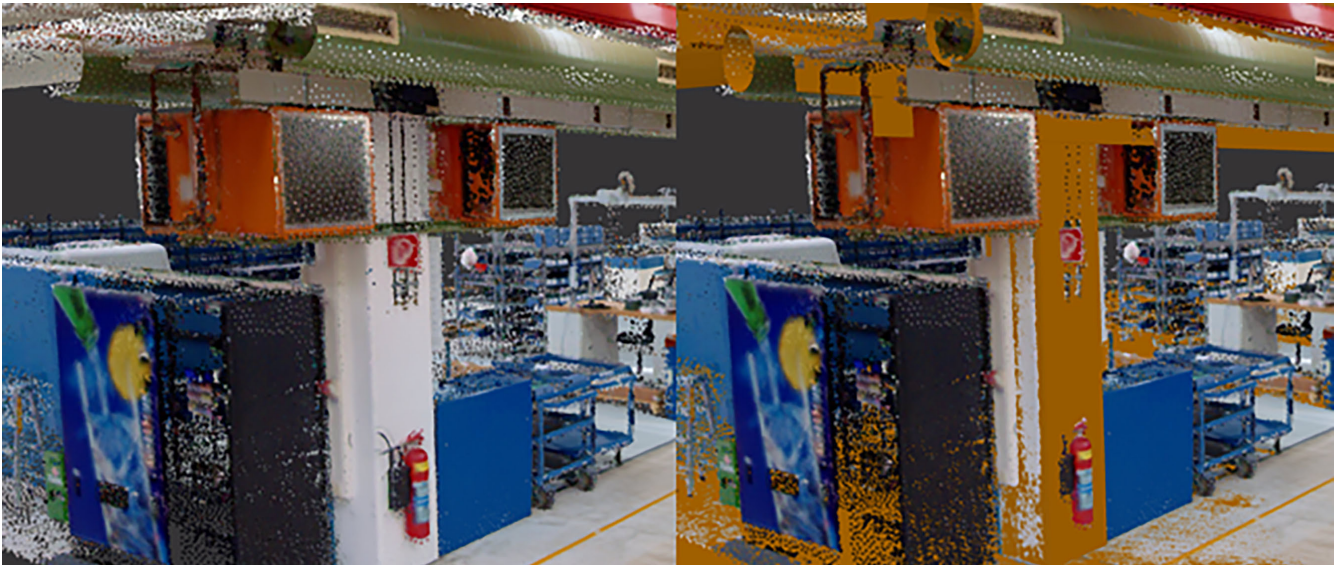


Bild 5 Punktwolke von KMU1 (links) und Überlagerung mit CAD-Gebäudemodell (rechts). Grafik: Fraunhofer IGCV

6.1 Anwendung bei KMU1

KMU1 ist im Maschinen- und Anlagenbau tätig und zeichnet sich durch eine hohe Variantenvielfalt in der Produktion aus.

- **Definition von Anforderungen:** Im Rahmen der Validierung wurde die Nutzung von Punktvolken zur Verbesserung der Planungsgrundlage für die Layoutumgestaltung als geeignetes Nutzungsszenario identifiziert. Konkretes Ziel dabei war die Kombination bereits vorhandener CAD-Daten mit einer aktuellen Punktwolke der gesamten Produktionshalle. Durch eine gezielte Überlagerung dieser Daten können Abweichungen zwischen der Realität (repräsentiert durch die Punktwolke) und den CAD-Daten identifiziert werden. Diese Abweichungen können anschließend durch Anpassungen der CAD-Daten beseitigt werden, sodass eine zuverlässigere Planungsgrundlage für anstehende Planungsmaßnahmen entsteht, die den Ist-Zustand der Produktionsumgebung abbildet. Bedingt durch dieses Nutzungsszenario wurde die gesamte Produktionshalle des KMUs als relevanter Fabrikbereich festgelegt. Die Definition relevanter Stakeholder und Informationsquellen erfolgte analog zur Definition des Nutzungsszenarios und Berücksichtigung der im Vorfeld erstellten Stakeholder- und Informationsquellen-Steckbriefe. Dabei wurden die Rollen des Fabrikplaners, Abteilungsleiters (zum Beispiel Produktion, Logistik, Facility Management) und Bereichsleiters (etwa für einen Geschäftsbereich) als zentrale Stakeholder identifiziert und CAD-Gebäudedaten und Punktvolken als relevante Informationsquellen definiert. Zum Abschluss der Anforderungsdefinition wurde in Abstimmung mit KMU1 ein geeigneter LoD für die Umsetzung definiert. Dieser orientierte sich am Detailgrad der verfügbaren CAD-Daten.
- **Auswahl und Beschaffung digitaler Tools:** Die Auswahl der digitalen Tools für diesen Anwendungsfall erfolgte unter Zuhilfenahme des Tools zur Entscheidungsunterstützung (siehe Kapitel 5). Um die Anzahl der benötigten Software so gering wie möglich zu halten, wurde ein Tool ausgewählt, das sowohl Punktvolken als auch CAD-Daten visualisieren kann. Eine Beschaffung konnte vermieden werden, da das Tool bereits regelmäßig vom Fraunhofer IGCV eingesetzt wird.

