Institut für
Maschinelle Anlagentechnik
und Betriebsfestigkeit

Innovationen der
Fabrikplanung und -organisation
Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht

Band 42

Marc Schlegel

Fabrikplanung 5.0

Durchgängige Layoutplanung in
und mit der Virtuellen Realität

Technische Universität Clausthal

SHAKER VERLAG

Fabrikplanung 5.0

Durchgängige Layoutplanung in und mit der Virtuellen Realität

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Marc Schlegel, M.Sc.

aus Köln

genehmigt von der Fakultät für

Mathematik/Informatik und Maschinenbau
der Technischen Universität Clausthal

Vorsitzender der Prüfungskommission:
Prof. Dr.-Ing. Hubert Schwarze

Hauptberichterstatter:
Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht

Berichterstatter:
Prof. Dr. rer. nat. Jörg P. Müller

Tag der mündlichen Prüfung: 04.05.2022

Innovationen der Fabrikplanung und -organisation

Band 42

Marc Schlegel

Fabrikplanung 5.0

Durchgängige Layoutplanung in und
mit der Virtuellen Realität

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8773-4
ISSN 1615-5211

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Nur die erfolgreiche Gestaltung und Weiterentwicklung industrieller Wertschöpfung kann auf Dauer unseren Lebensstandard und die Errungenschaften der sozialen Marktwirtschaft absichern. Die Produktion bildet nach wie vor das Rückgrat einer modernen, im globalen Wettbewerb stehenden Industrie-, Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft. Umfassendes Wissen und stetig neue Erkenntnisse auf den Gebieten der Fabrikplanung und Produktionsorganisation sind existentiell notwendig.

Die unternehmerische Bedeutung der Produktionsplanung ist im gleichen Maße gestiegen, wie sich die Innovationszyklen von Produkten, Fertigungs- und Logistiksystemen sowie der Arbeitsorganisation verkürzt haben. Um die vorhandene Marktposition zu festigen oder um Wettbewerbsvorteile zu erlangen, muss jede Unternehmensleitung neben dem Produkt und der Technologie auch die Produktionsstrukturen ständig analysieren, sie rechtzeitig an die zu erwartenden Marktentwicklungen anpassen und gegebenenfalls erneuern.

Die erhöhten Ansprüche an die Gestaltung und Wandlungsfähigkeit von Produktionsstrukturen im turbulenten Umfeld erfordern ein effizientes Projektmanagement und eine durchgehende rechnergestützte Planungsunterstützung. In der vorliegenden Reihe – Innovationen der Fabrikplanung und -organisation – sollen neue Methoden und Instrumente zur Planung und Optimierung von Produktionssystemen und -abläufen einer breiten Leserschaft in verständlicher Form vorgestellt werden. Es sind Forschungsergebnisse, die häufig in enger Zusammenarbeit mit der Industrie am Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der Technischen Universität Clausthal im Bereich Anlagenprojektierung und Materialflusslogistik entstanden sind.

Ein gemeinsamer systemtechnischer Ansatz kennzeichnet die Fachgebiete Anlagenplanung und Logistik, deren technische, informationstechnische, organisatorische und wirtschaftliche Fragestellungen ganzheitlich und zukunftsweisend zu beantworten sind. Die angestrebten Lösungsstrategien sind im Rahmen des gesamten Produkt- und Produktionsentstehungsprozesses zu sehen und beinhalten sowohl eine theoretische, planerische und simulierende

Seite als auch die konkrete Ausgestaltung von Prozessketten, Organisationsformen und Abläufen.

In der Vergangenheit wurden Produktionsstrategien, Programme und Teilebedarfe nicht selten aufgrund persönlicher Einschätzung und Erfahrung festgelegt. Heute sind mit Hilfe mathematischer, wissensbasierter Modelle hinreichende Prognosen und Szenarien zu entwickeln und das Komplexitätsmanagement muss bereits bei der Entwicklung variantenreicher Serienprodukte einsetzen. So können z.B. Agentensysteme schon vorausschauend bei der Analyse von Verbindungen möglicher Module helfen.

Früher wurden die darauf aufbauenden Produktionsstrukturen in der Regel nur statisch geplant und für dynamische Betrachtungen allenfalls Mittelwerte herangezogen. Um in Zukunft falsche oder überhöhte Investitionen und unnötige Folgekosten zu vermeiden, sind bestehende und zu planende Anlagen umfassend dynamisch zu analysieren und optimieren. Mit dem inzwischen zur Realität gewordenen ganzheitlichen Ansatz der Digitalen Fabrik kann jetzt – auf Basis eines umfassenden integrierten Datenmanagements durch rechnergestützte Einzelmethoden bis hin zur Virtuellen Realität – der Planungsprozess entscheidend beschleunigt und verbessert sowie die Planungsqualität und -sicherheit erheblich erhöht werden.

