



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Virtual Reality in der Fabrikplanung

Analyse des aktuellen Fabrikplanungsprozesses sowie Entwicklung und Integration eines Prozesses zur VR- Visualisierung von Planungsergebnissen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihn

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung)

Proj.-Ass. Marius Lütkemeyer, MSc

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung,
Fraunhofer Austria Research GmbH)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Sebastian Lumetzberger

e01325905

Keilgasse 4 / Top 6

1030 Wien

Wien, im Juni 2019

Sebastian Lumetzberger



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Juni 2019

Sebastian Lumetzberger

Danksagung

Mein Dank gilt zuerst dem Institut für Managementwissenschaften an der TU Wien, Bereich für Betriebstechnik und Systemplanung, sowie der Fraunhofer Austria Research GmbH unter der Leitung von Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihm und im Speziellen meinen beiden Betreuern Herrn Proj.-Ass. Marius Lütkemeyer, MSc. sowie Herrn Dipl.-Ing. Werner Kritzingen für die Unterstützung, die freundschaftliche Betreuung und die Zeit, die sie für mich aufgebracht haben.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich auch bei meinen Eltern Monika und Christian, die mich zu jeder Zeit meines Studiums aktiv unterstützt und immer wieder motiviert haben. Ein herzliches Dankeschön geht auch an meinen Bruder Jakob und seine Verlobte Diana sowie an meine Großeltern Irmgard und Josef, die immer ein offenes Ohr für mich hatten und mich nicht nur während dem Verfassen dieser Arbeit mental unterstützt haben.

Ebenso gilt mein Dank meiner gesamten Familie, meinen FreundInnen, StudienkollegInnen sowie meinen KollegInnen bei der Fraunhofer Austria Research GmbH, von denen mir viele auch für Fragebögen und Experteninterviews zur Verfügung gestanden sind.

Außerdem möchte ich mich bei meiner Freundin Christina dafür bedanken, dass sie mich, trotz ihres eigenen Studiums, auch in anstrengenden Phasen immer unterstützt und motiviert hat.

Kurzfassung

Der Fabrikplanungsprozess stellt einen äußerst komplexen und stark interdisziplinären Vorgang dar, an dem neben dem Projekt-Kernteam viele weitere Stakeholder beteiligt sind. Dieser Prozess kann in einzelne Phasen unterteilt werden, die allerdings nicht immer einheitlich definiert sind und in denen die unterschiedlichsten Methoden und Werkzeuge zum Einsatz kommen. Durch den technologischen Fortschritt hat Virtual Reality mittlerweile eine so hohe Technologiereife erreicht, dass der Einsatz als zusätzliches Tool im Fabrikplanungsprozess durchaus Sinn machen kann. Es ist allerdings unklar, in welchen Phasen VR als sinnvolle Unterstützung eingesetzt werden kann, wie VR-Visualisierungen ausgehend von der verwendeten Fabrikplanungssoftware erstellt werden können sowie welche Auswirkungen auf den Fabrikplanungsprozess dadurch zu erwarten sind.

In dieser Arbeit wird deshalb zu Beginn der Fabrikplanungsprozess im Detail analysiert und ein einheitliches Phasenmodell definiert. Zusätzlich werden die technologischen Grundlagen von Virtual Reality erörtert, notwendige Software für VR vorgestellt sowie der State-of-the-Art in der Fabrikplanung und ähnlichen Einsatzgebieten recherchiert. Da keine definierten Vorgehensmodelle für die Erstellung von VR-Erfahrungen aus Fabrikplanungsanwendungen existieren, werden in einem Workshop Anforderungen, die ein solches Vorgehensmodell erfüllen soll, als Entwicklungsgrundlage definiert. Ausgehend von diesen Anforderungen sowie der vorgestellten VR-Software werden drei Vorgehensmodelle zur VR-Visualisierung von Planungsergebnissen aus Vistable, Plant Simulation und Autodesk Factory Design Utilities entwickelt und hinsichtlich dem Erfüllungsgrad dieser Anforderungen bewertet. Die beiden am besten bewerteten Vorgehensmodelle werden in vier Use Cases einem Praxistest unterzogen sowie den Fabrik- und Lagerplanern von der Fraunhofer Austria Research GmbH vorgestellt.

Mit Hilfe von Fragebögen und Experteninterviews werden zum Abschluss dieser Arbeit die zu erwartenden Potentiale durch den Einsatz von VR im Fabrikplanungsprozess, mögliche Einsatzphasen im definierten Fabrikplanungsprozess sowie bevorzugte Einsatzszenarien ermittelt. Zusätzlich werden aber auch Verbesserungsvorschläge für VR-allgemein und die entwickelten Vorgehensmodelle sowie noch zu bewältigende Herausforderungen beim Einsatz von VR abgefragt und dokumentiert.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist, dass zwei der entwickelten Vorgehensmodelle in der Praxis anwendbar sind und der Einsatz von VR in der Fabrikplanung in vielen Fällen durchaus sinnvoll ist. Wie sehr allerdings VR diesen Planungsprozess verändern wird, hängt stark von zukünftigen Entwicklungen im Hard- und Software-Bereich dieser Technologie ab und muss anhand realer Fabrikplanungsprojekte getestet werden.

Abstract

The factory planning process is an extremely complex and highly interdisciplinary procedure, involving many other stakeholders in addition to the project core team. This process can be divided into single phases, which are often not defined uniformly and in which a wide variety of methods and tools are used. Due to the technological progress, Virtual Reality has reached a high technological maturity degree, so the use of it as an additional tool can certainly make sense. However, it is not clear, in which phases VR can be used meaningful as an additional tool. Furthermore, it is not clear, how VR-visualizations can be created based on the factory planning software and in which way the factory planning process will be affected.

At the beginning of this thesis, the factory planning process is analysed in detail and a phase model is defined. Additionally, the basics of Virtual Reality are discussed from a technological view, software for Virtual Reality is presented and the state-of-the-art of VR in the factory planning process and related fields of application is investigated. Due to the fact, that there are no standardized procedure models for the generation of VR-experiences from factory planning applications, the requirements, which should be fulfilled from such a procedural model, are defined in a workshop as a development basis. Based on the software for VR and the requirements, three process models for VR-visualization out of Autodesk Factory Design Utilities, Vistable Touch and Plant Simulation are developed. These process models are evaluated with regard to the degree of fulfilment of these requirements. The two best rated procedural models are tested in practice in four use cases and are presented to the factory and warehouse planners at Fraunhofer Austria Research GmbH.

At the end of this thesis, questionnaires and expert interviews are used to determine expected potentials due to the use of VR in the factory planning process, possible operational phases in the defined factory planning phase model as well as preferred application scenarios. Additionally, suggestions for improvements for VR in general and the developed procedural models as well as challenges to overcome before using VR are queried and documented.

The result of this work is, that two of the developed process models are applicable in practice, and that the use of VR can be helpful in the factory planning process. However, it is not clear, to what extent VR will change the planning process. This depends on future developments in the hardware and software sectors of this technology. Moreover, the use of VR in real factory planning projects has to be tested.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	2
1.2	Forschungsfragen und Ziele der Arbeit	5
1.3	Lösungsansatz und Aufbau der Arbeit	6
2	Fabrikplanung	9
2.1	Begriffsdefinition und Grundlagen	9
2.2	Phasenmodell des Fabrikplanungsprozesses	24
2.3	Stakeholder und Beteiligte im Planungsprozess	33
2.4	Methoden, Werkzeuge und Tools Fabrikplanung	35
2.5	Aktuelle Entwicklungen	44
2.5.1	Digitale Fabrik	45
2.5.2	Building Information Modeling	46
3	Virtual Reality	49
3.1	Begriffsdefinition	49
3.2	Grundlagen	52
3.3	Software für Virtual Reality	63
4	State-of-the-Art-Analyse Virtual Reality	70
4.1	VR in der Fabrikplanung und ähnlichen Einsatzgebieten	70
4.2	Aktuelle Grenzen und Schwachstellen der Technologie	81
4.3	Vergleich der verfügbaren VR-Hardware	85
5	Visualisierung in der Fabrikplanung	88
5.1	GrAPPA	89
5.2	Vistable	91
5.3	Plant Simulation	93
5.4	Factory Design Utilities	95
6	Vorgehensmodelle für VR Fabrikmodelle	97
6.1	Anforderungen an das Vorgehensmodell	97
6.2	Entwicklung von Vorgehensmodellen	99
6.2.1	Vorgehensmodell 1 – Factory Design Utilities-3DS MAX-Unity-HMD ..	100
6.2.2	Vorgehensmodell 2 – Vistable-MoreViz-HMD	111

6.2.3	Vorgehensmodell 3 – Plant Simulation-MoreViz-HMD.....	122
6.3	Bewertung der Vorgehensmodelle	125
7	Praxiseinsatz und Auswertung.....	134
7.1	Praxiseinsatz in Use Cases.....	134
7.1.1	Use Case Bürogebäude.....	135
7.1.2	Use Case Beispielfabrik.....	138
7.1.3	Use Case Pilotfabrik TU Wien.....	142
7.1.4	Use Case Roboterzelle	143
7.2	Auswertung Fragebögen	146
7.3	Experteninterviews	151
8	Diskussion und Ausblick	154
8.1	Diskussion und Einschränkung der Vorgehensmodelle und Ergebnisse	154
8.2	Mögliche nächste Schritte zur Weiterentwicklung und Implementierung	156
9	Anhang.....	157
9.1	Fragebogen VR in der Fabrikplanung.....	157
9.2	Experteninterviews	162
9.2.1	Experteninterview mit Marius Lütkemeyer, MSc.	162
9.2.2	Experteninterview mit Dr. Thomas Sobottka.....	165
10	Literaturverzeichnis.....	171
11	Abbildungsverzeichnis	178
12	Tabellenverzeichnis	182
13	Abkürzungsverzeichnis.....	183

1 Einleitung

Im Consumer Bereich wird Virtual Reality als „The Next Big Thing“ bezeichnet: Gerätehersteller präsentieren ständig neue Hardware, Medienanbieter arbeiten intensiv an adäquaten Inhalten und Konsumenten sind nach Produkttests meist begeistert. Umsatzseitig ist VR aktuell allerdings ein Nischenprodukt, die Prognosen zeigen zwar, dass die eine Milliarde Euro Umsatzmarke bald gebrochen werden wird, siehe Abbildung 1, im Vergleich zum globalen Smartphone-Markt mit 400 Milliarden Euro Umsatz ist dieser Markt trotzdem sehr klein. Technologie- und Internetkonzerne haben allerdings in den vergangenen Jahren ein Vielfaches des VR-Jahresumsatzes in Start-ups und Entwicklung von Hardware, Content und Geschäftsmodellen investiert. Dieses Aktivitätslevel im R&D-Bereich wird aufgrund des immensen Potentials von VR auch auf absehbare Zeit hoch bleiben. Laut Prognosen der amerikanischen Citibank könnte das Marktvolumen (E-Commerce, Hard- und Software) bis zum Jahr 2035 sogar auf 1,6 Billionen USD steigen, was einem Vielfachen des aktuellen Smartphone Marktes entspricht.^{1 2}

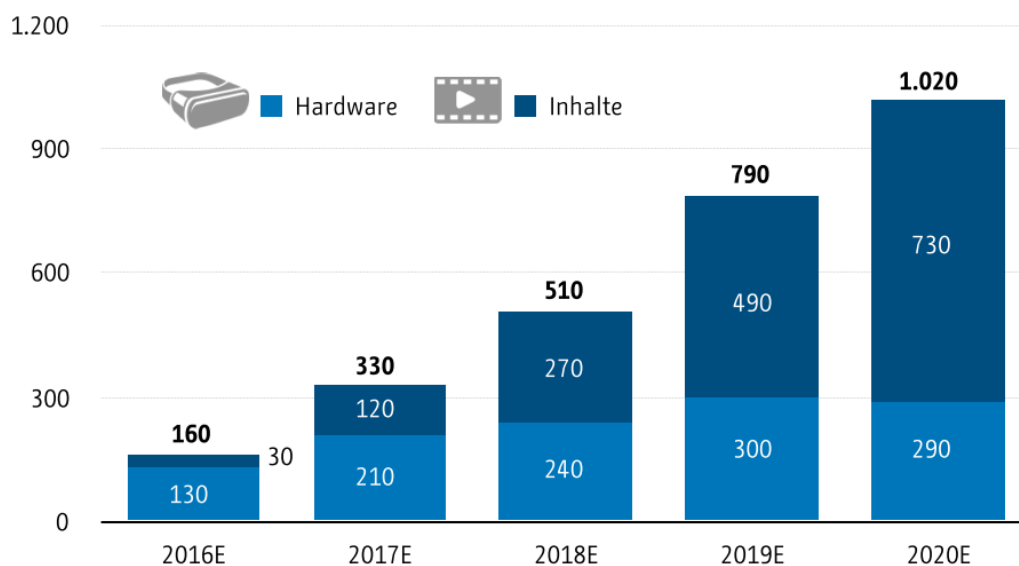


Abbildung 1: VR-Umsatzprognose in Millionen Euro³

Im Zusammenhang mit Virtual und Augmented Reality ist jedenfalls die klare Unterscheidung zwischen diesen beiden Begriffen, auf die in Kapitel 3 auch noch ausführlich eingegangen wird, sehr wichtig. VR baut auf 3D-Inhalten der Computergraphik auf, mit besonderem Fokus auf Echtzeit-Computergraphik. Zusätzlich kommen dreidimensionale Displays zur Darstellung der 3D-Inhalte zum Einsatz und die Präsentation der Daten erfolgt oft multisensorisch. Das bedeutet, dass

¹ Vgl. Lutter, T. u. a., 2016., S.44-54

² Vgl. Himmelfreundpointner, R., 2016., S.85

³ Lutter, T. u. a., 2016., S.53

neben dem Sehsinn auch weitere Sinne, wie beispielsweise der Hör- oder Tastsinn, zum Einsatz kommen können.⁴

Unter Augmented Reality hingegen versteht man die unmittelbare, echtzeitfähige und interaktive Erweiterung der realen Umgebung um virtuelle Inhalte, welche in Ausprägung und Anmutung möglichst realitätsnah sein sollen, sodass im Extremfall eine Unterscheidung zwischen realen und virtuellen Sinneseindrücken nicht mehr möglich ist.⁵

Anwendungsmöglichkeiten von VR lassen sich in unterschiedlichsten Branchen finden: In der Consumer- und Gaming Industrie (Spiele, Sportevents, Musikkonzerte etc.)⁶, in der Medizin (anatomische Ausbildung, präoperative Planung, interoperative Unterstützung, chirurgisches Training, Expositionstherapie, Trainingssimulation etc.)⁷ ⁸ ⁹, in der Lehre (Lernfabrik Kaiserslautern etc.)¹⁰, der Architektur und dem Bauwesen (BIM, virtuelle Begehungen etc.)¹¹ ¹², der Öl- und Gasindustrie¹³ sowie der Raumfahrt.¹⁴

Aktuelle Entwicklungen im Bereich der virtuellen Realität führen nun dazu, dass diese häufiger auch im Bereich der Planung von logistischen Systemen¹⁵ ¹⁶ sowie der von Fabriken¹⁷ ¹⁸ ¹⁹ eingesetzt wird.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Fabrikplanung ist ein Fachgebiet, in dem im deutschsprachigen Raum seit über vier Jahrzehnten wissenschaftlich geforscht wird. In den letzten Jahren hat dieser Bereich noch zusätzlich an Bedeutung gewonnen, da die Industrie immer schnellere Planungsprozesse fordert.²⁰ Im Zusammenhang mit der Fabrikplanung und der Planung logistischer Systeme tauchten dabei immer wieder Schlagwörter wie

⁴ Vgl. Dörner, R. u. a., 2013, S.13

⁵ Vgl. Dörner, R. u. a., 2013, S.245

⁶ Vgl. Lutter, T. u. a., 2016.

⁷ Vgl. Müller-Wittig, W., 2016.

⁸ Vgl. Diemer, J./Zwanzger, P., 2019.

⁹ Vgl. Lorenz, D. u. a., 2016.

¹⁰ Vgl. Weidig, C./Aurich, J. C., 2014.

¹¹ Vgl. Du, J. u. a., 2018.

¹² Vgl. Shi, Y. u. a., 2016.

¹³ Vgl. Dörner, R. u. a., 2013., S.300

¹⁴ Vgl. Dörner, R. u. a., 2013., S.303

¹⁵ Vgl. Pfleger, D./Wehking, K.-H., 2017., S.1-5

¹⁶ Vgl. Goldhahn, L./Müller-Eppendorfer, K., 2017., S.233-235

¹⁷ Vgl. Gausemeier, J./Grafe, M./Meyer auf der Heide, F., 2015., S.141

¹⁸ Vgl. Goldhahn, L./Müller-Eppendorfer, K., 2017., S.239-240

¹⁹ Vgl. Bracht, U./Geckler, D./Wenzel, S., 2018., S.145-146

²⁰ Vgl. Pawellek, G., 2014, S.1

beispielsweise Wandlungsfähigkeit, Digitale Fabrik und Virtual beziehungsweise Augmented Reality auf.^{21 22 23 24}

Unter dem Begriff der Wandlungsfähigkeit, der seit dem Ende der 1990er Jahre vermehrt diskutiert wird, versteht man das Potenzial einer Fabrik, auch schnelle Anpassungen außerhalb von gewissen Korridoren in Bezug auf Organisation und Technik bei einem geringen Investitionsaufwand zu ermöglichen.²⁵

Ein Hauptgrund für die Notwendigkeit von flexiblen und anpassbaren Fabriken ist die steigende Nachfrage nach kundenindividuellen Produkten und der damit einhergehenden Vielzahl an unterschiedlichen Varianten. Dieser Herausforderung kann beispielsweise durch schnelles Umordnen von Produktionslinien beigegeben werden.²⁶

Die Digitale Fabrik hingegen, unter der ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen zur Simulation und 3D/VR-Visualisierung der Fertigungsabläufe verstanden wird, welche durch ein durchgängiges Datenmanagement verbunden sind, gilt als Leitthema der kommenden Jahre.²⁷

Die Gründe dafür sind der Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt, die weiter fortschreitende Diversifizierung und Individualisierung von Produkten und die Forderung nach einer immer kürzeren time-to-market. Rechnergestützte Methoden und Werkzeuge bieten im Zusammenhang mit diesen Problemstellungen vielversprechende Ansätze zur Steigerung der Planungseffizienz und Verringerung der Realisierungsdauer von Produkten und Produktionseinrichtungen.²⁸

Zu diesen oben genannten Werkzeugen und Methoden zählen, neben vielen anderen, die virtuelle und augmentierte Realität.²⁹

Virtual Reality kann zur Visualisierung des Ist-Zustandes einer Fabrik, zur Beurteilung der Auswirkungen von Veränderungen auf das reale System durch virtuell durchgeführte Umplanungen als auch zur Begehung virtueller Fabriken, die erst in Planung sind, eingesetzt werden. Speziell unerfahrenen Mitarbeitern oder nicht unmittelbar am Projekt beteiligten Personen wird es dadurch erleichtert, komplexe

²¹ Vgl. Wiendahl, H.-P./Reichardt, J./Nyhuis, P., 2010, S.121

²² Vgl. Pawellek, G., 2014, S.393-394

²³ Vgl. Herr, D. u. a., 2018, S.1

²⁴ Vgl. Pfleger, D./Wehking, K.-H., 2017, S.1

²⁵ Vgl. Wiendahl, H.-P./Reichardt, J./Nyhuis, P., 2010, S.121

²⁶ Vgl. Herr, D. u. a., 2018, S.1

²⁷ Vgl. Pawellek, G., 2014, S.394

²⁸ Vgl. Bracht, U./Geckler, D./Wenzel, S., 2018, S.1

²⁹ Vgl. Bracht, U./Geckler, D./Wenzel, S., 2018, S.145-146

Sachverhalte einfacher zu verstehen oder sich schneller mit dem vorhandenen Planungsproblem vertraut zu machen.³⁰

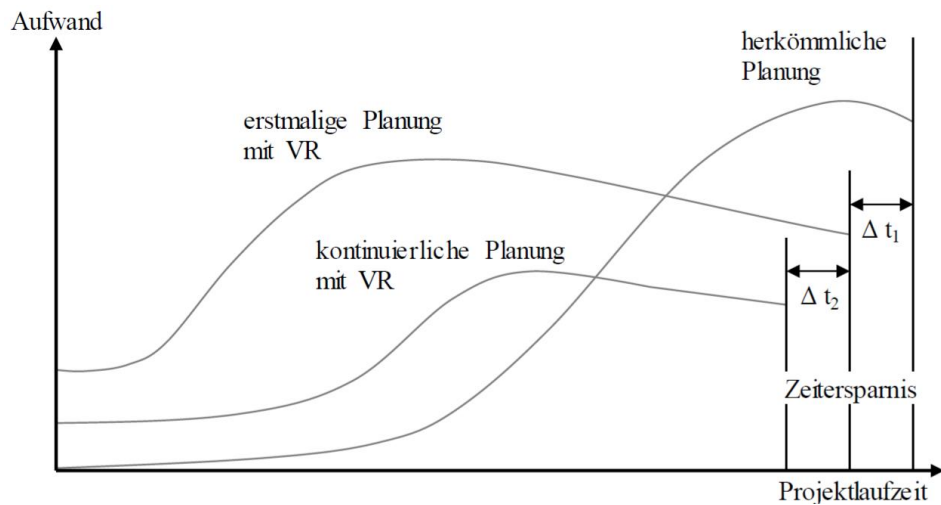


Abbildung 2: Qualitative Aufwandsschätzung für den Einsatz von VR³¹

Eine qualitative Aufwandsschätzung für den Einsatz von Virtual Reality im Fabrikplanungsprozess von Bracht, die in Abbildung 2 dargestellt ist, lässt vermuten, dass schon beim erstmaligen Einsatz von VR in der Planung eine Zeitersparnis möglich ist, wenngleich der Aufwand, speziell in früheren Projektphasen, dadurch steigt und in Summe wohl mindestens gleich hoch bleibt. Wird jedoch Virtual Reality kontinuierlich im Fabrikplanungsprozess integriert, ist laut Bracht davon auszugehen, dass sowohl eine Zeitersparnis als auch eine Senkung des Gesamtaufwandes für Planungsprojekte realisiert werden kann.³²

