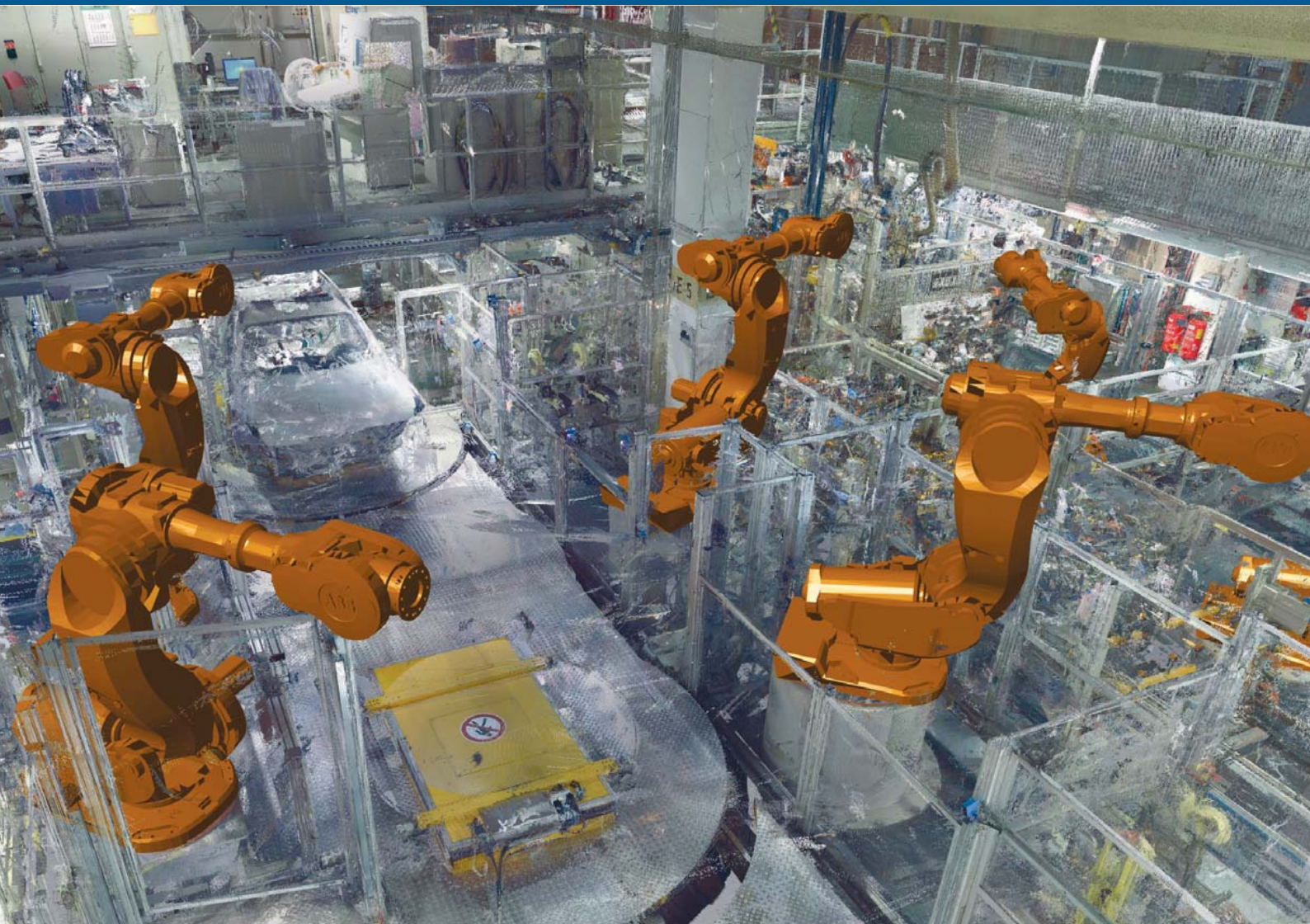


STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

MATTHIAS SCHINDLER

System und Methode zur Planung von Produktionssystemen auf Basis der 3D-Digitalisierung bestehender Strukturen mit Farbinformation



Universität Stuttgart



Fraunhofer

IPA

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG BAND 100

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl

Univ.-Prof. a.D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Matthias Schindler

System und Methode zur Planung von Produktionssystemen auf Basis der 3D-Digitalisierung bestehender Strukturen mit Farbinformation

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11/9 70-11 01
info@ipa.fraunhofer.de; www.ipa.fraunhofer.de

STUTTARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl^{1,2}

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke^{1,4}

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber^{1,2}

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel³

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer^{1,5}

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl³

Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper^{1,2}

¹Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

²Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart

³Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart

⁴Institut für Photovoltaik (IPV) der Universität Stuttgart

⁵Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart

Titelbild: © Matthias Schindler

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISSN: 2195-2892

ISBN (Print): 978-3-8396-1583-6

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2019

Druck: Mediendienstleistungen des Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2020

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70-25 00

Telefax 07 11 9 70-25 08

E-Mail verlag@fraunhofer.de

URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

**System und Methode zur Planung von Produktionssystemen
auf Basis der 3D-Digitalisierung bestehender Strukturen
mit Farbinformation**

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Matthias Schindler, M.Sc.
aus Saarbrücken

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Tag der mündlichen Prüfung: 21.05.2019

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen
und Fertigungseinrichtungen (ISW)
der Universität Stuttgart

2019

Geleitwort der Herausgeber

Produktionswissenschaftliche Forschungsfragen entstehen in der Regel im Anwendungszusammenhang, die Produktionsforschung ist also weitgehend erfahrungsbasiert. Der wissenschaftliche Anspruch der „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ liegt unter anderem darin, Dissertation für Dissertation ein übergreifendes ganzheitliches Theoriegebäude der Produktion zu erstellen.

Die Herausgeber dieser Dissertations-Reihe leiten gemeinsam das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und jeweils ein Institut der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik an der Universität Stuttgart.

Die von ihnen betreuten Dissertationen sind der marktorientierten Nachhaltigkeit verpflichtet, ihr Ansatz ist systemisch und interdisziplinär. Die Autoren bearbeiten anspruchsvolle Forschungsfragen im Spannungsfeld zwischen theoretischen Grundlagen und industrieller Anwendung.

Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ ersetzt die Reihen „IPA-IAO Forschung und Praxis“ (Hrsg. H.J. Warnecke / H.-J. Bullinger / E. Westkämper / D. Spath) bzw. ISW Forschung und Praxis (Hrsg. G. Stute / G. Pritschow / A. Verl). In den vergangenen Jahrzehnten sind darin über 800 Dissertationen erschienen.

Der Strukturwandel in den Industrien unseres Landes muss auch in der Forschung in einen globalen Zusammenhang gestellt werden. Der reine Fokus auf Erkenntnisgewinn ist zu eindimensional. Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ zielen also darauf ab, mittelfristig Lösungen für den Markt anzubieten. Daher konzentrieren sich die Stuttgarter produktionstechnischen Institute auf das Thema ganzheitliche Produktion in den Kernindustrien Deutschlands. Die leitende Forschungsfrage der Arbeiten ist: Wie können wir nachhaltig mit einem hohen Wertschöpfungsanteil in Deutschland für einen globalen Markt produzieren?

Wir wünschen den Autoren, dass ihre „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ in der breiten Fachwelt als substantziell wahrgenommen werden und so die Produktionsforschung weltweit voranbringen.

Alexander Verl

Thomas Bauernhansl

Engelbert Westkämper

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Alexander Verl, für die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit, die Unterstützung und den Hauptbericht. Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl danke ich herzlich für die Übernahme des Mitberichts.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Doktorandentätigkeit bei der BMW Group in München. Ich bedanke mich herzlich bei Christian Patron und Dirk Hilgenberg für ihre Förderung – ohne sie wäre das Forschungsvorhaben in dieser Form nicht realisierbar gewesen. Mein Dank gilt allen Kollegen, die mich in der Diskussion der Methodik unterstützt haben. Dies gilt im Besonderen für Patrick Strauß und Philipp Engelhardt, mit denen ich wissenschaftliche Fragen debattieren konnte. Hervorheben möchte ich die Unterstützung durch Marc Kamradt mit Hardware-Ressourcen. Darüber hinaus danke ich allen Kollegen, mit denen ich reale Planungsfälle fachlich diskutieren konnte. Martin Koch gilt mein Dank für den Gastaufenthalt im Werk Spartanburg (USA), während dessen ich die Methode evaluieren und weiterentwickeln konnte.

Allen Studenten, mit denen ich im Rahmen des Forschungsprojekts zusammenarbeiten durfte, danke ich für ihren persönlichen Einsatz. Besonders bedanken möchte ich mich bei Sabine König, Lukas Schuhegger und Leon Lipp für ihr inhaltliches Engagement und bei Frederik Schmihing für die kritische Durchsicht meiner Arbeit.

Mein außerordentlicher Dank gilt meiner Familie, da sie mich auf meinem persönlichen Weg ermutigt und während der gesamten Zeit unterstützt hat. Meiner Mutter Gabriele und meinem Bruder Tobias möchte ich besonders danken, da sie mir moralisch und inhaltlich beigestanden haben. Außerdem danke ich ihnen für die sorgfältige Korrektur.

Meinen langjährigen Freunden Felix Malzahn und Marcus Baulig danke ich von Herzen. Felix hat mit seiner Unterstützung zum Gelingen der Arbeit beigetragen, bei Marcus möchte ich mich für das Lektorat und seine schnelle und kritische Reflexion meiner Arbeit bedanken.

Kurzzinhalt

Produzierende Unternehmen erweitern ihr Angebot auf durch Abnehmermacht gekennzeichneten Absatzmärkten ständig, um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. Dieser Trend impliziert eine Verkürzung der Produktionsdauer und eine Verbreiterung der Angebotspalette. Dabei sehen sich Unternehmen gezwungen, Fertigungsressourcen für mehrere Produktgenerationen sowie für unterschiedliche Produkte einzusetzen. Im Zuge dessen werden neue Produkte und Fertigungstechnologien zunehmend in existierende Produktionssysteme (Brownfields) integriert, um diese effizient zu betreiben. Somit avancieren Integrationen zur Hauptaufgabe der Planung. Ein zeitversetzter Marktstart verschiedener Produkte impliziert eine permanente Anlaufsituation der Produktion. All diese Effekte resultieren in einem steigenden Qualitätsanspruch an die Planung. Während der Absicherung produktionstechnischer Konzepte gewinnt Effizienz an Bedeutung.

Die vorliegende Abhandlung erarbeitet in einem ersten Schritt Defizite etablierter Vorgehensweisen in der Phase Grundlagenermittlung und in der Interaktion zwischen verschiedenen Parteien. Ausgehend davon wird in einem zweiten Schritt eine innovative Methode entworfen, um die Planung von Integrationen zu verbessern. Die 3D-Digitalisierung mittels stationären 3D-Laserscannern mit Foto-Funktion wird appliziert, um ein aktuelles geometrisches Modell eines bestehenden Produktionssystems aufzunehmen. Dies erfolgt unter dem Gebot hoher Effizienz und Genauigkeit. Die resultierende farbige Punktwolke dient als Modell für sämtliche nachfolgenden Schritte. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass das Modell von zahlreichen Disziplinen genutzt werden kann und dass die Disziplinen untereinander interagieren können. Im Anschluss an die Konzeption und Umsetzung der Methode erfolgt eine Validierung anhand realer Planungsfälle an Standorten weltweit. Zur Unterstützung wird ein informationstechnisches System konzipiert, das die Datenverwaltung und die Visualisierung leistet.

Abstract

To stay competitive, manufacturers are constantly expanding their supply on buyer markets which are characterized by customer power. This trend involves a shortening of the production period, at the same time producers are broadening their assortment. Companies are forced to utilize manufacturing resources for multiple generations and for various products. As a result, new products and manufacturing technologies are progressively being integrated into existing production systems (brownfields) for efficient operation. Thus, integrations become the main task in planning. A differed market launch of different products implies a permanent start-up situation of production. All these effects result in an increasing quality demand to the planning. While confirming manufacturing concepts, efficiency gains in importance.

In a first step, this thesis elaborates deficits of established procedures in the phase establishment of the project basis and in the interaction between different parties. Based on this, in a second step, an innovative method is designed to improve the planning of integrations. The 3D digitalization using stationary 3D laser scanners with photo function is applied to acquire a current geometric model of an existing production system. This is performed, taking into account high efficiency and accuracy. The coloured point cloud which results serves as a model for all subsequent steps. The advantage of this method is that numerous disciplines are able to use the model and that the disciplines may interact with each other. Following the conception and realization of the method, validation takes place based on real planning cases at sites worldwide. To enable this, an information technology system is designed which performs data management and visualization.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Kurzinhalt	III
Abstract	V
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Abbildungsverzeichnis.....	XVII
Formelverzeichnis	XXI
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Arbeit.....	4
2 Begriffe und Grundlagen.....	7
2.1 Produktlebenszyklus	7
2.2 Produktion.....	8
2.2.1 Produktionssystem.....	8
2.2.2 Automobilproduktion.....	9
2.2.3 Planung der Produktion	10
2.3 Fabrikplanung.....	10
2.3.1 Fabrik.....	11
2.3.2 Planungsfälle der Fabrikplanung.....	11
2.3.3 Planungsphasen der Fabrikplanung.....	12
2.4 Abgrenzung des Betrachtungsbereichs	15
3 Anforderungen an die Planungsmethode und das System	17
3.1 Herausforderungen im Planungsprozess	17
3.2 Problemstellung der Datenakquise zu Planungsbeginn	22

3.3	Anforderungen an die Methode	26
3.3.1	Mensch	27
3.3.2	Technik	28
3.3.3	Prozess.....	29
3.4	Komponenten und Anforderungen des IT-Systems.....	30
4	Stand der Wissenschaft und Technik.....	33
4.1	Historie der Digitalisierung der Planung von Produktionssystemen	33
4.1.1	Computer Integrated Manufacturing.....	33
4.1.2	Produktdaten-Management	34
4.1.3	Die Digitale Fabrik	35
4.1.4	Produktlebenszyklusmanagement.....	35
4.1.5	Industrie 4.0	36
4.2	Digitale Ansätze zur Konzeptabsicherung.....	37
4.2.1	3D-Fabrikplanung	37
4.2.2	Simulation.....	38
4.2.3	Bibliotheksbasierte Ansätze, Modularisierung in der Planung	39
4.2.4	Fazit	39
4.3	Methoden zur Beschleunigung der Planung.....	40
4.3.1	Simultaneous Engineering.....	40
4.3.2	Partizipative Planung.....	41
4.3.3	Agilität in der Planung	41
4.3.4	Fazit	42
4.4	Änderungsplanung	43
4.4.1	Methoden zur Optimierung von Produktionssystemen	43
4.4.2	Kennzahlbasierte Änderungsplanung von Produktionssystemen	43
4.4.3	Methoden zur Umplanung von Fabriken mit Geometriefokus.....	45
4.4.4	Fazit	45
4.5	Erfassung geometrischer Daten zu bestehenden Produktionssystemen	46
4.5.1	Manuelle Vermessungen.....	46
4.5.2	Übersicht über Verfahren zur automatisierten Aufnahme von Geometrien	47

4.5.3	Photogrammetrie	48
4.5.4	Laufzeitverfahren zur elektrooptischen Distanzmessung.....	49
4.5.5	Systeme zur Lokalisierung von Objekten	52
4.5.6	Fazit	53
4.6	Laserscanning.....	53
4.6.1	Terrestrisches Laserscanning	54
4.6.2	Kinematisches Laserscanning.....	57
4.6.3	Ableitung von Modellen für die Planung	57
4.6.4	Fazit	59
4.7	Fazit zum Stand der Technik	60
5	Konzeption.....	63
5.1	Gesamtkonzeption der Methode.....	63
5.2	3D-Digitalisierung bestehender Produktionsstrukturen.....	64
5.2.1	Vorbereitung	65
5.2.2	Durchführung: Aufnahme von 3D-Scans der bestehenden Struktur.....	65
5.2.3	Postprocessing.....	66
5.3	Planung auf Basis von Punktwolken	72
5.3.1	Digitaler Besuch der Produktion	73
5.3.2	Konzeptplanung in der Punktwolke	73
5.3.3	Partizipative Detailplanung	75
5.4	IT-System zur Planung.....	77
5.4.1	Repositorium	77
5.4.2	Nutzermanagement	78
5.4.3	Komponente zur Visualisierung	79
5.4.4	Download-Schnittstelle	80
5.5	Zusammenfassung	81
6	Umsetzung.....	83
6.1	IT-System zur Planung.....	83
6.1.1	Repositorium	83

6.1.2	Nutzermanagement	86
6.1.3	Komponente zur Visualisierung	86
6.1.4	Download-Schnittstelle	87
6.2	Hardware zur 3D-Digitalisierung	89
6.3	Methode.....	91
6.3.1	Vorbereitung der 3D-Digitalisierung	91
6.3.2	Aufnahme der 3D-Scans	98
6.3.3	Postprocessing.....	100
6.3.4	Digitaler Besuch der Produktion	105
6.3.5	Konzeptplanung	106
6.3.6	Partizipative Detailplanung	110
6.4	Zusammenfassung	114
7	Validierung.....	117
7.1	IT-System.....	117
7.2	Methode.....	120
7.2.1	Vorbereitung der 3D-Digitalisierung	121
7.2.2	Aufnahme der 3D-Scans	121
7.2.3	Postprocessing.....	123
7.2.4	Digitaler Besuch der Produktion	124
7.2.5	Konzeptplanung	127
7.2.6	Partizipative Detailplanung	129
7.3	Zusammenfassende Bewertung der 3D-Digitalisierung in der Planung	137
7.3.1	Mensch	138
7.3.2	Technik	139
7.3.3	Prozess.....	141
7.3.4	IT-System	143
8	Zusammenfassung und Ausblick	145
8.1	Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse.....	145
8.2	Ausblick	147

8.2.1	Systeme zur 3D-Digitalisierung von Strukturen	148
8.2.2	Planung auf Basis der 3D-Digitalisierung	149
9	Literaturverzeichnis	151

Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
acatech	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
BIM	Building Information Modeling
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMW	Bayerische Motoren Werke
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAVE	Cave Automatic Virtual Environment (Mehrseitenprojektion)
CIM	Computer Integrated Manufacturing
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
EOP	End of Production (Ende der Produktion eines Produkts)
fps	frames per second (Bilder pro Sekunde)
GB	Gigabyte
GHz	Gigahertz
GPS	Global Positioning System
HDD	Hard-Disk Drive
HDR	High Dynamic Range

HMD	Head Mounted Display
IPA	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
KunstUrhG	Gesetz betreffend das Urheberrecht an Werken der bildenden Künste und der Photographie
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LiDAR	Light Detection And Ranging
MB	Megabyte
NC	Numerical Control
OEM	Original Equipment Manufacturer (Automobilhersteller als Original-Erstausrüster)
OStrV	Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung
PDCA	Plan Do Check Act (PDCA-Zyklus)
PDM	Produktdaten-Management
PLM	Produktlebenszyklus-Management
RAID	Redundant Array of Independent Disks
Rev	Revision
SATA	Serial Advanced Technology Attachment
SD Card	Secure Digital Memory Card (sichere, digitale Speicherkarte)
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SOP	Start of Production (Produktionsstart)
SSD	Solid State Drive (Halbleiter-Festplatte)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

VDI GMA	VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik
VR	Virtual Reality
WGP	Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik
WLAN	Wireless Local Area Network (drahtloses lokales Netzwerk)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Schematische Übersicht über den Aufbau der Arbeit.....	6
Abbildung 2-1:	Phasen des Produktlebenszyklus‘.....	7
Abbildung 2-2:	Phasen des Produktentstehungsprozesses	8
Abbildung 2-3:	Transformationsprozess der Produktion.....	8
Abbildung 2-4:	Prozesse der Automobilproduktion.....	9
Abbildung 2-5:	Phasen der Fabrikplanung	12
Abbildung 2-6:	Schritte zur Grundlagenermittlung.....	13
Abbildung 2-7:	Umfänge der Konzeptplanung.....	13
Abbildung 2-8:	Schritte der Detailplanung.....	14
Abbildung 2-9:	Phasen des Produktionsanlaufs.....	15
Abbildung 3-1:	Lebensdauern des Produkts und des Produktionssystems	18
Abbildung 3-2:	Entwicklung finanzieller Kennzahlen über den Produktlebenszyklus	19
Abbildung 3-3:	Anlauf eines neuen Produkts parallel zur Reifephase des etablierten Produkts.....	20
Abbildung 3-4:	2D-Layout einer Automobilmontage.....	23
Abbildung 3-5:	Betriebsmittel, die vor Ort – ohne digitale Konstruktion – erstellt wurden	25
Abbildung 3-6:	Zusammenfassung der Anforderungen an die Planungsmethode.....	30
Abbildung 3-7:	Zusammenfassung der Komponenten, die das IT-System enthalten soll	31
Abbildung 4-1:	Simultaneous Engineering – Parallelisierung von Entwicklung und Planung.....	41
Abbildung 4-2:	Vorgehen zur Änderungsplanung mit Fokus auf Produktionskennzahlen	43
Abbildung 4-3:	Verfahren zur Erfassung dreidimensionaler Daten	47
Abbildung 4-4:	Modell einer Produktionshalle, das via Photogrammetrie gewonnen wurde	48
Abbildung 4-5:	Funktionsweise eines Distanzmessgeräts nach dem Impulsverfahren.....	49
Abbildung 4-6:	Prinzipskizze des Phasenvergleichsverfahrens.....	50
Abbildung 4-7:	Polarwinkel ϑ und Azimutwinkel φ	51
Abbildung 4-8:	Schemaskizze zur Abschattung beim Laserscanning	54
Abbildung 4-9:	Klassischer Ablauf des Laserscannings	55

Abbildung 5-1: Gesamtablauf der innovativen Methode zur Planung von Produktionssystemen	64
Abbildung 5-2: Ablauf der 3D-Digitalisierung	64
Abbildung 5-3: Ablauf der Planung auf Basis von Punktwolken	72
Abbildung 5-4: Partizipative Planung in Punktwolken mit einem Planungsexperten	75
Abbildung 6-1: Logik zur Versionierung einzelner Planstände im Repositorium.....	85
Abbildung 6-2: Browserbasierter Viewer für Punktwolken	87
Abbildung 6-3: Virtual-Reality-System zur immersiven Visualisierung von Punktwolken.....	88
Abbildung 6-4: Geringe Auflösung der Punktwolken, die über ein kinematisches System gescannt wurden	90
Abbildung 6-5: Beispiel eines eingesetzten 3D-Laserscanners	91
Abbildung 6-6: Aufnahme desselben Raums mit der gewählten Auflösung von 0,04° Winkelunterschied (links) und der doppelten Auflösung.....	92
Abbildung 6-7: Punktwolken von Karosseriebauten.....	93
Abbildung 6-8: Qualität der Punktwolke bei unterschiedlichen HDR-Foto-Einstellungen	94
Abbildung 6-9: Auswahlsystematik zur Bestimmung der benötigten Anzahl an Scans.....	95
Abbildung 6-10: Positionierung mehrerer Scanner, sodass kein Sichtkontakt besteht	96
Abbildung 6-11: Streupunkte bei Materialien, die den Laserstrahl brechen.....	98
Abbildung 6-12: System aus mehreren SD-Karten zur Datenübertragung.....	100
Abbildung 6-13: Fehlerhafte Punktwolke, die aus der Registrierung mehrerer kinematisch gewonnener Datensätze hervorgegangen ist	101
Abbildung 6-14: Ausrichtung des Koordinatensystems entlang der Hauptachse der Struktur	102
Abbildung 6-15: Silhouetten von Personen in Punktwolken	102
Abbildung 6-16: Fehlerhafte Registrierung zweier Punktwolken	103
Abbildung 6-17: Digitaler Vergleich von verwandten Produktionsstationen	105
Abbildung 6-18: Zuschnitt der Punktwolke auf den Kernbereich	107
Abbildung 6-19: 3D-Box-Auswahl und perspektivische Selektion	107
Abbildung 6-20: Zerlegung einer Punktwolke in statische und mobile Elemente	108
Abbildung 6-21: Unterteilung einer Punktwolke in einzelne Objekte	109
Abbildung 6-22: Hybrider Planungsansatz zur Produktmitgestaltung.....	111

Abbildung 6-23: Bibliothek mit Punktwolken von gängigen Fertigungsressourcen	113
Abbildung 7-1: Auswertung der Nutzer des IT-Systems nach fachlicher Disziplin	118
Abbildung 7-2: Abschätzung des Brutto-Zeitbedarfs zum 3D-Scanning	122
Abbildung 7-3: Referenzkonzept für einen Logistikbereich	126
Abbildung 7-4: Trainingsplätze als Blaupause für Standorte weltweit	126
Abbildung 7-5: Positionierung von Lesegeräten und Aufklebern auf dem Produkt	130
Abbildung 7-6: Partizipative Planung der Bereitstellung	132
Abbildung 7-7: Hybride Planung	133
Abbildung 7-8: Planung in der Punktwolke	134
Abbildung 7-9: Klassischer Ansatz eines Störkantendurchlaufs mit Schablonen (links) gegenüber der Animation in der Punktwolke	135
Abbildung 7-10: Hybride Simulation zur Untersuchung einer Robotik-Applikation	136
Abbildung 7-11: Bewertung, zu welchem Grad die an die Methode gestellten Anforderungen erfüllt werden	137
Abbildung 7-12: Bewertung, zu welchem Grad das IT-System die nichtfunktionalen Anforderungen erfüllt	143

Formelverzeichnis

Formel 1:	Berechnung der Distanz D nach dem Impulsverfahren.....	50
Formel 2:	Zusammenhang zwischen Lichtgeschwindigkeit c_{Medium} und Brechungsindex n_{Medium}	50
Formel 3:	Berechnung der Distanz D durch Phasenvergleich.....	51
Formel 4:	Koordinatentransformation aus dem Kugelkoordinatensystem (d, ϑ, φ)	52
Formel 5:	Kalkulation der Koordinate eines Markers	56
Formel 6:	Minimierungsproblem zur Registrierung einer Punktwolke	56
Formel 7:	Anzahl der möglichen Nachbarschaftskombinationen	67
Formel 8:	Berechnung des Abstands eines Punkts von einer Ebene.....	68
Formel 9:	Minimierungsproblem bei der Rotation der Punktwolke	69
Formel 10:	Kalkulation des Abstands zweier Punkte.....	69

1 Einleitung

Die Integration neuer Produkte und Produktionsressourcen in bestehende Produktionssysteme avanciert zur vordringlichen Aufgabe der Planung. Vor dem Hintergrund immer kürzerer Produktlebenszyklen und breiterer Produktpaletten gilt es, die Planung effizienter zu gestalten. Mit der vorliegenden Abhandlung soll daher eine Methode entworfen werden, die die Grundlagen-erhebung für Integrationsprojekte mithilfe der 3D-Digitalisierung optimiert. Diese Methode soll so gestaltet werden, dass die Planung möglichst zügig auf einer aktuellen Basis beginnen kann. Zusätzlich ist die Interaktion zu befähigen, sodass mehrere Disziplinen Konzepte für Produktionssysteme in einem partizipativen Planungsprozess absichern können.

1.1 Problemstellung

Konsumgütermärkte entwickeln sich zunehmend zu Käufermärkten [BAUER 2007, S. 1382; WALTL & WILDEMANN 2015, S. 6], die durch eine starke „Abnehmermacht“ [KESPER 2012, S. 29] gekennzeichnet sind. Diese Entwicklung und der Kundenwunsch nach immer stärker individualisierten Produkten [BERESZEWSKI 2015, S. 3] motivieren produzierende Unternehmen, ihre Produktportfolios fortlaufend zu erweitern [EBEL ET AL. 2014, S. 6; BEHNERT 2017, S. 139]. Diese Spreizung der Modellpaletten [LANZA & ERTEL 2011, S. 606] ist in zahlreichen Industriezweigen zu beobachten [HÜTTENRAUCH & BAUM 2008, S. 113]. Besonders deutlich zeichnet sich dieser Trend in der Automobilindustrie ab, wo gerade die deutschen Automobilhersteller in der jüngeren Vergangenheit zahlreiche Nischen besetzt haben [ADELBERGER & HAFT-ZBORIL 2013, S. 41 ff.]. Mit dieser „Derivatisierung“ [LÖFFLER ET AL. 2011, S. 99] geht eine Degression der spezifischen Nachfrage je Derivat einher [BARTELS 2009, S. 118; SCHILLER & VON ALTEN 2014, S. 8] – insbesondere durch Kannibalisierungseffekte [ZERRES 2010, S. 35; MÜHLBÖCK 2017, S. 47] und Substitutionseffekte [ADELBERGER & HAFT-ZBORIL 2013, S. 45 f.].

Der intensive Wettbewerb in der Konsumgüterindustrie [BECKER 2007, S. 43 f.] führt neben der Erweiterung des Angebots dazu, dass die Phase der Serienproduktion von Konsumgütern verkürzt wird [LANZA & ERTEL 2011, S. 606; LÖFFLER ET AL. 2011, S. 99]. Folglich wird die Planung von Produktionssystemen zur kontinuierlichen Aufgabe [PAWELLEK 2014, S. 11]. Um die Vielzahl der Planungsprojekte ohne Steigerung des Ressourcenverzehr darzustellen, ist Effizienz von eminenter Bedeutung.

Die Lebensdauer von Produkten weicht ohnehin signifikant von jener von Fertigungsstätten ab [WESTKÄMPER & NIEMANN 2009, S. 525]. Die genannten Einflussfaktoren münden darin, dass Produkte aufeinanderfolgender Generationen in derselben Fabrik hergestellt werden, um diese effizient zu betreiben. Darüber hinaus lässt sich zum Beispiel in der Automobilindustrie der Trend beobachten, dass immer mehr unterschiedliche Produkte gleichzeitig in derselben Fabrik produziert werden [WIENDAHL ET AL. 2014, S. 36]. Um flexibel auf Nachfragevolatilität reagieren zu können, bestreben Produzenten, mehrere Modelle auf derselben Linie zu fertigen [WINDELBAND 2016, S. 80; KELLERHOFF 2017, S. 12 f.]. Im Allgemeinen laufen diese unterschiedlichen Produkte zeitversetzt an und erreichen somit ihre Hochphase versetzt. Dies bringt die Nebenwirkung mit sich, dass die Integration eines für das Produktionssystem neuen Produkts parallel zur Phase der Serienfertigung anderer Produkte erfolgt. Mit dieser Abkehr von der herkömmlichen Philosophie [WAGNER 2015, S. 5], ein Werk je Modell zu bauen, gewinnen Brownfield-Projekte [BRACHT ET AL. 2011, S. 251], im Zuge derer Produkte in eine vorhandene Struktur integriert werden, deutlich an Relevanz. Greenfield-Planungen, bei denen Fabriken von Grund auf ohne Bestand konzipiert werden [EBD.], treten in den Hintergrund.

In Summe resultieren all diese Umstände in höheren Anforderungen an die Planung von Produktionssystemen. Um die gravierenden wirtschaftlichen Konsequenzen eines Stückzahlverlustes [ABELE ET AL. 2003, S. 173] zu vermeiden und um bestehende Fabriken möglichst stark auszulasten, steht immer weniger Zeit für Umbauten und für Anlagenintegrationen zur Verfügung. Derartige Maßnahmen müssen also präziser als bis dato abgesichert werden. Die Planung hat Sorge zu tragen, dass zukünftige Produktionskonzepte grundsätzlich realisierbar sind und dass der Zeitplan für Integrationen strikt eingehalten wird. Branchenspezifische Transformationen auf der Produktseite – etwa die Elektrifizierung und Hybridisierung der Antriebe von Automobilen [WIMMELBÜCKER 2017] – sowie disruptive Einflüsse wie die Digitalisierung von Produktionssystemen steigern den Qualitätsanspruch an die Planung. Gleichzeitig darf die Planung selbst nicht mehr Ressourcen verzehren, schließlich herrscht ein intensiver Wettbewerb und die Spreizung der Produktpaletten macht Planungen häufiger erforderlich [GRUNDIG 2015, S. 18].

Der klassische Planungsprozess für Produktionssysteme ist sequentiell strukturiert [VDI 5200-1, S. 8 ff.]. Um die beschriebenen Integrationen mit hoher Genauigkeit untersuchen zu können, wird als

Planungsgrundlage ein aktuelles Abbild der Situation vor Ort benötigt [KÜHN 2006, S. 141 ff.]. Heutzutage entfällt ein Großteil der Zeit und Kosten in Planungsprojekten auf die Informationsakquise. Einerseits sind gerade geometrische Informationen in verschiedenen Systemen und in heterogener Art und Weise dokumentiert [PETZELT ET AL. 2010, S. 170], andererseits werden flexible Produktionssysteme häufig umstrukturiert [HELBING 2010, S. 12 ff.]. Methoden der „Schlanken Produktion“ [WOMACK ET AL. 1992, S. 23 ff.] unterstützen die permanente Optimierung und Modifikation der Fertigung. Diese Dynamik in Produktionssystemen macht historische Modelle und Planlayouts obsolet, da sie bereits nach kurzer Zeit die Realität am Shopfloor, also am Ort der Wertschöpfung [HERTLE ET AL. 2017, S. 118], nicht mehr hinreichend genau abbilden. Im Zuge der Informationsbeschaffung und -verifikation zu Planungsbeginn muss zunächst der Abgleich erfolgen, inwiefern ein Modell respektive Layout, das einen historischen Planstand widerspiegelt, mit der aktuellen Realität übereinstimmt. Bislang fehlt es an einer effizienten Methode zur Aggregation eines präzisen Modells, das ein bestehendes Produktionssystem repräsentiert und die Absicherung von Konzepten ermöglicht. Wird heute ein aktuelles geometrisches Modell einer bestehenden Fertigung benötigt, so gestaltet sich die Vermessung weitestgehend manuell. Neben dem Fehlerpotenzial bringt dies erhebliche finanzielle Defizite mit sich.

Die Planung eines Produktionssystems tangiert in Summe zahlreiche verschiedene Parteien [WIENDAHL ET AL. 2014, S. 459 ff.]. Exemplarisch sind hier Produktentwicklung, Bau-, Fabrik- und Logistikplanung sowie Betreiber und Lieferanten zu nennen. In der Praxis finden sich im Allgemeinen individuelle Werkzeuge je Planungspartei und dementsprechend verschiedene Repräsentationsformen eines Produktionssystems. Diese Teilmodelle, die ein Produktionssystem aus der Perspektive je einer bestimmten Disziplin abbilden, resultieren in Medienbrüchen zwischen den Beteiligten und torpedieren dadurch Ansätze zur ganzheitlichen Planung.

1.2 Zielsetzung

Historische Ansätze, die Fabrikplanung zu digitalisieren, beschäftigen sich eingehend mit der Neuplanung. Sie fokussieren dabei den vorwärts gerichteten Ansatz, relevante Objekte vom Groben ins Feine digital zu modellieren. Veränderungen in der realen Produktion finden heute keine hinreichend präzise Repräsentation im digitalen Modell, auf Basis dessen die Planung von

Produktionssystemen erfolgt. Gerade für Brownfield-Projekte erweist sich die Akquise einer präzisen Grundlage als aufwendig. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, diese Grundlagen-ermittlung zu optimieren. Es gilt, eine Methode zu entwerfen, die eine effiziente Digitalisierung bestehender Produktionsstrukturen leistet, sowie ein passendes Planungssystem zu kreieren, das diese Methode unterstützt.

Bisherige Ansätze versuchen, Planungsschritte zu parallelisieren, da für die Planung von Produktionssystemen insgesamt weniger Zeit zur Verfügung steht. Unterschiedliche Werkzeuge obstruieren allerdings die Zusammenarbeit zwischen den Disziplinen. Die neue Methode zur Planung von Produktionssystemen soll die Kooperation erleichtern, sodass sämtliche Ressorts wie beispielsweise die Montage-, die Logistik-, die Bauplanung als auch Anlagenlieferant und Betreiber an der Planung partizipieren können. Durch die Verbesserung der Kollaboration dieser Beteiligten sollen relevante Erkenntnisse früh in der digitalen Planung gewonnen werden. Die zu entwerfende Methode muss also von allen Parteien anwendbar sein. Dies setzt die Datenverfügbarkeit und -zugänglichkeit voraus, welche durch das korrespondierende System sichergestellt werden müssen. Zusätzlich ist eine Komponente zur Visualisierung der Daten als Teil des IT-Systems umzusetzen.

Die Methode ist anschließend in der Praxis zu validieren. Insbesondere gilt es, die Eignung für Integrationsplanungen zu bewerten. Um den Nutzen der neuen Methode für Planungsprojekte zu eruieren, werden Planungsfälle aus der Automobilindustrie herangezogen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Mit dieser Arbeit sollen ein System und eine Methode entwickelt werden, die die Planung von Produktionssystemen ermöglichen und dabei auf die effiziente Überführung bestehender Produktionssysteme in ein digitales Modell setzen.

Um die grundlegenden Termini einzuführen, erfolgt in Kapitel 2 die Einordnung der Planung in den Produktlebenszyklus und im Besonderen in den Produktentstehungsprozess. Das etablierte, phasenweise Vorgehen für Planungsprojekte wird vorgestellt. Anschließend wird der Betrachtungsbereich dieser Arbeit abgegrenzt. Die Ableitung eines Anforderungsprofils für die Planungsmethode

sowie für das unterstützende System, die beide eine Verknüpfung von realer Fertigung und digitaler Planung leisten sollen, erfolgt in Kapitel 3.

Auf Basis dieser Anforderungen wird im vierten Kapitel der Stand der Forschung und Technik analysiert. Hier werden Ansätze zur Digitalisierung der Planung eingeführt und relevante Bestrebungen, die Planung zu optimieren, zusammengefasst. Der Abgleich zwischen vorhandenen Ansätzen in der Planung und den erarbeiteten Anforderungen macht den Handlungsbedarf transparent.

Die zentralen Kapitel 5 bis 7 legen die Entwicklung des Systems und der Methode detailliert dar. Dazu wird im fünften Kapitel die Konzeption der innovativen Planungsmethode vorgestellt und das komplementäre System wird hinsichtlich Architektur und Funktionalität erläutert. Die eingeführte Planungsmethode setzt auf eine 3D-Digitalisierung existierender Produktionsstrukturen und inkludiert bewusst die Aufnahme von Farbfotos. Daraus wird ein geometrisches Modell generiert, das die Fertigung disziplinübergreifend repräsentiert. Auf Grundlage dieser Punktwolke erfolgt die mehrstufige Planung unter enger Einbindung planender und ausführender Disziplinen.

Die Umsetzung von System und Methode ist in Kapitel 6 dargelegt. Die neue Methode zur 3D-Digitalisierung ist historischen Ansätzen hinsichtlich der Effizienz überlegen. Nebenzeiten und unhandliche Utensilien werden explizit eliminiert. Das Postprocessing zur Fusion der Daten stützt sich auf natürliche Referenzen. In der Umsetzung wird die Robustheit und einfache Anwendbarkeit der Methode deutlich. Das realisierte IT-System dient der Datenverwaltung und Versionierung von Zwischenständen. Es offeriert den digitalen Besuch weltweit verteilter Produktionsstandorte.

Die neue Methode wird anhand realer Anwendungsbeispiele kritisch beleuchtet und der Nutzen wird validiert (Kapitel 7). Die farbigen Punktwolken zeichnen sich durch Präzision und Realitätsnähe aus. Dies erweist sich als vorteilhaft für die Interaktion zwischen Disziplinen. Die Methode ermöglicht die Generierung zahlreicher Konzepte und die Absicherung deren Realisierbarkeit.

Im letzten Kapitel erfolgt eine Zusammenfassung der Methode und der wesentlichen Erkenntnisse aus der praktischen Anwendung. Ein Ausblick, inwiefern die Methode von weiterer Entwicklung profitieren kann, schließt diese Arbeit ab.

Die folgende Übersicht veranschaulicht den Aufbau der Arbeit:



Abbildung 1-1: Schematische Übersicht über den Aufbau der Arbeit

2 Begriffe und Grundlagen

Der folgende Abschnitt klärt wesentliche Begriffe der Produktion und führt die für diese Abhandlung relevanten Aspekte der Planung ein. Ausgehend vom Produktlebenszyklus werden Grundlagen der Produktion dargelegt. Nach der Vorstellung des Fabrikplanungsprozesses nach VDI 5200-1 wird der Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit festgelegt.

2.1 Produktlebenszyklus

Der Lebenszyklus eines Produkts umfasst sämtliche Phasen von der Produktentwicklung bis zum Recycling [ARNOLD ET AL. 2011, S. 10; WESTKÄMPER 2014, S. 124]. Ausgehend von einer initialen Idee startet die Vorentwicklung, es folgen die Produkt- und Technologieentwicklung. Der Zeitraum zwischen Produktionsstart, kurz SOP (start of production), und Produktionsende, EOP (end of production) [JUNGLAS 2012, S. 10 ff.], wird als Produktion oder Serienfertigung bezeichnet. Mit dem Produktionsende wird das Produkt aus dem Programm eliminiert und vom Markt genommen [OPRESNIK & RENNHAKE 2015, S. 88]. Das Produkt wird bis zu seiner Außerbetriebnahme genutzt und anschließend recycelt. Die folgende Abbildung 2-1 stilisiert den zeitlichen Verlauf des Produktlebenszyklus' nach JUNGLAS [2012, S. 10].

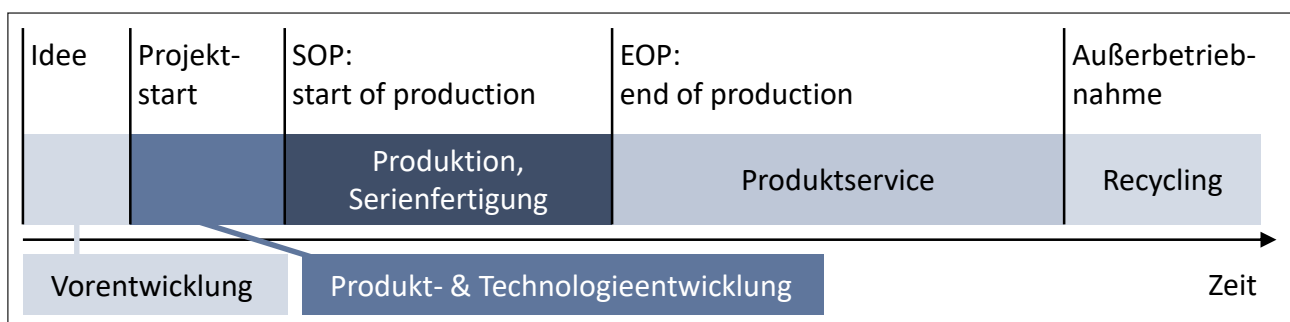


Abbildung 2-1: Phasen des Produktlebenszyklus' (in Anlehnung an JUNGLAS [2012, S. 10])

In der Vergangenheit ist ein genereller Trend zu immer kürzeren Produktlebenszyklen zu beobachten [SEIDEL 2005, S. 1; SENDLER 2009, S. 5; PAWELLEK 2014, S. 2].

ANDERL [2014, S. Y 17] beschreibt mit dem „Produktentstehungsprozess“ den Zeitraum des Produktlebenszyklus', bevor das Produkt vertrieben wird. Dazu werden die Phasen der Produktplanung

sowie der Entwicklung und Konstruktion durchlaufen. Es folgen die Arbeitsvorbereitung und die Produktion, wie Abbildung 2-2 zusammenfasst.

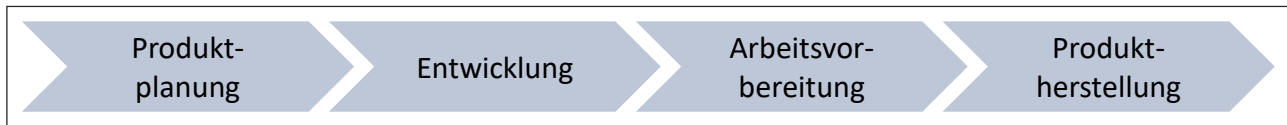


Abbildung 2-2: Phasen des Produktentstehungsprozesses (in Anlehnung an ANDERL [2014, S. Y 17])

Die Produktplanung definiert zu Beginn die Eigenschaften des Produkts, abgeleitet aus strategischen Vorgaben [SEIDEL 2005, S. 10]. Anschließend werden die Details festgelegt und das Produkt konstruiert. Im Rahmen der Arbeitsvorbereitung wird die Herstellung des Produkts konzipiert [ANDERL 2014, S. Y 17]. Schließlich erfolgt die Produktherstellung beziehungsweise Produktion.

2.2 Produktion

Die Produktion oder Fertigung beschreibt den „Prozess der zielgerichteten Kombination von Produktionsfaktoren (Input) und deren Transformation in Produkte (Erzeugnisse, Output)“ [GABLER 2013, S. 352]. Diesen Transformationsprozess illustriert Abbildung 2-3.

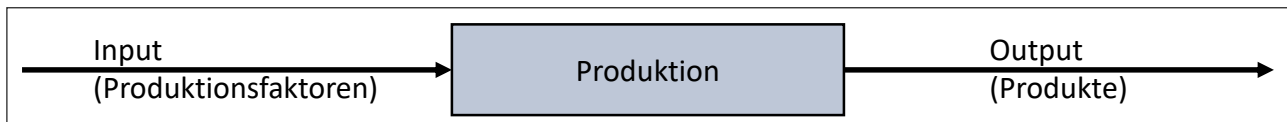


Abbildung 2-3: Transformationsprozess der Produktion (in Anlehnung an SCHNEEWEIß [1997, S. 2])

GUTENBERG [1951, S. 3] definiert Arbeitsleistung, Betriebsmittel und Werkstoffe als die „Elementarfaktoren“ der Produktion. SCHNEEWEIß [1997, S. 10 f.] unterscheidet in der Produktion die drei Reptitionstypen der Einzel-, Serien- und Massenfertigung und die Anordnungstypen der Baustellen-, Werkstatt- und Fließanordnung. Für weitere Details zu Anordnung und Ablauf der Produktion sei auf SCHNEEWEIß [1997, S. 11 ff.] verwiesen.

2.2.1 Produktionssystem

Die Produktion findet in Produktionssystemen statt, die eingehende Stoffe in Output transformieren [NYHUIS ET AL. 2008, S. 85]. Allgemein weist ein System eine verschiebbare Systemgrenze auf, über

die Input und Output bilanziert werden. Die Systemgrenze separiert den Betrachtungsraum von seiner Umgebung [FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 238 ff.] und legt damit fest, welche Objekte als Elemente des Systems angesehen werden. Die Relationen zwischen diesen Elementen ergeben die Struktur des Systems [PULM 2004, S. 37 ff.]. Die einzelnen Elemente selbst können als Subsysteme [FELDHUSEN ET AL. 2013, S. 779] aufgefasst werden. Die Elemente eines Produktionssystems sind in den wertschöpfenden Prozess der Herstellung involviert. DYCKHOFF [2003, S. 78] beschreibt die „Produktionsstelle“ als kleinste Einheit eines Produktionssystems. SCHRAFT ET AL. [1999, S. 163 f.] halten fest, dass die Systemgrenze so gelegt werden kann, dass sie einzelne Elemente oder einen gesamten Produktionsbetrieb umfasst. Ein Produktionssystem lässt sich vom Groben ins Feine in die Elemente Produktionsnetzwerk, Werk, Bereich, Arbeitsstation, Modul und Submodul untergliedern [NYHUIS 2008, S. 3]. Eine weitgehend kongruente Unterteilung findet sich in VDI 5200-1 [S. 7], dabei werden die Begriffe Werk und Fabrik sowie Arbeitsstation und Arbeitsplatz synonym verwendet.

2.2.2 Automobilproduktion

Die Umsetzung und Validierung der in dieser Arbeit entwickelten Methode erfolgt in Planungsfällen, die der Automobilproduktion entstammen. Zum grundlegenden Verständnis werden die Charakteristika der Fahrzeugherstellung hier grob vorgestellt.

Die Automobilproduktion lässt sich üblicherweise in vier Gewerke [KLUG 2010, S. 68], die die Kernprozesse der Produktherstellung durchführen, und in unterstützende Vorgänge untergliedern (siehe Abbildung 2-4). Im Normalfall verfügt ein Automobilhersteller beziehungsweise „OEM“ [HUNDERTMARK 2013, S. 1] über diese Gewerke Presswerk, Karosseriebau, Lackiererei und Montage.

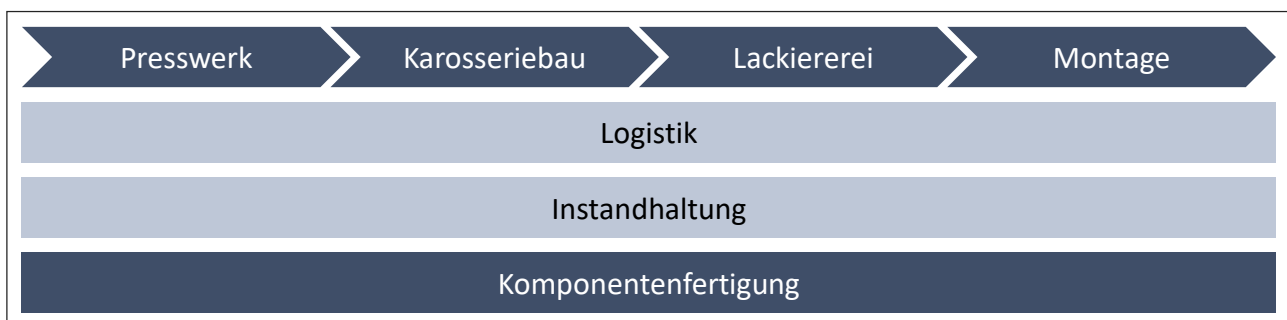


Abbildung 2-4: Prozesse der Automobilproduktion

Zu Beginn der Automobilproduktion werden im Presswerk Bleche aus „Coils“ [BIRKERT ET AL. 2013, S. 292] umgeformt. Jene werden im Karosseriebau zum Fahrzeuggerippe gefügt, auch Rohkarosserie oder „body-in-white“ [FIALA 1987, S. Q 13] genannt. Die unterschiedlichen Karosserieformen stellen in diesem Kontext die Baureihen und innerhalb einer Baureihe die „Derivate“ [KRUMM ET AL. 2014, S. 196] dar. Die Rohkarosserie wird anschließend in der Lackiererei oberflächenversiegelt und mit mehreren Schichten lackiert [WERTH 2007, S. 627]. Nun liegt die sogenannte lackierte Karosserie [KLUG 2010, S. 369] vor. In der Montage erfolgt der Einbau des Interieurs und weiterer Komponenten in die lackierte Karosserie, sodass das Fahrzeug das Werk nach einer Endkontrolle verlassen kann [KLAUKE ET AL. 2002, S. 146]. Daneben sind in der Fahrzeugherstellung die Logistik zur Teileversorgung der Kernprozesse und die Instandhaltung, welche Produktionsanlagen wartet und gegebenenfalls repariert, von Bedeutung. Die Kernprozesse werden durch die Komponentenfertigung flankiert, welche beim OEM oder bei Lieferanten stattfindet. Sie umfasst beispielsweise die Herstellung von Sitzen oder von Aggregaten wie Motor und Fahrwerk [BRACHT ET AL. 2011, S. 281].

2.2.3 Planung der Produktion

Bevor die Produktion erfolgt, wird diese geplant. Planung meint dabei allgemein die „gedankliche Vorwegnahme künftigen Handelns“ [SCHNEEWEIß 1991, S. 1 f.]. Die Produktionsplanung als ein zentraler Aspekt der Unternehmensplanung wird in der Produktionstechnik einerseits als Teil der Produktionsplanung und -steuerung betrachtet. Für Details zur Produktionsplanung und -steuerung sei hier auf DANGELMAIER [2009] und SCHUH & STICH [2012] verwiesen. Andererseits werden weitgehende Aspekte der Planung von Produktionssystemen unter dem Terminus der Fabrikplanung diskutiert. Wie in Kapitel 2.2.1 eingeführt, ist hervorzuheben, dass ein Produktionssystem mehrere Fabriken beziehungsweise Werke umfassen kann.

2.3 Fabrikplanung

Aus der Unternehmensplanung gehen die Unternehmensziele und die Strategie hervor [HERING 2015, S. 3 f.]. Die Strategie des Unternehmens induziert die Produktionsstrategie [WIENDAHL ET AL. 2014, S. 25 ff.]. Basierend auf dieser wird die Fabrikstrategie erarbeitet. Die Fabrikplanung ordnet sich mit diesem strategischen Rahmen in die Unternehmensplanung ein [AGGTELEKY 1987, S. 26]. Jene umfasst die Aspekte der Standort- und Gebäudeplanung, Anlagenlayout-, Materialfluss- und

Produktionsanlagenplanung [GRUNDIG 2015, S. 11] und wird als „systematischer, zielorientierter [...] Prozess zur Planung einer Fabrik von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion“ [VDI 5200-1, S. 3] verstanden. Die Ziele der Fabrikplanung nennen SCHENK ET AL. [2014, S. 17 f.] mit Wirtschaftlichkeit, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, Vernetzungsfähigkeit, Ressourceneffizienz, Attraktivität, Robustheit und Sicherheit.

2.3.1 Fabrik

Als abgeschlossener Produktionsstätte wird der einzelnen Fabrik in Produktionssystemen besondere Relevanz zuteil. Die Fabrik beschreibt nach VDI 5200-1 [S. 4] den „Ort, an dem Wertschöpfung durch arbeitsteilige Produktion industrieller Güter unter Einsatz von Produktionsfaktoren stattfindet“. Dabei werden in Fabriken Produktionsgüter, die durch weitere Produktionsprozesse verarbeitet werden, oder Konsumgüter, welche Endkunden direkt verbrauchen, hergestellt [OPRESNIK & RENNHAKE 2015, S. 4].

2.3.2 Planungsfälle der Fabrikplanung

VDI 5200-1 [S. 4] unterscheidet die vier Planungsfälle respektive Planungsursachen Neuplanung, Umplanung, Rückbau und Revitalisierung.

Die *Neuplanung* beschreibt die Planung einer Fabrik von Grund auf, ohne dass dabei eine vorhandene Bausubstanz zu berücksichtigen ist. Dieser Fall wird als Planung auf der grünen Wiese [WIENDAHL ET AL. 2001a, S. 197] oder als Greenfield-Planung [BRACHT ET AL. 2011, S. 251] bezeichnet. Die *Umplanung* hingegen betrachtet eine bestehende Fabrik, die es umzustrukturieren gilt. Im Zuge einer solchen Brownfield-Planung oder Integration sind die Restriktionen zu berücksichtigen, die aus dem laufenden Fabrikbetrieb und den bestehenden Ressourcen und Betriebsmitteln resultieren [VDI 5200-1, S. 4]. Wird eine Fabrik stillgelegt, wird dies als *Rückbau* bezeichnet, wohingegen eine *Revitalisierung* eine „Industriebrache“ [ESTERMANN & NOLL 1997, S. 8 ff.] erneut nutzbar macht.

In den letzten Jahren ist zu beobachten, dass Umplanungen immer relevanter werden [WIENDAHL ET AL. 2001a, S. 197; HARMS ET AL. 2003, S. 227] und Neuplanungen in den Hintergrund treten: PAWELLEK [2014, S. 152] schätzt die Neuplanung von Fabriken auf der grünen Wiese als „unproblematisch“ ein und betont zugleich die Seltenheit solcher Fälle.

2.3.3 Planungsphasen der Fabrikplanung

Der Prozess der Fabrikplanung wird nach VDI 5200-1 [S. 8 ff.] in die Phasen Zielfestlegung, Grundlagenermittlung, Konzeptplanung, Detailplanung, Realisierungsvorbereitung, Realisierungsüberwachung und Hochlaufbetreuung eingeteilt. Das Projektmanagement übernimmt die Steuerung des Planungsprozesses. Den Planungsprozess in Phasen nach VDI 5200-1 [S. 8 ff.] illustriert Abbildung 2-5.

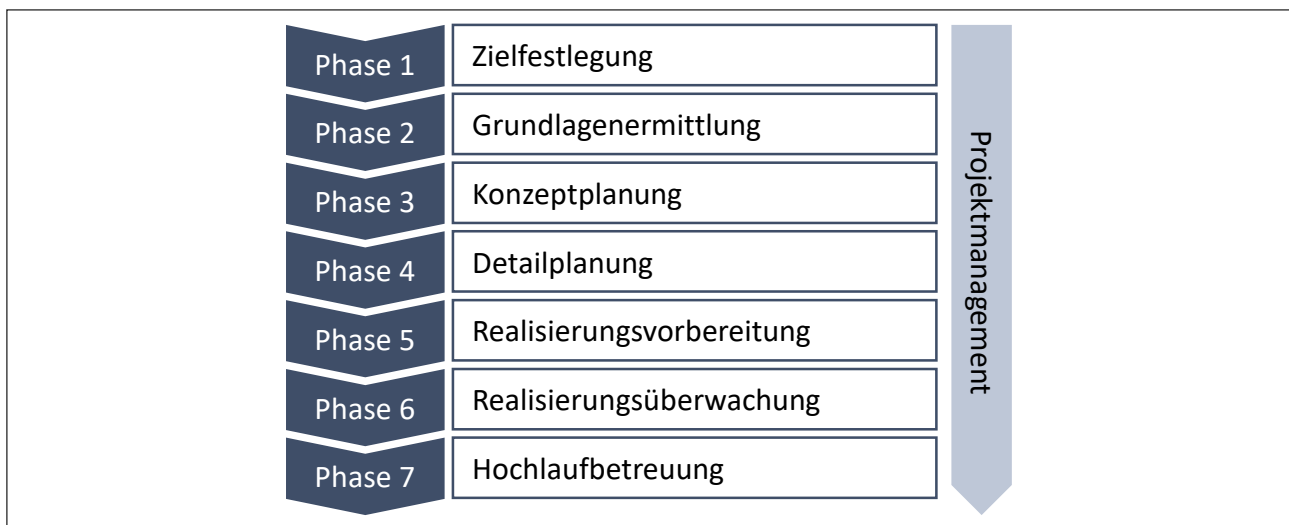


Abbildung 2-5: Phasen der Fabrikplanung(in Anlehnung an VDI 5200-1 [S. 8])

In der Literatur finden sich zahlreiche äquivalente Vorschläge für solch einen sequentiellen Planungsprozess. Für einen Überblick über diese Ansätze sei auf SCHUH ET AL. [2007, S. 195 f.] sowie auf AURICH ET AL. [2015, S. 191 f.] verwiesen.

Jede dieser Planungsphasen setzt sich nach VDI 5200-1 [S. 10 ff.] aus mehreren Schritten zusammen, welche ebenfalls sequentiell durchgeführt werden:

Phase 1 der *Zielfestlegung* umfasst die Schritte Analyse der Unternehmensziele, Festlegung der Fabrik- und Projektziele, Aufstellung der Bewertungskriterien und die Festlegung der Arbeitspakete. In der zweiten Phase erfolgt mit der *Grundlagenermittlung* die Informationsbeschaffung und Informationsauswertung, wie Abbildung 2-6 zeigt. Im Rahmen dieser Datenakquise werden die grundlegenden Daten für die folgenden Phasen zusammengetragen. Danach werden die Daten verdichtet und die Erreichbarkeit der definierten Ziele geprüft.



Abbildung 2-6: Schritte zur Grundlagenermittlung [VDI 5200-1, S. 11]

Für Integrationsprojekte werden während der Grundlagenermittlung die benötigten Maße der bestehenden Fabrikstruktur ermittelt und überprüft.

Daran schließt sich die dritte Phase der *Konzeptplanung* an (siehe Abbildung 2-7). Sie beinhaltet die Schritte der Strukturplanung, Dimensionierung, Idealplanung und Realplanung, welche in ein realisierbares Fabrikkonzept inklusive eines Groblayouts münden.

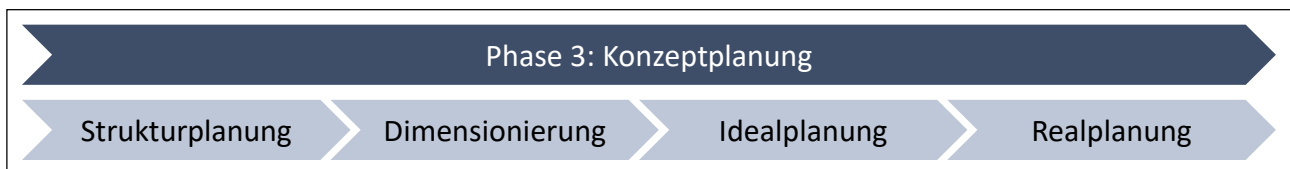


Abbildung 2-7: Umfänge der Konzeptplanung [VDI 5200 -1, S. 12]

Die Strukturplanung wird verstanden als die „alle Wirksysteme und Funktionsbereiche umfassende planerische Tätigkeit zur langfristigen Gestaltung einer Fabrik“ [PAWELLEK 2014, S. 149]. Die Strukturplanung leistet die Anordnung der Funktionseinheiten in der Fabrik. Die Dimensionierung dient der Abschätzung des Bedarfs an Fläche und Betriebsmitteln [VDI 5200-1, S. 13]. Die Idealplanung liefert die räumliche Anordnung in Form verschiedener Layoutvarianten. Dieser Entwurf erfolgt bewusst unter Ausblendung jeglicher Restriktionen, um das räumlich ideale Layout zu kreieren [WIENDAHL ET AL. 2014, S. 497 ff.]. Das Ideallayout stellt die „flächenbezogene, idealisierte räumliche Anordnung von Struktureinheiten“ [SCHENK ET AL. 2014, S. 336] dar. WIENDAHL ET AL. [2014, S. 500] sehen die Funktion der Idealplanung bei Integrationsprojekten darin, zu untersuchen, ob eine Nutzung der bestehenden Gebäudestruktur überhaupt möglich ist. Die Realplanung transformiert den idealen Anordnungsplan in ein realisierbares Layout; dazu finden sämtliche Restriktionen Berücksichtigung, die im Zuge der Grundlagenermittlung determiniert wurden [WIENDAHL ET AL. 2014, S. 500 ff.].

In Phase 4 erfolgt die *Detailplanung* zur Feinplanung, Erstellung von Genehmigungsanträgen und Erstellung der Leistungsbeschreibung, wie Abbildung 2-8 illustriert. Hier findet die Detaillierung der

ausgewählten Variante und der Prozesse statt. Daneben werden die Prozessfolge, die Fertigungsressourcen und die erforderliche Qualifikation der Mitarbeiter bestimmt. Nun liegen das Feinlayout und das Lastenheft vor.

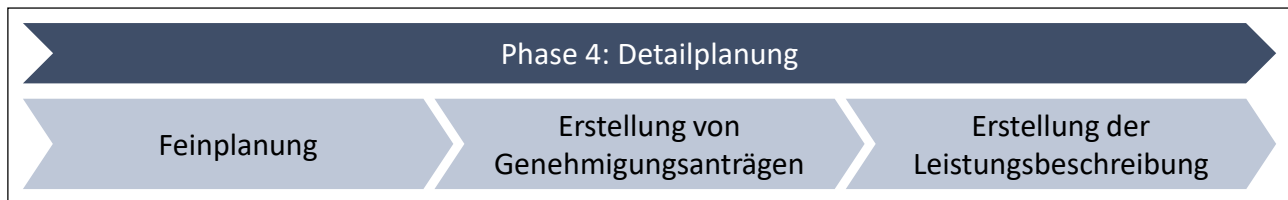


Abbildung 2-8: Schritte der Detailplanung [VDI 5200-1, S. 15]

Das Feinlayout enthält neben dem Gebäudeentwurf die Beschreibungen von Informations-, Kommunikations- und Materialflüssen. Die Prozessfolge inklusive der jeweiligen Ressourcen wird in diesem Schritt definiert [VDI 5200-1, S. 15]. Das Lastenheft legt die „Gesamtheit der Forderungen an die Lieferungen und Leistungen“ [DIN 69901-5, S. 9] fest. Dieses wiederum setzen meist mehrere Lieferanten in ihre Pflichtenhefte um, in denen sie die Realisierungsvorgaben [DIN 69901-5, S. 10] beschreiben.

Die *Realisierungsvorbereitung* (Phase 5) beinhaltet die Umsetzungsplanung, welche in Angebotseinholung, Vergabe und Überwachung der Ausführungsplanung unterteilt wird.

Die sechste Phase der *Realisierungsüberwachung* beinhaltet die Koordination und Dokumentation der Realisierung. Die Abschlussdokumentation dient dazu, alle erforderlichen Informationen für den späteren Fabrikbetrieb festzuhalten. Kommende Umplanungen sind auf diese Dokumentation angewiesen, sie bietet die Basis für eine spätere Grundlagenermittlung.

In der siebten und letzten Phase setzt sich die *Hochlaufbetreuung* aus der Anlaufbetreuung und der Bewertung der Fabrik zusammen. Dabei beschreibt der sogenannte Produktionsanlauf den Zeitraum zwischen der Freigabe der Vorserie und dem Erreichen der stabilen Serienproduktion [PETERS & HOFSTETTER 2008, S. 10]. Abbildung 2-9 verdeutlicht die Zusammenhänge und Begrifflichkeiten beim Produktionsanlauf. Die Phase des Produktionsanlaufs umfasst die Fertigung der Vorserie, der Nullserie sowie den Hochlauf der Produktion. Mit der Freigabe der Serienproduktion erfolgt der Produktionsstart, der SOP, und der Hochlauf beginnt. Sobald die Ausbringungsleistung das geplante Niveau erreicht hat, spricht man von der Serienproduktion – das Produktionsniveau befindet sich auf „Kammlinie“ [SCHMITT 2015, S. 7].

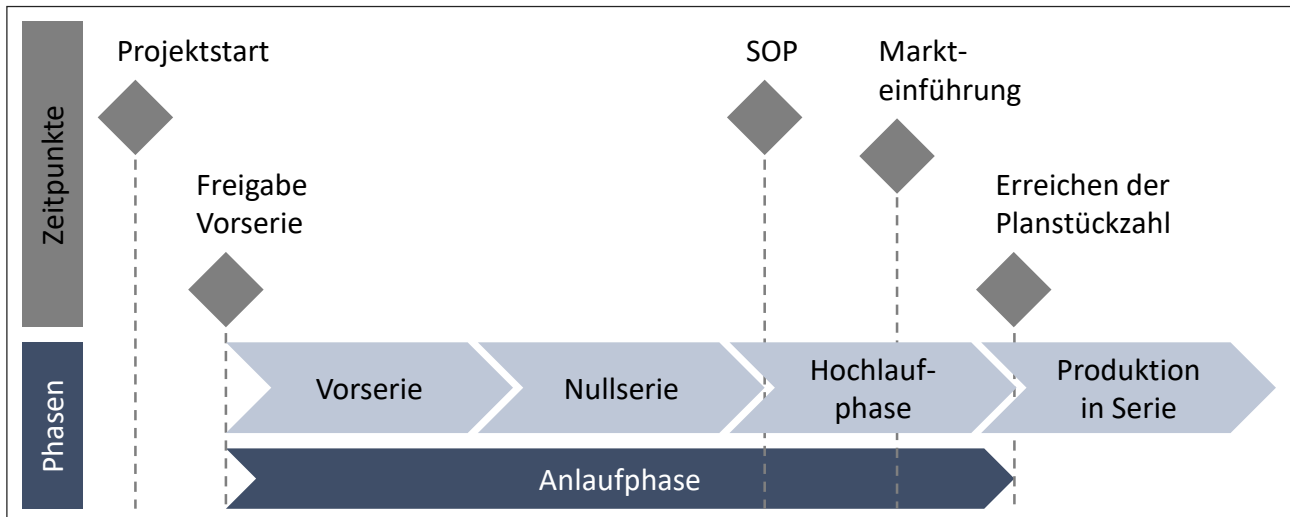


Abbildung 2-9: Phasen des Produktionsanlaufs (in Anlehnung an SCHMITT [2015, S. 7])

Nach dem Anlauf auf Normalbetrieb [SCHENK ET AL. 2014, S. 161] wird gemessen, zu welchem Grad die initial definierten Fabrikziele erfüllt werden [VDI 5200-1, S. 21].

Als Ergebnis des gesamten Fabrikplanungsprozesses liegt eine Fabrik vor, die auf dem geplanten Leistungsniveau stabil produziert [VDI 5200-1, S. 20]. Damit stellt der Serienanlauf die Schnittstelle zwischen der Planung und dem Fabrikbetrieb dar.

Der Fabrikbetrieb umfasst das Betreiben der Fabrik, das Lenken und das Steuern der Abläufe [WIRTH ET AL. 2012, S. 394]. Service und Instandhaltung sichern den Fabrikbetrieb nachhaltig. Während der täglichen Nutzung des Produktionssystems gilt es, dieses zu optimieren [WIECH 2013, S. 323], um die Effektivität und die Effizienz des Fabrikbetriebs kontinuierlich zu steigern [DOMBROWSKI & EBENTREICH 2015, S. 1]. WIRTH ET AL. [2012, S. 394] beschreiben den Fabrikbetrieb daher als die „Realisierung einer wettbewerbsfähigen Wertschöpfung von industriellen Gütern“.