- **Datenbeschaffung und Verarbeitung:** Die gesamte Produktionshalle des Unternehmens konnte innerhalb eines Arbeitstages mittels mobilem Laserscanner erfasst werden. Bei der Erfassung der Produktionshalle wurde auf einen aufgeräumten Zustand geachtet, sodass möglichst wenig bewegliche Objekte wie Paletten oder Logistikequipment wie Stapler auf dem Datensatz zu sehen sind und relevante Fabrikbereiche verdecken. Die erfassten Daten wurden nachbearbeitet und anschließend in das ausgewählte Tool importiert. Neben der Punktwolke sind in diesem Nutzungsszenario einzig CAD-Gebäudedaten relevant. Diese konnten seitens des KMUs bereitgestellt werden.
- **Verknüpfung der Daten:** Zur Verknüpfung der beiden Datensätze wurden die CAD-Gebäudedaten in das gleiche Tool importiert wie die Punktvolken der Produktionshalle. Sodann wurden die beiden Datensätze zueinander ausgerichtet. Dieser Prozess erfolgte manuell, was eine mögliche Fehlerquelle oder Ursache für Ungenauigkeiten darstellt. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung wird vom ausgewählten Tool jedoch noch keine automatisierte Unterstützung für diese Aufgabe angeboten. Nachdem die Datensätze zueinander ausgerichtet wurden, konnte das CAD-Gebäudemodell einer Sichtprüfung unterzogen und Abweichungen im Modell identifiziert werden (Bild 5).

6.2 Anwendung bei KMU2

KMU2 ist ein mittelständisches Unternehmen mit einer historisch gewachsenen Produktion. Für einige Betriebsmittel sind keine geometrischen Modelle und nur eingeschränkte nicht-geometrische Dokumentationen verfügbar.

- **Definition von Anforderungen:** Als geeignetes Nutzungsszenario wurde die direkte Attribuierung von Punktvolken zur Bestandsdokumentation identifiziert. Ziel war es, vorhandene Punktvolkendaten zur Ergänzung und Verbesserung der bestehenden Informationsbasis zu verwenden, indem Anlageninformationen unmittelbar an der jeweiligen Geometrie verfügbar gemacht werden. Da für den gesamten Standort bereits Punktvolkendaten vorlagen, konzentrierte sich die Anwendung der Methode auf einen Teilbereich der Produktion, in dem mehre-

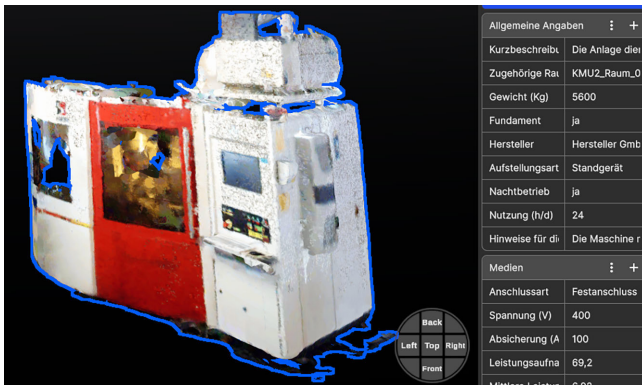


Bild 6 Punktwolkensegment verknüpft mit Metadaten aus Raumbuch.
Grafik: Fraunhofer IGCV

re Anlagen exemplarisch untersucht wurden. Die Anlagen aus diesem Teilbereich sollen perspektivisch an einen neuen Standort verlagert werden, wobei sowohl die geometrischen Informationen in Form unterschiedlichster Abmessungen als auch alphanumerische Informationen wie Medienbedarfe von hoher Relevanz sind. Durch eine Verknüpfung der verfügbaren alphanumerischen Daten direkt an den entsprechenden Punktwolkensegmenten konnte hierfür eine Planungsgrundlage geschaffen werden, die den Aufwand zu Datenbeschaffung in den frühen Planungsphasen reduziert und gleichzeitig eine höhere Planungssicherheit liefern kann.