Weiteres könnten durch die Untersuchung verschiedener Layoutvarianten in der virtuellen Welt und die damit erzeugte Immersion mögliche Planungsfehler früher entdeckt, die Planungsaufwände und -kosten reduziert, der Informationsaustausch zwischen verschiedenen Expertengruppen verbessert und die Akzeptanz des Planungsergebnisses gesteigert werden, wodurch neben einer höheren Planungsgeschwindigkeit auch von einer Steigerung der Planungsqualität ausgegangen werden kann.^{33 34 35 36}

Das Nicht-Vorhandensein einer integrierten Schnittstelle zur VR-Visualisierung in gängigen Fabrikplanungsanwendungen, was die Kommunikation und Datenübertragung zwischen den in der Fabrikplanung im Einsatz befindlichen Software-Paketen und der notwendigen Spezialsoftware für VR erheblich erschwert,

³⁰ Vgl. Pflieger, D./Wehking, K.-H., 2017., S.2

³¹ Pflieger, D./Wehking, K.-H., 2017., S.2

³² Vgl. Schenk, M., 2005., S.69-80

³³ Vgl. Pflieger, D./Wehking, K.-H., 2017., S.2

³⁴ Vgl. Yang, X./Malak, J./Aurich, C., 2011., S.210-214

³⁵ Vgl. Runde, C./Cannarozzi, M., 2016., S.183-185

³⁶ Vgl. Gausemeier, J./Grafe, M./Meyer auf der Heide, F., 2015., S.141

sowie teilweise fehlende 3D-Modelle in der Planungssoftware stellen dabei die größten Hindernisse für die Nutzung dieser Technologie dar.^{37 38}

Außerdem ist unklar, in welchen Planungsphasen Virtual Reality sinnvoll und unterstützend zum Einsatz kommen kann. In der Literatur werden die Grob- und Feinplanung als auch die Hochlaufbetreuung häufig als vielversprechende Phasen für VR-Unterstützung genannt.^{39 40 41}

Aufgrund der hohen Komplexität und Individualität von Fabrikplanungsprojekten und dem nicht einheitlichen Verständnis, wie ein Phasenmodell eines Fabrikplanungsprozesses aussieht, welche Aufgaben in jeder Phase zu erledigen sind und welche Ergebnisse daraus resultieren sollen, ist es schwierig zu definieren, wann und wo Virtual Reality eingesetzt werden soll.

Zusätzlich ist dem Großteil der in den Fabrikplanungsprozess involvierten Personen der genaue Unterschied zwischen Virtual und Augmented Reality nicht bewusst und diese Begriffe werden oft als Synonyme angesehen. Ohne das Wissen über die exakten Unterschiede dieser beiden Technologien ist es allerdings auch nicht möglich, die Bereiche, in denen VR und beziehungsweise oder AR zum Einsatz kommen können, abzugrenzen.

1.2 Forschungsfragen und Ziele der Arbeit

Um Virtual Reality sinnvoll im Fabrikplanungsprozess integrieren zu können, müssen aber, aufgrund der Tatsache, dass keine All-in-One Lösungen existieren, zuerst Vorgehensmodelle entwickelt werden, mit denen Planungsergebnisse aus der verwendeten Software einfach und mit möglichst wenig Aufwand in der virtuellen Welt dargestellt werden können.

Daraus ergeben sich die folgenden Forschungsfragen:

- Welche Anforderungen muss ein Vorgehensmodell erfüllen, damit es in der Praxis anwendbar ist und in den Fabrikplanungsprozess integriert werden kann?
- Welche Vorgehensmodelle zur Generierung von VR-Erfahrungen aus den 3D-Daten der verfügbaren Fabrikplanungssoftwarepaketen können entwickelt werden?

³⁷ Vgl. Bracht, U./Schlegel, M., 2018., S.254

³⁸ Vgl. Runde, C./Cannarozzi, M., 2016., S.183-185

³⁹ Vgl. Weidig, C./Aurich, J. C., 2014., S.748-749

⁴⁰ Vgl. Bracht, U./Schlegel, M., 2018., S.251-255

⁴¹ Vgl. Runde, C./Cannarozzi, M., 2016., S.183-185

Weiters muss eine fundierte Entscheidungsgrundlage geschaffen werden, die die Investitionen für Soft- und Hardware, die den Einsatz von VR erst ermöglichen, und den Aufwand für die Erstellung der VR-Erfahrung dem generierten Nutzen beziehungsweise dem Mehrwert, welcher durch das immersive Eintauchen in Planungsergebnisse generiert wird, gegenüberstellt.

Dazu ist die Klärung der folgenden Frage notwendig:

- In welchen Phasen dieses Fabrikplanungsprozesses ist der Einsatz von VR sinnvoll und welche möglichen Einsatzszenarien ergeben sich dadurch?
- Welche Potentiale oder Verbesserungseffekte ergeben sich durch den Einsatz dieser Technologie im Planungsprozess?

Aufgrund dieser Forschungsfragen ergeben sich die folgenden Ziele für diese Diplomarbeit:

1. Vermittlung der benötigten theoretischen Grundlagen der Fabrikplanung
2. Erstellung eines Phasenmodelles, das den gesamten Fabrikplanungsprozess abbildet
3. Vermittlung der benötigten theoretischen Grundlagen im Bereich Virtual Reality und der Abgrenzung zu Augmented Reality
4. Darlegung verschiedener Anwendungsbeispiele aus dem Bereich der Fabrikplanung und Darstellung des State-of-the-Art
5. Entwicklung von Vorgehensmodellen zur VR-Visualisierung
6. Ermittlung und Validierung der Einsatzbereiche im Fabrikplanungsprozess und der Verbesserungseffekte in diesem

1.3 Lösungsansatz und Aufbau der Arbeit

Um die oben genannten Forschungsfragen beantworten und die gesteckten Ziele erreichen zu können, wurde der in Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellte Aufbau dieser Arbeit festgelegt. Im theoretischen Block werden dabei alle notwendigen Grundlagen im Bereich der Fabrikplanung und von Virtual Reality erarbeitet. Anschließend werden Use Cases in verschiedenen Einsatzgebieten vorgestellt, aktuelle Head Mounted Displays verglichen sowie momentane Grenzen und Schwachstellen von Virtual Reality aufgezeigt.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen des Theorieteiles wird die verfügbare Software hinsichtlich der Eignung für Virtual Reality untersucht und kurz vorgestellt. Zusätzlich wird eine Anforderungsliste erstellt, welche die im Anschluss entwickelten Vorgehensmodelle bestmöglich erfüllen sollen. Dies wird schließlich mittels einer

Bewertung in einem Workshop überprüft und das/die am besten bewertete(n) Vorgehensmodell(e) ausgewählt.

Mit dem/den ausgewählten Vorgehensmodell(en) werden Use Cases aufbereitet, um einerseits die Funktion dieses/dieser zu validieren und andererseits um den Einsatz von VR in der Fabrikplanung zu demonstrieren. Im Anschluss an diese Demonstrationen werden erstellte Fragebögen ausgewertet und Experteninterviews durchgeführt, anhand derer die Einsatzmöglichkeiten sowie die durch den Einsatz von VR möglichen Verbesserungseffekte ermittelt werden.

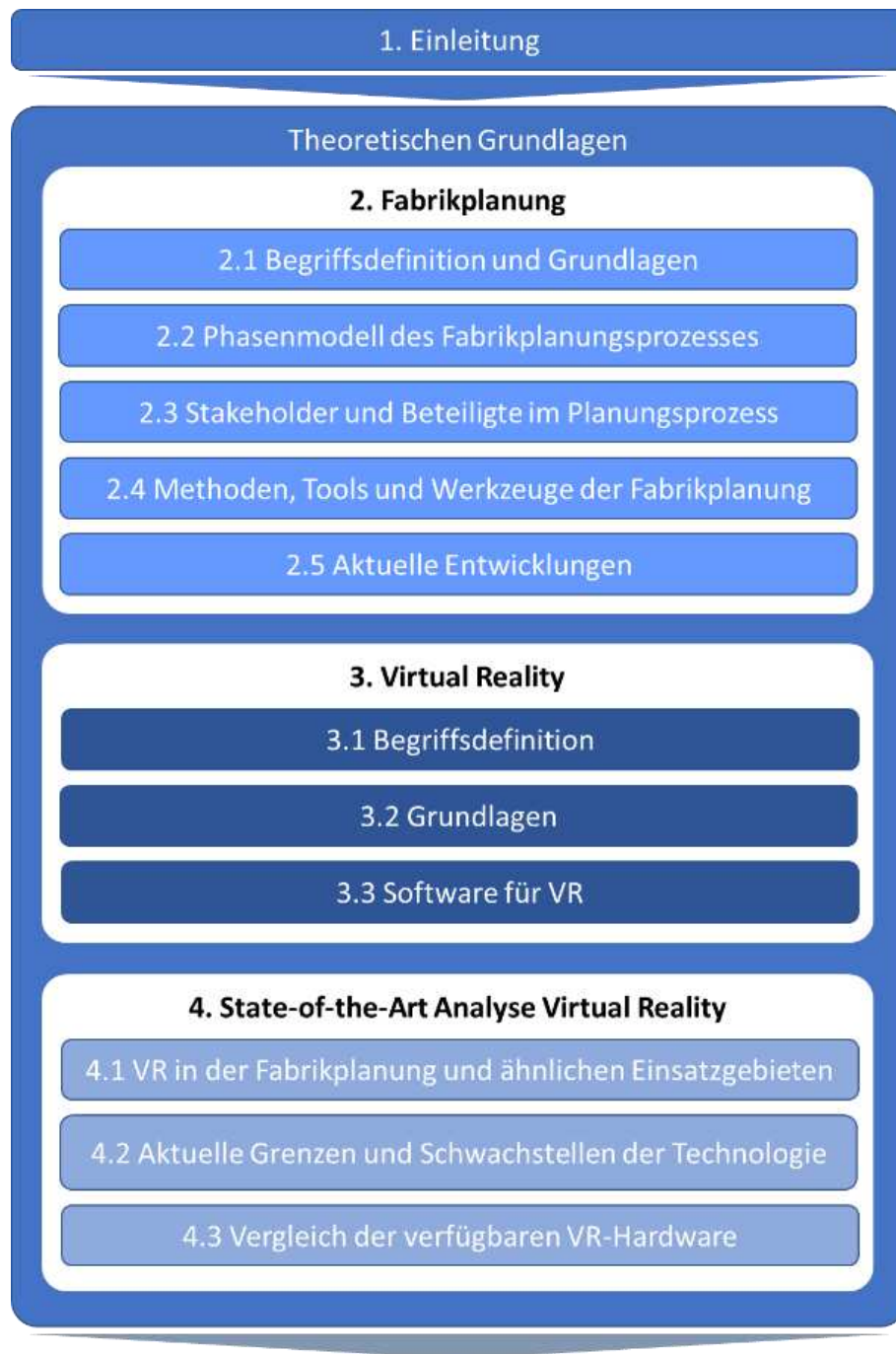


Abbildung 3: Vorgehensweise theoretische Grundlagen

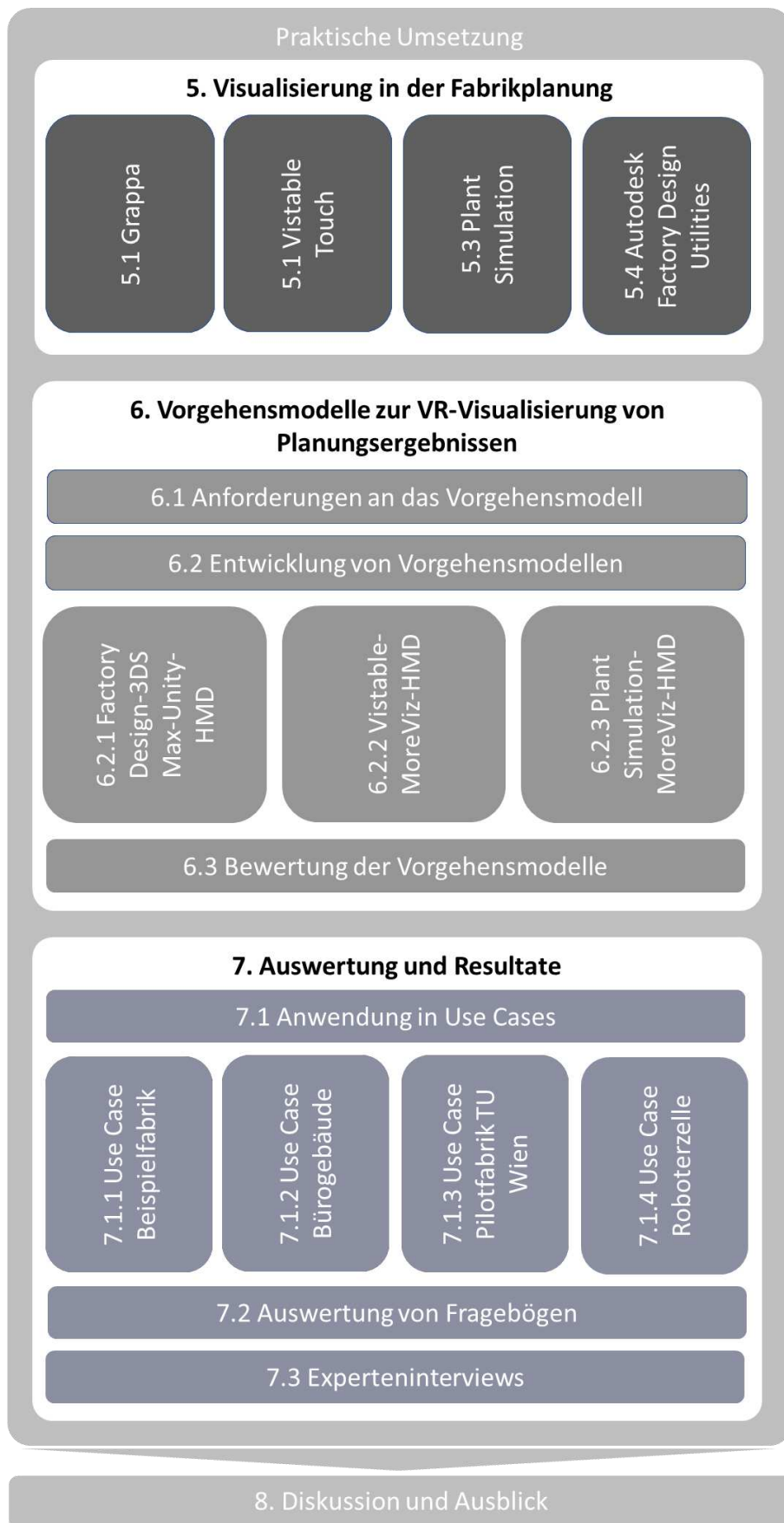


Abbildung 4: Vorgehensweise praktische Umsetzung

2 Fabrikplanung

Im folgenden Kapitel soll ein Überblick über das sehr weitläufige und stark interdisziplinäre Thema Fabrikplanung gegeben werden. Der Fokus liegt dabei auf einer Abgrenzung der im Fabrikplanungsprozess verwendeten Begriffe sowie einer detaillierten Analyse und Darstellung der in facheinschlägiger Literatur und Normen definierten Fabrikplanungsprozesse.

Aufbauend auf dieser umfassenden Literaturrecherche werden Anforderungen und Ziele in den einzelnen Planungsphasen herausgearbeitet und detailliert, aber auch Herausforderungen und Schwierigkeiten im aktuellen Fabrikplanungsprozess identifiziert. Zusätzlich werden in diesem Passus in der Fabrikplanung verwendete Tools, Methoden und Werkzeuge vorgestellt und dokumentiert.

Abschließend gibt der Autor noch einen Überblick über aktuelle Trends und Entwicklungen im Bereich von Fabriken und deren Planung.

2.1 Begriffsdefinition und Grundlagen

In diesem ersten Unterkapitel wird die Bedeutung des Wortes Fabrikplanung ausführlich erläutert sowie grundlegende Zielfelder eines Fabrikplanungsprojektes definiert. Zusätzlich werden Begriffe wie Struktur- bzw. Planungsebene, Fabriklebenszyklus, Planungsgrundfall und weitere wichtige Fachausdrücke eingeführt und erläutert. Abschließend werden die zu berücksichtigenden Gesetzmäßigkeiten bei der Durchführung eines Fabrikplanungsprojektes in einer Grafik dargestellt und beschrieben.

Fabrik

Abgeleitet aus den beiden Worten *fabrica* (lateinisch) und *fabrique* (französisch) wurde der Begriff Fabrik definiert, welcher ursprünglich in Frankreich und später auch in deutschen Ländern verwendet wurde. Darunter verstand man eine örtlich begrenzte Fläche zur Herstellung von Bauelementen für den Kirchen- und Kathedralbau.⁴²

Eine zeitgemäße allgemeinere Definition einer Fabrik ist laut Wirth et al. die folgende: „Die Fabrik ist ein Ort innovativer, kreativer und ressourceneffizienter Wertschöpfung von industriellen Gütern mittels Produktion und Dienstleistung.“⁴³

⁴² Vgl. Helbing, K. W./Mund, H./Reichel, M., 2014., S.9

⁴³ Wirth, S./Schenk, M./Müller, E., 2012.

Der Verein Deutscher Ingenieure liefert eine weitere, ähnliche Beschreibung: „Die Fabrik ist ein Ort, an dem Wertschöpfung durch arbeitsteilige Produktion industrieller Güter unter Einsatz von Produktionsfaktoren stattfindet.“⁴⁴

Ausführlicher definiert sind Fabriken die örtlich fixierten, funktionellen, technischen und räumlichen Wirkungsstätten, in denen Produkte gleicher oder unterschiedlicher Größe, Art und Menge hergestellt, wiederhergestellt oder verwertet werden. Dies wird durch den Einsatz von Material, Betriebsmitteln, Energie und Informationen sowie naturwissenschaftlichen Wirkprinzipien, technologischen Verfahren und Methoden durch wertschöpfende, technische und menschliche Arbeit erreicht.⁴⁵

Beschreibt man die Fabrik als ein System, so besteht sie aus Elementen, die im Zusammenwirken ein Produkt beziehungsweise eine Leistung erstellen, wie in Abbildung 5 dargestellt. Räumliche und zeitliche Anordnungen und Verbindungen zwischen Elementen nennt man dabei Strukturen, wobei räumlich in der Fabrik oft Materialflusstrukturen dominieren. Zusätzlich können aber auch Informationsstrukturen, beispielsweise bei Gruppenarbeit, die Anordnung von Elementen in der Fabrik sehr stark beeinflussen.^{46 47}

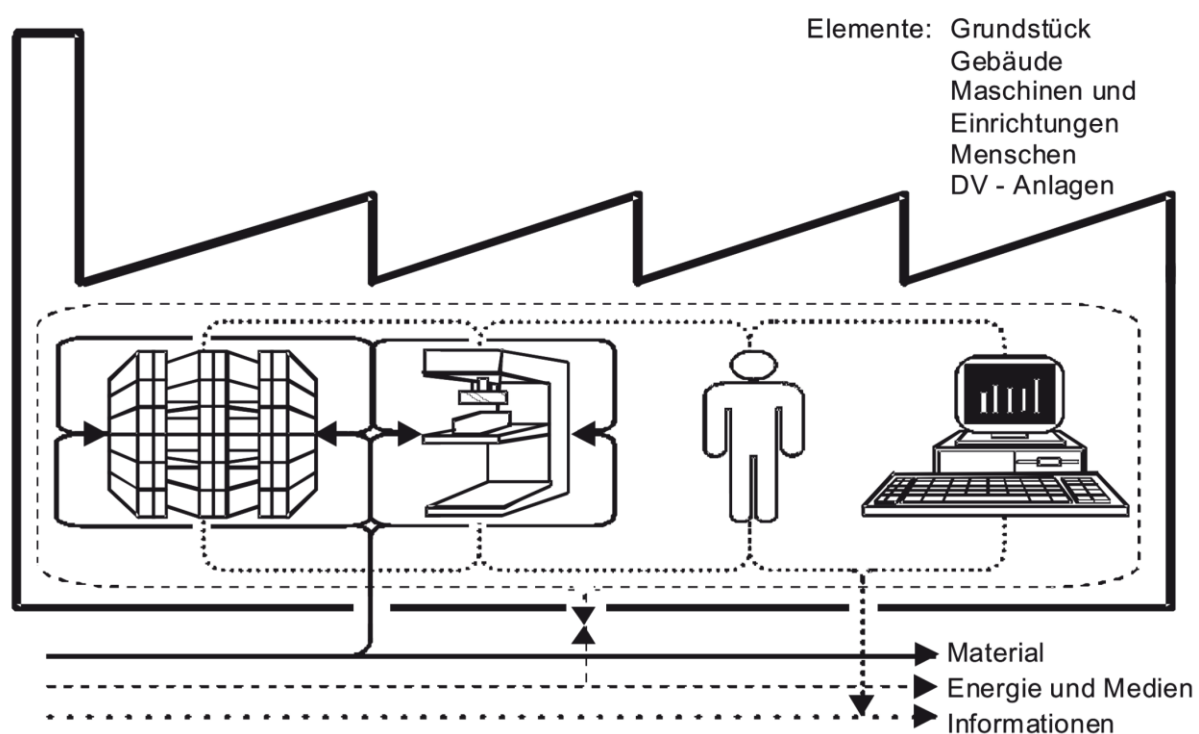


Abbildung 5: Fabrik als System⁴⁸

⁴⁴ VDI 5200 Blatt 1, S.3

⁴⁵ Vgl. Helbing, K. W./Mund, H./Reichel, M., 2014., S.9

⁴⁶ Vgl. Pawellek, G., 2014., S.2

⁴⁷ Vgl. Müller, E. u. a., 2013., S.38

⁴⁸ Pawellek, G., 2014.