2.4 Abgrenzung des Betrachtungsbereichs

Diese Abhandlung befasst sich intensiv mit bestehenden Produktionssystemen. Betrachtet werden in erster Linie Integrationsplanungen in Brownfield-Strukturen. Im Fokus steht ergo der Planungsfall der Umplanung. Weniger Aufmerksamkeit wird der Neuplanung, der Revitalisierung und dem Rückbau zuteil. Dabei werden Produkte und Produktionsressourcen als Integrationsobjekte behandelt.

Hervorzuheben ist die Konzentration auf Produktionssysteme, wobei explizit eine Vielzahl an Werken betrachtet wird. Die zu entwickelnde Methode bezieht sich auf Strukturen eines Produktionssystems, die sich an Standorten weltweit befinden können. Die innovative Methode soll die in Kapitel 1.2 formulierten Ziele verfolgen und sich zur Applikation auf sämtlichen Granularitätsniveaus der Planung eignen (vgl. Abschnitt 2.2.1). Sie soll für Produktionssysteme unabhängig vom Repititions- oder Anordnungstyp anwendbar sein. Deshalb erfolgt explizit keine abschließende Festlegung auf die Automobilproduktion. Vielmehr gilt es, die Übertragbarkeit auf ähnliche Produktionssysteme zu evaluieren.

Eine Betrachtung vollautomatisierter Produktionssysteme wird bewusst nicht forciert, da die dynamischen Vorgänge im Inneren solcher Anlagen multiplen physikalischen Effekten unterliegen, die an dieser Stelle nicht untersucht werden sollen. Außerdem sind derartige Produktionssysteme durch eine vergleichsweise geringe Dynamik der gesamten Struktur charakterisiert, was zu zeigen sein wird (siehe 3.2). Somit kommt die oben eingeführte Motivation dort nur in Teilen zum Tragen. Die vorliegende Arbeit rückt den planerischen Part vor dem Start der Serienproduktion in den Mittelpunkt. Operative Facetten, die in die Sphäre der Produktionsplanung und -steuerung fallen, werden ausdrücklich ausgeklammert.

Die Planung von Produktionssystemen soll weiterhin digital stattfinden. Da sich in aktuellen Planungsprojekten Defizite der geometrischen Datenaufnahme offenbaren, wird in der vorliegenden Abhandlung besonderes Augenmerk auf die 3D-Digitalisierung bestehender Fertigungsstrukturen gerichtet. Im Zuge dessen soll ein dreidimensionales Abbild als Planungsbasis verfügbar gemacht werden, sodass zweidimensionale Repräsentationsformen zukünftig nicht länger eingesetzt werden müssen. Die für diese Arbeit geltende Systemgrenze exkludiert eine Extraktion von Meta-Informationen – wie die interne Baugruppenstruktur von Objekten oder deren präzise Kinematik.

Ein passendes Informationssystem soll die Planung unterstützen und Daten sowohl verfügbar als auch handhabbar machen. Das IT-System soll dahingehend schlank gestaltet werden, dass State-of-the-Art-Rechner weiterhin für die Planung genutzt werden können.

3 Anforderungen an die Planungsmethode und das System

Dieses Kapitel befasst sich mit den Anforderungen an die Planungsmethode und das unterstützende System. Ein wesentliches Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine effiziente Methode zur Digitalisierung von Produktionssystemen zu entwerfen. Der Begriff der Digitalisierung meint dabei die Transformation einer realen Struktur aus dem gegenständlichen Raum in den digitalen Raum respektive in eine informationstechnische Repräsentation. Die Digitalisierung soll ein geometrisches Abbild von Produktionssystemen liefern und somit die Planung von Integrationen in bestehende Produktionssysteme, die nicht über ein permanent aktuelles Abbild verfügen, befähigen. Auf Basis dieses digitalen Modells sollen sich Erkenntnisse möglichst früh gewinnen lassen, sodass Lösungen von hoher Qualität installiert werden und späte Änderungen vermieden werden können.

In diesem Kapitel werden zunächst aktuelle Herausforderungen in der Planung von Produktionssystemen identifiziert (3.1), bevor Defizite im Bereich der Datenakquise während der Grundlagenermittlung dargelegt werden (3.2). Ausgehend von den Insuffizienzen im etablierten Planungsprozess werden schließlich die Anforderungen an eine neue Methode (3.3) und ein korrespondierendes informationstechnisches Planungssystem (3.4) deduziert.

3.1 Herausforderungen im Planungsprozess

Die oben eingeführte Situation auf den Absatzmärkten induziert die Erweiterung des Produktportfolios und die Verkürzung der Serienproduktion von Konsumgütern. Folglich wird die Planung von Produktionssystemen zur permanenten Aufgabe [HARMS ET AL. 2003, S. 227; PAWELLEK 2014, S. 11]. Die folgenden Abschnitte arbeiten die Implikationen für die Planung heraus, die aus der Reduktion der Produktlebenszyklen und aus Innovationen in Produktionssystemen resultieren.

Steigende Bedeutung von Brownfield-Projekten gegenüber Greenfield-Planungen

Strukturelle Elemente des Produktionssystems weisen eine Nutzungsdauer ungleich höher der Produktlebensdauer auf [AGGTELEKY 1987, S. 316 f.; PAWELLEK 2014, S. 23]. Den Fertigungsstätten wird Wandlungsfähigkeit [BERKHOLZ 2008, S. 190 ff.; NYHUIS ET AL. 2008, S. 85 ff.] abverlangt, sodass sich mehrere Generationen von Produkten in derselben Fabrik produzieren lassen. In der wissenschaftlichen Diskussion wird zwischen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit differenziert. Demnach

beschreibt Flexibilität die Eigenschaft eines Produktionssystems, dass es „im Rahmen eines prinzipiell vorgedachten Umfangs“ anpassbar an „veränderte Gegebenheiten“ ist [WESTKÄMPER ET AL. 2000, S. 24]. Wandlungsfähigkeit versetzt eine Fabrik demgegenüber in die Lage, auf ungeplante Veränderungen zu reagieren [WIENDAHL & HERNÁNDEZ 2002, S. 137].

Den Produktionszeitraum eines Produkts und die Nutzungsdauer von Komponenten der Fabrikstruktur illustriert Abbildung 3-1 nach PAWELLEK [2014, S. 23].

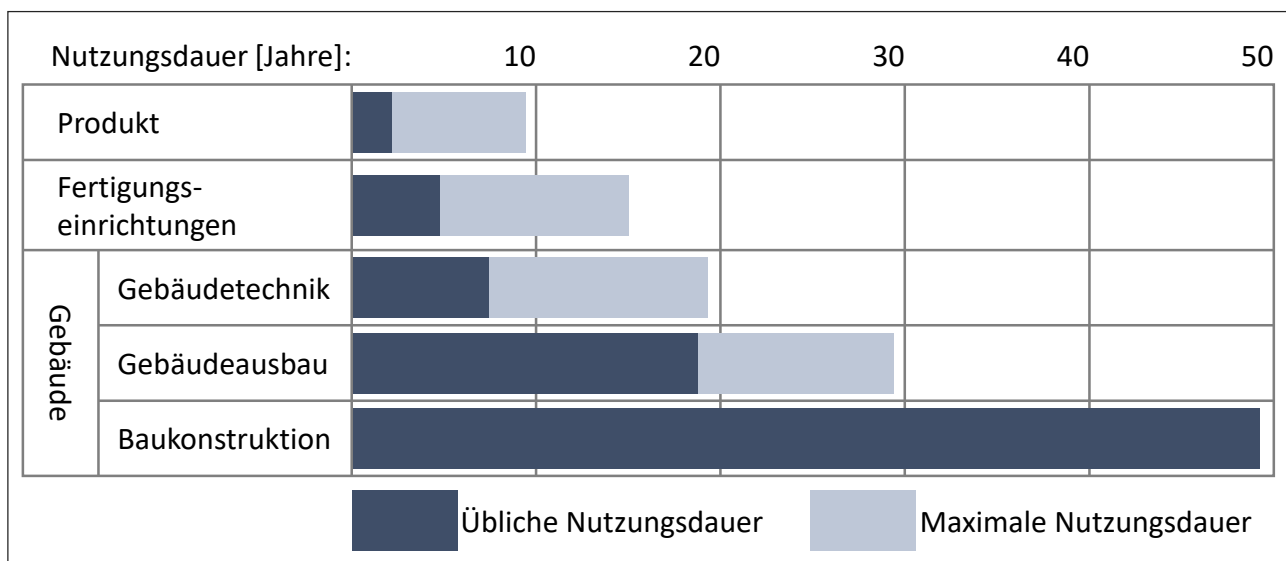


Abbildung 3-1: Lebensdauern des Produkts und des Produktionssystems (in Anlehnung an PAWELLEK [2014, S. 23])

In Abbildung 3-1 wird ersichtlich, dass die Fertigungseinrichtungen über mehrere Generationen von Produkten hinweg genutzt werden. Diese Divergenz der Lebenszyklen von Produkt und Fertigungsstruktur wird durch den Trend hin zu kürzeren Produktlebensdauern [THOMMEN ET AL. 2017, S. 13] bei gleichzeitig steigender Anzahl der Varianten eines Herstellers verschärft [MÖßMER ET AL. 2007, S. 4 f.; CIUPEK 2017, S. 17]. Folglich gewinnen Integrationen in bestehende Produktionssysteme an Bedeutung – Brownfield-Projekte stellen inzwischen den relevantesten Planungsfall dar [LANDHERR ET AL. 2013, S. 172; PAWELLEK 2014, S. 152; MICHNIEWICZ ET AL. 2017, S. 582]. Besonders deutlich ist diese Entwicklung im Segment der Elektronik [BERTHEL ET AL. 1990, S. 128; GRUNER 1996, S. 16 ff.] und in der Automobilindustrie [RENNER 2007, S. 3 ff.] zu beobachten. GÜNTHER [2015, S. 177 f.] attestiert erhöhten Aufwand zur Implementierung von Brownfield-Projekten.

Die Gemischtfahrweise bedeutet Anläufe parallel zur Hochphase etablierter Produkte

Produktionsunternehmen versuchen, bestehende Fabriken möglichst stark auszulasten [SCHENK ET AL. 2014, S. 364], um rentabel zu wirtschaften. Somit resultiert der beschriebene Trend zu breiteren Produktprogrammen darin, dass unterschiedliche Produkte auf denselben Fertigungsressourcen hergestellt werden [WAGNER 2015, S. 4 f.]. Diese Gemischtfahrweise [MAJOHR 2008, S. 14; WITTEK 2013, S. 43] wird in Produktionssystemen zunehmend zum Standard.

OLBRICH [2001, S. 62 ff.] beschreibt den modellhaften Absatzverlauf eines Produkts nach seiner Markteinführung mit den Phasen Einführung, Wachstum, Reife, Sättigung und Degeneration.

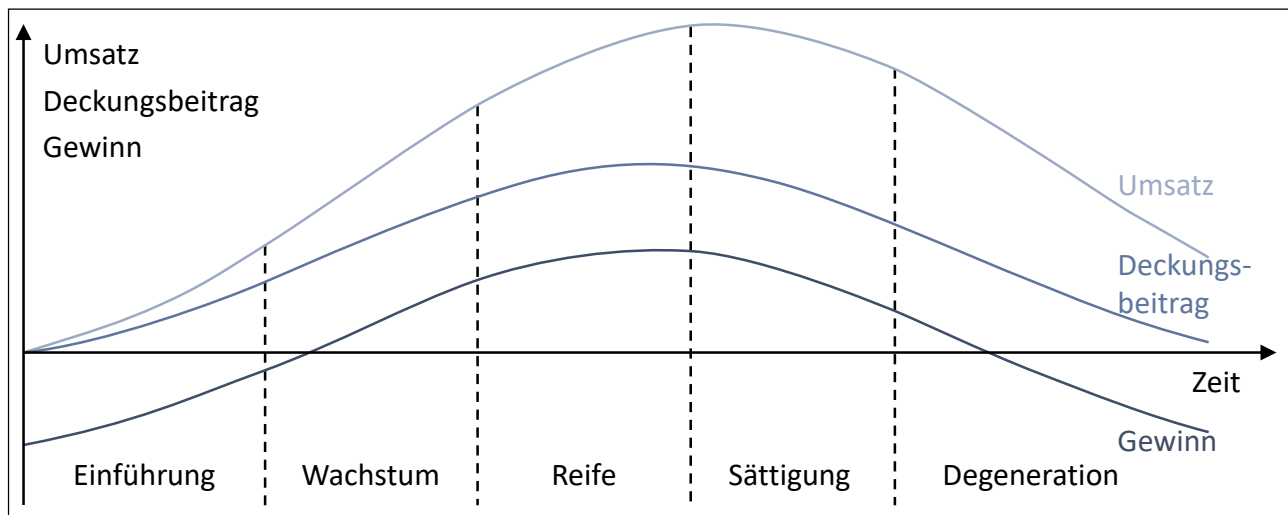


Abbildung 3-2: Entwicklung finanzieller Kennzahlen über den Produktlebenszyklus (in Anlehnung an OLBRICH [2001, S. 62])

Während der Reifephase eines Produkts erzielt das produzierende Unternehmen die höchsten Gewinne mit diesem Produkt [OLBRICH 2001, S. 62], wie Abbildung 3-2 versinnbildlicht.

Die einzelnen Produkte oder Derivate, die in einer Fabrik hergestellt werden, starten üblicherweise versetzt zueinander am Markt. Abbildung 3-3 exemplifiziert den Verlauf des betriebsparallelen Anlaufs anhand zweier Produkte, die mit zeitlichem Abstand zueinander eingeführt werden. GOTTSCHALK & HOESCHEN [2008, S. 177] halten allgemein fest, dass ein Anlauf in einer bestehenden Produktionsstätte den laufenden Betrieb nur minimal beeinflussen respektive nicht behindern darf.

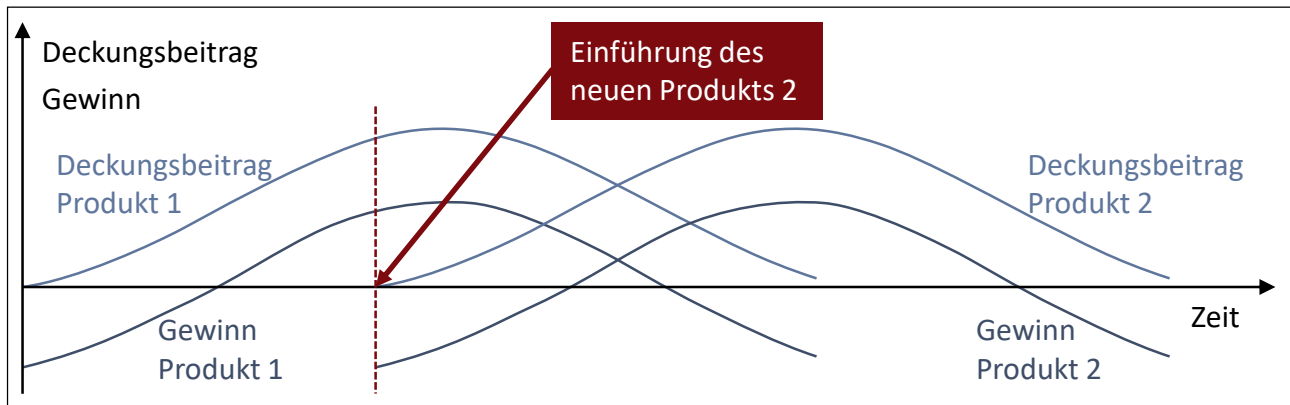


Abbildung 3-3: Anlauf eines neuen Produkts parallel zur Reifephase des etablierten Produkts

Abbildung 3-3 zeigt den idealen Anlauf des neuen Produkts, bei dem es zu keiner negativen Auswirkung auf die Fertigung des etablierten Produkts kommt. Diese Grafik impliziert darüber hinaus, dass der Anlauf des neu eingeführten Produkts erheblichen Einfluss auf die Ertragskennzahlen nehmen kann: Sofern die Integration eines neuen Produkts den Produktionsstillstand für ein etabliertes Produkt bedeutet, geht damit der Verlust von Einheiten des etablierten Produkts einher [WIESINGER & HOUSEIN 2002, S. 505]. Um die finanziellen Auswirkungen einer Produktionsunterbrechung durch derartige Absatzeinbußen [LANZA & ERTEL 2011, S. 606] möglichst gering zu halten, wird Anläufen parallel zum Serienbetrieb ein minimales Zeitfenster eingeräumt [SCHUH ET AL. 2005, S. 405 f.]. Die Realisierung muss optimal vorbereitet werden. Späte Änderungen während der Inbetriebnahme [GÜNTHER 2015, S. 191 ff.] und des Anlaufs, die sich besonders aufwendig und kostspielig gestalten [EHRENSPIEL ET AL. 2014, S. 149 f.], müssen vermieden werden [KERBER 2016, S. 4]. Die ständige Erweiterung des Produktportfolios hat zur Folge, dass Anläufe immer häufiger parallel zum Serienbetrieb erfolgen [ZEILHOFER-FICKER 2010, S. 5] und sich eine permanente Anlaufsituation in Produktionssystemen ergibt [BÖHLER & GLOGER 2007; SCHINDLER 2016, S. 136]. Dieser Umstand bedeutet einen verschärften Qualitätsanspruch für die Planung [REICHHARDT & GOTTSWINTER 2003, S. 275 f.], insbesondere geometrische Komplikationen müssen vor der Realisierung erkannt und beseitigt werden.

Innovationen in den Fabriken selbst

Produktionssysteme können als mechatronische Systeme [ISERMANN 2008, S. 4 ff.] betrachtet werden [GRONBACH 2002, S. 2-1]. Der Anteil von Software in derartigen Systemen steigt generell

[STETTER 2011, S. 9; EIGNER & KOCH 2017, S. 3], weshalb dem Softwaretest und der Validierung des Gesamtsystems während der Inbetriebnahme entsprechend Zeit eingeräumt werden muss.

Seit Beginn der aktuellen Dekade diskutieren Politik und Forschung in Deutschland „Cyber-Physische Systeme“ intensiv [BROY 2010a; ACATECH 2011; VERL ET AL. 2012]. Derartige Systeme setzen sich aus Sensoren, Aktoren, Netzwerk und Kommunikationseinrichtung zusammen [BROY 2010b, S. 21]. Sie können über die Kommunikationsschnittstelle an weltweite Netzwerke, wie das Internet, angeschlossen werden [LEE 2008, S. 369 ff.]. In der Produktion finden solche Systeme als „Cyber-Physische Produktionssysteme“ [REINHART ET AL. 2013, S. 84 ff.] Anwendung, die zum Beispiel autonome Transportsysteme [SCHMITT 2014, S. 6] und neuartige Robotik-Applikationen umfassen [NAUMANN ET AL. 2014, S. 510 ff.]. Forscher erhoffen sich dadurch in erster Linie eine gesteigerte Produktivität [VDI GMA 2013, S. 3 ff.], eine höhere Flexibilität [SEEBACH 2011, S. 93 ff.] und eine Reduktion der kritischen Ausfälle von Produktionssystemen im Betrieb [VOGEL-HEUSER 2014, S. 44 ff.]. Es wird zugleich betont, dass diese Systeme in erheblichem Maße mehr Software mitbringen, als dies etablierte Produktionssysteme heute üblicherweise tun [RUSSWURM 2013, S. 21 ff.]. Dies resultiert in einem erhöhten Gesamtaufwand zur Entwicklung dieser Cyber-Physischen Produktionssysteme [SCHINDLER ET AL. 2015, S. 124 ff.]. In Anbetracht der immer kürzeren Zeitfenster für Brownfield-Projekte stellt dieser Trend innovativer Produktionssysteme besonders hohe Anforderungen an die Planung. Neben herkömmlichen, geometrischen Fragestellungen muss der steigende Softwareanteil sowie insbesondere das Verhalten solcher Cyber-Physischer Systeme intensiv untersucht werden, bevor derartige Konzepte in der Produktion implementiert werden [EBD.].

Forscher postulieren für neu zu installierende, sogenannte Smart Factories [ZÜHLKE 2009, S. 31 ff.] eine automatische Aktualisierung des digitalen Fabrikmodells [LUCKE ET AL. 2009, S. 106 ff.] und somit eine hundertprozentige Kongruenz zwischen einem Produktionssystem und seinem digitalen Abbild zu jedem Zeitpunkt [BAUERNHANSL 2015, S. 28 f.]. Bestehende Produktionssysteme lassen sich jedoch nur in wenigen Fällen mit vertretbarem Aufwand derart smart aufrüsten [BAUERNHANSL ET AL. 2016, S. 15].

Fazit

Brownfield-Projekte avancieren zur Hauptaufgabe für die Planung von Produktionssystemen. Permanente Anläufe prägen den Alltag und die Zukunft in Produktionssystemen; Anläufe neuer Produkte erfolgen immer häufiger parallel zum Serienbetrieb etablierter Produkte. Daher gilt es, Verzögerungen während der Implementation vor Ort in der Fabrik zu vermeiden. Gleichzeitig muss die Planung effizienter werden, um die Vielzahl an Anläufen ohne Steigerung der Planungskosten zu bewerkstelligen. Die Zeitfenster für die Analyse klassischer Fragestellungen wie der geometrischen Konzeption, Layoutgestaltung und Absicherung werden verkürzt, damit der Software-Part von Produktionssystemen, die aktuell eine Digitalisierung erfahren, en détail untersucht werden kann.

3.2 Problemstellung der Datenakquise zu Planungsbeginn

Für eine Vielzahl von Planungsfällen ist heutzutage zu konstatieren, dass zu Beginn der Informationsbeschaffung im Rahmen der Grundlagenermittlung kein Layout oder Plan beziehungsweise kein hinreichend aktuelles geometrisches Modell der Produktionsstruktur vorliegt [RICHTER 2009, S. 165 ff.]. Vorhandene Layouts unterscheiden sich signifikant von der aktuellen Situation des Fertigungsbereichs, vorliegende Pläne eignen sich aufgrund ihres zu geringen Detaillierungsgrades nicht für die Planung. Die mangelnde Verfügbarkeit von Modellen zu Planungsbeginn maßgeblich durch zwei Faktoren bedingt: Einerseits werden die strukturellen Maßnahmen im Rahmen der Realisierung nur in unzureichendem Maße dokumentiert. Andererseits erfahren die Elemente eines Produktionssystems, die durch eine hohe Flexibilität geprägt sind, im Verlauf der Serienproduktion einen starken Wandel. Diese Veränderungen am Shopfloor finden nur in ungenügendem Maße zurück in ein digitales Bestandsmodell [FISSE ET AL. 2009, S. 124]. Ehemalige Planlayouts können nicht als Basis für Integrationen zu Rate gezogen werden, da sie veraltet sind. Die folgenden Passagen widmen sich diesen beiden Themen.

Unzureichende Dokumentation im Rahmen der Realisierungsüberwachung

Bei der Realisierung eines Konzepts hat die Implementierung der Anlagen und die Stabilisierung der Prozesse [FRANZKOCH & GOTTSCHALK 2008, S. 62] höchste Priorität, um den Produktionsbetrieb auf Kammlinien-Niveau pünktlich sicherzustellen. Sämtliche Aktivitäten fokussieren daher die Optimierung des neuen Produktionssystems. Schwachstellen in Maschinenhardware und -software,

die bei der Installation erkannt werden, werden während des Aufbaus beim Kunden behoben [SCHEIFELE 2015, S. 8]. Im Rahmen der Anlageninstallation oder der Realisierungsüberwachung entfällt schlimmstenfalls eine vollumfängliche Abschlussdokumentation oder diese wird nur auf grober Detaillierungsstufe vorgenommen. Folglich liegen nach Projektabschluss Modelle vor, die einen ehemaligen Planstand widerspiegeln. Die Dokumentation desjenigen Stands, wie er tatsächlich realisiert wurde, fehlt.

In der Praxis werden realisierte Lösungen für Produktionssysteme bislang nicht flächendeckend dreidimensional dokumentiert [SPILLNER ET AL. 2009, S. 180]. Zu den meisten Gebäuden liegen 2D-Grundrisse beziehungsweise Baupläne [BAUMGÄRTEL ET AL. 2011, S. 23; KERBER 2016, S. 5 ff.] vor, die die tragende Strukturen im Groben abbilden. Partiiell finden sich Layouts, welche beispielsweise die Anordnung einzelner Funktionseinheiten innerhalb eines Gebäudes oder entlang einer Linie wiedergeben [GRUNDIG 2015, S. 158 f.].

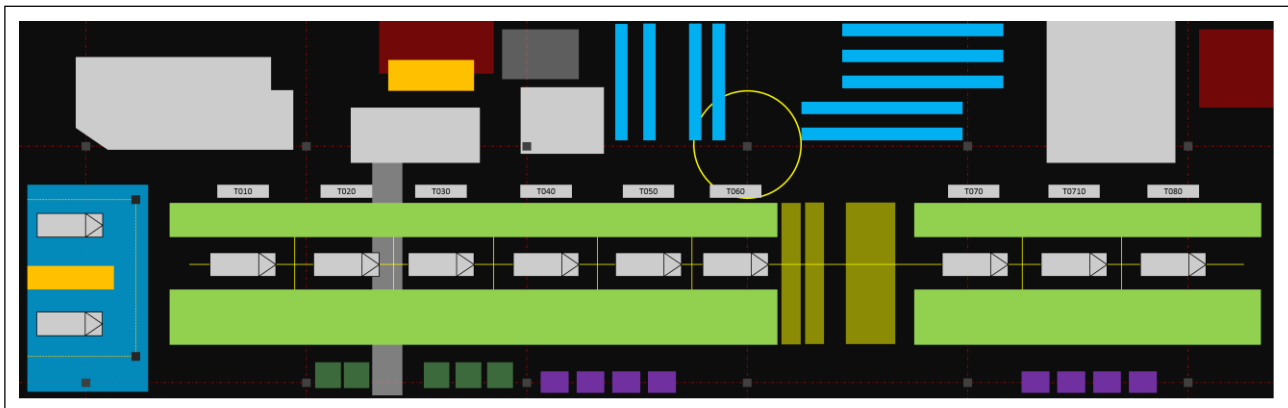


Abbildung 3-4: 2D-Layout einer Automobilmontage (Schriftzüge weitgehend zensiert)

Abbildung 3-4 zeigt exemplarisch ein zweidimensionales Layout einer Fertigung. Solche Layouts erweisen sich in der Praxis als problematisch, wenn Maßstab, Legende oder die Versionierung in Form des Datums fehlen. Zweidimensionale Abbilder resultieren darüber hinaus in einem hohen Aufwand, sobald 3D-Modelle zur Konkretisierung der Planung benötigt werden [WIENDAHL ET AL. 2014, S. 558]. Derzeit durchläuft die Baubranche einen Veränderungsprozess. Der Trend geht hin zu einer dreidimensionalen Planung und Bewirtschaftung von Gebäuden, bekannt unter dem Begriff Building Information Modeling, kurz BIM [BORRMANN ET AL. 2015, S. 4]. Forscher bescheinigen Planungsprojekten, welche auf BIM-Modellen aufsetzen, eine hohe Reife [SCHÖNHEIT & KUHNERT

2017, S. 222]. Für bestehende Fertigungsstrukturen oder angejahrte Fabrikbauten finden sich bislang kaum derartige 3D-Modelle, die den realisierten Ist-Stand des Gebäudes widerspiegeln [KERKENBERG 2016, S. 6].

In den Planungsprozess von Produktionssystemen sind insbesondere die Produktentwicklung, die Bau- und die Fabrikplanung involviert [NYHUIS ET AL. 2004, S. 96]. Zudem gilt es, Anlagenlieferanten und Betreiber zu berücksichtigen. Planer sehen sich immer wieder mit mehreren Quellen konfrontiert, die Informationen zum selben Fertigungsbereich enthalten [PETZELT ET AL. 2010, S. 170]. Domänenspezifische Modelle beinhalten in der Regel ein reduziertes Abbild der Realität. So zielt die Produktentwicklung darauf ab, einzelne Bauteile zu designen und diese zu Baugruppen zusammensetzen [VAJNA ET AL. 2009, S. 213 f.]. Historisch sind in der Bauplanung zweidimensionale Etagenpläne und Grundrisse etabliert [WEITKEMPER 2015, S. 50 ff.]. Einen tiefen Einblick in die unterschiedlichen Modelle je Disziplin geben VAJNA ET AL. [2009, S. 159 ff.]. Medienbrüche zwischen den Beteiligten [WIRTH ET AL. 2001, S. 328], die insbesondere auf den Einsatz unterschiedlicher Werkzeuge zurückzuführen sind, stellen ein Hemmnis dar.

Damit die interdisziplinäre Kooperation stattfinden kann, sind also verschiedene Teilmodelle zu synchronisieren und zu plausibilisieren, um eine einheitliche, korrekte Datenbasis zu erhalten. Inkonsistenzen in den verschiedenen Datensätzen obstruieren diese Synchronisation allerdings. Sofern eine Fusion einzelner Modelle technisch realisierbar ist, sind Konvertierungen der Formate oder händische Rekonstruktionen erforderlich. Diese Konvertierungen bedeuten Zeit- und Kostenaufwand, zudem besteht besonders während einer manuellen Umwandlung Fehlerpotenzial.

Dynamik durch kontinuierliche Optimierungen am Shopfloor

Wettbewerbsdruck auf den Absatzmärkten zwingt die Produzenten, permanent effizienter zu werden [KLETTI & SCHUMACHER 2014, S. 4] (vgl. 1.1). Dies ist einer der Treiber für kontinuierliche Verbesserungsprozesse, wie sie in den vergangenen Jahrzehnten in Fabriken weltweit etabliert wurden [DOMBROWSKI & MIELKE 2015, S. 13 ff.].

Für solche kontinuierlichen Optimierungsmaßnahmen bieten sich insbesondere Fabrikbereiche hoher Flexibilität an, welche mit relativ geringem Aufwand an veränderte Rahmenbedingungen angepasst werden können [HEINEN ET AL. 2008, S. 24]. Ein Bereich einer Fabrik weist eine hohe Flexibilität auf, sofern sich dort wenige Fixpunkte [ROSCHER 2008, S. 48] oder feste Strukturen

[WESTKÄMPER 2002, S. 249] finden, sodass sich beispielsweise die Anordnung der Fertigungsressourcen zügig ändern lässt. WILKE [2006, S. 2] konstatiert etwa für die Fördertechnik, dass sich Automatisierungsgrad und Flexibilität entgegenstehen. Die Flexibilität ist demnach in Fabrikbereichen, die von manuellen Tätigkeiten gekennzeichnet sind, hoch. Jene Prinzipien finden daher vor allem in den Bereichen der Montage, der Logistik und der Bereitstellung breite Anwendung, da diese über zahlreiche entsprechend flexible Ressourcen verfügen [BULLINGER & LUNG 1994, S. 40]. Die kontinuierlichen Veränderungen im Sinne der Schlanke Produktion bringen als Nebeneffekt eine Dynamik des Produktionssystems mit sich. Diese Dynamik in der Fertigung erschwert es, bestehende Dokumente wie Pläne aktuell zu halten. Während des Produktionsbetriebs finden also zahlreiche Modifikationen am Produktionssystem statt, die nicht hinreichend digital repräsentiert werden [MACKE & RULHOFF 2013, S. 95].

Ein weiteres Element der Schlanke Produktion sind schlanke Betriebsmittel, die direkt am Shopfloor gestaltet und verändert werden können. Beispielsweise Lean-Manufacturing- oder Rohrsteck-Systeme [NEUMANN 2015, S. 123] räumen den Werkern große Gestaltungsfreiräume ein. Gestelle, Regale, Wagen und weitere Bereitstellungslösungen lassen sich aufbauen, ohne dass es eines Konstruktionsprozesses bedarf [KUNERT 2010, S. 12 ff.]. Abbildung 3-5 zeigt beispielhaft mehrere Betriebsmittel, die aus Rohrsteck-Systemen angefertigt wurden. Mit dieser Möglichkeit, Betriebsmittel vor Ort zu kreieren, geht die Herausforderung mangelnder Dokumentation dieser Fertigungsressourcen einher.



Abbildung 3-5: Betriebsmittel, die vor Ort – ohne digitale Konstruktion – erstellt wurden

Neben geplanten Änderungen der Fabrik finden vor Ort teils Umbauten statt, ohne dass diese über den geregelten Planungsprozess vorbereitet werden [RICHTER 2009, S. 165]. Solche Ad-hoc-Maßnahmen verändern die Fabrik ebenfalls. Gerade wenn diese nicht top-down vorgeplant werden, finden Ergebnisse in den wenigsten Fällen zurück in Layouts.

Fazit

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass heutzutage in den wenigsten Fällen zu Beginn einer Änderungsplanung geometrische Informationen in Form von Layouts oder 3D-Modellen vorliegen, die den tatsächlichen Stand des Produktionssystems bezüglich Aktualität und Präzision hinreichend entsprechen. Dies ist einerseits fehlender oder unzureichender Dokumentation der Realisierungsphase geschuldet und andererseits tagtäglichen Optimierungen und inkrementellen Umbauten während des Produktionsbetriebs zuzuschreiben. Ein Prozess zur umfassenden Pflege von Layouts und Modellen ist in der Praxis nicht erfolgreich.

HAWER ET AL. [2015, S. 348 ff.] sehen unscharfe Basisinformationen als entscheidende Ursache für „Verzögerungen, Fehlplanungen und zusätzliche[n] Kosten“ in Planungsprojekten. Dabei identifizieren sie die Datenaufnahme und die Modellierung als besonders kritische Prozesse [EBD.]. In der Praxis zeigt sich, dass sowohl Lieferant als auch OEM die Fabrikstruktur mehrfach per Hand vermessen und digital modellieren, um fehlende geometrische Informationen zu aggregieren und um den aktuellen Zustand eines Produktionssystems entsprechend digital abzubilden [FRAUNHOFER IPA 2002, S. 3].

3.3 Anforderungen an die Methode

Bislang entfällt in Planungsprojekten ein erheblicher Zeitanteil auf die Informationsbeschaffung und -auswertung. Gerade die Akquise eines geometrischen Modells der bestehenden Produktionsstruktur und dessen anschließende Verifikation sind aufwendig und werden Stand heute in einem Projekt mehrfach durchgeführt. Die vorliegende Arbeit hat zur Aufgabe, eine Methode zur Planung von Produktionssystemen zu entwerfen, welche den oben genannten Herausforderungen begegnet. Um die Methode zu befähigen, soll ein korrespondierendes Planungssystem entworfen werden.

Die vorgestellten Schwierigkeiten, denen sich die Planung derzeit gegenüberstellt, münden in die Anforderungen an die neue Methode, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt wird. Eine Methode ist dabei nach PONN & LINDEMANN [2011, S. 10] als „regelbasierte, planmäßige Vorgehensweise [...]“ zu verstehen, welche als Handlungsempfehlung eine Reihenfolge mehrerer Einzelaktionen anbietet. Unter Anforderungen werden „Beschaffenheit, Fähigkeit oder Leistung, die ein Produkt [...] erfüllen oder besitzen muss“, verstanden [DIN 69901-5, S. 6].

Die Anforderungen an die zu entwickelnde Methode lassen sich in drei Kategorien unterteilen: Es gilt, den Menschen – den Planer – zu berücksichtigen (3.3.1), zudem hat die neue Methode technische (3.3.2) und prozessuale Anforderungen (3.3.3) zu erfüllen. Im Folgenden werden diese Anforderungen an die Methode detailliert erläutert.

3.3.1 Mensch

Die Methode findet dann Anwendung, wenn sie leicht handhabbar ist und zuverlässig funktioniert. Dies bedeutet, dass geringer Aufwand für den Bediener erforderlich ist und zur Initialisierung ein beschränktes Maß an Expertise benötigt wird. Die gesamte Vorgehensweise soll daher möglichst wenige manuelle Schritte umfassen. Digitalisierung und Planung müssen also das Kriterium der *Einfachheit* erfüllen.

Die Digitalisierung vor Ort muss robust funktionieren. *Robustheit* meint in diesem Kontext, dass der Bediener vorzugsweise nicht durch äußere Einflussfaktoren eingeschränkt wird. Das Verfahren muss die Digitalisierung von Produktionssystemen auf unterschiedlichen Granularitätsleveln ermöglichen, das heißt vom Fertigungsmodul und -submodul bis hin zum gesamten Produktionssystem. Es muss dementsprechend unempfindlich gegenüber den charakteristischen Umgebungsbedingungen sein, wie sie sich in Werken weltweit finden.

Die Daten sollen eine *intuitive Interpretation* gestatten. Zur Interpretation als auch zur Planung darf maximal die Fachkenntnis erforderlich sein, wie sie es für etablierte Pläne oder Zeichnungen ist. Idealerweise sollten die resultierenden Modelle leichter verständlich sein. Neben der Repräsentation der Fabrikstruktur ist die Möglichkeit zur Modifikation der Modelle zur Befähigung des kreativen Planungsprozesses vonnöten.

3.3.2 Technik

Aus der Betrachtung des digitalen Planungsprozesses heraus werden die technischen Anforderungen an die Methode abgeleitet.

Die immanente *Genauigkeit* der Technik und des gesamten Prozesses zur Digitalisierung muss hoch sein, sodass folgende planerische Aktivitäten auf einer soliden Datengrundlage aufsetzen.

Im Bereich der Gebäudestruktur sind nach DIN 18202 Toleranzen von ± 30 Millimetern auf Maße von 15 bis 30 Metern zulässig. Die Digitalisierung einer bestehenden Fabrik muss wenigstens eine Präzision in dieser Größenordnung liefern, sodass das digitale Abbild für sämtliche Phasen der Planung (siehe 2.3.3) eingesetzt werden kann. Für eine hohe Aussagegüte der Planung ist eine um eine Größenordnung bessere Genauigkeit der Digitalisierung anzustreben.

Neben der geometrischen Präzision von Maßen ist es entscheidend, dass das digitale Abbild die Realität hinreichend genau approximiert. Es müssen sich sämtliche für die Fertigung relevanten Objekte im digitalen Modell wiederfinden, zudem müssen sich diese identifizieren lassen. Dieser Aspekt der *Realitätstreue* ist also entscheidend, der Abstraktionsgrad [WENZEL ET AL. 2008, S. 166] ist passend zu wählen.

Ferner wird dem System *Mobilität* abverlangt. Idealerweise ist das System zur Digitalisierung transportabel, sodass es sich ohne besondere Vorkehrungen in weltweit verteilte Produktionsstätten transportieren lässt. Dazu sollte es insbesondere kompakt und leicht sein.

Die weiteren technischen Anforderungen ergeben sich primär aus betriebswirtschaftlichen Überlegungen heraus. So muss die Methode eine hohe *Kosteneffizienz* aufweisen. Der Nutzen eines aktuellen, dreidimensionalen Modells muss den zeitlichen und monetären Aufwand für die Digitalisierung deutlich überkompensieren. Die Digitalisierung muss also deutlich schneller ein Abbild der Produktion liefern, als etablierte Verfahren dies tun. Wie in Abschnitt 3.1 vorgestellt, verlangt der Wettbewerbsdruck in nahezu allen Branchen eine hohe Auslastung der Produktionsanlagen [PETERS & HOFSTETTER 2008, S. 10]. Die Digitalisierung darf den laufenden Betrieb nicht beeinträchtigen. Relevante Produktionsbereiche müssen sich während normaler Unterbrechungen, sprich in Pausen oder nachts, respektive binnen regulärer Produktionsstillstände aufnehmen lassen. Die *Geschwindigkeit* des Gesamtprozesses wird andererseits durch die Zeit für die Planung determiniert. Eine Datenaufbereitung muss binnen Stunden bis wenigen Tagen erfolgen und die schnelle Kreation von Konzepten erlauben.

3.3.3 Prozess

Letztlich folgen prozessuale Anforderungen, sodass die Methode etablierte Schritte der Planung unterstützt.

Generell soll die Methode in sämtlichen Produktionssystemen *anwendbar* sein. Für Automobilfabriken bedeutet dies beispielsweise die Anwendbarkeit in den genannten Gewerken vom Presswerk bis zur Montage (siehe 2.2.2) sowie in der Logistik und der Komponentenfertigung. Dabei bringen bestehende Fertigungsstätten die Herausforderung mit sich, dass sich dort zahlreiche Objekte befinden. Das Fahrzeugwerk der BMW Group in München beispielweise wurde im Laufe der Historie mehrfach erweitert, sodass es heute eine verwinkelte Struktur auf fünf Ebenen darstellt [PREM 2017]. Die Digitalisierung muss gerade in solchen Strukturen funktionieren, wo geometrische Aspekte aufgrund der Enge von besonderer Relevanz sind. Die ganzheitliche Anwendbarkeit ist erfüllt, wenn sich Gebäude und sämtliche Produktionsressourcen, also Säulen, Maschinen, Fördertechnik, Produkte usw. entsprechend von der Digitalisierung erfassen lassen.

Methoden der Schlanken Produktion wie die Gestaltung von Arbeitsplätzen mittels Kartonagen-simulation, „Cardboard Engineering“ [KRENKEL & LENDZIAN 2015, S. 96 ff.], oder die Kontinuierliche Verbesserung, „Kaizen“ [LORENZ 2014, S. 26 ff.], führen zu einer ständigen Weiterentwicklung von Produktionssystemen. Die Digitalisierung muss diese etablierten Methoden unterstützen und idealerweise die digitale Planung mit solchen operativen Methoden verknüpfen. Diese *Integrationsfähigkeit* soll also die Symbiose zu etablierten Methoden sicherstellen. Zusätzlich gilt es, etablierte informationstechnische Werkzeuge [BRACHT ET AL. 2011, S. 81 ff.] zur 2D- als auch zur 3D-Planung anzubinden, mithilfe derer üblicherweise statische sowie dynamische Effekte untersucht werden.

Die Planung der Produktion findet als interdisziplinärer Prozess mit zahlreichen beteiligten Parteien statt. Insbesondere vor dem Hintergrund der Parallelisierung der Entwicklung und Planung [EVERSHEIM 1995, S. 2 f.] ist es elementar, dass die neue Methode für sämtliche Teilnehmer verständlich ist. Diese Möglichkeit zur *Partizipation* soll die interdisziplinäre Zusammenarbeit erleichtern, sodass Planer und weitere Beteiligte profitieren. Neben unterschiedlichen Experten sollten auch die Produktionsmitarbeiter eingebunden werden, um die Qualität der Konzepte zu steigern und die Akzeptanz sicherzustellen [DÜRR & LICKEFETT 2010, S. 541 f.].

Die folgende Abbildung 3-6 fasst die Anforderungen an die zu entwickelnde Methode zusammen.

Mensch	Technik	Prozess
<ul style="list-style-type: none">• Einfachheit• Robustheit• Intuitive Interpretation	<ul style="list-style-type: none">• Genauigkeit• Realitätstreue• Mobilität• Kosteneffizienz• Geschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none">• Anwendbarkeit• Integrationsfähigkeit• Partizipation

Abbildung 3-6: Zusammenfassung der Anforderungen an die Planungsmethode

3.4 Komponenten und Anforderungen des IT-Systems

Zur Unterstützung der in Kapitel 3.3 beschriebenen Planungsmethode ist es notwendig, ein Informationssystem, kurz IT-System, zu kreieren. Dieser Abschnitt legt die funktionalen und die nichtfunktionalen Anforderungen [VERSTEEGEN 2004, S. 50] an die Komponenten des IT-Systems dar.

Dem IT-System kommt die zentrale Aufgabe der persistenten Speicherung und Bereitstellung von Daten zu. Bei diesen Daten handelt es sich um digitale Abbilder von Produktionssystemen. Die Datenspeicherung sollte in Form eines *Repositorys* [ORTNER 1999, S. 351 ff.], englisch „repository“, umgesetzt werden. Die Speicherung erfolgt dabei in einer Datenbank, in der sich die Modelle als einzelne Dateien in Verzeichnissen verwalten lassen. Veränderungen an den gespeicherten Dateien sollen über eine Versionsverwaltung nachvollziehbar protokolliert werden. Die Speicherung soll aus Gründen der Effizienz und, um Inkonsistenzen zu vermeiden, redundanzfrei erfolgen. Um eine hohe Verfügbarkeit im Falle eines Systemausfalls oder Datenverlusts zu gewährleisten, ist es sinnvoll, in regelmäßigen Zyklen Back-ups der gespeicherten Daten zu erstellen, welche eine Wiederherstellung ermöglichen [GRÜNENDAHL ET AL. 2017, S. 54 ff.].

Die präzise Abbildung von Produktionshallen inklusive weitreichender Details sind sensible Informationen, die es zu schützen gilt. Unbefugte Zugriffe durch Dritte außerhalb des Unternehmens sind generell auszuschließen. Zwei weitere Komponenten zur *Nutzerverwaltung* sollen der Sicherheit des IT-Systems, im Sinne der Security [MÜLLER 2008, S. 47 ff.], dienen: Das Management von Nutzerrollen kann die grundlegende Kapselung von Daten darstellen. Daneben soll es die Definition von Rechten je Nutzergruppe, zum Beispiel Lese- oder Schreibrechte, zulassen.

Um ein Need-to-know-Prinzip [LOOS ET AL. 2011, S. 384] umzusetzen, sollte ein Zugriffsmanagement die detaillierte Definition von Freigabestufen für jede Datei erlauben.

Neben der Datenspeicherung nimmt die *Visualisierung* eine zentrale Funktion ein. Nutzer sollen auf die Modelle zugreifen und diese herunterladen können. Darüber hinaus ist es anzustreben, dass das IT-System die Modelle anzeigen kann. Entscheidend für die Benutzbarkeit des Planungssystems und den Komfort ist die Performanz. Das System soll kurze Antwortzeiten und einen schnellen Datentransfer gewährleisten. Um dies auch bei steigender Zahl an Planungsprojekten oder wachsender Anzahl an Nutzern sicherzustellen, sollte das System skalierbar hinsichtlich Speicherkapazität gestaltet werden.

Eine *Schnittstelle* soll ermöglichen, weitere digitale Planungswerkzeuge an das IT-System anzubinden, beispielsweise Simulationssysteme oder Virtual-Reality-Werkzeuge. So kann die Integration des Systems in eine Infrastruktur aus verschiedenen Planungswerkzeugen gewährleistet werden.

Abbildung 3-7 gibt die Hauptkomponenten des IT-Systems als Zusammenfassung der funktionalen Anforderungen wieder.

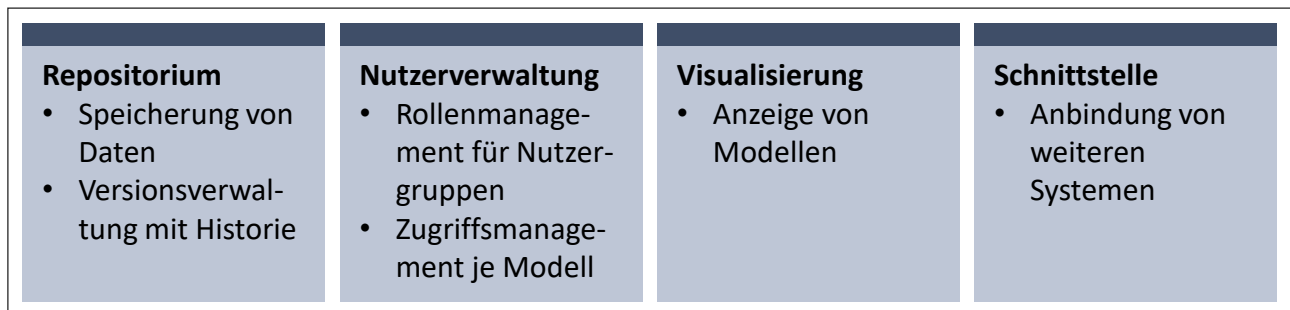


Abbildung 3-7: Zusammenfassung der Komponenten, die das IT-System enthalten soll

Das IT-System soll darüber hinaus mindestens die nichtfunktionalen Anforderungen Benutzbarkeit, Performanz, Skalierbarkeit, Sicherheit (Security), Verfügbarkeit und Effizienz erfüllen.

4 Stand der Wissenschaft und Technik

Auf Grundlage der erarbeiteten Anforderungen an die Planung von Produktionssystemen erfolgt in diesem Kapitel die Untersuchung des Stands der Wissenschaft und Technik. Diese Analyse gibt einen Überblick über Methoden, die einerseits auf eine Beschleunigung des Planungsprozesses in Gänze, andererseits auf Systeme zur automatisierten Vermessung der geometrischen Struktur einer Fabrik setzen. Dazu wird zunächst vorgestellt, über welche Stufen die Produktion und die Planung derselben in der Vergangenheit digitalisiert wurden (4.1). Es werden etablierte digitale Planungsansätze (4.2) und Vorschläge zur Steigerung der Geschwindigkeit der Planung (4.3) eingeführt. Im Anschluss wird dargelegt, wie die zielgerichtete Änderung von Produktionssystemen in der Wissenschaft diskutiert wird (4.4). Besondere Bedeutung erfährt in dieser Arbeit die Aufnahme eines geometrischen Modells als Grundlage für die Planung. Deshalb wird untersucht, welche physikalischen Prinzipien zur automatisierten Geometrievermessung infrage kommen (4.5). In Kapitel 4.6 werden bekannte Methoden zur Planung eingeführt, die derartige Ansätze nutzen, sodass sich schließlich die relevanten Lücken im Stand der Technik manifestieren (4.7).

4.1 Historie der Digitalisierung der Planung von Produktionssystemen

Verglichen mit der Produktentwicklung hat die Planung von Produktionssystemen bislang eine Digitalisierung in geringerem Maße erfahren [VOLLMER 2002, S. 27; BRACHT ET AL. 2011, S. 338]. Dies spiegelt sich vor allem darin wider, dass Daten manuell verwaltet und Änderungen ad hoc durchgeführt werden, ohne dass dies top-down geplant oder in IT-Systemen dokumentiert wird. Der folgende Abschnitt fasst die Historie der Digitalisierung in der Planung zusammen. Prominente Ansätze, ein zukünftiges Produktionssystem digital vorzudenken und zu gestalten, finden sich in der Vergangenheit unter den Schlagwörtern Computer Integrated Manufacturing und Digitale Fabrik. Im Kern der Betrachtung stehen dabei vor allem die Möglichkeiten zur frühzeitigen virtuellen Untersuchung von Konzepten.

4.1.1 Computer Integrated Manufacturing

Den Beginn der Digitalisierung nahm die Fertigung spätestens in den 1970er-Jahren mit „Computer Integrated Manufacturing“, kurz CIM, [HARRINGTON 1973]. Mit CIM gilt es, vor allem die Integration

der informationstechnischen Systeme Produktentwurf und Produktionsplanung zu realisieren [JACOBI 2013, S. 72]. Die informationstechnischen Insellösungen der Produktentwicklung in CAD-Systemen (Computer Aided Design) und der Fertigung (Computer Aided Manufacturing, CAM) – insbesondere im Sinne mechanischer Bearbeitung auf NC-Maschinen (Numerical Control) [PEIKER 1989, S. 4; SCHACK 2008, S. 31] – wuchsen zusammen. Bei einer NC-Maschine liegen die Befehle als NC-Code vor und werden in Arbeitsabläufe der Maschine umgesetzt [PEIKER 1989, S. 9]. CIM rückt die Ziele der Qualitätsverbesserung, Durchlaufzeitverkürzung sowie die Steigerung der Flexibilität und die Erhöhung der Produktivität von Fabriken in den Vordergrund [BULLINGER 1988, S. 13]. Mit der Konzentration auf die automatische Fertigung mittels NC-Maschinen geht in CIM die Vision vollautomatisierter Fabriken mit einem Leitstand beziehungsweise Zentralrechner einher, an dem alle Informationen zusammenlaufen [TRISTAM 1986, S. 1570]. In derart hochautomatisierten Fabriken sollten deutlich weniger Menschen arbeiten, weshalb der Begriff der „mensenleeren Fabrik“ [EIDENMÜLLER 1986, S. 335] in engen Zusammenhang mit CIM gebracht wird.

SENDLER [2009, S. 22] zeigt auf, dass CIM den Weg vom CAD-Modell zur NC-Maschine beschreibt, die Fabrikhalle als Ganzes – Roboterstationen oder relevante Komponenten wie die Fördertechnik – jedoch vernachlässigt. Der Autor kommt zu dem Schluss, dass CIM an Relevanz einbüßt, weil es ausschließlich die mechanische Bearbeitung von Teilen betrachtet [EBD.]. Bereits 1991 prophezeit SCHEER [1991, S. 1] eine Ernüchterung, die bezüglich CIM eintreten würde, und stellt „CIM-Ruinen“ fest. Mit der weiteren Entwicklung tritt der Gedanke vollautomatisierter Fabriken, die von einem Leitstand aus kontrolliert werden, in den Hintergrund. SCHLIEßMANN [2017, S. 171] konkludiert, dass CIM heute vollständig verschwunden ist.

4.1.2 Produktdaten-Management

Zur Integration der Einzelsysteme kommt dem Datenmanagement seit CIM eine tragende Rolle zu [JACOBI 2013, S. 52], da Daten konsistent für alle Systeme zur Verfügung stehen müssen. Das Produktdaten-Management, PDM, beschreibt die Speicherung und Verwaltung von Daten, welche das Produkt bestimmen, in Form von Produktmodellen [VAJNA ET AL. 2009, S. 51 ff.]. EIGNER & STELZER [2009, S. 34] definieren PDM als das „Management des Produkt- und Prozessmodells mit der Zielsetzung, eindeutige und reproduzierbare Produktkonfigurationen zu erzeugen“. PDM geht weiter als die reine Speicherung der CAD-Geometrie eines Bauteils und verknüpft Informationen, die im Wertschöpfungsprozess von Relevanz sind, in einer zentralen PDM-Datenbank. Im Zuge

dessen wird durch das PDM ein klarer Prozess zur Änderung und Freigabe von Produktdaten vorgegeben [EIGNER & STELZER 2009, S. 29 f.]. Zudem stellt das PDM die Resultate der Entwicklung mittels eines Produktmodells einschließlich der Stückliste bereit [UHLMANN ET AL. 2015, S. 527].

Das PDM konzentriert sich also auf die Produktplanung und Produktentwicklung. Die Aspekte der Produktion oder Planung derselben werden bewusst ausgeklammert [SCHACK 2008, S. 34].

4.1.3 Die Digitale Fabrik

In den 1990er-Jahren wurde der Begriff der „Digitale[n] Fabrik“ [VDI 4499-1, S. 1 ff.] geprägt. Die Digitale Fabrik fokussiert den Einsatz von „digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen“ [EBD.], um die reale Fabrik zu planen. Für die detaillierte Analyse verschiedener Definitionen der Digitalen Fabrik sei auf HIMMLER & AMBERG [2013, S. 167 ff.] verwiesen. Die Digitale Fabrik strebt die vollständige, digitale Abbildung des Produktentstehungsprozesses an. Sie umfasst die Repräsentation der Fabrik in Form eines digitalen Modells, das die Produktionsressourcen (Anlagen, Betriebsmittel, Gebäude) enthält [KAPP & CONSTANTINESCU 2006, S. 9]. Daneben umschließt sie die digitalen Abbilder der Produktentwicklung und der Produktion [VDI 4499-1, S. 3 f.; BRACHT ET AL. 2011, S. 26].

Die Digitale Fabrik ermöglicht die Absicherung eines Produktionskonzepts, bevor es in der Realität implementiert wird [BRACHT & ECKERT 2005, S. 10]. VDI 4499-1 [S. 9 ff.] sieht die Ziele dieser digitalen Produktionsplanung in Wirtschaftlichkeit, Qualität, Kommunikation, Standardisierung, Wissenserwerb und -erhalt. BRACHT ET AL. [2011, S. 35] führen an, dass Best-Practice-Lösungen, welche sich in abgeschlossenen Projekten bewährt haben, für zukünftige Projekte standardisiert werden und so eine bibliotheksbasierte Planung befähigt wird. Was die vollständige digitale Repräsentation einer Fabrik angeht, konstatieren BRACHT ET AL. [2008, S. 12] allerdings eine „Datenqualitätslücke im Bereich der Fabrikplanung“.

4.1.4 Produktlebenszyklusmanagement

JACOBI [2013, S. 85 ff.] sieht die konsequente Fortsetzung der vorgestellten Strömungen ab der Jahrtausendwende im Produktlebenszyklusmanagement, PLM. EIGNER & STELZER [2009, S. 37] halten fest, dass das PLM eine breite Sicht auf das Produkt aufweist. Das PLM betrachtet neben der Produktplanung und -entwicklung (PDM) die Phasen Anforderungserhebung, Produktion, Nutzung des Produkts, Recycling, Supply Chain und Wartung [EBD.]. FELDHUSEN & GEBHARDT [2008, S. 4] sehen

im PLM den systematischen Ansatz, einem Produkt die passenden Abläufe je Lebenszyklusphase unternehmensweit zuzuordnen. Einerseits umfasst das PLM also die Produktentwicklung, vor allem unter Zuhilfenahme digitaler Werkzeuge, andererseits Aspekte der Digitalen Fabrik, wobei fertigungstechnische Aspekte im Zuge der Produktgestaltung berücksichtigt werden sollen [SCHOLZ-REITER & LÜTJEN 2009, S. 20]. Den Nutzen des PLM beschreiben ARNOLD ET AL. [2011, S. 16 ff.] mit Verbesserungen der Geschäftsabläufe und der Produktqualität.

4.1.5 Industrie 4.0

Die zunehmende Digitalisierung in Fabriken wird in Deutschland unter dem Schlagwort „Industrie 4.0“ [BMW 2012] diskutiert, international finden sogenannte Cyber-Physische Produktionssysteme derzeit Beachtung (vgl. 3.1). Gemein ist beiden Begriffen, dass sie die Digitalisierung der Produktion beschreiben. Ziel ist eine weitere Optimierung der Produktion hinsichtlich Kosten und Effizienz [BAUERNHANSL ET AL. 2016, S. 9]. Cyber-Physische Produktionssysteme sollen eine höhere Automatisierung [VDI GMA 2013, S. 6] und eine Steigerung der Flexibilität in der Produktion [ACATECH 2011, S. 14; VDI GMA 2013, S. 4 ff.] vereinen. Innovative Produktionsressourcen sollen zur Eigendiagnose und Selbstorganisation bis hin zur Selbstoptimierung befähigt werden [ACATECH 2011, S. 23 f.].

Die Digitalisierung der Produktion und leistungsfähigere Sensorik sollen Echtzeit-Transparenz über die Produktion in hoher Auflösung schaffen [SCHUH ET AL. 2014, S. 284]. In solchen Produktionssystemen sollen sämtliche Fertigungsressourcen eine virtuelle Repräsentanz [MICHNIEWICZ & REINHART 2014, S. 566] erhalten. Über örtlich präzise und zeitlich hochauflösende Lokalisierungs- oder „Tracking“-Lösungen [SCHUH ET AL. 2014, S. 284] lässt sich die virtuelle Repräsentanz eines Produktionssystems in Zukunft um ein Echtzeit-Abbild der Position einzelner Fertigungselemente anreichern. BAUERNHANSL [2015, S. 28] spricht in diesem Kontext vom „Digitalen Schatten“ der Produktion, welcher neben Informationen zu Produkten „Fabrikstrukturdaten, Infrastrukturdaten, Prozessdaten, Ressourcendaten [und] Bewegungsdaten“ umfassen soll.

Solche realitätsnahen Abbilder können eine präzise Grundlage für Planungsaktivitäten bieten. Sofern ein Modell die Geometrie sämtlicher Objekte als auch deren Position in Echtzeit bereitstellt, kann eine Modifikation der Produktion binnen kurzer Zeit exakt geplant werden. Bis jedoch sämtliche Produktionssysteme über dieses Maß an Vernetzung verfügen [BAUERNHANSL ET AL. 2016,

S. 15], verlangt die Planung nach wie vor eine Modellakquise und Informationsbewertung, wie sie in VDI 5200-1 [S. 11 f.] ausgeführt ist.

4.2 Digitale Ansätze zur Konzeptabsicherung

Die Planung leistet die Absicherung von produktionstechnischen Konzepten und bereitet die Installation vor. Um die Qualität der Planung zu steigern, werden Produktionskonzepte weitgehend digital untersucht, bevor sie umgesetzt werden. In jüngerer Vergangenheit finden sich bibliotheks-basierte Ansätze, die auf die Wiederverwendung von Ressourcen setzen.

4.2.1 3D-Fabrikplanung

Fabrikplanung findet seit einiger Zeit digital und vermehrt dreidimensional statt [WARNECKE 1999, S. 77]. Dabei kommen CAD-Werkzeuge, ähnlich den Werkzeugen, wie sie in der Produktentwicklung seit Langem etabliert sind [VAJNA ET AL. 2009, S. 160 f.], für die sogenannte 3D-Fabrikplanung zum Einsatz [BRACHT ET AL. 2008, S. 12 ff.]. Insgesamt liefert die 3D-Fabrikplanung eine bessere Ergebnisqualität als ausschließlich flächige Layouts [BRACHT & REICHERT 2010, S. 250]. Daneben steigt die Anschaulichkeit [SPATH 2013, S. 199] und es wird eine höhere Realitätstreue erreicht. Außerdem erschließen sich neue Anwendungsfälle in der Planung, da viele detaillierte Untersuchungen erst durch die dreidimensionale Betrachtung möglich werden [BRACHT ET AL. 2008, S. 13]. Eine derartige Repräsentation dient vor allem zur Plausibilisierung von Konzepten, zur Untersuchung des Materialflusses sowie zur Kollisionsüberprüfung und damit zur digitalen Konzeptbewertung und -absicherung [ZÄH ET AL. 2004, S. 54 ff.; MASIK & PÖGE 2013, S. 184 f.].

Eine besonders einfache Interaktion versprechen digitale Werkzeuge, die ein zweidimensionales Layout mit einer 3D-Visualisierung kombinieren [HALM 2015, S. 102; DOMBROWSKI 2016, S. 22 f.]. Solche Werkzeuge sind unter dem Fachbegriff „Planungstisch“ bekannt [RUNDE & CANNAROZZI 2016, S. 183]. Dabei kann die Platzierung der einzelnen Anlagen auf einem digitalen 2D-Layout erfolgen, die Software-Lösung unterstützt den Planer bei der Überführung in ein korrespondierendes dreidimensionales Modell [SCHENK ET AL. 2014, S. 266 f.; RUNDE & CANNAROZZI 2015, S. 8]. ACKERMANN ET AL. [2017, S. 225 ff.] verfolgen diesen Ansatz unter dem Titel der Hybriden Fabrikplanung weiter.

4.2.2 Simulation

Simulation meint gemäß VDI 3633-1 [S. 3] das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell“. Simulationen werden eingesetzt, um Erkenntnisse zu gewinnen, die sich auf die Realität übertragen lassen [EBD.]. VDI 3633-1 [S. 7 f.] nennt exemplarisch die Ziele der Funktionsabsicherung, des Leistungsnachweises oder der Anlagen-dimensionierung.

Für die Planung von Produktionssystemen finden sich diverse Simulationswerkzeuge: Zur Untersuchung logistischer Größen etwa kommt die Ablaufsimulation, oder englisch discrete event simulation [MANSARAMANI 1997, S. 611 ff.], zum Einsatz [HLOSKA 2012, S. 246 ff.]. Zahlreiche Fertigungsschritte haben über die vergangenen Dekaden hinweg eine Automatisierung durch Industrieroboter erfahren. Zur Untersuchung von Robotik-Applikationen wird die 3D-Kinematik-simulation genutzt [SCHACK 2008, S. 84]. Mithilfe von Software-Werkzeugen lassen sich Roboter im digitalen Anlagenmodell programmieren, bevor die reale Anlage in Hardware aufgebaut ist, hier spricht man von der Offline-Programmierung [KUGELMANN 1999, S. 5]. Sie wird auch zur virtuellen Inbetriebnahme von Industrierobotern genutzt [WÜNSCH 2008]. Darüber hinaus lassen sich physikalische Vorgänge im Detail mittels Physiksimulation [WÜNSCH 2013, S. 30 f.] und ergonomische Aspekte mithilfe der Human-Simulation [BULLINGER-HOFFMANN & MÜHLSTEDT 2016] untersuchen.

Für einen umfassenden Überblick über den Simulationseinsatz in der Planung und die entsprechenden Werkzeuge sei auf KUHN & RABE [1998] und auf SCHACK [2008] verwiesen.

Vor der Simulation steht die Modellierung zur „vereinfachte[n] Nachbildung eines geplanten oder real existierenden Originalsystems“ [VDI 3633-1, S. 3]. VDI 3633-1 [S. 3] betont den Toleranzrahmen, innerhalb dessen sich das Modell vom Original unterscheiden darf. Entscheidende Voraussetzung für Simulationsstudien ist die Modellierung in der benötigten Detailgenauigkeit. ADAMSKI [2014, S. 79 f.] hält fest, dass sowohl die Eingangsdaten als auch die Modellierung eine hinreichende Qualität aufweisen müssen, um mit Simulationsstudien belastbare Ergebnisse zu erzielen. SCHOLZ-REITER & LÜTJEN [2009, S. 21] unterstreichen den Aufwand, der zur Konstruktion eines 3D-Modells für eine Simulation anfällt.

4.2.3 Bibliotheksbasierte Ansätze, Modularisierung in der Planung

NEUHAUS [2001, S. 182 f.] setzt in der Planung auf elektronische Kataloge, um ein digitales Modell der Fabrik mit vergleichsweise geringem Aufwand aufzubauen, sodass in erster Linie logistische Komponenten visualisiert und simuliert werden können. Auf Basis eines verknüpften Kostenmodells ermöglichen diese Kataloge außerdem eine Kostenkalkulation.

EIBRICH [2005, S. 4 ff.] nutzt zur dreidimensionalen Planung von Fabriken eine Planungsdatenbank. Diese Datenbank enthält Konstruktionsmodelle bestimmter Standard-Komponenten für die Fertigung. Bibliotheksbasierte Ansätze sind heute in der Planung etabliert, gängige Fertigungsressourcen stehen als digitale Modelle in Bibliotheken zur Verfügung [JONAS 2000, S. 69 ff.]. Teils sind die dreidimensionalen Modelle parametrierbar [VAJNA ET AL. 2009, S. 170 ff.], sodass sie sich individuell anpassen lassen. Mithilfe dieser Modelle aus der Bibliothek kann ein neues Konzept für die Fertigung zusammengestellt werden, ohne sämtliche Objekte von Grund auf zu konstruieren. JAENSCH ET AL. [2017, S. 640 ff.] führen eine Methode zur automatischen Erzeugung von Varianten für einzelne Produktionsanlagen auf Grundlage von mechatronischen Baukästen ein.

FIEBIG [2003, S. 6 f.] verfolgt einen modularen Planungsansatz für die Gebäudestruktur. Beim Neubau eines Fabrikgebäudes setzt er auf einen „Modulgrundriss“ [FIEBIG 2003, S. 7] mit standardisierten Gebäudeelementen, sodass sich diese Fabrik aufwandsarm erweitern lässt.

In der Literatur finden sich weitergehende Vorschläge zur Modularisierung von ganzen Fabriken, analog zur Plattform-, Modul- und Baukastenstrategie auf Produktebene [SCHNEIDER & RIECK 2012, S. 866 f.], die darauf bedacht sind, den Planungsaufwand zu reduzieren. BARTSCH [2012, S. 11] setzt auf eine Standardisierung in der Produktion im Sinne eines „Fabrikbaukasten[s]“, sodass eine Fabrik an jedem Standort weltweit aus identischen Modulen in gleicher Anordnung aufgebaut werden kann. WALTL & WILDEMAN [2014, S. 10] führen den „modularen Produktionsbaukasten“ ein, um die Investitionskosten zu senken und gleichzeitig die Wandlungsfähigkeit von Fabriken zu steigern. Sie legen standardisierte Fertigungsressourcen wie Maschinen, Anlagen als auch standardisierte Betriebsmittel für weltweit verteilte Standorte eines produzierenden Unternehmens fest.

4.2.4 Fazit

In der Planung von Fabrikstrukturen kommen 3D-Werkzeuge zum Einsatz, wenngleich zweidimensionale Pläne nach wie vor weitverbreitet sind. Ob der höheren Aussagekraft setzen sich

dreidimensionale Ansätze in der Planung immer stärker durch [KERKENBERG 2016, S. 108]. Robotik wird heutzutage über die präzise 3D-Kinematiksimulation analysiert und offline programmiert. Simulation findet zur digitalen Absicherung von Konzepten breite Anwendung.

Für die meisten planerischen Fragestellungen ist eine präzise geometrische Modellierung notwendig, was im Allgemeinen erheblichen Konstruktionsaufwand erfordert. Viele Abhandlungen zielen darauf ab, den Aufwand zur Modellierung von Fertigungsressourcen zu minimieren. Heute finden sich kommerzielle Lösungen, welche die Planung basierend auf Bibliotheken unterstützen. Im Besonderen wurden modulare Planungsmethoden vorgeschlagen, die Fabriken in Gänze aus Standard-Modulen aufbauen, um die Planungs- als auch die Realisierungskosten zu senken. Für bestehende Produktionssysteme ist jeweils zu evaluieren, ob sich standardisierte Module installieren lassen, ohne dass die Struktur tiefgreifend verändert werden muss.