- Analog zum Nutzungsszenario bei KMU1 wurden die Rollen des Fabrikplaners, Abteilungsleiters und Bereichsleiters für dieses Nutzungsszenario als relevant identifiziert. Als wichtigste Informationsquelle dienten das digitale Raumbuch, das grundlegende alphanumerische Informationen wie Standort, Anlagentyp, Baujahr und Verantwortlichkeit enthält und die verfügbaren Punktwolken des Standortes. Der LoD wurde im Nutzungsszenario so definiert, dass geometrische Informationen auf Anlagenebene und alphanumerische Informationen auf Basis der verfügbaren Raumbuchdaten abgebildet werden konnten.
- Auswahl und Beschaffung digitaler Tools: Die Auswahl der digitalen Tools zur Umsetzung des Nutzungsszenarios erfolgte auf Grundlage des in Kapitel 5 beschriebenen Tools zur Entscheidungsunterstützung. Da die Punktwolke bereits vorlag, wurde eine Softwareumgebung genutzt, die sowohl die Segmentierung der Punktwolke als auch die manuelle Verknüpfung von Metadaten unterstützt.
- Datenbeschaffung und Verarbeitung: Die Punktwolkendaten wurden aus einer früheren Bestandserfassung übernommen, sodass keine neue Aufnahme erforderlich war. Im ausgewählten Produktionsabschnitt wurden Punktwolkensegmente für einzelne Anlagen erstellt. Diese Segmente wurden so abgegrenzt, dass sie jeweils eine physische Anlage oder ein klar definiertes Anlagensystem repräsentierten. Die zugehörigen Einträge aus dem digitalen Raumbuch wurden anschließend von KMU2 bereitgestellt.
- Verknüpfung der Daten: Die Verknüpfung der geometrischen und alphanumerischen Daten erfolgte manuell innerhalb der gewählten Softwareumgebung. Für jedes Punktwolkensegment wurden die zugehörigen Metadaten aus dem Raumbuch – etwa Anlagen-ID, Typ, Hersteller oder Standort – ergänzt. Dadurch entstand eine direkt attribuierte Punktwolke, bei der alle relevanten Informationen unmittelbar an der jeweiligen Anlage verfügbar sind. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der räumlich kontextbezogenen Bereitstellung von Informationen, wodurch Suchaufwände reduziert und Planungsmaßnahmen wie die Verlagerung der fokussierten Anlagen effizienter gestaltet werden können. Das Ergebnis ist in **Bild 6** visualisiert.

6.3 Anwendung bei KMU3

KMU3 ist ein mittelständisches Unternehmen der Präzisionswerkzeugfertigung mit einem hohen Automatisierungsgrad und datengetriebenen Produktionsprozessen.