Diese Betrachtungsweise ergänzt sehr gut die oben angeführten Definitionen und hebt noch einmal die Wichtigkeit des effizienten Zusammenspiels von Menschen, Maschinen, Materialien und weiteren Elementen in einer Fabrik hervor, um eine Leistung bestmöglich erbringen zu können.

Eine Fabrik ist somit definiert als ein material-technisches, technologisch-organisatorisches und örtlich-räumliches Systemgebilde der industriellen Produktion. Dieses hat eine Produktionsaufgabe sowie eine bestimmte Dimension, Struktur und Gestalt, in der die zur Neuherstellung, Wiederherstellung oder Verwertung von Produkten erforderlichen Prozesse in Systemen realisiert, durch ausgebildete Menschen organisiert und durch energiebeanspruchende Technik unterstützt werden.⁴⁹

Planung

Vor der Durchführung jeder Tätigkeit wird im Allgemeinen eine Planung als Vorbereitung vorangestellt. Diese soll sicherstellen, dass die Tätigkeiten folgerichtig und mit dem gewünschten Ergebnis realisiert werden können. Zu den Hauptaufgaben zählen dabei die Erarbeitung von Vorgaben, deren Dokumentation in einem Plan (Bedarfsplan, Projektplan, Investitionsplan, Entwicklungsplan, usw.) und die Kontrolle, ob die Vorgaben während und nach der Tätigkeitsdurchführung eingehalten wurden.⁵⁰

Laut Wöhe et al. findet bei der Planung die gedankliche Vorwegnahme zukünftigen Handelns statt. Dabei werden verschiedene Handlungsalternativen betrachtet und abgewogen, um schlussendlich den bestmöglichen Pfad wählen zu können.⁵¹

In dieser Definition sind zwei wesentliche Merkmale der Planung definiert: Zum einen ist sie „zukunftsorientiert“, es erfordert also die Beschreibung künftiger Situationen. Zum anderen die „gedankliche Vorwegnahme“, wodurch die Planung also nicht unbedacht ist, sondern unter Berücksichtigung von bestimmten Regeln und Wertvorstellungen durchgeführt wird.⁵²

Kurz und adäquat beschrieben ist die Planung auch in der VDI-Richtlinie 5200 als eine gedankliche Vorwegnahme eines gewünschten Ergebnisses mit der zur Zielerreichung erforderlichen Handlungsabfolge.⁵³

⁴⁹ Vgl. Helbing, K. W./Mund, H./Reichel, M., 2014., S.16

⁵⁰ Vgl. Helbing, K. W./Mund, H./Reichel, M., 2014., S.10

⁵¹ Vgl. Wöhe, G./Döring, U./Brösel, G., 2016.

⁵² Vgl. Schneeweiß, C., 1991., S.1-2

⁵³ Vgl. VDI 5200 Blatt 1., S.4

Fabrikplanung

Fügt man die Worte Fabrik und Planung zusammen, kann man dies vereinfachend als die vorausbestimmende Gestaltung von industriellen Fabrik- beziehungsweise Produktionssystemen beschreiben.⁵⁴

Stärker methodisch betrachtet versteht man unter Fabrikplanung einen systematischen, ziel- und prozessorientierten und in aufeinander aufbauenden Phasen strukturierten, kreativen Prozess. Dabei werden Theorien, Modelle, Methoden und Werkzeuge eingesetzt, um eine Fabrik von der Idee über alle Planungsphasen und -strukturen des Fabriklebenszyklus hinweg und einschließlich des Fabrikgebäudes zu gestalten und zu betreiben. Dieser Fabriklebenszyklus umfasst dabei die Entwicklung, den Aufbau, den Anlauf, den Betrieb sowie auch den Abbau einer Fabrik.⁵⁵

In der Literatur, aber auch in der Praxis, wird der Fabrikplanungsbegriff - wie der Planungsbegriff selbst - nicht eindeutig verwendet. Mögliche Interpretationen sind dabei beispielsweise: ⁵⁶

- Fabrikplanung als Funktion, die eine methodische Entscheidungsvorbereitung bei einmaligen Reorganisations- oder Investitionsmaßnahmen erarbeitet.
- Fabrikplanung als Führungsinstrument, welches die Anforderungen und deren Auswirkungen auf das Fabrikssystem permanent und systematisch erfasst und nach der wirtschaftlichsten Lösung strebt.
- Fabrikplanung als Abteilung, die einen bestimmten Personenkreis umfasst und dieser Funktionen oder Tätigkeiten der Fabrikplanung zuordnet.

Definiert man den Begriff der Fabrikplanung aus logistischer Sichtweise, bedeutet er die Gestaltung der gesamten Logistik von der Standortwahl bis zum organisierten Zusammenführen der einzelnen Fabrikelemente. Dabei stellen niedrige Kosten und maximale Effektivität die Hauptziele dar.⁵⁷

Helbing führt im Zusammenhang mit der Fabrikplanung den Begriff Fabrikprojektierung ein. Die Fabrikplanung umfasst dabei die entsprechende Planung der Fabrikplanungsgebiete, wie beispielsweise die Fabrikentwicklungsplanung, die -projektierungsplanung, die -realisierungsplanung, die -betriebsplanung, die -rationalisierungsplanung sowie die -verwertungsplanung mit den Orientierungen Technologie (technologische Fabrikplanung), Betreuung (Fabrikbetriebsplanung) und Wirtschaft (Fabrikgeschäftsplanung). Die Inhalte und Durchführung dieser Tätigkeitsgebiete werden durch diese Planung allerdings nicht ersetzt. Vielmehr

⁵⁴ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.11

⁵⁵ Vgl. Schenk, M./Wirth, S./Müller, E., 2014., S.28

⁵⁶ Vgl. Pawellek, G., 2014., S.17

⁵⁷ Vgl. Pawellek, G., 2014., S.9

werden im Bezug zur Fabrikprojektierung durch die Fabrikplanung Projektierungsvorgaben als Aufgabenstellung erarbeitet, welche durch die Fabrikprojektierung in Projekte umgesetzt und dadurch kontrollierbar gemacht werden. Laut dieser Definition sind mit den Methoden der Fabrikplanung keine Projektlösungen erarbeitbar, sondern nur Vorgaben, welche durch die Fabrikprojektierung in Lösungen umgesetzt werden.⁵⁸

Trotz der unterschiedlichen Definitionen des Begriffes Fabrikplanung (oft auch als Werk- beziehungsweise Werkstrukturplanung bezeichnet) wird in dieser Arbeit darunter ein systematischer, zielorientierter Prozess mit allen zugehörigen Methoden, Werkzeuge etc. verstanden, der zur Bestimmung des Standortes, der Gebäudewahl und -anordnung sowie der Produktionsprozessgestaltung inklusive der zugehörigen Logistikprozesse und erforderlichen Nebenprozesse einschließlich deren Realisierung, Inbetriebnahme und Hochlauf notwendig sind.^{59 60 61}

Zielfelder

Die Fabrik muss im Planungsprozess als Gesamtsystem betrachtet werden, welches durch die Gestaltung folgender Planungsfelder beschrieben wird:^{62 63 64}

- Standortplanung
Bestimmung von strategisch geeigneten Produktionsstandorten aus globaler Perspektive unter Berücksichtigung von vorhandenen Kompetenzen, Infrastruktur, Kundennähe sowie Kosten
- Generalbebauungsplanung
Wahl und Anordnung der Raum- und Gebäudesysteme am Fabrikgelände sowie Entwurf von Bebauungsplänen
- Fabrikstrukturplanung
Konzeption notwendiger Produktions- und Logistikprozesse sowie der erforderlichen Personal- und Organisationsplanung in den entworfenen Flächen- und Raumsystemen

Dabei sollte grundsätzlich beachtet werden, dass die herzustellenden Produkte die erforderlichen Prozesse, also die Fabrikstruktur, bestimmen. Diese wiederum legen spezielle Gebäude- und deren Anordnungsstruktur (Generalbebauungsplan) fest, aus

⁵⁸ Vgl. Helbing, K. W./Mund, H./Reichel, M., 2014., S.10-11

⁵⁹ Vgl. Grundig, C.-G., 2018, S.11

⁶⁰ Vgl. Schenk, M./Wirth, S./Müller, E., 2014., S.29-30

⁶¹ Vgl. VDI 5200 Blatt 1., S.3

⁶² Vgl. Grundig, C.-G., 2018, S.11-12,15

⁶³ Vgl. Wiendahl, H.-P./Reichardt, J./Nyhuis, P., 2010., S.33

⁶⁴ Vgl. Schenk, M./Wirth, S./Müller, E., 2014., S.200-204

welchen schlussendlich die Anforderungen an das Grundstück beziehungsweise den Standort (Standortplanung) folgen.⁶⁵

In ihrer Gesamtheit bilden diese konkret gestalteten Planungsfelder das Fabrikkonzept, welches unterschiedlichste Zielsetzungen verfolgt, die jedoch in drei wesentliche Zielfelder zusammengefasst werden können, wie in Abbildung 6 mit durchgezogenen Linien dargestellt ist.^{66 67 68}

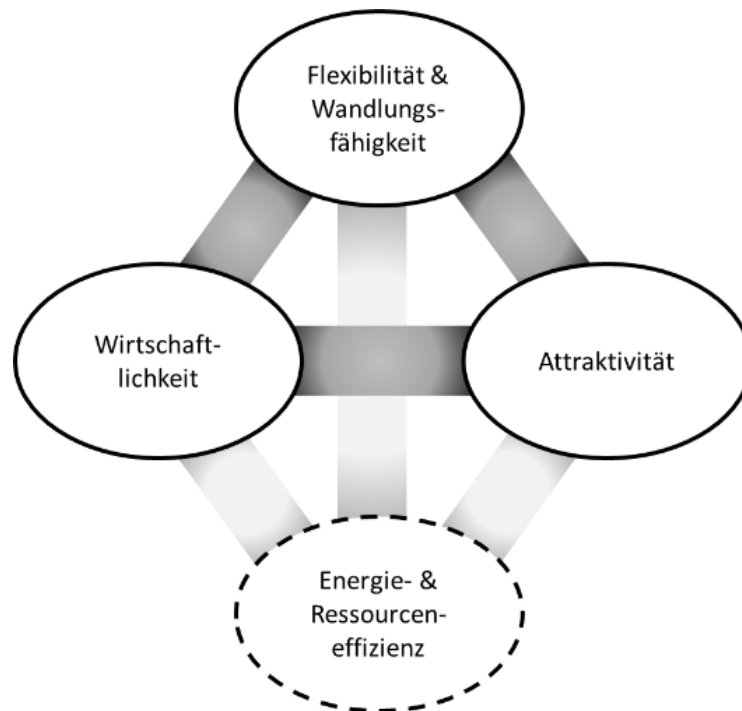


Abbildung 6: Zielfelder Fabrikkonzept (eigene Darstellung)

Aktuelle Entwicklungen im Energie- und Umweltbereich führen allerdings zu einer deutlichen Erweiterung dieser Zielfelder. Gefordert sind nun Fabrikkonzepte, welche zusätzlich die Erreichung und nachhaltige Sicherung einer hohen Energie- und Ressourceneffizienz gewährleisten, wie in Abbildung 6 strichliert dargestellt ist.⁶⁹

Diese oben genannten wesentlichen Zielfelder eines Fabrikkonzeptes können wie folgt beschrieben werden:^{70 71 72}

– Wirtschaftlichkeit

Ziel ist es, die Erzeugnisse bei kurzen Durchlaufzeiten und minimalen Beständen mit hoher Termintreue und ausreichender Qualität herzustellen.

⁶⁵ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.15

⁶⁶ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.12

⁶⁷ Vgl. Wiendahl, H.-P./Reichardt, J./Nyhuis, P., 2010.

⁶⁸ Vgl. Bischoff, J., 2018., Teil 2, S.4

⁶⁹ Vgl. Müller, E. u. a., 2013., S.11, 120

⁷⁰ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.12-15

⁷¹ Vgl. Müller, E. u. a., 2013, S.11, 30-31

⁷² Vgl. Berger, U./Wolff, D./Kulus, D., 2012., S.587

Dazu sind nicht wertschöpfende Tätigkeiten weitestgehend zu vermeiden, Produktions- und Materialflüsse logistikgerecht zu gestalten sowie Ausrüstungen, Flächen und Personal bestmöglich auszulasten.

– Flexibilität und Wandlungsfähigkeit

Aufgrund turbulenter äußerer (z.B. Absatzschwankungen) und innerer Einflüsse (z.B. Produktanlauf) sind Prozesse, Raumstrukturen, Gebäudesysteme, Ausrüstungen etc. so auszulegen, dass diese an die verschiedenen Einflüsse permanent angepasst werden können.

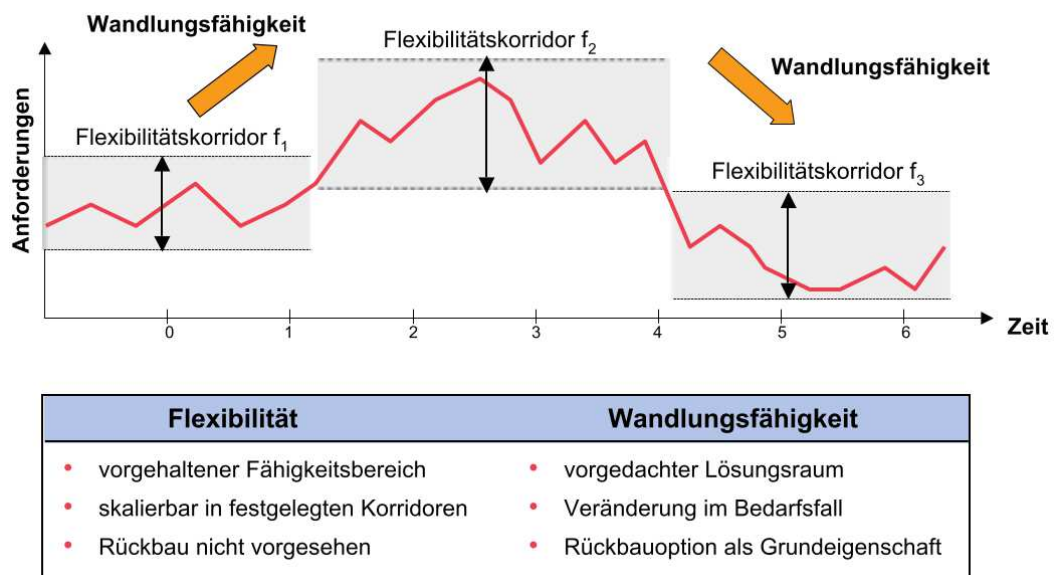


Abbildung 7: Flexibilität vs. Wandlungsfähigkeit⁷³

Der Unterschied zwischen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit ist dabei in Abbildung 7 dargestellt. Von Flexibilität einer Fabrik spricht man, wenn sich die Anforderungen zwar verändern, diesen allerdings durch einen vorgehaltenen Fähigkeitsbereich in einem gewissen Flexibilitätsskorridor ohne große Umbauten entsprochen werden kann. Über- oder Unterschreiten dieser Anforderungen diesen Flexibilitätsskorridor, sind bei entsprechendem Bedarf Umbauten in einem vorgedachten Lösungsraum notwendig, um diesen gerecht zu werden. Unter der Voraussetzung, dass eine Rückbauoption der Fabrik eingeplant wurde, spricht man in diesem Fall von der Wandlungsfähigkeit einer Fabrik.

– Attraktivität

Ein attraktives Erscheinungsbild des Fabrikgebäudes durch moderne, ästhetische Industriearchitektur, die Gewährleistung geringer

⁷³ Wiendahl, H.-P./Reichardt, J./Nyhuis, P., 2010., S.121

Umweltbelastungen durch die Erfüllung ökologischer Kriterien sowie motivierende, humane Arbeits-, Entlohnungs- und Sozialbedingungen stellen eine hohe Attraktivität der Fabrik sicher.

– Energie- und Ressourceneffizienz

Fabriken sollen so geplant und betrieben werden, dass sie im Betrieb energieeffizient sind und Ressourcen bestmöglich erhalten bleiben, um künftigen Generationen als Lebensgrundlage und Entwicklungskapital zu dienen. Abbildung 8 unterstreicht dabei den enormen Einfluss der Fabrikplanung anhand des tatsächlichen Energieverbrauches über den Fabrik-Lebenszyklus. Dabei wird deutlich, dass im Planungsprozess großes Potential besteht, Energie einzusparen, wohingegen dies im Fabrikbetrieb eher schwierig ist, da der wesentliche Anteil des Verbrauches bereits festgelegt wurde.

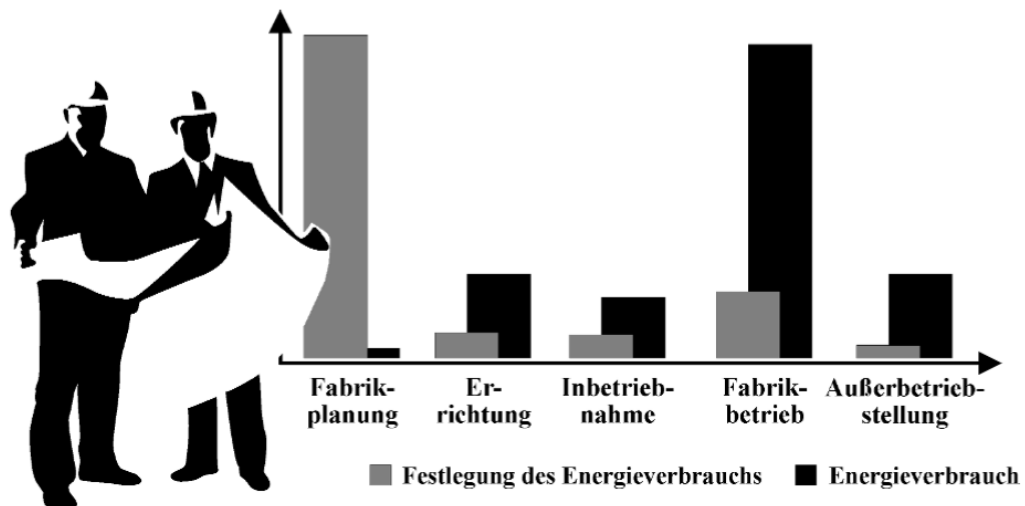


Abbildung 8: Festlegung des Energieverbrauches und tatsächlicher Energieverbrauch über Fabrik-Lebenszyklus⁷⁴

Struktur- bzw. Planungsebenen

Um die Komplexität (z.B. durch eine stufenweise Betrachtung bei komplexen betrieblichen Analysen) zu verringern, die Transparenz des Planungsobjektes zu erhöhen und das Planen und Betreiben von wandlungsfähigen Fabriken zu erleichtern, kann eine Fabrik beziehungsweise ein Industrieunternehmen in die in Abbildung 9 dargestellten Struktur- oder auch Planungsebenen vertikal aufgegliedert werden.