4.3 Methoden zur Beschleunigung der Planung

In der Literatur finden sich zahlreiche Vorschläge, die darauf abzielen, die Planung zu beschleunigen. Dazu werden einzelne Phasen auf verschiedenen Ebenen parallelisiert. Zur gesamthaften Konzipierung von Produktionssystemen wird die Kollaboration mehrerer Disziplinen vorgeschlagen. Weitere Methoden fokussieren eine enge Einbindung des Abnehmers in die Planung und verzichten bewusst auf eine detaillierte Dokumentation.

4.3.1 Simultaneous Engineering

EVERSHEIM [1995, S. 2 ff.] nutzt das „Simultaneous Engineering“, um die „time-to-market“, also die Zeit zwischen dem Start der Produktentwicklung und der Markteinführung, zu verkürzen, wie in Abbildung 4-1 bebildert. Dieser Ansatz wendet sich ab von einer streng sequentiellen Ausführung der Planung des Produktionssystems im Anschluss an die Produktplanung [WIENDAHL ET AL. 2001b, S. 188]. Stattdessen parallelisiert er diese beiden Schritte, sodass sie in Teilen simultan verlaufen. Als Synonym wird der Begriff „Concurrent Engineering“ verwendet [SCHLICK ET AL. 2010, S. 486].

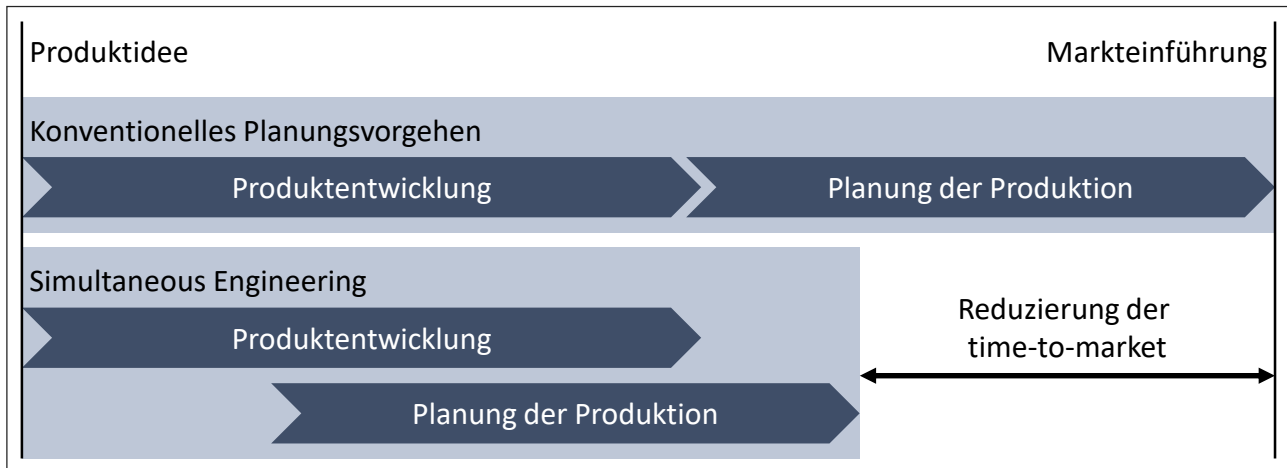


Abbildung 4-1: Simultaneous Engineering – Parallelisierung von Entwicklung und Planung (in Anlehnung an EVERSHEIM [1995, S. 2])

4.3.2 Partizipative Planung

WIRTH ET AL. [2001, S. 329 ff.] schlagen eine Parallelisierung der einzelnen Phasen innerhalb der Planung vor und verfolgen einen sogenannten partizipativen Ansatz, bei dem Spezialisten verschiedener Fachrichtungen eingebunden werden. Insgesamt ist Interdisziplinarität prägend für mehrere Planungsansätze. So sehen WIENDAHL ET AL. [2001b, S. 189 ff.] Kooperation in der Planung als Voraussetzung für Wandlungsfähigkeit an, damit eine ganzheitliche Lösung aus Prozess- und Bausicht resultiert. WILLNECKER [2001, S. 31 ff.] regt an, „Mitarbeiter aus produktionsnahen Bereichen“ in den Planungsprozess zu integrieren, um deren Detailwissen einfließen zu lassen. REICHHARDT & GOTTSWINTER [2003, S. 275 ff.] heben die Verzahnung von Standort-, Gebäude-, Haustechnik- und Anlagenplanung hervor. Die Synchronisation von Gebäude- und Prozessplanung beschreiben NYHUIS ET AL. [2004, S. 95 ff.] unter dem Begriff der Synergetischen Planung. Sie integrieren neben der Produkt- und der Fabrikplanung die Bauplanung [EBD.].

4.3.3 Agilität in der Planung

Agile Methoden [HANSER 2010] in der Entwicklung und Planung zielen darauf ab, inkrementelle Prototypen in einem iterativen Prozess zu entwickeln [HERZNER 2013, S. 3 ff.]. Ursprünglich entstammen Agile Methoden, wie zum Beispiel „Scrum“, der Softwareentwicklung [HANSER 2010, S. 61 ff.]. Durch eine enge Einbindung des Endabnehmers wird versucht, möglichst genau das zu entwickeln, was sich der Kunde oder „Product Owner“ vorstellt [SCHWABER & SUTHERLAND 2016, S. 5

f.]. Kurze Entwicklungszyklen, sogenannte Sprints [HERZNER 2013, S. 3], visieren das permanente Release neuen Codes an, sodass kurzfristig Feedback eingeholt werden kann. Projektplanung als auch Dokumentation werden dabei auf ein Minimum begrenzt, stattdessen wird funktionierende Software fokussiert [BECK ET AL. 2001, S. 1].

SCHNEIDER ET AL. [2012, S. 161 f.] weisen die grundsätzliche Übertragbarkeit der Methode Scrum auf die Planung nach. REINEMA ET AL. [2013, S. 114] regen an, die Anwendung Agiler Methoden für die Fabrikplanung zu untersuchen. Vereinzelt finden Agile Methoden Eingang in die Planung [SCHNEIDER 2015, S. 127 ff.; KLEIN & REINHART 2016, S. 71 f.], beispielsweise um besser auf Änderungen reagieren zu können, die im Laufe der Planung auftreten.

4.3.4 Fazit

Durch die Parallelisierung von Produktentwicklung und Planung von Produktionssystemen lässt sich ein Zeitvorteil erzielen. Die Parallelisierung der Planungsaktivitäten selbst führt zu einer Verkürzung der Abstimmungszyklen durch eine Einbindung sämtlicher an der Planung Beteiligten. Zudem finden sich sogenannte Agile Methoden, welche den Prozess der Planung in Sprints einteilen.

Simultaneous Engineering bringt neben dem Zeitgewinn durch die Parallelisierung neue Herausforderungen mit sich, beispielsweise verstärken sich die Abhängigkeiten zwischen den Parteien, der Informationsaustausch muss erhöht werden [STANKE & BERNDDES 1997, S. 15 f.].

Die partizipative Planung setzt eine einheitliche Datenbasis voraus, um erfolgreich verlaufen zu können. Die Kooperation in der Planung wird durch Inkonsistenzen und Widersprüche in den Daten und Konvertierungen von Modellen erschwert [ZÄH ET AL. 2004, S. 55]. So nutzen die Produktentwicklung und die Fabrikplanung unterschiedliches Vokabular, bedienen sich verschiedener Modelle und Formate [WIENDAHL ET AL. 2001b, S. 189].

Agile Methoden entstammen der Softwareentwicklung, ihre grundsätzliche Anwendbarkeit in der Planung wurde wissenschaftlich nachgewiesen. In der kommenden Dekade werden derartige Vorgehensweisen vereinzelt Eingang in die Produktentwicklung oder Planung finden [FREY 2017]. Die Schwierigkeit bei Agilen Vorgehensweisen, die Planungsaufwände zeitlich abzuschätzen, obstruiert eine saubere Terminierung des gesamten Planungsprozesses [SCHNEIDER 2015, S. 148].

4.4 Änderungsplanung

Dieser Abschnitt widmet sich der Änderung von Produktionssystemen. Einerseits werden Praktiken zur Verbesserung der Produktion, andererseits Planungsmethoden zur Änderungsplanung eingeführt. Zur Optimierung der Produktion findet eine Reihe an operativen Vorgehensweisen Anwendung. Für Modifikationen und Erweiterungen spielen kennzahlenbasierte Ansätze sowie Konzepte, die geometrische Aspekte in den Fokus der Planung rücken, eine Rolle.

4.4.1 Methoden zur Optimierung von Produktionssystemen

Der sogenannte Kontinuierliche Verbesserungsprozess, kurz KVP [DOMBROWSKI 2015, S. 228], nimmt eine zentrale Rolle im Konzept der Schlanken Produktion beziehungsweise Lean Production ein [HENNEBERG 2015, S. 334]. Im Fokus steht die Reduktion von Verschwendung zur Optimierung der Produktion [DOMBROWSKI 2015, S. 229]. Bezüglich entsprechender Gestaltungsprinzipien sei auf VDI-2870-1 [S. 13 ff.] verwiesen. Die kontinuierliche Verbesserung findet parallel zum Fertigungsprozess statt, wodurch das Produktionssystem permanent Änderungen widerfährt. Um derartige Optimierungen vorzubereiten und umzusetzen, wird der PDCA-Zyklus (Abkürzung für Plan Do Check Act) als Problemlösungsschleife praktiziert [BELZ ET AL. 2015, S. 53 f.]. Diese operative Optimierung der Fertigung kommt meist ohne digitale Planung aus, stattdessen werden Methoden wie die Kartonagensimulation [LORENZ 2014, S. 26 ff.] bemüht.

4.4.2 Kennzahlbasierte Änderungsplanung von Produktionssystemen

Kontinuierliche Entwicklungen als auch sprunghafte Effekte an den Märkten erfordern Änderungen an Produktionssystemen, um diese effizient zu betreiben [ZÄH ET AL. 2005, S. 384]. Zahlreiche Wissenschaftler leiten den Änderungsbedarf aus produktionstechnischen Kennzahlen ab. Den folgenden Ansätzen zu Modifikationen von bestehenden Produktionssystemen ist die in Abbildung 4-2 gezeigte Grundlogik gemein.

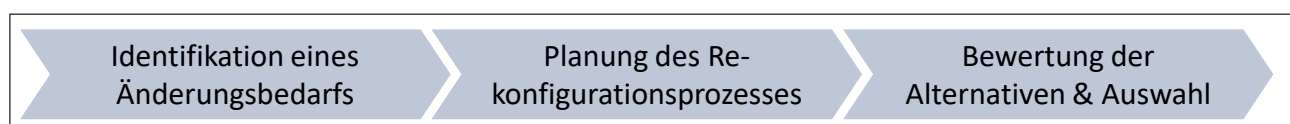


Abbildung 4-2: Vorgehen zur Änderungsplanung mit Fokus auf Produktionskennzahlen (in Anlehnung an CISEK [2005, S. 55])

AURICH ET AL. [2004, S. 382 f.] verorten die Auslöser für einen Änderungsbedarf vor allem in der Qualität oder der Ökonomie. Sie schlagen folgende Struktur für Änderungen in der Produktion vor: Sobald ein Bedarf erkannt wird, wird die Änderung initialisiert, dazu wird der Änderungsbedarf analysiert und alle betroffenen Teile bestimmt, sodass die Änderung formuliert werden kann. Zur Durchführung der Änderung werden Lösungsalternativen erzeugt, der Ablauf geplant und schließlich umgesetzt. Im Rahmen der Nachbereitung gilt es, das Ergebnis zu stabilisieren und den Erfolg zu bewerten.

CISEK [2005, S. 51 ff.] leitet den Änderungsbedarf aus der kontinuierlichen Überwachung von Kennzahlen ab, die die Leistung des Produktionssystems widerspiegeln. Nach einer entsprechenden Analyse der Kennzahlen wird der Rekonfigurationsprozess geplant. Dazu werden Arbeitsplanalternativen kombiniert und zweidimensionale Hallenlayouts deduziert [CISEK 2005, S. 76 ff.], sodass die Alternativen schließlich bewertet werden können. Der Fokus dieses Vorgehens richtet sich auf betriebswirtschaftliche Konsequenzen von Umorganisationen in der Fertigung.

POHL [2014, S. 62 ff.] folgt einer ähnlichen Vorgehensweise bei der Adaption von Produktionsstrukturen: Zunächst wird der Bedarf einer Anpassung identifiziert, anschließend werden Adaptionsszenarien kreiert und bewertet. Durch die Analyse struktureller Kennzahlen werden Ineffizienzen offengelegt, woraus die Notwendigkeit zur Veränderung hervorgeht [POHL 2014, S. 64 ff.]. Für jede Alternative werden alle notwendigen Strukturmaßnahmen aufgelistet. Auf Basis der Bewertung von Kosten und Risiko je Alternative erfolgt die Selektion eines Konzepts.

LÖFFLER [2011, S. 66 ff.] modelliert und analysiert die bestehenden Produkt- sowie Produktionsstrukturen, bevor sie geplante Änderungen untersucht. Den Kern ihres Konzepts stellt die Dynamisierung der Fabrikstruktur dar. Diese Variation der Struktur bietet die Basis, sodass Lösungskonzepte entwickelt und schließlich eine Lösung ausgewählt werden kann. Diese Methode konzentriert sich auf die langfristige Gestaltung von Fabriken, wobei mehrere Standorte in einem Produktionsnetzwerk betrachtet und in erster Linie bezüglich der zur Herstellung einer Einheit benötigten Zeit ausgewertet werden.

Weitere Ansätze, den Wandlungsbedarf aus Kennzahlen abzuleiten, finden sich beispielsweise in [SCHMITT & GLÖCKNER 2012] und in [LÜBKEMANN ET AL. 2016].

4.4.3 Methoden zur Umplanung von Fabriken mit Geometriefokus

In der Literatur finden sich sporadisch Ansätze, die die Umplanung von Produktionssystemen mit geometrischem Fokus auf Strukturen beschreiben. Dabei wird der Aufwand zur Modellerstellung und -verifikation hervorgehoben [KERBER 2016, S. 5].

REINHART ET AL. [2003, S. 651 ff.] beschäftigen sich mit der Anlagen- und Fabrikplanung. Sie unterstreichen den hohen Aufwand für die Modellierung einer Fabrik, da diese infolge von Umgestaltung und Umbauten während des Fabrikbetriebs permanent Änderungen erfährt. Sie setzen auf Augmented Reality in der Produktionsplanung, um Planungsfehler durch die visuelle Überlagerung zu detektieren. Dieser Ansatz vermeidet es bewusst, sämtliche Einzelheiten einer existierenden Fabrik zu modellieren, um somit die Effizienz zu steigern.

PATRON [2004, S. 2] sieht einen erheblichen Aufwand zur detailgetreuen Modellierung beziehungsweise der Aktualisierung von 3D-Daten eines Produktionsbereichs. Er führt daher eine Methode zur Planung ein, bei der nur diejenigen Komponenten dreidimensional modelliert werden, welche neu in eine bestehende Fertigung eingebracht werden sollen [PATRON 2004, S. 154].

BRACHT ET AL. [2011, S. 251 f.] sehen den Startpunkt für eine Umplanung einer bestehenden Fabrik in der Modellierung der Fabrikstruktur, sodass eine Ideal- und anschließend eine Realplanung durchgeführt werden können. Bei dieser Modellierung wird – ausgehend von den Fertigungsgewerken und Materialströmen – ein zweidimensionales Block-Layout erstellt. Die Wissenschaftler beschreiben die sukzessive Vervollständigung des Modells im Zuge der Planung.

LANDHERR ET AL. [2013, S. 172 ff.] betonen die Relevanz von Umplanungen in der Praxis. Sie schlagen ein durchgängiges Management der Fabrikdaten vor. Es sollen alle Daten gespeichert werden, sodass sie für Neu- und Umplanungen in aktueller Form zur Verfügung stehen [LANDHERR ET AL. 2013, S. 183 f.].

4.4.4 Fazit

Methoden der Schlanken Produktion forcieren die kontinuierliche Optimierung von Produktionssystemen. Im Zuge der operativen Umgestaltung der Fertigung verzichten solche Methoden auf einen umfassenden vorgelagerten Prozess der Planung und damit auf eine digitale Modellierung. Der PDCA-Zyklus erfolgt in diesem Kontext in unmittelbarer Nähe zum Shopfloor. Prototypenhafte Umsetzungen greifen dabei zum Beispiel auf Aufbauten aus Kartonage zurück.

Kennzahlbasierte Ansätze fokussieren die präzise Detektion von Änderungsbedarfen und setzen auf eine gemeinsame Grundlogik aus Detektion eines Änderungsbedarfs, Kreation von Alternativen und Auswahl eines Konzepts.

Daneben bestehen Bestrebungen, die zur digitalen Planung von Änderungen auf die geometrische Abbildung der Fertigung setzen. Wissenschaftler konstatieren erheblichen Aufwand für die Kreation eines derartigen Modells, das den aktuellen Zustand eines Produktionssystems abbildet. Es finden sich daher Ansätze, die die geometrische Modellierung bewusst auf ein geringes Maß reduzieren. Messungenauigkeiten und die Abstraktion bei der Kreation eines Modells werden als Ursachen für unscharfe Planungsdaten erachtet [HAWER ET AL. 2015, S. 349 ff.]. Im Folgenden werden deshalb Verfahren zur Aufnahme eines Modells von bestehenden Fabrikstrukturen vorgestellt.

4.5 Erfassung geometrischer Daten zu bestehenden Produktionssystemen

Während Neuplanungen von Produktionssystemen heutzutage von Grund auf digital starten, gilt es bei Umplanungen, zunächst eine Datengrundlage aufzunehmen. In den folgenden Abschnitten erfolgt eine Einführung bezüglich der manuellen Vermessung von bestehenden Strukturen, im Anschluss werden automatische Messverfahren, die im Kontext der Planung von Produktionssystemen relevant sind, mit ihren physikalischen Grundlagen vorgestellt.

4.5.1 Manuelle Vermessungen

Bis heute finden Vermessungen in der Regel manuell statt, um eine Datenbasis für Produkt- als auch für Anlagenintegrationen zu generieren. Dabei vermessen sowohl der Fabrikbetreiber und die Planungsabteilung auf Seite des OEM als auch der Anlagenlieferant die bestehende Fertigungsstruktur mithilfe von Maßstäben oder Werkzeugen wie etwa simplen, elektronischen Distanzmessgeräten. Die Messungen werden in Skizzen zusammengetragen oder mithilfe zusätzlicher Fotos dokumentiert. In einer Vielzahl von Planungsprojekten ist die Datengrundlage zu Beginn derart gering, dass Layouts von Grund auf erstellt werden müssen. BRACHT & MASURAT [2002, S. 156] sehen in der Praxis einen iterativen Prozess, bis „ein 3D-CAD-Modell entwickelt werden kann“.

Diese manuellen Vermessungen bergen das Risiko unterschiedlicher Ergebnisse der beteiligten Personen, sodass die Layouts möglicherweise divergieren und konsolidiert werden müssen.

Außerdem müssen meist hunderte einzelne Messungen durchgeführt werden, bis ein Modell eines Gebäudes oder einer Fertigungslinie als Planungsgrundlage steht. Manuellen Messungen stehen der hohe Aufwand und das Fehlerpotenzial entgegen [DÜRR & KUHLMANN 2008, S. 28].

4.5.2 Übersicht über Verfahren zur automatisierten Aufnahme von Geometrien

Automatisierte Ansätze sollen die Aufnahme von Geometrien gegenüber manuellen Verfahren beschleunigen und eine höhere Messgenauigkeit liefern [STERNBERG & KERSTEN 2007, S. 391]. VDI 5620-1 [S. 6 ff.] ordnet Verfahren zur automatisierten Aufnahme von Geometrien nach dem folgenden Schema.

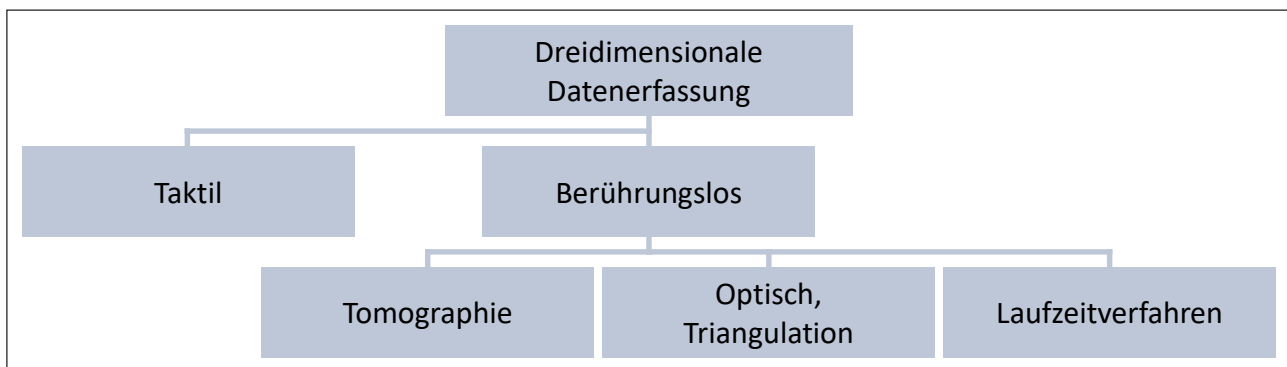


Abbildung 4-3: Verfahren zur Erfassung dreidimensionaler Daten (in Anlehnung an VDI 5620-1 [S. 6])

Die in Abbildung 4-3 genannten Ansätze sind partiell geeignet, um ein Abbild einer Produktionsstruktur zu erstellen. Taktile Messungen [VDI 5620-1, S. 6] als auch Tomographie [KROLL 2014, S. 6 ff.] scheiden hier allerdings aus. Eine Fabrik eignet sich aufgrund ihrer Ausmaße nicht für eine taktile Vermessung, beispielsweise mit einem Koordinatenmessgerät [DUTSCHKE 2002, S. 129 ff.]. Die Durchleuchtung [VDI 5620-1, S. 9] von sämtlichen Elementen in einer Fertigung ist nicht zielführend, zudem stehen die Röntgenstrahlen einem Einsatz von Tomographie-Verfahren in der Produktion entgegen.

Es finden sich zahlreiche technische Messapparate, die volumetrische Modelle von Bauteilen zu erstellen vermögen. Diese setzen meist auf Triangulation. Triangulationsverfahren nehmen Aufnahmen desselben Objekts aus unterschiedlichen Perspektiven auf [WIORA 2001, S. 6]. Damit die Position eines Punktes vermessen werden kann, muss sich dieser in mindestens zwei Aufnahmen

wiederfinden. Details zur Funktionsweise und den mathematischen Zusammenhängen finden sich beispielsweise in [JÄHNE 2012, S. 262 ff.].

4.5.3 Photogrammetrie

Photogrammetrie, präzise „Mehrbild-Photogrammetrie“ [WIEDEMANN 2004, S. 180 ff.] genannt, nutzt mehrere Fotos, um daraus dreidimensionale Modelle abzuleiten. Photogrammetrie arbeitet nach dem Triangulationsverfahren [VDI 2634-2, S. 3]. Dabei setzt das Verfahren darauf, Fotos um die Verzerrung, die das optische Gerät bei der Aufnahme verursacht, zu bereinigen. Diese „Bündelblockausgleichung“ [WIEDEMANN 2004, S. 234] ermöglicht es, mehrere zweidimensionale Projektionen von Objekten zu einer maßstäblichen Zeichnung oder einem 3D-Modell zusammenzusetzen. Um eine präzise Vermessung vornehmen zu können, wird zusätzlich ein Maßstab am realen Objekt benötigt. Im Bereich der Architektur hat sich dieses Verfahren zur Aufnahme von Geometrien etabliert, da es sich besonders für Oberflächen eignet, die im Rahmen der Messgenauigkeit eben sind [WIEDEMANN 2004, S. 180], wie es etwa bei Fassaden der Fall ist. Im Inneren von bestehenden Fabriken eignet sich das Verfahren der Mehrbild-Photogrammetrie nur in geringem Maße. Da sich in der Produktion zahlreiche Objekte auf relativ engem Raum finden, bedarf es einer großen Anzahl an Fotos, bis ein Bereich hinreichend abgedeckt ist. Darüber hinaus machen großflächige Ebenen wie Fassaden in Fabriken eine Minderheit der relevanten Objekte aus. Abbildung 4-4 illustriert die Ergebnisse, welche in Experimenten im Rahmen dieser Arbeit über Photogrammetrie erzielt werden konnten.

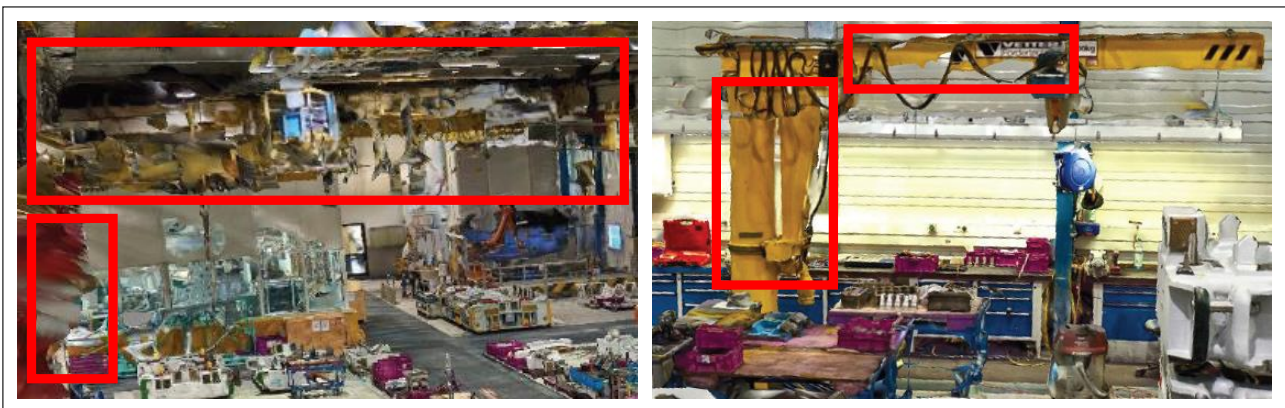


Abbildung 4-4: Modell einer Produktionshalle, das via Photogrammetrie gewonnen wurde. Zonen mit verschwommenen und fehlenden Details sind rot eingerahmt.

Es zeigt sich bei diesem Verfahren, dass Oberflächen wellig abgebildet werden und insbesondere feingliedrige Strukturen verschwimmen, wodurch die Genauigkeit der Repräsentation von Flächen und Kanten leidet. Bereiche, in denen sich viele Objekte auf engem Raum befinden, werden durch diesen Ansatz wenig detailgetreu und damit nicht realistisch modelliert.

4.5.4 Laufzeitverfahren zur elektrooptischen Distanzmessung

Laufzeitverfahren nutzen eine elektromagnetische Welle zur elektrooptischen Distanzmessung. Im Allgemeinen kommen dazu Laser zum Einsatz, die eine kohärente Welle einer diskreten Wellenlänge λ emittieren [HÜGEL 1992, S. 9 ff.]. Ein Messgerät empfängt dieselbe Welle nach Reflektion. Das Impulsverfahren ermittelt die Strecke basierend auf der doppelten Laufzeit eines Lichtimpulses. Das Phasenvergleichsverfahren wertet den Unterschied des Phasenwinkels zwischen ausgesandter und empfangener, reflektierter Welle aus, um die Entfernung zu kalkulieren.

Impulsverfahren

Systeme, die Distanzen via Impulsverfahren aus der Laufzeit des Lichts bestimmen [CZICHOS & DAUM 2014, S. W 9], bestehen aus einem Emitter eines Lichtstrahls, welcher einen elektromagnetischen Impuls aussendet, einem Empfänger und einer Einheit zur Zeitmessung. Dabei wird die Zeitspanne Δt zwischen Emission und Detektion der reflektierten Welle bestimmt, siehe Abbildung 4-5.

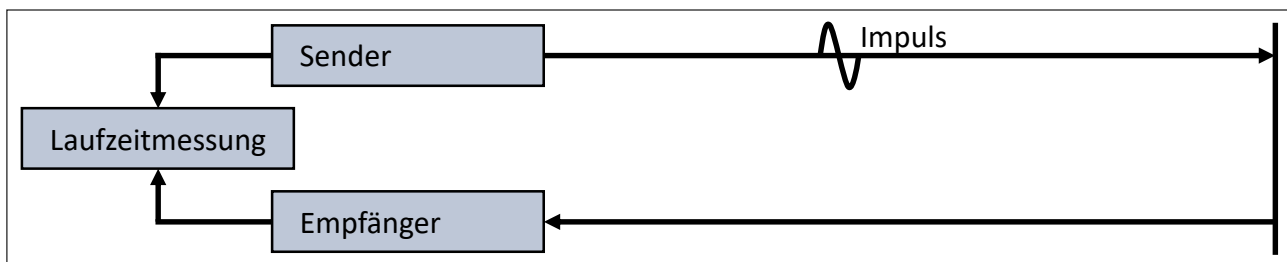


Abbildung 4-5: Funktionsweise eines Distanzmessgeräts nach dem Impulsverfahren [RIETDORF 2005, S. 12]

Die oben eingeführte Zeitspanne Δt zwischen Emission und Reflektion ist dabei proportional zur zurückgelegten Distanz D . Diese Distanz errechnet sich über die Lichtgeschwindigkeit c_{Medium} in einem Medium nach folgender Formel:

$$D = \frac{c_{\text{Medium}}}{2} * \Delta t$$

Formel 1: Berechnung der Distanz D nach dem Impulsverfahren [RIETDORF 2005, S. 12]

$$\text{mit } c_{\text{Medium}} = \frac{1}{n_{\text{Medium}}} * c_0$$

$$\text{und } c_0 = 2,998 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Formel 2: Zusammenhang zwischen Lichtgeschwindigkeit c_{Medium} und Brechungsindex n_{Medium} eines Mediums [HÜGEL 1992, S. 13 f.]

Beim Impulsverfahren korrespondiert eine auf eine Zehntel Nanosekunde ($=10^{-10}$ s) genaue Zeitmessung mit einer Präzision der Distanzmessung von circa drei Zentimetern.

Phasenvergleichsverfahren

Eine höhere Genauigkeit bezüglich der Distanzmessung lässt sich durch das sogenannte Phasenvergleichsverfahren erzielen. Dabei wird der Abstand zum Punkt, an dem der emittierte Lichtstrahl einer Wellenlänge λ reflektiert wird, über die Auswertung des Phasenversatzes $\Delta\lambda$ zwischen der emittierten und reflektierten Welle abgeleitet [RIETDORF 2005, S. 12 f.], wie Abbildung 4-6 darlegt. Die mathematischen Zusammenhänge erläutert Formel 3.

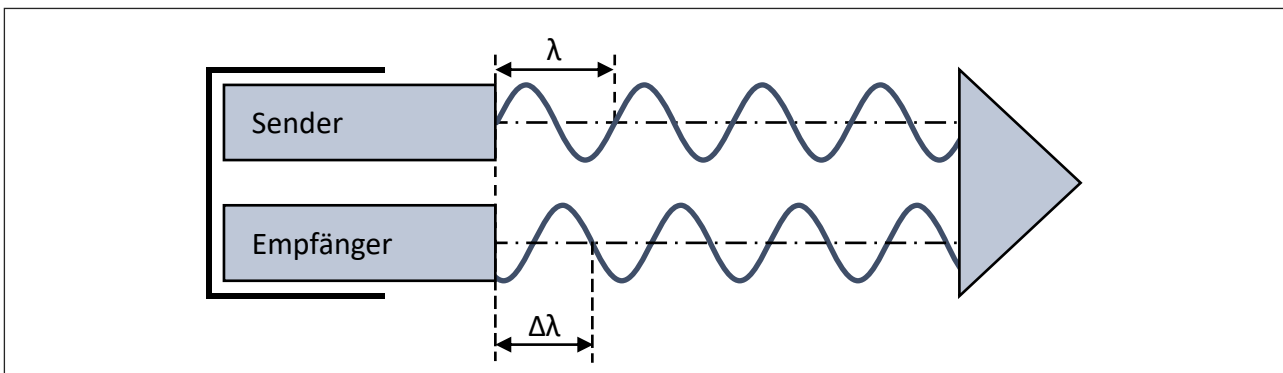


Abbildung 4-6: Prinzipische Skizze des Phasenvergleichsverfahrens (in Anlehnung an RIETDORF [2005, S. 13])

$$D = \frac{n * \lambda_{Medium} + \Delta\lambda_{Medium}}{2}$$

Formel 3: Berechnung der Distanz D durch Phasenvergleich [GRUBER & JOECKEL 2004, S. 61]

Die eingesetzte Wellenlänge λ limitiert bei diesem Messverfahren die maximale Streckenlänge, die sich eindeutig bestimmen lässt. Über den Phasenvergleich wird die Länge $\Delta\lambda$ bestimmt. Die Gesamtdistanz setzt sich allerdings aus der Anzahl der kompletten Wellen n plus dem Teilstück $\Delta\lambda$ zusammen. Dieses „Mehrdeutigkeitsproblem“ [KERN 2007, S. 4] lässt sich umgehen, indem mehrere elektromagnetische Wellen mit unterschiedlichen Wellenlängen eingesetzt werden.

In sogenannten Tachymetern [RIETDORF 2005, S. 11 ff.] finden diese beiden vorgestellten Verfahren Anwendung, um die Distanz zu einem zu vermessenden Punkt zu bestimmen. Dabei beruhen Tachymeter auf Theodoliten [WIEDEMANN 2004, S. 94 ff.], mit denen sich horizontale und vertikale Winkel messen lassen [SEIFERT 1923, S. 22 ff.]. Die Winkel werden in diesem Kontext Polarwinkel ϑ und Azimutwinkel φ genannt, die Nomenklatur folgt Abbildung 4-7.

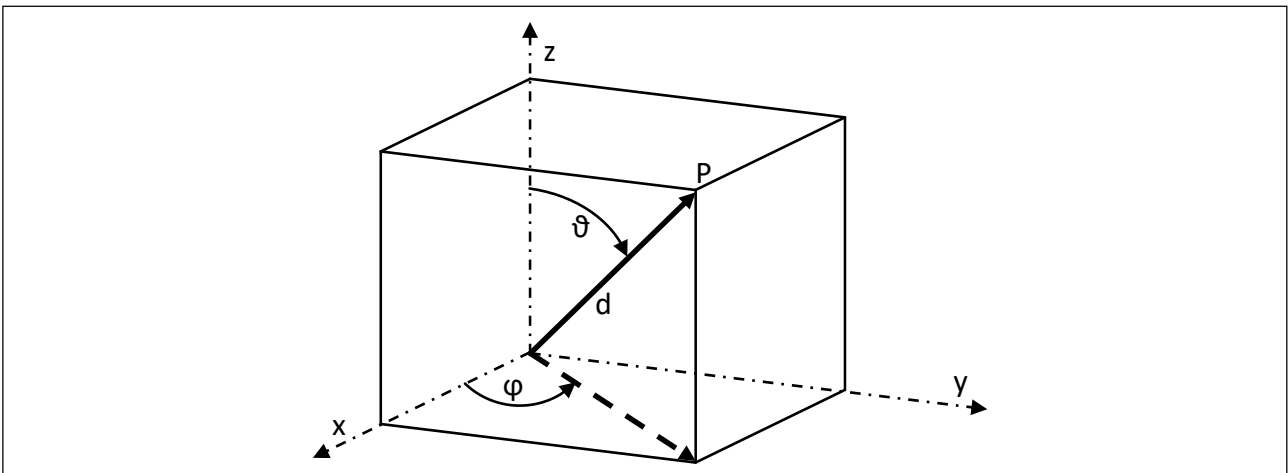


Abbildung 4-7: Polarwinkel ϑ und Azimutwinkel φ (in Anlehnung an SIRK & RANG [1969, S. 190])

Eine Koordinatentransformation überführt die ermittelten Koordinaten vom Kugelkoordinatensystem in ein kartesisches Koordinatensystem. Dazu gilt folgende mathematische Beziehung:

$$x = d * \sin \vartheta * \cos \varphi$$

$$y = d * \sin \vartheta * \sin \varphi$$

$$z = d * \cos \vartheta$$

$$\text{mit } d \geq 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi, \quad -\pi < \varphi \leq +\pi$$

Formel 4: Koordinatentransformation aus dem Kugelkoordinatensystem (d, ϑ, φ) in das kartesische Koordinatensystem (x, y, z) [SIRK & RANG 1969, S. 190 f.]

Beispielsweise in LiDAR-Systemen (Akronym für Light Detection And Ranging) kommen Impuls- und Phasenvergleichsverfahren zum Einsatz, um Distanzen zu bestimmen. In der technischen Umsetzung dient dabei mindestens eine Spiegeleinheit dazu, den Laserstrahl abzulenken. Diese Spiegeleinheit wird in Rotation versetzt, typischerweise mit einer konstanten Drehgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ oder $\dot{\vartheta}$, sodass zahlreiche, diskrete Punkte vermessen werden. Erfolgt diese Rotation um die Horizontal- als auch um die Vertikalachse, spricht man von einem 3D-Scanner (siehe 4.6), da ein solches Gerät die Umgebung rasterartig in drei Dimensionen vermisst. Die Umrechnung aus dem Kugelkoordinatensystem in kartesische Koordinaten erfolgt dabei nach Formel 4. In 3D-Scannern werden vor allem sogenannte Time-of-Flight-Systeme [RIETDORF 2005, S. 19] eingesetzt, welche sich dadurch auszeichnen, dass Laser-Emitter und Empfänger koaxial im Gerät angeordnet sind.

Gegenüber LiDAR-Scannern, die auf einer rasterartige Aufnahme der Umgebung basieren, setzen Time-of-Flight-Kameras auf ein flächiges Signal [ZHOU ET AL. 2012; OVERMEYER ET AL. 2016, S. 97]. Sie erfassen sämtliche Messpunkte im Sichtbereich quasi zeitgleich und liefern dabei bis zu einhundert dreidimensionale Aufnahmen pro Sekunde [WINNER ET AL. 2015, S. 337].

4.5.5 Systeme zur Lokalisierung von Objekten

Zur Aufnahme eines geometrischen Abbilds einer Fertigungsstruktur ist neben der Vermessung die Überwachung der Positionen sämtlicher Objekte denkbar. Zur Ermittlung der Position einzelner Objekte kommen Verfahren wie das Global Positioning System, GPS, zum Einsatz. Das GPS basiert auf der Distanzmessung zu mehreren Satelliten, deren aktuelle Positionen auf ihrer jeweiligen Erdumlaufbahn bekannt sind, und einer anschließenden Trilateration [DONATH 2009, S. 117 f.]. Weitergehende Informationen zum GPS finden sich in [HOFMANN-WELLENHOF ET AL. 1994].

Im Inneren von Gebäuden ist der GPS-Empfang ob der Signalschwächung und der elektromagnetischen Abschirmung durch die Gebäudehülle unzureichend. Daher werden dort Systeme zur Indoor-Lokalisation eingesetzt. In Fabriken finden sich verschiedene, meist funkbasierte, Systeme zur Lokalisation. Dabei spielt die Trilateration zur Bestimmung der Position eine wesentliche Rolle. Für einen Überblick über verfügbare Lösungen sei hier auf MAUTZ [2012, S. 9 ff.] verwiesen. Lokalisierungssysteme per se liefern kein gesamtheitliches, geometrisches Abbild des Produktionssystems, da neben der Positionsinformation die Information über die geometrische Gestalt eines jeden lokalisierten Objekts benötigt wird. Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, finden sich in der Fertigung allerdings zahlreiche Ressourcen, deren Gestalt nicht digital dokumentiert ist.

4.5.6 Fazit

Der konventionelle Ansatz, zu Beginn eines Planungsprojekts 2D-Pläne zu aktualisieren oder Fotos und Handskizzen aufzunehmen, bedingt in aller Regel mehrfache Aufnahmen und Unterbrechungen oder zumindest Behinderungen der laufenden Produktion.

Für die Aufnahme eines geometrischen Modells in der Produktion eignet sich die Photogrammetrie, sofern nur die Gebäudehülle oder große, ebene Strukturen aufgenommen werden sollen. Tachymeter liefern die präzise Einmessung einiger diskreter Punkte, die vorher festgelegt werden. Derartige Apparate finden zum Beispiel zur Kontrolle der Installation von Anlagen Anwendung [VMT 2012]. 3D-Laserscanner rastern die gesamte Umgebung ab und vermögen die geometrische Vermessung der Umgebung. Sie können mehrere Millionen diskrete Messpunkte aufnehmen. Der Einsatz des 3D-Laserscannings für Planungsprojekte wird in Kapitel 4.6 näher betrachtet.

Lokalisierungs-Systeme dienen der Positionsermittlung von Objekten. Aufgrund der Vielzahl an beweglichen Objekten in einer Fabrik kommen derartige Systeme heutzutage für dezidierte Objekte zum Einsatz. Sie liefern eine Übersicht der aktuellen Positionen dieser Objekte, allerdings kein holistisches Geometrie-Abbild des Produktionssystems.

4.6 Laserscanning

3D-Laserscanner liefern über die in Abschnitt 4.5.4 eingeführten physikalischen Prinzipien eine Punktwolke, welche die Koordinaten sämtlicher vermessener Punkte enthält [WIEDEMANN 2004, S.

248 ff.]. Eine solche Punktwolke liegt als maschinenlesbare Textdatei vor, sie weist je Messpunkt mindestens drei Einträge bezüglich der räumlichen Information auf – beispielsweise für kartesische Koordinaten den x-, y- und z-Wert. 3D-Laserscanner aggregieren über Laufzeitverfahren eine weiße Punktwolke mit der reinen Geometrie-Information. Sofern der Detektor im Laserscanner zusätzlich die Intensität des empfangenen Strahls auswertet, lässt sich eine intensitätsbasierte Punktwolke erstellen [KERSTEN ET AL. 2006, S. 1 f.]. Diese beinhaltet neben den Koordinaten der gemessenen Punkte den Grauwert, der mit der Intensität korrespondiert, und verfügt somit je Messpunkt über mindestens vier Einträge [WESTKÄMPER ET AL. 2001, S. 306]. Im Speziellen finden sich Laserscanner, die die Laservermessung um Farbfotos ergänzen. Durch die Verknüpfung von Messpunkt und Pixel im Foto werden jedem vermessenen Punkt Farbinformationen (zum Beispiel im RGB-Farbraum) zugeordnet [ALBA & SCAIONI 2007, S. 2 f.]. In diesem Falle entsteht eine farbige Punktwolke, sodass die Textdatei zusätzlich je Koordinate drei Farbwerte aufweist.

Grundsätzlich lassen sich zwei Verfahren des Laserscannings zur dreidimensionalen Aufnahme von Objekten unterscheiden – terrestrisches Laserscanning, bei dem der Scanner selbst während einer Aufnahme seine Position beibehält, und kinematisches Laserscanning.

4.6.1 Terrestrisches Laserscanning

Beim terrestrischen Laserscanning wird ein Scanner stationär an mehreren Standorten aufgestellt, von denen aus er jeweils eine Punktwolke der Umgebung aufnimmt [DONATH 2009, S. 106 ff.]. Die einzelnen Punktwolken werden im nachgelagerten Schritt der Registrierung zu einem Gesamtmodell fusioniert [EBD.]. Von jedem Standpunkt aus ergeben sich „sichttote“ Bereiche [WIEDEMANN 2004, S. 254], die nicht aufgenommen werden, da sie sich gegenüber dem Scanner im optischen Schatten einer ersten Geometrie befinden. Abbildung 4-8 skizziert diesen Umstand der Abschattung.

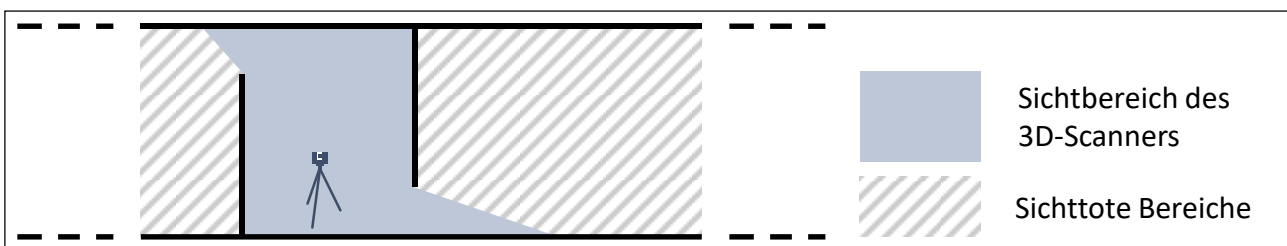


Abbildung 4-8: Schemaskizze zur Abschattung beim Laserscanning

Um diese sichttoten Bereiche im späteren Gesamtmodell auszugleichen, werden mehrere einzelne Punktwolken aufgenommen. Bei der Positionierung des Scanners ist dabei darauf zu achten, dass sichttote Bereiche, die von einer Position aus nicht einsehbar sind, durch eine Aufnahme von einer anderen Position aus kompensiert werden.

Das Gesamtmodell wird durch die Registrierung der einzelnen Punktwolken, die über terrestrische Laserscans gewonnen wurden, kalkuliert. BRACHT ET AL. [2011, S. 253 ff.] beschreiben eine präzise Methode, bei der in der Struktur „Messbolzen“ fest installiert und via Tachymeter genau eingemessen werden. Auf diese Messbolzen werden im weiteren Verlauf Marker montiert, welche später zur Registrierung der einzelnen Punktwolken benötigt werden. Somit spannen die installierten Messbolzen das Basis-Koordinatensystem auf, welches auch für das digitale Modell gilt. Die genannten Autoren setzen also auf eine zweistufige Kombination aus Tachymetrie und 3D-Laserscanning. Der Ansatz folgt dabei der in Abbildung 4-9 gezeigten Sequenz.

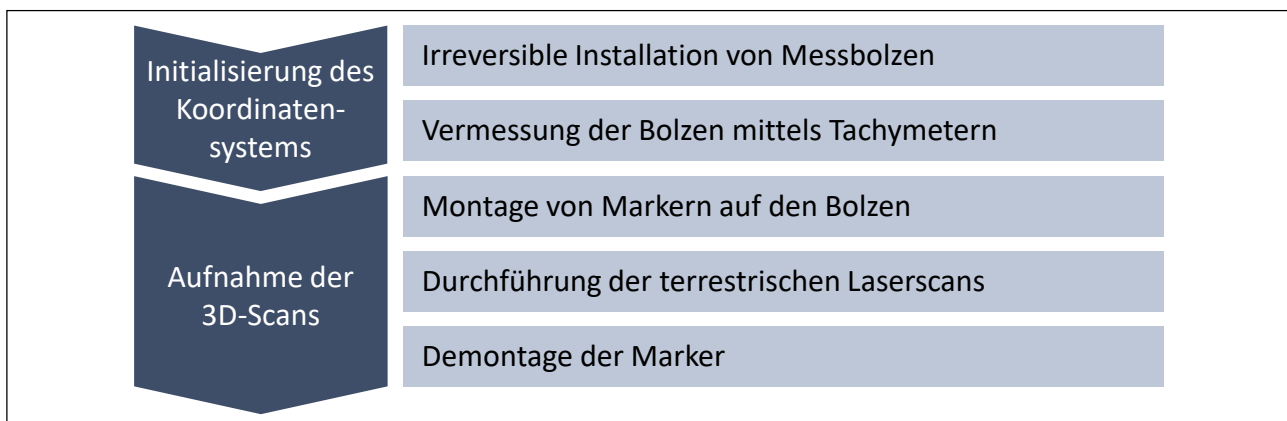


Abbildung 4-9: Klassischer Ablauf des Laserscannings nach BRACHT ET AL. [2011, S. 253 ff.]

Gängig sind Kugeln [BRACHT ET AL. 2011, S. 254 f.] als Marker, da sich in der zweidimensionalen Projektion immer einen Kreis ergibt, weshalb sie aus jeder Richtung als Referenz genutzt werden können. Daneben kommen weitere „Zielmarken“ [DOLD & BRENNER 2007, S. 9 ff.] oder „Targets“ [DONATH 2009, S. 112 f.] zum Einsatz. In der Literatur finden sich dafür Prismen-Targets [DONATH 2009, S. 75 ff.] als auch Schachbrettmuster mit hohem Kontrast zwischen schwarzen und weißen Feldern [DOLD & BRENNER 2007, S. 11].

Die Marker selbst müssen eine charakteristische, präzise Geometrie aufweisen, sodass sich die Position jeden Markers auf Basis der vermessenen Position des jeweiligen Messbolzens und der bekannten Geometrie des Markers kalkulieren lässt, wie Formel 5 beschreibt.

$$\vec{p}_{\text{Marker}} = \vec{p}_{\text{Messbolzen}} + \vec{v}_{\text{Geometrie}}$$

Formel 5: Kalkulation der Koordinate eines Markers

Jede Punktwolke wird anhand dreier Marker, die sich eindeutig identifizieren lassen und dabei nicht auf einer Geraden liegen dürfen, in das Hallen-Koordinatensystem überführt. Die Marker sind bei diesem Verfahren essenziell, damit die gescannte Punktwolke „lagerichtig“ in das Koordinatensystem der Struktur, das die Marker aufspannen, transformiert werden kann [BRACHT ET AL. 2011, S. 254]. Aufgrund der Toleranz des Laserscanners und potenzieller Limits, was die Genauigkeit der Projektion des Markers auf einen Punkt betrifft, kann diese Kalkulation als Optimierungsaufgabe formuliert werden. Für die drei Marker wird die Summe der Abstände (nach Euklid'scher Norm) zwischen der auf Basis der tachymetrischen Vermessung berechneten Koordinate und der korrespondierenden Koordinate in der Punktwolke minimiert:

$$\min \sum_{n=1}^3 |\vec{p}_{\text{Punktwolke},n} - \vec{p}_{\text{Marker},n}|$$

Formel 6: Minimierungsproblem zur Registrierung einer Punktwolke in das Hallen-Koordinatensystem

Nach der Transformation sämtlicher einzelner Punktwolken in das Hallen-Koordinatensystem liegt die Gesamtpunktwolke vor. Diese zusammenhängende Punktwolke stellt ein dreidimensionales Modell der aufgenommenen Struktur dar. Die Genauigkeit der Gesamtpunktwolke wird also von der Präzision des Tachymeters, des 3D-Scanners und durch den Registrierungsprozess beeinflusst. Als optionaler Schritt kann die Kolorierung der Punkte erfolgen. Um die Punktwolke einzufärben, muss an jedem Standpunkt, von dem aus ein Scan aufgenommen wird, ein Panoramafoto aufgenommen werden. Der Schritt zur Panoramafotografie bringt daher vor Ort zusätzlichen Zeitaufwand mit sich.

4.6.2 Kinematisches Laserscanning

Kinematisches Laserscanning bedeutet, dass sich der gesamte Scanner während der Aufnahmen relativ zur Umgebung bewegt. Dies wird über Transportwagen [MÜLLER & SOCHERT 2006, S. 343 ff.] oder Fluggeräte [HYYPÄÄ 2011, S. 203 ff.] realisiert. Über eine Odometrie oder Inertialsensorik [HAALA ET AL. 2008, S. 1119 ff.], die aus einer Kaskade verschiedener Messsysteme bestehen kann, wird die Bewegung des Messgeräts aus den gemessenen Rohdaten herausgerechnet. Die Information über den Standort des Messgeräts wird nahezu in Echtzeit verarbeitet, um die via Scanner gemessenen Daten korrekt zusammzusetzen. Dazu kommen sogenannte SLAM-Algorithmen (Simultaneous Localization and Mapping) zum Einsatz [VINCZE ET AL. 2008, S. 25 f.]. Bezüglich der Untersuchung von SLAM-Verfahren und Odometrie sei auf SCHROTH [2013] verwiesen. Werden mittels kinematischem Laserscanning mehrere einzelne Datensätze aufgenommen, so werden diese einzelnen Punktwolken zueinander registriert. Anwendungen des kinematischen Laserscannings finden sich mehrheitlich außerhalb von Gebäuden, um beispielsweise Straßenzüge, Tunnel oder Landschaften zu vermessen [MÜLLER & SOCHERT 2006, S. 343 ff.; HAALA ET AL. 2008, S. 1119 ff.]. Für einen Überblick über kinematische Scansysteme sei auf HESSE ET AL. [2016, S. 132] verwiesen.

Unabhängig vom Verfahren muss beim Laserscanning die Szene während der Aufnahmen vor Ort in derselben Position stehenbleiben. Daher können die Scans von Produktionssystemen nur binnen einer entsprechend langen Produktionsunterbrechung durchgeführt werden.

4.6.3 Ableitung von Modellen für die Planung

Die Punktwolke eines einzelnen terrestrischen Scans ist eine mehrere Megabyte bis Gigabyte große Datei [RIETDORF 2005, S. 18]. Filter werden appliziert, um Punktwolken auszudünnen [KERBER 2016, S. 44], sodass aufgrund der geringeren Auflösung ein kompakteres Modell entsteht. Außerdem existieren Ansätze, um Punktwolken in kompaktere Repräsentationsformen umzuwandeln. In der Literatur finden sich verschiedene Vorgehensweisen, um gescannte Punktwolken in dreidimensionale Oberflächenmodelle [KERSTEN ET AL. 2012] zu konvertieren. Dabei werden die manuelle Modellierung und die teilautomatische Nachkonstruktion unterschieden.

Im ersten Fall wird angestrebt, relevante Strukturen mithilfe eines CAD-Werkzeugs von Hand zu rekonstruieren [KERBER 2016, S. 44]. So setzen beispielsweise WESTKÄMPER ET AL. [2001, S. 307] auf die

manuelle Überführung von Objekten aus der Punktwolke in CAD. BRACHT ET AL. [2011, S. 256] schlagen einen gegebenenfalls mehrstufigen Prozess der CAD-Konstruktion auf Grundlage der Punktwolke vor. Die Forscher setzen auf Objektbibliotheken, sodass zur Nachmodellierung Objekte nicht konstruiert, sondern aus einem Katalog entnommen und in der Punktwolke platziert werden [BRACHT ET AL. 2011, S. 256 f.].

„Per Knopfdruck“ können simple Geometrien in Punktwolken detektiert und in eine CAD-Zeichnung transformiert werden [WESTKÄMPER ET AL. 2003, S. 166]. Es finden sich weiterführende Ansätze, Punktwolken automatisiert in Segmente zu unterteilen und diese durch regelgeometrische Objekte zu ersetzen [WESTKÄMPER ET AL. 2006, S. 60 ff.]. Wissenschaftler nutzen die 3D-Modellierung von gescannten Punktwolken auch im Bereich der Bestandsaufnahme von Baustrukturen [BLANKENBACH 2015, S. 359]. In derartigen Architektur-Anwendungen findet eine Modellierung ebenfalls über Primitivgeometrien statt, welche sich in Teilen automatisieren lässt [EBD.]. TONN & BRINGMANN [2017, S. 22 ff.] stellen eine Methode zum „Fitting“ vor, um Punktwolken von Gebäuden teilautomatisiert in ein Bauwerksmodell beziehungsweise BIM-Modell zu überführen.

Zur automatisierten Umwandlung von Punktwolken kommen außerdem Ansätze zur Vermaschung, auch „Meshing“ [BÖHM & PATERAKI 2006, S. 2] genannt, zum Einsatz, die darauf abzielen, eine Punktwolke in ein Polygonmodell zu überführen. Polygone oder Vielecke werden zwischen benachbarten Punkten der Punktwolke eingefügt [HALLER 1998, S. 61 ff.], wodurch zunächst ein Polygonnetz [GORNÝ & VIERECK 1984, S. 228 f.] entsteht. Geometrische Fehler wie Löcher, die sich im Polygonnetz finden, können im Anschluss gefüllt werden [JU 2009, S. 20 ff.; MANSFIELD 2014, S. 120 ff.]. Im Allgemeinen wird eine Reduktion der Anzahl an einzelnen Polygonen angestrebt, um das Modell möglichst kompakt zu gestalten, damit es sich in weiteren Schritten effizient nutzen lässt [CAMPAGNA 1999].

Auf Grundlage der Vermaschung kann eine sogenannte Flächenrückführung erfolgen [BÖHM 2009, S. 14 ff.]. Dazu wird eine Umwandlung der Polygonflächen in eine mathematische Beschreibung derselben vorgenommen [EBD.], sodass das entstehende Modell die ursprüngliche Punktwolke in Form von Freiformflächen [ROUBANOV 2014, S. 120] approximiert. Optional erfolgt die manuelle Überführung dieses Modells aus Freiformflächen, sodass schließlich ein parametrisiertes CAD-Modell resultiert. Dabei kann das Gesamtmodell zum Beispiel in einzelne Bereiche oder Objekte unterteilt werden.

Diese Idee, Punktwolken in ein CAD-Modell zu überführen, hat bis heute Bestand [NÄSER & WENGEL 2017]. Nach der Wandlung von Punktwolken in Primitivgeometrien, Flächenmodelle oder CAD-Objekte folgt die digitale Planung dem etablierten Vorgehen. Die eingeführten Ansätze zur Digitalisierung mit 3D-Laserscannern finden in Fabriken [WESTKÄMPER ET AL. 2001, S. 304 ff.; WESTKÄMPER ET AL. 2003, S. 164 ff.; DÜRR & KUHLMANN 2008, S. 28 ff.] als auch in anderen Bereichen [GREWE ET AL. 2011, S. 107 ff.; FRIEDEWALD ET AL. 2013, S. 7 ff.] Anwendung. Das Gros der etablierten Ansätze nutzt die Punktwolke stets als Zwischenstufe auf dem Weg zu einer CAD-Repräsentationsform.

Nur vereinzelt werden Punktwolken ohne Konvertierung zur Planung eingesetzt. WESTKÄMPER ET AL. [2001, S. 307] kombinieren die Punktwolke mit einem aktuellen zweidimensionalen Layout des korrespondierenden Bereichs. Die Wissenschaftler stellen dabei Kollisionsüberprüfungen an. WESTKÄMPER ET AL. [2003, S. 165 f.] nutzen die Punktwolke direkt zur Ausleitung von Maßen. Zusätzlich visualisieren sie Unebenheiten von Flächen in der Punktwolke. DÜRR & KUHLMANN [2008, S. 29] betonen den Aufwand für die Nachmodellierung von Punktwolken. Sie minimieren daher die Anzahl der Punkte in einer Punktwolke bewusst, um die kompaktere Punktwolke anschließend ohne weitere Modellierung zur Kollisionsüberprüfung mit neuen Anlagen zu verwenden.

4.6.4 Fazit

Terrestrische 3D-Laserscanner liefern mit der Punktwolke eine digitale Repräsentation der Geometrie realer Objekte. Sie können für die Vermessung von Fertigungsstrukturen genutzt werden. Vor Ort werden zahlreiche Scans aufgenommen, damit in der endgültigen Punktwolke keine Lücken verbleiben, die aus sichttoten Bereichen der einzelnen Aufnahmen stammen. Mehrstufige Verfahren, die auf eine initiale Installation und Vermessung von Messbolzen setzen, gestalten sich zeitaufwendig und verlangen entsprechend großzügige Pausen der Produktion. Zudem muss die Installation der Messbolzen überhaupt möglich sein und von den verantwortlichen Betreibern genehmigt werden. Die Registrierung der einzelnen Punktwolken hat maßgeblichen Einfluss auf die Gesamtpräzision.

Kinematische Laserscanner finden vor allem im Freien und für große Strukturen Anwendung [RUTZ 2011, S. 38]. Im Inneren von Fabriken muss für kinematische Scansysteme die Zugänglichkeit gegeben sein respektive die Sicherheit für das System und die Produktion sichergestellt werden.

Für die Planung von Produktionssystemen wurde terrestrisches Laserscanning inklusive einer anschließenden Nachkonstruktion in einzelnen Projekten appliziert. Der Zeit- und Kostenaufwand für die Nachkonstruktion erweist sich in der Praxis ungleich höher dem der reinen Aufnahme, sodass diese Methode heute nicht in der Breite für Planungsprojekte angewandt wird. Mit der Nachkonstruktion oder Umwandlung von Punktwolken in eine CAD-Repräsentation geht eine Abstraktion der gescannten Punktwolke einher. Um den Aufwand zur Modellierung zu begrenzen, erfolgt eine Konzentration auf relevante Geometrien. Im Fall der Planung von Produktionsanlagen verfolgen die gezeigten Ansätze die Abbildung relevanter Geometrien, zum Beispiel Gebäudehülle, Säulen und Maschinen. Zur Kreation von BIM-Modellen werden Wände, Boden und Decken in eine CAD-Darstellung umgesetzt. Solche resultierenden Modelle stellen ergo eine reduzierte Abbildung der Punktwolke dar, da sie nicht alle aufgenommenen Details umfassen. Diese Approximation von Objekten resultiert in einem Verlust der Präzision gegenüber der initialen Punktwolke.

4.7 Fazit zum Stand der Technik

Die Produktentwicklung hat eine Digitalisierung über mehrere Stufen erfahren. Konstruktionen von Produkten erfolgen heutzutage in 3D-CAD-Softwarewerkzeugen. Produktmodelle liegen infolgedessen durchgängig digital vor. Im Gegensatz dazu finden sich kaum durchgängig aktuelle Modelle von Produktionssystemen. Gegenwärtige Forschungen zur Digitalisierung der Fertigung proklamieren den Digitalen Schatten eines Produktionssystems. Dieser Digitale Schatten soll Details zur aktuellen Fabrikstruktur und weitere aktuelle Daten, die das Produktionssystem beschreiben, enthalten. Für bestehende Fabriken trifft dies Stand heute nicht beziehungsweise in minimalem Umfang zu.

Digitale Planungsansätze für die Fertigung liefern eine hohe Aussagegüte, allerdings muss für bestehende Produktionssysteme initial hoher Aufwand für die Grundlagenermittlung investiert werden. Modulbasierte Ansätze beabsichtigen, den Aufwand zur Planung als auch zur Realisierung der Produktion zu senken. Die Fertigungsplanung mithilfe von Standardressourcen aus Bibliotheken ist etabliert. Bestehende Produktionsstätten warten allerdings mit individuellen Restriktionen auf, weshalb im Einzelfall überprüft werden muss, inwiefern ein Baukastenansatz für das jeweilige Fertigungssystem appliziert werden kann.

Zur Reduktion der gesamten Planungsdauer wurden Methoden vorgeschlagen, um die Planung und die Entwicklung als auch die einzelnen Phasen innerhalb der Planung zeitgleich durchzuführen. Die Parallelisierung der Schritte des Produktentstehungsprozesses ist heute etabliert, außerdem finden einzelne Phasen der Planung von Produktionssystemen simultan statt. Medienbrüche in der interdisziplinären Arbeit – einerseits zwischen den beteiligten Disziplinen andererseits zwischen Anlagenlieferant und Fabrikbetreiber – erschweren dabei die Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Parteien. Agile Methoden aus der Softwareentwicklung finden sporadisch Eingang in den Produktentstehungsprozess. Vor dem Hintergrund kürzerer Produktlebenszyklen ist ein pünktlicher Produktionsstart entscheidend für den Markterfolg und damit für das Gesamtunternehmen, sodass sich in der Praxis vor allem klassische Vorgehensweisen der Planung mit festem Zieltermin finden.

Die Änderungsplanung von Produktionssystemen dominieren wissenschaftliche Ansätze mit klarem Fokus auf Kennzahlen, die dazu dienen, einen Änderungsbedarf zu detektieren. Geometrische Aspekte werden in einzelnen Abhandlungen beleuchtet. Wissenschaftler versuchen, die initiale Modellierung bestehender Produktionssysteme explizit zu vermeiden.

Neben der manuellen Vermessung findet zur Rekonstruktion von Gebäuden die Photogrammetrie Verwendung. Dieses Verfahren kommt für die Modellierung ebener Objekte wie Fassaden in Betracht. Daneben ermöglichen optische Mechanismen das 3D-Laserscanning, wobei zwischen kinematischem und terrestrischem Laserscanning differenziert wird. Kinematisches Laserscanning wird vor allem zur Aufnahme von Außenbereichen genutzt. In bestehenden Produktionssystemen stellt terrestrisches 3D-Laserscanning ein mögliches Werkzeug zur Aufnahme eines dreidimensionalen Modells dar. Dabei steht der Installationsaufwand für Messbolzen und Markern in der Produktion einer breiten Anwendung entgegen. Vorhandene Ansätze, die resultierende Punktwolke nachzumodellieren, erweisen sich als äußerst zeitintensiv. Lediglich in Einzelfällen wird das 3D-Laserscanning inklusive der Überführung der gescannten Daten in ein CAD-Modell eingesetzt, um ein geometrisches Grundlagenmodell zu generieren. Die Nachmodellierung impliziert allerdings eine weitgehende Abstraktion und bringt einen entsprechenden Präzisionsverlust mit sich.

5 Konzeption

Basierend auf den in Kapitel 3.3 aufgestellten Anforderungen wird eine Methode entwickelt, um Produktionssysteme mithilfe der 3D-Digitalisierung zu planen. Der innovative Ansatz setzt auf die Aufnahme der Fertigungsstruktur vor Ort, die Aufbereitung der Daten und die Planung in einem interdisziplinären Team. Im Zuge der 3D-Digitalisierung wird ein geometrisches Modell eines existierenden Produktionssystems und Farbfotos desselben aufgenommen, woraus eine farbige Punktwolke des Produktionssystems generiert wird. Die neue Methode wird derart gestaltet, dass ein umfassendes Geometriemodell der etablierten Produktion entlang des gesamten Planungsprozesses genutzt werden kann. Insgesamt rückt Effizienz in den Mittelpunkt der Methode – es gilt, die 3D-Digitalisierung und den Planungsprozess zeiteffizient zu gestalten.

Zur Befähigung der innovativen Methode wird ein IT-System entworfen, das die Planung unterstützt. Ein Server wird als dessen Kernkomponente zur Speicherung von Modellen und zur Visualisierung von Punktwolken konzipiert. Das System soll die einfache Zugänglichkeit zu Daten gewährleisten und die Versionierung verschiedener Planstände übernehmen. Im Folgenden werden die Konzeption der Planungsmethode sowie des korrespondierenden Systems dargelegt.

5.1 Gesamtkonzeption der Methode

Die Methode ist zweistufig aufgebaut – zunächst wird über die 3D-Digitalisierung ein Abbild bestehender Fertigungsstrukturen gewonnen, worauf der folgende Planungsprozess aufsetzt.

Mit der 3D-Digitalisierung erfolgt die Überführung der realen Fertigung in ein digitales Modell. Dieser Schritt beinhaltet nach entsprechender Vorbereitung die Aufnahme und Aufbereitung von 3D-Scans und Farbfotos. Als Resultat der 3D-Digitalisierung liegt eine farbige Punktwolke vor. Die 3D-Digitalisierung wird dahingehend entwickelt, dass sich die Zeitspanne zwischen dem Start der Aufnahmen und dem Planungsbeginn möglichst minimal gestaltet. Die farbigen Punktwolken werden durchgängig in der weiteren Planung eingesetzt. Die Planung umfasst den digitalen Besuch der Produktion, die Konzept- sowie die Detailplanung. Zwecks des digitalen Besuchs der Produktion werden Punktwolken visualisiert, jedoch nicht modifiziert. Zur Kreation neuer Planstände werden Punktwolken während der Konzept- und der Detailplanung gezielt umgestaltet.

Die zweistufige Methode inklusive der einzelnen Prozessschritte zur 3D-Digitalisierung und zur Planung gibt Abbildung 5-1 wieder.

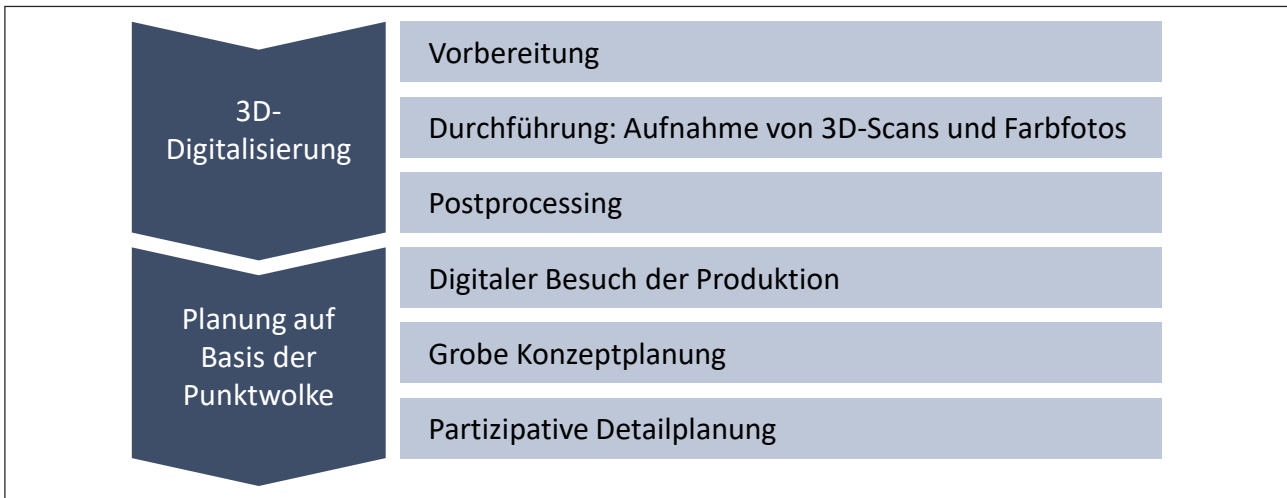


Abbildung 5-1: Gesamtablauf der innovativen Methode zur Planung von Produktionssystemen auf Basis der 3D-Digitalisierung

5.2 3D-Digitalisierung bestehender Produktionsstrukturen

Als erster Schritt der 3D-Digitalisierung ist die Vorbereitung zwecks Terminierung erforderlich. Anschließend werden vor Ort in der Produktion zahlreiche 3D-Scans inklusive Farbfotos aufgenommen. Um ein zusammenhängendes Modell zu generieren, werden die einzelnen Scans entpackt und die resultierenden Punktwolken zueinander registriert und koloriert.