Nicht zuletzt gilt es, die in den Produktions- und Logistiksystemen arbeitenden Menschen wieder stärker in den Mittelpunkt zu stellen, ihre Bedürfnisse zu respektieren und ihnen genügend Raum für Engagement und Verantwortung mit effizienten Formen der Arbeitsorganisation zu geben, die Verschwendung vermeiden und eine stetige Steigerung des Produktionsflusses ermöglichen.

Clausthal, im Juni 2022

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht

Vorwort des Verfassers

Die Entwicklung von Fabriklayouts stellt eine komplexe Aufgabe dar, bei der eine Vielzahl von Methoden und Werkzeugen zur Anwendung kommen. Ziel dieser Arbeit war es, eine Gesamtmethodik zu entwickeln welche die Methoden zur Gestaltung von Layouts in die virtuelle Realität überträgt.

Durch die realitätsnahe Visualisierung und anwenderfreundliche Bedienung wird - bereits während des Planungsvorgangs in der virtuellen Realität - jeder Entwicklungsschritt bis hin zur vollständigen Fabrikanlage für den Planer erlebbar. Das Ergebnis ist eine einfachere, schnellere, sicherere und genauere Planung von Layouts.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit sowie zahlreiche fachliche Gespräche. Mit großer Freude konnte ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit an der TU Clausthal zu seinen über 20 Jahre währenden Forschungen zur Digitalen Fabrik beitragen.

Weiterhin bedanke ich mich bei Prof. Dr. rer. nat. Jörg P. Müller für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie Prof. Dr.-Ing Hubert Schwarze für die Leitung der Prüfungskommission.

Meinen Kollegen am Institut Marco Seewaldt, Thomas Krüger und Simon Schäfer sowie meinen Mit-Doktoranden Andrés Kohler, Sven Wittenbröker und Nils Gorke danke ich für die vielen konstruktiven Gespräche und Anregungen.

Ebenfalls möchte ich Felix Özkul, Lukas Pawletta, Marc Brünninghaus, Philipp Hagenhoff und Daniel Niehaus für ihre Unterstützung bei der prototypischen Umsetzung und Durchführung von Versuchen danken.

Besonderer Dank gilt meiner Familie und meiner Freundin Yvonne für die Unterstützung und Geduld während der Anfertigung dieser Arbeit.

Kurzdarstellung

Um eine hohe Effizienz der Fabrikplanung zu gewährleisten, müssen Fabriklayouts mit niedrigem Aufwand bei gleichzeitig bester Qualität erstellt werden. Hierfür sind Fabrikplanungsprogramme erforderlich, die über einen hohen Funktionsumfang verfügen, von Fachleuten verschiedener Disziplinen leicht bedient werden können und gleichzeitig einen möglichst geringen Aufwand in der Erstellung der Layouts erfordern.

Die mittlerweile etablierte Technik von VR mit ihren sehr präzisen Eingabegeräten eröffnet diesbezüglich weitgehende gestalterische Potenziale, die Benutzer in die Lage versetzt, auf natürliche Art eigene Ideen umzusetzen.

Ziel der Arbeit ist es, eine durchgängige virtuelle Layoutplanung zu realisieren. Dazu wird zunächst der dafür notwendige Forschungs- und Entwicklungsbedarf identifiziert. Benötigt werden Konzepte für die übergeordneten Anforderungen: Informationsbereitstellung, Übersichtlichkeit und Interaktion, sowie für funktionelle und konzeptionelle Anforderungen zur Gestaltung von Layouts in und mit der VR. Zur Erfüllung dieser Anforderungen wird eine virtuelle Planungsumgebung entwickelt und prototypisch umgesetzt.

Zentrales Element dieser Umgebung ist ein virtueller Planungstisch, der jede Planungsebene darstellen kann. Dieser vermittelt den vollständigen Überblick über die Planungsszene und dient der Platzierung von Objekten. Dem Benutzer ist es somit möglich, auf fast natürliche Art und Weise Objekte in einem digitalen Layout zu platzieren.

Die so gestalteten Layouts lassen sich gleichzeitig auch in Originalgröße virtuell betreten und dort weiter im Detail bearbeiten. Dadurch entfallen bisher verwendete analoge Verfahren wie Probeaufbauten aus Holz und Pappe. Da sich Objekte in der VR aus Bauteilbibliotheken entnehmen und in beliebiger Anzahl reproduzieren lassen, entfallen Zeit und Kosten für den Bau analoger Modelle. Weiterhin lässt sich jederzeit auf bisherige Bestandsdaten oder Planungen zurückgreifen. Diese können realitätsnah in VR sofort weiterbearbeitet werden.