Dabei kann sich die Anzahl und Benennung dieser Ebenen von Unternehmen zu Unternehmen unterscheiden, da sich beispielsweise ein Produktionsbereich über

⁷⁴ Müller, E. u. a., 2013., S.30

mehrere Gebäude erstrecken kann oder nur ein Gebäude am Fabrikstandort vorhanden ist.^{75 76 77}

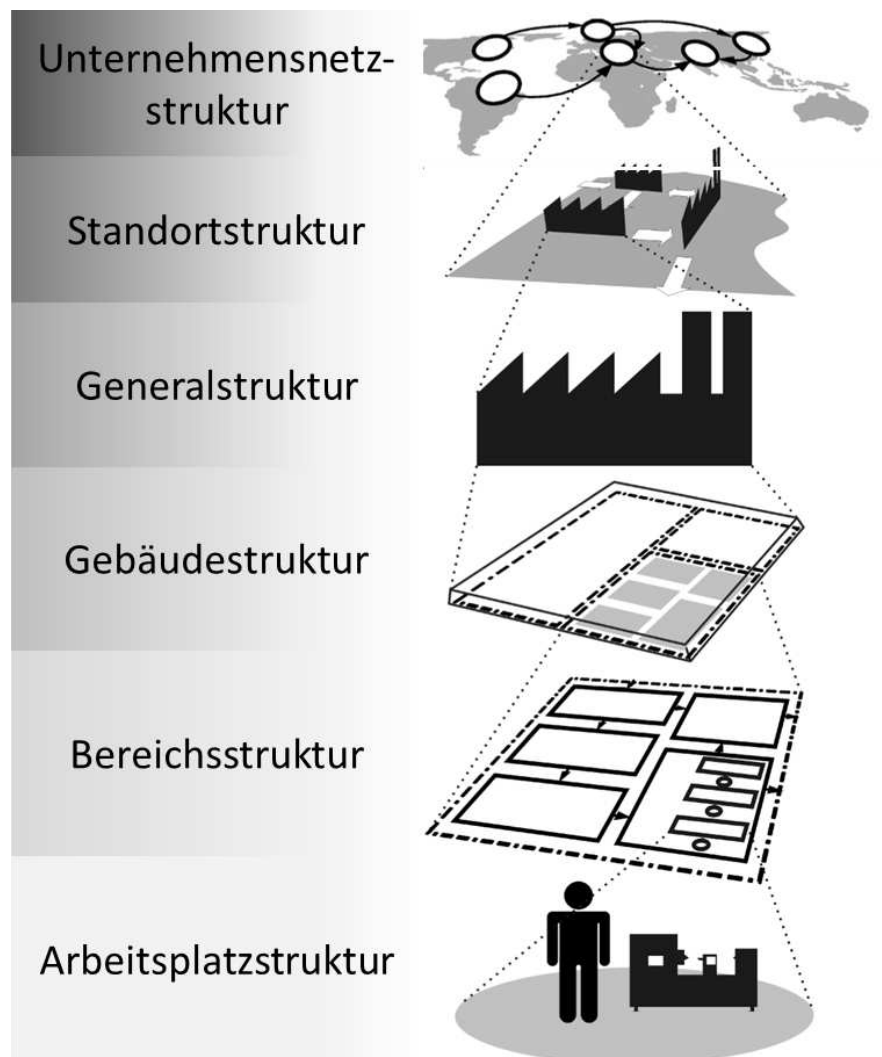


Abbildung 9: Struktur-/Planungsebenen einer Fabrik (eigene Darstellung)^{78 79 80}

Diese Strukturebenen sind hierarchisch miteinander verknüpft, wodurch die Planung ein Zusammenspiel über die einzelnen Ebenen hinweg erfordert.⁸¹

Die unterste Ebene, oft auch Arbeitsstation genannt, ist eine elementare Einheit des Produktionsprozesses und stellt die Konfiguration eines Arbeitsplatzes dar. Diese beinhaltet in der Regel eine Arbeitsplatzfläche und einen Arbeitsraum, in dem die Arbeitsaufgabe (beispielsweise eine Drehoperation oder Oberflächenbehandlung)

⁷⁵ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.15

⁷⁶ Vgl. Müller, E. u. a., 2013., S.41

⁷⁷ Vgl. Schenk, M./Wirth, S./Müller, E., 2014., S.165

⁷⁸ Vgl. Müller, E. u. a., 2013., S.42

⁷⁹ Vgl. Schenk, M./Wirth, S./Müller, E., 2014., S.165

⁸⁰ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.15

⁸¹ Vgl. Brecher, C., 2011., S.304

sicher und gefährungsfrei unter Nutzung von Ressourcen durchgeführt werden kann.^{82 83 84}

Unter der Bereichsstruktur wird die Anordnung von Arbeitsplätzen beziehungsweise Arbeitsstationen in Segmenten verstanden. Diese in sich geschlossenen Leistungseinheiten bestehen dabei mindestens aus zwei, sich meist ähnelnden Arbeitsstationen, die über ein Flusssystem miteinander verknüpft sind. Dieser Material- und Informationsfluss wird zunächst durch das Produkt bestimmt, da aus dem Produktfluss alle weiteren Flusssysteme mit den zusätzlich notwendigen Flussgegenständen (z.B. Hilfsstoffe, Werkzeuge, Prüfmittel, Abfallstoffe) sowie die ganzheitlichen Material-, Informations- und Energieflüsse folgen.^{85 86 87}

Die Strukturplanung der Bereiche steht dabei in enger Verbindung mit der Gebäudestruktur und wird durch sie auch beeinflusst. Die Gebäudestruktur legt die Anordnung der Bereiche (z.B. Logistik, Fertigung, Montage, Instandhaltung, Qualitätssicherung) im Gebäude fest und steht dabei in Beziehung nach innen zum Produktionssystem sowie nach außen zur infrastrukturellen Anbindung an die General- und Standortstruktur.^{88 89 90}

Durch die Generalstrukturplanung wird die Anordnung der Gebäude am Fabriksgelände festgelegt. Eine wichtige Rolle spielen bei der Gestaltung die Informations-, Material- und Warenflüsse mit den zugehörigen Verkehrswegen sowie Ver- und Entsorgungssystemen. Der Generalbebauungsplan legt die Anordnung der Baukörper, Verkehrs- und Freiflächen in möglichen Baustufen fest. Im Zuge dieser Strukturebene wird neben der Planung der eigentlichen Produktion auch die Anbindung indirekter Bereiche (z.B. Produktionsleitung, Arbeitsvorbereitung, Disposition und Logistikbereiche) festgelegt.^{91 92 93}

Ziel der Standortplanung ist es, das Werksgelände optimal im Wirtschaftsraum, also einer bestimmten Region, anzuordnen. Dabei bilden die Planungsobjekte Gebäude-, General- und Standortstruktur im Planungsprozess eine zusammenhängende Einheit, die ganzheitlich zu gestalten ist, um die logistikgerechte Gestaltung von Prozessen

⁸² Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.15

⁸³ Vgl. Wiendahl, H.-P./Reichardt, J./Nyhuis, P., 2010., S.131-132

⁸⁴ Vgl. Schenk, M./Wirth, S./Müller, E., 2014., S.167

⁸⁵ Vgl. Müller, E. u. a., 2013., S.41-42

⁸⁶ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.15

⁸⁷ Vgl. Schenk, M./Wirth, S./Müller, E., 2014., S. 178-179

⁸⁸ Vgl. Brecher, C., 2011., S.305

⁸⁹ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.15

⁹⁰ Vgl. Schenk, M./Wirth, S./Müller, E., 2014., S.186

⁹¹ Vgl. Wiendahl, H.-P./Reichardt, J./Nyhuis, P., 2010., S.359

⁹² Vgl. Brecher, C., 2011., S.305

⁹³ Vgl. Schenk, M./Wirth, S./Müller, E., 2014., S.200

und Flusssystemen innerhalb des Gebäudes, des Werksgeländes sowie im regionalen Wirtschaftsraum sicherzustellen.^{94 95}

Die oberste Ebene beschreibt die Einbindung der Fabrik in ein globales Wertschöpfungsnetzwerk. Diese Netzwerke bestehen in der Regel aus mehreren Standorten eines oder mehrerer Unternehmen und sind oft eng verknüpft mit Lieferanten von Produktionskomponenten oder Teilprodukten.^{96 97 98 99}

Fabriklebenszyklus

Fabriken durchlaufen bei einer ganzheitlichen zeitlichen Betrachtung den in Abbildung 10 dargestellten Fabriklebenszyklus. Dieser beinhaltet die Entwicklung eines Neusystems, die Realisierung (Aufbau), die Inbetriebnahme, die Nutzung der Fabrik sowie den Abbau dieser am Ende der Lebensdauer, wobei zwei oder mehrere dieser Phasen auch parallel ablaufen können.^{100 101}

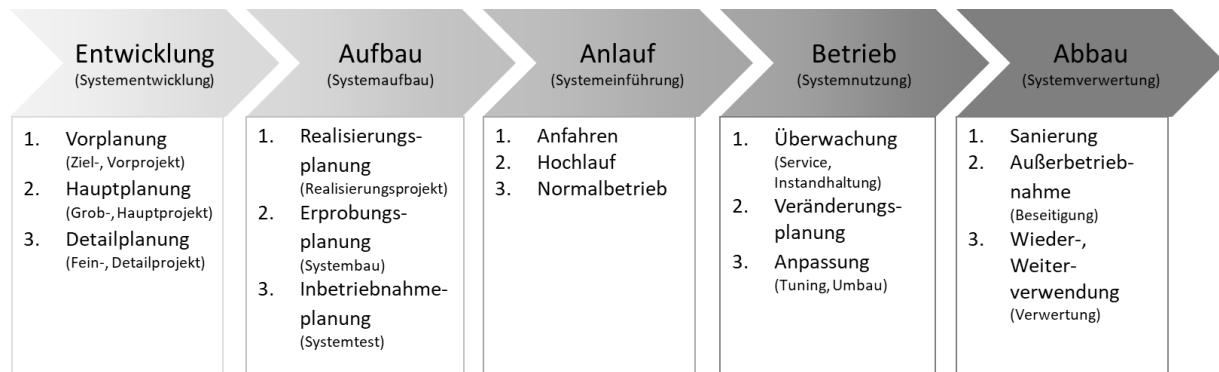


Abbildung 10: Fabriklebenszyklus und Planungsstufen (eigene Darstellung)¹⁰²

Da Fabriklebenszyklen oft länger als 40 Jahre lang sind, treten die materielle Entstehungs- und Abbauphase jeweils einmal, die Fabriknutzungs- und erhaltungsphase, insbesondere die Anpassung und Rekonstruktion, mehrfach auf.¹⁰³

Die Lebensdauer und ihre Verteilung auf die einzelnen Phasen im Fabriklebenszyklus können sehr unterschiedlich sein und werden letztendlich durch das herzustellende Produkt, die notwendigen Geschäfts- und Produktionsprozesse sowie das Produktions- und Fabrikssystem bestimmt. Dabei unterliegen alle Phasen dem

⁹⁴ Vgl. Schenk, M./Wirth, S./Müller, E., 2014., S.200

⁹⁵ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.15

⁹⁶ Vgl. Wiendahl, H.-P./Reichardt, J./Nyhuis, P., 2010., S.132

⁹⁷ Vgl. VDI 5200 Blatt 1., S.7

⁹⁸ Vgl. Müller, E. u. a., 2013., S.41

⁹⁹ Vgl. Pawellek, G., 2014., S.3

¹⁰⁰ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.15

¹⁰¹ Vgl. Müller, E. u. a., 2013., S.53

¹⁰² Vgl. Schenk, M./Wirth, S./Müller, E., 2014., S.151

¹⁰³ Vgl. Helbing, K. W./Mund, H./Reichel, M., 2014., S.23

ständigen Wandel, es müssen somit Veränderungen in den einzelnen Phasen sowie gegenseitige Wechselwirkungen im Gesamtzyklus berücksichtigt werden.¹⁰⁴

Eine ständige Herausforderung stellen dabei auch die im Vergleich zur Lebensdauer der Fabrik deutlich kürzeren Produkt- und Prozesslebenszyklen dar, welche beispielsweise durch Innovationen und Marktturbulenzen hervorgerufen werden und eine permanente Flexibilität und Wandlungsfähigkeit erfordern.¹⁰⁵

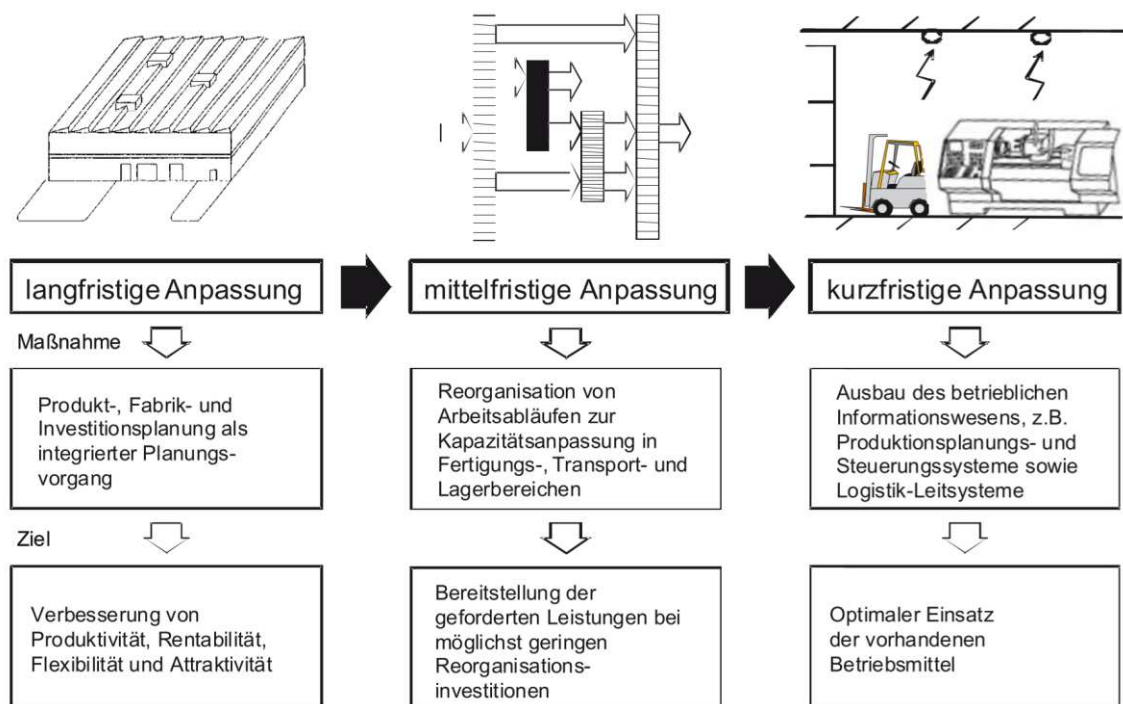


Abbildung 11: lang-, mittel- und kurzfristige Anpassungen an Veränderungen¹⁰⁶

Diese Anpassungen an Veränderungen können unterschieden werden in lang-, mittel- und kurzfristige und beeinflussen sich sehr stark gegenseitig, einige Beispiele dazu sind in Abbildung 11 dargestellt.

Planungsgrundfälle

Abgeleitet aus dem Fabriklebenszyklus ergeben sich in der Fabrikplanung fünf Planungsgrundfälle, wobei in der VDI Norm 5200 die beiden Fälle Umgestaltung und Erweiterung unter dem Überbegriff Umplanung zusammengefasst werden. Diese unterscheiden sich hinsichtlich Aufgabencharakter, Problemumfang Schwierigkeitsgrad, Lösungskonzepten und -freiräumen sowie speziellen Inhalten der Planungsmethodik.^{107 108 109}

¹⁰⁴ Vgl. Schenk, M./Wirth, S./Müller, E., 2014., S.149-150

¹⁰⁵ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.16

¹⁰⁶ Pawellek, G., 2014., S.10

¹⁰⁷ Vgl. VDI 5200 Blatt 1., S.4

¹⁰⁸ Vgl. Strunz, M., 2003., S.189

¹⁰⁹ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.17

Die fünf Grundfälle lauten wie folgt: ^{110 111 112}

- Neubau

Stellt den klassischen, idealen Grundfall der Fabrikplanung dar und bietet die maximale Anzahl an Freiheitsgraden durch den Aufbau der Fabrik auf der „grünen Wiese“. Bauliche Restriktionen sind dabei nur durch das Gelände und die vorhandene Infrastruktur zu erwarten, nicht jedoch durch vorhandene Bausubstanz. Bedingt durch die große Anzahl an Freiheitsgraden erhöht sich aber auch die Komplexität und der Planungsaufwand, da zusätzliche Aufgaben, wie beispielsweise die Wahl eines neuen Standortes oder die Erstellung eines Generalbebauungsplanes, anfallen können. Aktuell ist nur ein kleiner Teil der industriellen Fabrikplanungsaufgaben diesem Grundfall zuzuordnen, durch die Globalisierung von Märkten und Standorten ist eine Zunahme von Neubau-Fabrikplanungsprojekten allerdings deutlich erkennbar.

- Umgestaltung

Dieser Planungsfall stellt häufig eine Daueraufgabe in Unternehmen dar und wird deswegen auch als „rollende Fabrikplanung“ bezeichnet. Dabei werden unter Berücksichtigung gegebener Restriktionen, wie beispielsweise vorhandener Fundamente oder Versorgungsleitungen, bestehende Anlagen, Prozesse oder ganze Fertigungskomplexe modernisiert beziehungsweise rationalisiert. Der Anlass dafür sind oft vom Markt geforderte Änderungen des Produktionsprogrammes, zu dem im Regelfall relativ exakte Vorgaben möglich sind, oder die Verfügbarkeit kostenwirksamer Prozess- und Anlageninnovationen. Dieser Grundfall beinhaltet den Großteil der anfallenden Fabrikplanungsaufgaben.

- Erweiterung

Reichen vorhandene Produktionsanlagen und -flächen beispielsweise aufgrund des vorhandenen Auftrags- und Umsatzwachstums nicht mehr aus und ist die Schaffung zusätzlicher Kapazitäten und/oder Fabrikgebäude notwendig, spricht man von der Erweiterung bestehender Industriebetriebe oder Fertigungskomplexe. Im Zuge dieser werden oftmals tangierende, bestehende und zu erweiternde Werkstattprozesse modernisiert und rationalisiert. Im Regelfall wird durch die Erweiterung der Flächen- und Raumnutzungsgrad erhöht, wodurch Änderungen im

¹¹⁰ Vgl. Brecher, C., 2011., S.304

¹¹¹ Vgl. VDI 5200 Blatt 1., S:4

¹¹² Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.17-19

Generalbebauungsplan notwendig werden können. Im Extremfall wird der Standort des Unternehmens in Frage gestellt, was zur Verlagerung beziehungsweise Ausgliederungen von Kapazitäten an einen Neustandort führen kann und somit ähnliche Aufgaben wie bei einem Neubau anfallen.

– Rückbau

Komplementär zur Erweiterung einer Fabrik ist der Rückbau. Die Gründe dafür können vielfältig sein, oft sind aber Umsatzrückgänge, ein Abbau der Fertigungstiefe oder die Auslagerung von Produktionsstufen beziehungsweise die Konzentration auf Kernprodukte der Auslöser dafür. Vorhandene Überkapazitäten werden durch Restrukturierungs- und Redimensionierungs-Maßnahmen in den Produktionsbereichen, entsprechenden Nebengebieten (z.B. Instandhaltung, Entsorgung) sowie indirekten Produktionsbereichen (z.B. Arbeitsvorbereitung, Vorrichtungsbau) abgebaut. Diese Definition wird zwar in dieser Arbeit nicht verwendet, der Vollständigkeit halber wird jedoch erwähnt, dass der Verein Deutscher Ingenieure in der Richtlinie 5200 den Rückbau als ein Stilllegen und Demontieren der Fabrik beschreibt, um das Gelände für die Nachnutzung vorzubereiten.

– Revitalisierung

Wird eine Industriebrache für die erneute industrielle Neu- beziehungsweise Umnutzung verfügbar gemacht, spricht man von einer Revitalisierung. Dabei finden im Grunde Abbruch und Sanierungsprozesse statt sowie eine Restrukturierung und Umgestaltung der Gebäudestrukturen und des Fertigungskomplexes. Angestrebt wird die Erzielung optimaler Prozesslösungen durch eine große Anzahl an Freiheitsgraden im Gestaltungsprozess. Ein positiver Effekt der Revitalisierung von Industriebetrieben ist, dass Ressourcen geschont und Naturflächen geschützt werden.

Planungsgrundsätze¹¹³

Um vorgegebene Zielstellungen (Aufwand, Termine, Zeiträume, Qualität) zu erreichen, ist die Einhaltung der in Abbildung 12 dargestellten Gesetzmäßigkeiten unbedingt notwendig. Diese, aus theoretischen Analysen abgeleiteten und durch praktische Erfahrung bestätigten Grundsätze, die auch aktuelle Neuanforderungen an den Planungsablauf beinhalten, sichern eine wissenschaftliche Planungsmethodik.