- Definition von Anforderungen: Als Nutzungsszenario wurde die Anzeige und Verknüpfung von Betriebsdaten auf Anlagenebene identifiziert. Ziel war es, vorhandene Maschinen- und Prozessdaten aus der Produktion mit den entsprechenden geometrischen Informationen in einer Punktwolke zu verbinden. So sollte eine visuelle und intuitive Darstellung des Anlagenzustands ermöglicht werden, bei der aktuelle Betriebsparameter unmittelbar im räumlichen Kontext der Anlage einsehbar sind. Für die Umsetzung wurde ein Teilbereich der Fertigung mit vier Anlagen ausgewählt, der exemplarisch für andere Teile des gesamten Maschinenparks steht. Die relevanten Stakeholder umfassten die Produktionsleitung, Instandhaltung und IT-Abteilung. Als Informationsquellen diente einerseits eine Punktwolke des ausgewählten Produktionsbereichs. Diese wurde im Rahmen des Projekts speziell für dieses Nutzungsszenario aufgenommen. Andererseits wurden Dashboards zu Betriebs- und Zustandsdaten aus bestehenden Maschinenüberwachungssystemen als zweite Informationsquelle verwendet. Durch eine Verknüpfung relevanter Dashboards an den entsprechenden Anlagen in der Punktwolke, konnte so eine Verknüpfung realer Betriebsdaten und geometrischer Daten geschaffen werden. Hier ist wichtig zu betonen, dass die Entwicklung des Systems zur Erfassung der Maschinendaten und auch der Aufbau des Dashboards selbst nicht Teil des Projekts waren. Der Projektfokus lag einzig auf der sinnvollen Verknüpfung dieser beiden Informationsquellen.
- Auswahl und Beschaffung digitaler Tools: Wie in den anderen beiden Nutzungsszenarios, wurde auch im dritten Nutzungsszenario das in Kapitel 5 beschriebene Tool zur Entscheidungsunterstützung für die Auswahl der geeigneten Software eingesetzt. Da das Unternehmen bereits über die Systeme zur Datenerfassung und Dashboards zur Datenvisualisierung verfügte, wurde die Softwareumgebung so ausgewählt, dass sie sowohl Punktwolken visualisieren kann, als auch die Verknüpfung zusätzlicher Inhalte zulässt.
- Datenbeschaffung und Verarbeitung: Die Punktwolkendaten des ausgewählten Produktionsbereichs wurden analog zum Nutzungsszenario von KMU1 mit einem mobilen Laserscanner erfasst. Durch den sehr geringen Umfang des Fokusbereichs erfolgte die Erhebung dieser Daten in weniger als einer Stunde. Mit Blick auf die Verknüpfung wurden im Rahmen der Datenerfassung Gespräche mit KMU3 geführt, um mögliche Schnittstellen zur Integration der vorhandenen Dashboards zu identifizieren.
- Verknüpfung der Daten: Die Verknüpfung der Betriebsdaten mit den geometrischen Daten erfolgte innerhalb der gewählten Softwareumgebung. Für jede der vier erfassten Anlagen wurde ein eigener Datenknoten in der Punktwolke angelegt, an den

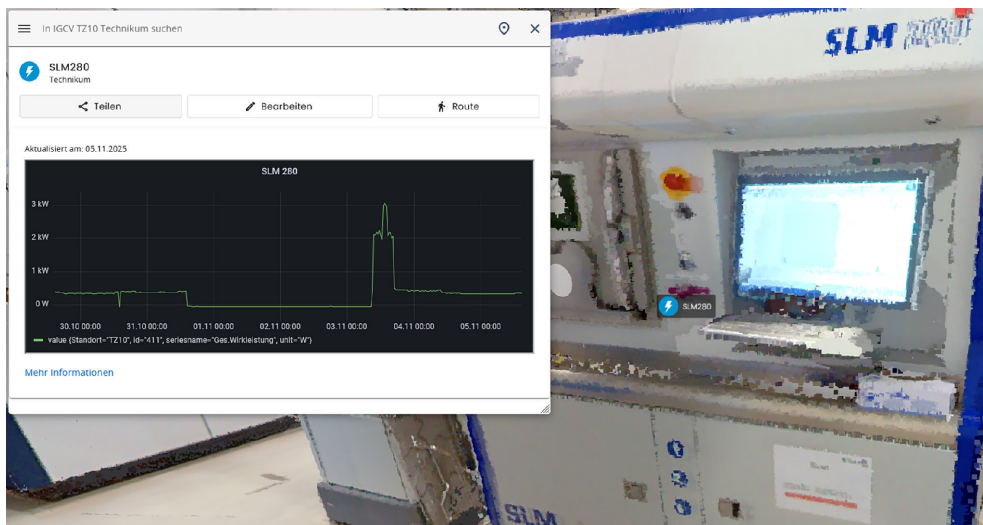


Bild 7 Beispiel der Verknüpfung anhand eines Beispiels am Fraunhofer IGCV. Grafik: Fraunhofer IGCV

die entsprechenden Dashboards mit Betriebsparameter ange-bunden wurden. So entstand ein visuell attribuiertes Fabrikmodell, das sowohl geometrische als auch prozessrelevante Informationen integriert. Eine vergleichbare Verknüpfung von Betriebsdaten und Punktwolken ist in **Bild 7** dargestellt. Hierbei werden Live-Energiedaten einer Anlage direkt in der Punktwolke visualisiert.