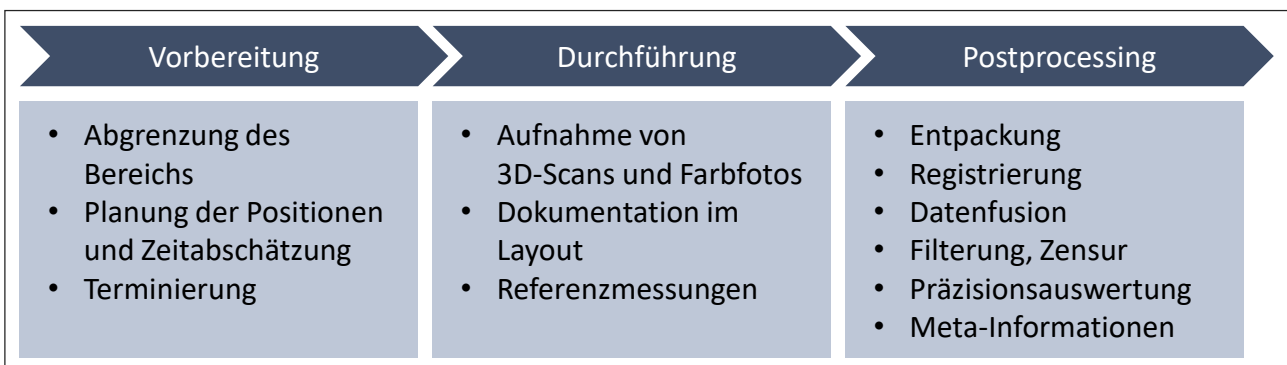


Abbildung 5-2: Ablauf der 3D-Digitalisierung

Die optionale Zensur der Punktwolke und die Validierung schließen die 3D-Digitalisierung ab. Die nachstehenden Abschnitte erklären die einzelnen Schritte, die in Abbildung 5-2 skizziert sind.

Für die konzipierte Methode beschreiben die Termini des 3D-Scans respektive 3D-Scannings folgend die Aggregation von 3D-Scans inklusive zugehöriger Farbfotos.

5.2.1 Vorbereitung

Zunächst wird der Zeitaufwand für das 3D-Scanning des bestimmten Bereichs abgeschätzt. Dazu wird der relevante Fertigungsabschnitt räumlich eingegrenzt. Die Kalkulation des Bruttozeitbedarfs erfolgt anhand des ausgewählten Scanverfahrens, der Grundfläche und der geometrischen Kompliziertheit der Struktur. Neben der zeitlichen Bewertung wird die grobe Positionierung der einzelnen Aufnahmen vorgenommen. In einem Etagenlayout wird festgelegt, an welchen Positionen Aufnahmen durchgeführt werden sollen. Durch den parallelen Einsatz mehrerer 3D-Scanner lässt sich gegebenenfalls ein Zeitvorteil erzielen. Der Netto-Zeitbedarf wird aus der Möglichkeit und dem Umfang dieser Parallelisierung abgeleitet. Er stellt die Grundlage für die Terminfindung dar.

Um einen reibungslosen Ablauf der Aufnahmen vor Ort sicherzustellen, muss ein passender Termin bestimmt werden. Der Produktionsprozess muss während der Durchführung ruhen. Sämtliche Gegenstände im Aufnahmebereich sollten über die gesamte Zeit hinweg in derselben Position verharren, damit sich ein konsistentes Gesamtbild ergibt. Da Personen relevante Teile der Fabrikstruktur verdecken können, sollte der Bereich für den Zeitraum der Aufnahme der 3D-Scans frei von Menschen sein. Außerdem gilt es insbesondere im deutschen Rechtsraum, die Aufnahme von Personen zu vermeiden [KUNSTURHG 2001]. Um Maschinenstörungen vorzubeugen, sind potenzielle Interferenzen durch den gebündelten Energiestrahle des Lasers vorher abzusichern.

5.2.2 Durchführung: Aufnahme von 3D-Scans der bestehenden Struktur

Um der in Kapitel 3.3.2 formulierten Genauigkeitsanforderung Genüge zu tun, setzt die Methode auf 3D-Scansysteme mit einer entsprechend hohen systemimmanenten Messgenauigkeit. Zum Einsatz kommen moderne Scansysteme, die zusätzlich die Aufnahme von Farbfotos ermöglichen.

Produktionsunterbrechungen sind in stark ausgelasteten Fertigungsstätten rar. Die Geschwindigkeit vor Ort ist für die 3D-Digitalisierung daher primär entscheidend. Die etablierten künstlichen Marker wie Prismen oder Referenzkugeln, die in Absatz 4.6.1 ausgeführt sind, verzögern den Prozess des konventionellen Laserscannings immens: In einer neuen Umgebung fällt ein hoher Aufwand zur initialen Installation und Vermessung der Messbolzen an. Bei jeder weiteren Aktion müssen

zumindest die Marker auf die Bolzen gesetzt, nach mehreren Aufnahmen mehrfach versetzt und nach Fertigstellung aller Aufnahmen wieder abgebaut werden. Außerdem beeinträchtigen derartige zusätzliche Utensilien, die transportiert werden müssen, die Mobilität.

Die neue Methode intendiert eine Beschleunigung der 3D-Digitalisierung durch die gezielte Reduktion von Nebenzeiten, während derer keine Informationsaufnahme erfolgt. Die Methode verzichtet beim 3D-Scanning bewusst auf Marker, damit die Installation und Vermessung von Messbolzen entfällt. Um die Effizienz weiter zu steigern, wird eine Dokumentation möglichst parallel zur Aufnahme der 3D-Scans arrangiert: Beim Einsatz eines stationären Scansystems soll der Operator sich während der Aufnahme außerhalb des Sichtbereichs des Geräts aufhalten. Diese Zeit soll der Operator nutzen, um die aktuelle Position des Scanners eindeutig identifizierbar im vorbereiteten Layout festzuhalten. So lässt sich einerseits sicherstellen, dass Aufnahmen an allen geplanten Positionen durchgeführt werden. Andererseits unterstützen diese Lokalisationsinformationen die spätere Datenaufbereitung. Wird ein kinematisches Scansystem eingesetzt, so ist die Trajektorie, also die Bahnkurve, entlang derer der Operator das mobile System bewegt, in gleicher Logik zu notieren.

Die Methode setzt auf die Bewertung der gesamten 3D-Digitalisierung anhand einer Präzisionsuntersuchung. Vor Ort werden Maße genommen, um diese später im digitalen Modell zu kontrollieren. Hierfür sollte ein unabhängiges, möglichst präzises Messverfahren gewählt werden. Idealerweise werden diese Abstände mit einem Verfahren einer um eine Größenordnung höheren Präzision, als sie der 3D-Scanner aufweist, ermittelt. Ein Messprotokoll dient dazu, diese Maße inklusive der jeweiligen Positionen, von denen aus sie aufgenommen werden, zu dokumentieren. Um den Zeitbedarf in der Produktion zu minimieren, wird dieser Schritt vor Ort nach Möglichkeit parallel zu den Scanaufnahmen durchgeführt.

5.2.3 Postprocessing

Um die gewonnenen Daten in ein planungstaugliches Modell zu überführen, werden sie prozessiert: Nach dem Entpacken der Daten erfolgt die Registrierung der einzelnen Punktwolken zueinander. Dabei wird das Layout mit den Informationen bezüglich der Standorte der einzelnen Aufnahmen zu Hilfe genommen. Im Anschluss an die Registrierung erfolgt die Transformation der zusammenhängenden Punktwolke in ein übergeordnetes Koordinatensystem. Die optionalen Schritte der

Filterung und Zensur der Punktwolke sowie die Auswertung der erzielten Präzision und die Ergänzung von Meta-Informationen schließen das Postprocessing ab.

Marktübliche 3D-Scanner speichern die Daten in einem kompakten Format im Gerät. Zur weiteren Verarbeitung werden diese Daten auf eine Recheneinheit übertragen und dort entpackt. Die vorliegende Methode richtet den Fokus auf die zeiteffiziente 3D-Digitalisierung. Deshalb werden die Datenübertragung und das Entpacken vorzugsweise zeitgleich zu den Scans organisiert. Über einen Kreislauf mit mehreren auswechselbaren Speichermedien werden die Aufnahmen auf einen Computer transferiert. Nach einer Serie von 3D-Scans wird das Speichermedium im Scanner gegen ein weiteres ausgetauscht. Dieses Vorgehen nutzt die Hot-Plugging-Fähigkeit [CZERNOHOUS 2012, S. 55] aktueller Scanner- und Computer-Hardware. Ein Speichermedium lässt sich dabei verbinden, einlesen und auswerfen, während das System eingeschaltet ist. Alternativ können die Daten drahtlos an eine separate Recheneinheit übertragen werden. Hierbei ist die Verträglichkeit des Übertragungssystems mit der Infrastruktur der Umgebung sicherzustellen.

Den nächsten Schritt der Methode bildet die Registrierung. Wenn sämtliche 3D-Scans auf dem Rechnersystem entpackt sind, wird ein Rechenprozess angestellt, um die einzelnen Punktwolken in ein gemeinsames Koordinatensystem zu transformieren.

Zunächst gilt es, die per Scanner erfassten Punktwolken zueinander zu positionieren. Als Hilfsmittel dient dabei das Layout mit den verzeichneten Scanpositionen (vgl. 5.2.2), welches die Nachbarschaftsbeziehungen der Scans darlegt. Ohne die Information, welche Punktwolken jeweils in Nachbarschaft zueinander liegen, fällt der Zeitaufwand für diesen Schritt ungleich höher aus. Mit der Anzahl an aufgenommenen Scans N bietet sich eine theoretisch mögliche Anzahl von K Kombinationen, wenn keinerlei Information über die Nachbarschaftslage zur Verfügung steht. Diese Anzahl steigt quadratisch mit der Anzahl an aufgenommenen Scans nach folgender Formel:

$$K = \sum_{n=1}^N (n - 1) = \frac{N^2 - N}{2}$$

Formel 7: Anzahl der möglichen Nachbarschaftskombinationen bei N aufgenommenen Scans (Summenformel nach WESTERMANN [2008, S. 7])

Sofern derjenige Nutzer, der die Registrierung der Scans vornimmt, die Strukturen vor Ort nicht kennt, muss er im ungünstigsten Falle mindestens all diese Kombinationen ausprobieren, was einen erheblichen Zeitaufwand für die Registrierung bedeutet. Dadurch, dass die Positionen der Scans festgehalten sind, lässt sich die Datenaufbereitung insbesondere bei Projekten mit einer Vielzahl einzelner Scans deutlich beschleunigen. Das entsprechende Layout muss die Lage der Scans relativ zueinander inklusive einer eindeutigen Identifizierbarkeit wiedergeben.

Darauf aufbauend werden die einzelnen Punktwolken paarweise feinregistriert. Da die Methode explizit auf künstliche Marker verzichtet, wird diese Registrierung basierend auf natürlichen geometrischen Charakteristika durchgeführt. Um dabei eine hohe Genauigkeit zu erreichen, werden korrespondierende Ebenen aus benachbarten Punktwolken zueinander in Übereinstimmung gebracht. Zunächst werden in jeder Punktwolke Ebenen ermittelt und Ebenen-Objekte mit möglichst geringer Toleranz bestimmt. Für jeden Punkt \vec{p} , der als Element der Ebene betrachtet wird, ergibt sich sein Abstand d von der als ideal angenommenen Ebene E mit dem Aufpunkt \vec{p}_0 (in Hessescher Normalenform [SCHMIDT 2015, S. 167]) nach Formel 8.

$$d(\vec{p}, E) = \frac{|\vec{n} * (\vec{p} - \vec{p}_0)|}{|\vec{n}|}$$

Formel 8: Berechnung des Abstands eines Punkts von einer Ebene in Hessescher Normalenform [SCHMIDT 2015, S. 175]

Dabei liegt ein Punkt \vec{p} innerhalb der Ebene E , sofern der Abstand d zur Ebene kleiner oder gleich einer definierten Toleranz ist. Algorithmen vermögen, Ebenen in einer Punktwolke zu detektieren [RUSU & COUSINS 2011]. In einer iterativen Kalkulation wird für jede Ebene in einer Punktwolke die tatsächliche maximale Abweichung (nach Formel 8) ermittelt. Diese Kalkulation gibt an, wie weit der äußerste Punkt, der der jeweiligen Ebene zugerechnet wird, von dieser entfernt ist. Bei dieser Methode löst die paarweise Registrierung der Punktwolken also die historischen Marker ab.

Nach erfolgreicher Registrierung der zusammengehörigen Punktwolken wird die Koloration der Punkte vorgenommen. Dazu gilt es, die Fotos, die je Standort aufgenommen wurden, zu einem Panoramafoto zusammenzufügen, zu stitchen [GOCKEL 2012, S. 58 ff.]. Basierend auf diesem Panoramafoto werden die Messpunkte um die korrespondierende Farbinformation angereichert, sodass eine farbige Punktwolke resultiert.

Nun liegen die kolorierten Punktwolken inklusive der Information, wie diese zueinander im Raum anzuordnen sind, vor, sodass die Kalkulation einer gesamten, zusammenhängenden Punktwolke erfolgen kann. Dazu werden sämtliche Punkte jeder Punktwolke jeweils vom lokalen in ein gemeinsames, globales Koordinatensystem transformiert. Zur Adaption des globalen Koordinatensystems wird die gesamte Punktwolke zunächst transferiert, sodass der Punkt \vec{p}'_1 der Punktwolke in den Soll-Ursprung \vec{o}_1 verschoben wird. Dabei müssen Punkte im Inneren von Objekten, die nicht direkt gemessen wurden, über mathematische Operationen definiert werden. Schließlich wird die Punktwolke um den Ursprung rotiert, bis ein weiterer Referenzpunkt \vec{p}'_2 ungleich dem Ursprung in bestmögliche geometrische Übereinstimmung mit dem entsprechenden Pendant \vec{p}_2 gerät. Dieses Optimierungsproblem ist in Formel 9 formuliert.

$$\min (d(\vec{p}'_2, \vec{p}_2))$$

Formel 9: Minimierungsproblem bei der Rotation der Punktwolke um den Ursprung

$$\text{mit } d(\vec{p}'_2, \vec{p}_2) = |\vec{p}'_2 - \vec{p}_2| = |(\vec{p}_2 - \vec{p}'_2)|$$

Formel 10: Kalkulation des Abstands zweier Punkte über Vektorrechnung [SCHMIDT 2015, S. 152]

Analog kann eine Drehung um eine weitere Achse erfolgen, um die Koordinatensysteme in möglichst gute Übereinstimmung zu bringen.

Die Methode sieht eine optionale Bereinigung der Punktwolke vor, um die Optik zu modifizieren. Dabei werden Filter appliziert, um isolierte Punkte, die auf Reflektionen oder den „Kanteneffekt“ [WEHMANN ET AL. 2007, S. 179] zurückzuführen sind, zu eliminieren. In gleicher Weise sollten Punkte entfernt werden, bei denen die Intensität des reflektierten Laserstrahls einen bestimmten Grenzwert unterschreitet, da die entsprechenden Punkte beispielsweise eine zu hohe Distanz vom Gerät aufgewiesen haben.

Anschließend sind kritische beziehungsweise sensible Bereiche einer Zensur zu unterziehen. Es ist von eminenter Bedeutung, Personen gemäß dem jeweils relevanten Datenschutz aus der Punktwolke auszuschneiden. Außerdem gilt es, gewisse Prozessinformationen (etwa zu Fehlerraten in der Produktion) und geheime Produktprototypen aus der Punktwolke zu entfernen.

Um zu untersuchen, welche Präzision bei der 3D-Digitalisierung insgesamt erreicht wurde, wird der Abgleich zwischen der Punktwolke und den Maßen vorgenommen, die in der realen Szene aufgezeichnet wurden. Korrespondierende Distanzen werden in Tabellenform einander gegenübergestellt. Sollten diese Stichprobenmessungen eine signifikante Abweichung der Punktwolke von der Realität aufzeigen, sind weitere Maßnahmen erforderlich, bevor die Punktwolke der Planung zur Verfügung gestellt wird.

Sofern im Rahmen der Arbeiten vor Ort keine separaten Maße für diese Überprüfung aufgenommen wurden, werden zunächst in der Punktwolke mehrere Distanzen zwischen charakteristischen Punkten bestimmt. Die jeweils korrespondierenden Strecken werden anschließend in der realen Szene ausgemessen. Dabei ist besonderes Augenmerk auf die Auswahl der Maße zu richten. Es gilt, immobile Objekte auszuwählen, zwischen denen direkter Sichtkontakt besteht und deren jeweilige Position sich in der Realität gegenüber dem Zeitpunkt der Aufnahme nicht verändert hat. Um diese Messungen in der Realität mit möglichst geringem Aufwand durchzuführen, ist bei der Auswahl der Maße in der Punktwolke zudem auf Zugänglichkeit und Einsehbarkeit der Objekte zu achten.

Neben der erreichten Genauigkeit sollten weitere Meta-Informationen ergänzt werden, die den 3D-digitalisierten Bereich näher determinieren. Für Fertigungsstrukturen empfiehlt sich beispielsweise die Kategorisierung nach Standort, Gebäudename, Etage sowie von Band- und Taktnummer. Außerdem sollten relevante Informationen zu Fertigungsinhalten oder eine Kategorisierung nach Gewerk eingetragen werden. Die Punktwolke wird schließlich inklusive der zugehörigen Meta-Informationen in einem Speicher abgelegt.

Die oben skizzierte Dynamik in Produktionssystemen (vgl. 3.1) resultiert in einer zumindest schleichenden Metamorphose der Fertigung. Deshalb werden zwei Strategien konzipiert, wann eine 3D-Digitalisierung zwecks Aktualisierung vorzunehmen ist, – die Push- und die Pull-Strategie.

Sofern am Shopfloor tiefgreifende Veränderungen vorgenommen werden, empfiehlt es sich, den betroffenen Sektor zeitnah zu digitalisieren, um 3D-Daten von hoher Aktualität zu aggregieren. Ausgehend von einer bekannten Änderung vor Ort in der Produktion strebt diese Push-Strategie eine unmittelbare 3D-Digitalisierung an. Dabei liefern in erster Linie die folgenden Vorgänge in einer Fertigung Anstoß für die 3D-Digitalisierung des entsprechenden Bereichs:

- Fertigstellung eines Gebäudes für die Produktion
- Abschluss eines Planungsprojekts
- Tiefgreifende Umstrukturierung eines Fertigungsbereichs
- Definierter Zyklus (in Abhängigkeit der Änderungsdynamik des jeweiligen Bereichs)

Bezüglich des Baus liefert eine 3D-Digitalisierung Informationen über die Innenansicht eines Gebäudes beziehungsweise über die Gebäudehülle. Für konsekutive Planungsschritte ist es relevant, inwiefern das reale Gebäude dem ursprünglichen Plan entspricht. Ein Abgleich zwischen geplanter und realer Gebäudestruktur bietet sich zum Beispiel an, wenn bereits im Kontext des BIM-Gedankens ein dreidimensionales Soll-Modell entworfen wurde.

Zum Abschluss eines Planungsprojekts soll das in der Produktion implementierte Konzept dokumentiert werden. Dies initiiert die 3D-Digitalisierung, sodass für folgende Planungen, die denselben Sektor tangieren, ein Modell der tatsächlich realisierten Lösung verfügbar ist.

Zeitnah nach tiefgreifenden Änderungen der Fabrik – seien es Umbauten einer Fertigungslinie, Umgestaltungen an der Gebäudestruktur oder die Installation neuer Fertigungsmittel – sollte eine 3D-Digitalisierung vorgenommen werden, damit die Punktwolke die Realität widerspiegelt.

Um den Aufwand für die 3D-Digitalisierung zu begrenzen, ist es ratsam, die zyklische 3D-Digitalisierung ausschließlich in Bereichen mit sehr hoher Änderungsdynamik vorzunehmen.

Die Push-Aktualisierung muss sich an den Produktionsplänen der jeweiligen Standorte orientieren, die auch den Überblick über geplante Produktionsunterbrechungen geben.

Bei der Pull-Strategie zur 3D-Digitalisierung zieht der Bedarf der Planung eine 3D-Digitalisierung nach sich. Sie wird veranlasst, wenn eine Integrationsplanung in ein bestehendes Produktionssystem ansteht, wobei unzureichende Transparenz über die aktuelle Situation am Shopfloor herrscht. Sofern eine langfristige Planung hinsichtlich der Produktpalette und der jeweiligen Starttermine der Produkte (SOP, siehe 2.1) besteht, empfiehlt sich die korrespondierende Terminierung der 3D-Digitalisierung. So kann gewährleistet werden, dass pünktlich zu Planungsbeginn ein aktuelles geometrisches Modell der Struktur, in die das Produkt integriert werden soll, zur Verfügung steht. Ausgehend vom SOP wird eine Rückwärtsterminierung vorgenommen, um zu bestimmen, zu welchem Termin die Planung beginnt und wann dementsprechend spätestens ein Grundlagenmodell benötigt wird. Auch in diesem Falle muss der

laufende Produktionsbetrieb bei der Terminierung der 3D-Digitalisierung Berücksichtigung finden. Gemäß des Pull-Prinzips definiert die planerische Anwendung den Umfang der zu digitalisierenden Bereiche. In Anbetracht der Zeitspanne zwischen Planungsstart und finaler Konzeptentscheidung wird unter Umständen eine Aktualisierung der Punktwolken im laufenden Planungsprojekt notwendig, um relevante Änderungen abzubilden, die seit Planungsstart stattgefunden haben.

Generell ist der zu digitalisierende Bereich möglichst eng abzugrenzen, um den Aufwand vor Ort minimal zu halten. Zur Aktualisierung des Teilbereichs einer Punktwolke sind die einzelnen neuen Punktwolken nach der eingeführten Methode zu registrieren. Anschließend kann die aktuellere Punktwolke in das bestehende globale Koordinatensystem des Bereichs transformiert werden.

5.3 Planung auf Basis von Punktwolken

Die 3D-Digitalisierung liefert mit der farbigen Punktwolke die geometrische Datengrundlage für die Planung von Produktionssystemen. Grundsätzlich werden zwei Szenarien unterschieden – je nachdem, ob die Punktwolke ausschließlich visualisiert wird oder ob sie eine Modifikation erfährt. Die Punktwolke wird für einen digitalen Besuch eines bestehenden Produktionssystems genutzt. Im planerischen Prozess werden Konzepte zur zukünftigen Gestaltung eines Produktionssystems geschaffen, im Zuge dessen werden die Punktwolken verändert. Dabei erfolgt die Konzeptplanung auf grober Ebene und anschließend die partizipative Detailplanung mit Beteiligten aus diversen Disziplinen, wie Abbildung 5-3 einführt.

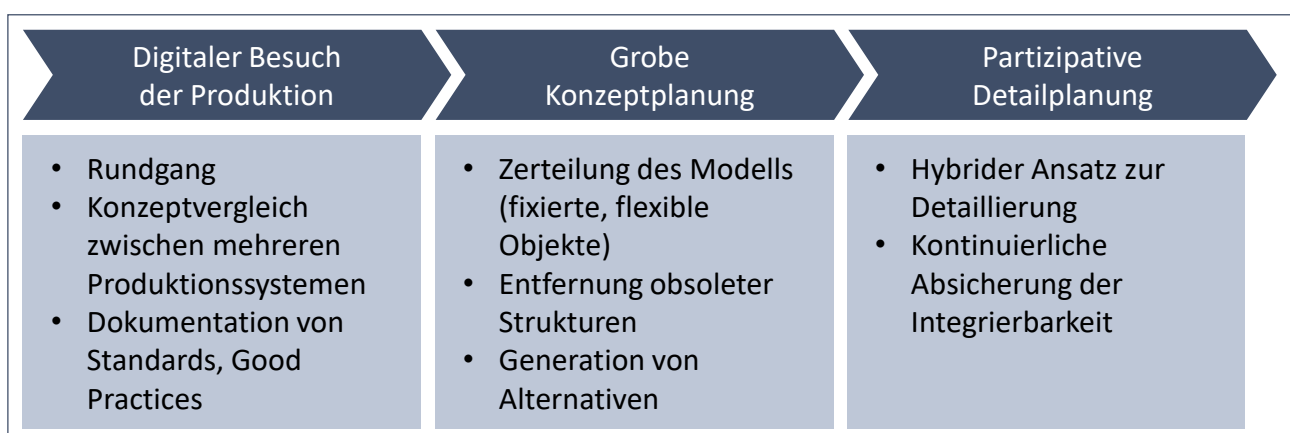


Abbildung 5-3: Ablauf der Planung auf Basis von Punktwolken

In den folgenden Passagen werden diese drei Schritte der Planung auf Grundlage von farbigen Punktwolken erläutert.

5.3.1 Digitaler Besuch der Produktion

Der Anwender nutzt die Visualisierung von Punktwolken, um sich einen Überblick über Konzepte zu verschaffen, die an verschiedenen Produktionsstandorten realisiert sind. Die Punktwolken bieten die Option des digitalen Besuchs der Fertigung. Die Meta-Informationen erleichtern es dem Nutzer, einen bestimmten Sektor zu finden. Die Punktwolke erlaubt die freie Navigation, der Nutzer kann beliebige Positionen und Blickwinkel einnehmen. Die fotorealistische Einfärbung der Punktwolke ermöglicht die intuitive Orientierung. Vermessungen in der Punktwolke erfolgen via Selektion zweier Punkte. Die Distanz dazwischen wird nach Formel 10 kalkuliert.

In internationalen Produktionssystemen finden sich im Allgemeinen ähnliche Produktionsbereiche an weltweit verteilten Standorten. Verwandte Produktionselemente werden 3D-digitalisiert und einem digitalen Konzeptvergleich unterzogen – ohne räumliche oder zeitliche Separation. Verwandte Bereiche sind dabei Sektoren in einem Produktionssystem, denen dieselbe oder eine vergleichbare fertigungstechnische Destination zukommt. Die Analyse gleichartiger Sektoren wird auf demselben Granularitätsniveau durchgeführt – es werden zum Beispiel Arbeitsstationen, Fertigungsmodule oder Bandabschnitte miteinander verglichen. Der dreidimensionale Vergleich von realisierten und optimierten Lösungen an verschiedenen Standorten kann im Sinne eines Benchmarks genutzt werden. Idealerweise werden hierzu alle verwandten Lösungen aus einem Produktionssystem 3D-digitalisiert.

Die 3D-Digitalisierung wird ebenso eingesetzt, um Standards inklusive der Ergebnisse aus dem kontinuierlichen Verbesserungsprozess zu dokumentieren. Schlanke Lösungen, die vor Ort entwickelt werden, und Good Practices, also Umsetzungen, die für gut befunden wurden, werden auf diese Weise von der Operation am Shopfloor in die Planung transferiert.

5.3.2 Konzeptplanung in der Punktwolke

Neben der Visualisierung gilt es, die Punktwolken zu modifizieren. Zur Planung neuer Konzepte werden eine oder mehrere Punktwolken von Nutzern bearbeitet.

Zu Beginn sollte der für die Planung relevante Bereich zugeschnitten werden. Dabei werden diejenigen Fertigungselemente in Betracht gezogen, die angepasst beziehungsweise umgeplant werden. Die für die aktuelle Planung irrelevanten Punkte werden bewusst ausgeblendet.

Um die planerischen Freiräume zu erarbeiten, wird die Punktwolke in statische Elemente, die Fixpunkte darstellen, da sie beispielsweise in Fundamenten fixiert sind, und mobile Objekte unterteilt. Mobile Objekte zeichnen sich dadurch aus, dass sie sich mit geringem Aufwand verschieben lassen. Um Gestaltungsräume für den Planungsfall möglichst plakativ zu visualisieren, werden alle mobilen Objekte zumindest in eine separate Punktwolke verschoben.

Anschließend werden obsolete Strukturen identifiziert und aus der Punktwolke herausgelöst. Steht zum Beispiel ein Produkt vor dem Auslauf oder werden bestimmte Anlagen nicht länger eingesetzt, werden diese aus der Punktwolke entfernt. Um diese Modifikation später nachvollziehen zu können, sollten die obsoleten Objekte in einer separaten Punktwolke abgelegt werden. Das verbleibende Modell kann weiter unterteilt werden. Dabei werden vom Groben ins Feine einzelne Elemente definiert und jeweils als separate Punktwolke gespeichert.

Sobald die Gebäudestruktur mitsamt den fixierten Fertigungselementen isoliert vorliegt, können neue Konzepte erarbeitet werden. Die Konzeptplanungsgruppe rund um einen Planungsspezialisten kreiert in einem modulbasierten Ansatz alternative Varianten für das Produktionssystem. Dieses Key-User-Konzept [STIEGLITZ ET AL. 2017, S. 645 f.] sieht vor, dass der Spezialist sämtliche Modifikationen an den Punktwolken ausführt. Dazu werden die Punktwolken einzelner Elemente eingesetzt – sie werden translatorisch verschoben und rotiert, dupliziert, skaliert und weiter modifiziert. Gegebenenfalls ist im Zuge dieses planerischen Schritts eine weitere Zerlegung bestehender Punktwolken vorzunehmen. Sollte ein relevanter Produktionsbereich fehlen, ist dieser schnellstmöglich zu digitalisieren. In diesem iterativen Prozess aus 3D-Digitalisierung und planerischer Modifikation der Daten entstehen mehrere Konzeptalternativen, die jeweils die Anordnung der Fertigungselemente in der bestehenden Gebäudehülle, den Flächenbedarf und das grobe Materialflusskonzept wiedergeben. Unter Beachtung der realen Randbedingungen wird die Realisierbarkeit dieser initial erarbeiteten Varianten untersucht. Gegebenenfalls sind die jeweiligen Konzepte zu modifizieren, um die Umsetzbarkeit sicherzustellen. Schließlich erfolgen die Bewertung aller vorliegenden Alternativen und die Auswahl einer Vorzugsvariante.

5.3.3 Partizipative Detailplanung

Die Ausdifferenzierung des ausgewählten Grobkonzepts erfolgt mit der Detailplanung. Um ein ganzheitlich optimales Konzept zu finden, werden sämtliche Interessensvertreter der Planung und der Produktion in diesen Schritt eingebunden.

Im Rahmen der Detaillierung des Konzepts werden die Facetten der Realisierung sowie des späteren Betriebs berücksichtigt. Im partizipativen Prozess kollaborieren Planung des Produktionssystems und Produktentwicklung sowie die Bauplanung, Anlagenlieferant, Logistik, Produktionsspezialisten und Betreiber, wie Abbildung 5-4 veranschaulicht. Im Bedarfsfall werden weitere Fachplaner als auch Entscheider in den Planungsprozess integriert. So werden zur Beleuchtung bestimmter Facetten beispielsweise Spezialisten für einen Prozess oder Ergonomieexperten konsultiert.

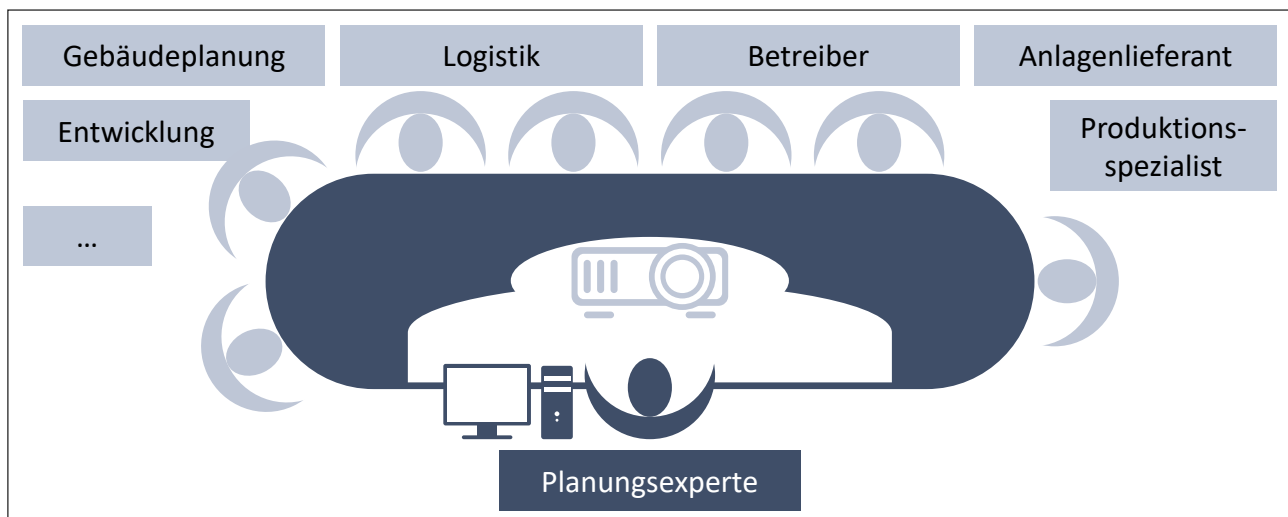


Abbildung 5-4: Partizipative Planung in Punktwolken mit einem Planungsexperten

Für die Experten der Bauplanung gilt es in der Detailphase, die Medienver- und -entsorgung zu bestimmen. Planung und Logistik arbeiten auf Basis der modifizierten Punktwolken zusammen am selben Modell. Die Ausarbeitung der Bereitstellung erfolgt bis auf Ebene eines Arbeitsplatzes oder einer Anlage. Als Aspekt der Materialflussplanung wird die Konzeption der Anlieferung vorgenommen. Produktionsspezialisten werden zurate gezogen, sie leisten die differenzierte Gestaltung von Arbeitsplätzen. Basierend auf 3D-digitalisierten Standard-Objekten und Fertigungsressourcen werden einzelne Arbeitsstationen zusammengestellt und optimiert. Zusätzlich wird die Sicht des Betreibers in die Planung eingeschlossen. Dazu wird die Meinung von Arbeitern aus der

Produktion eingeholt. Einerseits dient dies dazu, das implizite Wissen der Werker in den Planungsprozess einfließen zu lassen, andererseits sieht der Betreiber sehr früh, wie das Produktionssystem zukünftig aussehen wird. Sofern sich fertigungstechnische Bedenken ergeben, finden diese unmittelbar Berücksichtigung. Die Produktentwicklung ist mindestens bis zum Zeitpunkt der finalen Entscheidung über Produktdetails in diesen Prozess eingebunden.

In einem iterativen Prozess werden die Stellen des Produktionssystems, an denen neue Anlagen installiert werden, ausgeplant. Anlagenbau respektive Zulieferer im Bereich Anlagenentwicklung und -bau sollen eine CAD-Konstruktion als digitales Modell der Maschine oder Anlage möglichst frühzeitig einreichen. Zunächst können neue Produktionsanlagen durch Platzhalter approximiert werden. Sobald eine erste Version einer Anlage in CAD-Form vorliegt, wird diese in einem hybriden Planungsansatz in das aktuelle Konzept des Produktionssystems eingesetzt. Dieser hybride Weg beschreibt die Kombination von Punktwolken, die bestehende Fertigungselemente repräsentieren, und CAD-Konstruktionen von Fertigungsressourcen, die in das Konzept integriert werden. Dabei strebt die hybride Planung eine iterative Verfeinerung des Konzepts an. Mit jeder neuen Entwicklungs- oder Detaillierungsstufe von Anlagen beziehungsweise vom umgebenden Produktionssystem wird eine digitale Integration des CAD-Modells in die Punktwolke vorgenommen.

Im Zuge der Detailplanung wird die Realisierbarkeit des Konzepts kontinuierlich überwacht. Dazu kann neben der beschriebenen Integration der Anlagenkonstruktion der reale Anlagenaufbau begleitet werden: Fertigungsressourcen, die sich abseits der Produktion im Aufbau befinden, werden im Zuge dessen 3D-digitalisiert. Die entsprechende Punktwolke wird in das Konzept installiert, welches den aktuellen Planstand wiedergibt. Die geometrische Verträglichkeit wird jeweils beleuchtet, dazu wird digital untersucht, ob Kollisionen zwischen bestehenden Strukturen und zu integrierenden Ressourcen auftreten. Daneben werden die Platzverhältnisse an Arbeitsplätzen bewertet. Dieser Schritt wird gegebenenfalls iterativ durchlaufen, um die finale Integrationsfähigkeit einer Anlage sicherzustellen.

In der Praxis übernimmt ein Spezialist die digitale Umsetzung. Er wohnt den Workshops bei und führt die Modifikationen durch, sodass alle Beteiligten die Konzepte live betrachten und interaktiv gestalten können. Der Prozess der Detailplanung wird durch solche Experten beschleunigt, sobald

sie über Erfahrung im Umgang mit Punktwolken verfügen. Schließlich ergibt sich das dreidimensionale Feinlayout, das die Anordnung und Ausgestaltung der Arbeitsplätze, die Betriebsmittel inklusive Maschinen und Anlagen sowie das detaillierte Konzept zur Materialver- und -entsorgung beinhaltet.

5.4 IT-System zur Planung

Das informationstechnische System unterstützt die oben beschriebene Planungsmethode. Es setzt sich aus einem zentralen Server, der die Datenspeicherung, die Versionsverwaltung und Back-ups übernimmt, mit einer Schnittstelle zur Anbindung weiterer Systeme und einer erweiterbar großen Anzahl an Client-Computern zusammen. Die Datenspeicherung zur Visualisierung geschieht serverseitig, sodass der jeweilige Client-Rechner leichtgewichtig ausfallen kann. Der Fokus liegt in dieser Arbeit auf dem Server als der zentralen Komponente des IT-Systems. Es sollen bestehende Client-Computer benutzbar sein und keine Client-Computer aufgrund des Systems neu beschafft werden. Die Client-Computer werden daher nicht in der Tiefe beleuchtet.

Das IT-System umfasst die in Abschnitt 3.4 erarbeiteten Komponenten, es soll die formulierten nichtfunktionalen Anforderungen erfüllen.

5.4.1 Repositorium

Grundlegende Komponente des Systems ist ein Server, der dazu dient, die oben beschriebenen digitalen Daten, das heißt Punktwolken von Produktionssystemen oder einzelnen Abschnitten und Modelle von Fertigungsressourcen, zu speichern. Teil dieser gespeicherten Modelle sind auch die zugehörigen Meta-Informationen (siehe 5.2.3). Das Repositorium als Komponente des Servers verwaltet die Punktwolken und weitere Modelle sowie sämtliche Planstände. Es stellt die Konsistenz der verschiedenen Versionen, die im Rahmen von Planungsprojekten kreiert werden, sicher.

Die Datengrundlage in Form der ursprünglich aggregierten Punktwolke befindet sich in der ersten Revision im Hauptzweig [HOFFMANN 2013, S. 435 ff.] – analog zur Softwareentwicklung. Revision 1 spiegelt also den realen Stand wie vor Ort in der aktuellen Form wider.

Das Repositorium ermöglicht die Erstellung neuer Konzepte sowie die Modifikation bestehender Konzepte nach dem Sandbox-Prinzip [HOFFMANN 2013, S. 420 ff.]: Zu Beginn eines Planungsschritts wird eine lokale Kopie auf einem Client-Computer angelegt. Zunächst werden alle relevanten

Modelle heruntergeladen. So wird sichergestellt, dass die planerische Arbeit den ursprünglichen Datensatz nicht beeinflusst. Für die Planung sind die Daten im Anschluss dezentral auf dem Client verfügbar, währenddessen ist also keine Verbindung zum Server erforderlich. Sollen mehrere Alternativen eines Konzepts erarbeitet werden, so geschieht dies jeweils in einem separaten Seitenzweig des Repositoriums. Hauptzweig und Seitenzweig werden unter dem Oberbegriff Branch zusammengefasst.

Das Repository arbeitet nach dem Lock-Modify-Unlock-Prinzip [COLLINS-SUSSMAN ET AL. 2011, S. 10], um sicherzustellen, dass ein Konzept nie von mehreren separaten Nutzern parallel modifiziert wird. Sobald ein Nutzer einen Planstand modifizieren möchte, wird der entsprechende Branch gesperrt, bis jener sämtliche Änderungen vorgenommen und auf den Server hochgeladen hat. Im Anschluss erfolgen die Inkrementierung der Revisionsnummer und die Freigabe dieses Branches. Sofern ein Nutzer einen Bereich modifizieren möchte, der derzeit gesperrt ist, kann er dies nur durch Anlage eines weiteren Seitenzweiges sofort tun. Im Gegensatz zur Softwareentwicklung ist keine Fusion verschiedener Seitenzweige im IT-System vorgesehen. Stattdessen obliegt es den Planern, gegebenenfalls ein Konzept auszuwählen, das weiterverfolgt wird.

Jeder Upload-Vorgang, bei dem Dateien auf den Server gespielt werden, wird protokolliert. Dabei werden der Nutzer, welcher die Datei auf den Server lädt, der Zeitstempel und der betroffene Fertigungsbereich festgehalten. Im Zuge des Uploads wird ein Back-up der neuen Dateien angelegt. Über eine Kommentarfunktion dokumentiert der Nutzer, an welchen Stellen er welche konkreten Änderungen vorgenommen hat.

5.4.2 Nutzermanagement

Der Zugriff auf diesen Datenspeicher wird limitiert, damit schützenswerte Unternehmensinformationen nicht in die Hände Dritter gelangen. Hier ist ein geeignetes System aus Firewall und Angriffsdetektion einzusetzen, sodass Zugriffsversuche auf diese Daten von außen detektiert und blockiert werden.

Hochauflösende Punktwolken großflächiger Produktionsareale bieten Potenzial für Datendiebstahl und Industriespionage, weshalb ein Zugriffsmanagement implementiert wird, sodass der Zugriff auf jedes einzelne Modell, das heißt auf jede Datei, restringiert wird. Ein Nutzer erhält nur zu denjenigen Strukturen digital Zugang, die ihn persönlich auch real in der Fertigung tangieren.

Die zusätzliche Definition von Nutzergruppen regelt die Berechtigung bezüglich des Datenzugriffs und räumt ausschließlich entsprechenden Planungsspezialisten die Möglichkeit ein, Dateien herunterzuladen. Um die Qualität des Datenstands auf dem zentralen Server sicherzustellen, verfügen nur die Key User (vgl. 5.3.2) über Schreibrechte, um den Datensatz auf dem Server zu ändern. Sie dürfen neue Punktwolken, die den Ist-Stand eines Produktionssystems abbilden, oder aktuelle Planungskonzepte auf den Server hochladen.

Die Informationen über bestehende Fabriken sind wertvolle Daten. Um dem Verlust dieser Daten vorzubeugen, werden regelmäßig Sicherungskopien erstellt. Dazu kommt ein zweiter Speicher zum Einsatz, der sich an einem separaten Ort befindet. Punktwolken, die unter Umständen großflächige Produktionsbereiche repräsentieren, weisen eine erhebliche Dateigröße auf. Insofern empfiehlt es sich, inkrementelle Back-ups [MÜLLER 2015, S. 322 ff.] anzulegen. Es ist eine hohe Verfügbarkeit des primären Speichersystems anzustreben. Da die Daten allerdings nicht kritisch für den eigentlichen Fabrikbetrieb sind, sind wenige, kurze Ausfälle zu verkraften und es bedarf keiner mehrfach redundanten Auslegung des Hauptrechensystems.

5.4.3 Komponente zur Visualisierung

Das IT-System bietet den Zugang zu 3D-digitalisierten Bereichen der Produktion. Für möglichst hohen Nutzerkomfort wird die Visualisierung browserbasiert konzipiert. Damit werden die Hürden für die Visualisierung bewusst minimal gehalten, sodass grundsätzlich eine breite Masse an Nutzern – explizit auch außerhalb der Planungsabteilungen – erreicht werden kann. Eine globale Übersicht zeigt, welche Bereiche des Produktionssystems bereits 3D-digitalisiert wurden und visualisiert werden können. Die Bestandsdaten eines jeden 3D-digitalisierten Produktionsabschnitts werden über eine Top-down-Gliederung nach Werk oder Werksnummer, Hallennummer, Etage, Band und Takt strukturiert. Diese Aufteilung erfolgt auf Basis der Meta-Informationen so fein, wie es die reale Struktur jeweils erfordert beziehungsweise zulässt. Neben der Visualisierung des Ist-Abbilds von bestehenden Produktionsstrukturen, die 3D-digitalisiert wurden, können Konzepte, die sich gerade in der Planung befinden, über diese Visualisierungsfunktion angezeigt werden. Dazu zeigt ein Katalog die Planungsprojekte an, die aufgerufen werden können.

Die Daten werden zentral im Server vorgehalten, sodass ausschließlich derjenige Teil der Daten zur Visualisierung geladen wird, der dem Nutzer aktuell angezeigt wird. Zur Navigation zu einem

bestimmten Fabrikbereich sowie zur Visualisierung ist also keine Übertragung der gesamten Punktwolke erforderlich. Neben der Visualisierung der geometrischen Struktur können die zum aktuellen Bereich gehörigen Meta-Informationen angezeigt werden, hier sind in erster Linie die Informationen zur Aktualität der Daten und zur Benennung des Bereichs relevant. Durch dieses Streaming der zu visualisierenden Daten wird die Netzwerklast gering gehalten. Zudem wird der dezentrale Speicher auf der Client-Seite während der Visualisierung geschont, da keine gesamte Punktwolke heruntergeladen wird. Diese browserbasierte Visualisierungslösung verlangt keine separate Installation auf Seite des Clients; die Hardware-Anforderungen an das Endgerät werden auf einem niedrigen Niveau gehalten.

Zusätzlich verfügt das IT-System über ein Kalkulationsmodul, sodass Vermessungen in der Punktwolke via Browser möglich sind. Dabei übernimmt der Server die in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Berechnungen.

5.4.4 Download-Schnittstelle

Um die Punktwolken in weiteren Systemen zur Planung und für den Produktionsbetrieb zu nutzen, wird eine Download-Schnittstelle konzipiert.

Die Download-Schnittstelle soll es zulassen, dass Punktwolken in Virtual-Reality-Systemen, kurz VR-Systemen, eingesetzt werden. Da Virtual Reality sehr hohe Anforderungen an eine Echtzeitvisualisierung stellt und eine Bildrate von 60 Frames pro Sekunde (fps) oder idealerweise höher erfordert [THOMECEK 2016, S. 103], werden die Daten auf ein VR-System heruntergeladen. Optional werden bestimmte Bereiche aus einer Punktwolke herausgelöst. Die Echtzeitübertragung von Punktwolken an ein Virtual-Reality-System wird nicht verfolgt. Stattdessen wird also ein lokales Abbild der im Repository vorliegenden Punktwolke beziehungsweise eines Ausschnitts derselben erstellt.

Die Punktwolke als digitales Abbild einer Produktionsstruktur eröffnet weitere Anwendungsfälle. Die geometrischen Informationen können beispielweise für logistische Systeme, die örtliche Informationen verarbeiten, von Interesse sein – so bietet sich die Punktwolke etwa als dreidimensionale Karte für autonome Systeme an. Zu solchen Systemen zählen autonome Roboter, Reinigungssysteme oder fahrerlose Transportsysteme [BUBECK ET AL. 2014, S. 221 ff.], die zukünftig Einzug in die Logistik halten sollen (vgl. 3.1).

5.5 Zusammenfassung

Die hier dargestellte innovative Methode setzt auf die 3D-Digitalisierung für die Planung von Produktionssystemen. Dabei kommt der 3D-Digitalisierung die Aufgabe zu, ein holistisches geometrisches Modell einer bestehenden Produktionsstruktur zu aggregieren. Die Methode stützt sich auf Hardware zur 3D-Digitalisierung, die Geometrien via Laservermessung und zusätzlich Farbfotos aufnimmt. Im Zentrum der Methode steht die maximale Effizienz vor Ort. Zur 3D-Digitalisierung kommen bewusst keine weiteren Instrumente wie Marker zum Einsatz.

Die neuartige Methode setzt auf eine strukturierte, gründliche Verbreitung der Aufnahmen in der Produktion vor Ort. Die Aufwandsabschätzung erfolgt anhand einer groben Positionierung der einzelnen Scanaufnahmen. Durch den parallelen Einsatz mehrerer 3D-Scanner lässt sich die vor Ort benötigte Nettozeit verkürzen. Bei der Terminierung wird eine ausreichend lange Produktionsunterbrechung gewählt, binnen der die Produktion stillsteht und der betreffende Bereich frei von jeglichen Arbeiten ist. Für die 3D-Digitalisierung werden im Gegensatz zu historischen Ansätzen keine Marker und keine Messbolzen oder Ähnliches benötigt. In der Fertigung werden Maße mithilfe eines unabhängigen Messverfahrens genommen, welche später der Qualitätskontrolle der Punktwolke dienen. Das Postprocessing kann parallel zu den Aufnahmen vor Ort starten, um den Gesamtprozess der 3D-Digitalisierung möglichst effizient zu gestalten.

Das Postprocessing besteht im Wesentlichen aus dem Entpacken der Daten und der Registrierung der Punktwolken zueinander. Dabei wird für die Positionierung der einzelnen Punktwolken das Layout mit den verzeichneten Scanpositionen zu Hilfe genommen. Entscheidender Schritt des Postprocessings ist die Feinregistrierung der einzelnen Punktwolken zueinander. Diese wird basierend auf großen ebenen Flächen in Punktwolken benachbarter Scans vorgenommen. Schließlich resultiert eine zusammenhängende, realistisch eingefärbte Punktwolke. In Abgrenzung zu etablierten Ansätzen verzichtet diese Methode ausdrücklich auf die Nachkonstruktion der Punktwolken. Es findet weder eine automatisierte noch eine manuelle Überführung der Punktwolke in eine CAD-Repräsentation statt. Aktualität und Genauigkeit einer Punktwolke werden stets dokumentiert. Die Datenaktualisierung erfolgt nach der Push- oder Pull-Strategie, wobei einzelne Teilbereiche gezielt aktualisiert werden. Die Push-Strategie wird für Produktionsabschnitte

appliziert, die sich durch eine hohe Änderungsdynamik auszeichnen. Der planerische Bedarf induziert eine 3D-Digitalisierung nach dem Pull-Prinzip.

Die Punktwolke dient als Abbild eines Produktionssystems. Sie bietet die Möglichkeit des digitalen Besuchs der Produktion. Diese Option wird zum Vergleich von Konzepten und zum Benchmarking genutzt. Hervorzuheben ist das strukturierte Vorgehen zur Planung auf Grundlage von Punktwolken. Dem Gedanken der Effizienz folgend wird die Separation der gesamten Punktwolke in einzelne Punktwolken jeweils so weit geführt, wie es der konkrete Planungsfall erfordert. Die schrittweise Modifikation von Punktwolken setzt auf eine Unterteilung der gesamten Punktwolke in statische und bewegliche Elemente. Obsolete Strukturen, die für die weitere Planungsaufgabe nicht von Relevanz sind, werden herausgelöst. Das realisierbare Grobkonzept wird in einem interdisziplinären Team während der Detailplanung weiterentwickelt. Dabei interagieren Produktentwicklung, Bau- und Produktionsplanung, Anlagenlieferanten, Logistik, Betreiber sowie weitere Beteiligte. Eine zentrale Rolle nimmt die Partizipation diverser Disziplinen im innovativen Planungsprozess ein, die enge Integration zwischen Entwicklung, Planung und Betreiber wird explizit forciert.

Ein IT-System befähigt diese Methode zur Planung auf Basis von Punktwolken. Es umfasst einen Server mit zentralem Speicher, der performant und skalierbar gestaltet wird. Um die Punktwolken im planerischen Prozess zu modifizieren, werden diese zunächst nach dem Sandbox-Prinzip heruntergeladen. Das Repositorium stellt die Versionierung der Dateien sicher. Die 3D-Digitalisierung eines Produktionssystems liefert die erste Revision, die im Hauptzweig des Repositoriums gespeichert wird. Sämtliche neuen Konzepte, die aus der Planung hervorgehen, lassen sich durch ihre fortlaufenden Revisionsnummern identifizieren, alternative Konzepte werden in separaten Seitenzweigen im System gespeichert. Um den Informationsschutz sicherzustellen, kommen das Management von Nutzergruppen und die Definition von individuellen Zugriffsrechten je Datensatz zum Einsatz. Die Visualisierung erfolgt browserbasiert, sodass der Datenverkehr zur Anzeige von Modellen gering gehalten wird. Eine Schnittstelle erlaubt den Download von Punktwolken.

6 Umsetzung

Die Realisierung der in Kapitel 5 entworfenen Methode wird im Folgenden detailliert dargelegt. Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurden System und Methode zur Planung von Produktionssystemen auf Basis der 3D-Digitalisierung bei der BMW Group umgesetzt. Als Produzent von Motoren und Fahrzeugen betreibt die BMW Group ein weltweites Produktionsnetzwerk mit derzeit 31 internationalen Standorten [BMW 2018, S. 20].

Die Umsetzung der in dieser Arbeit entwickelten Methode erfolgte an 20 Produktionsstandorten weltweit. In verschiedenen Anwendungen werden die Gewerke des Automobilbaus (vgl. 2.2.2) berücksichtigt – inklusive der Komponentenfertigung und der Logistik. Im Bereich der Produktion der lackierten Karosserie wurden Presswerk und Karosseriebauten betrachtet. Einzig in der Lackiererei wurde die 3D-Digitalisierung nicht praktiziert. Der Schwerpunkt der Umsetzungen liegt auf Montage und Logistik, da sich die Änderungsdynamik dieser Fabrikbereiche als besonders hoch erwiesen hat. Das informationstechnische System wurde zentral in Deutschland implementiert.

Im vorliegenden Kapitel wird die Umsetzung des IT-Systems erläutert. Da sich die Planungsmethode auf das IT-System stützt, wird dieser Aspekt zuerst behandelt. Daneben wird die Hardware zur Aufnahme von 3D-Scans mit Farbinformationen beschrieben, bevor die Methode zur 3D-Digitalisierung und zur Planung ausgeführt wird.

6.1 IT-System zur Planung

Das IT-System dient der Speicherung und Versionierung von Planständen, es regelt die Zugriffsrechte verschiedener Nutzer auf die Daten. Darüber hinaus übernimmt das System die Visualisierung. Via Download-Funktion werden die Daten für weitere Systeme nutzbar gemacht. Die Realisierung der zentralen Komponenten des informationstechnischen Systems wird in den folgenden Abschnitten ausgeführt.

6.1.1 Repositorium

Der Speicher im Server bietet die technische Grundlage für das Repositorium, deshalb wird die Umsetzung hinsichtlich der Hardware hier zunächst skizziert. Hardwareseitig besteht das IT-System aus einem Server mit Mehrkernarchitektur, welcher in einem Rechenzentrum in Deutschland

aufgestellt ist. Über das unternehmensinterne Intranet kann eine Verbindung zu Client-Computern, die sich im selben Netzwerk befinden, aufgebaut werden, sodass Nutzer von einem Personal Computer aus Zugriff auf die Daten erhalten können. Für hohe Übertragungsraten ist diese Netzwerkanbindung auszubauen. Der Datenspeicher ist über Solid-State-Drive-Festplatten, kurz SSD [ABTS & MÜLDER 2017, S. 39], realisiert. Diese bieten eine hohe Zugriffsgeschwindigkeit, vor allem eine hohe Lesegeschwindigkeit. Der serverinterne Anschluss der Festplatten via SATA unterstützt Leseraten von 600 Megabyte pro Sekunde (MB/s) [SCHIFFMANN ET AL. 2011, S. 26 f.]. Der Speicher wird skalierbar gestaltet – insbesondere, um Punktwolken mit mehreren Gigabyte (GB) Dateigröße zu speichern und zahlreiche Versionen von Planungskonzepten zu verwalten. Die Skalierbarkeit des Speichers ist dadurch verwirklicht, dass sich das System im Bedarfsfall um zusätzliche Festplatten aufstocken lässt. Die systeminterne Speicherverwaltung generiert eine Meldung, sobald die genutzte Kapazität 90 Prozent des momentan verfügbaren Festplattenspeichers überschreitet.

Um eine hohe Verfügbarkeit sämtlicher Daten zu gewährleisten, wird unmittelbar nach jedem Upload ein Back-up angelegt. Alle Back-ups werden auf einem RAID-System (Redundant Array of Independent Disks [ABTS & MÜLDER 2017, S. 38 f.]) gespeichert. Konkret ist ein Hardware-RAID als RAID-10-System umgesetzt [BAUN 2017, S. 72 f.]. Dieses RAID-Speichersystem kombiniert eine hohe Ausfallsicherheit mit niedrigen Kosten. Es ist mit herkömmlichen Festplatten, Hard-Disk Drives (HDD) [SCHIFFMANN ET AL. 2011, S. 176], ausgestattet. Um eine hohe Datensicherheit zu erreichen, ist der Back-up-Speicher an einer gegenüber dem primären Server separaten Lokation installiert.

Die Strukturierung der Dateien folgt der in Abschnitt 5.4.3 eingeführten Logik von der Granularitätsstufe eines Werks bis zu einem Band oder Takt. In sämtlichen praktischen Anwendungen im Zuge der Arbeit wird diese Nomenklatur eingesetzt, wobei sich jeder Produktionsstandort eindeutig über einen numerischen Code und jedes Gebäude über eine je Standort eindeutige Nummer identifizieren lässt. Im Falle einer getakteten Produktion werden die Taktnummern im digitalen Modell übernommen. In Sektoren, in denen sich keine Takte finden (z. B. Presswerke), erfolgt die Gliederung anhand großer Anlagen oder entlang des Säulenrasters.

Die Funktionsweise des Repositoriums stellt sich folgendermaßen dar: Sobald die Punktwolke eines Bereichs, zu dem bislang kein Modell auf dem Server vorliegt, hochgeladen wird, wird dafür ein entsprechender Hauptzweig angelegt. Dieser Datensatz wird im Repositorium „Revision 1“ genannt. Zu Planungsbeginn wird ein Seitenzweig aus dem aktuellen Hauptzweig ausgeleitet, das bedeutet,

der Datenstand wird heruntergeladen. Der Branch bleibt im Repository so lange gesperrt, bis der Nutzer den neuen Planstand in den Speicher überträgt. Sofern mehrere Konzepte parallel entwickelt werden, werden entsprechend mehrere Branches angelegt. Die Versionierung kennzeichnet unterschiedliche Konzepte, die vom selben Branch ausgehen, durch den Zusatz „a“ für Alternative. Abbildung 6-1 illustriert diese Nomenklatur der Planstände im Repository.

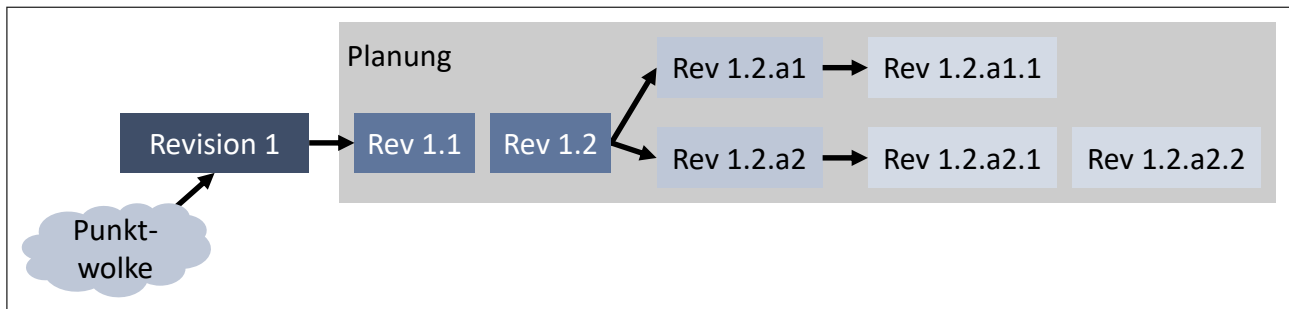


Abbildung 6-1: Logik zur Versionierung einzelner Planstände im Repository

Die ursprüngliche Datengrundlage ist in Revision 1 enthalten. Eine Aktualisierung des Hauptzweiges erfolgt, wenn der Produktionsbereich abermals 3D-digitalisiert und eine aktuellere Punktwolke hochgeladen wird. Um diesen Hauptzweig eindeutig als neue Version zu kennzeichnen, wird die Nummer auf oberster Revisionsebene erhöht. Wird nur ein Teilbereich einer Punktwolke aktualisiert, werden der neue Teil der gesamten Punktwolke und derjenige Teil der Punktwolke, welcher nicht Bestandteil der Aktualisierung ist, als neue Revision angelegt. Der Hauptzweig umfasst nun beide Dateien, sodass jedem einzelnen Bereich genau ein Akquisdatum zugeordnet ist. Der historische Stand der gesamten Punktwolke ist weiterhin in der vorigen Revision verfügbar.

Um das Repository in der vorgestellten Weise umzusetzen, wurde eine browserbasierte Planung bewusst ausgeschlossen. Via Browser sind die Visualisierung respektive der Dateizugriff zwecks Downloads möglich, die Planung findet dezentral auf Client-Computern statt. Dazu kommen Software-Lösungen zum Einsatz, welche die Modifikation von Punktwolken ermöglichen.

Neben der Versionierung von Punktwolken und von Planständen, kommt im IT-System eine Bibliothek zum Einsatz, um 3D-digitalisierte Modelle auf Objektebene zu verwalten. Dort werden Punktwolken auf dem Granularitätslevel einzelner Fertigungsressourcen gespeichert – unabhängig davon, welchem Standort und Takt sie entstammen. Isolierte Fertigungsressourcen, die für ein Produktionssystem als gängig betrachtet werden, werden je als separate Punktwolke in der

Bibliothek archiviert. Um die Suche in der Bibliothek zu vereinfachen, werden ein eindeutiger Identifikator und die groben Abmessungen des jeweiligen Elements im Dateinamen annotiert.

6.1.2 Nutzermanagement

Jeder Nutzer verfügt über individuelle Zugangsdaten – eine Kombination aus Nutzernamen und Passwort. Das Informationsschutzkonzept für die Punktwolken ist äquivalent zu den Zutrittsberechtigungen in der Realität umgesetzt. Nur die Bereiche, die der jeweilige Nutzer in der realen Produktion betreten darf, kann er digital aufrufen. Das Need-to-know-Prinzip (siehe 3.4) gilt gleichermaßen in der Planung, es weist jedem Branch eine Gruppe von Anwendern zu, die Zugriff zu diesem Branch erhalten, wodurch die Planstände von zukünftigen Konzepten gekapselt werden. Eine Nutzergruppe von Experten verfügt über die Berechtigung, neue Punktwolken hochzuladen. Administratoren können die Zugriffsrechte dafür entsprechend definieren.

Insgesamt wurden Produktentwicklung, Produktionsplanung, Logistik, Betrieb, Gebäudeplanung und Komponentenfertigung für das System freigeschaltet, sodass Vertreter dieser Disziplinen Punktwolken bei entsprechender Berechtigung aufrufen können. In der konkreten Umsetzung sind Lieferanten aufgrund von informationstechnischen Restriktionen nicht mit einem direkten Zugang zu diesem IT-System ausgestattet. Damit beispielsweise auch Anlagenlieferanten, die keinen Zugriff auf das Intranet haben, die Daten im Rahmen der Planung nutzen können, werden ihnen Ausschnitte der jeweiligen Punktwolke auf einem separaten Speichersystem zur Verfügung gestellt. Ein Datei-Download ist somit für den Transfer an bestimmte Dritte möglich, sie verfügen allerdings nicht über die Möglichkeit der browserbasierten Datenvisualisierung.

6.1.3 Komponente zur Visualisierung

Die Visualisierung von Punktwolken wurde in Kooperation mit einem lokalen Software-Lieferanten umgesetzt, um diese Komponente des Systems unter Beachtung sämtlicher Unternehmensrichtlinien in die bestehenden IT-Systeme zu integrieren. Der browserbasierte Zugriff auf Punktwolken bietet sämtlichen Nutzern einen unkomplizierten Zugang zu den Daten. Die Navigation in einer Punktwolke ist über Standard-Eingabegeräte realisiert – eine translatorische Bewegung erfolgt über Tastatur-, eine Rotation über Mauseingaben, wie Abbildung 6-2 verdeutlicht.



Abbildung 6-2: Browserbasierter Viewer für Punktwolken

Zur Visualisierung wird jeweils ein Bruchteil einer Punktwolke dynamisch geladen und visualisiert, wobei ein Strom an Bilddaten im Browser des Client-Computers angezeigt wird. Dies bedeutet, es werden nur diejenigen Punkte geladen, die vom aktuellen Standpunkt des Nutzers aus sichtbar sind. In konkreten Fällen erweisen sich Punktwolken als Dateien von mehreren hundert Gigabyte Größe. Systemintern werden solche Punktwolken strukturiert in kleinere Sub-Punktwolken zerlegt.

6.1.4 Download-Schnittstelle

Über die Download-Funktion lassen sich Punktwolken bei entsprechender Berechtigung beziehen, sodass sie anschließend in weiteren Systemen nutzbar sind. Die ursprünglich gescannten Punktwolken sowie sämtliche Planstände sind auf Basis des Repositoriums verfügbar. Ein solcher Download zielt auf die Nutzung der Daten in weiteren Systemen ab, nicht aber auf deren Modifikation im Sinne einer Planung. Daher wird kein neuer Branch angelegt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein VR-System realisiert, das Punktwolken direkt – das bedeutet ohne Nachkonstruktion – sowie CAD-Objekte immersiv visualisiert. Damit der Nutzer in die digitale dreidimensionale Welt eintauchen kann, bedarf es der flüssigen Wiedergabe und Interaktion. Da sich große Punktwolken primär aufgrund von Netzwerkrestriktionen nicht entsprechend schnell streamen lassen, erfolgt für die VR-Anwendung der Download via Schnittstelle. Das umgesetzte VR-System räumt dem Nutzer sechs Freiheitsgrade auf einer Fläche von bis zu zehn auf zehn Metern ein. Dabei betrachtet der Nutzer die Umgebung in einem Head Mounted Display, HMD [RADEMACHER 2014, S. 27], welches permanent über zwei Sensoren im Raum lokalisiert wird. Er kann sich frei bewegen und die Orientierung seines Kopfes und damit den Blickwinkel frei wählen.

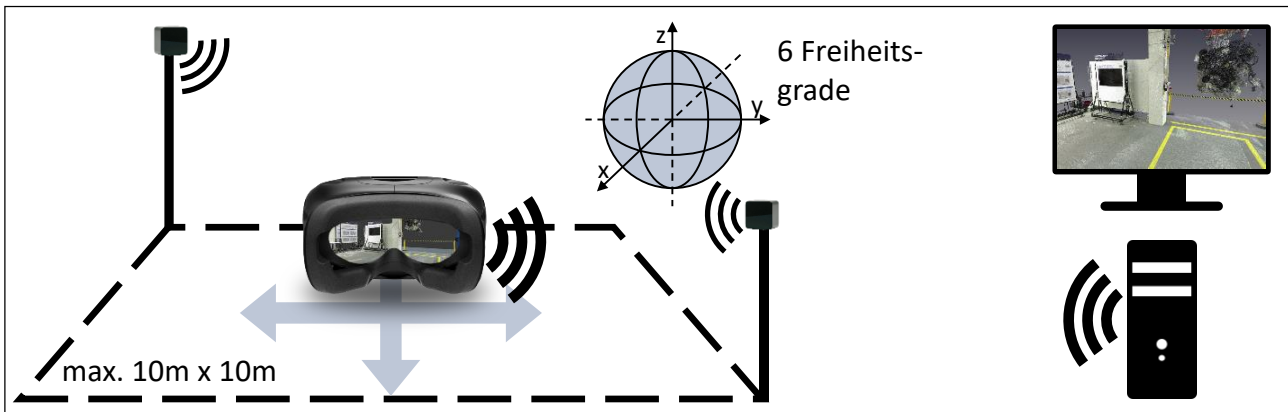


Abbildung 6-3: Virtual-Reality-System zur immersiven Visualisierung von Punktwolken

Ein lokaler Computer mit leistungsstarker Grafikeinheit kalkuliert Stereobilder und übermittelt diese drahtlos an das Display. HMD und Computer entstammen der Unterhaltungselektronik. In Abbildung 6-3 ist dieses VR-System schematisch dargestellt. Je größer die Punktwolke in Bezug auf die geometrischen Ausmaße und auf die Anzahl der enthaltenen Punkte ist, desto geringer fällt die Bildwiederholrate im VR-System aus. Daher wird überprüft, dass die Punktwolke, die in das VR-System eingespielt wird, eine bestimmte Größe nicht überschreitet. Zur Steigerung der Performanz werden optional Filter zur Ausdünnung der Punktwolke appliziert. Wird der minimale Abstand zwischen benachbarten Punkten vergrößert, sinkt die Punktdichte und damit die Dateigröße. Um die Punktwolke im VR-System zu visualisieren, konvertiert die VR-Applikation die Punkte in ein sogenanntes Mesh, das die geometrische Information wiedergibt, und in Shader [REMONDINO 2003], welche die Farben beinhalten.