¹¹³ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.23

Wertschöpfungsanalyse	- Durchgängige kritische Analyse der Wertschöpfungsketten als Planungsgrundlage - Wertschöpfende Prozesselemente (Bearbeitungsschritte) hochrationell und flexibel gestalten, nicht wertschöpfende (Logistikfunktionen) minimieren
Ganzheitliche Planung	- Vielzahl miteinander verflochtene Teilaufgaben, die zahlreichen inner- und außerbetrieblichen Einflüssen unterliegen - Lösung der Teilaufgaben darf nicht isoliert, sondern muss durchgängig bei ganzheitlicher Problembetrachtung, mit Blick auf das Gesamtziel, erfolgen
Stufenweises Vorgehen (Iteration)	- Stufenweise, gegebenenfalls parallele bzw. überlappende Bearbeitung von abgrenzbaren, logisch geordneten Teilschritten zur Sicherung von zielorientierten und systematischen Abläufen - Prinzipiell von Grob- zu Feinplanungsinhalten (steigende Konkretisierung), Teilschritte möglichst abgrenzbar und ablauforientiert gliedern
Visualisierung	- Planungsergebnisse (Teil- und Zwischenergebnisse als auch komplexe Projektlösungen) darstellen und veranschaulichen zur Sicherung abgestimmter, widerspruchsfreier und verteilter Zusammenarbeit und um die Lösungspräsentation z.B. vor Entscheidungsträgern verständlich, überzeugend und funktionsgerecht zu gestalten 2-D (Schemata, Layout, etc.) und 3-D (Funktionsmodelle, etc.) sowie innovative IT-Systeme (virtuelle Räume, etc)
Wirtschaftlichkeit der Planung	- Fabrikplanungsaktivitäten verursachen erhebliche Kosten, insbesondere für Fabrikplanungspersonal und sind in ihrem Umfang zu begrenzen (Budgetierung), aufwandsseitige Über- bzw. Unterplanung soll vermieden werden - Wesentliche Kostenbeeinflussung des Projektes in den konzeptionellen Phasen am Planungsanfang, deshalb besondere Anforderungen an das in diesen Phasen tätige Planungspersonal (Integration von Erfahrungsträgern)
Variantenprinzip	- Im Regelfall immer mehrere sinnvolle Lösungsvarianten bei einer Fabrikplanungsaufgabe möglich, Variantenbildung ist erwünschte Vorgehensweise zur Aufweitung des Lösungsraumes - Kritisch-schöpferische Auseinandersetzung mit Lösungen, Alternativen und Einflüssen mündet in fundiertem Lösungskompromiss als Vorzugsvariante, wodurch zielsichere Lösungsfindung erleichtert wird
Notwendigkeit der Idealplanung	„kompromissfreie Ideallösung“ (Idealplanung) als Ausgangsbasis für die nachfolgende Bestimmung von realisierbaren Lösungsvarianten bilden (Realplanung) - Idealvariante bietet objektiven Beurteilungsmaßstab (Vergleichsbasis) für die Realvariante hinsichtlich des Zielerreichungsabstandes, wodurch die Projektverteidigung bzw. Entscheidungsfindung fundiert möglich wird
Sicherung von Projekttreue	- Fabrikplanungsaufgaben haben einen Zeitrahmen von mehreren Wochen, in speziellen Fällen Monaten oder Jahren - Signifikante Änderungen in der Planungs-/Realisierungsphase sollten nachträglich wegen Auswirkungen auf bisher erarbeiteten Projektstand nur bei Vorliegen von Projektfehlern/wesentlichen Neuanforderungen gestattet werden - Flexibilität wird durch möglichst kurze Planungszeiträume (gleitende/rollende/partizipierte Fabrikplanung) erreicht
Sicherung von Flexibilität/ Wandlungsfähigkeit	- Sinkende Lebensdauer von Produkten/Prozessen sowie Globalisierung führen zu steigendem Bedarf an Flexibilität - Anpassungs- und Wandlungsfähigkeit des Planungsergebnis an wechselnde Produktionsbedingungen und Eingriffe wird durch bewusst gestaltete Projektflexibilität gesichert, z.B. durch vorausschauende Planungstätigkeit (mittel-/langfristig), Modularisierung/Standardisierung, gezielte Überdimensionierung, flexibler Industriebaustrukturen
Komplexität der Arbeitsinhalte	- Bei Fabrikplanungsprojekten ist Teamarbeit von Beginn an notwendig, typischerweise stimmen sich Fabrikplanungsingenieure sehr früh z.B. mit Industriearchitekten, Bauingenieuren, Spezialisten der Lüftungs- und Klimatechnik sowie der Verfahrens- und Entsorgungstechnik ab - Im Projektmanagement der Fabrikplanungsaufgabe ist der interdisziplinäre Charakter zu berücksichtigen
Ordnung und Vereinheitlichung	- Die Lösung der großen Menge an unterschiedlichen Teilaufgaben in der Fabrikplanung ist nur unter Berücksichtigung des Gesamtzusammenhanges aller Teilaufgaben möglich - Der Planungsingenieur muss die Ordnung sichern und vereinheitlichen (gleiche Sprach-/Begriffswelt, Begrenzung Variantenbreiten, Baustandards), um komplizierte/komplexe Aufgabenstellungen überschaubar zu halten
Dezentralisierung/ Partizipation	- Komplexitätsverringerung durch Verlagerung von Planungsinhalten/Entscheidungen zu den Orten der Wirkungen/Erfahrungen, besonders bei Grob-/Fein-/Ausführungsplanung in den Planungsebenen Arbeitsplatz-/Bereichs-/Gebäudestrukturen wird durch interdisziplinäre Zusammenarbeit mit „vor Ort“ Mitarbeitern angestrebt - Nutzen von Erfahrungen, aktive Mitgestaltung/praxisnahe Entscheidungsfindung erhöhen Akzeptanz der Lösung
Funktionsintegration Fabrikplanung/ Fabrikbetrieb	- Integrierte/parallele Bearbeitung spezifischer funktioneller Fachinhalte der Fabrikplanung - Prozessstrukturen, das Layout, Logistikprinzipien, Lagertechniken und -größen werden in der Systemplanung bestimmt, wodurch zwangsläufig spezifische Anforderungen für die Ablauforganisation in der Systemnutzung (Informationsflüsse, Datenstrukturen, Kriterien, PPS- und BDE-Systeme, spezifische Software, etc) festgelegt sind

Abbildung 12: Planungsgrundsätze Fabrikplanung (eigene Darstellung)¹¹⁴

¹¹⁴ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.23-27

2.2 Phasenmodell des Fabrikplanungsprozesses

Der Planungsprozess einer Fabrik kann sich, je nach Anforderungen der Projektart beziehungsweise des Projekttyps (Neuplanung, Erweiterung etc.), sehr unterschiedlich gestalten, da verschiedenartige Zielsetzungen eine differenzierte Vorgehensweise verlangen.¹¹⁵

Dabei finden sich in der Fachliteratur eine Vielzahl verschieden strukturierter Fabrikplanungsabläufe, welche sich hinsichtlich Anzahl, Benennung und Detaillierung der einzelnen Phasen mehr oder weniger stark unterscheiden. Abhängig vom Planungsinhalt und der Planungstiefe muss gegebenenfalls nur ein Teil der in den unterschiedlichen Modellen beschriebenen Phasen durchlaufen werden. Eine Gemeinsamkeit aller Phasenmodelle ist jedenfalls, dass sich eine generalisierende, verallgemeinerungsfähige Planungssystematik hinsichtlich des planungsmethodischen Vorgehens gebildet hat, welche eine möglichst breite Anwendbarkeit der Modelle sicherstellen soll.^{116 117}

Weiters ist allen Modellen ein stufen- beziehungsweise phasenweises Vorgehen gemein, das dem Planungsgrundsatz „vom Groben zum Feinen“ entsprechend immer detaillierter wird. Dabei können im Planungsprozess zahlreiche Iterationen notwendig werden und Rückkoppelungen auftreten. Zusätzlich hat sich in den letzten Jahren eine zunehmende Parallelisierung sowie fließende Übergänge der Planungsphasen aus Zeit- und Kostengründen etabliert.¹¹⁸

Trotzdem entdeckt man grundsätzliche Planungsprozessphasen in nahezu jedem Phasenmodell, die mit jeweils unterschiedlichem Detaillierungsgrad bearbeitet werden müssen. In Abbildung 13 ist dabei ein stark an die VDI-Richtlinie 5200 angelehntes Modell abgebildet, das um Einflüsse aus facheinschlägiger Literatur ergänzt wurde.

Darin ist ganz oben in dem hellblauen Feld die Benennung der jeweiligen Phase ersichtlich und darunter, in dunkelblau dargestellt, sind die wesentlichen Inhalte der entsprechenden Planungsphase abgebildet. Somit stellen beispielsweise im Bereich der Grundlagenermittlung im Phasenmodell die Informationsbeschaffung sowie die Informationsauswertung elementare Aktivitäten dar.

Eine der wesentlichen Ergänzungen zum VDI-Phasenmodell, welche in Abbildung 13 dargestellt ist, ist die Rückkopplung der jeweiligen Planungsphasen auf die vorherige (dunkelblau), wodurch der iterativ-zyklische Charakter des Fabrikplanungsprozess verdeutlicht wird. Dieser Schleifenprozess kann allerdings nicht nur zwischen den einzelnen Phasen auftreten, sondern auch im Laufe der Bearbeitung von Inhalten in

¹¹⁵ Vgl. Wiendahl, H.-P./Reichardt, J./Nyhuis, P., 2010., S.427

¹¹⁶ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.37

¹¹⁷ Vgl. VDI 5200 Blatt 1., S.37

¹¹⁸ Vgl. Bracht, U./Geckler, D./Wenzel, S., 2018., S.28

diesen Planungsphasen selbst (weiß). Dabei müssen diese Rückkoppelungen nicht auf direkt vorgelagerte Phasen beziehungsweise Inhalte beschränkt bleiben, sondern es kann durchaus auch eine Überarbeitung weiter zurückliegender Ergebnisse, Rahmenbedingungen etc. notwendig werden.^{119 120}

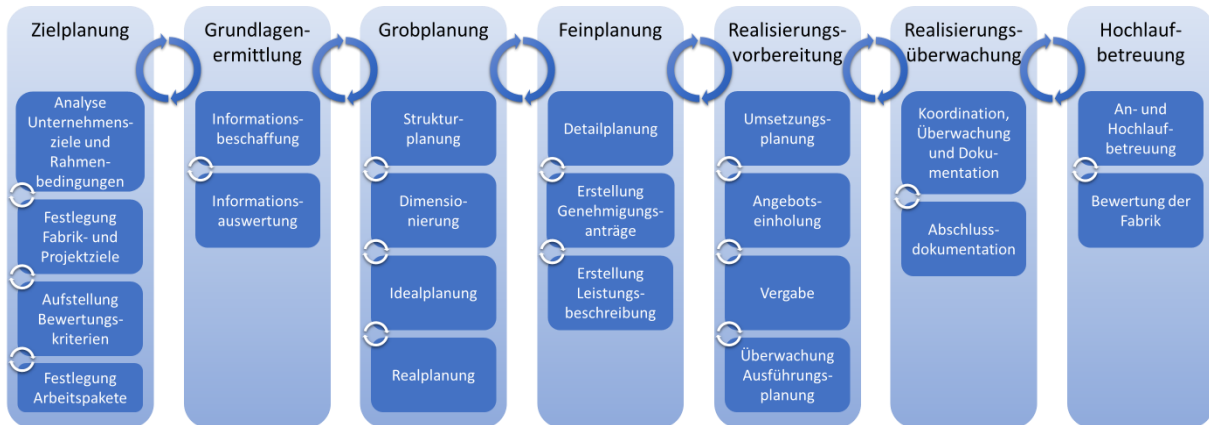


Abbildung 13: Phasenmodell Fabrikplanungsprozess (eigene Darstellung)^{121 122 123 124}

Unter Rückkoppelung ist in diesem Fall ein formaler Rückgriff auf eine vorgelagerte Planungsphase oder einen zuvor erarbeiteten Inhalt zu verstehen, wodurch oft Modifikationen an diesen Ausgangsgrößen und Arbeitsergebnissen vorgenommen werden müssen. Besonders sorgfältig und hochwertig sollte die Planung der Fabrik dabei in den frühen Projektphasen erfolgen, da hier Planungs- und daraus folgende Entscheidungsfehler enormen Einfluss auf den Planungsablauf und die Planungskosten haben.¹²⁵

In Abbildung 14 ist die Entwicklung der festgelegten sowie der entstehenden Kosten über die einzelnen Planungsphasen hinweg dargestellt. Da Pawellek die einzelnen Planungsphasen etwas anders definiert als in dieser Arbeit in Abbildung 13 abgebildet, wurde die horizontale Achse an das hier verwendete Phasenmodell angepasst.

Grundlegende Entscheidungen, wie sie in der Zieldefinition, der Grundlagenermittlung sowie der Grobplanung oft getroffen werden müssen (z.B. Umsiedelung an neuen Standort oder Änderungen im Generalbebauungsplan), haben einen weitaus stärkeren Einfluss auf die Kostenstruktur einer Fabrik als spätere Entscheidung, wie beispielsweise die Festlegung auf einen bestimmten Maschinentyp oder eine bestimmte Bauart, in der Feinplanung oder der Realisierungsvorbereitung. Im

¹¹⁹Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.40

¹²⁰ Vgl. Bracht, U./Geckler, D./Wenzel, S., 2018., S.30

¹²¹ Vgl. VDI 5200 Blatt 1., S.8-21

¹²² Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.40, 46-47

¹²³ Vgl. Bracht, U./Geckler, D./Wenzel, S., 2018., S.29

¹²⁴ Vgl. Wiendahl, H.-P./Reichardt, J./Nyhuis, P., 2010., S.429

¹²⁵ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.40

Gegensatz dazu entspricht der Anteil der verursachten Kosten der ersten beiden Phasen nur wenigen Prozent der gesamt verursachten Kosten, siehe Abbildung 14.¹²⁶

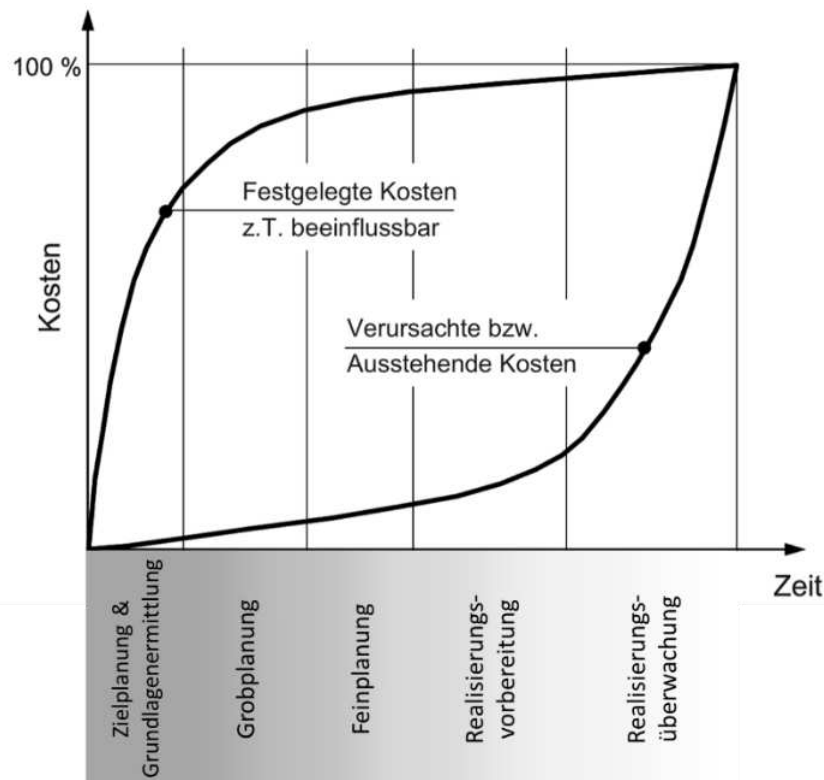


Abbildung 14: festgelegte und entstehende Kosten in den Planungsphasen (eigene Darstellung)¹²⁷

In der folgenden Tabelle werden die einzelnen Phasen des Fabrikplanungsprozesses, deren Inhalt sowie die daraus resultierenden Ergebnisse genauer beschrieben.^{128 129}

130

Planungsphasen im Fabrikplanungsprozess	
Planungsphase Inhalte	Ergebnis
Zielplanung Klärung der fabrikplanerischen Aufgabenstellung und Strukturierung des Planungsprojektes, um zielgerichtet arbeiten zu können und eine Bewertung des Planungsergebnisses zu ermöglichen; Analyse des Standortes sowie seines Umfeldes; klares Herausarbeiten der Ziele und Teilziele dieses Projektes	➤ Fabrikziele mit gewichteten Bewertungskriterien ➤ Projektziele ➤ Projektplan

Tabelle 1: Beschreibung der Planungsphasen (Teil 1)

¹²⁶ Vgl. Pawellek, G., 2014., S:64

¹²⁷ Vgl. Pawellek, G., 2014., S.64

¹²⁸ Vgl. VDI 5200 Blatt 1., S.8-22

¹²⁹ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.53.198

¹³⁰ Vgl. Schenk, M./Wirth, S./Müller, E., 2014., S.243

Analyse der Unternehmensziele und Rahmenbedingungen: Ermittlung projektspezifischer Auftraggeber-Vorgaben; Heranziehen von Informationen aus Unternehmensplanung und Vertriebsplanung zur Analyse der Unternehmensziele; nähere Bestimmung Planungsfall und Planungsinhalt; Untersuchung der Rahmenbedingungen; die Betrachtungsbereiche und Freiheitsgrade einschränken unter Berücksichtigung der strategischen Ausrichtung, der geplanten Produkte, möglicher Standorte und Budget- und Zeitrahmen	➤ Planungsanlass entsprechende, grob umrissene Aufgabenstellung
Festlegung der Fabrik- und Projektziele: konkrete Zielvorgaben für Planungsergebnis und -prozess; Festlegung Produktspektrum (Qualität, Lieferzeit, Kosten und Stückzahl/Zeiteinheit); Definition von Kennzahlen zur quantitativen Messung, gestalterische Leitlinie durch qualitative Fabrikziele inkl. Bewertungskriterien; Bestimmung einzuhaltender Termine sowie Projektbudget; Definition qualitativer Projektziele (Qualität der Dokumente, Einbeziehung von Mitarbeitern, Fachdisziplinen und externen Planungsbeteiligten, Planungsmethoden)	➤ Zu erreichende Fabrikziele ➤ Kennzahlen für Fabrikbetrieb ➤ Einzuhaltende Projektziele
Aufstellung der Bewertungskriterien: Vorgaben zur Kostenermittlung (betriebswirtschaftliche Kennzahlen, Berechnungsmodi, Kostensätze); Bewertungsmaßstab für Planungsvarianten; Festlegung weiterer quantitativer sowie qualitativer Bewertungskriterien passend zu Fabrikzielen sowie relative Gewichtung dieser	➤ Vorgaben zur Kostenermittlung ➤ Gewichtete Bewertungskriterien
Festlegung der Arbeitspakete: Strukturierung des Planungsprojektes; Beschreibung der formulierten Aufgabenstellungen und Zielsetzungen in konkreten Arbeitspaketen; Anstoß des begleitenden Projektmanagementprozesses	➤ Projektplan mit strukturierten Arbeitspaketen
Grundlagenermittlung Sammeln bzw. Erzeugen aller für die Planung notwendigen Daten und Informationen; primär Analyse von Produkt- und Prozessdaten; Ermittlung von Schwächen und Potenzialen des Ist-Zustandes bei einer Reorganisation bzw. Beschreibung von Referenzprozessen bei einer Neuplanung; Erstellung einer aus fabrikplanerischer Sicht präzisierten Aufgabenstellung und überprüfen der Erreichbarkeit der Zielsetzungen anhand der Planungsdaten	➤ Sämtliche für weitere Planung benötigten Daten und Informationen (Produkt- und Prozessdaten, Ist-Zustand, Referenzprozesse, etc)

Tabelle 2: Beschreibung der Planungsphasen (Teil 2)

Informationsbeschaffung: Sammeln und Erzeugen der zur Planung benötigten Daten und Informationen (Produktdaten, Produktionsdaten, Immobiliendaten bzw. im speziellen Mengengerüste, Betriebsmittel, Produktionsabläufe, Gebäude und Grundstücke); Ermittlung von Ist-Daten und Restriktionen; Prognose zukünftig zu fertigender Produkte (Art, Menge, Spezifikation) und Abschätzung der benötigten Prozesse und Ressourcen; Szenarienbildung, mit denen unterschiedliche zukünftige Entwicklungen berücksichtigt sind	➤ sämtliche Planungsdaten inhaltlich zusammengefasst und strukturiert dargestellt
Informationsbewertung: Erzeugen, Verdichten und Auswerten der Planungsgrundlagen bzw. -daten und Überprüfung der Erreichbarkeit der definierten Fabrikziele; Einsatz verschiedener Methoden (ABC-Analyse, Produkt-Quantum- Analyse etc.); Ermittlung von Umsatzanteilen; Erstellung von Grafiken	➤ Alle die Fabrikziele betreffenden Auswertungen liegen als Planungsgrundlage vor
Grobplanung Entwerfen eines umsetzbaren Gesamtkonzeptes für die Fabrik, aufbauend auf den Ergebnissen der Grundlagenermittlung und unter bestmöglicher Berücksichtigung der in der Zielplanung definierten Fabrikziele	➤ Dimensionierte Einheiten der Fabrik ➤ Material- und Informationsflusskonzept sowie Kommunikationsprinzip für Produktionsprozess ➤ Vorzugsvariante des Reallayouts qualitativ und quantitativ bewertet inklusive Gebäudevorentwurf
Strukturplanung: Strukturierung der Produktion nach bestimmten Kriterien (Technologien, Produkte, Märkte, Produktionsabläufe, Kundenkopplung etc.) und Anwendung dieser (auch kombiniert) auf den verschiedenen Planungsebenen; Festlegen der funktionalen und organisatorischen Einheiten der betrachteten Planungsebenen inklusive wechselseitiger Beziehungen; Ableitung aller zur Wertschöpfung erforderlichen Aktivitäten und deren Abfolgen, aufbauend auf der Definition der Geschäftsprozesse; Bestimmung des Kommunikationskonzeptes; Bildung und Bewertung mehrerer Varianten der Produktionsstruktur sowie Zusammenführung in optimalem Funktionsschema, aus der alle Produktionsprozessabfolgen hervorgehen, nicht jedoch ihre räumliche Anordnung	➤ Ideales Funktionsschema ➤ Kommunikationskonzept für gesamte Fabrik