7 Fazit und Ausblick

Die vorgestellte Methode zur direkten Nutzbarmachung von Punktwolken zeigt, wie eine belastbare, digitale Planungsgrundlage geschaffen werden kann, ohne hohe Aufwände für die Modellierung einzelner Fabrikobjekte aufbringen zu müssen. Durch die Kombination von Punktwolkendaten mit alphanumerischen Informationen können Anwender Nutzungsszenarien digitaler Fabrikmodelle umsetzen, ohne den aufwendigen Schritt der Nachmodellierung in CAD-Tools gehen zu müssen.

Die Anwendung der Methode am Beispiel der drei KMUs hat gezeigt, dass dieser Ansatz auf verschiedene Produktionsumgebungen übertragbar ist. Dabei konnte die Methode sowohl in planungsorientierten Nutzungsszenarien wie der Layoutumgestaltung, als auch in betriebsorientierten Szenarien, beispielsweise der Anzeige und Verknüpfung von Betriebsdaten auf Anlagenebene, erfolgreich angewendet werden. Die jeweiligen Umsetzungen verdeutlichen, dass unterschiedliche Nutzungsszenarien durch die Kombination bereits vorhandener Softwarelösungen umgesetzt werden können. Dabei sind keine speziell entwickelte Systemumgebungen notwendig. Dadurch bietet die Methode insbesondere KMUs einen praxistauglichen Einstieg in die Nutzung von Punktwolken. Im Zuge der Anwendungen wurden jedoch auch aktuelle Grenzen der Methode und des verfügbaren Technologiestands deutlich. Dazu zählen vor allem der manuelle Aufwand bei der Segmentierung und Attribuierung von Punktwolken. Auch, wenn dieser Aufwand deutlich geringer ausfällt als eine Modellierung, liegt in der Automatisierung dieser Schritte ein großes Optimierungspotenzial. Zudem zeigt sich, dass die Kompatibilität einzelner Softwarelösungen ein Hindernis bei der Umsetzung gewisser Nutzungsszenarien darstellen kann. Dennoch konnte in allen drei Fällen ein Mehrwert hinsichtlich Datenverfügbarkeit, Transparenz und Planungssicherheit generiert werden.

Für die zukünftige Forschung ergibt sich daraus vor allem die Notwendigkeit, Teilprozesse der Methode weiter zu automatisieren. Hierbei bietet der Einsatz von Machine-Learning-Verfahren ein hohes Potenzial, insbesondere zur Klassifikation komplexer Fabrikobjekte. Außerdem muss die Entwicklung standardisierter Schnittstellen angestrebt werden, um attribuierte Punktwolken nahtlos in bestehende Planungs-, Betriebs- und Simulationsumgebungen zu integrieren. So könnten Punktwolken von Fabriken einen größeren Nutzen darstellen als eine bloße Modellierungsgrundlage. Eine Erweiterung der Methode um immersive Visualisierungstechnologien, wie etwa Virtual- oder Augmented-Reality-Anwendungen, könnten zudem die intuitive Nutzung und Zusammenarbeit verschiedener Stakeholder weiter verbessern.

Insgesamt zeigt die entwickelte Methode, dass die erweiterte Nutzbarmachung von Punktwolken eine praktikable Möglichkeit zur Digitalisierung von Fabriken darstellt. Sie trägt dazu bei, die Potenziale digitaler Fabrikmodelle auch für KMUs zugänglich zu machen und leistet somit einen Beitrag auf dem Weg zur Digitalisierung des deutschen Mittelstandes.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Bayrischen Transformations- und Forschungsstiftung für die Förderung des Projektes DigiFab4KMU.