Das VR-System wird zur Plausibilisierung und Bewertung von Konzepten eingesetzt. Dazu wird ein Planstand in das VR-System übertragen. Aufgrund der immersiven Darstellung mit realistischen Größenverhältnissen kann eine breite Masse an Nutzern das Konzept erleben und Feedback geben. Darüber hinaus ermöglicht das System die Erstellung neuer Konzepte. Dazu wurde das System um zwei Eingabegeräte, die ebenfalls im Raum verfolgt werden, erweitert. Mithilfe dieser Controller kann der Nutzer die Anordnung einzelner Objekte in der virtuellen Szene manipulieren. Auf diese Weise wird eine digitale Kartonagensimulation befähigt. Dabei steht die Evaluation der Ergonomie im Fokus. Das VR-System liefert beispielweise grundlegende Aussagen zu Laufwegen und Zeiten, sodass sich eine Abschätzung bezüglich der Mitarbeiterauslastung ergibt. Des Weiteren können

Nutzer unmittelbar die Einsehbarkeit als auch Greifräume begutachten. Somit kommen ergonomische Vorteile oder Insuffizienzen eines geplanten Konzepts zum Vorschein.

Für einige produktionstechnische Systeme scheinen komplette Punktwolken ob der Dateigröße unhandlich. Wird eine Punktwolke beispielsweise als Basiskarte für ein Transportsystem genutzt, sind der Boden je Etage sowie Hindernisse von Relevanz. Um die interne Speicherkapazität derartiger Systeme zu schonen, ist es ratsam, die Punktwolke auszudünnen und bezüglich der Höhe zu limitieren, also Punkte abzuschneiden, die eine gewisse z-Komponente überschreiten.

6.2 Hardware zur 3D-Digitalisierung

Die konzipierte Methode zur 3D-Digitalisierung von Produktionssystemen stützt sich auf 3D-Scans, die die geometrische Struktur inklusive einer realistischen Einfärbung abbilden. Im Fokus dieser Arbeit steht die Methode, daher wird im Folgenden die Evaluation am Markt verfügbarer Scanlösungen kompakt zusammengefasst. Dabei werden stationäre und kinematische Laserscan-Systeme unterschieden (vgl. 4.6).

Damit die aus der 3D-Digitalisierung resultierende Punktwolke durchgängig für die Planung eingesetzt werden kann, muss das entsprechende System eine hohe Präzision je einzelne Messung liefern. Aktuelle stationäre 3D-Laserscanner, die zur Fabrikdigitalisierung eingesetzt werden können, bieten eine maximale Distanzgenauigkeit [KERSTEN ET AL. 2009, S. 5 ff.] im Bereich von einem Millimeter [FARO 2016, S. 2]. Kinematische Scansysteme werden während der Aufnahme selbst bewegt. In praktischen Anwendungen kann sich dies in einem Zeitvorteil gegenüber stationären Laserscannern niederschlagen, jedoch erweist sich die Genauigkeit bei derzeit verfügbaren Systemen als gering. Tests mit Trolley-Systemen, die anlässlich der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurden, zeigen, dass modernste kinematische Scanner in realen Fabrikumgebungen ein Toleranzfenster in der Größenordnung von plus/minus 50 Millimetern erreichen. Beim Postprocessing führt diese geringe Genauigkeit zu Problemen (siehe 6.3.3). In realen Fertigungsstrukturen entpuppen sich kinematische Systeme zudem als schwierig handhabbar. Dies ist dadurch bedingt, dass Fabriken in der Regel über eine Vielzahl von Objekten verfügen und Fertigungsabschnitte dadurch schwer zugänglich sind. Wagen-basierte Systeme lassen sich nur schwierig oder überhaupt nicht in engen Bereichen einsetzen, da sich Engstellen nicht passieren

lassen oder die SLAM-Registrierung fehlschlägt. Scanner, die Drohnen oder Luftfahrtsysteme nutzen, eignen sich im Freien. Hier gilt es, die Bestimmungen zum Luftverkehr und zur Erlaubnispflicht zu beachten [BMVI 2017, S. 2]. In Fabriken stehen derartige Fluggeräte vor der Herausforderung, dass es unter keinen Umständen zu einer Kollision kommen darf, es dürfen weder Personen noch Fluggerät, Messgerät, Produktionsanlagen oder Produkte, die sich gegebenenfalls zum Zeitpunkt der Messung in der Nähe befinden, beschädigt werden.

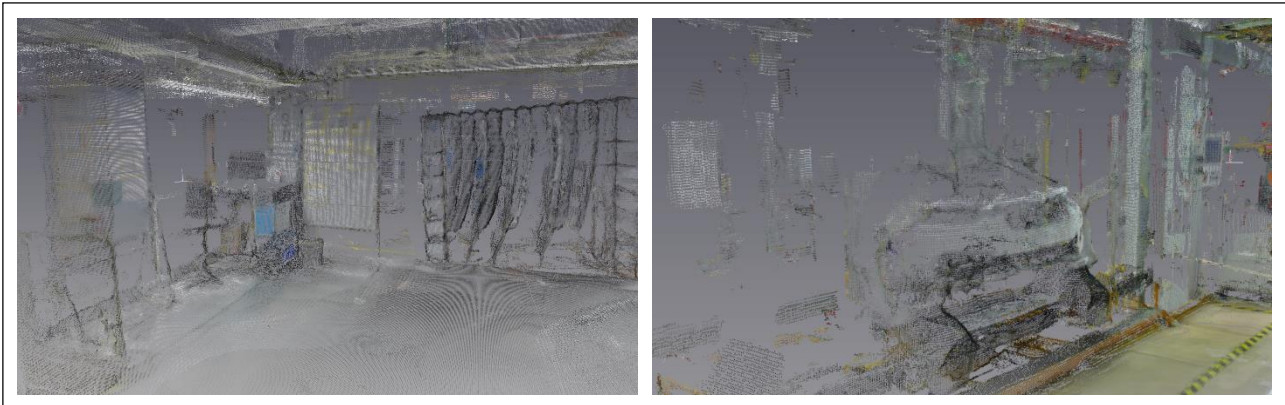


Abbildung 6-4: Geringe Auflösung der Punktwolken, die über ein kinematisches System gescannt wurden (hier: Ausschnitte einer Automobilmontage)

Neben der unzureichenden Genauigkeit zeigt sich, dass die Auflösung der Punktwolken, die mit dem kinematischen Scansystem erstellt wurden, für eine planerische Nutzung zu gering ist, wie Abbildung 6-4 veranschaulicht. Der Detailgrad erweist sich als insuffizient. Nutzer beklagen Schwierigkeiten bei der Interpretation dieser Daten aufgrund der groben Auflösung der Objekte.

Die Anreicherung der gescannten Geometrien um Farbinformationen stellt eine wesentliche Säule dieser Arbeit dar. Um die Effizienz während der Fotoaufnahmen ebenfalls sicherzustellen, werden Scansysteme eingesetzt, die über eine integrierte Fotokamera verfügen. Es sind Stand heute Scanner verfügbar, bei denen eine separate Fotografie-Einheit an jeder Scanposition installiert werden muss. Dies bedeutete Nachteile bezüglich der Effizienz der Aufnahmen und der Mobilität des Gesamtsystems. Derartige Systeme werden daher nicht appliziert.

Aus Gründen der Zugänglichkeit in der Fabrik, der Präzision, der Effizienz und der Mobilität werden für die 3D-Digitalisierung von bestehenden Produktionsstrukturen im Rahmen dieser Arbeit stationäre 3D-Laserscanner mit integrierter Farbfoto-Funktion eingesetzt. Abbildung 6-5 zeigt die genutzten stationären 3D-Laserscanner exemplarisch.



Abbildung 6-5: Beispiel eines eingesetzten 3D-Laserscanners; Scanner gelb eingerahmt (bei verschiedenen Projekten)

6.3 Methode

Die Methode umfasst die 3D-Digitalisierung eines Fertigungsbereichs sowie die konsekutive Planung. Zunächst erfolgt die Aufnahme von zahlreichen 3D-Laserscans mit Farbinformation in der Produktion, nach dem Postprocessing beginnt die Planung. Besonderes Augenmerk richtet sich dabei auf die Interdisziplinarität. Dadurch, dass die 3D-Digitalisierung eine aktuelle, umfassende Datengrundlage liefert und die Punktwolken dank der Farbinformation eine intuitive Interpretation gewährleisten, können diverse Parteien partizipieren.

6.3.1 Vorbereitung der 3D-Digitalisierung

Dieses Kapitel gibt die einzelnen Schritte wieder, die zur 3D-Digitalisierung in der Produktion vorgenommen werden. Zunächst erfolgt eine grundlegende Betrachtung der Auflösung der laserbasierten Geometrieabtastung und der Fotoaufnahmen. Weitere Aspekte wie die Positionierung des Scanners und der Zeitbedarf werden ausgeführt.

Auflösung des Scanners

Der Zeitbedarf für jede Einzelaufnahme wird durch die Auflösung je Laserscan sowie durch die Parametrierung für die Farbfotos determiniert. Daher werden zunächst adäquate Einstellungen für diese beiden Aspekte erläutert.

Eine hohe Auflösung des Laserscanners, also ein enger Winkel zwischen zwei gemessenen Punkten, bedeutet eine hohe Punktdichte in jeder Punktwolke. Die pro Scan benötigte Dauer korreliert mit

der Auflösung für den Scan. Eine hohe Auflösung trägt allerdings nicht dazu bei, sichttote Bereiche zu füllen, die von einem Standort aus entstehen. Deshalb wird in der praktischen Anwendung eine moderate Auflösung gewählt. Insgesamt werden eine kurze Zeit je Einzelscan und viele Scans von unterschiedlichen Positionen aus angestrebt. In zahlreichen Anwendungen im Rahmen dieser Arbeit hat sich eine Auflösung von $0,04^\circ$ Winkelunterschied zwischen zwei radial benachbarten Punkten bewährt. Die Projekte in Produktionssystemen zeigen, dass sich dort üblicherweise derart viele Objekte befinden, sodass die Distanz zwischen Scanner und Objekt meist unter fünf Meter beträgt. Der Punktabstand je einzeltem Scan liegt für solche Objekte daher unter 3,5 Millimetern.



Abbildung 6-6: Aufnahme desselben Raums mit der gewählten Auflösung von $0,04^\circ$ Winkelunterschied (links) und der doppelten Auflösung

Abbildung 6-6 stellt zwei Punktwolken gegenüber, die mit der gewählten Auflösung von $0,04^\circ$ Winkelunterschied und mit der doppelten Auflösung aufgenommen wurden. Dazu wurde ein Raum von denselben Positionen aus je mit der normalen und mit der höheren Auflösung 3D-digitalisiert. Unterschiede in der Auflösung werden nur im Bereich feiner Strukturen wie dem Zaun offenkundig.

Eine Verringerung der Auflösung würde eine zu geringe Punktdichte mit sich bringen. Die Ableitung von Maßen in der Punktwolke büßte an Präzision ein, da sich nur Maße direkt zwischen Punkten ableiten lassen, die digitalisiert wurden. Außerdem würde die Anschaulichkeit der Punktwolke leiden – wie im Falle kinematischer Scans (vgl. Abbildung 6-4). Der Abstand des Scanners auf einem Stativ zum Boden beträgt in direkter Umgebung des Standorts circa 1,8 Meter, sodass sich der Punktabstand an diesen Stellen teils auf unter 1,3 Millimeter beläuft. Eine höhere Punktdichte scheint nicht zielführend, da gerade der Boden als simple Geometrie sehr dicht digitalisiert würde.

Qualität der Farbfotos

Wie in Kapitel 6.2 beschrieben, werden geometrische Laservermessung und Farbfotos im 3D-Scanner kombiniert. Zur Optimierung des Zeitbedarfs vor Ort gilt es, neben der Auflösung des Laserscans eine passende Einstellung für diese Fotoaufnahmen zu finden. Wie in Absatz 4.6 angeführt, bieten sich verschiedene Optionen der Farbaufnahme im Rahmen der 3D-Digitalisierung: Sofern ausschließlich die Laservermessung erfolgt, resultiert eine farblose beziehungsweise einfarbige Punktwolke. Moderne Scanner bieten eine integrierte Messung der Intensität des reflektierten Lichtstrahls. Derartige Systeme liefern eine Punktwolke mit Graustufen; diese Intensitätsmessung erfolgt im Allgemeinen integriert im Laser-Messsystem. Abbildung 6-7 verdeutlicht die Unterschiede in der resultierenden Punktwolke zwischen einer weißen Punktwolke und einer intensitätsbasierten Aufnahme, welche eine Einfärbung mit Grautonabstufung liefert.

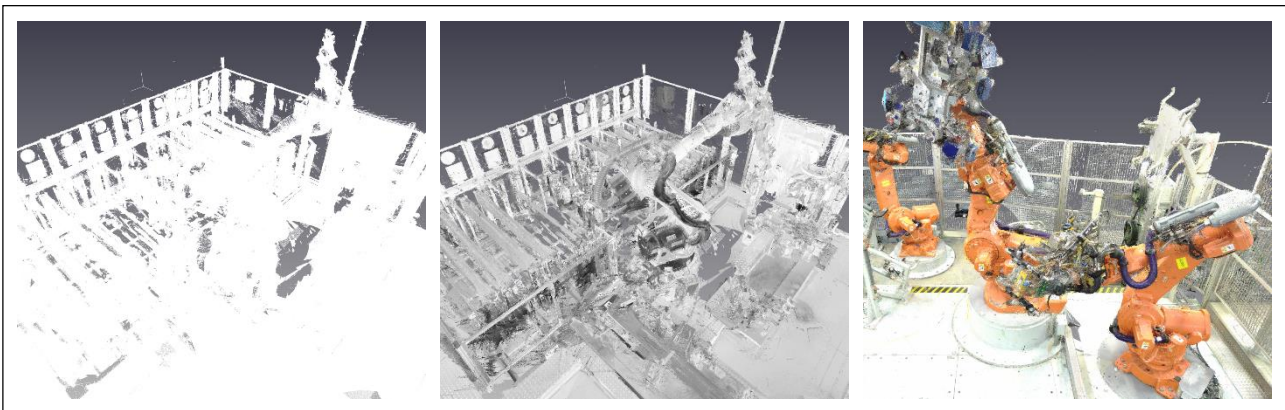


Abbildung 6-7: Punktwolken von Karosseriebauteilen. Punktwolke desselben Bereichs: weiß (links) und mit Graustufen (Mitte). Farbige Punktwolke eines anderen Bereichs.

Es finden sich außerdem 3D-Laserscanner, die dank einer integrierten Kamera-Funktion in der Lage sind, die Umgebung fotorealistisch einzufangen, sofern die Szene ausreichend beleuchtet ist (siehe Abbildung 6-7, rechts). Moderne Systeme bieten darüber hinaus die Option, auch sogenannte High-Dynamic-Range- oder HDR-Farbfotos [GOCKEL 2012, S. 71 ff.] aufzunehmen. Diese Funktion soll insbesondere in Umgebungen mit großen Helligkeitsdifferenzen dazu dienen, eine detailgetreue Farbgebung zu erzielen [EBD.]. Für HDR-Fotografien werden von derselben Position aus mehrere Fotos mit unterschiedlichen Belichtungseinstellungen gemacht, sodass diese Fotos anschließend zu einem Foto fusioniert werden können. Es finden sich 3D-Scanner, die in der Lage sind, solche HDR-Fotos aufzunehmen. Praktische Anwendungen anlässlich dieser Arbeit zeigen die Unterschiede

zwischen einer Punktwolke, die basierend auf einem herkömmlichen Panoramafoto respektive mit 3-fach und 5-fach HDR koloriert ist, wie die folgende Abbildung 6-8 illustriert.



Abbildung 6-8: Qualität der Punktwolke bei unterschiedlichen HDR-Foto-Einstellungen

Die Nutzer melden einstimmig zurück, dass auf Basis von HDR-Fotos eingefärbte Punktwolken weniger realistisch wirken und sie diese aufgrund der lamentablen Optik ablehnen. Die Tests mit HDR-fähigen Scannern im Rahmen der Arbeit zeigen, dass HDR-Fotos in der drei- beziehungsweise fünffachen Zeit je einzelner Aufnahme resultieren. Aus Gründen der Effizienz vor Ort wird bewusst auf HDR-Aufnahmen verzichtet, stattdessen beschränkt sich die Methode auf die Aggregation konventioneller Farbfotos. Die Aufnahme von normalen Farbfotos wird dringend empfohlen, da graue Punktwolken deutlich schwieriger zu interpretieren sind (siehe Abbildung 6-7).

Kalkulation des Zeitbedarfs

Um die 3D-Digitalisierung vor Ort vorzubereiten, muss die Zeit, die in der Fabrik benötigt wird, abgeschätzt werden. Der Zeitbedarf zur 3D-Digitalisierung eines Sektors der Produktion skaliert mit dessen Fläche und dessen geometrischer Kompliziertheit: Je mehr Objekte sich dort befinden, desto mehr Scans werden benötigt, damit die sichttoten Bereiche (vgl. Abbildung 4-8) ausgeglichen werden. Zudem ist der benötigte Detailgrad relevant. Die Logik zur Bestimmung der Scanpositionen richtet sich nach der Grundfläche und teilt die Struktur in Ebenen ein. Bodengestützte stationäre Scansysteme lassen sich innerhalb einer Ebene bewegen. Daher erfolgt die Platzierung entlang der x- und der y-Achse. Sofern eine Struktur über mehrere Höhenniveaus hinweg digitalisiert wird, wird die Positionierung der Scanpositionen je Höhenlevel separat vorgenommen. Abbildung 6-9 gibt eine Übersicht, wie dicht die Scans jeweils entlang beider Achsen zu platzieren sind.

Geometrische Kompliziertheit	hoch	mittel	niedrig	sehr niedrig
Distanz benachbarter Scanpunkte (je in x- und y-Richtung) [m]	5	7	10	14
Anzahl an Scans pro 1000 m ² [Stk.]	40	20	10	5
Beispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Montage-arbeits-platz 	<ul style="list-style-type: none"> • Super-markt 	<ul style="list-style-type: none"> • Große Maschinen von außen 	<ul style="list-style-type: none"> • Leere Halle • Gebäude-struktur

Abbildung 6-9: Auswahlmethodik zur Bestimmung der benötigten Anzahl an Scans

Mit einer hohen geometrischen Kompliziertheit warten Bereiche wie einzelne Arbeitsplätze auf. Im Allgemeinen sind Arbeitsplätze so gestaltet, dass sich den Werkern kurze Wege bieten. Dies resultiert in einer hohen Dichte an Objekten, also zahlreichen Geometrien, die es allesamt zu digitalisieren gilt. Anlagen mit mehreren Robotern oder die Bereitstellungssituation in unmittelbarer Bandnähe verlangen ebenfalls einen geringen Abstand zwischen den einzelnen Standorten für Scans. In Spezialfällen ist eine noch höhere Auflösung zu wählen, um eine Überlappung der einzelnen Punktwolken für die spätere Registrierung sicherzustellen. Die besonders hohe Auflösung empfiehlt sich vor allem für Bereiche mit sehr vielen Objekten als auch für solche mit ungünstiger Abschattung, zum Beispiel für Treppenhäuser oder verwinkelte Gänge. Die Aufnahme von Logistikarealen wie Supermärkten kann mit einer gröberen Auflösung erfolgen, sofern nicht die individuellen Produkte von Relevanz sind, sondern die Anordnung von Kisten. Große Anlagen mit geringem benötigten Detailgrad erfordern eine niedrige Anzahl an Scans. In diese Kategorie fallen etwa Coilanlagen oder Pressenstraßen, wenn sie von außen 3D-digitalisiert werden. Soll ein Gebäude wie beispielsweise eine leere Fabrikhalle aufgenommen werden, ist ein großzügiges Raster mit relativ wenigen Aufnahmen ausreichend.

Sofern mehrere Ebenen desselben Produktionssystems 3D-digitalisiert werden, wird eine Unterteilung entlang der Hochachse vorgenommen. Die reguläre Einteilung in Etagen ist durch die Gebäudestruktur vorgegeben. In speziellen Szenarien in der Produktion erfolgen allerdings Aufnahmen auf unterschiedlicher Höhe in derselben Etage. Dieser Aufwand wird dann investiert, wenn Teile von Objekten für den konkreten Planungsfall relevant sind und diese ansonsten aufgrund mangelnder Einsehbarkeit nicht digitalisiert würden. In praktischen Anwendungsfällen wird dieses

Vorgehen für spezielle Details, zum Beispiel Deckel von Maschinen, fördertechnische Zwischenebenen als auch Unterboden von Fahrzeugen, welche sich in Gehängen befinden, gewählt.

Der gesamte zu digitalisierende Bereich der Produktionsstruktur wird in Sektoren mit einer jeweils einheitlichen Dichte an benötigten Scans eingeteilt. Basierend auf der Grundfläche und der Information über die zu digitalisierenden Ebenen wird anhand der getroffenen Einstellungen für den 3D-Laserscanner die benötigte Zeit je Bereich prognostiziert. Die Prognose des Brutto-Scanaufwands resultiert durch Addition der einzelnen Zeiten. Auf Grundlage der benötigten Dichte an Scans (siehe Abbildung 6-9) werden die einzelnen Positionen für Scanaufnahmen in einem Plan verzeichnet, damit der beschriebene Abstand zwischen benachbarten Positionen später möglichst eingehalten wird. Dieser vorbereitete Plan dient einerseits als Orientierungsrahmen, sodass vor Ort kein Scan ausbleibt, und stellt andererseits die Basis für die Aufbereitung dar, da in diesem Layout die eindeutige Kennung eines jeden Scans notiert wird.

Generell wird eine Parallelisierung der 3D-Digitalisierung vor Ort angestrebt. Eine Parallelisierung bietet sich vor allem bei Bereichen an, die sich in Teilbereiche aufteilen lassen, die überwiegend isoliert voneinander liegen. Ziel ist, dass sich die einzelnen Scanner zu keiner Zeit im gegenseitigen Sichtbereich befinden (siehe Abbildung 6-10) – sei es wegen optischer Hindernisse, die mehrere Geräte jeweils voneinander trennen, oder aufgrund der maximalen Reichweite des Lasers. Es eignen sich hier explizit Bereiche, die sich über mehrere Stockwerke erstrecken. Die Referenzierung erfolgt in diesem Falle über Treppen oder Schächte. Außerdem bieten sich mehrere weitestgehend abgeschlossene Räume für eine parallele Aufnahme an. Zugleich müssen die einzelnen Sektoren kommunale Bereiche aufweisen, da diese für die Registrierung der Datensätze benötigt werden.

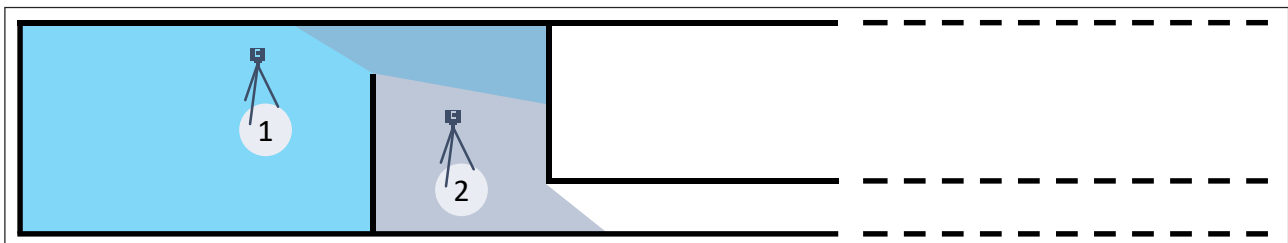


Abbildung 6-10: Positionierung mehrerer Scanner, sodass kein Sichtkontakt besteht

Durch die Parallelisierung lässt sich die Zeit vor Ort verkürzen. Der Netto-Zeitbedarf wird basierend auf der Möglichkeit zur Parallelisierung und der Anzahl der verfügbaren Geräte kalkuliert. Praktische

Anwendungen im Rahmen dieser Arbeit zeigen, dass ein Operator problemlos drei stationäre Scanner bedienen kann.

Auf Grundlage des prognostizierten Netto-Aufwands vor Ort erfolgt die Terminfindung in Abstimmung mit den Produktionsverantwortlichen. Um einen Zeitraum zu finden, während dessen der entsprechende Produktionsbereich steht und frei von Personen ist, werden die geplanten Produktionsunterbrechungen bewertet. Neben der regulären Produktion finden Sonderschichten, Bauarbeiten oder diverse weitere Aktivitäten in einer Fabrik statt. Daher gilt es, einen Termin zu finden, an dem der entsprechende Fertigungsabschnitt sicher frei von jeglichen Arbeiten, wie Logistik-, Instandhaltungs- oder Reinigungsarbeiten, ist. Um ideale Ergebnisse zu erzielen, wird der Termin zur 3D-Digitalisierung so gewählt, dass diese ohne Unterbrechungen durchgeführt werden kann. Dabei ist darauf zu achten, dass möglichst alle Objekte im betreffenden Bereich auch über potenzielle Pausen der 3D-Digitalisierung hinweg in derselben Stellung verbleiben. Verschieben sich einzelne Objekte zwischen der Aufnahme von Scans, zieht dies zusätzlichen Aufbereitungsaufwand nach sich, um diejenigen Objekte aus der Punktwolke zu entfernen, die sich verschoben haben.

Sofern Produktionsanlagen selbst digitalisiert werden, werden die Experten seitens des Betreibers konsultiert. Gerade in automatisierten Bereichen der Produktion (beispielsweise Zellen mit Industrierobotern) gilt es, vor einer Digitalisierung die Anlagenverantwortlichen und die Instandhaltung miteinzubeziehen. Es muss geklärt werden, welche Bereiche betreten werden dürfen beziehungsweise welche besonderen Einweisungen erforderlich sind. Im Speziellen sind potenzielle Anlagenstörungen a priori auszuschließen, hier sind automatisierte Anlagen und solche mit Sicherheitseinrichtungen anzuführen. Einerseits muss der Zugang gewährleistet sein, andererseits muss die Anlage nach Abschluss der Arbeiten kontrolliert werden. Fehler- und Warnmeldungen von Lichtschranken oder Sicherheitssensoren müssen gegebenenfalls zurückgesetzt werden. Eine Absprache mit den zuständigen Sicherheitsverantwortlichen für den Bereich erfolgt, um Interferenzen mit Sicherheits- und Feuerlöschsystemen auszuschließen. Je nach Wellenlänge des eingesetzten Lasers im Scanner kann die Möglichkeit bestehen, dass diese Warnsysteme ausgelöst werden. Dabei sind in erster Linie automatische Brandmelder [KASIKCI 2013, S. 122 ff.] abzusichern. Bei keinem Digitalisierungsprojekt im Zuge dieser Arbeit fanden sich solche Sicherheitseinrichtungen, dieser Umstand wurde allerdings stets im Vorfeld überprüft.

6.3.2 Aufnahme der 3D-Scans

Vor Ort müssen so viele 3D-Scans aufgenommen werden, dass die sichttoten Bereiche, die von einem Standpunkt aus nicht einsehbar sind, insgesamt ausgeglichen werden und ein möglichst vollständiges Modell resultiert. Dabei werden die Standorte für Scanaufnahmen so gewählt, dass alle relevanten Objekte von hinreichend vielen Seiten aus aufgenommen werden. Die endgültige Platzierung des Scanners vor Ort wird gegebenenfalls gegenüber den vorher im Layout eingetragenen Positionen verändert, um eine optimale Einsehbarkeit und Abdeckung der Objekte sicherzustellen. Im Allgemeinen wird der Scanner so auf einem Stativ aufgebaut, dass sich die Spiegel- respektive Messeinheit an einer möglichst hohen Position befindet (siehe Abbildung 6-5), auf diese Weise wird die 360°-Rundumsicht des Geräts ausgenutzt. Vor Ort ist die Arretierung derart zu wählen, dass der Scanner die relevanten Bereiche einsehen kann. Ist etwa die Unterseite eines Objektes von Bedeutung, wird die Höhe des Scanners entsprechend angepasst.

Um nach der Registrierung die maximale Präzision zu erreichen, werden einige relevante Punkte hervorgehoben, die während der Aufnahmen in der Fertigung zu beachten sind: Eine Registrierung zweier Punktwolken sollte nie durch Glas, Acrylglas, Flüssigkeiten oder Ähnliches hindurch erfolgen, da diese den Laserstrahl brechen [TIPLER & MOSCA 2015, S. 1011 ff.], siehe Abbildung 6-11.

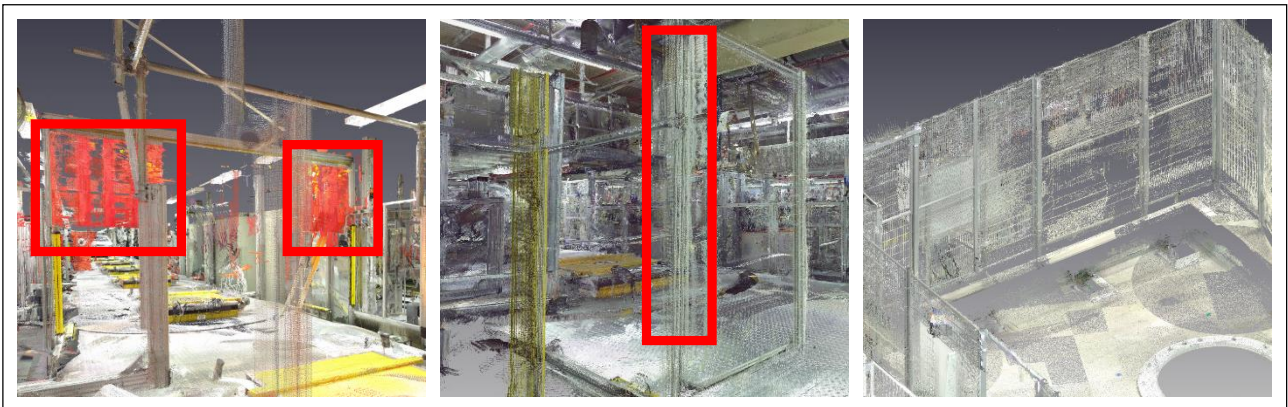


Abbildung 6-11: Streupunkte bei Materialien, die den Laserstrahl brechen – semitransparenter Vorhang (links), Acrylglas-Scheibe (Mitte); feingliedriger Zaun (Kanteneffekt)

Ebenso ist es zu vermeiden, Bereiche durch Schutzzäune oder ähnlich filigrane Strukturen hindurch zu registrieren. Stattdessen werden während der Scanaufnahmen vor Ort großflächige Überlappungen geschaffen. Dazu erfolgt mindestens eine Aufnahme von einer Position aus, in der die

Bereiche, über die die Punktwolken später registriert werden, direkt einsehbar sind. Dies bedeutet konkret, dass beispielsweise Glastüren oder Schutztüren zu Anlagen geöffnet werden und der Scanner für eine Aufnahme direkt in der der geöffneten Tür platziert wird. In der auf diese Weise aggregierten Punktwolke liegen ergo Innen- und Außenseite einer Fertigungszelle oder Anlage vor. Die entsprechende Punktwolke wird später für die Registrierung der beiden Bereiche genutzt, dieser spezielle Scan wird im Layout hervorgehoben.

Während der Scanaufnahme begibt sich der Operator in einen aktuell für sämtliche Scanner sichttoten Bereich, sodass er selbst nicht aufgenommen wird. Währenddessen vermerkt er die eindeutige Bezeichnung eines jeden Scans im Layout. Ebenso notiert er, falls sich Objekte im Vergleich zu ihrer jeweiligen Position in einem vorherigen Scan verschoben haben.

Trotz optimaler Vorbereitung lässt es sich in der Praxis nicht immer vermeiden, dass Personen den Scanbereich durchqueren. Daher werden diejenigen Scans, in denen vermeintlich Personen aufgenommen wurden, gekennzeichnet. So lässt sich bei der späteren Kontrolle der Punktwolke in Bezug auf den Datenschutz Zeit gewinnen. Die im Rahmen der Arbeit eingesetzten Scansysteme mit einem Laser von Laserklasse 1 [FARO 2015, S. 20] stellen keine Gefahr für den Menschen dar. Die Spiegeleinheit rotiert so schnell, dass der Laser jeden Punkt nur für eine sehr kurze Zeitdauer bestrahlt. Sollte ein System mit einer für Menschen gefährlichen Laserklasse eingesetzt werden, ist eine entsprechende persönliche Schutzausrüstung [OSTRV 2010, S. 960 ff.; DIN EN 60825-1] zu tragen und der Bereich gänzlich abzusperren.

Referenzmessungen in der realen Szene

Möglichst zeitgleich zu den Scans werden Referenzmessungen in der Realität angestellt, die im Anschluss dazu dienen, die Qualität des digitalen Modells zu bewerten. Der Operator bewegt sich dazu stets im sichttoten Bereich aller Scanner. Vor Ort werden einige Distanzen vermessen, sodass sich mögliche negative Trends nach der Registrierung erkennen lassen. Auch für diesen Schritt gilt das Gebot der Effizienz, weshalb der Stichprobenumfang begrenzt wird – in der Praxis werden meist 30, aber nicht mehr als 50 Maße genommen. Für diese Referenzmessungen werden jeweils die Abstände zwischen zwei Ebenen möglichst genau bestimmt. Zum einen wird dabei ein Messgerät verwendet, welches Distanzen präzise ermitteln kann. Zum anderen wird auf eine saubere Ausrichtung des Geräts geachtet, um einen Winkelversatz zu vermeiden. Es empfiehlt sich die

berührungslose Messung via Laser, da hierdurch große Distanzen aufwandsarm determiniert werden können – beispielweise ist die Ermittlung der lichten Weite zwischen Boden und Decke ohne Leiter oder zusätzliche Hilfsmittel möglich. Marktübliche 1D-Laser-Entfernungsmesser liefern eine Genauigkeit im Bereich derer des Laserscanners [BOSCH 2016, S. 329 ff.].

6.3.3 Postprocessing

Während des Postprocessings werden die einzelnen Punktwolken registriert und koloriert. Die resultierende Punktwolke mit Farbinformation wird aufbereitet und steht anschließend für die Planung zur Verfügung.

Entpackung

Parallel zu den Aufnahmen vor Ort kann das Postprocessing beginnen. Die Entpackung der Daten erfolgt, wie in Kapitel 5.2.3 eingeführt, auf einem mobilen Rechner. Es sind Scanner mit Modulen zur drahtlosen Informationsübermittlung an einen Computer verfügbar. In einer Vielzahl von Produktionsstätten ist es allerdings untersagt, Kommunikationsnetze im Bereich von 2,4 bis 5 GHz zu nutzen, was beispielweise einer Datenübertragung via Bluetooth oder WLAN im Wege steht. Zudem hat sich die Reichweite der Drahtlosübertragung der eingesetzten Scanner innerhalb von Gebäuden in Tests mit unter 10 Metern als gering erwiesen. In der Praxis kommen mobile Datenträger, konkret SD-Karten, zum Datentransfer zum Einsatz, siehe Abbildung 6-12.

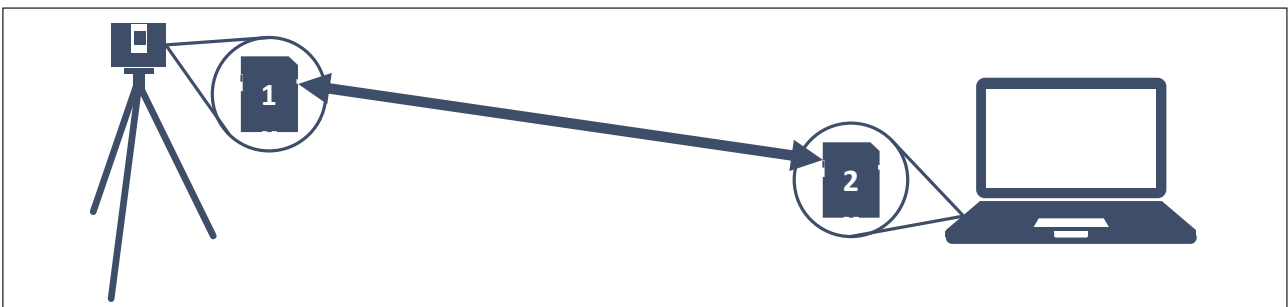


Abbildung 6-12: System aus mehreren SD-Karten zur Datenübertragung zwischen Scannern und mobiler Rechneinheit

Bei den Anwendungen im Zuge der vorliegenden Arbeit hat sich gezeigt, dass das Entpacken eines Scans deutlich weniger als die Hälfte der Zeit als für die Aufnahme selbst in Anspruch nimmt, sofern die in Kapitel 6.3.2 empfohlenen Einstellungen verwendet werden.

Registrierung

Im nächsten Schritt folgt die Registrierung der einzelnen Punktwolken. Auf Basis der Notizen im Layout erfolgt die Zuordnung jeweils benachbarter Scanaufnahmen. Anschließend findet die Feinregistrierung statt. Ziel der Feinregistrierung ist es, jeweils zwei benachbarte Punktwolken derart in Übereinstimmung zu bringen, dass ein möglichst präzises Gesamtmodell entsteht. Dazu werden natürliche Referenzen genutzt (vgl. 5.2.3). Die Detektion von Ebenen in jeder Punktwolke kann über etablierte Algorithmen oder manuell erfolgen. Jeweils zwei Punktwolken in unmittelbarer Nachbarschaftslage zueinander werden paarweise registriert. Für diese Feinregistrierung werden je drei kongruente Ebenen mit bestmöglicher Passgenauigkeit genutzt, die nicht komplanar, sondern möglichst orthogonal zueinander stehen. Dieser Prozess wird iterativ durchlaufen, bis sämtliche einzelnen Punktwolken registriert sind. Schließlich erfolgt die Fusion sämtlicher Punktwolken zu einer zusammenhängenden Punktwolke, wobei alle Punkte vom lokalen in ein globales Koordinatensystem transformiert und mithilfe der aufgenommenen Farbfotos koloriert werden.

Die Praxis zeigt Herausforderungen während der Registrierung der Punktwolken bei unzureichender Präzision der initial verwendeten Hardware. So konnten Punktwolken, welche bei Experimenten über ein kinematisches Trolley-System gewonnen wurden, zwar registriert werden. Die Qualität der gesamten Punktwolke erweist sich jedoch als mangelhaft. Es finden sich zahlreiche Stellen, an denen die Punktwolken auseinanderdriften, sodass dieses Modell nicht für eine Planung nutzbar ist. Abbildung 6-13 zeigt exemplarische Ausschnitte aus derartigen Punktwolken, wobei die problematischen Bereiche zur besseren Visualisierung farblich hervorgehoben sind.

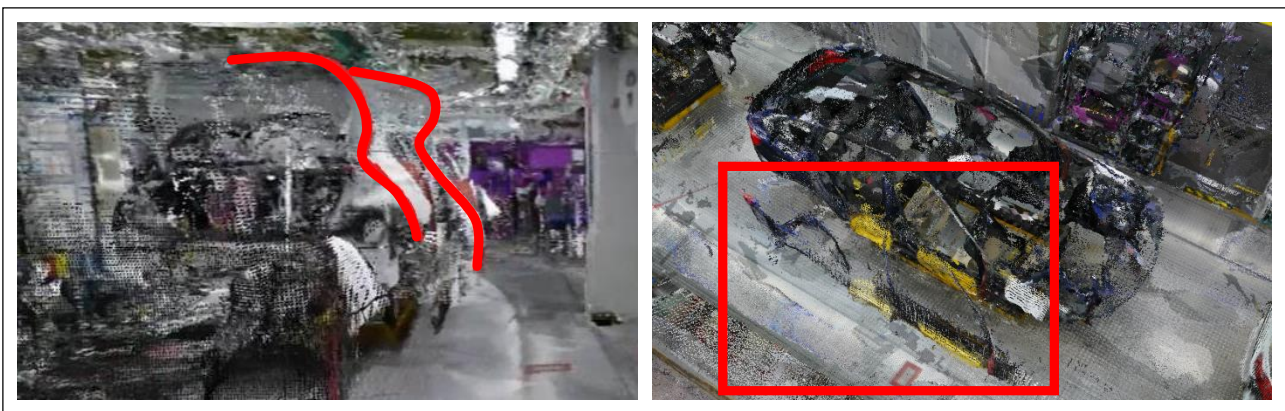


Abbildung 6-13: Fehlerhafte Punktwolke, die aus der Registrierung mehrerer kinematisch gewonnener Datensätze hervorgegangen ist

Im Allgemeinen erfolgt die Überführung der gesamten Punktwolke in ein spezielles globales Koordinatensystem. Sofern sich kein konsistentes Koordinatensystem für ein Gebäude oder für vorhandene, historische Layouts findet, erfolgt die Definition des Koordinatensystems entlang der Hauptachsen des Gebäudes oder der Fertigungslinie, wie Abbildung 6-14 entnommen werden kann.

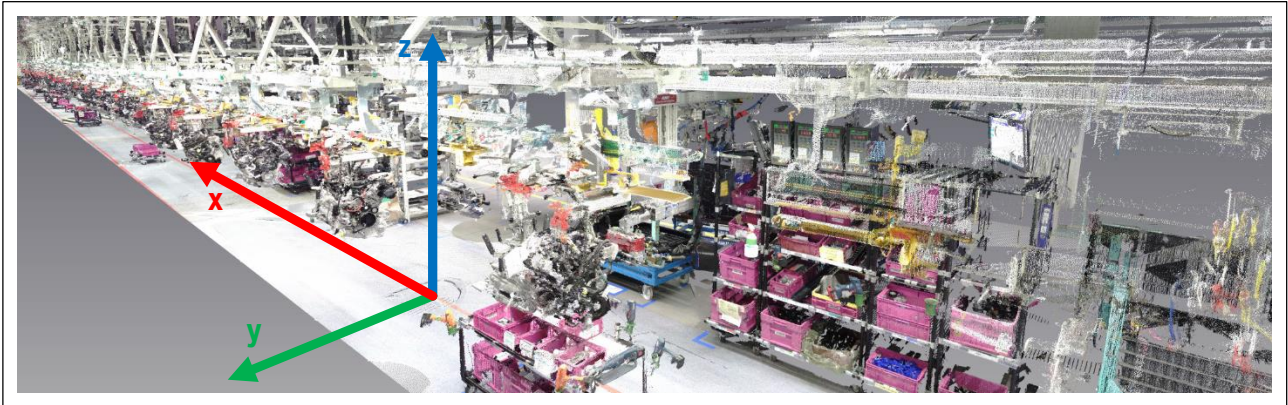


Abbildung 6-14: Ausrichtung des Koordinatensystems entlang der Hauptachse der Struktur

Zensur

Zur Aufbereitung der Daten ist es notwendig, alle Personen herauszutrennen, die identifizierbar sind. Zusätzlich werden Silhouetten entfernt, da diese keine für die Planung relevante Information darstellen. Abbildung 6-15 zeigt Konturen von Personen. Die einzelne Person ist dabei nicht identifizierbar, dennoch wird die Silhouette aus der Punktwolke herausgelöst.

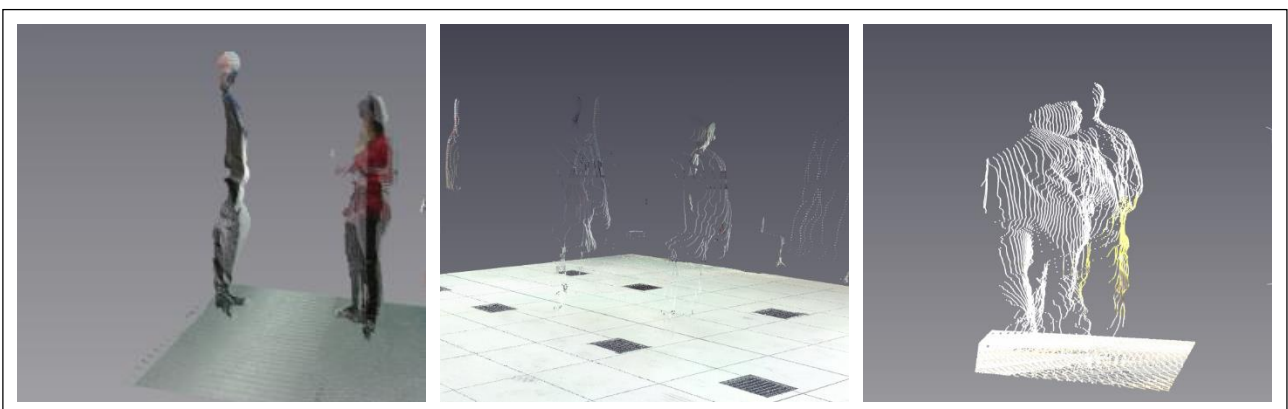


Abbildung 6-15: Silhouetten von Personen in Punktwolken

Das beschriftete Layout, welches Aufschluss über die Positionen der einzelnen Scanaufnahmen gibt, wird auch als Unterstützung zur datenschutzgerechten Aufbereitung der Punktwolke zurate

gezogen. Ist dort neben Lage und Index der Scans verzeichnet, wo sich mutmaßlich Personen im Datensatz finden, hilft diese Information bei der Durchsicht der Punktwolke.

Präzisionsabgleich digital-real

Um die Präzision der gesamten Punktwolke zu bewerten, werden die Referenzmaße zwischen Realität und Punktwolke zum Vergleich herangezogen. Die korrespondierenden Maße werden in einer Tabelle abgeglichen. Zu bedenken ist, dass auch die manuelle Kontrollmessung einer bestimmten Toleranz unterliegen kann. Einerseits wird die maximale Abweichung zwischen sämtlichen Messungen als absolutes Längenmaß, andererseits die relative Abweichung festgehalten. Sofern mehrere Messungen eine Diskrepanz zwischen Realität und Punktwolke größer der doppelten Toleranz der Scanner-Hardware aufweisen, erfolgt eine detaillierte Untersuchung. Dabei wird kontrolliert, ob während der Registrierung ein Fehler aufgetreten ist.



Abbildung 6-16: Fehlerhafte Registrierung zweier Punktwolken. Die grün gefärbten Bereiche sind Wegeflächen, die übereinstimmen müssten.

Falls sich in der registrierten Punktwolke optische Anomalien finden, beispielsweise Unstetigkeiten bei Linien oder Wänden und sehr viele Silhouetten, wird die Registrierung verworfen. Gegebenenfalls muss ein Scan entfernt werden. Diesen Effekt illustriert die Abbildung 6-16 anhand eines Datensatzes, bei dem zwei Punktwolken bewusst falsch registriert wurden.

Meta-Informationen

In einem abschließenden manuellen Schritt werden die Meta-Informationen zur Punktwolke hinzugefügt. Dabei werden das Akquisedatum und die erzielte Präzision – in Form des Messprotokolls – abgelegt. Des Weiteren werden Details wie die beinhalteten Taktnummern oder der Fertigungsinhalt je Arbeitsplatz annotiert. Im Allgemeinen lassen sich diese Informationen aus der kolorierten Punktwolke herauslesen. In Ergänzung können sie aus bestehenden Dokumenten extrahiert werden, beispielweise aus Zeichnungen oder Bauplänen. Diese Meta-Informationen werden jeweils einem konkreten Punkt anhand seiner Koordinate per Notiz zugeordnet.

Aktualisierung der Punktwolke

Zur Aktualisierung eines Teilbereichs werden neue Scans aufgenommen, das Koordinatensystem der bestehenden Punktwolke wird bewusst beibehalten. Die Referenzierung folgt in diesem Falle einer zweistufigen Sequenz: Die Punktwolken aus neuen Aufnahmen werden zuerst zueinander registriert. Anschließend erfolgt die Referenzierung der neuen zusammenhängenden Punktwolke relativ zur vorhandenen Punktwolke. Um diese Referenzierung durchzuführen, werden die historischen Aufnahmen benötigt, weshalb diese gespeichert und entsprechend verfügbar gehalten werden. Somit wird das bestehende Koordinatensystem konserviert und auf die neue Punktwolke übertragen. Soll nur ein Ausschnitt einer bestehenden Punktwolke aktualisiert werden, so werden diejenigen Punkte, die außerhalb dieses Bereichs liegen und die der Laserscanner aufgrund seiner optischen Reichweite aufgenommen hat, separiert. Zum Zuschnitt bieten sich eine Auswahl beispielsweise anhand von Säulen oder Takten an. Diese Auswahl wird in kongruenter Weise auf das alte Modell appliziert, sodass der Bereich, der durch die neuen Aufnahmen abgedeckt wird, ausgetauscht werden kann. Die alten Punkte in diesem Bereich werden archiviert, die neuen Informationen werden eingespielt. Dieses Vorgehen gewährleistet, dass sich im Peripheriebereich der zu aktualisierenden Punkte keine inkonsistenten Informationen aus historischen und neuen Aufnahmen finden.

Diese Aktualisierung kann nach dem Push- oder dem Pull-Prinzip ausgelöst werden (vgl. 5.2.3). In Anbetracht der unterschiedlich hohen Veränderungsdynamik empfiehlt sich das Vorgehen nach dem Push-Prinzip mit zyklischer 3D-Digitalisierung in der Praxis vor allem für die Montage und die Logistik. In konkreten Projekten wurden Montagebereiche teils in einem Zyklus von vier bis sechs

Monaten 3D-digitalisiert. Für Presswerke und Karosseriebauten in Gänze hat sich im Rahmen dieser Arbeit das Pull-Prinzip bewährt. Zur initialen Datenaggregation werden in sämtlichen Gewerken relevante Sektoren unmittelbar vor Planungsbeginn 3D-digitalisiert (Pull-Strategie).

Die gesamte Prozedur des Postprocessings fällt einmal je Projekt an. Sie wird daher einer Spezialistengruppe aufgetragen, damit diese Experten Erfahrung im Umgang mit den Punktwolken aufbauen und sich nicht alle Planer in das Postprocessing einarbeiten müssen.

6.3.4 Digitaler Besuch der Produktion

Das realisierte IT-System (siehe 6.1) ermöglicht den browserbasierten Besuch sämtlicher Fertigungssektoren, die bereits 3D-digitalisiert wurden. Dieser Abschnitt beleuchtet die Optionen, die sich Planern im Rahmen des digitalen Besuchs der Fertigung eröffnen, ohne die Punktwolke zu modifizieren.

Gegenüber einem Video bieten Punktwolken den Vorteil der freien Navigation, sodass jeder Planer genau den Aspekt untersuchen kann, der für seine individuelle Tätigkeit von Bedeutung ist. Neben dem Entfall von Reisezeit bietet dies die Möglichkeit des direkten Vergleichs mehrerer Lösungen ohne Zeitversatz. Zum Konzeptvergleich im Sinne eines Benchmarks wird die 3D-Digitalisierung verwandter Produktionselemente im Produktionssystem vorgenommen. Nach der Eingrenzung des Betrachtungsraums des Benchmarks erfolgt die Aufnahme, die Aufbereitung der Daten und die Untersuchung der Punktwolken. Abbildung 6-17 zeigt die digitale Gegenüberstellung dreier exemplarischer Anlagen.

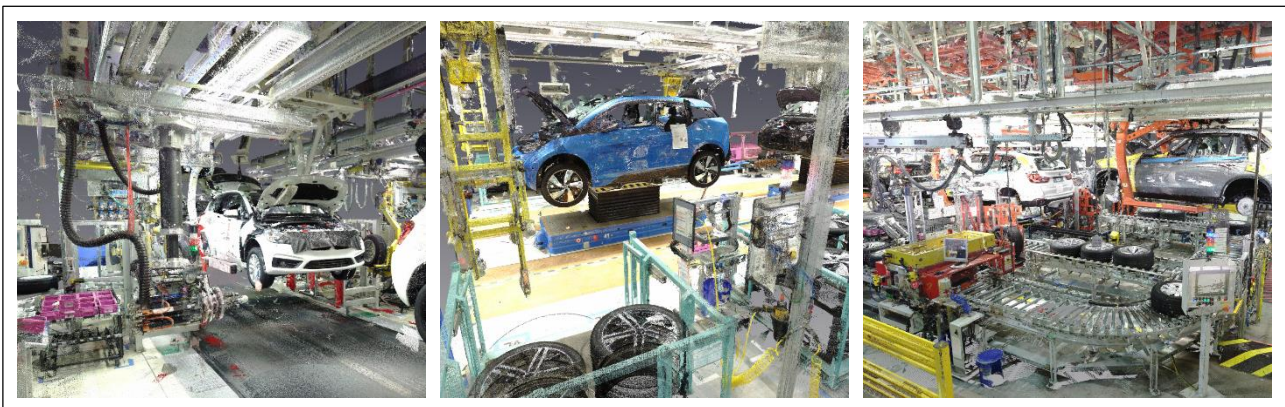


Abbildung 6-17: Digitaler Vergleich von verwandten Produktionsstationen, die sich an drei weltweit verteilten Standorten finden

Ein konkreter Anwendungsfall im Zuge dieser Arbeit ist der direkte Vergleich von Fertigungsstationen. Dazu wurden weltweit zwölf Stationen mit derselben fertigungstechnischen Funktion 3D-digitalisiert und im Planungsteam miteinander verglichen. Die verwandten Bereiche sind so für einen Benchmark zugänglich, grobe Unterschiede werden unmittelbar transparent. Im konkreten Beispiel erweisen sich Automationsgrad, Anlieferungsstrategie und davon abhängig die Fördertechnik als deutlich verschieden. Zur genauen Analyse werden die relevanten Maße sämtlicher Lösungen einander gegenübergestellt. Diese Benchmarks wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit Spezialisten aus der Planung und je einem Repräsentanten des jeweiligen Betreibers in Online-Sitzungen vorgenommen. Die Praxis zeigt einerseits, dass die Planer sich somit kritisch mit den implementierten Lösungen auseinandersetzen. Andererseits kann der Betreiber erklären, welche Adaptionen zur Optimierung des Produktionssystems ausgearbeitet wurden. Zur Bewertung der einzelnen Konzepte werden zusätzlich Kennzahlen bezüglich der Produktionsmenge (benötigte Zeit pro Einheit beziehungsweise Output pro Zeiteinheit) und äußere Gegebenheiten des jeweiligen Standorts berücksichtigt. Als Essenz dieses Vergleichs sämtlicher etablierter Lösungen wurden Blaupausen für die zukünftige Planung dieser Anlage extrahiert. Auf Basis der geforderten Stückzahl je Zeiteinheit stehen somit in Summe drei Konzepte als Vorlage zur Verfügung.

Die Messfunktion erweist sich auch im Rahmen des Konzeptvergleichs als hilfreich. Dabei offeriert die Punktwolke die Möglichkeit, Maße auch zwischen Objekten zu kalkulieren, zwischen denen realiter kein direkter Sichtkontakt besteht.

Die 3D-Digitalisierung wird insbesondere zur Konservierung von Konzepten appliziert, die ohne Top-down-Planungsprozess vor Ort entwickelt wurden. Good-Practice-Konzepte sowie Lösungen, die als Standard definiert wurden, werden via 3D-Digitalisierung als Punktwolke festgehalten. In diesem Anwendungsfall erfolgt die 3D-Digitalisierung nach dem Push-Prinzip, sobald an einem Standort ein innovatives Konzept entwickelt oder aufgebaut wurde. Die Punktwolke dient zum Beispiel für Rohrsteck-Regale oder Lösungen, die dem Gedanken der Schlanken Produktion folgen, als Dokumentation und Bauanleitung, da relevante Maße direkt entnommen werden können.

6.3.5 Konzeptplanung

Die Nutzung der Punktwolke zur Konzeptplanung umfasst mehrere Schritte der Modifikation, deren Umsetzung im Folgenden erläutert wird.

Ein Planungsspezialist schneidet die Punktwolke auf den inneren Bereich zu, sodass die Peripherie-Sektoren, die nur in geringem Umfang aufgenommen wurden, abgetrennt werden, siehe Abbildung 6-18. Als Resultat liegt der Kernbereich der Punktwolke vor, welcher detaillierte Informationen bezüglich der geometrischen Struktur beinhaltet.

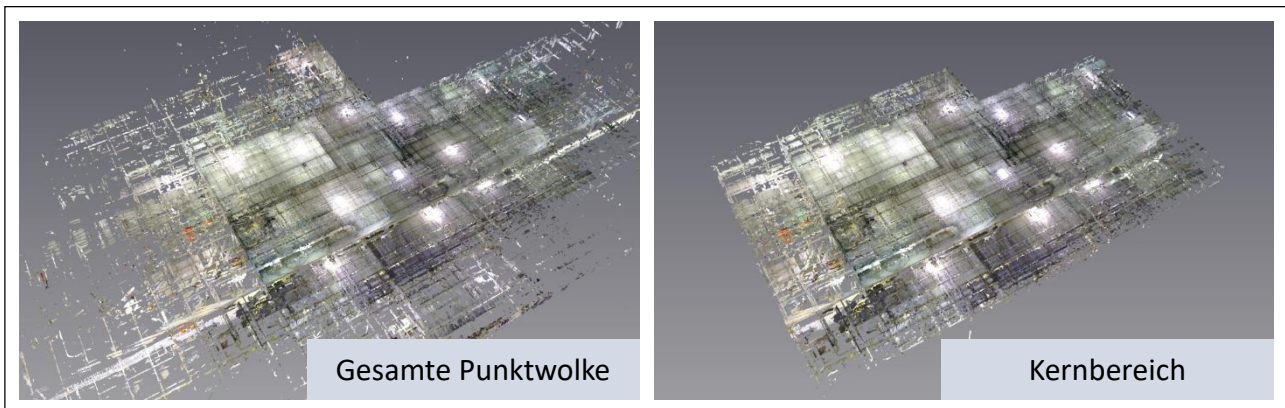


Abbildung 6-18: Zuschnitt der Punktwolke auf den Kernbereich

Um die folgende strukturelle Planung vorzubereiten, wird diese Punktwolke in Bereiche mit fixierten Elementen und solche mit mobilen Objekten unterteilt; diese Bearbeitung erfolgt manuell. Automatismen zur Gruppierung sind hier wenig geeignet (vgl. 4.6.3), festzulegen, ob ein Objekt fixiert oder beweglich ist. Bei der Arbeit in Punktwolken steht im Allgemeinen die dreidimensionale Box-Auswahl sowie die perspektivische Selektion zur Verfügung, wie Abbildung 6-19 zeigt.

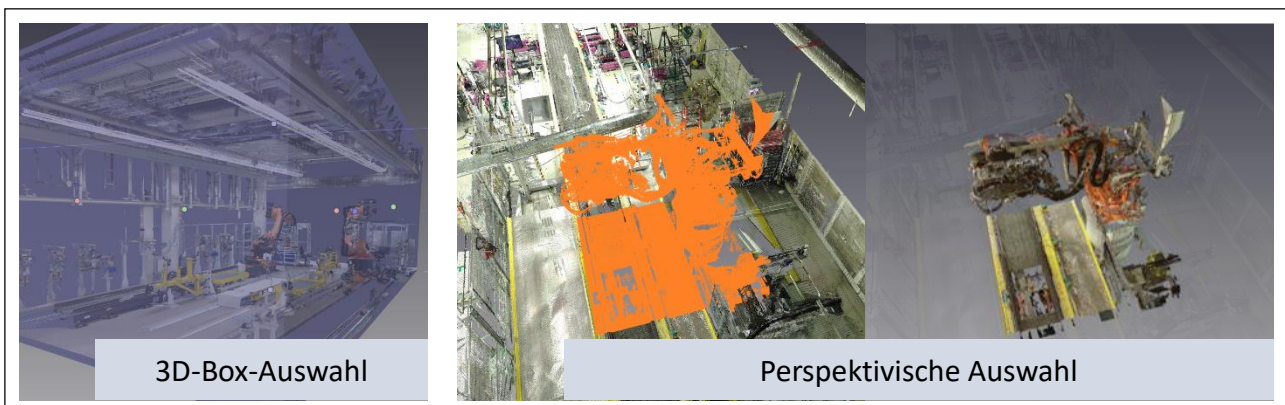


Abbildung 6-19: 3D-Box-Auswahl und perspektivische Selektion (Mitte und rechts) in Punktwolken

Die perspektivische Selektion dient der Auswahl der Punkte, die sich von einem fixen Standpunkt aus innerhalb der Projektion einer zweidimensionalen Geometrie (Rechteck, Kreis, frei definierbare Geometrie) befinden. Über die Echtzeit-Visualisierung der 3D-Box-Auswahl bestimmt der Planer beispielsweise mithilfe eines digitalen Quaders, welche Punkte zur Auswahl gehören.

Statische Elemente sind dabei Objekte, die Fixpunkte in der Fertigung darstellen. Hier sind beispielsweise Gebäudestrukturen, fest installierte Maschinen, Bänderkonstruktion, Förder-technik oder deckengebundene Fertigungsmittel zu nennen. Mobile Elemente in der Fabrik lassen sich leicht verschieben oder mithilfe von Gabelstaplern oder Ähnlichem bewegen beziehungsweise umorganisieren. Beispiele sind hier Betriebsmittel auf Rollen, Regale, Gitterboxen, Kisten in Supermärkten und Großmärkten sowie Flurförderzeuge selbst. Diese Unterteilung ist in Abbildung 6-20 illustriert.

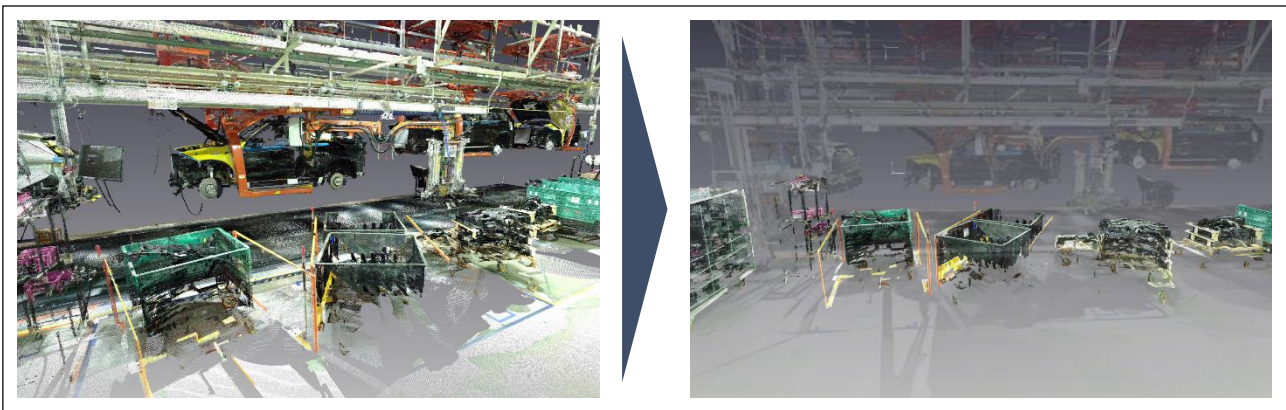


Abbildung 6-20: Zerlegung einer Punktwolke in statische und mobile Elemente (hervorgehoben)

Obsoletere Strukturen werden in Analogie zu diesem Vorgehen ausgewählt und aus der Punktwolke entfernt. Anschließend wird die Unterteilung in relevante Module oder Sektoren auf einer feineren Detaillierungsstufe vorgenommen. So ist es je nach Planungsaufgabe sinnvoll, die Punktwolke einer Fertigung in mehrere Ebenen zu unterteilen, die den realen Etagen entsprechen, wie Abbildung 6-21 veranschaulicht.

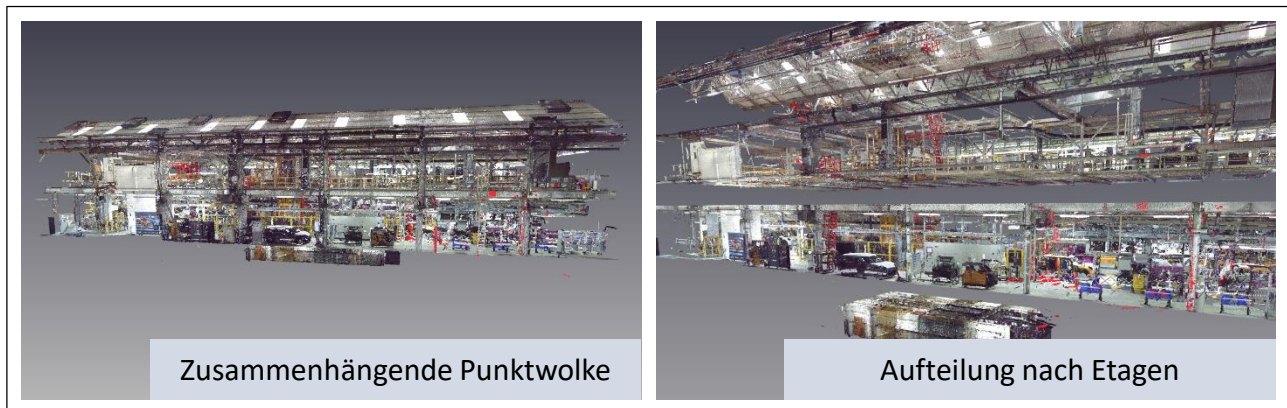


Abbildung 6-21: Unterteilung einer Punktwolke in einzelne Objekte – hier Ebenen

Ebenso bietet es sich an, eine Punktwolke in Sektoren zu zerschneiden, die bestimmte Fertigungsabschnitte umfassen. Passend zur Granularität der Planungsaufgabe wird eine weitere Unterteilung vorgenommen, sodass zum Beispiel jeder Arbeitsplatz aus der Punktwolke als losgelöste Datei vorliegt und separat zugänglich ist. Über die Verschiebung der Boxauswahl entlang einer Koordinatenachse lässt sich die Punktwolke, beispielsweise der Bandstruktur oder Werkstattanordnung folgend, in Subbereiche bestimmter Ausdehnung unterteilen. Sofern die Punktwolke eines Sektors universelle Fertigungselemente enthält, die bislang nicht in der Bibliothek (siehe 6.1.1) abgelegt wurden, werden diese separiert und entsprechend in die Bibliothek übertragen – unabhängig von der aktuellen Konzeptplanung.

Nachdem obsolete Teile digital ausgeschnitten sind, repräsentiert die Punktwolke die Umgebungsstruktur, die beibehalten werden soll. Für die konzeptionelle Arbeit werden in das Basismodell, welches sich aus einer oder mehreren Punktwolken zusammensetzt, zusätzliche Fertigungsressourcen eingefügt, sodass sich Entwürfe für die Anordnung der Produktionselemente ergeben. In der praktischen Umsetzung wird diese Realplanung während der Konzipierung fokussiert, schließlich bildet die Punktwolke die reale Szene genau ab, insbesondere wenn sie unmittelbar vor Planungsbeginn aufgenommen wurde. Die geometrische Verträglichkeit des neuen Konzepts für das Produktionssystem mit der bestehenden Struktur wird untersucht. Für diejenigen Fertigungsressourcen, die zum aktuellen Zeitpunkt nicht als 3D-digitalisiertes Modell vorliegen, werden Platzhalter eingeschoben. Dafür kommen ähnliche Ressourcen, welche bereits 3D-digitalisiert wurden, zum Einsatz, die gegebenenfalls skaliert werden.

In der Praxis werden Experten damit betraut, die beschriebene Zerlegung der Punktwolke in einzelne Teile als auch die Fusion sämtlicher Punktwolken zu einem Konzept vorzunehmen. Sinnvollerweise werden solche Experten in der Planungsabteilung angesiedelt, sodass sie diese Arbeiten für sämtliche Projekte übernehmen.

Schließlich liegen im Allgemeinen mehrere Vorschläge für das neue Produktionssystem als Real-layout vor. Der Planstand beinhaltet dabei je Konzept die Struktur des Produktionssystems mit der Anordnung der einzelnen Arbeitsstationen oder Takte und Fertigungsressourcen, das Materialflusskonzept sowie den Platzbedarf. Die Bewertung mehrerer realisierbarer Konzepte bezüglich der Zielgrößen des Produktionssystems erfolgt, sodass eine Lösung ausgewählt wird, welche im Folgenden bis ins Detail geplant wird.

6.3.6 Partizipative Detailplanung

Das beschlossene Konzept zur Gestaltung des Produktionssystems wird in einem partizipativen Prozess feingeplant. Dazu nehmen alle Interessengruppen an Planungsworkshops teil, um das Konzept gemeinschaftlich zu optimieren. Zu Beginn der Detailplanung sollten Bau-, Produktionsplanung, Produktentwicklung, Strukturplanung, Anlagenlieferant und Vertreter der Fertigung zusammenarbeiten. Zur Steigerung der Konzeptreife ist bei entsprechendem Planungsfortschritt die Logistikplanung als auch die Fertigungsmittelkonstruktion einzubinden.