Konzepte zur partizipativen Planung ermöglichen es Benutzern innerhalb der virtuellen Welt zusammenzukommen und gemeinsam ein Fabriklayout zu

gestalten. Dabei sind sie ortsunabhängig, d.h. sie können sich sowohl im selben Raum, als auch weltweit an jedem anderen Ort befinden.

Die Materialflusssimulation ermöglicht die simulative Absicherung von Maschinenanordnungen. Sie wird bisher entweder im Vorfeld einer Planungssitzung oder danach durchgeführt. Eine bidirektionale Kopplung zur virtuellen Planungsumgebung ermöglicht sowohl den automatischen Aufbau von Simulationsmodellen in der VR als auch die Rückführung von Layouteänderungen in das Materialflusssimulationsprogramm während der VR-Planungssitzungen. Dies spart gegenüber einer manuellen Übertragung Zeit und garantiert eine fehlerfreie Ausgangsbasis von VR-Planungssitzungen. Dies bedeutet, dass die simulative Absicherung von Layoutvarianten auch während einer Planungssitzung durchgeführt werden kann.

Eine Visualisierung von Materialflusszusammenhängen innerhalb der VR liefert dem Planer die notwendigen Informationen über die Bearbeitungsreihenfolgen von Werkstücken. Die Berechnung kürzester Wege zwischen Bearbeitungsstationen bietet darüber hinaus die Möglichkeit, Layouts zu optimieren, Engpässe zu identifizieren und diese aufzulösen.

Durch eine prototypische Systementwicklung konnte gezeigt werden, dass eine Gestaltung von Fabriklayouts über alle Planungsebenen hinweg in und mit VR realisierbar ist. Mit diesem Prototyp wurden verschiedene Anwendertests sowohl im Labor, als auch anhand eines realen Praxisbeispiels durchgeführt. Basierend auf den daraus gewonnenen Erkenntnissen wurde die Gesamtmethodik schrittweise optimiert und weiterentwickelt.

Mit der Entwicklung der Gesamtmethodik Fabrikplanung Planung 5.0 wurde nachgewiesen, dass die durchgängige digitale Layoutplanung in und mit der VR den Planungsprozess entscheidend verbessern, vereinfachen und beschleunigen kann.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis ..... **V**

1 Einführung **1**

1.1 Ausgangssituation und Motivation 2

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise 3

1.3 Aufbau der Arbeit 5

2 Wissenschaftliche Grundlagen der Layoutplanung im Fabrikplanungsprozess **7**

2.1 Allgemeine Grundlagen der Fabrikplanung 7

2.1.1 Planungsfälle 9

2.1.2 Der Planungsprozess anhand der Fabrikplanungsphasen 10

2.2 Layoutplanung 13

2.2.1 Planungsebenen 15

2.2.2 Methoden und Werkzeuge der Layoutplanung 18

2.2.3 Partizipative Planung 19

2.3 Die Digitale Fabrik 21

2.3.1 Visualisierung und Interaktion 23

2.3.2 Virtual Reality 24

2.3.3 Digitale Methoden und Werkzeuge der Layoutplanung 26

2.3.4 Materialflusssimulation 28

2.4 Digitale Durchgängigkeit in der Layoutplanung 31

2.4.1 Durchgängigkeit der Planungsmethoden zur Erstellung von Grob- und Feinlayouts 32

2.4.2 Durchgängigkeit von Visualisierung und Interaktion 33

2.4.3 Durchgängigkeit über die Planungsebenen hinweg 33

2.5 Zusammenfassung der Grundlagen für die Layoutplanung im Fabrikplanungsprozess 34

3 Bisheriger VR-Einsatz in der Layoutplanung **35**

3.1 Stand der Forschung 36

3.1.1 Literaturrecherche 36

3.1.2 Schlussfolgerungen zum Stand der Forschung 38

3.2 Analyse aktueller Fabrikplanungsprogramme und -systeme 39

3.2.1 Betrachtete Software 39

3.2.1.1 Spezielle Fabrikplanungssoftware 40

3.2.1.2 CAD-Programme 42

3.2.1.3 Fabrikplanungssysteme 43

3.2.2 Bewertungskriterien 44

3.2.2.1 Bewertungskriterien zur Visualisierung und Interaktion ... 45
3.2.2.2 Bewertungskriterien zur Interaktion in den Planungsebenen ... 46
3.2.3 Einordnung und Diskussion der Analyseergebnisse ... 46
3.3 Zusammenfassung des bisherigen Einsatzes von VR in der Layoutplanung ... 50