LITERATUR

- [1] BERPPOHL, F.; SCHÄFER, S. F.; HOHMANN, A. et al.: Short-cycled factory planning – motivation and existing challenges. *Procedia CIRP* 130 (2024), pp. 1708–1713, doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.304
- [2] GEISSBAUER, R.; BRUNS, M.; WUNDERLIN, J.: PwC Digital Factory Transformation Survey 2022. Stand: 2022. Internet: www.pwc.de/content/0f96ea9c-992c-4ba7-8c4d-b4637cf81d9f/pwc-digital-factory-transformation-survey-2022.pdf. Zugriff am 11.02.2026
- [3] FELDMANN, K.; REINHART, G.: Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion. Modellaufbau, Simulationsexperimente, Einsatzbeispiele. Heidelberg: Springer 2000
- [4] NAVVIS GmbH: NavVis Digital Factory Survey 2021. A time of change for manufacturing industries. Stand: 2021. Internet: [hubspot-cta-reid](https://www.navvis.com/cta-reid)

rect-eu1-prod.s3.amazonaws.com/cta/redirect/3339696/f2a3cd22-e1fb-44ec-bde6-88741ffe41fa. Zugriff am 11.02.2026

[5] Klinc, R.; Jotanović, U.; Kregar, K.: Point Clouds For Use In Building Information Models (BIM). *Geodetski vestnik* 65 (2021) 4, pp. 594–613

[6] Volk, R.; Stengel, J.; Schultmann, F.: Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. *Automation in Construction* 38 (2014), pp. 109–127

[7] van Treeck, C.: Building Information Modeling. In: Treeck, v. C.; Elixmann, R.; Rudat, K. et al. (Hrsg.): Gebäude.Technik.Digital. Building Information Modeling. Heidelberg: Springer 2016, S. 7–90

[8] Courtney, M.; Rezgui, Y.; Beach, T. et al.: Moving from targeted acquisition to urban area modelling — increasing the scale of point cloud processing. 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), Funchal, 2017, pp. 938–946

[9] Hron, V.; Kostin, V.; Halounová, L.: Comparison of Software Solutions for Automatic Generation of 3D Building Models. 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconference and EXPO, SGEM 2014 (2014) 2, pp. 513–520

[10] Hron, V.; Halounová, L.: Automatic Generation of 3D Building Models from Point Clouds. 11th Symposium on Geoinformatics for Intelligent Transportation, GIS Ostrava 2014 (2015) 214, pp. 109–119

[11] Cui, Y.; Li, Q.; Yang, B. et al.: Automatic 3-D Reconstruction of Indoor Environment With Mobile Laser Scanning Point Clouds. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 12 (2019) 8, pp. 3117–3130

[12] Elseberg, J.; Borrmann, D.; Schauer, J. et al.: A sensor skid for precise 3D modeling of production lines. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-5* (2014), pp. 117–122

[13] Petschnigg, C.; Spitzner, M.; Weitzendorf, L. et al.: From a Point Cloud to a Simulation Model-Bayesian Segmentation and Entropy Based Uncertainty Estimation for 3D Modelling. *Entropy* 23 (2021) 3, <https://doi.org/10.3390/e23030301>

[14] Badenko, V.; Fedotov, A.; Zotov, D. et al.: Scan-to-bim methodology adapted for different application. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-5/W2* (2019), pp. 1–7

[15] López Iglesias, J.; Diaz Severiano, J. A.; Lizcano Amorcho, P. E. et al.: Revision of Automation Methods for Scan to BIM. In: Cavas-Martínez, F.; Sanz-Adan, F.; Morer Camo, P. et al. (Edit.): *Advances in Design Engineering*. INGEGRAF 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer International Publishing 2020, pp. 482–490, https://doi.org/10.1007/978-3-030-41200-5_53

[16] Braun, A.; Borrmann, A.: Combining inverse photogrammetry and BIM for automated labeling of construction site images for machine learning. *Automation in Construction* 106 (2019), #102879

[17] Melcher, D.; Küster, B.; Stonis, M. et al.: Optimierung von Fabrikplanungsprozessen durch Drohneneinsatz und automatisierte Layoutdigitalisierung. *Logistics Journal* 14 (2018), https://doi.org/10.2195/lj_Proc_melcher_de_201811_01

[18] Dürr, M.; Kuhlmann, T.: Kooperative Fabrikplanung mit Laserscans. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 103 (2008) 1–2, S. 28–30

[19] George, S.; David, K.: Knowledge management of part and bill of material in an engineering industry. *International Journal of Applied Engineering Research* 10 (2015) 69, pp. 55–59

[20] Verein Deutscher Ingenieure: 2552 Blatt 11.8. Building Information Modeling (BIM) Informationsaustauschanforderungen Fabrikplanung. Beuth Verlag GmbH September 2023