Neben der Arbeit mit mehreren Punktwolken kommt der hybriden Planung während der Detailphase eine entscheidende Rolle zu. So dient der hybride Ansatz sowohl der Kollaboration zwischen Entwicklung und Planung des Produktionssystems als auch der Zusammenarbeit mit dem Anlagenbau. Die hybride Planung bedeutet die Fusion von CAD-Konstruktionen und dem aktuellen Planstand, der als Kombination mehrerer Punktwolken vorliegt. Dieser Ansatz wird besprochen, sobald Maschinen oder Produkte als konstruierte Modelle verfügbar sind.

Die Produktmitgestaltung erfordert eine enge Abstimmung zwischen der Produktionsplanung und der Entwicklung. In dieser Phase ist es das Ziel der Produktentwicklung, die Zwischenstände der Konzepte zu verstehen. Der aktuelle Planstand dient in diesem Stadium als Diskussionsgrundlage zwischen den beiden Parteien. Ferner lassen sich verfügbare digitale Produktprototypen über den

hybriden Ansatz in das Produktionssystem integrieren, wie in Abbildung 6-22 in abstrahierter Form dargestellt.

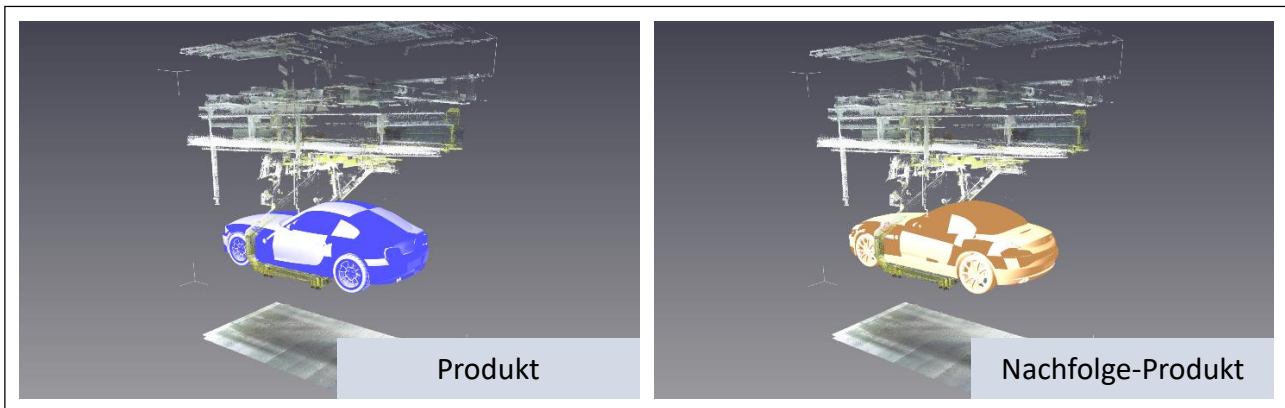


Abbildung 6-22: Hybrider Planungsansatz zur Produktmitgestaltung

Diese Kooperation zwischen Entwicklung und Planung erfolgt in der Praxis ab einer möglichst frühen Phase des Produktentstehungsprozesses, um vorgeschlagene Produktkonzepte hinsichtlich ihrer Herstellbarkeit zu beleuchten. Restriktionen, die das Produktionssystem mit sich bringt, werden nachvollziehbar. Auf diese Weise befähigen Punktwolken die fertigungsgerechte Produktgestaltung, da die Fertigungsstruktur für Entwickler greifbar wird. Sobald das Produkt definiert und fixiert ist, bleiben Vertreter der Entwicklung wenigstens zur Information in den Prozess eingebunden.

Wenngleich es strukturelle Änderungen an tragenden Gebäudeteilen zu vermeiden gilt, müssen teilweise bauliche Maßnahmen berücksichtigt werden. In der Praxis werden Vertreter, die den Bau verantworten, in die Detailplanung eingebunden, um vor allem strukturelle Eingriffe zu betreuen, etwa die Installation von Bühnen oder die Modifikation von Wänden. Die Bauplanung berät außerdem bezüglich der Gebäudeausstattung, was zum Beispiel die Beleuchtung und Sicherheitseinrichtungen betrifft.

Der Anlagenbauer reicht seinen Vorschlag der Anlage als Konstruktion ein, sodass die Planer des Produktionssystems überprüfen können, ob die aktuelle Version der Anlage in das Fertigungskonzept integriert werden kann oder ob sich geometrisch ungünstige Effekte ergeben. In dieser Kooperation ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Anlagenkonstruktion als dreidimensionales Modell vorgelegt wird. Ein zweidimensionales Layout der Anlage erlaubt keine valide Aussage. Des Weiteren bildet das Modell der Anlage den Ausgangspunkt für die Planung der Umgebung hinsichtlich Materialfluss, Bereitstellung und Anlagenbeschickung. Diese Integration der

Anlage findet iterativ für jede Detaillierungsstufe statt: Sobald eine neue Entwicklungsstufe der Anlage als Modell vorliegt, wird dieses in der beschriebenen hybriden Vorgehensweise in das Konzept des Produktionssystems integriert. Während des Aufbaus der Anlage in den Räumlichkeiten des Anlagenbauers kann eine mehrstufige Absicherung der Integrationsfähigkeit erfolgen. Ausgehend von der 3D-Digitalisierung der Anlage, wie sie tatsächlich aufgebaut wird, erfolgt die digitale Integration des Abbilds der Anlage in die Produktionsumgebung.

Die Logistikplanung stellt Untersuchungen in der unmittelbaren Umgebung eines jeden Arbeitsplatzes an. Der Austausch von Voll- und Leergut muss sichergestellt werden. Parallel dürfen sonstige logistische Prozesse nicht beeinträchtigt werden, so sind etwa Fahrwege freizuhalten, damit Gabelstapler oder Routenzüge passieren können. Überdies beschäftigt sich die Logistikplanung mit der Positionierung von Wegen und Lagern im Produktionssystem.

Die Fertigungsmittelkonstruktion liefert Vorschläge für diejenigen Produktionsressourcen, die nicht standardisiert sind. Hier sind etwa Hebevorrichtungen und Handlingsgeräte zu nennen. Analog zum Anlagenbau werden die Modelle solcher Ressourcen zur kontinuierlichen Absicherung in das Konzept integriert.

Für den Betreiber des Produktionssystems ist es entscheidend, die Arbeitsplätze schlank zu gestalten, sodass sich zum Beispiel am Arbeitsplatz kurze Wege zum Material ergeben. Dazu werden Experten für die Schlanke Produktion konsultiert. Um die Anordnung der Materialien und die Konfiguration von Arbeitsplätzen zu optimieren, stützen sie sich einerseits auf bereits etablierte Lösungen an anderen Standorten, welche als 3D-digitalisierte Modelle im Repositorium verfügbar sind. Daneben können sie auf 3D-digitalisierte Konzepte zugreifen, die aus früheren Cardboard-Engineering-Workshops hervorgegangen sind. Im Sinne einer digitalen Kartonagensimulation werden einzelne Fertigungsressourcen digital in das aktuelle Konzept eingebracht, skaliert und verschoben.

Bedarfsgesteuert sind weitere Parteien hinzuzuziehen. In Spezialfällen ist etwa die Instandhaltung zu berücksichtigen, beispielsweise bei der Verlagerung von Schaltschränken. Ferner ist es von Vorteil, auch indirekt Beteiligte wie Einkauf und Finanzen bei der Konzeptfindung einzugliedern – speziell zur Plausibilisierung der gewählten Lösung.

Die Detailplanung stützt sich außerdem auf die Bibliothek. Diese stellt einzelne Fertigungselemente, zum Beispiel Betriebsmittel, zur Verfügung, wie Abbildung 6-23 entnommen werden kann.



Abbildung 6-23: Bibliothek mit Punktwolken von gängigen Fertigungsressourcen (zugreifbar auf Objektebene)

In der Praxis lassen sich detaillierte Vorschläge zur Gestaltung des Produktionssystems aufgrund des umfangreichen Angebots an Fertigungsressourcen in der Bibliothek binnen kurzer Zeit umsetzen. Die Bibliothek wurde im Zuge dieser Arbeit aufgebaut und mit über 900 einzelnen Objekten befüllt.

Um die Realisierbarkeit zu begutachten, werden Kollisionsuntersuchungen vorgenommen. Algorithmen zur Kollisionsuntersuchung können die automatisierte Evaluation von Interferenzen zwischen Objekten leisten, wobei eine Kollision als Unterschreitung des Abstands zwischen Punkten, die zwei unterschiedlichen Objekten zugeordnet sind, definiert ist. Die Interpretation detektierter Kollisionen obliegt dem Nutzer. So gilt es, zwischen notwendigen Kollisionen, die beispielsweise der Befestigung zweier Objekte dienlich sind, und schädlichen Kollisionen, die in Realität zu Deformationen oder Schäden führten, zu differenzieren.

Neben der hybriden Planung von statischen Konzepten werden als optionale Facette der Detailplanung kinematische Fertigungsressourcen beleuchtet. Sonderbetriebsmittel mit Kinematik und Industrieroboter inklusive deren Peripherie oder Fördertechniksysteme stehen im Zentrum dieser Betrachtung. Animationen kommen zum Einsatz – etwa, um logistische Systeme zu analysieren. Dabei werden sowohl 3D-digitalisierte als auch konstruierte Elemente animiert, indem ihnen ein Pfad aufgeprägt wird. Die detaillierte Planung von Industrierobotern wird durch die 3D-Kinematiksimulation ermöglicht. Um diese Untersuchungen mit der Punktwolken-basierten Detailplanung zu verknüpfen, kommt ebenfalls ein hybrider Ansatz zum Tragen. Diejenigen Fertigungsressourcen, deren präzise Kinematik relevant ist, werden als CAD-Konstruktion mit entsprechender Bewegungslogik in die Punktwolke des Produktionssystems eingebracht. Die Simulation unterstützt

die Analyse von Zugänglichkeiten und geometrischer Realisierbarkeit. Auf eine nachträgliche Kinematisierung von 3D-digitalisierten Objekten wird im Fall der Simulation zugunsten der Präzision verzichtet.

6.4 Zusammenfassung

Im Zentrum des IT-Systems steht ein Server, welcher sämtliche Modelle speichert. Der Speicher umfasst das Repositorium sowie die Bibliothek. Das Repositorium leistet die Versionierung von Punktwolken und Planständen, die sich im Allgemeinen aus einer Vielzahl an Modellen zusammensetzen. Sofern planerische Modifikationen an einem Konzept vorgenommen werden, wird ein separater Seitenzweig angelegt. In der Bibliothek werden die Modelle universeller Produktionsressourcen abgelegt, die sich besonders häufig in einem Produktionssystem finden. Diese Modelle repräsentieren einzelne Fertigungselemente. Zur Gewährleistung des Informationsschutzes erhält jeder Planer genau auf diejenigen Bereiche Zugriff, die realiter für ihn von Relevanz sind. Das IT-System bietet die browserbasierte Visualisierung, sodass zur reinen Betrachtung nie eine gesamte Punktwolke auf den Client-Computer heruntergeladen wird. Die Punktwolken können über die Schnittstelle bezogen und in weiteren Systemen genutzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Virtual-Reality-System umgesetzt, das die immersive Visualisierung von Punktwolken direkt leistet. Es kommt zwecks der Betrachtung von Planständen sowie der Gestaltung von Produktionssystemen auf Grundlage von Punktwolken zum Einsatz. Die Wiedergabe der Stereobilder erfolgt in einem Head Mounted Display. Der Anwender verfügt auf einer Fläche von bis zu zehn auf zehn Metern, in der er sich frei bewegen kann, über sechs Freiheitsgrade.

Die innovative Methode zur Planung von Produktionssystemen stützt sich auf die 3D-Digitalisierung bestehender Fertigungsstrukturen und darauf aufbauend auf die Visualisierung und die Modifikation von Punktwolken. Zur 3D-Digitalisierung bestehender Produktionssystemen kommen stationäre 3D-Laserscanner mit integrierter Fotofunktion zum Einsatz. Diese Scanner aggregieren Punktwolken der Umgebung mit korrespondierender Farbinformation. Auf die Aufnahme von HDR-Fotos wird aus Gründen der Effizienz und der Optik bewusst verzichtet. Kinematische Systeme werden wegen der unzureichenden Zugänglichkeit in bestehenden Produktionsumgebungen und

Defiziten der Genauigkeit, welche die Registrierung mehrerer Datensätze obstruieren, nicht eingesetzt.

Die 3D-Digitalisierung setzt auf eine Sequenz aus Vorbereitung und Durchführung von 3D-Scans, gefolgt vom Postprocessing der Daten. Zu Beginn eines jeden Projekts zur 3D-Digitalisierung von Produktionsstrukturen wird der Zeitbedarf abgeschätzt. Anhand der eingeführten Auswahlmatrix wird die zu digitalisierende Umgebung in Sektoren gleicher geometrischer Kompliziertheit eingeteilt, sodass eine Approximation des Brutto-Zeitbedarfs resultiert. Die Praxis zeigt, dass ein Anwender drei Scanner parallel bedienen kann, wodurch sich die benötigte Nettozeit zum Scannen in der Produktion minimieren lässt. Bereits simultan zur Aufnahme weiterer 3D-Scans kann das Postprocessing auf einem Computer starten. In der Praxis kommt ein System aus mehreren SD-Karten zum Datentransfer zwischen Scannern und Computer zum Einsatz. Zentrale Aufgabe des Postprocessings ist die Registrierung sämtlicher Punktwolken zueinander. Die Nachbarbeziehungen der einzelnen Punktwolken, die aus Scans hervorgehen, sind dem Layout zu entnehmen. Punktwolken benachbarter Scans werden paarweise feinregistriert – je auf Basis dreier Ebenen mit geringer Toleranz, die möglichst orthogonal zueinanderstehen. Die Gegenüberstellung von Maßen, die in der realen Szene mit einem separaten Messgerät aufgenommen werden, und der Punktwolke liefert ein Indiz bezüglich der Qualität der Registrierung. Die Aktualisierung eines Teilbereichs bedeutet, neue Punktwolken in ein bestehendes Koordinatensystem einzupassen. Dabei wird der Peripheriebereich der neuen Punktwolken separiert, um ein konsistentes Gesamtmodell zu erhalten.

Der digitale Besuch eines Fertigungsabschnitts ist für jeden Nutzer mit Zugriffsrechten via Browser möglich, so erfolgt der Vergleich von verwandten Lösungen, die an unterschiedlichen Standorten implementiert sind. Realisierte Konzepte werden somit ohne zeitliche oder örtliche Distanz zugänglich. Der Betrachter kann jeden beliebigen Blickpunkt in der Punktwolke einnehmen.

Zur Konzeptplanung werden einzelne Module aus Punktwolken herausgetrennt. Es werden mobile von fixierten Objekten abgespalten, obsolete Objekte werden aus dem Konzept entfernt. Ferner wird die Bibliothek um neue Punktwolken von Standard-Ressourcen angereichert. Eine weitere Zerteilung der Punktwolke erfolgt, bis einzelne Module zur Verfügung stehen. Je nach Granularität und Betrachtungsumfang des Planungsfalls werden einzelne Stockwerke oder beispielsweise

Arbeitsstationen isoliert und als separate Dateien gespeichert. Aus den zerteilten Punktwolken werden alternative Konzepte aufgebaut, dazu werden gegebenenfalls weitere Sektoren der Fertigung 3D-digitalisiert. Schließlich resultiert mindestens ein realisierbares Konzept, welches in der Folge weiter ausgearbeitet wird.

Mindestens in der Detailplanung werden die in der Bibliothek verfügbaren Modelle von Fertigungselementen eingesetzt, um ein detailliertes Konzept zu erstellen. An Workshops zur Detailplanung partizipieren im Besonderen die Planung des Produktionssystems, Produktentwicklung, Bauplanung, Anlagenbauer, Logistikplanung, Fertigungsmittelkonstruktion, Produktionsspezialisten und Betreiber. In Workshops erfolgt die Betrachtung bis auf Ebene einzelner Produktionselemente und Arbeitsplätze. Die hybride Planung schließt konstruierte 3D-Modelle, die in das neue Produktionskonzept integriert werden, in den Punktwolken-basierten Ansatz ein, um die Realisierbarkeit sicherzustellen. Dieser hybride Ansatz wird ebenfalls verfolgt, um die Implikationen eines neuen Produkts auf das Produktionssystem zu beleuchten. Die Interferenzen zwischen Anlagen und Gebäude werden untersucht. Zum einen muss eine Anlage hinsichtlich ihrer Abmessungen überhaupt integriert werden können, zum anderen ist der Prozess des Einbaus zu untersuchen. Die Interdependenzen zwischen Anlage, Anlieferung, Bereitstellung und Arbeitsplatzgestaltung erfordern eine enge Abstimmung zwischen den einzelnen Spezialisten. Im Zuge der Detailplanung wird das VR-System eingesetzt, um auch Mitarbeitern, die nicht in der Planung beschäftigt sind, Konzepte in einer intuitiven Weise zuzuführen und so ihr Feedback abzufragen.

Als Erweiterung zu diesen statischen Analysen von Konzepten eines Produktionssystems werden dynamische Untersuchungen angestellt. Einerseits wird die Animation eingesetzt, andererseits findet die 3D-Kinematiksimulation in hybrider Logik statt – in diesem Falle wird CAD-Modellen eine Kinematik aufgeprägt.

7 Validierung

In der vorliegenden Arbeit wurden das entworfene IT-System und die Methode zur Planung von Produktionssystemen auf Basis der 3D-Digitalisierung mit Farbinformationen anhand zahlreicher realer Planungsfälle validiert. Im Vordergrund der Anwendungen stehen Umplanungen von Produktionssystemen an diversen Standorten. Die Projekte weisen ob des Praxispartners BMW Group Bezug zur Automobil- respektive Fahrzeugproduktion auf. Nichtsdestotrotz ist das Gros der Erkenntnisse auf weitere Produktionssysteme und Anwendungen abseits der Fertigung übertragbar.

Dieses Kapitel dient der Validierung des IT-Systems sowie der Methode zur 3D-Digitalisierung und der anschließenden Planung. Es erfolgt eine Nutzenbewertung für die 3D-Digitalisierung in der Planung anhand realisierter Projekte. Das Kapitel schließt mit der kritischen Reflexion der entworfenen Methode in Bezug auf die eingangs formulierten Anforderungen ab.

7.1 IT-System

Das entworfene und implementierte IT-System zur Unterstützung der Planung stellt den zentralen Zugangspunkt zu den Daten dar. Der folgende Abschnitt untersucht die Nutzungshäufigkeit dieses Systems und die Implikationen der ausgewählten Architektur. Dazu werden das Repositorium, das Nutzermanagement, die Funktion zur Visualisierung sowie die Schnittstelle analysiert.

Die eingeführte Server-Client-Architektur des informationstechnischen Systems zur Visualisierung von Punktwolken stellt minimale Hardware-Anforderungen an die Client-Computer. Dies manifestiert sich aufgrund geringer Eintrittsbarrieren in einer hohen Anzahl an Nutzern. Durch die hohe Frequentation und die Vielzahl an Nutzern rentiert sich der Aufwand für die 3D-Digitalisierung umso mehr. Ein Bereich wird ergo einmal 3D-digitalisiert, die entsprechende Punktwolke wird für diverse Fragestellungen konsultiert. Eine anonymisierte Auswertung bezüglich der Fachbereiche der Anwender ergibt folgendes Bild. Die Nutzergruppen, die das IT-System am intensivsten nutzen, das heißt, diejenigen Disziplinen, die die meisten Zugriffe auf die Punktwolken verursachen, sind Planung, Logistik und Produktionsbetreiber, wie Abbildung 7-1 hervorhebt.

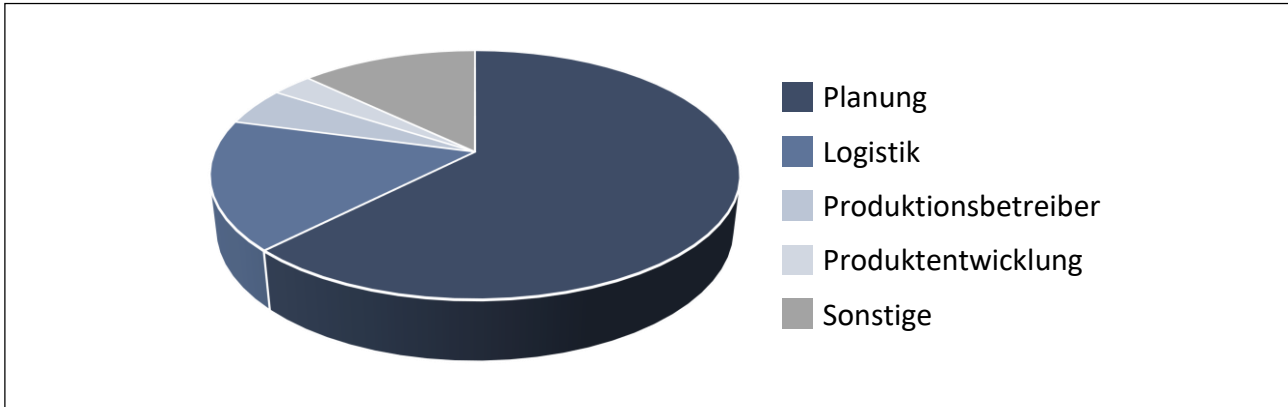


Abbildung 7-1: Auswertung der Nutzer des IT-Systems nach fachlicher Disziplin

Auf dem serverzentrierten IT-System werden die Daten zentral verwaltet. Das im Repository realisierte Lock-Modify-Unlock-Prinzip (vgl. 5.4.1) stellt eine redundanzfreie Speicherung der Planstände sicher. Durch die Freigabe und Aktualisierung der Datenbasis auf dem zentralen Speicher kam es während sämtlicher Projekte zu keinerlei Inkonsistenzen in Planständen.

Nach jeder Änderung wird eine neue Revision angelegt, welche sämtliche Dateien umfasst. Auch wenn eine einzelne Punktwolke, die Teil des Konzepts ist, in einem Schritt nicht modifiziert wird, wird diese abermals als separate Datei im Speicher abgelegt. Hieraus resultiert ein hoher Speicherbedarf. Die Nutzung des Speichers scheint durch diesen gewählten Ansatz im Repository nicht maximal wirtschaftlich. Da die eingesetzten Festplatten jedoch preiswert sind und die Lösung sich durch eine hohe Robustheit auszeichnet, wird am implementierten Konzept festgehalten. Nach Abschluss eines Planungsprojekts werden sämtliche Zwischenstände auf das Back-up-System transferiert, somit wird der Speicher im primären Server wieder verfügbar gemacht.

Hinsichtlich des Nutzermanagements bewährt sich das realisierte Need-to-know-Prinzip. Gerade Bereiche, in denen frühe Produktprototypen entwickelt oder erstmals gefertigt werden, müssen abgeschirmt und vor dem breiten Zugriff geschützt werden, um die Geheimhaltung bis zum geplanten Termin der öffentlichen Kommunikation zu gewährleisten. Ebenso sind neue Produktionsstätten und Anlagenbereiche zu kapseln, die innovative Lösungen beinhalten.

Die umgesetzte Download-Funktion zur Variation von Konzepten und zur Nutzung der Daten in weiteren Systemen (siehe 6.1) stellt einen Makel hinsichtlich des Informationsschutzes dar. Digitale Produktmodelle sind während der Entwicklungsphase allerdings in gleicher Logik einem Expertenkreis auf Seite des OEM als auch bei Lieferanten zugänglich. Daher wird dieser Umstand unter der

Prämisse akzeptiert, dass nur entsprechenden Experten die Download-Möglichkeit eingeräumt wird. Die ausschließlich browserbasierte Planung ist theoretisch vorstellbar, sie wird aus Gründen der Praktikabilität nicht verfolgt. Dazu müsste das IT-System über die Funktion zur Visualisierung hinaus entsprechend weiterentwickelt werden. Zusätzlich würde die Download-Funktion abgeschaltet, was eine Vielzahl an weiteren Anwendungsszenarien obstruierte.

Die betriebswirtschaftliche Reflexion zeigt, dass die Lösung mit zentraler Datenspeicherung und einer serverbasierten Visualisierung dazu dient, die Hardware-Kosten für das IT-System auf einem minimalen Level zu halten. Die Daten sind gleichzeitig einer möglichst breiten Masse an Nutzern zugänglich. Die Anzeige von Punktwolken stellt hohe Anforderungen an den Speicher und – ob der zahlreichen zu visualisierenden Objekte – an die Grafikleistung eines Computers. Soll also eine Punktwolke auf einem dezentralen Client-Computer angezeigt oder verarbeitet werden, muss dieser Computer entsprechend leistungsfähig ausgestattet sein. Die flächendeckende Aufrüstung von Computern scheidet aus finanziellen Gründen aus. Dementsprechend stünden nur wenige spezielle Rechner zur Verfügung, an denen Interessenten Punktwolken betrachten könnten.

Um Punktwolken beispielsweise für fahrerlose Transportsysteme zu beziehen, kann die Download-Schnittstelle genutzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte keine weitergehende Bewertung bezüglich der Eignung von Punktwolken als Kartengrundlage für Transportsysteme.

Die Schnittstelle ermöglicht die Nutzung von Punktwolken für weitere Anwendungsfälle. So können sie in Virtual-Reality-Systeme geladen werden. Mit der umgesetzten VR-Lösung für unter 5.000€ steht eine im Vergleich zu etablierten Mehrseitenprojektionen, kurz „CAVE“ [SPITZWEG 2009, S. 61; MEIER 2013, S. 17], kostengünstige Lösung zur Verfügung. Die Kalkulation der Bilder aus Punktwolken liefert performante Ergebnisse mit bis zu 90 Frames pro Sekunde. Aufgrund von Hardware-Limitationen beläuft sich die maximale Größe der Punktwolke auf 80 Millionen farbige Punkte, die entsprechend flüssig wiedergegeben werden können. Dies kommt einem 3D-digitalisierten Produktionsbereich im Umfang von etwa zwei Takten in der Montage gleich. Es fehlt an einer Echtzeit-Visualisierung größerer Punktwolken. Hier sind Algorithmen zu entwickeln, damit eine zusammenhängende Punktwolke im VR-System in mehrere Sektoren zerlegt und diese jeweils dynamisch nachgeladen werden. Zusätzlich sind Experimente auf die simultane Nutzung mehrerer Grafikkarten anzustellen, um große Punktwolken ohne Einbußen der Performanz zu visualisieren.

Der Einsatz von Punktwolken in diesem VR-System ermöglicht die unmittelbare Integration von weiteren Beteiligten, die keine Planungsspezialisten sind, in den Prozess. Entgegen historischen Ansätzen fällt für diese immersive Visualisierung allerdings keinerlei Modellierungsaufwand an, weshalb es jederzeit ohne Verzögerung möglich ist, ein Konzept im Virtual-Reality-System zu betrachten und zu begutachten. Die Nutzung dieses VR-Systems ermöglicht und fördert kurze Feedbackschleifen und die Partizipation. Durch diese Visualisierung von Konzepten, die aus Punktwolken aufgebaut sind, können alle betroffenen Parteien die Modelle realistisch erleben und sofort verstehen. In der Praxis können mithilfe des VR-Systems insbesondere auch ergonomische Untersuchungen dargestellt werden. Diese immersive Wiedergabe von Punktwolken vermittelt einen realistischen Eindruck für Abmessungen und erlaubt damit eine Einschätzung der Ergonomie. Derjenige Werker, der einen Arbeitsplatz nutzen soll, kann an der Planung partizipieren. Dabei lassen sich einzelne Punktwolken als auch konstruierte Geometrien von Ressourcen, die es in die Fabrik zu integrieren gilt, live im VR-System verschieben. Durch die direkte Interaktion mit der Umgebung im virtuellen Raum ergeben sich folgende Vorteile: Die Einsehbarkeit von gewissen Bereichen wird realitätsnah dargestellt. Dadurch, dass die geometrischen Verhältnisse der Realität entsprechen und der Werker sich realistisch bewegt, kann der Komfort einer Lösung unmittelbar bewertet werden. Die Untersuchung ergonomischer Aspekte gestaltet sich intuitiv – im Gegensatz zu einer Human-Simulation ist keine Expertise bezüglich eines Software-Werkzeugs vonnöten. Zudem ist kein Hardwareaufbau des Arbeitsplatzes erforderlich, sodass die Produktion nicht tangiert wird. Das VR-System ermöglicht die Modifikation des Konzepts und zugleich dessen Speicherung. Insgesamt manifestiert sich dies in Vorteilen der Ressourcenschonung und der Nachhaltigkeit.

7.2 Methode

Die 3D-Digitalisierung erweist sich in der Praxis als effiziente Methode, um ein aktuelles, dreidimensionales Abbild einer Fabrikstruktur zu generieren. Die benötigte Zeit für die Aufnahmen vor Ort und das Postprocessing lässt sich durch Parallelisierung minimieren. In diesem Abschnitt werden die einzelnen Schritte der Planungsmethode von der Vorbereitung und der Aufnahme vor Ort über das Postprocessing bis hin zur Planung von Produktionssystemen validiert.

7.2.1 Vorbereitung der 3D-Digitalisierung

In den realisierten Projekten zahlt sich die akribische Vorbereitung aus. Stark ausgelastete Produktionssysteme bieten ein Minimum an geplanten Produktionsunterbrechungen. Die Praxis zeigt, dass solche Pausen in den meisten Sektoren für Umbauten oder für Wartungs- und Reinigungsarbeiten genutzt werden. Die vorherige Absprache mit den Verantwortlichen vor Ort ist unabdingbar, um die Realisierbarkeit eines Digitalisierungsprojekts sicherzustellen.

Mithilfe der Auswahlmatrix (siehe 6.3.1) erfolgt die Festlegung der Positionen, an denen 3D-Scans aufgenommen werden. So ergibt sich eine Abschätzung für den Zeitbedarf vor Ort. Die Auswahlmatrix zur Bestimmung der Dichte an 3D-Scans erweist sich in der Praxis als simpel anwendbar. Die Rückmeldung sämtlicher Nutzer bestätigt die unkomplizierte Logik. Der Ansatz, 3D-Scans auf mehreren Ebenen in derselben Etage aufzunehmen, bedarf bei Neulingen allerdings einer Explikation. Daher empfiehlt es sich, diesen Aspekt in einer kurzen Demonstration zu besprechen, sodass deutlich wird, wann Scans auf differierenden Höhenniveaus aufgenommen werden sollten.

Die Auflösung der Punktwolke wurde lediglich in zwei (von mehr als 260) Projekten als ausbaufähig empfunden. In beiden Fällen bemängelten Nutzer, dass der visuelle Eindruck in der Punktwolke nicht hinreichend massiv sei. Die eingesetzte Hardware erlaubt zahlreiche weitere Stufen zur Erhöhung der Auflösung der 3D-Scans. Eine feinere Auflösung resultiert in einem höheren Zeitbedarf für den einzelnen Scan, was bei der Terminierung ins Kalkül zu ziehen ist.

7.2.2 Aufnahme der 3D-Scans

In weltweiten Projekten an Produktionsstandorten in China, USA, Thailand, Malaysia, Indien, Südafrika, Großbritannien, Österreich und Deutschland wurde die innovative Methode eingesetzt. Es wurden jeweils Teile dieser Produktionssysteme mithilfe von Laserscannern mit Fotofunktion 3D-digitalisiert. Im überwiegenden Falle kamen Mitarbeiter aus der lokalen Produktion zum Einsatz. Die 3D-Digitalisierung wurde bewusst in circa 90 Prozent aller Projekte von ortsansässigem Personal durchgeführt, um Abstimmungsaufwände und Reisekosten zu minimieren. Es wurden Schulungsunterlagen ausgearbeitet, auf Basis derer neue Mitarbeiter, die bislang keinen Kontakt mit der Materie hatten, zügig angelernt werden. Die praktischen Projekte zeigen, dass eine Einarbeitung von maximal einer Stunde solche Fachfremden in die Lage versetzt, die 3D-Digitalisierung in der

Fertigung vorzunehmen. Die Anwendung der 3D-Digitalisierung bringt ergo zum Vorschein, dass keine Experten für die Bedienung der Hardware benötigt werden.

Die 3D-Digitalisierung nach diesem Vorgehen zeichnet sich durch ihre einfache Anwendbarkeit und Robustheit aus. Mit der eingeführten Methode kann eine Ebene einer Fabrikstruktur mit tausend Quadratmetern Grundfläche, die eine mittlere geometrische Kompliziertheit aufweist, in circa zweieinhalb Arbeitsstunden mit einem einzigen 3D-Scanner aufgenommen werden. Neben der Zeit für die Aufnahme des 3D-Scans wird ein Bruchteil einer Minute zur Positionierung des Scanners benötigt. Mithilfe dieser Geschwindigkeit aus der Praxis lässt sich der benötigte Zeitaufwand zur Aufnahme einer Fläche vor Ort abschätzen, wie Abbildung 7-2 zusammenfasst.

Geometrische Kompliziertheit	hoch	mittel	niedrig	sehr niedrig
Distanz benachbarter Scanpunkte (je in x- und y-Richtung) [m]	5	7	10	14
Geschätzter Zeitbedarf pro 1000 m ² [h]	4,7	2,3	1,2	0,6

Abbildung 7-2: Abschätzung des Brutto-Zeitbedarfs zum 3D-Scanning in Abhängigkeit der geometrischen Kompliziertheit der Struktur

Mit den ausgewählten Einstellungen (siehe 6.3.1) benötigt der eingesetzte 3D-Scanner circa sechseinhalb Minuten für eine Aufnahme. Die Praxis zeigt, dass es sich empfiehlt, knapp eine halbe Minute für das Versetzen des Scanners einzuplanen. Die einstimmige Rückmeldung der Operatoren ergibt, dass die Wartezeit während der Aufnahmen als unangenehm empfunden wird. Die Parallelisierung durch die simultane Nutzung mehrerer 3D-Scanner beschleunigt den Prozess und erlaubt eine Reduktion des Netto-Zeitbedarfs in der Fabrik. Sie wird favorisiert, da sich so Zeit einsparen und eine höhere Nutzerzufriedenheit erzielen lässt. Die Terminfindung gestaltet sich an Standorten mit hoher Produktionsauslastung schwierig. Derartige Produktionssysteme stellen trotz der Möglichkeit zur Parallelisierung eine Herausforderung für das Verfahren zur 3D-Digitalisierung dar, da sich nur selten Zeitfenster ergeben, während derer die Fertigung in Gänze stillsteht.

7.2.3 Postprocessing

Bereits parallel zu den Aufnahmen vor Ort beginnt mit dem Entpacken der gescannten Daten der erste Schritt des Postprocessings. In praktischen Projekten zeigt sich, dass das Postprocessing durch die eingeführte Methode von zwei Effekten entscheidend profitiert. Einerseits lassen sich durch die Zuordnung der einzelnen Punktwolken zu Positionen im Layout Suchaufwände zwecks der Registrierung vollständig eliminieren. Für die Registrierung reicht eine nicht maßstäbliche Skizze aus, die lediglich die Nachbarschaftslage der einzelnen Punktwolken zueinander wiedergibt. Andererseits beschleunigt die ideale Terminierung der Scanaufnahmen das Postprocessing. Sofern sich keine Personen in den Punktwolken befinden, entfällt der Schritt der datenschutzgerechten Zensur, was eine deutliche Zeitersparnis mit sich bringt. In diesem Falle erfolgt lediglich eine Durchsicht der Punktwolke, aber keine Modifikation.

In der Praxis erweist sich der Zeitaufwand für das gesamte Postprocessing als circa halb so hoch wie für die Aufnahmen vor Ort (brutto), sofern der Bereich frei von Personen ist und die Positionen aller Scans dokumentiert sind. Eine Steigerung der Geschwindigkeit des Postprocessings scheint für große Projekte mit mehreren hundert Aufnahmen interessant. Da das Postprocessing allerdings den Produktionsbetrieb selbst nicht tangiert, ist einer Steigerung der Geschwindigkeit der Scans vor Ort ungleich höhere Bedeutung beizumessen.

In sämtlichen praktischen Umsetzungen im Zuge der Arbeit erzielt die Registrierung anhand von Ebenen eine sehr hohe Präzision der gesamten Punktwolke. Die statistischen Auswertungen zeigen, dass die absolute Toleranz im Bereich von zwei Millimetern liegt. Die Genauigkeit erreicht damit das Präzisionsfenster, das die eingesetzten 3D-Scanner liefern. Hervorzuheben ist die Fehleranfälligkeit der Vergleichsmessung durch einen Winkelversatz des separaten Messgeräts und aufgrund von Veränderungen in der realen Produktionsumgebung. Für sämtliche durchgeführten Planungsprojekte war dieser Grad der Genauigkeit ausreichend. Dennoch existieren Planungsfälle, die eine um eine Größenordnung höhere Präzision erfordern. Experten bestätigen, dass die Einmessung von Automatisierungstechnik-Komponenten, wie beispielsweise Industrierobotern, eine Präzision der Messung von Zehntelmillimetern erfordert. Diese Aufgabe ist mit dem aktuellen Stand der Hardware nicht über eine 3D-Digitalisierung darstellbar. Eine weitere Steigerung der Präzision ist

also anzustreben. Hier ist zunächst eine höhere Genauigkeit der Laserscanner umzusetzen und konsekutiv die Gesamtgenauigkeit nach dem Postprocessing zu evaluieren.

Die Praxis zeigt, dass das beschriebene Vorgehen die Aktualisierung eines Teilbereichs zu einem späteren Zeitpunkt zulässt. Aufgrund der Eingrenzung des Bereichs, der 3D-digitalisiert wird, fällt der Aufwand für die Aufnahmen entsprechend geringer aus. Der korrespondierende Zuschnitt der vorhandenen und der neuen Punktwolke stellt die Konsistenz des Modells sicher.

7.2.4 Digitaler Besuch der Produktion

Die via 3D-Digitalisierung gewonnene Punktwolke stellt ein umfassendes Abbild eines Produktionssystems dar. Aufgrund der automatisierten Digitalisierung werden zum einen keine im Planungsprozess relevanten Maße übersehen. Zum anderen bewährt sich die hohe Genauigkeit je einzelne Messung, was sich schließlich in einer insgesamt hohen Präzision der Punktwolke niederschlägt. Die 3D-Digitalisierung erweist sich dahingehend als vorteilhaft, dass sie über die einmalige Aufnahme sämtliche Objekte digitalisiert, die einsehbar sind. Dies erfolgt unabhängig davon, in welchen organisatorischen Zuständigkeitsbereich das jeweilige Objekt fällt. Auf diese Weise lassen sich mehrfache Vermessungen desselben Fertigungsabschnitts durch Planer mit unterschiedlichem fachlichem Hintergrund vermeiden. Gegenüber manuellen Messungen wird das Fehlerpotenzial minimiert, da Fehler durch Ablesen oder mangelhafte Notizen ausgeschlossen sind.

Als besonders wertvoll erweist sich die Farbinformation in Punktwolken. In den Anwendungsfällen der vorliegenden Arbeit bestätigen alle Nutzer den Mehrwert der Farbinformationen. Die Punktwolke eines Produktionssystems wird dadurch selbst für Personen, deren Fachgebiet abseits der Planung liegt, intuitiv verständlich. Aufgrund der typischerweise einheitlichen Farbgebung in der Fertigung, die sich in der Punktwolke wiederfindet, fällt die Interpretation von Inhalten und beispielsweise Arbeitsplätzen leicht. Konzepte können somit einfach kommuniziert und diskutiert werden. Neben den an der Planung beteiligten Experten profitieren vor allem Fachfremde als auch das Management von der Möglichkeit, einen Ausschnitt eines Produktionssystems in Form eines derart realistischen Modells zu besuchen. Gegenüber Fotos oder Videos von der Produktionsumgebung bieten Punktwolken den Vorteil, dass Betrachter digital frei hindurch navigieren und jeden erdenklichen Standort einnehmen können.

Der digitale Besuch der Produktion kann zu Kosteneinsparungen in der Planung beitragen. Nutzer erreichen die Ausschnitte von Produktionssystemen, die bereits 3D-digitalisiert wurden, gänzlich ohne Wegzeit. Die präzise Abbildung der Geometrien erlaubt die Kalkulation von Maßen im digitalen Raum. Zusätzlich sind in der Punktwolke viele Stellen digital leichter als in der Realität zugänglich. Außerdem lassen sich die Maße automatisch projizieren. Anzumerken ist, dass der 3D-Scanner Gegenstände nicht durchleuchtet und somit deren äußere Kontur aufzunehmen vermag. Nur dort, wo sich im digitalen Modell ein Messpunkt findet, kann eine direkte Messung erfolgen. Dabei manifestiert sich der Nutzen der Punktwolke als Abbild der Realität in einer Kosteneinsparung, wenn Reisen entfallen. Selbst falls die Planungsabteilung in der Nähe zur Produktion angesiedelt ist, fallen in großräumigen Fabriken Wegzeiten an, beispielsweise um vor Ort Maße zu nehmen. In der Punktwolke hingegen kann der Planer ohne Zeitverlust an einen beliebigen Punkt in der Fertigung springen. Dennoch zielt diese Abhandlung nicht darauf ab, den Besuch der realen Produktion zu eliminieren. Insbesondere Unternehmen mit weltweit verteilten Produktionsstätten profitieren von der 3D-Digitalisierung, da ein digitaler Besuch der Produktion die direkte Gegenüberstellung von Lösungen an entfernten Standorten ermöglicht. Die 3D-Digitalisierung befähigt ein Planungsteam überhaupt zum Vergleich von Produktionskonzepten, die an internationalen Standorten realisiert sind. Die Modellierung all dieser Stationen gestaltete sich zu aufwendig und ist daher praktisch ausgeschlossen. Zudem können die Planungsvertreter aus Zeit- und Kostengründen nicht alle Standorte bereisen. Eine Dokumentation in Form beschrifteter Fotos und Skizzen reicht nicht aus, um sämtliche relevanten Details wie Anlagenanordnung, Fördertechnik, Robotik, Handlingsgeräte etc. in der benötigten Tiefe und Genauigkeit zu analysieren.

Die 3D-Digitalisierung hat sich in praktischen Planungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit als nützlich erwiesen, um Good Practices dreidimensional zu konservieren. Insbesondere für fertigungstechnische Konzepte, welche am Shopfloor entwickelt oder optimiert werden, ohne dass dies im Sinne einer Top-down-Konstruktion geschieht, kommt die 3D-Digitalisierung zum Einsatz. Exemplarisch werden im Folgenden drei Anwendungsfälle bewertet.

In einem Projekt zur Verbesserung von Logistik-Umschlagstationen, die eine wichtige Komponente in der internationalen Teileversorgung darstellen, wurde die 3D-Digitalisierung appliziert. Sobald

das Referenzdesign für den Supermarkt, hier aus Rohrsteck-Regalen, aufgebaut und optimiert war, erfolgte die 3D-Digitalisierung zur Dokumentation, wie Abbildung 7-3 veranschaulicht.

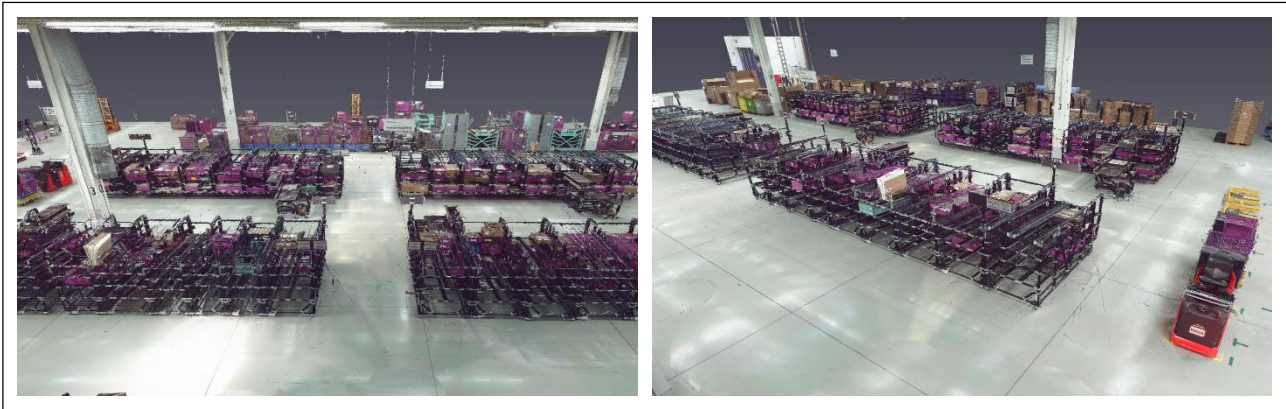


Abbildung 7-3: Referenzkonzept für einen Logistikbereich (selber Bereich aus zwei Perspektiven)

Zum einen steht somit ein aktuelles Modell für weitere Planungen zur Verfügung, zum anderen bietet die Punktwolke quasi die inhärente Bauanleitung, um dieses Referenzdesign an weiteren Standorten zu implementieren, da sie sämtliche Maße enthält. Auf Grundlage dieser Punktwolke, die die ausgereifte Lösung an einem deutschen Standort repräsentiert, erfolgte der Roll-out an weiteren Standorten in Nordamerika und Asien.

In ähnlicher Weise wurden Trainingsarbeitsplätze 3D-digitalisiert, die weder konstruiert noch in sonstiger Form dokumentiert waren. In dieser Anwendung wurden bestehende Konzepte, welche von internen Auditoren für sehr gut befunden wurden, auf Basis der Punktwolke an internationalen Standorten repliziert (siehe Abbildung 7-4).

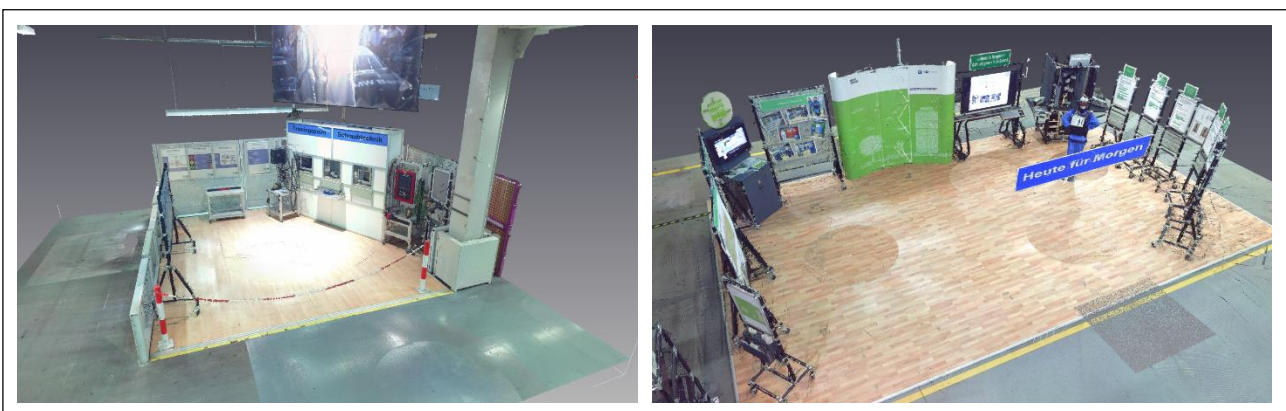


Abbildung 7-4: Trainingsplätze als Blaupause für Standorte weltweit

Sämtliche neuen Trainingsbereiche, an denen Mitarbeiter qualifiziert und eingearbeitet werden, wurden nach diesem Best-Practice-Vorbild aufgebaut. Konkret wurden die Trainingsplätze nach deutschem Vorbild an nord- und südamerikanischen Standorten ausgerollt.

Die 3D-Digitalisierung zeigt sich in der Praxis in Symbiose zu etablierten Methoden der Prozessverbesserung, insbesondere der Kartonagensimulation. In praktischen Umsetzungen wurden Lösungen, die in Cardboard-Engineering-Workshops erarbeitet wurden, via 3D-Digitalisierung konserviert. Unmittelbar im Anschluss an die digitale Dokumentation kann die Workshop-Fläche freigegeben und für sonstige Aktivitäten genutzt werden. Die gefundenen Lösungen müssen nicht als Hardware-Aufbau erhalten oder eingelagert werden, um die Ergebnisse zu einem späteren Zeitpunkt begutachten zu können. Planer können außerdem für weltweite Projekte auf den bestehenden Fundus an digitalisierten Lösungen für einen bestimmten Fertigungsinhalt zugreifen. Dabei fällt kein Modellierungsaufwand an, die Dokumentation via 3D-Digitalisierung nimmt kurze Zeit in Anspruch. Ein Bereich von circa 50 Quadratmetern Grundfläche lässt sich beispielsweise binnen weniger als einer halben Stunde vor Ort aufnehmen.

Zur Dokumentation von implementierten Lösungen trägt die 3D-Digitalisierung mit folgenden Vorteilen bei:

- Robustheit und Vollständigkeit der automatischen Vermessung
- Echtzeit-Vergleich von Konzepten, die sich an verschiedenen Lokationen weltweit befinden
- Einsparung von Reiseaufwänden und Wegezeiten
- Dokumentation von Lösungen, die vor Ort entstanden sind respektive optimiert wurden, ohne Konstruktionsaufwand
- Implizite Bauanleitung für den Aufbau von Fertigungsmitteln
- Zugänglichkeit von Good Practices in der Bibliothek

7.2.5 Konzeptplanung

In der Planung wird die Punktwolke zerlegt und modifiziert. Die Konzepte zur Gestaltung des Produktionssystems werden aus einzelnen Modulen aufgebaut. Der folgende Abschnitt arbeitet den Nutzen der eingeführten Methode für die konzeptionelle Planung heraus.

Zur Aufteilung der Punktwolke in Module verschiedener Granularität empfiehlt sich das eingeführte Vorgehen vom Groben ins Feine. Zunächst erfolgt die Separation statisch fixierter von mobilen Objekten, bevor obsoletere Teile aus der Punktwolke herausgelöst werden. Die vorliegende Punktwolke wird sodann in einzelne Module untergliedert, die dem Granularitätsgrad der aktuellen Planungsaufgabe entsprechen. Dieser Schritt fällt einmalig je Punktwolke an, er schafft die Grundlage für die folgenden Planungsschritte. Die praktischen Planungsprojekte im Zuge dieser Arbeit zeigen, dass sinnvollerweise Experten – Key User – diese Aufteilung der Gesamtpunktwolke leisten, um Zeit zu sparen. Die Planer, die sich mit dem Konzept für das Produktionssystem beschäftigen, können sich auf die kreative Arbeit der Gestaltung von Konzepten fokussieren. Abhängig von der Granularitätsstufe der Planung und von der Anzahl der Objekte in der gescannten Szene nimmt dieser Prozess eine Zeit von circa 10 bis 50 Prozent der Brutto-Scanzeit in Anspruch. In der Praxis bewährt es sich, diesen Prozess für besonders große Planungsprojekte bei hoher Dringlichkeit zu parallelisieren. Dazu bearbeiten mehrere Spezialisten Teilbereiche der gesamten Punktwolke. Im Zuge dieser Modifikation der Punktwolke wird die Bibliothek gegebenenfalls um neue Elemente erweitert. Die im Speicher abgelegten Module aus Punktwolken erleichtern und beschleunigen den gesamten Planungsprozess: Neue Konzepte werden durch die Kombination dieser Module generiert – ohne weiteren Aufwand für Zuschnitt oder Zerlegung. Aufgrund der verständlichen Darstellungsform kann zum Abschluss der Konzeptphase ein Entwurf von einer breiten Nutzergruppe selektiert werden, der im Weiteren ausgeplant wird.

Wenngleich Greenfield-Projekte derzeit an Bedeutung einbüßen (vgl. 3.1), bot sich in dieser Arbeit ein Projekt zur Planung einer neuen Montage auf bislang unbebautem Gebiet. Während der Konzeptphase wurde auch für dieses Greenfield der Weg der 3D-Digitalisierung beschritten. Um eine modulbasierte Planung durchzuführen, wurden entsprechende Sektoren bestehender Produktionssysteme 3D-digitalisiert. Die Selektion der Sektoren richtete sich dabei nach den Produkten, den Prozessen und der intern bewerteten Qualität des jeweiligen Bereichs. Basierend auf diesen 3D-digitalisierten Modulen wurden mehrere grobe Konzepte für das neue Werk erarbeitet. Für die Planung bedeutet dies aus mehrerer Hinsicht einen Mehrwert. Einerseits stand ab Beginn der Planung ein dreidimensionales Modell des gesamten Konzepts zur Verfügung. Dieses stellt gegenüber dem klassischen Planungsvorgehen, das in dieser Phase auf zweidimensionale Blocklayouts setzte, einen Gewinn an Aussagekraft und Detailtreue dar. Andererseits bescheinigten

die beteiligten Planer den frühen Konzepten eine hohe Reife, da bestehende Good Practices aus dem Produktionssystem aggregiert wurden. Für jedes Modul wurden die drei besten Lösungen aus dem Produktionsnetzwerk untersucht. Der frühe Planstand für das neue Produktionssystem profitiert somit von den Erfahrungen und Optimierungen anderer Standorte. Abschließend ist die einfache Kommunikationsmöglichkeit, die dieses realitätsnahe 3D-Modell ab der frühen Phase mit sich bringt, hervorzuheben.

Als Fazit zur konzeptionellen Arbeit mit Punktwolken sind die realistische Repräsentationsform und der Effizienzvorteil festzuhalten. Gegenüber konstruierten und damit idealisierten Modellen bietet die kolorierte Punktwolke die digitale Repräsentanz der realen Szene, wie sie tatsächlich vor Ort implementiert ist. Die Planer bestätigen in den praktischen Realisierungen den Zeitvorteil während der Konzeptplanung auf Basis der farbigen Punktwolke, da sich klassische Fragestellungen wie zum Beispiel der Platzbedarf von Konzepten zügig beantworten lassen. Zum einen ist kein iterativer Prozess der Datenaufnahme zur Ermittlung der geometrischen Grundlagen vonnöten, zum anderen entfällt die Modellierung der bestehenden Fertigungskomponenten.

7.2.6 Partizipative Detailplanung

Dieser Abschnitt widmet sich den Beteiligten an partizipativen Planungssitzungen und beleuchtet die qualitativen Vorteile, die daraus entstehen, dass die Punktwolke als holistisches Modell für die Detaillierung genutzt wird. Sofern die Aufnahmen vor Ort großzügig durchgeführt werden, umfasst die Punktwolke als gesamthaftes Geometriemodell sämtliche Aspekte eines Produktionssystems – unabhängig vom Zuständigkeitsbereich.

Die Workshops zur Detailplanung werden interdisziplinär mit Teams zwischen drei und acht Teilnehmern organisiert. In den Praxisprojekten im Zuge dieser Arbeit haben sich kleine Gruppen mit fünf oder weniger Teilnehmern als besonders effektiv erwiesen. In diesem Falle haben sich alle Beteiligten durchgehend engagiert und ihr Feedback direkt kundgetan. Durch die gemeinsame Gestaltung ergeben sich kurze Feedbackschleifen, wobei Planstände ganzheitlich plausibilisiert werden. Insbesondere die hybride Planung mit Punktwolken und CAD-Konstruktionen erlaubt die effiziente Absicherung von Konzepten. Trotz der interdisziplinären Zusammenarbeit bedarf es keiner Konvertierung von Modellen und keines Wechsels der Repräsentationsform.

Die folgenden Absätze geben ausführliche Einblicke in die Synergien, die aus diesem holistischen

Ansatz und dieser Integration der Disziplinen resultieren. Um eine optimale Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten, wird jeweils die Kooperation zweier Disziplinen vorgestellt.

Ein fertigungsgerechtes Produktkonzept wird durch eine Kollaboration zwischen Produktentwicklung und der Produktionsplanung erarbeitet. Hier kommt in Ergänzung zur Punktwolke des Produktionssystems möglichst früh ein hybrider Ansatz zur Anwendung, wobei die Fertigungsumgebung als Punktwolke, das Produkt als CAD-Konstruktion repräsentiert werden. In der Praxis wird deutlich, dass die Produktentwickler durch ein umfassendes, verständliches Abbild des Produktionssystems in die Lage versetzt werden, fertigungstechnische Restriktionen und Randbedingungen nachzuvollziehen. Diese Vorgehensweise vereinfacht also die Produktmitgestaltung. Mit fortschreitender Konkretisierung des Produkts werden Produktprototypen 3D-digitalisiert. Die Planung des Produktionssystems profitiert davon, wenn der reale Prototyp um Aspekte von fertigungstechnischer Relevanz ergänzt wird. In der Praxis kommt diese Facette insbesondere bei der präzisen Anpassung des Produktionssystems an das Produkt zum Tragen. Dazu findet eine Detailplanung auf Ebene eines Arbeitsplatzes oder einer Fertigungsstation statt. Effekte wie die Einsehbarkeit werden transparent, wobei sich Details wie die Positionierung von Lesegeräten oder Scannern auf Seite des Produktionssystems und die Anordnung von Barcodes, Aufklebern, Schildern oder Zetteln auf dem Produkt digital gestalten und präzise absichern lassen. Dieser Fall ist in Abbildung 7-5 anhand der Produktion von Hochvoltspeichern exemplifiziert.

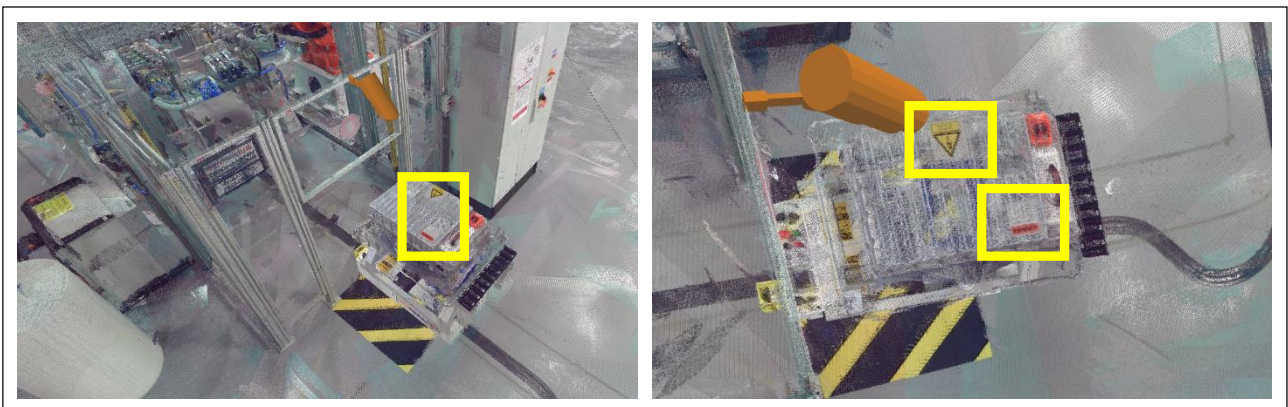


Abbildung 7-5: Positionierung von Lesegeräten und Aufklebern auf dem Produkt (stilisierte Darstellung zur Analyse von Detailfragen)

Gegenüber dem konventionellen Vorgehen, bei dem solche Detailfragen erst vor Ort untersucht werden, wenn das finale Produkt tatsächlich in die Fertigung eingebracht wird, werden diese Erkenntnisse deutlich früher im Produktentstehungsprozess gewonnen.

Planung von Gebäude und Produktion arbeiten durchgängig am selben Modell. Die Punktwolke substituiert in diesem Fall historische, zweidimensionale Etagenpläne. Einerseits liefert die 3D-Digitalisierung über mehrere Stockwerke hinweg eine Punktwolke inklusive der genauen Informationen entlang der z-Achse (vgl. Abbildung 6-21). Dies manifestiert sich in einem Präzisionsvorteil für die Gebäudeplanung, da einzelne 2D-Layouts, wie sie in der Vergangenheit verwendet wurden, einer präzisen Lokalisierung entlang der z-Achse entbehren. Andererseits repräsentiert die Punktwolke sowohl die Bau- als auch die Produktionssicht, sodass Effekte, die an dieser Schnittstelle auftreten, unmittelbar ersichtlich werden. Dies erweist sich vor allem bei der Integration großer Anlagen in die vorhandene Baustruktur sowie bei der Anordnung einzelner Arbeitsplätze innerhalb des Säulenrasters als vorteilhaft. Experten der Gebäude- und Produktionsplanung bestätigen diese Vorzüge der ganzheitlichen Repräsentationsform.

Die Bereitstellungsplanung verantwortet die Schnittstelle zwischen Fertigungsprozess und Logistik. Im partizipativen Planungsprozess interagieren Produktions-, Logistik- und Bereitstellungsplanung direkt, sie verwenden dasselbe Modell. Die sogenannte gelbe Linie [EGGERS 2017] in der Produktion, welche die Zuständigkeitsbereiche zwischen Montage beziehungsweise Fertigung und Logistik formal voneinander abgrenzt, wird virtuell durch die eingeführte Planungsmethode aufgehoben. Dadurch wird die Schaffung einer ganzheitlich optimalen Lösung unterstützt, wie Abbildung 7-6 anhand eines exemplarischen Planstands bebildert (linke Bildhälfte). Um die Facetten der Zusammenarbeit zu veranschaulichen, sind die Objekte nach Zuständigkeiten zusätzlich koloriert (gelb: Bau, rot: Montage, blau: Bereitstellung, grün: Lean-Experte, blaues CAD: Anlagenbauer, Fahrwege: Logistik). In der Praxis der Planung zeigt sich, dass die Kollaboration von Montage und Logistik durch diese einheitliche Datengrundlage gestärkt wird. An diesem Beispiel der Bereitstellungsplanung, die die Logistik in Form der Anlieferung und die Montage durch die Anordnung der Ressourcen an einem Arbeitsplatz tangiert, wird der Mehrwert der Punktwolke als einheitliches Modell für sämtliche Beteiligten besonders deutlich. Die Parteien setzen nicht länger auf unterschiedliche Tools und müssen nicht separat Informationen zum selben Sektor in der

Fertigung aufnehmen und diese immer wieder synchronisieren. Stattdessen arbeiten sie auf einer gemeinsamen Grundlage und in den Planungsworkshops finden die unterschiedlichen Sichtweisen gleichzeitig Berücksichtigung.

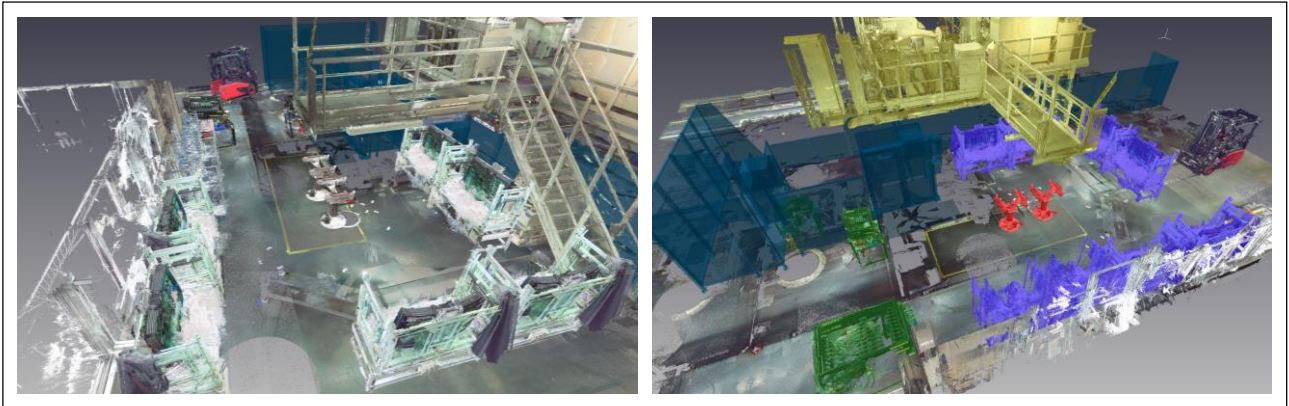


Abbildung 7-6: Partizipative Planung der Bereitstellung – Kooperation zwischen Anlagenbauer, Produktions-, Logistik-, Bereitstellungs- und Gebäudeplanung

Zur digitalen Integration neuer Fertigungsressourcen wird die hybride Planung angestellt. Sobald ein Entwurf der Anlage als CAD-Modell verfügbar ist, wird dieser digital in die Produktionsumgebung eingesetzt, wie in Abbildung 7-7 zu erkennen ist. Da sich in der Vergangenheit meist lediglich zweidimensionale Pläne des Produktionssystems fanden, war die Motivation, eine neue Anlage frühzeitig als 3D-Konstruktion zu liefern, gering, was Planer für vergangene Projekte bemängeln. Heutzutage erweisen sich CAD-Modelle von Produkten und Produktkomponenten als häufig verfügbar – im Gegensatz zu Konstruktionen von Produktionsressourcen wie Anlagen. Nun ist mit der 3D-Digitalisierung die Möglichkeit geboten, ein dreidimensionales Modell eines bestehenden Produktionssystems zu aggregieren.

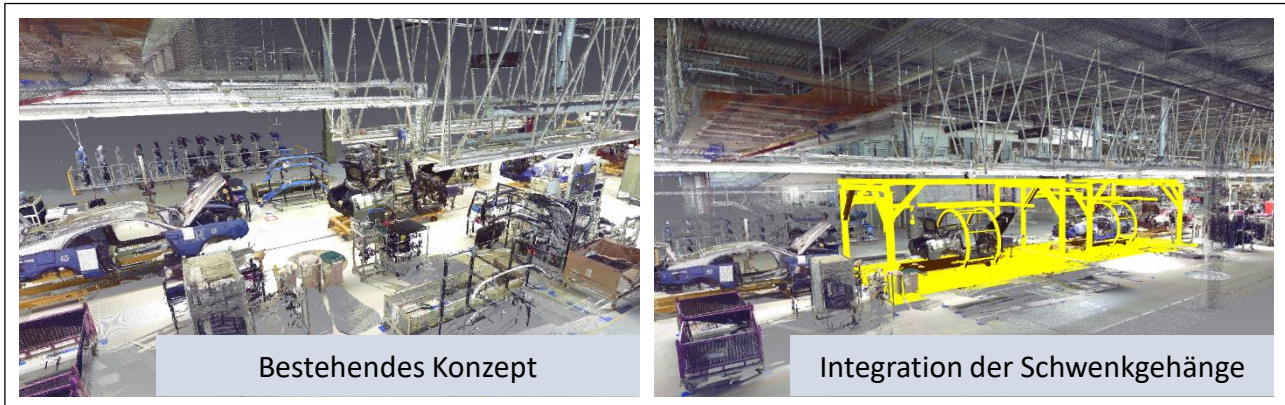


Abbildung 7-7: Hybride Planung– Integration zweier Stationen mit sogenannten Schwenkgehängen in das bestehende Produktionssystem

Die Praxis offenbart im Vergleich zu früheren Projekten, die auf 2D-Zeichnungen aufgesetzt haben, eine steigende Motivation der Anlagenbauer, das entsprechende Konstruktionsmodell pünktlich einzureichen, da die Fertigungsumgebung bereits in dreidimensionaler Form vorliegt.

Insbesondere beim Anlagenaufbau drohen späte Änderungen, wenn Kollisionen mit der bestehenden Gebäudestruktur oder mit Fertigungsressourcen erst vor Ort festgestellt werden. Während des Aufbaus einer neuen Anlage abseits des späteren Einsatzorts empfiehlt sich daher die iterative 3D-Digitalisierung derselben zur kontinuierlichen Absicherung der Integrationsfähigkeit. Dazu wird jeweils die Punktwolke der Anlage digital in die Punktwolke der Produktionsumgebung integriert. Sofern geometrische Unverträglichkeiten zum Vorschein kommen, können unmittelbar konstruktive Änderungen eingeleitet werden. Die Gefahr von späten Adaptionen der realen Anlage lässt sich deutlich reduzieren, wenn der reale Zustand im Aufbau präzise aufgenommen und digital in die Produktionsumgebung integriert wird. Diese Form der digitalen Absicherung offeriert eine höhere Qualität als die reine Betrachtung idealisierter 3D-Konstruktionen. Späte, kostenintensive Änderungen während der Anlageninstallation auf der Baustelle lassen sich somit vermeiden.

Die Partizipation des Betreibers des Produktionssystems wird dank der 3D-Digitalisierung erleichtert. Die direkten Produktionsmitarbeiter und das Management können ihre fertigungstechnische Erfahrung auf diese Weise in den Planungsprozess einbringen. Erst die Punktwolke ermöglicht diese ernsthafte Integration der Betreibersicht. Praktische Planungsfälle untermauern, dass die Punktwolke leicht interpretierbar ist und dadurch insbesondere Vorarbeiter und Meister an der Planung teilnehmen können, denen dieser Zugang ob der Komplexität der Modelle und Pläne

in der Vergangenheit mitunter verwehrt war. Abbildung 7-8 zeigt ein beispielhaftes Konzept, das von direkten Produktionsmitarbeitern und Prozessexperten erstellt worden ist.