Tabelle 3: Beschreibung der Planungsphasen (Teil 3)

Dimensionierung: Festlegung von Art und Menge der Betriebsmittel und Personalressourcen; Bildung verschiedener Varianten (verschiedene Technologien, Automatisierungsgrade etc.); Berechnung des Flächenbedarfs für die benötigten Kapazitäten; Auswahl eines geeigneten Material- und Informationsflusskonzeptes; Festlegen eines Planungs- und Steuerungsverfahrens für die Auftragsabwicklung; Ermittlung der Menge und Frequenzen der Materialflüsse zwischen funktionalen Einheiten sowie des zugehörigen Flächenbedarfes	➤ Dimensionierte Ressourcen ➤ Logistikkonzept ➤ Flächenmaßstäbliche Funktionsschema
Idealplanung: Räumlich ideales Anordnen der dimensionierten Einheiten ohne Restriktionen (layoutbezogene, wirtschaftliche, gesetzliche, anlagentechnische, räumliche, bauliche etc.) unter Einhaltung der Fabrikziele; Bilden von Layoutvarianten zur Aufweitung des Lösungsraumes sowie als Bewertungsmaßstab für die Realplanung; die den qualitativen Fabrikzielen, den Anforderungen des Kommunikations- und Logistikkonzeptes bestmöglich entsprechenden Entwurf von Gebäudehüllen zu jeweiligen Ideallayoutvarianten	➤ Ideallayoutvarianten ➤ Zugehörige Gebäudehüllen (Entwurf)
Realplanung: Layoutplanung innerhalb der vorgeplanten Gebäude mit Tragwerk; Erstellung verschiedener Varianten unter Berücksichtigung aller Restriktionen und realen Gegebenheiten sowie unterschiedlichem Erfüllungsgrad konkurrierender Fabrikziele; eventuell Prüfung der Varianten auf Genehmigungsfähigkeit; monetäre (Investitions- und Betriebskosten-Differenzbetrachtung), qualitative und quantitative Bewertung der Lösungsvarianten (inkl. Ideallösungen); Zusammenführen aller Bewertungen und Auswahl einer Vorzugsvariante	➤ Realisierbares Fabrikkonzept mit Groblayout inkl. Gebäudevorentwurf der bewerteten Vorzugsvariante
Feinplanung Ausplanung des in der Grobplanung ausgewählten Fabrikkonzeptes in, je nach Bedarf, unterschiedlichen Varianten; detaillierte Beschreibung und grafische Darstellung der geplanten Fabrik	➤ Feinlayout der Fabrik mit zugehörigen Ausführungsplänen der Gebäude inklusive Kostenbetrachtung ➤ Lastenheft Betriebsmittel ➤ Prozessbeschreibung Kommunikations- und Logistikkonzept ➤ Arbeitsorganisation der Fabrik ➤ Behördliche Genehmigungsanträge

Tabelle 4: Beschreibung der Planungsphasen (Teil 4)

Detailplanung: Prozessdarstellungen bzw. -beschreibungen der detailliert geplanten Material-, Informations- und Kommunikationsflüsse inklusive Zuordnung von Produkten und Ressourcen zu Prozessen, der Abfolge der Prozessschritte mit organisatorischer Eingliederung und den jeweils eingesetzten Arbeitshilfsmitteln; Gestaltung der Arbeitsorganisationen; Beschreibung des Qualifikationsprofils der Mitarbeiter; Erstellung der Lastenhefte (Anforderungsspezifikationen des Auftraggebers) für Betriebsmittel und Logistikeinrichtungen; Detaillierung und Anpassung des bestehenden Groblayouts anhand beschriebener Ressourcen zum Feinlayout; zeichnerische Darstellung der Entwurfsplanung des Gebäudes (Einordnung der Betriebsmittel, Medienversorgung etc.); Kostenberechnung basierend auf vorliegenden Planungsergebnissen	➤ Feinlayout mit spezifizierten Betriebsmitteln ➤ Zugehöriger Gebäudeentwurf ➤ Kostenberechnung
Erstellung Genehmigungsanträge: Erarbeitung aller Vorlagen zur Einholung nach öffentlich-rechtlichen Vorschriften notwendigen Genehmigungen aller Baumaßnahmen; Vorbereiten und Einreichen der erforderlichen produktionsprozessbezogenen Anträge Erstellung Leistungsbeschreibung: Unterscheidung zwischen funktionaler (Lastenheft ausreichend, Ausführungsplanung und Pflichtenheft wird durch ausgewählten Lieferanten erstellt) und detaillierter Ausschreibung (auf Lastenheft basierende Ausführungsplanung durch Projektteam erarbeitet, Lieferant nur noch geringe Aufwände und Freiheitsgrade bei Erstellung Pflichtenheft); Überwachung der jeweiligen Lieferantenplanungen	➤ Den gesetzlichen Vorschriften entsprechende Genehmigungsanträge ➤ Funktionale/detaillierte Leistungsbeschreibung
Realisierungsvorbereitung Organisation der Vergabe an Lieferanten basierend auf Leistungsbeschreibung der Fabrikelemente; Planen der Umsetzung und Vorbereitung der Realisierung der Fabrik; parallele Durchführung von drei sequenziellen und gegebenenfalls iterativen Schritten neben der begleitenden Umsetzungsplanung	➤ Liste ausgewählter Lieferanten ➤ Pflichtenhefte für bestellte Fabrikelemente inklusive Ausführungsplänen und verifiziertem Kostenplan
Umsetzungsplanung: Festlegung von Maßnahmen zur Sicherstellung der Lieferfähigkeit von Produkten während Realisierung (Planung Nullserie, Produktionsanlauf mit Erstversorgung benötigter Materialien und temporär benötigter	➤ Umstiegskonzept ➤ Baustelleneinrichtungsplan ➤ Umzugsplan ➤ Personalaufbaukonzept

Tabelle 5: Beschreibung der Planungsphasen (Teil 5)

Infrastruktur); Planung der temporär erforderlichen Infrastruktur der Baustelle zur Leistungserstellung (Verkehrs- und Lagerflächen, Medienver- und -entsorgung, Versorgungseinrichtungen für Baustellenpersonal); Erstellung des Baustellensicherungskonzeptes; Planen der Umzüge von Betriebsmittel, Arbeitsplätzen und Personal unter Berücksichtigung der Anforderungen der Realisierung; Initiierung von Personalbeschaffungs- und Personalqualifizierungsmaßnahmen auf Basis der Personalplanung; ausreichendes Informieren aller an der Umsetzung beteiligten Personen über das Vorhaben Angebotseinholung: Erstellung der Ausschreibungsunterlagen basierend auf Leistungsbeschreibungen; Auswahl potenzieller Anbieter (Bieterliste); Übermittlung der Ausschreibungsunterlagen zur Angebotsabgabe Vergabe: Technische Auswertung der Angebote (Prüfen auf Vollständigkeit, Abgleich mit Ausschreibungsunterlagen und Bewertung); Verhandeln von Abwicklungsmodalitäten, kommerziellen Bedingungen und Preisen; Auswahl von Lieferanten inklusive Festlegung der Lieferleistungen in Pflichtenheft; Anpassung des Kostenplanes an aktuelle Preise Überwachung Ausführungsplanung: Prüfung und Freigabe von Lieferanten-Ausführungsplänen	➤ Ausschreibungsunterlagen ➤ Bieterliste ➤ Beauftragung der Lieferanten ➤ Pflichtenhefte ➤ Freigegebene Ausführungspläne
Realisierungsüberwachung Sicherstellung und Dokumentation der ordnungsgemäßen Ausführung von Gebäuden inklusive Außenanlagen, Betriebsmitteln sowie plangemäßigem Aufbau des Personals; Überprüfen der Baustelleneinrichtung sowie Einhaltung aller Sicherheitsmaßnahmen; Gewährleistung der Einhaltung vereinbarter Qualitätsstandards, des festgelegten Zeitplanes sowie der budgetierten Kosten	➤ Erstellte Fabrik ➤ Abschlussdokumentation
Koordination, Überwachung und Dokumentation: ausreichende Abstimmung zwischen allen an der Ausführung fachlich Beteiligten; Sicherstellen der Ausführung einzelner Gewerke unter Berücksichtigung der Arbeitssicherheit und Übereinstimmung mit den	➤ Fertiggestellte einzelvertraglich vereinbarte Leistungen für Gebäude und Betriebsmittel ➤ Dokumentation der

Tabelle 6: Beschreibung der Planungsphasen (Teil 6)

vereinbarten Leistungen; Feststellung und Überwachung der Beseitigung von Mängeln während den Baumaßnahmen, der Installation sowie der Inbetriebnahme; Qualitätssicherung (Leistungsabnahme, Sicherheitsabnahme, behördliche Abnahme) unter Berücksichtigung aller vereinbarten Kriterien sowie einschlägigen Richtlinien und Vorschriften zur Überprüfung vertragsgemäßer und mängelfreier Ausführung; Sicherstellen der Einhaltung von vereinbartem Fertigstellungstermin; Kontrolle der Rechnung hinsichtlich der Übereinstimmung mit vertraglichen Vereinbarungen und Freigabe; Begleitung der Personalaufbau- und qualifizierungsmaßnahmen, Dokumentation zur Nachvollziehbarkeit und Rückverfolgbarkeit (Bautagebuch, Abnahmedokumentation mit Restmängeln sowie Rechnungen) Abschlussdokumentation: Dokumentation aller erforderlichen Informationen für die weitere Nutzung im Fabrikbetrieb und mögliche Umplanungen; strukturiertes Zusammenführen, Vervollständigen und Archivieren einzelner Dokumente der Realisierung	Realisierung ➤ Ausreichende Verfügbarkeit qualifizierten Personals ➤ Aktualisierte Ausführungsunterlagen ➤ Festgestellte tatsächlich erbrachte Leistungen mit zugehörigen Kosten
Hochlaufbetreuung Inbetriebnahme und Hochfahren der Fabrik bis zur angestrebten Leistungsfähigkeit; Bewertung anhand der in der Zielplanung definierten Fabrikziele	➤ Nachweis hinsichtlich stabiler Prozesse bei festgelegtem Leistungsniveau
An- und Hochlaufbetreuung: Überführen der Fabrik in Betriebszustand, in dem verkaufsfähige Produkte erzeugt werden; Einrichtung und Etablierung organisatorischer Prozesse (Arbeitsorganisation etc.); Einrichtung, Verbesserung und Stabilisierung der Produktionsprozesse; Einführung Qualitätssicherungssystem und Instandhaltungsroutinen; Sicherstellen von Gebäudebetrieb inklusive technischer Ausrüstung; Einrichten von logistischen Prozessen (Versorgung, Produktion, Distribution); Hochlauf auf angestrebtes Leistungsniveau mit definierter Verfügbarkeit mit Fokus auf Stabilisierung von Prozessen und dem Zusammenspiel dieser Bewertung der Fabrik: Überprüfen des Erfüllungsgrades qualitativer und quantitativer der in der Zielplanung definierten Fabrikziele; Abnahme Fabrikplanungsergebnis durch Auftraggeber; optional eine Auditierung durch Produktkunden	➤ Stabil produzierende Fabrik auf geplantem Leistungsniveau ➤ Bewertung der produzierenden Fabrik

Tabelle 7: Beschreibung der Planungsphasen (Teil 7)

2.3 Stakeholder und Beteiligte im Planungsprozess

In einem klassischen Fabrikplanungsprojekt werden normalerweise Arbeitsprozesse, Einrichtungen und das Layout aufbauend auf einer zuvor definierten Aufgabenstellung und daraus abgeleiteten Zielen geplant. Anschließend wird ein Architekt für den Gebäudeentwurf beauftragt, welcher eine preiswerte Hülle inklusive der notwendigen Gebäudeausrüstung um das geplante Layout entwerfen soll. Prozesse und Produktionsanlagen stehen allerdings in einer Wechselbeziehung mit der Haustechnik, welche selbst wieder Teil der Gebäudearchitektur ist. Die durch die konventionelle Fabrikplanung entstandenen Insellösungen für einen Standort führen zu immensen Mengen an Schnittstellen und daraus resultierenden Problemen, siehe Abbildung 15.

Durch die zunehmende Änderungsgeschwindigkeit der das Fabrikssystem beeinflussenden Größen ist es nicht mehr möglich, dass die Fabrikplanung zu einem zufälligen Zeitpunkt einmalig von einer Person durchgeführt wird, sondern es müssen verschiedenste Fachleute und Disziplinen in diesen Prozess gleichzeitig eingebunden werden.¹³¹

In dieser ganzheitlichen Fabrikplanung entstehen Prozesse, die teilweise sehr komplex sind und es notwendig machen, verschiedene Fachdisziplinen gleichzeitig in den Planungsprozess miteinzubeziehen. Ganzheitlich bedeutet in diesem Zusammenhang, dass alle zur Gestaltung der Fabrik erforderlichen Komponenten inklusive deren Wechselwirkungen und Beeinflussungen berücksichtigt werden.^{132 133}

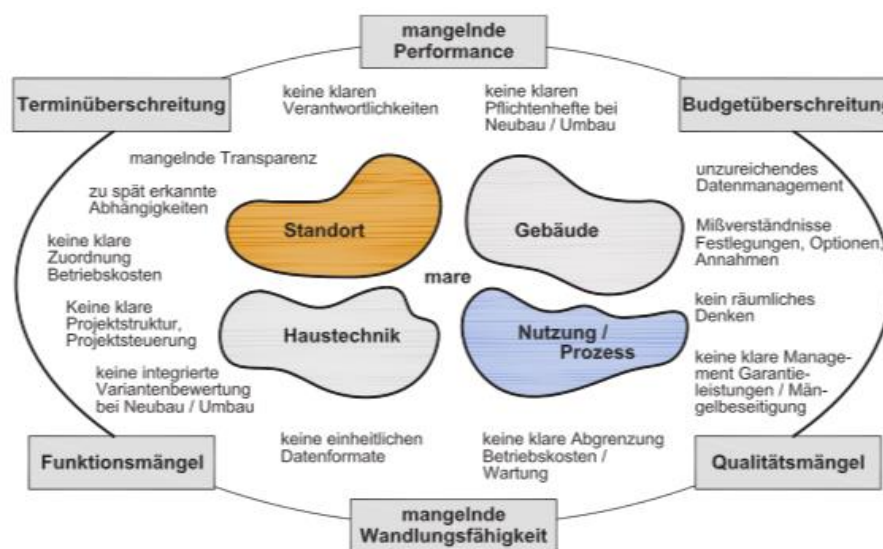


Abbildung 15: Schnittstellen und Problememe im klassischen Fabrikplanungsprozess¹³⁴

¹³¹ Vgl. Pawellek, G., 2014., S.11

¹³² Vgl. Schenk, M./Wirth, S./Müller, E., 2014., S.25

¹³³ Vgl. Pawellek, G., 2014., S.18

¹³⁴ Wiendahl, H.-P./Reichardt, J./Nyhuis, P., 2010, S.423

Durch den dadurch entstehenden stark interdisziplinären Charakter der Fabrikplanung werden an alle Beteiligten hohe Anforderungen hinsichtlich der fachlichen, methodischen, sozialen sowie kommunikativen Kompetenz gestellt. Fabrikplanung und Fabrikbetrieb sind dabei als Einheit zu betrachten, welche Ideen, Kreativität, Innovations-, Kommunikations- und Anpassungsfähigkeit von allen Beteiligten während des gesamten Fabriklebenszyklus fordern.^{135 136}

Diese Heterogenität des Fabrikplanungsprozesses, an dem verschiedene Expertengruppen beteiligt sind, führt allerdings zu einer Reihe an Herausforderungen, wie beispielsweise die Kommunikation zwischen diesen Expertengruppen. Unzählige Entscheidungen, die im Zuge des Planungsprozesses getroffen werden, haben unterschiedlichste Auswirkungen auf andere Domänen. Zur Verbesserung des Planungsprozesses sind diese Wechselwirkungen für alle Experten bestmöglich erfassbar zu machen.¹³⁷

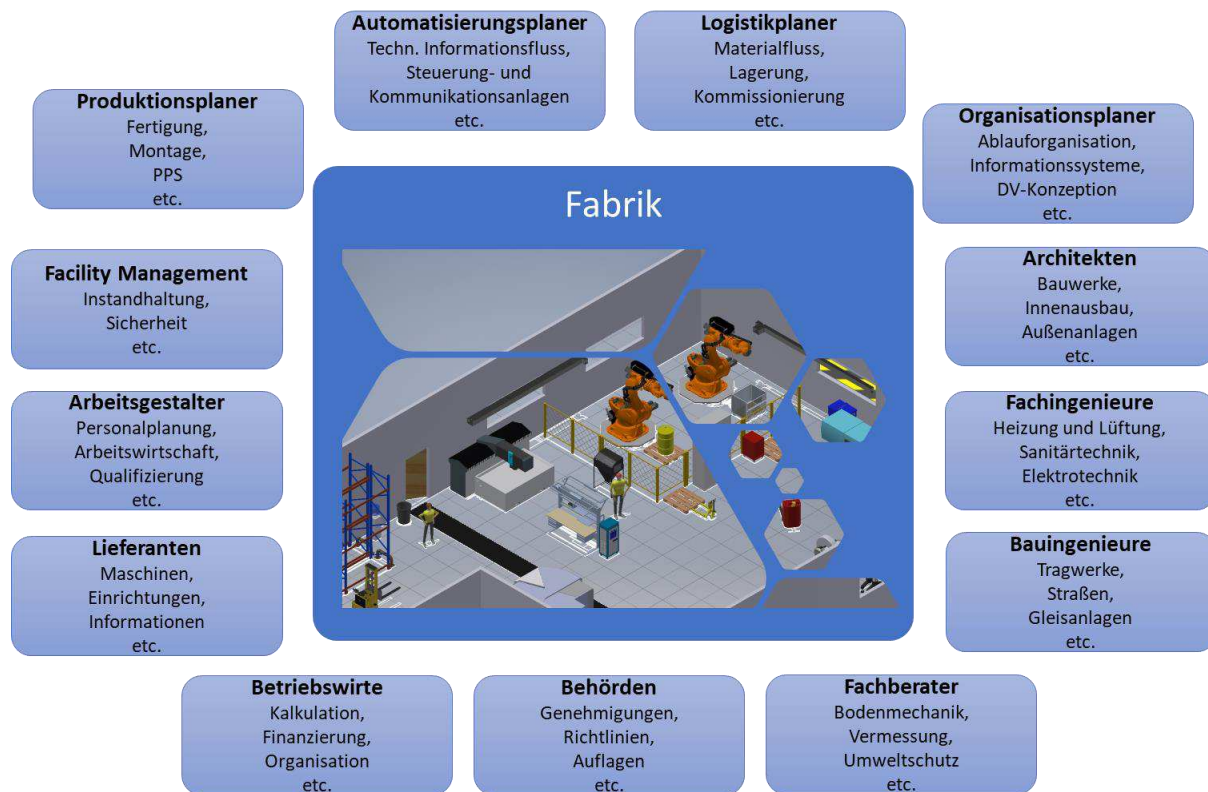


Abbildung 16: Beteiligte am Fabrikplanungsprozess (eigene Darstellung)¹³⁸

In Abbildung 16 ist eine Auswahl möglicher Teilnehmer am Fabrikplanungsprozess inklusive typischer Aufgaben dieser dargestellt. Abhängig vom Umfang der Planungsaufgabe können dabei bis zu 100 Gewerke im Laufe des Projektes an der Planung beteiligt sein, wobei typischerweise die Größe und der Umfang des

¹³⁵ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S:19

¹³⁶ Vgl. Schenk, M./Wirth, S./Müller, E., 2014., S.25

¹³⁷ Vgl. Gausemeier, J./Grafe, M./Meyer auf der Heide, F., 2015., S.140

¹³⁸ Vgl. Schulte, H., 2003., S.10

Projektteams mit fortschreitendem Planungsablauf zunimmt. Beteiligte können Experten des jeweiligen Unternehmensbereiches, aber auch externe Berater, Dienstleister oder Vertreter von Behörden sein, wobei alle ihre eigene Perspektiven und Ziele in das Projekt miteinbringen. Dabei kann ein beteiligter Planer natürlich auch in mehreren Bereichen tätig sein, was sich positiv auf den Informationsaustausch zwischen den einzelnen Beteiligten auswirken kann.^{139 140}

Ziel ist es, dass alle Forderungen in einem synergetischen Ansatz münden, in dem die Zielprojektionen der an der Planung Beteiligten zu einer von allen getragenen Lösung verschmelzen, wobei nicht nur rechenbare Fakten berücksichtigt werden sollten, sondern auch die emotionale Zustimmung. Deshalb muss schon frühzeitig damit begonnen werden, räumlich durchgebildete Teilprojekte (Standort, Prozess, Gebäude, Haustechnik etc.) zusammenzuführen, um die Qualität der Planung aus Prozess- und Raumsicht zu verbessern. Zu bevorzugen ist dabei eine dreidimensionale Visualisierung aller Objekte mit der Möglichkeit einer datentechnisch unterstützten Interaktion zwischen den Planungspartnern. Durch ein durchgängiges 3D-Datenmodell können dabei aktuelle Potenziale von CAD-CAM-Datenbanktechniken zur übergreifenden Projektoptimierung genutzt werden. Vorteile der räumlichen Planung sind Kollisionsprüfungen, eine mitlaufende Qualitätskontrolle für alle Gewerke sowie eine erhöhte Anschaulichkeit der Planungsergebnisse für alle Beteiligten. Dadurch können Kosten, Zeit und Qualität beeinflussende Konfliktpotenziale frühzeitig erkannt und beseitigt werden und führen dadurch nicht zu Problemen beim Bau, Hochlauf oder Betrieb der Fabrik.¹⁴¹

In diesem Zusammenhang stehen auch die beiden Kapitel 2.5.1 (Digitale Fabrik) sowie Kapitel 2.5.2 (Building Information Modeling).