[21] Steinmann, R.: IFC certification of BIM software. In: Borrmann, A.; König, M.; Koch, C. et al. (eds): *Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice*. Cham: Springer 2018, https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3_7

[22] Burggräf, P.; Dannapfel, M.; Schneidermann, D. et al.: Integrated factory modelling: Using bim to disrupt the interface between manufacturing and construction in factory planning. *WIT Transactions on the Built Environment* 192 (2019), pp. 143–155, doi.org/10.2495/BIM190131

[23] Neuhäuser, T.; Chen, Q.; Rösch, M. et al.: Building Information Modeling im Fabriklebenszyklus. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 115 (2020) s1, S. 66–69

[24] Neuhäuser, T.; Daub, R.: Building Information Modeling einführen. *wt Werkstattstechnik online* 113 (2023) 04, S. 126–134. Düsseldorf: VDI Fachmedien, <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-04-26>

[25] Rieke, L.; Schäfer, S. F.; Hingst, L. et al.: Einsatz von BIM in der Fabrikplanung. *wt Werkstattstechnik* 111 (2021) 11–12, S. 881–886. Düsseldorf: VDI Fachmedien, <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2021-11-12-112>

[26] Löhr, K.; Weinhardt, M.; Sieber, S.: The “World Café” as a Participatory Method for Collecting Qualitative Data. *International Journal of Qualitative Methods* 19 (2020), <https://doi.org/10.1177/1609406920916976>

[27] Bogner, A.; Littig, B.; Menz, W.: Interviews mit Experten. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2014

[28] BERPPOHL, F.; Schäfer, S. F.; Neumann, O. et al.: Industrial study on holistic digital factory models. *Production Engineering* (2025), pp. 1093–1118, <https://doi.org/10.1007/s11740-025-01344-z>

[29] Neuhäuser, T.; Weist, K. C.; Spiegelsperger, S. M. et al.: Relevanz von BIM in der Fabrikplanung. *wt Werkstattstechnik online* 113 (2023) 3, S. 93–100. Düsseldorf: VDI Fachmedien, <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-27>

[30] Schäfer, S. F.; Lenz, L.; Neuhäuser, T.: Level of Coordination in der Fabrikplanung. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 118 (2023) 5, S. 284–292

[31] BERPPOHL, F.; Eckart, C. J.; Forte, S. et al.: IDM für eine BIM-basierte Fabrikplanung – Prozesse, Rollen, Aufgaben und Informationsaustauschanforderungen. Stand: 2024: Internet: publica.fraunhofer.de/bitstream/ams/fd8bc4d9-028e-4602-8d18-3c2385d9a53c/download. Zugriff am 11.02.2026

[32] Schäfer, S. F.; Buning, B.; Krüger, T. et al.: Verbindung von BIM und Simulation. *wt Werkstattstechnik online* 115 (2025) 06, S. 517–525. Düsseldorf: VDI Fachmedien, <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-151>

[33] BERPPOHL, F.; Schäfer, S. F.; Forte, S.: Ganzheitliche digitale Fabrikmodelle. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 120 (2025) 7–8, S. 482–488

[34] Schäfer, S. F.; Münnich, M.; BERPPOHL, F. et al.: Aufbau des Digitalen Fabrikzwillings. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 120 (2025) 5, S. 366–373

Fabian BERPPOHL, M.Sc. 
fabian.bermpohl@igcv.fraunhofer.de

Julian Böck, M.Eng. 

Eren Kacar

Anja Munzke, M.Eng. 

Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite-, und Verarbeitungstechnik IGCV
 Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg
www.igcv.fraunhofer.de

Heinrich Etschmann

Otto Bihler Maschinenfabrik GmbH & Co. KG
 Lechbrucker Str. 15, 87642 Halblech
www.bihler.de

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Böck

J. N. Eberle & Cie. GmbH
 Eberlestr. 28, 86157 Augsburg
www.eberle-augsburg.de

Andreas Frank, B.Eng.

Hufschmied Zerspanungssysteme GmbH
 Edisonstr. 11d, 86399 Bobingen

Bernd Bräuchler

Dreicad GmbH
 Karlstr. 37, 89073 Ulm
www.dreicad.de/

Dr. Eckart Reihlen

Drees & Sommer SE
 Aviation Campus
 Major Hirst Str. 11, 38442 Wolfsburg
www.dreso.com

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
 Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)