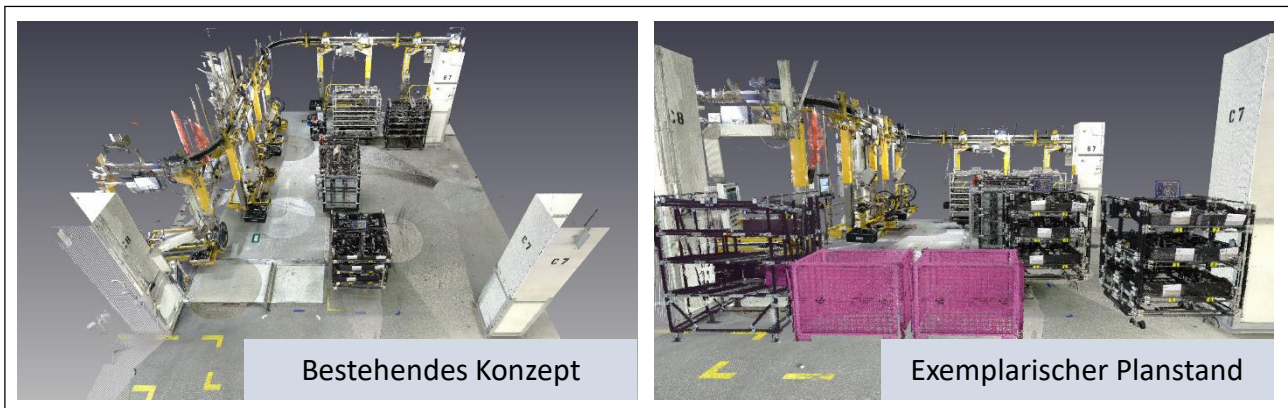


Abbildung 7-8: Planung in der Punktwolke (hier: Gestaltung von Arbeitsplätzen inklusive Umgebung)

Die Integration von Prozessspezialisten beziehungsweise von Experten für schlanke Fertigungslösungen erlaubt die digitale Kartonagensimulation. Dazu ist zum einen kein Hardware-Aufbau notwendig, zum anderen erfolgt die Optimierung eines Fertigungskonzepts früh während der digitalen Planung. Grundlegende Analysen wie die Aufnahme von Laufwegen lassen sich in der Punktwolke bereits durchführen. Einerseits werden dazu in der Punktwolke die einzelnen Stationen, entlang derer sich der Werker bewegt, festgelegt und mit Linien verbunden. Andererseits können charakteristische Punkte eines bestehenden Arbeitsplatzes bereits in der Realität markiert und somit im Zuge der 3D-Digitalisierung erfasst werden. In der praktischen Umsetzung fand die Planung auf Basis der 3D-Digitalisierung bei den Produktionsmitarbeitern derart Anklang, dass die Initiative zur 3D-Digitalisierung weiterer Produktionsbereiche von Meistern aus der Fertigung ausging.

Neben der statischen Betrachtung sind kinematische Untersuchungen für die Planung von Produktionssystemen relevant. Daher werden die Digitalisierung von Bahnkurven sowie die Simulation von Robotern im Kontext der 3D-Digitalisierung bewertet.

Im Zuge der Konzeption von Fördertechnik muss die Integrierbarkeit untersucht werden, Kollisionen sind auszuschließen. In Fließfertigungen wie der Automobilproduktion ist vor allem bei der Kurvenfahrt oder der Übergabe zwischen verschiedenen fördertechnischen Systemen die geometrische Realisierbarkeit abzusichern. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden dazu

Animationen erstellt, wobei jedem individuellen Objekt – Punktwolke oder CAD-Modell – ein Pfad aufgeprägt wird, wie Abbildung 7-9 zu entnehmen ist.

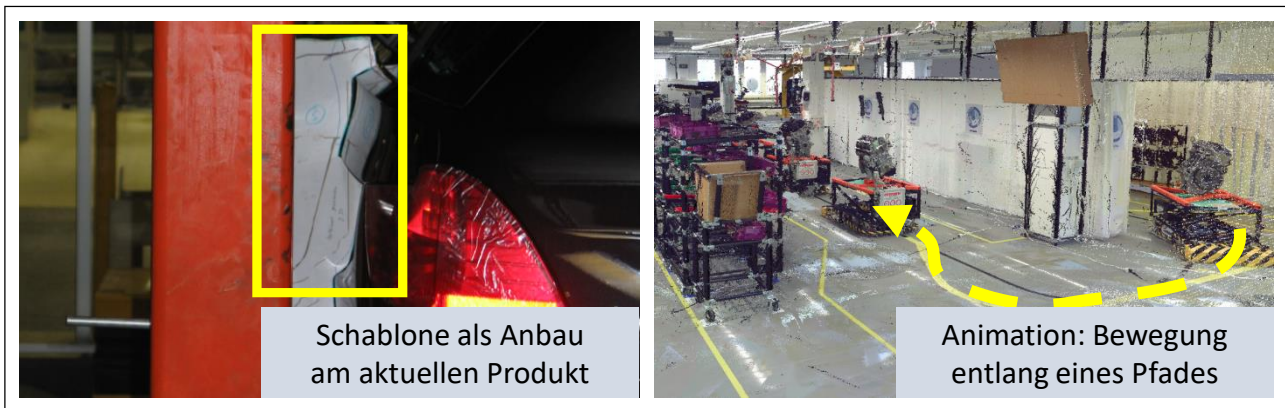


Abbildung 7-9: Klassischer Ansatz eines Störkantendurchlaufs mit Schablonen (links) gegenüber der Animation in der Punktwolke

In der Vergangenheit wurden Integrationen neuer Produkte durch Hardware-Aufbauten untersucht. Sogenannte Störkantendurchläufe setzen dazu auf Schablonen aus Kartonage oder Styropor, die beispielweise an ein aktuelles Produkt angebracht werden, um die Form eines neuen Produkts zu approximieren. Dieser modellhafte Aufbau wird durch die Produktion geschleust – begleitet von mehreren Experten, die sämtliche vermeintlichen Engstellen protokollieren. Gegenüber dieser etablierten Analyse von sogenannten Hüllkurven über den Störkantendurchlauf bietet der digitale Ansatz mehrere Vorteile. Zum einen wird der laufende Produktionsbetrieb durch eine digitale Untersuchung nicht beeinflusst. Dadurch, dass der Hardware-Aufbau entfallen kann, werden Störungen der Produktion, die zum Beispiel an Lichtschranken oder ähnlichen Einrichtungen durch andere Abmaße hervorgerufen werden, vermieden. Zusätzlich werden keine Kapazitäten der Spezialisten gebunden. Außerdem zeichnet sich der digitale Ansatz durch die Replizierbarkeit aus. Im Falle einer Änderung von Produkt oder Anlage lässt sich die Animation zügig aktualisieren.

Solche Animationen kamen zur Analyse von einfachen kinematischen Systemen zum Einsatz. In der Praxis wurden Gehängbahnen sowie die Integration neuer Produkte in Lastenaufzüge untersucht. Es zeigt sich, dass sich daraus eine grundlegende Aussage zur Realisierbarkeit ableiten lässt. Einer millimetergenauen Analyse der Kinematik steht allerdings die manuelle Definition des Pfades entgegen. Die Applikation von Sensorik ist vorstellbar, um die Trajektorie eines bestehenden

kinematischen Systems zu digitalisieren. Derzeit kommen hier etwa Lasertracking-Systeme oder Indoor-Lokalisationssysteme in Betracht.

Fertigungsressourcen mit komplexer Kinematik wie beispielsweise Industrieroboter oder aufwendige Handlingsgeräte werden mittels 3D-Kinematiksimulationen untersucht. Im Zuge dessen wird die 3D-Digitalisierung angewandt, um eine aktuelle Grundlage der bestehenden Produktionsumgebung zur Verfügung zu stellen. Es wird also der Ansatz der hybriden Simulation beschritten, wobei sämtliche Komponenten mit komplexer Kinematik als CAD-Modelle inklusive Kinematisierung eingesetzt werden. In praktischen Anwendungen wurde dieser hybride Weg eingeschlagen, um eine grundsätzliche Auswahl des Robotermodells zu treffen. Im Zentrum der kinematischen Analysen für Roboter standen dabei die Zugänglichkeit sowie die geometrische Verträglichkeit des Konzepts mit der Produktionsumgebung, dargestellt in Abbildung 7-10. Daneben ist eine solche Simulation imstande, zeitliche Bewertungen zur Konzeption von Prozessen zu liefern.

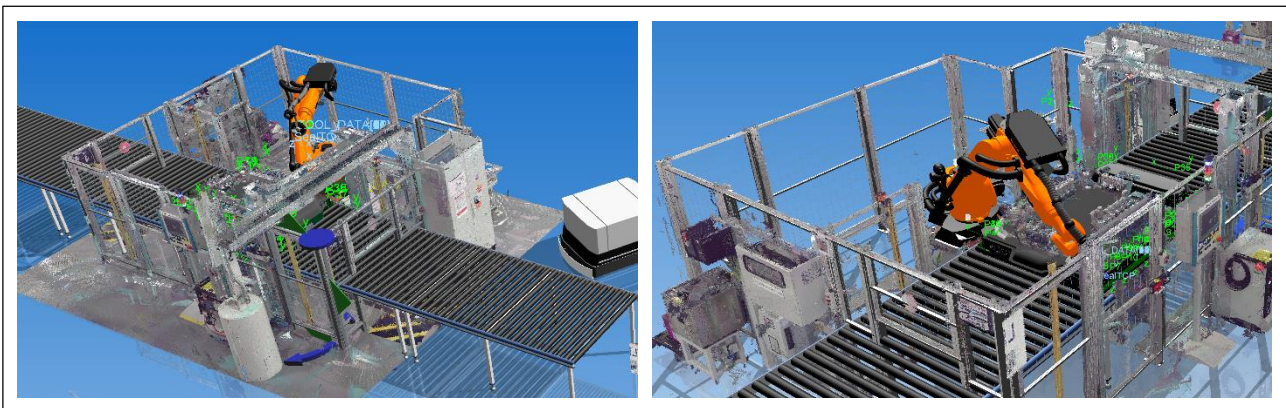


Abbildung 7-10: Hybride Simulation zur Untersuchung einer Robotik-Applikation

Die Offline-Programmierung von Industrierobotern lässt sich ob der Präzision derzeit verfügbarer 3D-Scanner nicht bis ins Detail darstellen – diese liegt eine Größenordnung zu grob (siehe 7.2.3).

Dieser Ansatz der hybriden Simulation hilft beispielsweise bei der Konzeption von Industrierobotern. Darüber hinaus kommt dem Menschen als Werker in Produktionssystemen eine entscheidende Rolle zu. Bestehende Werkzeuge zur 3D-Simulation bieten die Möglichkeit zur Untersuchung menschlicher Arbeit. Die Punktwolke kann hier als Abbild der Fertigungsumgebung genutzt werden. So lässt sich zum Beispiel die ergonomische Qualität von Arbeitsplätzen beurteilen. In realen Planungsprojekten unterstützt die Human-Simulation, ergänzt um die 3D-digitalisierte

Repräsentation der Umgebung, eine Bewertung der körperlichen Belastung und der Greifräume. Ferner erlaubt sie die Untersuchung der Einsehbarkeit von Bereichen. Dieser Ansatz ist auf Grundlage der Bibliothek für 3D-digitalisierte Produktionsressourcen auf neue Produktionskonzepte übertragbar. Die 3D-Digitalisierung erlaubt den Einsatz eines digitalen Menschmodells in einer realistischen Umgebung. Hervorzuheben ist allerdings der hohe Aufwand zur digitalen Editierung menschlicher Bewegungen, der in zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten beschrieben ist [JEONG ET AL. 2010]. Neben dem Zeitaufwand zur Erstellung einer präzisen Human-Simulation ist ein erhebliches Maß an Expertise zur Bedienung derartiger Software-Werkzeuge erforderlich. Aufgrund der vergleichsweise geringen Anwenderfreundlichkeit dieser Systeme wird empfohlen, ergonomische Aspekte im beschriebenen VR-System zu betrachten (siehe 7.1). Dort gestaltet sich die Interaktion intuitiv und es wird kein spezielles Vorwissen zur Bedienung der Software verlangt.

7.3 Zusammenfassende Bewertung der 3D-Digitalisierung in der Planung

Abschließend gilt es, die Methode zur Planung auf Basis der 3D-Digitalisierung und das korrespondierende System hinsichtlich der initial formulierten Anforderungen (siehe 3.3) zu bewerten. Dieser Abschnitt der Reflexion befasst sich daher damit, zu welchem Grad diese Anforderungen erfüllt werden. Einen Überblick gibt Abbildung 7-11.

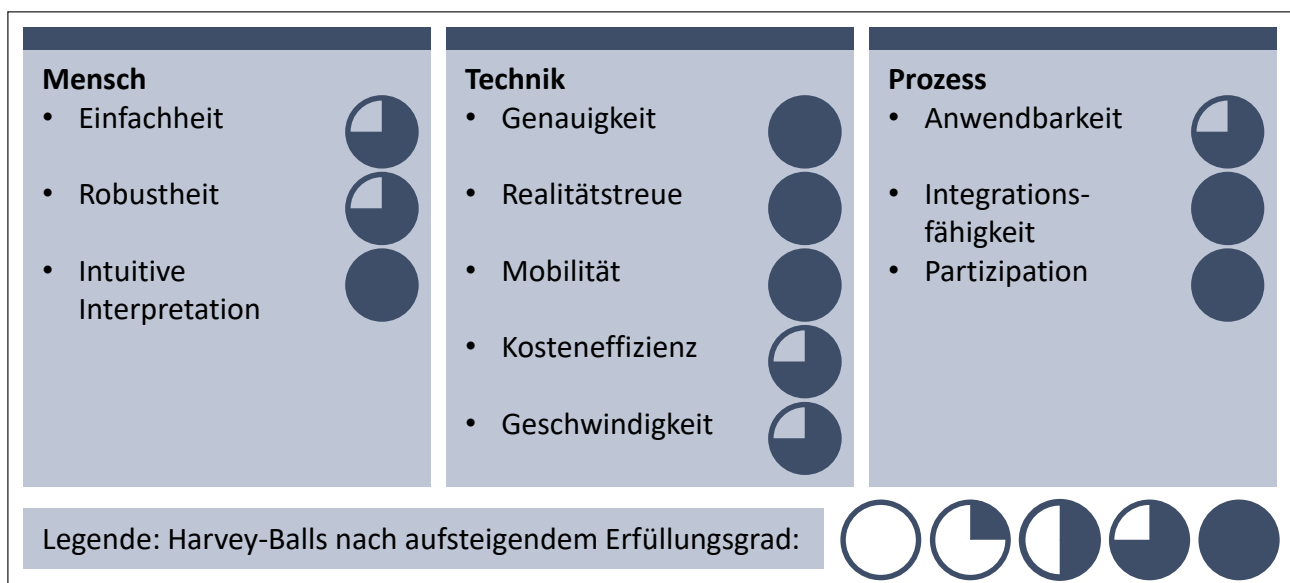


Abbildung 7-11: Bewertung, zu welchem Grad die an die Methode gestellten Anforderungen erfüllt werden

7.3.1 Mensch

Einfachheit

Die Durchführung der 3D-Digitalisierung ist von hoher Einfachheit gekennzeichnet. Im Rahmen der Arbeit wurde ein gut vierminütiges Video in deutscher und in englischer Sprache erstellt, anhand dessen neue Operatoren angelernt werden. An deutschen wie an internationalen Standorten hat sich die Einarbeitung als entsprechend schnell erwiesen. Ein gewisses Maß an Routine ist für die Modifikation der Punktwolken während der Planung von Vorteil, um den Planungsprozess zu beschleunigen. Hier bewährt sich das Key-User-Konzept.

Robustheit

Gegenüber unterschiedlichen Beleuchtungssituationen ist die Hardware empfindlich. Hell beleuchtete Bereiche führen zu einer Überbelichtung im Farbfoto und resultieren in weiß eingefärbten Bereichen in der Punktwolke. Diesem Effekt kann mit HDR-Fotoaufnahmen entgegengesteuert werden. Ob des Zeitbedarfs und der wenig realistischen Einfärbung der Punktwolke ist allerdings von HDR-Aufnahmen abzuraten. Die Szene, die 3D-digitalisiert wird, sollte ergo gleichmäßig beleuchtet sein. Der Einsatz einer starken Lichtquelle direkt unterhalb des Scanners bei Dunkelheit hat sich als nicht tauglich erweisen. Die Objekte in unmittelbarer Nähe der Lichtquelle sind in diesem Falle überbelichtet.

Intuitive Interpretation

In sämtlichen praktischen Projekten haben sich alle Anwender unmittelbar in der Punktwolke zurechtgefunden. Die integrierten Farbinformationen vermitteln einen realistischen Eindruck und erleichtern die Interpretation des digitalen Abbilds. Die Navigation in der Punktwolke wurde von keinem Nutzer bemängelt. Planungsmitarbeiter, die im Umgang mit klassischen Tools geübt sind, sowie Anwender, die mit digitalen Umgebungen aus dem Unterhaltungsbereich vertraut sind, bewerten sie als bedienerfreundlich. Die interdisziplinäre Planung wird vor allem dadurch ermöglicht, dass die Punktwolke als dreidimensionales Modell kein besonderes räumliches Vorstellungsvermögen verlangt, wie es 2D-Layouts und Schnitte erfordern.

7.3.2 Technik

Genauigkeit

Das geforderte Toleranzfenster von Millimetern wird bei sämtlichen Projekten eingehalten: In allen Punktwolken, die mittels Referenzmessungen überprüft wurden, wurde eine mittlere Abweichung von maximal drei Millimetern gegenüber diesen Messungen erzielt. Damit ergibt sich ein breites Nutzungsspektrum der entworfenen Methode zur 3D-Digitalisierung für die Planung. Die vollständige Offline-Simulation von Industrierobotern wird derzeit nicht empfohlen.

Realitätstreue

Die 3D-Digitalisierung liefert ein ganzheitliches Modell der Umgebung. Die Realitätstreue ist dank der aufgenommenen Farbfotos sehr hoch. Die resultierende Punktwolke gibt die reale Situation der Fertigung ohne Abstraktion, Idealisierung oder Verkürzung wieder. Bei einer entsprechenden Anzahl an Scans ergibt sich ein umfassendes Abbild, sodass sämtliche planenden Parteien die Punktwolke einsetzen können – sie repräsentiert also bewusst nicht nur eine spezielle fachliche Sicht auf ein Produktionssystem. Zu bedenken ist, dass die jeweilige Hülle von Objekten, nicht aber der Innenraum, digitalisiert wird, was für Planungen im Allgemeinen ausreicht. Die statische Aufnahme via 3D-Digitalisierung ist präzise; es sollten Verfahren untersucht werden, die Bahnkurven von Fördertechnik-Anlagen in einer vergleichbaren Genauigkeit digitalisieren können. Im Besonderen ist zu untersuchen, welche Instrumente imstande sind, die Position und die Orientierung von Objekten bei nichtlinearen Bewegungen zu erfassen.

Mobilität

Der Einsatz stationärer Laserscanner erfüllt die Mobilitätsanforderung – die Hardware wartet mit relativ geringem Gewicht auf und ist transportabel. Somit ist die 3D-Digitalisierung an nahezu jedem Standort weltweit möglich. In einem Fahrzeug lassen sich problemlos mehrere Systeme transportieren. Auf Flugreisen konnte der Scanner als Handgepäck mitgeführt werden. Darüber hinaus sind die beschriebenen stationären Scanner kinematischen Systemen in der Anwendung überlegen. Durch die kompakte Bauform ist es möglich, Bereiche zu digitalisieren, die sich aufgrund der Platzverhältnisse ansonsten einer Aufnahme verschließen würden.

Kosteneffizienz

Die Anschaffung eines Scansystems lohnt sich aufgrund der initialen Investitionskosten dann, wenn es stark frequentiert wird. Die höchsten Kosten für die Aufnahmen vor Ort sind in diesem Falle Lohnkosten für das Bedienpersonal. Insbesondere, wenn die Arbeiten nachts, an Wochenenden oder Feiertagen, während derer die Produktion für mehrere Stunden oder Tage steht, durchgeführt werden, sind entsprechende Zuschläge zu den Lohnkosten zu berücksichtigen. Um die spezifischen Operatorkosten pro 3D-digitalisiertem Quadratmeter zu verringern, empfiehlt sich die parallele Arbeit mit mehreren Geräten.

Insgesamt erweist sich die eingeführte Methode zur 3D-Digitalisierung als sehr kosteneffizient. Einerseits entfallen mehrfache Vermessungen durch verschiedene Parteien sowie die manuelle Nachmodellierung. Zugleich ist die automatisierte Digitalisierung um Größenordnungen schneller als eine Aufnahme der Produktionsstruktur von Hand. Ein derart vollständiges Abbild wie durch die 3D-Digitalisierung ließe sich händisch für einen Fertigungsabschnitt nicht erstellen. Andererseits eliminiert die automatisierte Vermessung die Gefahr manueller Messfehler.

Die realistische, dreidimensionale Repräsentation erlaubt die Einsparung von Reisekosten, vor allem für Unternehmen mit zentraler Planung und weltweit verteilten Produktionsstandorten. Zu weiteren Kosteneinsparungen trägt die innovative Methode dadurch bei, dass geometrische Interferenzen, die den Aufbau von Anlagen in der Fabrik respektive deren Inbetriebnahme verzögerten, frühzeitig in der Planung eliminiert werden können. So lassen sich späte Änderungen auf der Baustelle und damit verbundene Änderungskosten und Verzögerungen reduzieren.

Geschwindigkeit

Gegenüber klassischen Formen des terrestrischen Laserscannings gewinnt die vorgestellte Methode zur 3D-Digitalisierung signifikant an Geschwindigkeit, da explizit auf die Installation von Markern oder sonstigen Hilfsmitteln verzichtet wird. Damit einher geht der Vorteil, dass die bestehende Fertigungsstruktur durch die 3D-Digitalisierung nicht verändert wird, da keine Messbolzen oder Ähnliches installiert werden.

Für stark ausgelastete Produktionssysteme gestaltet sich die Terminierung zur 3D-Digitalisierung eines großflächigen Bereichs von mehreren tausend Quadratmetern dennoch schwierig, da sich hinreichend große Produktionsunterbrechungen in der Regel nur mit langfristigem Planungs-

horizont finden. Durch den parallelen Einsatz mehrerer Scanner lässt sich der Netto-Zeitbedarf reduzieren, was sich allerdings in höheren Hardwarekosten widerspiegelt.

Die weiteren Schritte Postprocessing und Zerteilung der resultierenden Punktwolke gestalten sich zeiteffizient. Da sie abseits der laufenden Produktion stattfinden, sollte der Fokus weiterer Optimierungen primär auf die Hardware zur 3D-Digitalisierung gerichtet werden. Hier ist weitere Forschung vonnöten, um die Scanner derart zu beschleunigen, dass die Zeit je einzelne Aufnahme bei gleichbleibender oder gar höherer Auflösung deutlich reduziert werden kann.

7.3.3 Prozess

Anwendbarkeit

Insbesondere in Bereichen, die durch eine flexible Struktur mit wenigen Fixpunkten charakterisiert sind, bietet sich die 3D-Digitalisierung an, um ein aktuelles Grundlagenmodell für die Planung zu aggregieren. Die erreichte Präzision der Gesamtpunktwolke impliziert, dass die Methode für sämtliche Planungsprojekte bis zur Feinplanung anwendbar ist. Limits ergeben sich im Bereich der Simulation und Offline-Programmierung von Industrierobotern.

Die zahlreichen Anwendungen in Planungsprojekten mit Automobilbezug zeigen, dass eine Einsetzbarkeit in allen Gewerken grundsätzlich gewährleistet ist. Im Bereich der Lackiererei kann allerdings keine Digitalisierung der befüllten Tauchbecken vorgenommen werden. Restriktionen durch die Brechung des Laserstrahls in transluzenten Materialien und Flüssigkeiten sind zu beachten. Die Breite der Anwendungsfälle in dieser Arbeit zeigt darüber hinaus, dass sich die entworfene Methode in bestehenden Produktionssystemen applizieren lässt. Die beschriebenen Erkenntnisse lassen sich explizit auch auf Produktionssysteme außerhalb der Fahrzeugproduktion transferieren. Einerseits ist die Übertragbarkeit entlang der Wertschöpfungskette, das heißt auf Zulieferer, die ähnliche Produktionssysteme für vorgelagerte Wertschöpfungsschritte betreiben, offensichtlich. Andererseits zeigen die Anwendungsfälle aus Montage und Logistik zahlreiche Facetten, die sich typischerweise in manuell geprägten Fertigungssystemen mit hoher Flexibilität wiederfinden. Dabei erfolgt keine Einschränkung, was den Repetitionstyp oder den Anordnungstyp betrifft. Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass sich die 3D-Digitalisierung inklusive der eingeführten Planungsmethode für all diejenigen Produktionsbereiche empfiehlt, die eine präzise geometrische Planung erfordern oder die einem dauerhaften Wandel unterliegen. Darüber hinaus

ist das Verfahren für Einsatzfälle abseits der Produktion vorstellbar – hier ist etwa das Immobilien-gewerbe zu nennen.

Integrationsfähigkeit

Derzeit ist der Trend im Bereich von Gebäuden hin zu einer dreidimensionalen Planung, zu BIM, zu beobachten. Die 3D-Digitalisierung unterstützt diesen Transformationsprozess, 2D-Pläne und Layouts auf Etagen-Niveau abzulösen. Auf Basis der präzisen und aktuellen Punktwolke gestaltet sich der Planungsprozess durchgängig in drei Dimensionen.

Daneben werden bekannte Methoden zur kontinuierlichen Verbesserung der Produktion unterstützt und befähigt. Einerseits leistet die 3D-Digitalisierung eine geometrische Dokumentation von Good Practices, die anschließend an jedem weiteren Produktionsstandort repliziert werden können. Dabei erweist sich der Aufwand zur Aufnahme als minimal, da eine Modellierung oder Konstruktion in CAD vollständig entfällt. Andererseits fördert die 3D-Digitalisierung das Benchmarking: Auf Basis der Punktwolken von verschiedenen Fertigungsbereichen mit vergleichbarer produktionstechnischer Aufgabe kann eine Bewertung vorgenommen werden. Davon ausgehend können ein optimales Konzept oder mehrere Blaupausen erstellt werden, wobei gegebenenfalls weitere Informationen hinzugespielt werden. Etablierte Methoden zur schlanken Gestaltung der Produktion sind im digitalen Raum gleichfalls anwendbar. So ist es auf Basis der 3D-Digitalisierung möglich, eine digitale Kartonagensimulation durchzuführen. Dabei kann ein VR-System unterstützen, sodass sich zum Beispiel Detailfragen der Ergonomie realitätsnah und auf besonders einfache Weise klären lassen. Dadurch ergeben sich zusätzlich Vorteile hinsichtlich der Nachhaltigkeit, da Platz und Karton eingespart wird.

Partizipation

Die entworfene Methode zur Nutzung der 3D-Digitalisierung in der Planung ermöglicht die Beteiligung zahlreicher Parteien. Die Methode setzt explizit auf die interdisziplinäre Gestaltung von Konzepten. Es erweist sich als elementar, die Vielzahl unterschiedlicher Disziplinen bei der Erzeugung von Alternativen einzubinden. Mit dem realisierten VR-System ist ein Werkzeug geboten, um die Punktwolken einer breiten Masse an Nutzern zugänglich zu machen. Es unterstützt die Partizipation, da weder Fachexpertise zur Interpretation noch eine Modellierung notwendig sind.

7.3.4 IT-System

Das umgesetzte IT-System verfügt über die geforderten Komponenten (vgl. 3.4). Das Repository dient der Speicherung der grundlegenden Punktwolken und der einzelnen Konzepte, die im Rahmen der Planung erarbeitet werden. Die Nutzerverwaltung regelt die Zugriffsrechte auf die einzelnen Dateien, sodass der Informationsschutz realisiert werden kann. Die Komponente der browserbasierten Visualisierung lässt den digitalen Besuch der Produktion per Knopfdruck zu. Über die Schnittstelle erfolgt der Dateidownload, Punktwolken können zum Beispiel im VR-System genutzt werden. Die nichtfunktionalen Anforderungen aus Kapitel 3.4 wurden weitestgehend erfüllt, wie Abbildung 7-12 zeigt.

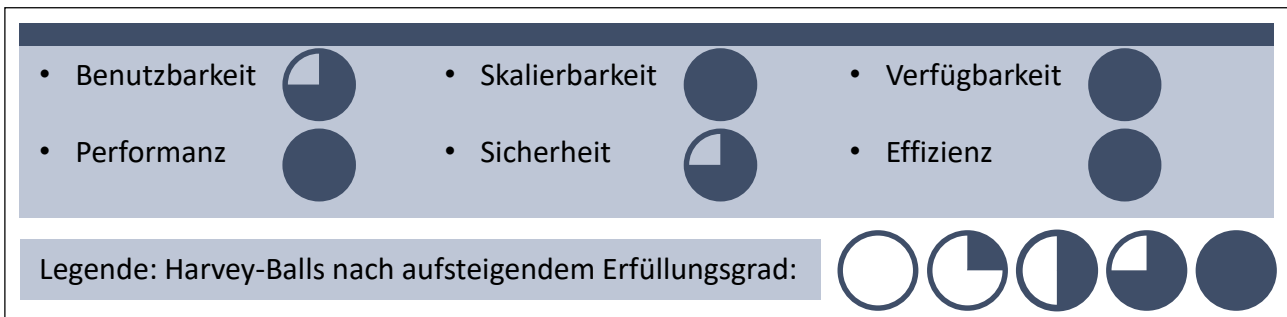


Abbildung 7-12: Bewertung, zu welchem Grad das IT-System die nichtfunktionalen Anforderungen erfüllt

Diese nichtfunktionalen Anforderungen werden im Folgenden zusammenfassend validiert.

Benutzbarkeit

Das System findet aufgrund seines einfachen Aufbaus und der geringen Hardware-Anforderungen bei Planern und vielen Nutzern darüber hinaus Anklang. In der Breite wird die browserbasierte Visualisierung von Punktwolken genutzt. Key User übernehmen das Postprocessing und die Modifikationen zur Konzept- und Detailplanung. Verbesserungsbedarf besteht bezüglich der Selektion von Ebenen und Kanten in der Punktwolke. Hier wurde vereinzelt eine Erweiterung gewünscht, sodass der Mauszeiger – ähnlich wie in CAD-Tools – automatisch ein Objekt fängt. Dementsprechend sind Entwicklungen anzustreben, um die Arbeit mit Punktwolken weiter zu erleichtern.

Performanz

Die Performanz der Visualisierung wurde als hoch bewertet. Lediglich die Download-Geschwindigkeit wurde von manchen Experten als zu gering empfunden. Einerseits bringen Punktwolken mitunter große Datenmengen mit sich, deren Transfer im Firmennetzwerk einige Zeit in Anspruch nimmt. Andererseits kam es in dringenden Projekten zu sporadischen Lastspitzen: Unmittelbar nach dem Upload einer neuen Punktwolke wollten besonders viele Nutzer gleichzeitig darauf zugreifen, was in einer geringen Download-Geschwindigkeit für jeden Einzelnen mündete. Aus Kostengründen wurde bis dato auf einen Ausbau des Netzwerks verzichtet.

Skalierbarkeit

Über die Laufzeit der Forschungsarbeit wurden große Datenmengen akkumuliert, weshalb der Speicher mehrmals erweitert wurde. Das entworfene System-Design lässt einen Ausbau zu. Bevor der Speicher vollständig belegt ist, kann das IT-System um weitere Festplatten ergänzt werden.

Sicherheit

Die Sicherheit der Daten auf dem Server ist durch die Definition individueller Zugriffsrechte gewährleistet. Nach einem Download könnte der Nutzer die Daten an unbefugte Dritte weiterleiten. Diese Gefahr besteht für sämtliche IT-Systeme, in denen Informationen lokal gespeichert werden können. Im Rechtekonzept spiegelt sich dies wider: Eine vergleichsweise breite Masse von Nutzern kann den überwiegenden Teil aller Punktwolken visualisieren. Lediglich ein kleiner Expertenkreis ist jedoch befugt, die Daten herunterzuladen und neue Planstände zu kreieren.

Verfügbarkeit

Über die gesamte Nutzungsdauer hinweg kam es zu keinem kritischen Ausfall. Die Datenverfügbarkeit war zu jeder Zeit gegeben.

Effizienz

Die Effizienz der Visualisierung ist sehr hoch, da keine separate Software erforderlich ist, um auf die Punktwolken zuzugreifen. Aufgrund der intuitiven Interpretation der Punktwolke und einer einfachen Navigation im Viewer via Tastatur sind keine Schulungsaufwände nötig.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die innovative Methode unterstützt die Planung von Produktionssystemen durch die 3D-Digitalisierung. Dieses finale inhaltliche Kapitel fasst die wesentlichen Erkenntnisse zusammen. Im Anschluss wird ein Ausblick gegeben, welche weitere Evolution seitens der Scanner-Hardware erstrebenswert scheint. Abschließend wird präsentiert, inwiefern eine Weiterentwicklung der Planungsmethode zu forcieren ist.

8.1 Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse

An die Stelle von Neubauten und Neuplanungen rücken Brownfield-Projekte, im Rahmen derer es neue Produkte und Produktionselemente in ein Produktionssystem zu integrieren gilt, wobei dort bereits weitere Produkte auf Kammlinien-Niveau gefertigt werden.

Die kontinuierliche Verbesserung führt zur Steigerung der Effizienz einer Produktionsstätte und resultiert in einer hohen Dynamik, mit der sich der Shopfloor verändert.

Die vorliegende Abhandlung zeigt, dass die 3D-Digitalisierung mittels Laserscannern und der integrierten Aufnahme von Farbfotos prädestiniert dafür ist, ein aktuelles Grundlagenmodell für die Planung von Produktionssystemen zu aggregieren. Dabei erreichen moderne stationäre 3D-Laserscanner die hohe Präzision, die für die Planung benötigt wird. Die in dieser Arbeit eingeführte Methode gestaltet die gesamte 3D-Digitalisierung besonders zeiteffizient. Im Gegensatz zu bekannten Praktiken, terrestrische Laserscans in Fabriken durchzuführen, werden keine Messbolzen, künstlichen Marker oder zusätzlichen Objekte im Produktionsbereich installiert. Nebenzeiten dafür entfallen und die Fertigung selbst wird im Rahmen der 3D-Digitalisierung nicht manipuliert. Zusätzlich werden mehrere 3D-Scanner simultan eingesetzt, um die Aufnahmen zu parallelisieren. Weitere Zeitvorteile werden dadurch erreicht, dass der Transfer der akquirierten Daten auf eine Recheneinheit und die Entpackung bereits vor Ort erfolgen. Trotz der erzielten Beschleunigung gegenüber konventionellen Verfahren des Laserscannings ist eine akribische Vorbereitung der 3D-Digitalisierung vonnöten, um die Aktionen in der Produktion zu terminieren. Mit dieser Arbeit wird dazu eine strukturierte Auswahlmethodik präsentiert, anhand derer sich der Zeitbedarf für die 3D-Digitalisierung eruiert lässt.

Die vorgeschlagene Methode zur 3D-Digitalisierung erweist sich als leicht anwendbar – sie wurde im Zuge dieser Arbeit weltweit appliziert. Dabei wird eine kurze Einarbeitungszeit für bisherige Laien von deutlich unter einer Stunde veranschlagt. Die automatisierte Aufnahme der Fertigung mittels 3D-Laserscanner erfordert ein Minimum an manuellen Operationen. Die eingesetzten 3D-Scanner weisen eine hohe Mobilität auf, insbesondere sind mithilfe stationärer Laserscanner wichtige Bereiche in Fabriken zugänglich. Das eingeführte Vorgehen stellt eine robuste Methode zur Digitalisierung bestehender Produktionsstrukturen dar. Details wie die Brechung des Laserstrahls an Glastüren und Scheiben sowie die Beleuchtungsempfindlichkeit sind zu beachten.

Das Postprocessing umfasst die Registrierung der einzelnen Punktwolken zueinander. Dieser Schritt resultiert in einer zusammenhängenden Punktwolke von hoher Präzision. Diese Arbeit zeigt, dass sich bereits existierende ebene Flächen anstelle von zusätzlichen Markern eignen, um die einzelnen Punktwolken zu fusionieren. Während dieser Art des Postprocessings gelingt es, die hohe Genauigkeit der automatisierten Vermessung via Laser zu erhalten.

Durch die realistische Einfärbung der Punktwolke kann auf jegliche Nachkonstruktion, wie sie in der Vergangenheit für einfarbige oder intensitätsbasierte Punktwolken quasi unabdingbar war, verzichtet werden. Dadurch gewinnt die Methode deutlich an Geschwindigkeit. Das Postprocessing selbst stellt einen effizienten Prozess dar. Die Punktwolke steht als ganzheitliches Abbild der Fertigung kurzfristig nach den Aufnahmen vor Ort zur Verfügung.

Für die Planung liegt mit der dreidimensionalen Punktwolke mit Farbinformation ein präzises und aktuelles Abbild der realen Produktionsstruktur vor. Auf Basis dieser Punktwolke ist der digitale Besuch sämtlicher 3D-digitalisierter Standorte respektive Fertigungsbereiche möglich. Die in dieser Arbeit beschriebene Methode schlägt die strukturierte Modifikation von farbigen Punktwolken vor, um diese für die Planung einzusetzen. Die Konzeptplanung setzt auf eine Zerteilung der gesamten Punktwolke, wobei obsoletere Elemente entfernt und mobile gegenüber fixierten Objekten separiert werden. Die Detailplanung findet schließlich in interdisziplinären Workshops statt. Die farbigen Punktwolken bringen eine einfache Interpretierbarkeit für sämtliche Teilnehmer mit sich, weshalb sie durchgängig von allen Parteien eingesetzt werden. Auf Grundlage der breiten Partizipation von Planern, Betreibern und Entscheidern werden durchgängig ganzheitliche Konzepte kreiert. Die einstimmige Rückmeldung der Nutzer aus der Praxis zeigt, dass die realistische dreidimensionale

Umgebung hilft, Effekte zu verstehen und potenzielle Insuffizienzen eines Konzepts frühzeitig aufzuzeigen.

Hervorzuheben ist die Integration klassischer Methoden der Schlanken Produktion. Die Punktwolke als dreidimensionale Planungsgrundlage verstärkt die Bestrebungen, Planung durchgängig in 3D zu gestalten. Etablierte Methoden wie die Dokumentation von Best Practices werden durch die 3D-Digitalisierung vereinfacht. Eine Kartonagensimulation kann früher als bislang stattfinden, da ein Hardwareaufbau nicht länger zwingend erforderlich ist. Das realisierte Virtual-Reality-System vermag, diese Detailplanung von Arbeitsplätzen, die Bewertung von Planständen und insbesondere die Analyse der Ergonomie zu unterstützen.

Zusammenfassend sind die folgenden Aspekte der Methode hervorzuheben: Dem Menschen, also jedem Anwender, kommt die intuitive Interpretierbarkeit der Punktwolken und die Einfachheit der 3D-Digitalisierung entgegen. Seitens der Technik kommen die Vorzüge der erarbeiteten Lösung vor allem hinsichtlich der Realitätstreue sowie der Genauigkeit zum Vorschein. Entscheidende Facette des Planungsprozesses ist die Partizipation.

Das entworfene IT-System unterstützt die Planungsmethode. Das Repositorium leistet die Verwaltung von Planständen und stellt die Konsistenz von Konzepten sicher. Die Visualisierung von Punktwolken der Produktion erfolgt browserbasiert. Dadurch werden zum einen minimale Anforderungen an den Client-Computer gestellt. Zum anderen erweist sich der browserbasierte Zugang als besonders komfortabel für die Anwender – sie müssen keinerlei Software installieren.

8.2 Ausblick

Aufgrund der angespannten Terminsituation in der Fertigung ist eine weitere Beschleunigung der 3D-Digitalisierung mit hoher Priorität anzustreben. Dazu ist die Weiterentwicklung aktueller Scanner-Hardware sinnvoll. Zudem eignen sich bestimmte Produktionssysteme unter Umständen für eine automatische 3D-Digitalisierung.

Daneben kann die Planung von einer präzisen Digitalisierung von Bahnkurven einzelner Produktionsressourcen mit Kinematik profitieren. Vorteilhaft für die Planung erscheint außerdem die Fortentwicklung des VR-Systems, sodass größere Punktwolken visualisiert werden können.

8.2.1 Systeme zur 3D-Digitalisierung von Strukturen

Die monetäre und zeitliche Effizienz der Hardware sind weiter zu steigern. Insbesondere aufgrund der immer engeren Zeitfenster für geplante Produktionsunterbrechungen ist eine höhere Geschwindigkeit der Aufnahme bei gleichbleibender Auflösung und Präzision anzustreben. Dazu ist zum einen die entsprechende Optimierung stationärer 3D-Laserscanner denkbar. Zum anderen kann die Weiterentwicklung kinematischer Systeme, sodass diese eine hohe Präzision liefern, dazu beitragen. Hier ist sicherzustellen, dass es nicht weiter zu signifikanten Drifts in den erfassten Daten kommt, sodass die Registrierung mehrerer Datensätze eine Punktwolke von insgesamt hoher Qualität liefern kann.

Für einzelne Planungsfälle ist eine Steigerung der Messgenauigkeit von Interesse. Eine Präzision der Systeme im Zehntelmillimeter-Bereich erlaubt eine minutiöse Überprüfung von installierten Anlagen. In diesem Falle sind Untersuchungen anzustellen, inwiefern sich eine Qualitätskontrolle von aufgebauten Maschinen und Anlagen mithilfe der 3D-Digitalisierung realisieren lässt. Konkret sollte für installierte Industrieroboter evaluiert werden, ob diese in entscheidenden Punkten mit den geplanten Installationspositionen übereinstimmen. Ferner ist dann ein Automatismus zu entwickeln, der die finalen Roboterprogramme auf Basis der 3D-Digitalisierung adaptieren kann. Gerade im Falle duplizierter Anlagen ist der geometrische Vergleich von Anlagen vorstellbar: Sofern eine Anlage, die bereits an einem Standort aufgebaut und in Betrieb genommen wurde, an einem weiteren Standort in identischer Weise installiert werden soll, ist eine entsprechend präzise 3D-Digitalisierung zur Anpassung der Roboterprogramme erstrebenswert.

Zur Reduktion der Personalkosten für die 3D-Digitalisierung kann die vollständige Automatisierung des 3D-Scannings beitragen. Diese Automatisierung scheint in Produktionssystemen mit den strukturellen Voraussetzungen sinnvoll. Entsprechende Systeme können beispielsweise eine Erleichterung für lange Gänge bieten, sofern sich dort keine Stufen befinden und eine Umgebungsbeleuchtung permanent eingeschaltet ist. Die Praxis hat gezeigt, dass relevante Bereiche der Automobilproduktion durch sehr enge Strukturen, Stufen und Türen geprägt sind. Zudem wird gerade in der produktionsfreien Zeit die Beleuchtung häufig zeitgesteuert ausgeschaltet. Dennoch sind Produktionssysteme vorstellbar, die mit passenden Randbedingungen für automatische Lösungen aufwarten. Systeme wie Serviceroboter, die autonom navigieren

können, könnten um eine entsprechende Einheit erweitert werden. Voraussetzung ist die Fähigkeit zur Kollisionsvermeidung, sodass sowohl der Roboter als auch das zusätzliche Scansystem nicht mit der Produktionsumgebung und nicht mit Menschen kollidieren. Zusätzlich ist es denkbar, fahrerlose Transportsysteme für eine automatische 3D-Digitalisierung zu nutzen. Sofern derartige Systeme Genauigkeiten im Bereich der eingesetzten 3D-Laserscanner erreichen, wird eine zyklische Erfassung von Produktionsstrukturen interessant. Die vorliegende Abhandlung zeigt den Mehrwert der Farbinformationen in Punktwolken für den Planungsprozess. Gegebenenfalls sollten autonome Transportsysteme dann um eine entsprechende Fotokamera ergänzt werden. Bei der zyklischen 3D-Digitalisierung nach einer solchen Push-Strategie gilt es zu beurteilen, inwiefern die jeweils aktuell aufgenommenen Daten eine höhere Qualität als die bislang vorliegenden Daten aufweisen. Konkret gilt es in diesem Falle, Objekte wie etwa zwischengelagertes Material oder Paletten zu isolieren und zu verwerfen, um eine hohe Verlässlichkeit der Daten zu gewährleisten.

8.2.2 Planung auf Basis der 3D-Digitalisierung

Zur Weiterentwicklung der Planung bieten sich Potenziale im Bereich der Aufnahme von Kinematiken. Außerdem ist das vorgestellte Virtual-Reality-System bislang nicht in der Lage, Punktwolken beliebiger Größe wiederzugeben.

Es finden sich Planungsfälle, in denen die Kinematik bestehender Produktionstechnik von Relevanz ist. Hier sind vor allem Fördertechnik-Systeme mit nichtlinearer Bewegung anzuführen. Die Praxis hat gezeigt, dass seitens der Planung Interesse besteht, Störkantendurchläufe digital durchzuführen. Um eine besonders hohe Aussagegüte solcher Kollisionsuntersuchungen zwischen neuen Produkten und bestehenden Anlagen zu erzielen, bedarf es eines Verfahrens zur Aufnahme der entsprechenden Trajektorien. Die Präzision dieser Digitalisierung der Bahnkurve sollte dabei im Bereich der Genauigkeit der Punktwolke liegen. Zusätzlich ist ein gemeinsamer Referenzpunkt vonnöten. Von einem solchen System kann die hybride Planung bei Integrationsprojekten profitieren.

Das realisierte VR-System kann Punktwolken bereits visualisieren. Das Limit an Punkten, die maximal visualisiert werden können, schränkt die Optionen zur Nutzung des VR-Systems momentan ein. Weitere Forschung sollte darauf verwendet werden, die Visualisierungskapazität auszubauen. Dazu ist es einerseits anzustreben, Punkte dynamisch zu laden. Analog zu bekannten Ansätzen aus

der Computergrafik ist eine dynamische Anpassung des Detailgrads für Punktwolken denkbar. Dabei könnten beispielsweise Nahbereiche, die sich im unmittelbaren Sichtfeld des Nutzers des VR-Systems befinden, mit voller Auflösung der Punktwolke und entfernte Bereiche mit reduzierter Auflösung visualisiert werden. Andererseits ist die Performanz von VR-Systemen dahingehend zu steigern, dass sich größere Punktwolken flüssig wiedergeben lassen. Dazu ist die parallele Nutzung mehrerer leistungsstarker Grafikkarten umzusetzen. Hierbei sind aktuelle Entwicklungen der Hardware für Grafikanwendungen vorteilhaft.

Elementare Vorteile der neuen Methode ergeben sich durch die Partizipation sowohl von Entwicklung und Planung als auch von Planung und Betrieb. So bringt es einen entscheidenden Mehrwert mit sich, Entwickler digital in die Produktion zu führen, um die fertigungstechnische Situation zu demonstrieren. Die frühzeitige und häufige Einbindung der Betreiberseite in den Planungsprozess befähigt enge Feedbackschleifen zur effizienten Optimierung von Planständen. Hierzu trägt das VR-System in besonderem Maße bei, da Szenen leicht interpretierbar sind und Größenverhältnisse auf Anhieb realistisch eingeschätzt werden.

Es bleibt festzuhalten, dass jegliche Modelle, die die Produktion abbilden, mit einem minimalen Nutzen für die eigentliche Produktion aufwarten. Für den Fertigungsprozess selbst sind Informationen zum Zustand der Fabrik bei Planungsstart unerheblich. Zur Wertschöpfung werden vor allem Informationen bezüglich der individuellen Konfiguration des Produkts und gegebenenfalls Instruktionen wie beispielsweise eine Montageanleitung benötigt.

Mit der 3D-Digitalisierung in der hier vorgestellten Form ist eine Methode gegeben, Informationen zur geometrischen Gestalt eines Produktionssystems, die in erster Linie für die Planung relevant sind, auf besonders effiziente Weise zu aggregieren.

9 Literaturverzeichnis

- Abele et al. 2003 Abele, Eberhard; Elzenheimer, Jens & Rüstig, Alexander. 2003: Anlaufmanagement in der Serienproduktion. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, **98** (4), S. 172–176. DOI: 10.3139/104.100630.
- Abts & Mülder 2017 Abts, Dietmar & Mülder, Wilhelm. 2017: *Grundkurs Wirtschaftsinformatik. Eine kompakte und praxisorientierte Einführung*. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-658-16378-5.
- acatech 2011 acatech. 2011: *Cyber-Physical Systems. Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion*. acatech — Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. acatech Position, 11. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-27566-1.
- Ackermann et al. 2017 Ackermann, Jörg; Müller, Egon & Börner, Frank. 2017: Hybride Fabrikplanung. Symbiotische Planung mit physischen und digitalen Fabrikmodellen. *wt Werkstattstechnik online*, **107** (4), S. 225–230.
- Adamski 2014 Adamski, Dirk. 2014: *Simulation in der Fahrwerktechnik. Einführung in die Erstellung von Komponenten- und Gesamtfahrzeugmodellen*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-658-06535-5.
- Adelberger & Haft-Zboril 2013 Adelberger, Werner & Haft-Zboril, Nicole. 2013: Portfoliomanagement als Aufgabe der Optimierung von Rendite, Marktanteil und Ressourceneinsatz. *Controlling – Zeitschrift für erfolgsorientierte Unternehmenssteuerung*, **25** (1), S. 41–48. DOI: 10.15358/0935-0381_2013_1_54.

- Aggteleky 1987 Aggteleky, Béla. 1987: *Fabrikplanung. Werksentwicklung und Betriebsrationalisierung*, Band 1. München: Hanser. ISBN: 978-3-446-14860-4.
- Alba & Scaioni 2007 Alba, Mario & Scaioni, Marco. 2007: Comparison of Techniques for Terrestrial Laser Scanning Data Georeferencing Applied to 3-d Modelling of Cultural Heritage. In: ETH Zürich (Hrsg.): *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IAPRSSIS. XXXVI (Part 5/W47). Proceedings of the 2nd ISPRS International Workshop*. Zürich, Schweiz.
- Anderl 2014 Anderl, Reiner. 2014: Virtuelle Produktentstehung. In: Grote, Karl-Heinrich; Feldhusen, Jörg & Dubbel, Heinrich (Hrsg.): *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin: Springer Vieweg, S. 17–31. ISBN: 978-3-642-38890-3.
- Arnold et al. 2011 Arnold, Volker; Dettmering, Hendrik; Engel, Torsten & Karcher, Andreas. 2011: *Product Lifecycle Management beherrschen. Ein Anwenderhandbuch für den Mittelstand*. Berlin, Heidelberg, Dordrecht: Springer. ISBN: 978-3-642-21812-5.
- Aurich et al. 2004 Aurich, Jan C.; Rößing, Martin & Jaime, Rosa. 2004: Änderungsmanagement in der Produktion. Am Beispiel der Einführung einer Maschinen- und Betriebsdatenerfassung. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, **99** (7-8), S. 381–384. DOI: 10.3139/104.100794.
- Aurich et al. 2015 Aurich, Jan C.; Steimer, Chantal; Meissner, Hermann & Menck, Nicole. 2015: Einfluss von Industrie 4.0 auf die Fabrikplanung. Auswirkungen der besonderen Charakteristika cybertronischer Produktionssysteme auf die Fabrikplanung. *wt Werkstattstechnik online*, **105** (4), S. 190–194.

- Bartels 2009 Bartels, Jan-Hendrik. 2009: *Anwendung von Methoden der ressourcenbeschränkten Projektplanung mit multiplen Ausführungsmodi in der betriebswirtschaftlichen Praxis*. Produktion und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien. ISBN: 978-3-834-91696-9.
- Bartsch 2012 Bartsch, Christian 2012: Baukastensystem löst starre Plattformen ab. *VDI Nachrichten* (27.04.2012), **66** (17), S. 11.
- Bauer 2007 Bauer, Jürgen. 2007: Betriebswirtschaft. In: Böge, Alfred (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, S. 1362–1385. ISBN: 978-3-8348-9092-4.
- Bauernhansl 2015 Bauernhansl, Thomas. 2015: Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution. ZEW Wirtschaftsforum 2015 „Europa im Digitalen Wettbewerb“. Mannheim, 11.06.2015.
- Bauernhansl et al. 2016 Bauernhansl, Thomas; Krüger, Jörg; Reinhart, Gunther & Schuh, Günther. 2016: *WGP-Standpunkt Industrie 4.0*. WGP - Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik e. V., zuletzt geprüft am 15.01.2017. Verfügbar: https://wgp.de/wp-content/uploads/WGP-Standpunkt_Industrie_4-0.pdf.

- Baumgärtel et al. 2011 Baumgärtel, Tobias; Borrmann, André; Euringer, Thomas; Frei, Matthias; Hirzinger, Gerd; Horenburg, Tim; Ji, Yang; Juli, Rudolf; Liebich, Thomas; Neuberg, Frank; Obergrießer, Mathias; Pfitzner, Markus; Plank, Claus; Popp, Karin H.; Posch, Hanno; Reif, Rupert; Schorr, Markus; Steinert, Sabine; Strackenbrock, Bernhard; Stockbauer, Wolfgang; Stumpf, Dieter; Suleiman, Alaeddin; Vogt, Norbert & Wimmer, Johannes. 2011: Integrierte Planung auf Basis von 3D-Modellen. In: Günthner, Willibald A. & Borrmann, André (Hrsg.): *Digitale Baustelle - innovativer Planen, effizienter Ausführen. Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 23–115. ISBN: 978-3-642-16485-9.
- Baun 2017 Baun, Christian. 2017: *Betriebssysteme kompakt*. IT kompakt. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-662-53142-6.
- Beck et al. 2001 Beck, Kent; Beedle, Mike; van Bennekum, Arie; Cockburn, Alistair; Cunningham, Ward; Fowler, Martin; Grenning, James; Highsmith, Jim; Hunt, Andrew; Jeffries, Ron; Kern, Jon; Marick, Brian; Martin, Robert C.; Mellor, Steve; Schwaber, Ken; Sutherland, Jeff & Thomas, Dave. 2001: *Agile Manifesto. Manifest für Agile Softwareentwicklung*, zuletzt geprüft am 19.10.2016. Verfügbar: <http://agilemanifesto.org/iso/de/manifesto.html>.
- Becker 2007 Becker, Helmut. 2007: *Auf Crashkurs. Automobilindustrie im globalen Verdrängungswettbewerb*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-540-70982-4.

- Behnert 2017 Behnert, Dorothee. 2017: Getaktete Fließfertigung in der Einzelteilfertigung von Press- und Umformwerkzeugen im Automobilbau. In: Koether, Reinhard & Meier, Klaus-Jürgen (Hrsg.): *Lean Production für die variantenreiche Einzelfertigung. Flexibilität wird zum neuen Standard*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 139–162. ISBN: 978-3-658-13968-1.
- Belz et al. 2015 Belz, Thore; Große-Heitmeyer, Volker & Sobiech, Hans-Jürgen. 2015: Kontinuierlicher Verbesserungsprozess. In: Dombrowski, Uwe & Mielke, Tim (Hrsg.): *Ganzheitliche Produktionssysteme. Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen*. Berlin: Springer Vieweg, S. 50–66. ISBN: 978-3-662-46163-1.
- Bereszewski 2015 Bereszewski, Markus. 2015: Herausforderungen. *ATZextra*, **20** (1), S. 3. DOI: 10.1007/s35778-015-0022-0.
- Berkholz 2008 Berkholz, Daniel. 2008: Einleitung: Wandlungsfähige Produktionssysteme – der Zukunft einen Schritt voraus. In: Nyhuis, Peter; Reinhart, Gunther & Abele, Eberhard (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten*. Garbsen, Hannover: PZH Produktionstechnisches Zentrum, S. 13–18. ISBN: 978-3-939-02696-9.
- Berthel et al. 1990 Berthel, Jürgen; Herzhoff, Sabine & Schmitz, Gereon. 1990: *Strategische Unternehmensführung und F&E-Management. Qualifikationen für Führungskräfte*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-540-52405-2.
- Birkert et al. 2013 Birkert, Arndt R.; Haage, Stefan & Straub, Markus. 2013: *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile. Auslegung von Ziehanlagen*. Berlin: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-642-34669-9.

- Blankenbach 2015 Blankenbach, Jörg. 2015: Bauwerksvermessung für BIM. In: Borrmann, André; König, Markus; Koch, Christian & Beetz, Jakob (Hrsg.): *Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 343–362. ISBN: 978-3-658-05605-6.
- BMVI 2017 BMVI. 2017: *Verordnung zur Regelung des Betriebs von unbemannten Fluggeräten. Ein Überblick über die wichtigsten Regeln*. BMVI - Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Berlin. Verfügbar:
https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/LF/flyer-die-neue-drohnen-verordnung.pdf?__blob=publicationFile.
- BMW 2018 BMW. 2018: *Geschäftsbericht 2017. Wir gestalten die Mobilität der Zukunft*. Bayerische Motoren Werke AG. München. Verfügbar:
https://www.bmwgroup.com/content/dam/grpw/websites/bmwgroup_com/ir/downloads/de/2018/gb/BMW-GB17_de_Finanzbericht_ONLINE.pdf.
- BMW 2012 BMWi. 2012: *AUTONOMIK für Industrie 4.0. Produktion, Produkte, Dienste im multidimensionalen Internet der Zukunft*. BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Berlin. Verfügbar:
https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/autonomik-fuer-industrie-4-0.pdf?__blob=publicationFile&v=9.
- Böhler & Gloger 2007 Böhler, Tino M. & Gloger, Ulrike. 2007: *Produktionsanlauf bereits im Produktentstehungsprozess berücksichtigen*, zuletzt geprüft am 03.08.2016. Verfügbar:
<https://www.maschinenmarkt.vogel.de/produktionsanlauf-bereits-im-produktentstehungsprozess-beruecksichtigen-a-98358/>.

- Böhm & Pateraki 2006 Böhm, Jan & Pateraki, Maria. 2006: From point samples to surfaces - on meshing and alternatives. In: Maas, Hans-Gerd & Schneider, Danilo (Hrsg.): *International Archives on Photogrammetry and Remote Sensing IAPRS*. ISPRS Commission V Symposium "Image Engineering and Vision Metrology". Dresden. 25.-27.09.2006, S. 50–55.
- Böhm 2009 Böhm, Jan. 2009: Übersicht über Ansätze zur automatischen Objektrekonstruktion aus Punktwolken. Hamburger Anwenderforum Terrestrisches Laserscanning. Hamburg, 16.06.2009.
- Borrmann et al. 2015 Borrmann, André; König, Markus; Koch, Christian & Beetz, Jakob. 2015: Einführung. In: Borrmann, André; König, Markus; Koch, Christian & Beetz, Jakob (Hrsg.): *Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 1–21. ISBN: 978-3-658-05605-6.
- Bosch 2016 Bosch. 2016: *Measuring and Layout Tools. 2016/2017 Power Tools & Accessories Catalog*.
- Bracht & Eckert 2005 Bracht, Uwe & Eckert, Clemens. 2005: Ein umfassender Ansatz für Planung und Betrieb. Ursprünge und Visionen der Digitalen Fabrik. *Intelligenter Produzieren* (1), S. 8–10.
- Bracht & Masurat 2002 Bracht, Uwe & Masurat, Thomas. 2002: Die vergessenen Fabriken. Schlafende Potentiale für innovative Planungen bei KMU systematisch mit modernen IT-Instrumenten wecken. *wt Werkstattstechnik online*, **92** (4), S. 154–158.
- Bracht & Reichert 2010 Bracht, Uwe & Reichert, Johannes. 2010: Digitale Fabrik auf Basis der 3D-CAD-Fabrikplanung. Herausforderungen bei der Einführung von IT-gestützter Planung in kleinen und mittelständischen Unternehmen. *wt Werkstattstechnik online*, **100** (4), S. 247–253.

- Bracht et al. 2008 Bracht, Uwe; Spillner, Andrea & Reichert, Johannes. 2008: Stufenweise Einführung von 3D-CAD-basierter Fabrikplanung im Rahmen der Digitalen Fabrik. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, **103** (1-2), S. 12–16. DOI: 10.3139/104.101235.
- Bracht et al. 2011 Bracht, Uwe; Geckler, Dieter & Wenzel, Sigrid. 2011: *Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele*. VDI-Buch. Berlin, New York: Springer. ISBN: 978-3-540-89038-6.
- Broy 2010a Broy, Manfred. 2010: *Cyber-Physical Systems. Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme*. acatech diskutiert. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-14498-1.
- Broy 2010b Broy, Manfred. 2010: Cyber-Physical Systems — Wissenschaftliche Herausforderungen bei der Entwicklung. In: Broy, Manfred (Hrsg.): *Cyber-Physical Systems. Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 17–31. ISBN: 978-3-642-14498-1.
- Bubeck et al. 2014 Bubeck, Alexander; Gruhler, Matthias; Reiser, Ulrich & Weißhardt, Florian. 2014: Vom fahrerlosen Transportsystem zur intelligenten mobilen Automatisierungsplattform. In: Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael & Vogel-Heuser, Birgit (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 221–233. ISBN: 978-3-658-04681-1.
- Bullinger & Lung 1994 Bullinger, Hans-Jörg & Lung, Martin M. 1994: *Planung der Materialbereitstellung in der Montage*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner. ISBN: 978-3-663-11047-7.

- Bullinger 1988 Bullinger, Hans-Jörg. 1988: CIM – Die Herausforderung der nächsten Jahre. In: Bullinger, Hans-Jörg (Hrsg.): *Produktionsforum '88. Die CIM-fähige Fabrik. Zukunftssichernde Planung und erfolgreiche Praxisbeispiele. 8. IAO-Arbeitstagung 4./5. Mai 1988 in Stuttgart*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 9–44. ISBN: 978-3-540-19034-9.
- Bullinger-Hoffmann & Mühlstedt 2016 Bullinger-Hoffmann, Angelika C. & Mühlstedt, Jens. 2016: *Homo Sapiens Digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle*. Berlin: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-50458-1.
- Campagna 1999 Campagna, Swen. 1999: *Polygonreduktion zur effizienten Speicherung, Übertragung und Darstellung komplexer polygonaler Modelle*. München: Utz. Informatik. Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1998. ISBN: 978-3-896-75480-6.
- Cisek 2005 Cisek, Robert. 2005: *Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen*. München: Utz. Forschungsberichte iw 191. München, Techn. Univ., Diss., 2005. ISBN: 978-3-831-60475-3.
- Ciupek 2017 Ciupek, Martin 2017: Alles in einem Werk. *VDI Nachrichten* (12.05.2017), **71** (19), S. 17.
- Collins-Sussman et al. 2011 Collins-Sussman, Ben; Fitzpatrick, Brian & Pilato, Michael C. 2011: *Version Control with Subversion*. Sebastopol, California, USA: O'Reilly. ISBN: 978-0-596-51033-6.
- Czernohous 2012 Czernohous, Christoph. 2012: *Pervasive Linux. Basistechnologien, Softwareentwicklung, Werkzeuge*. Berlin: Springer. ISBN: 978-3-540-20940-9.

- Czichos & Daum 2014 Czichos, Horst & Daum, Werner. 2014: Messgrößen und Messverfahren. In: Feldhusen, Jörg & Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.): *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin: Springer, S. W 8–W 30. ISBN: 978-3-642-38891-0.
- Dangelmaier 2009 Dangelmaier, Wilhelm. 2009: *Theorie der Produktionsplanung und -steuerung. Im Sommer keine Kirschpralinen?* VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-00632-6.
- DIN 18202 DIN 18202:2013-04. *Toleranzen im Hochbau - Bauwerke*.
- DIN 69901-5 DIN 69901-5:2009-01. *Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 5: Begriffe*.
- DIN EN 60825-1 DIN EN 60825-1:2015-07. *Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen*.
- Dold & Brenner 2007 Dold, Christoph & Brenner, Claus. 2007: Verfahren zur Registrierung von 3D Punktwolken. Hamburger Anwenderforum Terrestrisches Laserscanning. Hamburg, 14.06.2007.
- Dombrowski & Ebentreich 2015 Dombrowski, Uwe & Ebentreich, David. 2015: Einleitung. In: Dombrowski, Uwe (Hrsg.): *Lean Development. Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 1–19. ISBN: 978-3-662-47420-4.
- Dombrowski & Mielke 2015 Dombrowski, Uwe & Mielke, Tim. 2015: Einleitung und historische Entwicklung. In: Dombrowski, Uwe & Mielke, Tim (Hrsg.): *Ganzheitliche Produktionssysteme. Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen*. Berlin: Springer Vieweg, S. 1–24. ISBN: 978-3-662-46163-1.

- Dombrowski 2015 Dombrowski, Uwe. 2015: Glossar. In: Dombrowski, Uwe (Hrsg.): *Lean Development. Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 223–239. ISBN: 978-3-662-47420-4.
- Dombrowski 2016 Dombrowski, Uwe. 2016: IFU Planungstisch. In: Bauernhansl, Thomas & Dombrowski, Uwe (Hrsg.): *Einfluss von Industrie 4.0 auf unsere Fabriken und die Fabrikplanung*. Fachkongress Fabrikplanung. Ludwigsburg. 20.-21.04.2016, S. 22–23. ISBN: 978-3-946-91600-0.
- Donath 2009 Donath, Dirk. 2009: *Bauaufnahme und Planung im Bestand. Grundlagen - Verfahren - Darstellung - Beispiele*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner; GWV Fachverlage GmbH. ISBN: 978-3-834-80398-6.
- Dürr & Kuhlmann 2008 Dürr, Mark & Kuhlmann, Timm. 2008: Kooperative Fabrikplanung mit Laserscans. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, **103** (1-2), S. 28–30. DOI: 10.3139/104.101238.
- Dürr & Lickefett 2010 Dürr, Mark V. & Lickefett, Michael. 2010: In virtuellen Räumen real planen. IPA-Planungstisch bekommt neue Multitouch-Oberfläche – mit einem Klick in die Cave. *wt Werkstattstechnik online*, **100** (6), S. 541–544.
- Dutschke 2002 Dutschke, Wolfgang. 2002: *Fertigungsmesstechnik*. 4., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner. ISBN: 978-3-519-36322-4.
- Dyckhoff 2003 Dyckhoff, Harald. 2003: *Grundzüge der Produktionswirtschaft. Einführung in die Theorie betrieblicher Wertschöpfung*. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-540-44048-2.

- Ebel et al. 2014 Ebel, Bernhard; Hofer, Markus B. & Genster, Bettina. 2014: Automotive Management – Herausforderungen für die Automobilindustrie. In: Ebel, Bernhard & Hofer, Markus B. (Hrsg.): *Automotive Management. Strategie und Marketing in der Automobilwirtschaft*. Berlin: Springer Gabler, S. 3–15. ISBN: 978-3-642-34067-3.
- Eggers 2017 Eggers, Lars. 2017: Ich bin ein echter Logistikfan geworden. BVL-Interview mit Oliver Zipse, Produktionsvorstand BMW. *BVL Magazin*, zuletzt geprüft am 09.07.2017. Verfügbar: <http://www.bvl.de/fal-news/interview-oliver-zipse>.
- Ehrlenspiel et al. 2014 Ehrlenspiel, Klaus; Kiewert, Alfons; Lindemann, Udo & Mörtl, Markus. 2014: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-642-41958-4.
- Eidenmüller 1986 Eidenmüller, Bodo. 1986: Auswirkungen von Automatisierungskonzepten auf Führung und Organisation. In: Warnecke, Hans-Jürgen (Hrsg.): *Initiativen für die Fabrik mit Zukunft. Internationales Symposium im Rahmen der Hannover-Messe-Industrie '86 10. und 11. April 1986*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 325–345. ISBN: 978-3-540-16673-3.
- Eigner & Koch 2017 Eigner, Martin & Koch, Walter. 2017: Vorwort. In: Eigner, Martin; Koch, Walter & Muggeo, Christian (Hrsg.): *Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme. Der PLM-unterstützte Referenzentwicklungsprozess für Produkte und Produktionssysteme*. Berlin: Springer Vieweg, S. 3–4. ISBN: 978-3-662-55124-0.

- Eigner & Stelzer 2009 Eigner, Martin & Stelzer, Ralph. 2009: *Product Lifecycle Management. Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management*. VDI-Buch. Dordrecht: Springer. ISBN: 978-3-540-44373-5.
- Eißrich 2005 Eißrich, Rainer. 2005: Die vernetzte und integrierte Planung durch die Digitale Fabrik. Herausforderungen in der Produktionsplanung. *Intelligenter Produzieren* (1), S. 4–6.
- Estermann & Noll 1997 Estermann, Hans & Noll, Hans-Peter. 1997: Brachflächenrecycling als Chance - die Brache als Ressource? In: Kompa, Reiner; Pidoll, Michael & Schreiber, Bernd (Hrsg.): *Flächenrecycling. Inwertsetzung, Bauwürdigkeit, Baureifmachung*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 5–17. ISBN: 978-3-642-64537-2.
- Eversheim 1995 Eversheim, Walter. 1995: *Simultaneous Engineering. Erfahrungen aus der Industrie für die Industrie*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-78919-9.
- Faro 2015 Faro. 2015: *FARO Laser Scanner Focus3D X 330*. Faro Technologies, Inc. Lake Mary, Florida, USA.
- Faro 2016 Faro. 2016: *FARO Laser Scanner FocusS 150. The world's most popular terrestrial laser scanner with ultra-high accuracy and ingress protection*. Faro Technologies, Inc. Lake Mary, Florida, USA.
- Feldhusen & Gebhardt 2008 Feldhusen, Jörg & Gebhardt, Boris. 2008: *Product Lifecycle Management für die Praxis. Ein Leitfaden zur modularen Einführung, Umsetzung und Anwendung*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-540-34008-9.