2.4 Methoden, Werkzeuge und Tools Fabrikplanung

Im Laufe der Jahre wurden eine Vielzahl an Theorien, Modellen, Methoden, Verfahren, Werkzeugen und Tools entwickelt, die in den verschiedenen Planungsphasen einer Fabrik zum Einsatz kommen.¹⁴²

In Abbildung 17 ist ein Auszug von in der Fabrikplanung verwendeten Tools, Methoden und Werkzeuge abgebildet, von denen im Anschluss ein paar wichtige kurz erläutert werden, damit der Leser eine Vorstellung bekommt, welche breite Palette an Hilfsmitteln den Planern zur Verfügung stehen. Dabei werden die Visualisierung von 2D- und 3D-

¹³⁹ Vgl. Brecher, C., 2011. S.332-333

¹⁴⁰ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.40

¹⁴¹ Vgl. Wiendahl, H.-P./Reichardt, J./Nyhuis, P., 2010., S.424-425

¹⁴² Vgl. Schenk, M./Wirth, S./Müller, E., 2014., S.219

Layouts betreffende Tools, etc. nicht im Detail berücksichtigt, da diese in Kapitel 5 umfassend analysiert werden.

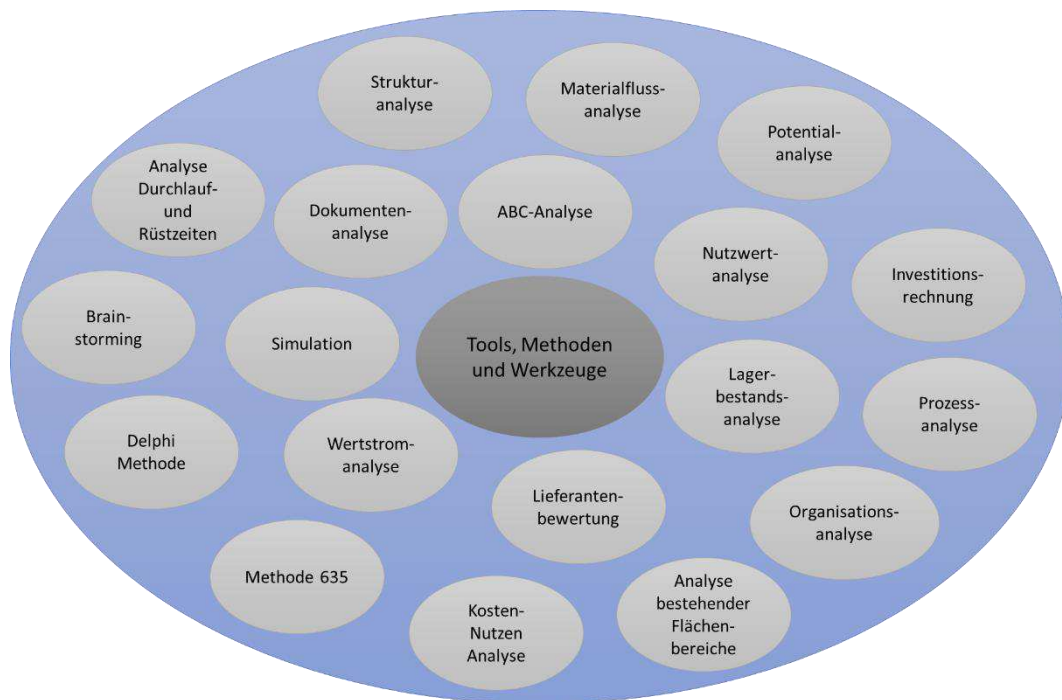


Abbildung 17: Auszug Tools, Methoden und Werkzeuge im Fabrikplanungsprozess^{143 144 145}

ABC-Analyse

Diese Methode, auch unter Wert-Häufigkeitsverteilung bekannt, wird häufig in der Grundlagenermittlung verwendet und untersucht, wie stark sich eine spezielle Eigenschaft (Kosten, Gewinn, Umsatz, Verbrauch etc.) auf die Elemente in einer Menge konzentriert.

Das Ergebnis ist eine Rangfolgebestimmung oder auch eine klassenbezogene Trennung von Elementen nach deren Wirksamkeit. Typischerweise wird eine Unterteilung in A- (geringe Anzahl mit hohem Anteil an Gesamtergebnis), B- (in etwa proportionaler Anteil am Gesamtergebnis) und C-Klasse (viele Elemente mit geringem Anteil am Gesamtergebnis) vorgenommen.¹⁴⁶

Ein mögliches Ergebnis einer ABC-Analyse, welches in Abbildung 18 dargestellt ist, kann beispielsweise zeigen, dass nur 5% aller Artikel in einer bestimmten Artikelgruppe für 70% des Gesamtumsatzes verantwortlich sind. Im Gegensatz dazu tragen 80% der Artikel nur unwesentlich (10%) zum Umsatz bei. Die ABC-Analyse wird auch häufig in Kombination mit der GMK- (Kategorisierung der Artikel nach Größe)

¹⁴³ Vgl. Pawellek, G., 2014., S.72

¹⁴⁴ Vgl. Erlach, K., 2010., S.31

¹⁴⁵ Vgl. Bischoff, J., 2018., Teil 3, S.10-21

¹⁴⁶ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.61

und XYZ-Analyse (Kategorisierung nach qualitativen Merkmalen, beispielsweise Bedarfs- oder Produktionsdynamik) angewendet.

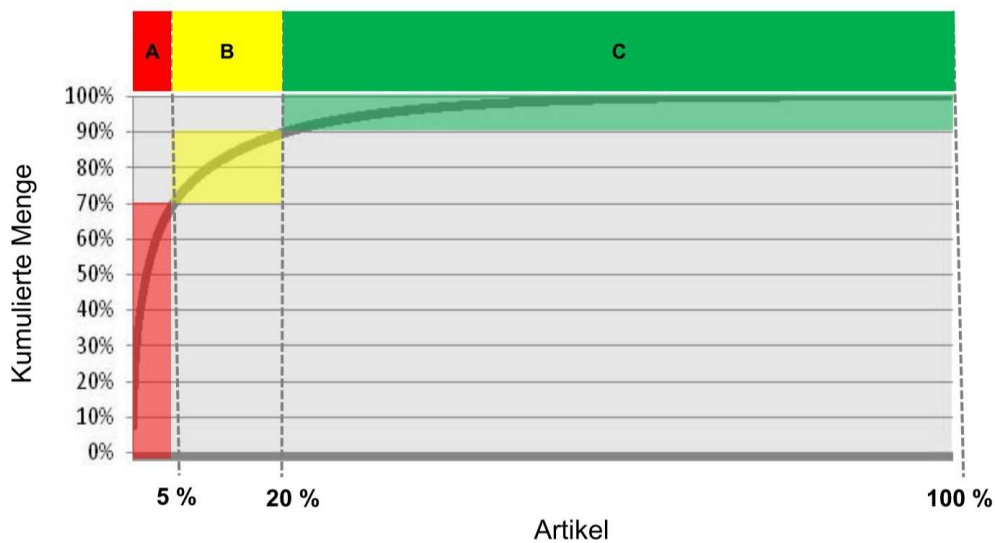


Abbildung 18: Beispiel ABC-Analyse¹⁴⁷

PQ-Analyse¹⁴⁸

Unter einer Produkt-Quantum Analyse wird der Vergleich eines Produktionsprogrammes (A, B, C etc.) hinsichtlich mehrerer Faktoren (Umsatz, Gewinn, Durchlaufzeit, Produktionsmengen, Herstellkosten etc.), dem sogenannten Faktormix, verstanden, siehe Abbildung 19.

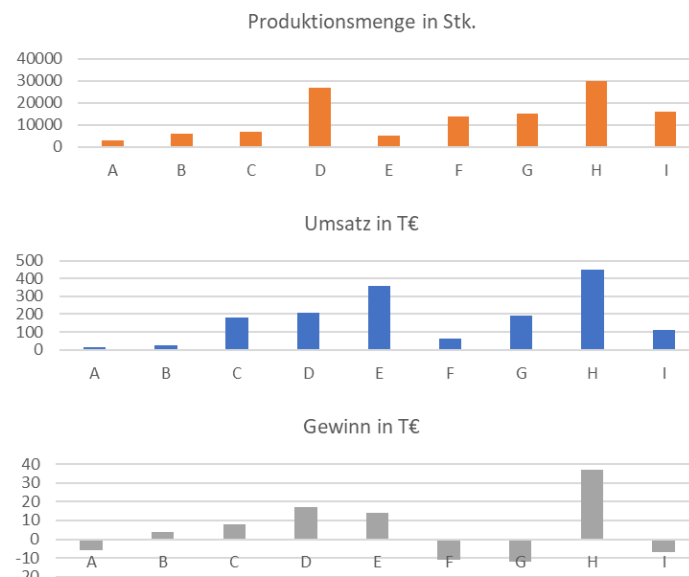


Abbildung 19: Beispiel PQ-Analyse (eigene Darstellung)¹⁴⁹

¹⁴⁷ Bischoff, J., 2018., Teil 3, S.11

¹⁴⁸ Vgl. Grundig, C.-G., 2018, S.60-62

¹⁴⁹ Vgl. Grundig, C.-G., 2018.

Wechselbeziehungen zwischen Produktionsmenge, Umsatz etc. können so sichtbar gemacht werden, wodurch Konsequenzen auf die Produktpolitik abgeleitet werden können, welche wiederum Einfluss auf die Fabrikplanungsaufgabe hat. Die PQ-Analyse stellt eine wirksame Planungs- und Entscheidungshilfe in der Zielplanung und der Grundlagenermittlung dar.

Wertstromanalyse

Um alle wertschöpfenden und auch nicht-wertschöpfenden Tätigkeiten aufzunehmen, die notwendig sind, um das Rohmaterial als Fertigprodukt in die Hände des Kunden zu bringen, wird häufig die Wertstromanalyse verwendet, welche den Blick auf das Wesentliche lenkt, nämlich die Leistungserstellung des Unternehmens.¹⁵⁰

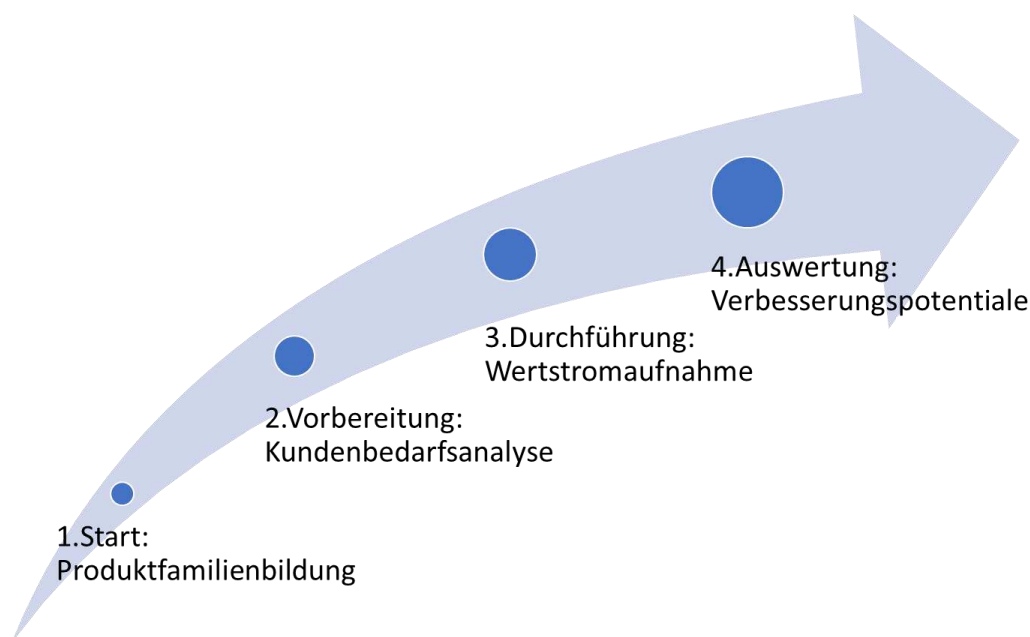


Abbildung 20: Ablauf Wertstromanalyse (eigene Darstellung)

Zur Durchführung einer Wertstromanalyse sind in einem produzierenden Unternehmen normalerweise die vier in Abbildung 20 dargestellten Schritte notwendig. Begonnen wird dabei mit der Bildung von Produktfamilien, in denen Erzeugnisse zusammengefasst werden, deren Produktionsabläufe sich nur geringfügig unterscheiden. Zum Abschluss der Vorbereitungstätigkeiten werden die Kundenbedarfe in den Produktfamilien aus einer geeigneten Datenbasis (beispielsweise Verkaufszahlen des abgelaufenen Geschäftsjahres) ermittelt. Die eigentliche Wertstromaufnahme findet dann vor Ort in der Fabrik statt, in der für jede Produktfamilie der Ist-Zustand des Wertstromes aufgezeichnet und zusätzlich wichtige Kennwerte der Produktion und Logistik erfasst werden. Im letzten Schritt werden mit dem Verhältnis der Bearbeitungszeit zur Produktionsdurchlaufzeit und der Stimmigkeit

¹⁵⁰ Vgl. *Bischoff, J.*, 2018., Teil 3, S.12

der einzelnen Produktionsprozesse untereinander die Güte des erfassten Wertstromes beurteilt, wodurch erste Verbesserungspotentiale entdeckt werden können.¹⁵¹

In der Wertstromanalyse wird versucht, die Kundensicht einzunehmen, wobei die jeweils nachfolgenden Tätigkeiten interne Kunden in der Produktion darstellen. Die Betrachtung schließt dabei alle wertschöpfenden Kerntätigkeiten eines Unternehmens ein, besonders wichtig ist dabei die Aufnahme von Durchlaufzeiten, Durchsätzen und der Material- und Informationsflüsse. Ein ordnungsgemäß aufgenommener Wertstrom in Kombination mit einem Layoutplan der Fabrik ermöglicht es dem Planungsteam, sich schnell den benötigten Überblick über ein Unternehmen zu verschaffen.¹⁵²

In Abbildung 21 ist ein fertig digitalisierter Wertstrom abgebildet, der die Ist-Situation darstellt und in dem alle wesentlichen Schritte des Produktionsprozesses inklusive wichtigen Kennwerten sowie Material- und Informationsflüsse enthalten sind. Zwischen den einzelnen Produktionsstationen sind zusätzlich die jeweiligen Bestandsmengen und Reichweiten aufgenommen worden.

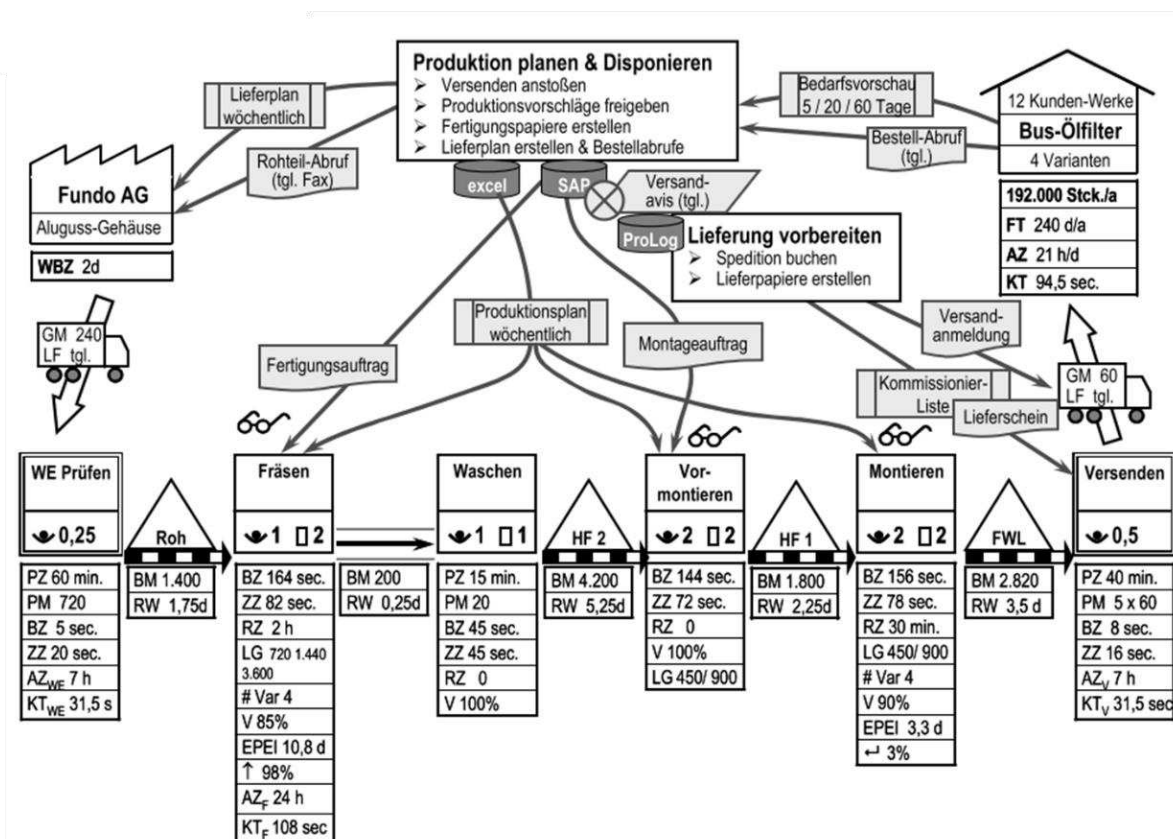


Abbildung 21: Beispiel Wertstromanalyse¹⁵³

¹⁵¹ Vgl. Erlach, K., 2010., S.36

¹⁵² Vgl. Bischoff, J., 2018., S.12

¹⁵³ Erlach, K., 2010., S.113

Durch eine Wertstromanalyse können bestehende Strukturen analysiert, dokumentiert und bewertet werden. Sie kann aber auch bei geplanten Wertströmen eingesetzt werden.¹⁵⁴

Materialflussanalyse^{155 156}

Darunter ist die Erfassung aller Transportvorgänge im betrachteten Bereich der Fabrik inklusive aller gewollten und ungewollten Lagerungen zu verstehen. Dies geschieht meist vor Ort durch Beobachtungen und durch Auswertungen von Unterlagen (Fertigungspläne, Lagerkarteien etc.) im Büro, wobei alle beteiligten Personen, Materialien, Flächen sowie Transport- und Lagerungsmittel erfasst werden.¹⁵⁷

Ein typischer Ablauf einer Materialflussanalyse ist in Abbildung 22 dargestellt.

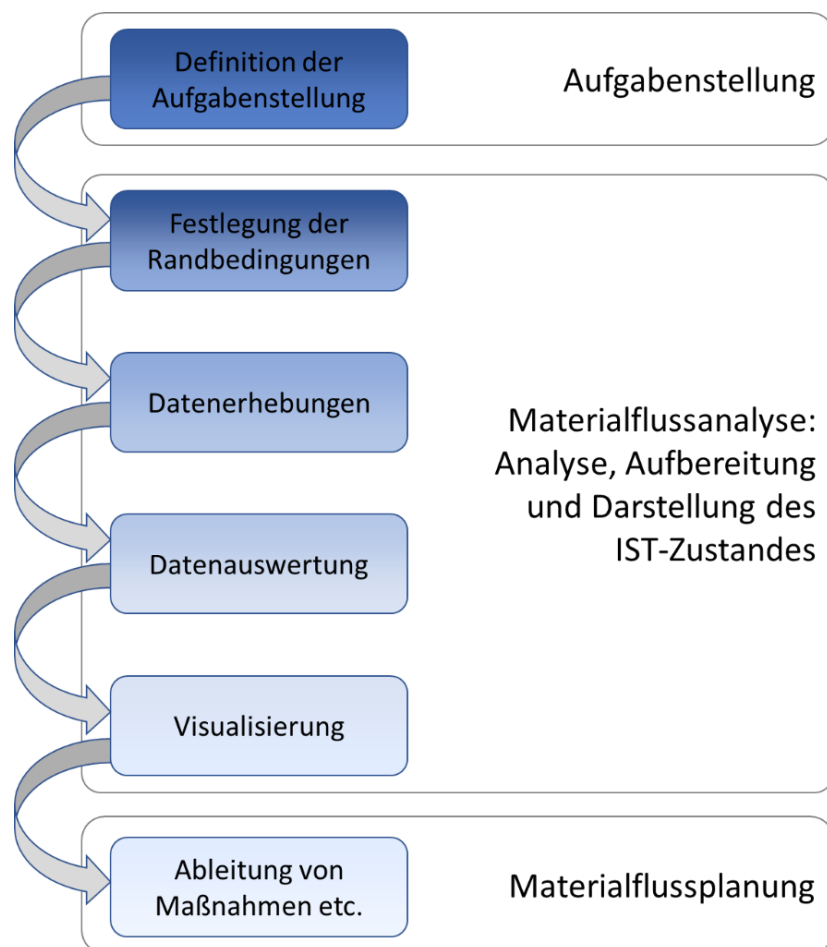


Abbildung 22: Vorgehensweise bei der Materialflussplanung (eigene Darstellung)¹⁵⁸

¹⁵⁴ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.19

¹⁵⁵ Vgl. Dickmann, P., 2015., S.S.112

¹⁵⁶ Vgl. Martin, H., 2016., S.30, 476, 461, 27ff

¹⁵⁷ Vgl. Martin, H., 2016., S.29-31

¹⁵⁸ Vgl. Lutz, U./Galenza, K., 2004., S.131

Einen wichtigen Teil der Materialflussanalyse stellt die Visualisierung der Materialflüsse dar, wobei die folgenden, wesentlichen Darstellungsformen unterschieden werden:¹⁵⁹

- **Materialflussvisualisierung:** Abbildung der Mengen oder Werte der Materialströme mit Pfeilen in mehr oder weniger abstrakten Visualisierungen. Die Dicke beziehungsweise die Farbe der Pfeile gibt dabei Auskunft über das jeweilige Volumen. Beispiele dazu sind in Abbildung 23 dargestellt.