4 Abgeleiteter Forschungs- und Entwicklungsbedarf ... 51

4.1 Übergeordnete Anforderungen an die Layoutplanung in und mit VR ... 52
4.1.1 Informationsbereitstellung ... 52
4.1.2 Übersichtlichkeit ... 52
4.1.3 Interaktion ... 53
4.2 Funktionale Anforderungen an die durchgängige Layoutplanung in und mit VR ... 53
4.2.1 Der virtuelle Planungstisch ... 54
4.2.2 Bauteilbibliotheken ... 55
4.2.3 Virtuelle Anzeigetafel ... 56
4.2.4 Darstellung von Transportwegen und -intensitäten ... 56
4.2.5 Integration der dynamischen Materialflusssimulation ... 57
4.3 Konzeptionelle Anforderungen ... 57
4.3.1 Interaktion in und mit der virtuellen Welt ... 57
4.3.2 Partizipative Planung ... 58
4.4 Zusammenfassung des abgeleiteten Forschungs- und Entwicklungsbedarfs ... 59

5 Konzeption einer Gesamtmethodik zur Planung von Grob- und Feinlayouts in und mit VR ... 60

5.1 Die neue VR-Arbeitsumgebung der Fabrikplanung 5.0 ... 60
5.1.1 Der virtuelle Planungstisch ... 61
5.1.2 Die Bauteilbibliothek ... 63
5.1.3 Die virtuelle Anzeigetafel ... 65
5.1.4 Planung in Originalgröße ... 66
5.1.5 Darstellung von Bearbeitungsreihenfolgen und Transportintensitäten ... 67
5.1.6 Bidirektionale Kopplung zur Materialflusssimulation ... 70
5.2 Interaktion in und mit der VR ... 73
5.2.1 Navigation ... 73
5.2.2 Objektselektion ... 75
5.2.3 Objektplatzierung ... 75
5.2.4 Datenaggregation ... 77
5.3 Partizipative Planung in der Fabrikplanung 5.0 ... 78
5.4 Die Gesamtmethodik Fabrikplanung 5.0 ... 80
5.4.1 Ablauf ohne Materialflusssimulation ... 82
5.4.2 Beginn des Ablaufs mit dem Aufbau des VR-Layouts und anschließender Simulation ... 83
5.4.3 Beginn des Ablaufs mit dem Aufbau des Simulationsmodells ... 83
5.5 Zusammenfassung der Entwicklung der Gesamtmethodik ... 84

6 Prototypische Systementwicklung ... 85
6.1 Verwendete Hardware ... 85
6.1.1 3D-Großprojektion ... 86
6.1.2 VR-Brillen ... 89
6.1.3 Auswahl eines geeigneten VR-Systems für die FP 5.0 ... 90
6.1.4 Technische Ausstattung des IMAB ... 91
6.2 Erhebung von 3D-Ausgangsdaten ... 93
6.2.1 Überprüfung von Bestandsdaten ... 94
6.2.2 3D-Daten-Aufnahme für die Fabrikplanung 5.0 ... 95
6.3 Softwareumsetzung ... 100
6.3.1 Umsetzung des virtuellen Planungstisches ... 104
6.3.2 Virtuelle Begehung und Bearbeitung der Arbeitsplatzebene ... 106
6.3.3 Variable Hallen ... 108
6.3.4 Visualisierung der Bearbeitungsreihenfolgen ... 108
6.3.5 Berechnung und Visualisierung kürzester Transportwege ... 109
6.3.6 Die virtuelle Anzeigetafel ... 111
6.3.7 Umsetzung der Bauteilbibliothek ... 111
6.3.8 Generierung von VR-Elementen ... 112
6.3.9 Bidirektionale Kopplung zur Materialflusssimulation ... 114
6.3.10 Partizipative Planung in und mit VR ... 117
6.4 Zusammenfassung der prototypischen Systementwicklung ... 119

7 Praktische Anwendung der Gesamtmethodik Fabrikplanung 5.0 120
7.1 Beispiel 1: Layoutplanung auf Generalebene ... 121
7.2 Beispiel 2: Partizipative Layoutplanung ... 125
7.2.1 Partizipative Planung mit VR-Brille und VR-Großprojektion ... 125
7.2.2 Partizipative Planung mit mehreren VR-Brillen ... 130
7.3 Beispiel 3: Planung mit bidirektionaler Kopplung zur Materialflusssimulation ... 131
7.4 Beispiel 4: Demontagefabrik ... 133
7.5 Zusammenfassung der Anwendungsbeispiele ... 136

8 Zusammenfassung und Ausblick ... 138

Literaturverzeichnis ... 141

Abbildungsverzeichnis ... 149

Tabellenverzeichnis ... 151

Abkürzungsverzeichnis ... 151

Anhang ... 152