- Feldhusen & Grote 2013 Feldhusen, Jörg & Grote, Karl-Heinrich. 2013: System, Anlage, Apparat, Maschine, Gerät, Baugruppe, Einzelteil. In: Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich; Pahl, Gerhard & Beitz, Wolfgang (Hrsg.): *Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 238–240. ISBN: 978-3-642-29568-3.
- Feldhusen et al. 2013 Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich & Thon, Jörg. 2013: Grundsätzliche Überlegungen zur Rationalisierung. In: Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich; Pahl, Gerhard & Beitz, Wolfgang (Hrsg.): *Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 773–815. ISBN: 978-3-642-29568-3.
- Fiala 1987 Fiala, Ernst. 1987: Kraftfahrzeugtechnik. Automotive engineering. In: Beitz, Wolfgang & Küttner, Karl-Heinz (Hrsg.): *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. Q 1–Q 26. ISBN: 978-3-662-06778-9.
- Fiebig 2003 Fiebig, Christian. 2003: Modularität gibt den Ton an! *phi - Produktionstechnik Hannover informiert*, 4 (2), S. 6–7.
- Fisser et al. 2009 Fisser, Frank; Heisel, Uwe; Kircher, Christian; Klemm, Peter; Le Blond, Jan; Lehr, Patricia; Meitzner, Martin; Pritschow, Günter; Westkämper, Engelbert & Wurst, Ulrich. 2009: Technik und Strukturen. In: Westkämper, Engelbert & Zahn, Erich (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 115–138. ISBN: 978-3-540-21889-0.

- Franzkoch & Gottschalk 2008 Franzkoch, Bastian & Gottschalk, Sebastian. 2008: Anlauforganisation. In: Schuh, Günther; Stölzle, Wolfgang & Straube, Frank (Hrsg.): *Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen. Ein Leitfaden für die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 55–64. ISBN: 978-3-540-78406-7.
- Fraunhofer IPA 2002 Fraunhofer IPA. 2002: *Laserscanning. Methode und Werkzeuge für eine zukünftige Planung von Fabriken und Produktionssystemen*. Fraunhofer IPA - Institut für Produktionstechnik und Automatisierung. Stuttgart, zuletzt geprüft am 07.07.2014. Verfügbar: <http://www.ipa.fraunhofer.de/fileadmin/www.ipa.fhg.de/pdf/Fabrik>.
- Frey 2017 Frey, Jochen. 2017: *BMW Group legt Grundstein für den Ausbau ihres Forschungs- und Innovationszentrums FIZ*. BMW. München, zuletzt geprüft am 15.10.2017. Verfügbar: <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0274947DE/bmw-group-legt-grundstein-fuer-den-ausbau-ihres-forschungs-und-innovationszentrums-fiz?language=de>.
- Friedewald et al. 2013 Friedewald, Axel; Titov, Fedor; Halata, Philipp S. & Lödding, Hermann. 2013: An Efficient Retrofit Planning Workflow. In: RINA - The Royal Institute of Naval Architectures (Hrsg.): *16th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS). Papers Volume I*. Busan, Südkorea, S. 7–14.
- Gabler 2013 Gabler. 2013: *Gabler Kompakt-Lexikon Wirtschaft. 4.500 Begriffe nachschlagen, verstehen, anwenden*. Wiesbaden: Springer Gabler. ISBN: 978-3-658-00007-3.

- Gockel 2012 Gockel, Tilo. 2012: *Kompendium digitale Fotografie. Von der Theorie zur erfolgreichen Fotopraxis*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-11238-6.
- Gorny & Viereck 1984 Gorny, Peter & Viereck, Axel. 1984: *Interaktive grafische Datenverarbeitung. Eine einführende Übersicht*. Leitfäden der angewandten Informatik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner. ISBN: 978-3-519-02468-2.
- Gottschalk & Hoeschen 2008 Gottschalk, Sebastian & Hoeschen, Axel. 2008: Produktionsmanagement im Anlauf. In: Schuh, Günther; Stölzle, Wolfgang & Straube, Frank (Hrsg.): *Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen. Ein Leitfaden für die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 177–185. ISBN: 978-3-540-78406-7.
- Grewe et al. 2011 Grewe, Olaf; Geist, Michael & Bohnenberg, Ralf. 2011: Einsatz terrestrischer Laserscanner bei der Reorganisation von Fertigungslayouts. In: Luhmann, Thomas & Müller, Christina (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011*. Oldenburger 3D-Tage. Oldenburg. 01.-03.02.2011. Berlin: Wichmann, S. 107–116. ISBN: 978-3-879-07506-5.
- Gronbach 2002 Gronbach, Hans. 2002: Werkzeugmaschinenentwicklung benötigt Simulation. Auf dem Weg zur virtuellen Maschine. In: Reinhart, Gunther (Hrsg.): *Mechatronische Produktionssysteme. Genauigkeit gezielt entwickeln*. München: Utz, S. 19–41. ISBN: 978-3-896-75060-0.
- Gruber & Joeckel 2004 Gruber, Franz J. & Joeckel, Rainer. 2004: *Formelsammlung für das Vermessungswesen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner. ISBN: 978-3-519-00486-8.

- Grundig 2015 Grundig, Claus-Gerold. 2015: *Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen*. München: Hanser. ISBN: 978-3-446-44215-3.
- Grünendahl et al. 2017 Grünendahl, Ralf-T.; Steinbacher, Andreas F. & Will, Peter H. 2017: *Das IT-Gesetz: Compliance in der IT-Sicherheit. Leitfaden für ein Regelwerk zur IT-Sicherheit im Unternehmen*. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-658-18204-5.
- Gruner 1996 Gruner, Kai. 1996: *Beschleunigung von Marktprozessen. Modellgestützte Analyse von Einflußfaktoren und Auswirkungen*. Neue betriebswirtschaftliche Forschung, 184. Wiesbaden: Gabler. ISBN: 978-3-409-13268-8.
- Günther 2015 Günther, Thomas. 2015: *Baustellenmanagement im Anlagenbau. Von der Planung bis zur Fertigstellung*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-45860-0.
- Gutenberg 1951 Gutenberg, Erich. 1951: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Erster Band Die Produktion*. Enzyklopädie der Rechts- und Staatswissenschaft, Abteilung Staatswissenschaft. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-662-21966-9.
- Haala et al. 2008 Haala, Norbert; Peter, Michael; Kremer, Jens & Hunter, Graham. 2008: Mobile LiDAR Mapping for 3D Point Cloud Collection in Urban Areas. A Performance Test. In: Chen, Jun; Jiang, Jie & Baudoin, Alain (Hrsg.): *Advances in photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. 2008 ISPRS congress book. Silk Road for Information from Imagery*. ISPRS Congress Beijing 2008. Peking, China. 03.-11.07.2008. Boca Raton: CRC Press, S. 1119–1124. ISBN: 978-0-415-47805-2.

- Haller 1998 Haller, Thomas. 1998: *Erfassen und Verarbeiten komplexer Geometrie in Meßtechnik und Flächenrückführung*. IPA-IAO Forschung und Praxis, 277. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-540-65147-5.
- Halm 2015 Halm, Andreas. 2015: Fabriken schneller und kostengünstiger planen. *wt Werkstattstechnik online*, **105** (3), S. 102–103.
- Hanser 2010 Hanser, Eckhart. 2010: *Agile Prozesse: Von XP über Scrum bis MAP*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-12312-2.
- Harms et al. 2003 Harms, Thomas; Lopitzsch, Jens & Nickel, Rouven. 2003: Integrierte Fabrikstrukturierung und Logistikkonzeption. Effiziente Fabrikplanung durch Phasen der Kommunikation und Konzentration. *wt Werkstattstechnik online*, **93** (4), S. 227–232.
- Harrington 1973 Harrington, Joseph. 1973: *Computer Integrated Manufacturing*. New York: Industrial Press. ISBN: 978-0-831-11096-3.
- Hawer et al. 2015 Hawer, Sven; Ilmer, Philipp & Reinhart, Gunther. 2015: Klassifizierung unscharfer Planungsdaten in der Fabrikplanung. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, **110** (6), S. 348–351. DOI: 10.3139/104.111339.
- Heinen et al. 2008 Heinen, Tobias; Rimpau, Christoph & Wörn, Arno. 2008: Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung. In: Nyhuis, Peter; Reinhart, Gunther & Abele, Eberhard (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten*. Garbsen, Hannover: PZH Produktionstechnisches Zentrum, S. 19–33. ISBN: 978-3-939-02696-9.
- Helbing 2010 Helbing, Kurt W. 2010: *Handbuch Fabrikprojektierung*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-01617-2.

- Henneberg 2015 Henneberg, Jens. 2015: Flexible, ergonomische Arbeitsplatzgestaltung – Steigerung der Effizienz am Beispiel der manuellen Produktionssysteme (MPS). In: Dickmann, Philipp (Hrsg.): *Schlanker Materialfluss. Mit Lean Production, Kanban und Innovationen*. Berlin: Springer Vieweg, S. 333–338. ISBN: 978-3-662-44868-7.
- Hering 2015 Hering, Ekbert. 2015: *Unternehmensplanung für Ingenieure*. Essentials. Wiesbaden: Springer Fachmedien. ISBN: 978-3-658-08435-6.
- Hertle et al. 2017 Hertle, Christian; Tisch, Michael; Metternich, Joachim & Abele, Eberhard. 2017: Das Darmstädter Shopfloor Management-Modell. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, **112** (3), S. 118–121. DOI: 10.3139/104.111675.
- Herzner 2013 Herzner, Dennis. 2013: *Projektplanung in agilen IT-Projekten*. Ludwig-Maximilians-Universität, München. Verfügbar: <https://www.pst.ifi.lmu.de/Lehre/wise-13-14/jur-pm/presentation-d-herzner-projektplanung-1.html>.
- Hesse et al. 2016 Hesse, Christian; Weltzien, Kay & Stromhardt, Andreas. 2016: Hochpräzises Mobile Mapping im Ingenieur- und Verkehrswegebau. In: DVW - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning 2016 (TLS 2016). Beiträge zum 154. DVW-Seminar am 28. und 29. November 2016 in Fulda*. DVW-Seminar. Fulda. 28.-29.11.2016. Augsburg: Wißner, S. 131–143. ISBN: 978-3-95786-106-1.

- Himmler & Amberg 2013 Himmler, Florian & Amberg, Michael. 2013: Die Digitale Fabrik – eine Literaturanalyse. In: Alt, Rainer & Franczyk, Bogdan (Hrsg.): *11th International Conference on Wirtschaftsinformatik (WI2013)*. 11th International Conference on Wirtschaftsinformatik. Leipzig. 27.02.-01.03.2013, S. 165–179. ISBN: 978-3-000-41359-9.
- Hloska 2012 Hloska, Jiří. 2012: Working with the Modular Library Automotive. In: Bangsow, Steffen (Hrsg.): *Use cases of discrete event simulation. Appliance and research*. Berlin: Springer, S. 241–276. ISBN: 978-3-642-28776-3. DOI: 10.1007/978-3-642-28777-0_12.
- Hoffmann 2013 Hoffmann, Dirk W. 2013: *Software-Qualität*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-35699-5.
- Hofmann-Wellenhof et al. 1994 Hofmann-Wellenhof, Bernhard; Kienast, Gerhard & Lichtenegger, Herbert. 1994: *GPS in der Praxis*. Wien: Springer. ISBN: 978-3-211-82609-6.
- Hügel 1992 Hügel, Helmut. 1992: *Strahlwerkzeug Laser. Eine Einführung*. Teubner Studienbücher Technik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner. ISBN: 978-3-519-06134-2.
- Hundertmark 2013 Hundertmark, Heike. 2013: *Beziehungsmanagement in der Automobilindustrie. OEM Relationship Management als Sonderfall des CRM*. Wiesbaden: Springer Fachmedien. ISBN: 978-3-834-94510-5.
- Hüttenrauch & Baum 2008 Hüttenrauch, Mathias & Baum, Markus. 2008: *Effiziente Vielfalt. Die dritte Revolution in der Automobilindustrie*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-540-72115-4.

- Hyypää 2011 Hyypää, Juha. 2011: State of the Art in Laser Scanning. In: Fritsch, Dieter (Hrsg.): *Photogrammetric Week*, 11. Berlin: Wichmann, S. 203–216. ISBN: 978-3-879-07507-2.
- Isermann 2008 Isermann, Rolf. 2008: *Mechatronische Systeme. Grundlagen*. Berlin: Springer. ISBN: 978-3-540-32336-5.
- Jacobi 2013 Jacobi, Hans-Friedrich. 2013: Computer Integrated Manufacturing (CIM). In: Westkämper, Engelbert; Spath, Dieter; Constantinescu, Carmen & Lentjes, Joachim (Hrsg.): *Digitale Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 51–92. ISBN: 978-3-642-20258-2.
- Jaensch et al. 2017 Jaensch, Florian; Neyrinck, Adrian; Lechler, Armin & Verl, Alexander. 2017: Variantenreiche Fabrikplanung. Automatische Variantenerzeugung für den simulationsbasierten Vergleich von Anlagenprojektierungen. *wt Werkstattstechnik online*, **107** (9), S. 640–646.
- Jähne 2012 Jähne, Bernd. 2012: *Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-04951-4.
- Jeong et al. 2010 Jeong, Seonhwa; Wegner, Diana M. & Noh, Sangdo. 2010: Validation of an Ontology-based Approach for Enhancing Human Simulation in General Assembly Environments. In: Ao, S. I.; Gelman, Len; Hukins, David W. L.; Hunter, Andrew & Korsunsky, Alexander M. (Hrsg.): *Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol III*. London, UK. 30.06.-02.07.2010. Hong Kong: IAENG. ISBN: 978-9-881-82108-9.
- Jonas 2000 Jonas, Christian. 2000: *Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen*. München: Utz. Forschungsberichte iw 145. München, Techn. Univ., Diss., 2000. ISBN: 978-3-896-75870-5.

- Ju 2009 Ju, Tao. 2009: Fixing Geometric Errors on Polygonal Models. A Survey. *Journal of Computer Science and Technology*, **24** (1), S. 19–29. DOI: 10.1007/s11390-009-9206-7.
- Junglas 2012 Junglas, Marco. 2012: *Methodische Entwicklung hochintegrierter mechatronischer Systeme unter funktionalen, zuverlässigkeits- und sicherheitstechnischen Aspekten. Analyse und Quantifizierung*. Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik, 2012. Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2012. urn:nbn:de:hbz:464-20120726-112932-4.
- Kapp & Constantinescu 2006 Kapp, Ralf & Constantinescu, Carmen. 2006: Digitales Engineering. Neue Werkzeuge und Trends. *Intelligenter Produzieren* (3), S. 9–11., zuletzt geprüft am 13.08.2017. Verfügbar: [https://www.produktionstechnologie.de/downloads/indit2_intelligenter produzieren.pdf](https://www.produktionstechnologie.de/downloads/indit2_intelligenter_produzieren.pdf).
- Kasikci 2013 Kasikci, Ismail. 2013: *Kompodium Planung von Elektroanlagen. Theorie, Vorschriften, Praxis, Softwareanwendung*. Berlin: Springer. ISBN: 978-3-642-63043-9.
- Kellerhoff 2017 Kellerhoff, Peter 2017: „Keine Angst vor der Modellvielfalt“. Interview: BMW-Produktionsvorstand Oliver Zipse sieht die Münchner aufgrund hoher Flexibilität in der Produktion auch angesichts der aktuell sinkenden Dieselnachfrage gut aufgestellt. *VDI Nachrichten* (24.11.2017), **71** (47/48), S. 12–13.
- Kerber 2016 Kerber, Sebastian. 2016: *Prozessgestaltung zum Einsatz digitaler Fabrikgesamtmodelle. Anwendung in der Produktionsplanung eines Automobilherstellers*. Wiesbaden: Springer. AutoUni - Schriftenreihe 86. Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2015. ISBN: 978-3-658-14109-7.

- Kerkenberg 2016 Kerkenberg, Thorben. 2016: Digitale Fabrikplanung für zukunftssichere und Industrie 4.0- fähige Produktionssysteme. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, **111** (3), S. 104–108. DOI: 10.3139/104.111490.
- Kern 2007 Kern, Fredie. 2007: Terrestrisches Laserscanning. kurz & bündig. *Architektur-Vermessung – www.architektur-vermessung.de*, zuletzt geprüft am 09.10.2016. Verfügbar: http://www.architektur-vermessung.de/05-Literatur/doc/laserscanning_fkern.pdf.
- Kersten et al. 2006 Kersten, Thomas; Przybilla, Heinz-Jürgen & Lindstaedt, Maren. 2006: Integration, Gusion und Kombination von terrestrischen Laserscannerdaten und digitalen Bildern. Workshop „Anforderungen an geometrische Fusionsverfahren“. Berlin, 20.11.2006.
- Kersten et al. 2009 Kersten, Thomas P.; Mechelke, Klaus; Lindstaedt, Maren; Graeger, Tanja & Sternberg, Harald. 2009: Phasen im Vergleich - Erste Untersuchungsergebnisse der Phasenvergleichsscanner Faro Photon und Trimble FX. Hamburg, 2009.
- Kersten et al. 2012 Kersten, Thomas P.; Lindstaedt, Maren; Mechelke, Klaus & Zobel, Kay. 2012: Automatische 3D-Objektrekonstruktion aus unstrukturierten digitalen Bilddaten für Anwendungen in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie. In: Seyfert, Eckhardt (Hrsg.): *Erdblicke – Perspektiven für die Geowissenschaften. 32. Jahrestagung in Potsdam*. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF. Potsdam. 14.-17.03.2012, S. 137–148.
- Kesper 2012 Kesper, Heiner. 2012: *Gestaltung von Produktvariantenspektren mittels matrixbasierter Methoden*. München: Dr. Hut. Produktentwicklung. München, Techn. Univ., Diss., 2012. ISBN: 978-3-843-90780-4.

- Klauke et al. 2002 Klauke, Adolf; Schreiber, Werner & Weißner, Rüdiger. 2002: Zukunftsorientierte Fabrikstrukturen in der Automobilindustrie. *wt Werkstattstechnik online*, **92** (4), S. 144–148.
- Klein & Reinhart 2016 Klein, Thorsten & Reinhart, Gunther. 2016: Scrum im Maschinen- und Anlagenbau. *Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe*, **68** (10), S. 71–72.
- Kletti & Schumacher
2014 Kletti, Jürgen & Schumacher, Jochen. 2014: *Die perfekte Produktion. Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT)*. Berlin: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-45440-4.
- Klug 2010 Klug, Florian. 2010: *Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau*. VDI-Buch. Berlin: Springer. ISBN: 978-3-642-05292-7.
- Krenkel & Lenzian
2015 Krenkel, Philipp & Lenzian, Henrike. 2015: Null Fehler-Prinzip. In: Dombrowski, Uwe (Hrsg.): *Lean Development. Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 92–102. ISBN: 978-3-662-47420-4.
- Kroll 2014 Kroll, Julia. 2014: *Aufgabenangepasste, kontrollierte Oberflächenextraktion aus 3D-Computertomographiedaten*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 27. Stuttgart, Univ., Diss., 2013. ISBN: 978-3-839-60672-8.
- Krumm et al. 2014 Krumm, Stephan; Schopf, Klaus D. & Rennekamp, Marcus. 2014: Komplexitätsmanagement in der Automobilindustrie – optimaler Fit von Vielfalt am Markt, Produktstruktur, Wertstrom und Ressourcen. In: Ebel, Bernhard & Hofer, Markus B. (Hrsg.): *Automotive Management. Strategie und Marketing in der Automobilwirtschaft*. Berlin: Springer Gabler, S. 189–205. ISBN: 978-3-642-34067-3.

- Kugelman 1999 Kugelman, Doris, 1999: *Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern*. München: Utz. Forschungsberichte iwB 127. München, Techn. Univ., Diss., 1999. ISBN: 978-3-896-75615-2.
- Kuhn & Rabe 1998 Kuhn, Axel & Rabe, Markus. 1998: *Simulation in Produktion und Logistik. Fallbeispielsammlung*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-540-63854-4.
- Kühn 2006 Kühn, Wolfgang. 2006: *Digitale Fabrik. Fabriksimulation für Produktionsplaner*. München: Hanser. ISBN: 978-3-446-40619-3.
- Kunert 2010 Kunert, Robert. 2010: Einführung und Umsetzung des Lean-Supply-Chain-Managements. Deutscher Logistik-Kongress. Berlin, 20.10.2010.
- KunstUrhG 2001 KunstUrhG Gesetz betreffend das Urheberrecht an Werken der bildenden Künste und der Photographie. Fassung vom 16.02.2001. Verfügbar: <https://www.gesetze-im-internet.de/kunsturhg/BJNR000070907.html>. Zugriff am: 16.02.2018.
- Landherr et al. 2013 Landherr, Martin; Neumann, Michael; Volkmann, Johannes; Jäger, Jens; Kluth, Andreas; Lucke, Dominik; Rahman, Omar-Abdul; Riexinger, Günther & Constantinescu, Carmen. 2013: Fabriklebenszyklusmanagement. In: Westkämper, Engelbert; Spath, Dieter; Constantinescu, Carmen & Lentjes, Joachim (Hrsg.): *Digitale Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 163–195. ISBN: 978-3-642-20258-2.
- Lanza & Ertel 2011 Lanza, Gisela & Ertel, Anna. 2011: Ressourceneffizienz im Produktionsanlauf. Personalbedarfsplanung mittels einer kombiniert heuristischen und simulativen Planungsmethode. *wt Werkstattstechnik online*, **101** (9), S. 606–610.

- Lee 2008 Lee, Edward A. 2008: Cyber Physical Systems: Design Challenges. In: IEEE Computer Society (Hrsg.): *Proceedings of the 2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing*, S. 369–375.
- Löffler 2011 Löffler, Carina. 2011: *Systematik der strategischen Strukturplanung für eine wandlungsfähige und vernetzte Produktion der variantenreichen Serienfertigung*. Heimsheim: Jost-Jetter. IPA-IAO Forschung und Praxis 519. Stuttgart, Univ., Diss., 2011. ISBN: 978-3-939-89090-4.
- Löffler et al. 2011 Löffler, Carina; Westkämper, Engelbert & Unger, Karl. 2011: Änderungsdynamik und Varianz im Automobilbau. Analyse der Produktvarianz und deren Auswirkung auf die Produktion. *wt Werkstattstechnik online*, **101** (3), S. 99–104.
- Loos et al. 2011 Loos, Peter; Lechtenböcker, Jens; Vossen, Gottfried; Zeier, Alexander; Krüger, Jens; Müller, Jürgen; Lehner, Wolfgang; Kossmann, Donald; Fabian, Benjamin; Günther, Oliver & Winter, Robert. 2011: In-Memory-Datenmanagement in betrieblichen Anwendungssystemen. *Wirtschaftsinformatik*, **53** (6), S. 383–390. DOI: 10.1007/s11576-011-0296-9.
- Lorenz 2014 Lorenz, Jörg. 2014: Cardboard Engineering 2.0. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, **109** (1-2), S. 26–28. DOI: 10.3139/104.111083.
- Lübke mann et al. 2016 Lübke mann, Jens; Canitez, Ali & Nyhuis, Peter. 2016: Analyse des Restrukturierungsbedarfs von Fabriken. Anwendung eines Beschreibungsmodells zur Einflussanalyse von Veränderungstreibern auf Strukturelemente“. *wt Werkstattstechnik online*, **106** (4), S. 255–259.

- Lucke et al. 2009 Lucke, Dominik; Constantinescu, Carmen & Westkämper, Engelbert. 2009: Fabrikdatenmodell für kontextbezogene Anwendungen. Ein Datenmodell für kontextbezogene Fabrikanwendungen in der „Smart Factory“. *wt Werkstattstechnik online*, **99** (3), S. 106–110.
- Macke & Rulhoff 2013 Macke, Nils & Rulhoff, Stefan. 2013: Integrierte Produktionsplanung in dynamischen Umgebungen. In: Schenk, Michael (Hrsg.): *10. Fachtagung „Digital Engineering zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme“*. 16. IFF-Wissenschaftstage. Magdeburg. 18.-20.06.2013, S. 91–100.
- Majohr 2008 Majohr, Detlef. 2008: *Optimierung von Karosserievorbehandlungsanlagen in der Automobilindustrie*. Dissertation. Rostock, Univ., Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik.
- Mansfield 2014 Mansfield, Alexander P. 2014: *Visual Media Editing Using Scene Understanding*. Dissertation No. 21756. ETH, Zürich. DOI: 10.3929/ethz-a-010144656.
- Mansharamani 1997 Mansharamani, Rajesh. 1997: An overview of discrete event simulation methodologies and implementation. *Sadhana*, **22** (5), S. 611–627. DOI: 10.1007/BF02802549.
- Masik & Pöge 2013 Masik, Steffen & Pöge, Carsten. 2013: Virtuell planen – real profitieren. Wie sich mit virtueller Realität Materialflüsse in der Automobilindustrie planen lassen. *wt Werkstattstechnik online*, **103** (3), S. 184–185.
- Mautz 2012 Mautz, Rainer. 2012: *Indoor Positioning Technologies. A Survey*. Habilitation Thesis ETH Zurich. Saarbrücken: Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften. ISBN: 978-3-838-13537-3.

- Meier 2013 Meier, Klaus-Jürgen. 2013: *Virtuelle Fabrikplanung in der 3D-CAVE. Gemeinsamer Schlussbericht zum Projekt*. Institut für Produktionsmanagement und Logistik GmbH; Simplan AG. München. Verfügbar unter: <https://i-p-l.de/download/Cave-Schlussbericht.pdf>.
- Michniewicz & Reinhart 2014 Michniewicz, Joachim & Reinhart, Gunther. 2014: Cyber-physical robotics – automated analysis, programming and configuration of robot cells based on Cyber-Physical-Systems. In: Thoben, Klaus-Dieter; Busse, Matthias; Denkena, Berend & Gausemeier, Jürgen (Hrsg.): *2nd International Conference on System-Integrated Intelligence: Challenges for Product and Production Engineering*. Bremen. 02.-04.07.2014, S. 566–575.
- Michniewicz et al. 2017 Michniewicz, Joachim; Leiber, Daria; Riedl, Florian; Erdogan, Hüseyin; Hörmann, Markus; Meyer, Thomas; Koetschan, Christian; Ngoumou, Judith; Riegel, Jörg; Röhler, Marcus; Schwentner, Nicola; Windisch, Thomas & Reinhart, Gunther. 2017: Automatisierte digitale Anlagenplanung. Methode für die automatisierte Planung von Montageanlagen auf Basis digitaler Produktdaten. *wt Werkstattstechnik online*, **107** (9), S. 582–589.
- Mößmer et al. 2007 Mößmer, Helmut E.; Schedlbauer, Michael & Günthner, Willibald A. 2007: Die automobile Welt im Umbruch. In: Günthner, Willibald A. (Hrsg.): *Neue Wege in der Automobillogistik. Die Vision der Supra-Adaptivität*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 3–16. ISBN: 978-3-540-72404-9.
- Mühlböck 2017 Mühlböck, Sandra. 2017: Entwicklungsprojekte mit Portfolios steuern. *Controlling & Management Review*, **61** (3), S. 44–54. DOI: 10.1007/s12176-017-0018-2.

- Müller & Sochert 2006 Müller, Urs & Sochert, Thomas. 2006: Kinematisches Laserscanning in einem absoluten Koordinatensystem. *Geomatik Schweiz*, **104** (6), S. 343–346. DOI: 10.5169/seals-236336.
- Müller 2008 Müller, Klaus-Rainer. 2008: *IT-Sicherheit mit System. Sicherheitspyramide - Sicherheits-, Kontinuitäts- und Risikomanagement - Normen und Practices - SOA und Softwareentwicklung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner; GWV Fachverlage GmbH. ISBN: 978-3-834-80368-9.
- Müller 2015 Müller, Klaus-Rainer. 2015: *Handbuch Unternehmenssicherheit. Umfassendes Sicherheits-, Kontinuitäts- und Risikomanagement mit System*. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-658-10150-3.
- Näser & Wengel 2017 Näser, Peggy & Wengel, Hartmut. 2017: Digitale Fabrikplanung – Von der Punktwolke zum 3D-Modell. 14. Deutscher Fabrikplanungskongress. Ludwigsburg, 14.11.2017.
- Naumann et al. 2014 Naumann, Martin; Dietz, Thomas & Kuss, Alexander. 2014: Mensch-Maschine-Interaktion. In: Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael & Vogel-Heuser, Birgit (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 509–523. ISBN: 978-3-658-04681-1.
- Neuhaus 2001 Neuhaus, Ralf. 2001: Fabrikplanung mit Elektronischen Katalogen. Effizient und kundenorientiert. *wt Werkstattstechnik online*, **91** (4), S. 182–183.
- Neumann 2015 Neumann, Michael. 2015: *Methode für eine situationsbasierte Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit in der Serienmontage*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 40. Stuttgart, Univ., Diss., 2014. ISBN: 978-3-839-60816-6.

- Nyhuis 2008 Nyhuis, Peter. 2008: Wandlungsfähige Produktionssysteme. Fit sein für morgen. Garbsen, 13.02.2008, zuletzt geprüft am 17.12.2016.
Verfügbar: https://www.ifa.uni-hannover.de/fileadmin/IFA/02_Forschung/WPS/WPS_Einleitungsvortrag.pdf.
- Nyhuis et al. 2004 Nyhuis, Peter; Elscher, Andreas & Kolakowski, Michael. 2004: Prozessmodell der Synergetischen Fabrikplanung. Ganzheitliche Integration von Prozess- und Raumsicht. *wt Werkstattstechnik online*, **94** (4), S. 95–99.
- Nyhuis et al. 2008 Nyhuis, Peter; Heinen, Tobias; Reinhart, Gunther; Rimpau, Christoph; Abele, Eberhard & Wörn, Arno. 2008: Wandlungsfähige Produktionssysteme. Theoretischer Hintergrund zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. *wt Werkstattstechnik online*, **98** (1/2), S. 85–91.
- Olbrich 2001 Olbrich, Rainer. 2001: *Marketing. Eine Einführung in die marktorientierte Unternehmensführung*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-662-08497-7.
- Opresnik & Rennhak 2015 Opresnik, Marc O. & Rennhak, Carsten. 2015: *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Grundlagen unternehmerischer Funktionen*. Studienwissen kompakt. Berlin: Springer Gabler. ISBN: 978-3-662-44326-2.
- Ortner 1999 Ortner, Erich. 1999: Repository Systems. Teil 2: Aufbau und Betrieb eines Entwicklungsrepositoriums. *Informatik-Spektrum*, **3** (5), S. 351–362. DOI: 10.1007/s002870050164.

- OStrV 2010 OStrV *Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung)*. Fassung vom 19.07.2010. Verfügbar: http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&jumpTo=bgbl110s0960.pdf. Zugriff am: 05.03.2018.
- Overmeyer et al. 2016 Overmeyer, Ludger; Dohrmann, Lars; Eilert, Björn; Kleinert, Steffen & Podszus, Florian. 2016: Intelligente Flurförderzeuge durch die Implementierung kognitiver Systeme. In: Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas & ten Hompel, Michael (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd.3. Logistik*. Berlin: Springer, S. 87–118. ISBN: 978-3-662-53250-8.
- Patron 2004 Patron, Christian. 2004: *Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung*. München: Utz. Forschungsberichte iw 190. München, Techn. Univ., Diss., 2004. ISBN: 978-3-831-60474-6.
- Pawellek 2014 Pawellek, Günther. 2014: *Ganzheitliche Fabrikplanung. Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung*. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-43727-8.
- Peiker 1989 Peiker, Stefan. 1989: *Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems*. Berlin, Heidelberg: Springer. Forschungsberichte iw 23. München, Techn. Univ., Diss., 1989. ISBN: 978-3-540-51880-8.
- Peters & Hofstetter
2008 Peters, Nils & Hofstetter, Joerg S. 2008: Konzepte und Erfolgsfaktoren für Anlaufstrategien in Netzwerken der Automobilindustrie. In: Schuh, Günther; Stölzle, Wolfgang & Straube, Frank (Hrsg.): *Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen. Ein Leitfaden für die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 9–29. ISBN: 978-3-540-78406-7.

- Petzelt et al. 2010 Petzelt, Dominik; Busch, Felix; Schallow, Julian & Deuse, Jochen. 2010: Entwicklung einer Referenzplanungssystematik der digitalen Produktentstehung. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, **105** (3), S. 168–172. DOI: 10.3139/104.110278.
- Pohl 2014 Pohl, Johannes. 2014: *Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen*. München: Utz. Forschungsberichte iwv 284. München, Techn. Univ., Diss., 2013. ISBN: 978-3-831-64358-5.
- Ponn & Lindemann
2011 Ponn, Josef & Lindemann, Udo. 2011: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltungsformen*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-20579-8.
- Prem 2017 Prem, Martin 2017: BMW trotz der Enge im Stammwerk. Neue Lackiererei. *Münchner Merkur* (01.06.2017), zuletzt geprüft am 03.06.2017. Verfügbar: <https://www.merkur.de/wirtschaft/bmw-trotzt-enge-im-stammwerk-8367402.html>.
- Pulm 2004 Pulm, Udo. 2004: *Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung*. München: Dr. Hut. Produktentwicklung. München, Techn. Univ., Diss., 2004. ISBN: 978-3-899-63062-6.
- Rademacher 2014 Rademacher, Martin H. 2014: *Virtual Reality in der Produktentwicklung. Instrumentarium zur Bewertung der Einsatzmöglichkeiten am Beispiel der Automobilindustrie*. Schriften zur Medienproduktion. Wiesbaden: Springer Fachmedien. ISBN: 978-3-658-07012-0.
- Reichhardt &
Gottswinter 2003 Reichhardt, Jürgen & Gottswinter, Christian. 2003: Synergetische Fabrikplanung. Am Fallbeispiel der Neuplanung eines Automobilzulieferers. *wt Werkstattstechnik online*, **93** (4), S. 275–281.

- Reinema et al. 2013 Reinema, Christian; Pompe, Andre & Nyhuis, Peter. 2013: Agiles Projektmanagement. Einsatzpotenziale und Handlungsbedarfe im Rahmen von Fabrikplanungsprojekten. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, **108** (3), S. 113–117. DOI: 10.3139/104.110903.
- Reinhart et al. 2003 Reinhart, Gunther; Zäh, Michael F.; Patron, Christian; Doil, Fabian; Alt, Thomas & Meier, Peter. 2003: Augmented Reality in der Produktionsplanung. *wt Werkstattstechnik online*, **93** (9), S. 651–653.
- Reinhart et al. 2013 Reinhart, Gunther; Engelhardt, Philipp; Geiger, Florian; Philipp, Tobias R.; Wahlster, Wolfgang; Zühlke, Detlef; Becker, Tilman; Privu; Bogdan; Hodek, Stefan; Scholz-Reiter, Bernd; Thoben, Klaus-Dieter; Gorltd, Chistian; Hribenik, Karl A.; Lappe, Dennis & Veigt, Marius. 2013: Cyber-Physische Produktionssysteme. Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik. *wt Werkstattstechnik online*, **103** (2), S. 84–89.
- Remondino 2003 Remondino, Fabio. 2003: From Point Cloud to Surface: the Modeling and Visualization Problem. In: ETH Zürich (Hrsg.): *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IAPRSSIS*. International Workshop on Visualization and Animation of Reality-based 3D Models. Tarasp-Vulpera, Schweiz. 24.-28.02.2003.
- Renner 2007 Renner, Ingo. 2007: *Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil*. München: Dr. Hut. Produktentwicklung. München, Techn. Univ., Diss., 2007. ISBN: 978-3-899-63567-6.

- Richter 2009 Richter, Dirk. 2009: Übereinstimmungsproblematik zwischen der Digitalen und der Realen Fabrik - Potenziale, Herausforderungen und Lösungsansätze. In: Schenk, Michael (Hrsg.): *Digitales Engineering zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme. 6. Fachtagung zur Virtual Reality*. 12. IFF-Wissenschaftstage 2009. Magdeburg. 16.-18.06.2009, S. 163–170.
- Rietdorf 2005 Rietdorf, Andreas. 2005: *Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip*. München: Bayerische Akademie der Wissenschaften. Berlin, Techn. Univ., Diss., 2004. ISBN: 978-3-769-65021-1.
- Roscher 2008 Roscher, Jörg. 2008: *Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie*. Universität Stuttgart, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, 2008. Stuttgart, Univ., Diss., 2007. urn:nbn:de:bsz:93-opus-34021.
- Roubanov 2014 Roubanov, Daniil. 2014: Mechanikkonstruktion (M-CAD). In: Eigner, Martin; Roubanov, Daniil & Zafirov, Radoslav (Hrsg.): *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Berlin: Springer Vieweg, S. 115–136. ISBN: 978-3-662-43815-2.
- Runde & Cannarozzi 2015 Runde, Christoph & Cannarozzi, Marc. 2015: *Virtuelle Techniken in der Fabrikplanung. Anwendungen und Technologien*. Fellbach, zuletzt geprüft am 06.01.2018. Verfügbar: <https://www.vdc-fellbach.de/fileadmin/assets/Publikationen/Whitepaper/2015-VDC-Whitepaper-Virtuelle-Techniken-in-der-Fabrikplanung.pdf>.
- Runde & Cannarozzi 2016 Runde, Christoph & Cannarozzi, Marc. 2016: Virtuelle Techniken in der Fabrikplanung. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, **111** (4), S. 183–186. DOI: 10.3139/104.111484.

- Russwurm 2013 Russwurm, Siegfried. 2013: Software: Die Zukunft der Industrie. In: Sendler, Ulrich (Hrsg.): *Industrie 4.0. Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 21–36. ISBN: 978-3-642-36916-2.
- Rusu & Cousins 2011 Rusu, Radu B. & Cousins, Steve. 2011: 3D is here: Point Cloud Library (PCL). In: IEEE (Hrsg.): *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Shanghai, China. 09.-13.05.2011.
- Rutz 2011 Rutz, Michael. 2011: Betriebsnahes Engineering mit Laserscanning und Georeferenzierung bei der BASF SE. In: Schenk, Michael (Hrsg.): *Kooperation im Anlagenbau - Die Digitale Anlage*. Magdeburg: Docupoint, S. 36–49, zuletzt geprüft am 13.08.2017. Verfügbar: <https://www.iff.fraunhofer.de/content/dam/iff/de/dokumente/publikationen/industriearbeitskreis-anlagenbau-2011-16-arbeitsbericht-fraunhofer-iff.pdf>.
- Schack 2008 Schack, Rainer. 2008: *Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik*. München: Utz. Forschungsberichte iw 207. München, Techn. Univ., Diss., 2007. ISBN: 978-3-831-60748-8.
- Scheer 1991 Scheer, August-Wilhelm. 1991: Wie vermeidet man CIM-Ruinen? — Architektur für eine sichere CIM-Einführung. In: Scheer, August-Wilhelm (Hrsg.): *CIM im Mittelstand. Fachtagung, Saarbrücken, 20.-21. Februar 1991*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1–14. ISBN: 978-3-540-53717-5.
- Scheifele 2015 Scheifele, Dieter. 2015: Virtuelle Inbetriebnahme von Maschinen und Anlagen. Stuttgart, 15.12.2015, zuletzt geprüft am 02.05.2016. Verfügbar: <http://www.isg-stuttgart.de/de/isg-virtuos/virtuos-downloads.html>.

- Schenk et al. 2014 Schenk, Michael; Wirth, Siegfried & Müller, Egon. 2014: *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik*. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-642-05458-7.
- Schiffmann et al. 2011 Schiffmann, Wolfram; Bähring, Helmut & Hönig, Udo. 2011: *Technische Informatik 3. Grundlagen der PC-Technologie*. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-16811-6.
- Schiller & von Alten
2014 Schiller, Thomas & von Alten, Matthias. 2014: Verbesserte Preisplanung als wirksamer Hebel zur Steigerung der Profitabilität. Innovative Analytics-Ansätze sorgen für einen nachhaltigen Wettbewerbsvorteil. In: Deloitte (Hrsg.): *Die Erfolgsspur in volatilen Märkten. Flexibilität und Risikomanagement werden wichtiger denn je*. Sonderbeilage in Automobilwoche. München, S. 8.
- Schindler 2016 Schindler, Matthias. 2016: Vernetzung der realen und der virtuellen Welt in der Produktionsplanung. In: Roth, Armin (Hrsg.): *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, S. 133–149. ISBN: 978-3-662-48504-0.
- Schindler et al. 2015 Schindler, Matthias; Hilgenberg, Dirk; Patron, Christian & Engelhardt, Philipp. 2015: Integrierte Planung durch die Vernetzung der realen und der virtuellen Welt. In: Reinhart, Gunther; Scholz-Reiter, Bernd; Wittenstein, Manfred & Zühlke, Detlef (Hrsg.): *Intelligente Vernetzung in der Fabrik. Industrie 4.0 Umsetzungsbeispiele für die Praxis*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 121–130. ISBN: 978-3-839-60930-9.
- Schlick et al. 2010 Schlick, Christopher M.; Luczak, Holger & Bruder, Ralph. 2010: *Arbeitswissenschaft*. Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-540-78332-9.

- Schließmann 2017 Schließmann, Alexander. 2017: iProduction, die Mensch-Maschine-Kommunikation in der Smart Factory. In: Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas & ten Hompel, Michael (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4. Allgemeine Grundlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 171–200. ISBN: 978-3-662-53253-9.
- Schmidt 2015 Schmidt, Jürgen. 2015: *Basiswissen Mathematik. Der smarte Einstieg in die Mathematikausbildung an Hochschulen*. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer Spektrum. ISBN: 978-3-662-43545-8.
- Schmitt & Glöckner
2012 Schmitt, Robert & Glöckner, Henrik. 2012: Identifikation von Wandlungsbedarf. Eine Kernaufgabe des unternehmerischen Qualitätsmanagements. *wt Werkstattstechnik online*, **102** (11/12), S. 801–806.
- Schmitt 2014 Schmitt, Robert. 2014: Cyber Physical Production Systems: Ohne Sensorik keine Industrie 4.0. ITG/GMA Fachtagung. Nürnberg, 04.06.2014.
- Schmitt 2015 Schmitt, Robert. 2015: *Anlaufmanagement - Begriffe und Definitionen*. Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag. ISBN: 978-3-863-59345-2.
- Schneeweiß 1991 Schneeweiß, Christoph. 1991: *Planung. Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen*. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-540-54000-7.
- Schneeweiß 1997 Schneeweiß, Christoph. 1997: *Einführung in die Produktionswirtschaft*. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-540-62585-8.

- Schneider & Rieck 2012 Schneider, Reiner A. & Rieck, Klaus. 2012: Komplexität in der Automobilindustrie am Beispiel Baukastenstrategie. In: Goltz, Ursula & Appelrath, Hans-Jürgen (Hrsg.): *Informatik 2012*. Was bewegt uns in der/die Zukunft? 42. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI). Braunschweig. 16.-21.09.2012. Bonn: Köllen, S. 863–872. ISBN: 978-3-885-79602-2.
- Schneider 2015 Schneider, Stephan. 2015: *Agile Prozessplanung im Produktentstehungsprozess am Beispiel der Motorenproduktion*. Aachen: Shaker. Schriftenreihe Industrial Engineering 16. Dortmund, Techn. Univ., Diss., 2015. ISBN: 978-3-844-03583-4.
- Schneider et al. 2012 Schneider, Stephan; Fallböhrer, Markus; Schallow, Julian; Hartung, Jochen & Deuse, Jochen. 2012: Agile Prozessplanung im Produktentstehungsprozess. Softwareentwicklung als Lösungshilfe für permanente Anpassungsbedarfe in der Prozessplanung. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, **107** (3), S. 158–162. DOI: 10.3139/104.110718.
- Scholz-Reiter & Lütjen 2009 Scholz-Reiter, Bernd & Lütjen, Michael. 2009: Digital Factory - Ansätze integrierter Produkt- und Prozessgestaltung. *Industrie Management*, **25** (1), S. 19–22.
- Schönheit & Kuhnert 2017 Schönheit, Martin & Kuhnert, Tobias. 2017: Smart Factory - Die Planung der intelligenten Fabrik. Wie die Arbeitsräume der Zukunft geschaffen werden. *wt Werkstattstechnik online*, **107** (4), S. 219–224.

- Schraft et al. 1999 Schraft, Rolf D.; Eversheim, Walter; Tonshoff, Hans K.; Milberg, Joachim & Reinhart, Gunther. 1999: Planung von Produktionssystemen. In: Eversheim, Walter & Schuh, Günther (Hrsg.): *Produktion und Management 3. Gestaltung von Produktionssystemen*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 153–189. ISBN: 978-3-540-65453-7.
- Schroth 2013 Schroth, Georg. 2013: *Mobile Visual Location Recognition*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Medientechnik, 2013. München, Techn. Univ., Diss., 2013. urn:nbn:de:bvb:91-diss-20130708-1137957-0-4.
- Schuh & Stich 2012 Schuh, Günther & Stich, Volker. 2012: *Produktionsplanung und -steuerung 1. Grundlagen der PPS*. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-642-25422-2.
- Schuh et al. 2005 Schuh, Günther; Kampker, Achim & Franzkoch, Bastian. 2005: Anlaufmanagement. Kosten senken – Anlaufzeit verkürzen – Qualität sichern. *wt Werkstattstechnik online*, **95** (5), S. 405–409.
- Schuh et al. 2007 Schuh, Günther; Gottschalk, Sebastian; Lösch, Felix & Wesch, Cathrin. 2007: Fabrikplanung im Gegenstromverfahren. *wt Werkstattstechnik online*, **97** (4), S. 195–199.
- Schuh et al. 2014 Schuh, Günther; Potente, Till; Thomas, Christina & Hauptvogel, Annika. 2014: Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch cyber-physische Systeme. In: Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael & Vogel-Heuser, Birgit (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 277–295. ISBN: 978-3-658-04681-1.

- Schwaber & Sutherland 2016 Schwaber, Ken & Sutherland, Jeff. 2016: *Der Scrum Guide. Der gültige Leitfaden für Scrum: Die Spielregeln*, zuletzt geprüft am 29.10.2016. Verfügbar: <http://www.scrumguides.org/docs/scrumguide/v2016/2016-Scrum-Guide-German.pdf>.
- Seebach 2011 Seebach, Hella. 2011: *Konstruktion selbst-organisierender Softwaresysteme*. Berlin: Logos. Augsburg, Univ., Diss., 2011. ISBN: 978-3-832-53033-4.
- Seidel 2005 Seidel, Michael. 2005: *Methodische Produktplanung. Grundlagen, Systematik und Anwendung im Produktentstehungsprozess*. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe. Informationsmanagement im Engineering 1. Karlsruhe, Univ., Diss., 2005. ISBN: 978-3-937-30051-1.
- Seifert 1923 Seifert, R. 1923: *G.H.A. Kröhnkes Taschenbuch zum Abstecken von Bögen auf Eisenbahn- und Weglinien*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner. ISBN: 978-3-663-15239-2.
- Sendler 2009 Sendler, Ulrich. 2009: *Das PLM-Kompendium. Referenzbuch des Produkt-Lebenszyklus-Managements*. Berlin: Springer. ISBN: 978-3-540-87897-1.
- Sirk & Rang 1969 Sirk, Hugo & Rang, Otto. 1969: *Einführung in die Vektorrechnung. Für Naturwissenschaftler, Chemiker und Ingenieure*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-53342-6.
- Spath 2013 Spath, Dieter. 2013: Einführung in Trends der Nutzung neuer Informationstechnologien. In: Westkämper, Engelbert; Spath, Dieter; Constantinescu, Carmen & Lentjes, Joachim (Hrsg.): *Digitale Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 199–200. ISBN: 978-3-642-20258-2.

- Spillner et al. 2009 Spillner, Andrea; Bracht, Uwe & Röhl, Horst. 2009: Umsetzungsstand der Digitalen Fabrik - Ergebnisse einer Umfrage zur Fabrikplanung bei großen deutschen Automobilherstellern. In: Schenk, Michael (Hrsg.): *Digitales Engineering zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme. 6. Fachtagung zur Virtual Reality*. 12. IFF-Wissenschaftstage 2009. Magdeburg. 16.-18.06.2009, S. 173–183.
- Spitzweg 2009 Spitzweg, Michael. 2009: *Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen*. München: Utz. Forschungsberichte iw 233. München, Techn. Univ., Diss., 2009. ISBN: 978-3-831-60931-4.
- Stanke & Berndes 1997 Stanke, Alexander & Berndes, Stefan. 1997: Simultaneous Engineering als Strategie zur Überwindung von Effizienzsenken. In: Bullinger, Hans-Jörg & Warschat, Joachim (Hrsg.): *Forschungs- und Entwicklungsmanagement. Simultaneous Engineering, Projektmanagement, Produktplanung, Rapid Product Development*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, S. 15–27. ISBN: 978-3-663-05947-9.
- Sternberg & Kersten
2007 Sternberg, Harald & Kersten, Thomas P. 2007: Comparison of Terrestrial Laser Scanning Systems in Industrial as-built Documentation Applications. In: Grün, Armin & Kahmen, Heribert (Hrsg.): *Optical 3-D Measurement Techniques*. 8th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques. Zürich. 09.-12.07.2007, S. 389–397.
- Stetter 2011 Stetter, Rainer. 2011: Software im Maschinenbau – lästiges Anhängsel oder Chance zur Marktführerschaft? München, 2011, zuletzt geprüft am 03.07.2014. Verfügbar: http://www.software-kompetenz.de/servlet/is/21700/Stetter-SW_im_Maschinenbau.pdf.

- Stieglitz et al. 2017 Stieglitz, Stefan; Potthoff, Tobias & Kißmer, Tobias. 2017: Digital Nudging am Arbeitsplatz. Ein Ansatz zur Steigerung der Technologieakzeptanz. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, **54** (5), S. 637–648. DOI: 10.1365/s40702-017-0367-5H.
- Thomeczek 2016 Thomeczek, Sebastian. 2016: Echtzeitanforderungen an Virtual Reality Systeme – Interaktive Anwendungen mit sechs Freiheitsgraden. In: Halang, Wolfgang A. & Unger, Herwig (Hrsg.): *Internet der Dinge. Echtzeit 2016: Fachtagung des gemeinsamen Fachausschusses Echtzeitsysteme von Gesellschaft für Informatik e.V. (GI), VDI /VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) und Informationstechnischer Gesellschaft im VDE (ITG) Boppard, 17. und 18. November 2016*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 101–106. ISBN: 978-3-662-53442-7.
- Thommen et al. 2017 Thommen, Jean-Paul; Achleitner, Ann-Kristin; Gilbert, Dirk U.; Hachmeister, Dirk & Kaiser, Gernot. 2017: *Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht*. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Gabler. ISBN: 978-3-658-07767-9.
- Tipler & Mosca 2015 Tipler, Paul A. & Mosca, Gene. 2015: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. Lehrbuch. Berlin: Springer Spektrum. ISBN: 978-3-642-54165-0.
- Tonn & Bringmann 2017 Tonn, Christian & Bringmann, Oliver. 2017: Punktwolken zu BIM – Methoden der Bauteilanpassung in Laserscannerdaten. Point Clouds to BIM – Methods for Building Parts Fitting in Laser Scan Data. *AVN - Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, **124** (1-2), S. 21–26.

- Tristam 1986 Tristam, V. 1986: Der PC - in der Fertigungsindustrie. In: Warnecke, Hans-Jürgen (Hrsg.): *Produktionsplanung, Produktionssteuerung in der CIM-Realisierung. 18. IPA-Arbeitstagung, 22. und 23. April 1986 in Stuttgart*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 143–169. ISBN: 978-3-540-16674-0. DOI: 10.1007/978-3-662-12804-6_7.
- Uhlmann et al. 2015 Uhlmann, Eckart; Laghmouchi, Abdelhakim & Geisert, Claudio. 2015: CPS-basiertes Life Cycle Monitoring und Management. Steigerung der Anlagenverfügbarkeit durch Verknüpfung von Zustands-, Service- und Produktdaten. *wt Werkstattstechnik online*, **105** (7/8), S. 525–529.
- Vajna et al. 2009 Vajna, Sandor; Bley, Helmut; Hehenberger, Peter; Weber, Christian & Zeman, Klaus. 2009: *CAX für Ingenieure. Eine praxisbezogene Einführung*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-540-36038-4.
- VDI GMA 2013 VDI GMA. 2013: *Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation. Thesen und Handlungsfelder*. VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V. Düsseldorf, zuletzt geprüft am 29.10.2017. Verfügbar: https://www.vdi.de/uploads/media/Stellungnahme_Cyber-Physical_Systems.pdf.
- VDI 2634-2 VDI-Richtlinie 2634 Blatt 2:2012-08. *Optische 3-D-Messsysteme - Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung*.
- VDI 2870-1 VDI-Richtlinie 2870 Blatt 1:2012-06. *Ganzheitliche Produktionssysteme - Grundlagen, Einführung und Bewertung*.
- VDI 3633-1 VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1:2014-12. *Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen Grundlagen*.
- VDI 4499-1 VDI-Richtlinie 4499 Blatt 1:2008-02. *Digitale Fabrik Grundlagen*.

- VDI 5200-1 VDI-Richtlinie 5200 Blatt 1:2011-02. *Fabrikplanung - Planungsvorgehen*.
- VDI 5620-1 VDI-Richtlinie 5620 Blatt 1:2015-08. *Reverse Engineering von Geometriedaten*.
- Verl et al. 2012 Verl, Alexander; Lechler, Armin & Schlechtendahl, Jan. 2012: Glocalized cyber physical production systems. *Production Engineering*, **6** (6), S. 643–649. DOI: 10.1007/s11740-012-0418-2.
- Versteegen 2004 Versteegen, Gerhard. 2004: Die Formulierung von Anforderungen. In: Heßeler, Alexander; Hood, Colin; Missling, Christian; Stücka, Renate & Versteegen, Gerhard (Hrsg.): *Anforderungsmanagement. Formale Prozesse, Praxiserfahrungen, Einführungsstrategien und Toolauswahl*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 39–64. ISBN: 978-3-642-62388-2.
- Vincze et al. 2008 Vincze, Markus; Olufs, Sven; Einramhof, Peter & Wildenauer, Horst. 2008: Roboternavigation in Büros und Wohnungen. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, **125** (1-2), S. 25–32. DOI: 10.1007/s00502-008-0499-y.
- VMT 2012 VMT. 2012: *Große Objekte präzise vermessen. Industrielle Messtechnik im internationalen Einsatz*. VMT GmbH Industrievermessung, zuletzt geprüft am 04.11.2017. Verfügbar: http://ims.vmt-gmbh.de/wp-content/uploads/2012/04/7_3a.pdf.
- Vogel-Heuser 2014 Vogel-Heuser, Birgit. 2014: Herausforderungen und Anforderungen aus Sicht der IT und der Automatisierungstechnik. In: Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael & Vogel-Heuser, Birgit (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 37–48. ISBN: 978-3-658-04681-1.

- Vollmer 2002 Vollmer, Lars. 2002: Virtualisierung und Digitalisierung bei der Fabrikplanung. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, **97** (1-2), S. 24–27.
- Wagner 2015 Wagner, Reinhard. 2015: *Projektmanagement in der Automobilindustrie. Herausforderungen und Erfolgsfaktoren. Essentials*. Wiesbaden: Springer Gabler. ISBN: 978-3-658-08812-5.
- Waltl & Wildemann 2014 Waltl, Hubert & Wildemann, Horst. 2014: Der Modulare Produktionsbaukasten. Teil 2. *Productivity Management*, **19** (5), S. 10–12.
- Waltl & Wildemann 2015 Waltl, Hubert & Wildemann, Horst. 2015: *Modularisierung der Produktion in der Automobilindustrie*. TCW, 30. München: TCW Transfer-Centrum. ISBN: 978-3-941-96748-9.
- Warnecke 1999 Warnecke, Hans-Jürgen. 1999: Innovation durch Information. Unternehmen modellieren, Abläufe simulieren und Ergebnisse visualisieren. In: Nagel, Kurt; Erben, Roland F. & Piller, Frank T. (Hrsg.): *Produktionswirtschaft 2000. Perspektiven für die Fabrik der Zukunft*. Wiesbaden: Gabler, S. 75–81. ISBN: 978-3-322-89483-0.
- Wehmann et al. 2007 Wehmann, Wolffried; van Zyl, Christopher; Kramer, Holger; Widiger, Daniel & Zimmermann, Ronny. 2007: Einrichtung eines Prüffeldes zur Genauigkeitsbestimmung von Laserscannern und Untersuchung des Scanners LMS-Z360i der Firma Riegler in diesem Testfeld. *zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, **132** (3), S. 175–180.
- Weitkemper 2015 Weitkemper, Uwe. 2015: Bauzeichnungen. In: Vismann, Ulrich (Hrsg.): *Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln*. Wiesbaden, Berlin: Springer Vieweg; Beuth, S. 41–71. ISBN: 978-3-658-01688-3.

- Wenzel et al. 2008 Wenzel, Sigrid; Collisi-Böhmer, Simone; Pitsch, Holger; Rose, Oliver & Weiß, Matthias. 2008: *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Planung und Durchführung von Simulationsstudien*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-540-35272-3.
- Werth 2007 Werth, Lutz. 2007: Zukunftsweisende Farbtrends und Hightech-Klarlacke. Innovationen in der Automobillackierung. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, **109** (07-08), S. 626–631. DOI: 10.1007/BF03221904.
- Westermann 2008 Westermann, Thomas. 2008: *Mathematik für Ingenieure. Ein anwendungsorientiertes Lehrbuch*. Berlin: Springer. ISBN: 978-3-540-77730-4.
- Westkämper & Westkämper, Engelbert & Niemann, Jörg. 2009: Digitale Produktion -
Niemann 2009 Herausforderung und Nutzen. In: Bullinger, Hans-Jörg; Spath, Dieter; Warnecke, Hans-Jürgen & Westkämper, Engelbert (Hrsg.): *Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 515–529. ISBN: 978-3-540-87595-6.
- Westkämper 2002 Westkämper, Engelbert. 2002: Die Digitale Fabrik - Kontinuierliche und Partizipative Planung. In: Milberg, Joachim & Schuh, Günther (Hrsg.): *Erfolg in Netzwerken*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 245–260. ISBN: 978-3-642-62853-5.
- Westkämper 2014 Westkämper, Engelbert. 2014: Fertigungs- und Fabrikbetrieb. In: Grote, Karl-Heinrich; Feldhusen, Jörg & Dubbel, Heinrich (Hrsg.): *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin: Springer Vieweg, S. S 124–S 145. ISBN: 978-3-642-38890-3.

- Westkämper et al. 2000 Westkämper, Engelbert; Zahn, Erich; Balve, Patrick & Tilebein, Meike. 2000: Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. Ein Bezugsrahmen für die Unternehmensentwicklung im turbulenten Umfeld. *wt Werkstattstechnik online*, **90** (1-2), S. 22–26.
- Westkämper et al. 2001 Westkämper, Engelbert; Bischoff, Jürgen; von Briel, Ralf & Dürr, Mark. 2001: Fabrikdigitalisierung. Ein angepasster Ansatz für die digitale Fabrikplanung in bestehenden Fabriken und Gebäuden. *wt Werkstattstechnik online*, **91** (6), S. 304–307.
- Westkämper et al. 2003 Westkämper, Engelbert; Pfeffer, Matthias & Rosenbusch, Christian. 2003: Laserscanning. Unterstützung der digitalen Fabrik durch Strukturdatenerfassung mit Hilfe eines 3D-Laserscanningsystems. *wt Werkstattstechnik online*, **93** (3), S. 164–166.
- Westkämper et al. 2006 Westkämper, Engelbert; Stolz, Martin & Effenberger, Ira. 2006: Automatische Segmentierung von Messpunktwolken in regelgeometrische Elemente (Automatic Segmentation of Measurement Point Clouds to Geometric Primitives). *TM - Technisches Messen*, **73** (1), S. 60–66. DOI: 10.1524/teme.2006.73.1.60.
- Wiech 2013 Wiech, Thomas. 2013: Kontinuierliche Verbesserung als „heißer Kern“ eines schlanken Produktionssystems. In: Günthner, Willibald A. & Boppert, Julia (Hrsg.): *Lean Logistics. Methodisches Vorgehen und praktische Anwendung in der Automobilindustrie*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 323–332. ISBN: 978-3-642-37325-1.
- Wiedemann 2004 Wiedemann, Albert. 2004: *Handbuch Bauwerksvermessung. Geodäsie, Photogrammetrie, Laserscanning*. Bauhandbuch. Basel: Birkhäuser. ISBN: 978-3-034-89615-3.

- Wiendahl & Hernández 2002 Wiendahl, Hans-Peter & Hernández, Roberto. 2002: Fabrikplanung im Blickpunkt. Herausforderung Wandlungsfähigkeit. *wt Werkstattstechnik online*, **92** (4), S. 133–138.
- Wiendahl et al. 2001a Wiendahl, Hans-Peter; Hernández, Roberto; Lopitzsch, Jens R. & Hamacher, Oliver. 2001: „Grüne-Wiese-Planung“ – Alles ist möglich! Best in Class durch Wandlungsfähigkeit und Logistikperformance. *wt Werkstattstechnik online*, **91** (4), S. 197–201.
- Wiendahl et al. 2001b Wiendahl, Hans-Peter; Reichhardt, Jürgen & Hernández, Roberto. 2001: Kooperative Fabrikplanung. Wandlungsfähigkeit durch zielorientierte Integration von Prozess- und Bauplanung. *wt Werkstattstechnik online*, **91** (4), S. 186–191.
- Wiendahl et al. 2014 Wiendahl, Hans-Peter; Reichardt, Jürgen & Nyhuis, Peter. 2014: *Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*. München: Hanser. ISBN: 978-3-446-43892-7.
- Wiesinger & Housein 2002 Wiesinger, Georg & Housein, Giourai. 2002: Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten. Wettbewerbsvorteile durch ein anforderungsgerechtes Anlaufmanagement. *wt Werkstattstechnik online*, **92** (10), S. 505–508.
- Wilke 2006 Wilke, Michael. 2006. *Wandelbare automatisierte Materialflusssysteme für dynamische Produktionsstrukturen*. München: Utz. Fördertechnik Materialfluss Logistik. München, Techn. Univ., Diss., 2006. ISBN: 978-3-831-60591-0.
- Willnecker 2001 Willnecker, Ulrich. 2001: *Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen*. Forschungsberichte iw b, Bd. 146. München: Utz. ISBN: 978-3-896-75891-0.

- Wimmelbücker 2017 Wimmelbücker, Stefan 2017: Drei Antriebsvarianten der wichtigsten Modelle: BMW elektrifiziert die Kernbaureihen. *Automobilwoche* (07.08.2017), 15, zuletzt geprüft am 26.08.2017. Verfügbar: <http://www.automobilwoche.de/article/20170807/nachrichten/170809909/drei-antriebsvarianten-der-wichtigsten-modelle-bmw-elektrifiziert-die-kernbaureihen/>.
- Windelband 2016 Windelband, Lars. 2016: Industrie 4.0 ein Assistenzsystem für die Facharbeit in der Produktion? In: Frenz, Martin; Schlick, Christopher & Unger, Tim (Hrsg.): *Wandel der Erwerbsarbeit. Berufsbildgestaltung und Konzepte für die gewerblich-technischen Didaktiken*. Berlin, Münster: Lit, S. 77–94. ISBN: 978-3-643-13608-4.
- Winner et al. 2015 Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix & Singer, Christina. 2015: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-658-05733-6.
- Wiora 2001 Wiora, Georg. 2001: *Optische 3D-Messtechnik: Präzise Gestaltvermessung mit einem erweiterten Streifenprojektionsverfahren*. Ruprechts-Karls-Universität Heidelberg, Interdisziplinäres Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen, 2001. Heidelberg, Univ., Diss., 2001. urn:nbn:de:bsz:16-opus-18088.
- Wirth et al. 2001 Wirth, Siegfried; Gäse, Thomas & Günther, Uwe. 2001: Partizipative simulationsgestützte Layoutplanung. Ein neuer integrierter Ansatz zur Layoutplanung von Produktionssystemen. *wt Werkstattstechnik online*, **91** (6), S. 328–332.

- Wirth et al. 2012 Wirth, Siegfried; Schenk, Michael & Müller, Egon. 2012: Wandlungsfähige und ressourceneffiziente Fabriken. Konsequenzen für Fabrikplanung und -betrieb sowie Unternehmen. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, **107** (6), S. 391–397. DOI: 10.3139/104.110760.
- Wittek 2013 Wittek, Kai. 2013: *Standortübergreifende Programmplanung in flexiblen Produktionsnetzwerken der Automobilindustrie*. Produktion und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien. ISBN: 978-3-658-01837-5.
- Womack et al. 1992 Womack, James P.; Jones, Daniel T. & Roos, Daniel. 1992: *Die zweite Revolution in der Autoindustrie. Konsequenzen aus der weltweiten Studie aus dem Massachusetts Institute of Technology*. Frankfurt/Main, New York: Campus. ISBN: 978-3-593-34548-2.
- Wünsch 2008 Wünsch, Georg. 2008: *Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme*. München: Utz. Forschungsberichte iwv 215. München, Techn. Univ., Diss., 2007. ISBN: 978-3-831-60795-2.
- Wünsch 2013 Wünsch, Georg. 2013: Simulation für die Optimierung des Energieverbrauchs in Verpackungsmaschinen. *Economic Engineering*, **51** (6), S. 30–31.
- Zäh et al. 2004 Zäh, Michael F.; Fusch, Thomas & Neise, Patrick. 2004: Integrative Fabrikplanung mit virtuellen Produktionsmodellen. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, **99** (1-2), S. 54–57. DOI: 10.3139/104.100740.
- Zäh et al. 2005 Zäh, Michael F.; Cisek, Robert & Rimpau, Christoph. 2005: Planung kontinuierlicher Strukturadaptionen. Nutzung innerbetrieblicher Mobilitätspotentiale. *wt Werkstattstechnik online*, **95** (5), S. 383–387.

- Zeilhofer-Ficker 2010 Zeilhofer-Ficker, Irene. 2010: *Produktionsanlauf (Production Ramp-Up). Von der Entwicklung zur stabilen Serienproduktion*. München: GBI-Genios. ISBN: 978-3-737-91102-3.
- Zerres 2010 Zerres, Christopher. 2010: *Preis-Promotions im Automobilverkauf*. Wiesbaden: Gabler; GWV Fachverlage GmbH. Forum Marketing. Kassel, Univ., Diss., 2010. ISBN: 978-3-834-92315-8.
- Zhou et al. 2012 Zhou, Guoqing; Yang, Jiazhi; Li, Xin & Yang, Xiaoping. 2012: Advances of Flash LiDAR Development onboard UAV. In: Shortis, Mark; Paparoditis, Nicolas & Mallet, Clément (Hrsg.): *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Volume XXXIX-B3*. ISPRS Congress Melbourne 2012. Melbourne, Australien. 25.08.–01.09.2012, S. 193–198.
- Zühlke 2009 Zühlke, Detlef. 2009: SmartFactory – A Vision becomes Reality. In: IFAC (Hrsg.): *Proceedings of the 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*. Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM). Moskau, Russland. 03.-05.06.2009, S. 31–39. DOI: 10.3182/20090603-3-RU-2001.0578.

Produzierende Unternehmen erweitern ihr Angebot, um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. Aufgrund der Verkürzung der Produktionsdauern werden Fertigungsressourcen für unterschiedliche Produkte eingesetzt. Neue Produkte und Fertigungstechnologien gilt es zunehmend in existierende Produktionssysteme, sogenannte Brownfields, zu integrieren. Somit avancieren Integrationen zur Hauptaufgabe der Planung. Dies resultiert in einem steigenden Qualitätsanspruch an die Planung. Während der Absicherung produktionstechnischer Konzepte gewinnt Effizienz zugleich an Bedeutung.

Diese Abhandlung erarbeitet Defizite etablierter Planungsvorgehensweisen in der Grundlagenermittlung und in der Interaktion zwischen verschiedenen Disziplinen. Ausgehend davon wird eine innovative Methode entworfen, um die Planung von Integrationen zu verbessern. Die 3D-Digitalisierung mittels stationären 3D-Laserscannern wird inklusive Farbfotos appliziert, um ein aktuelles geometrisches Modell eines bestehenden Produktionssystems aufzunehmen. Dies erfolgt unter dem Gebot hoher Effizienz und Genauigkeit. Die aus der 3D-Digitalisierung resultierende farbige Punktwolke dient als Modell für sämtliche nachfolgenden Planungsschritte. Die Validierung der Methode erfolgt anhand realer Planungsfälle an Standorten weltweit.

ISBN 978-3-8396-1583-6



FRAUNHOFER VERLAG