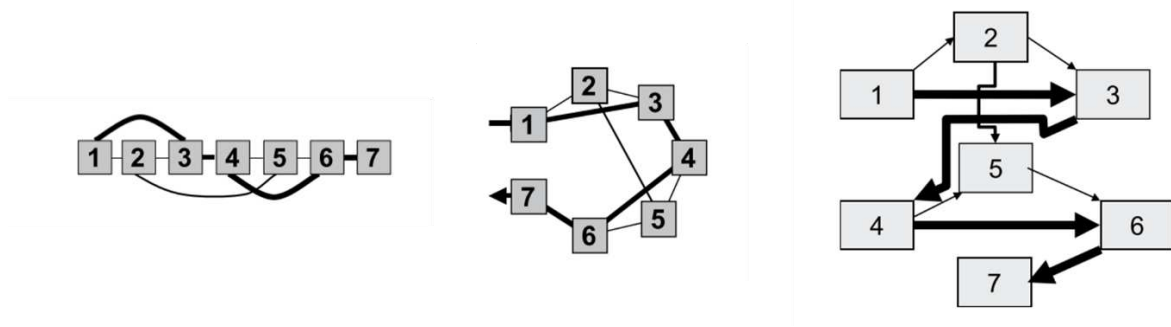


Abbildung 23: Materialflussvisualisierung (Lineares, Kreis und Matrix Blockdiagramm)¹⁶⁰

- **Pareto-Volumenstromdiagramme:** Ist eine abstrahierte Darstellung der Hauptströme
- **Fischgrät-Visualisierung:** Die Darstellung von Ursachen-Wirkungs-Zusammenhängen von Störparametern im Materialfluss
- **Wertschöpfungsdarstellung im Blockdiagramm oder Zeitstrahl:** Zeigt Anteil an wertschöpfenden, bedingt wertschöpfenden sowie nicht wertschöpfenden Prozessen je Teilprozess, siehe Abbildung 24.

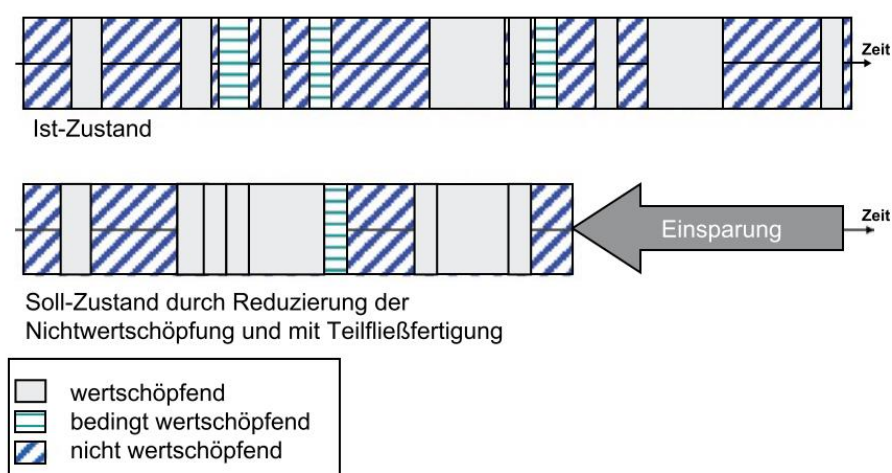


Abbildung 24: Wertschöpfungsdarstellung im Blockdiagramm¹⁶¹

¹⁵⁹ Vgl. Dickmann, P., 2015., S.386-389

¹⁶⁰ Dickmann, P., 2015., S:387

¹⁶¹ Dickmann, P., 2015., S.388

- *Spaghetti Diagramm*: Wird vorwiegend in Meetings und Workshops verwendet, um die Informations- sowie Materialflüsse und deren Gesamtkomplexität darzustellen.
- *Material- oder Wertstrom im realen Layout*: Ist die entscheidende Darstellungsform, welche in der Fabrikplanung auch am häufigsten angewendet wird. Dabei werden die tatsächlichen Ströme mit nötigen Pufferflächen etc. dargestellt. Diese Darstellungsform kann durch Hochrechnungen beziehungsweise Simulationen untermauert werden.

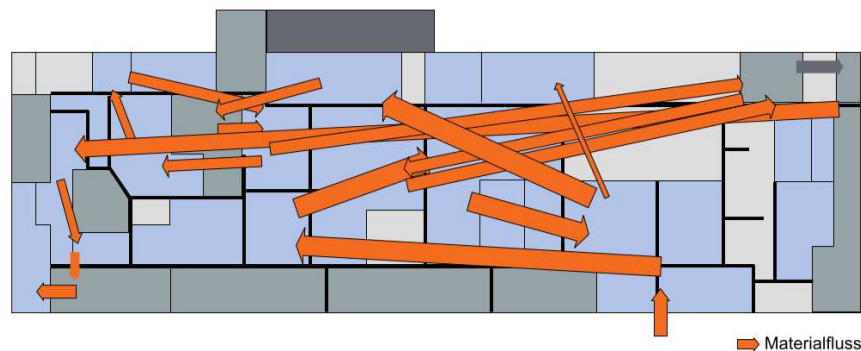


Abbildung 25: Ist-Zustand des Materialflusses im Reallayout¹⁶²

Ziel der Materialflussanalyse ist es, Schwachstellen im Materialfluss ausfindig zu machen, die Ursachen dafür zu ermitteln und die Materialflusskosten aufzuteilen, damit im Anschluss ein optimaler Materialfluss mit minimierten Materialflusskosten geplant werden kann.¹⁶³

Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse wird zur systematischen Bewertung von Handlungs- und Lösungsalternativen eingesetzt. Unter der Voraussetzung, dass ein Ziel oder mehrere Ziele existieren, wird mit der Bewertung ermittelt, welche Alternative dieses beziehungsweise diese am besten erfüllen. Neben quantitativen Zielen können dabei auch Ziele formuliert werden, welche lediglich vergleichend beurteilt werden können, also qualitativen Charakter besitzen.¹⁶⁴

Dabei wird das Prinzip der Fragmentierung eingesetzt: Das zu bewertende Gesamtproblem wird in Teilprobleme zerlegt und, falls erforderlich, werden diese in weitere Teilprobleme zerlegt und so weiter. Da Menschen bei komplexen und umfangreichen Entscheidungen die Problemstellung meist stark vereinfachen, wird durch diesen systematischen Ansatz und die Gliederung in Teilprobleme die Fehlerquote bei Entscheidungen verringert.¹⁶⁵

¹⁶² Wiendahl, H.-P./Reichardt, J./Nyhuis, P., 2010., S:6

¹⁶³ Vgl. Martin, H., 2016, S.30

¹⁶⁴ Vgl. Herbig, N., 2016., S.5

¹⁶⁵ Vgl. Kühnapfel, J. B., 2014., S.1

Diese Methode kann grob in drei Teile untergliedert werden:¹⁶⁶

1. Konzeptionsphase: Es werden Ziele formuliert und zusammengestellt und für diese dann Bewertungskriterien ermittelt. Bereits vorab definierte Zielkriterien sollten in dieser Phase noch einmal überdacht und gegebenenfalls angepasst, erweitert oder detailliert werden. Zusätzlich werden die zur Bewertung stehenden Alternativen gesammelt.
2. Bewertungsphase: Die Gewichtung der definierten Bewertungskriterien wird ermittelt, um dem unterschiedlichen Stellenwert verschiedener Kriterien gerecht zu werden. Eine häufig verwendete Methode dazu stellt der paarweise Vergleich dar (siehe Tabelle 11 in Kapitel 4.3). Zum Abschluss dieser Phase werden die Alternativen anhand der gewichteten Bewertungskriterien verglichen.
3. Ergebnisphase: In dieser Phase werden der Teilnutzwert (beschreibt den Zielerreichungsgrad einer Alternative hinsichtlich eines Bewertungskriteriums) sowie der Gesamtnutzwert (Quantifizierung des Zielerreichungsgrades einer Alternative hinsichtlich aller zu berücksichtigenden Bewertungskriterien) berechnet. Eine Ordnung der Gesamtnutzwerte ergibt eine Rangliste, in der die Alternativen hinsichtlich des Grades der Zielerreichung gereiht sind.

Der Einsatz einer Nutzwertanalyse ist dann sinnvoll, wenn zumindest einer der folgenden Punkte erfüllt ist:¹⁶⁷

- Hohe Anzahl an Bewertungskriterien
- Unterschiedliche Bewertungskriterien (quantitativ, qualitativ)
- Keine eindeutige Festlegung der Rangfolge der Bewertungskriterien möglich
- Am Entscheidungsprozess sind mehrere Personen mit jeweiligen Meinungen/Vorerfahrungen beteiligt
- Routineentscheidungen auf Basis von Erfahrungen oder unternehmerischen Instinkten sind nicht sinnvoll
- Die Entscheidungsfindung muss dokumentiert werden

Ein Beispiel einer Nutzwertanalyse, in der das am besten geeignete VR-Headset für einen bestimmten Anwendungsfall ausgewählt werden soll, ist in Tabelle 13 in Kapitel 4.3 dargestellt.

¹⁶⁶ Vgl. Herbig, N., 2016., S.5-6, 12

¹⁶⁷ Vgl. Kühnapfel, J. B., 2014., S.2-3

2.5 Aktuelle Entwicklungen

Die Fabrikplanung ist ein Fachgebiet, das vielen Einflüssen ausgesetzt ist. Dazu gehören unter anderem die Globalisierung, der Kosten- und Zeitdruck, Marktturbulenzen, Innovationen in den Ausrüstungs- und Informationstechniken sowie neue Anforderungen durch Menschen und Umwelt. Aus diesen Einflüssen resultieren eine Reihe von Entwicklungstendenzen, die zu einem Wandel in speziellen Teilen des Objekt- und Methodenbereichs der Fabrikplanung führen. So sind die spezifische Gestaltung von Ausrüstungs- und Gebäudetechniken genauso wie die Strategie-, Planungs- und Entscheidungsmethoden sowie -werkzeuge von diesen innovativen Wirkungen betroffen.¹⁶⁸

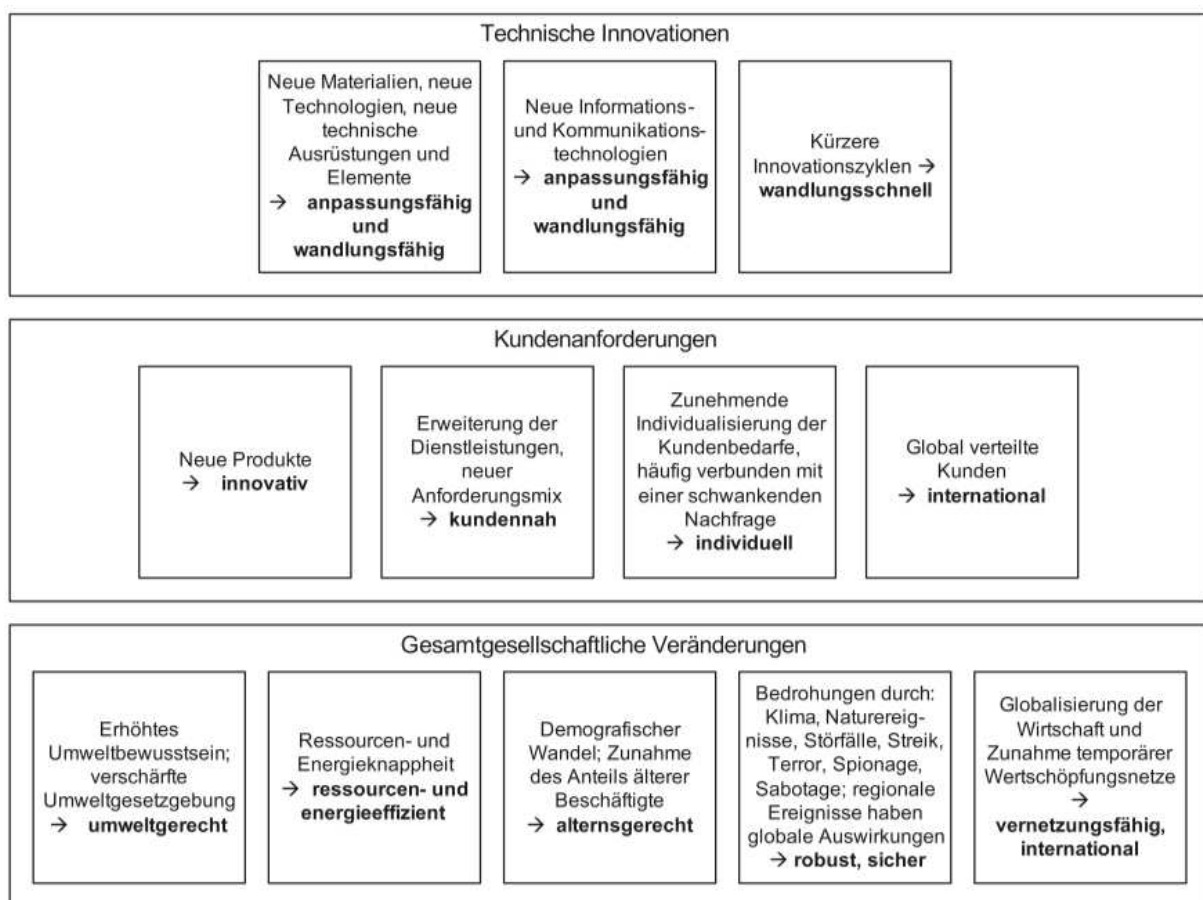


Abbildung 26: Trends mit Auswirkungen auf die Fabrikplanung und den Fabrikbetrieb¹⁶⁹

Abbildung 26 zeigt die wesentlichen Trends, die sich auf die Fabrikplanung und den Fabrikbetrieb auswirken. Nach dem Pfeil ist dabei exemplarisch jeweils die Anforderung an die Fabrik angeführt. So folgt beispielsweise aus dem aktuellen Trend „Demografischer Wandel“, also dass der Anteil älterer Menschen in der Gesellschaft beziehungsweise älterer Beschäftigter im Unternehmen steigt, dass Fabriken und Arbeitsplätze altersgerecht geplant und betrieben werden müssen. Deshalb sind neue

¹⁶⁸ Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.27

¹⁶⁹ Schenk, M./Wirth, S./Müller, E., 2014., S.14

Lösungskonzepte in der Gestaltung und der Ergonomie von Arbeitsplätzen und die Integration von Automatisierungslösungen notwendig.¹⁷⁰

In diesem Kapitel werden deshalb speziell aktuelle Entwicklungen, die mit Virtual Reality und dem Fabrikplanungsprozess in Verbindung stehen, kurz vorgestellt.

2.5.1 Digitale Fabrik^{171 172 173}

Aufgrund der Notwendigkeit der breiten Variantenplanung, der Planungszeitverkürzung, der Sicherung von Anlaufprozessen, dem Einbau und Testung von Wandlungsfähigkeit und der Forderung nach Durchgängigkeit von Produktentwicklung und Prozessplanung inklusive der Einpassung der Prozesse in die Bauhülle ist der Einsatz innovativer informationstechnischer Werkzeuge unabdingbar geworden. Ein eben solches innovatives informationstechnisches Planungswerkzeug stellt die Digitale Fabrik dar.

In der Literatur finden sich die unterschiedlichsten Beschreibungen der Digitalen Fabrik, eine sehr treffende und allgemein anerkannte Definition liefert die VDI Richtlinie 4499:¹⁷⁴

„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u.a. der Simulation und dreidimensionalen Visualisierung – die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“

Ein wesentliches Ziel der Digitalen Fabrik ist die Schaffung eines virtuellen Abbildes einer realen oder geplanten Fabrik, in dem die durchgängige Visualisierung und Simulation von Fabrikstrukturen und -prozessen möglich ist. Diese sollen zusätzlich mit Hilfe realer Planungsdaten (Produkte, Prozesse, Gebäude) digital darstellbar und veränderbar sein, ohne der Notwendigkeit des Vorhandenseins oder der Veränderung eines realen Systems. In diesem virtuellen Abbild können komplexe interaktive Experimente (Umplanungen, Logistikeingriffe, Programmvariationen, Neuauslegung des Gebäudes etc.) im virtuellen Raum durchgeführt werden mit den Zielsetzungen der Sicherstellung der Kollisionsfreiheit und der Prozessoptimierung.

Abbildung 27 zeigt ausgewählte Anwendungsfelder der Digitalen Fabrik im Bereich der Fabrikplanung und dem Betrieb.

¹⁷⁰ Vgl. Schenk, M./Wirth, S./Müller, E., 2014, S.13-14

¹⁷¹ Vgl. Bracht, U./Geckler, D./Wenzel, S., 2018., S.9-11

¹⁷² Vgl. Grundig, C.-G., 2018., S.29-30

¹⁷³ Vgl. Wiendahl, H.-P./Reichardt, J./Nyhuis, P., 2010., S.517-519

¹⁷⁴ VDI 4499 Blatt 1., S.3



Abbildung 27: ausgewählte Anwendungsfelder der Digitalen Fabrik¹⁷⁵

2.5.2 Building Information Modeling^{176 177 178}

In den vergangenen Jahrzehnten hat die Digitalisierung weite Bereiche der Wirtschaft erfasst und für eine Steigerung der Produktivität in den verschiedensten Industriesektoren gesorgt. In der Planung, der Errichtung und dem Betrieb von Gebäuden werden zwar auch digitale Werkzeuge eingesetzt, die Nutzung der digital erzeugten Informationen bleibt allerdings häufig im Vergleich zu den anderen Branchen gering.

Um die Nutzung von digitalen Informationen während des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes zu steigern, wurde die Idee des Building Information Modelling geboren. Werden Bauwerksinformationen nicht in Zeichnungen abgebildet, sondern in einem umfassenden digitalen Bauwerksmodell festgehalten, bestehen viel tiefgreifendere Möglichkeiten der Computerunterstützung während der Planung, dem Bau und dem Betrieb.

Dieses digitale Bauwerksmodell wird weitergegeben, wodurch die Anbindung von Simulationen, die Steuerung des Bauablaufes und die Übergabe von Gebäudeinformationen an den Betreiber deutlich verbessert werden können. Dadurch werden ansonsten mehrmals durchzuführende Arbeiten, die fehleranfällig sind, vermieden und die Produktivität sowie die Qualität gesteigert.

¹⁷⁵ Bracht, U./Geckler, D./Wenzel, S., 2018., S.27

¹⁷⁶ Vgl. Borrmann, A. u. a., 2015.. S-2-4

¹⁷⁷ Vgl. Wiendahl, H.-P./Reichardt, J./Nyhuis, P., 2010., S.532

¹⁷⁸ Vgl. Bracht, U./Geckler, D./Wenzel, S., 2018., S.262

Laut Definition versteht man unter einem Building Information Modell also ein umfassendes digitales Abbild eines Gebäudes mit großer Informationstiefe, in dem neben den dreidimensionalen Geometrien der Bauteile auch nicht geometrische Daten, wie beispielsweise technische Eigenschaften, Typeninformationen oder Kosten hinterlegt sind. Building Information Modeling ist der Vorgang der Erschaffung, Änderung und Verwaltung eines solchen Bauwerkmodells mit entsprechender Software.



Abbildung 28: Building Information Modelling¹⁷⁹

Die Möglichkeiten von BIM, die im Rahmen von Fabrikplanungsprojekten genutzt werden können, werden in den folgenden Absätzen in einem kurzen Beispiel erläutert:

Der Architekt erstellt, in Abstimmung mit den Fabrik- und Logistikplanern, ein auf der Layoutplanung basierendes räumliches Konzept für das neue Fabrikgebäude. Nach der Fertigstellung der Rohbauplanung erhält der Tragwerksplaner das Modell und leitet daraus ein statisches Analysemodell ab. Der Statiker detailliert das Modell, überführt die Daten für die Dimensionierung in ein Berechnungsprogramm und meldet bei Bedarf Änderungsvorschläge fehlerfrei an den Architekten zurück.

Der Ingenieur der Haustechnik nutzt das vom Architekten erstellte Gebäudemodell und plant die Technikzentralen und die Leitungstrassen ein. Der Architekt wiederum führt mit dem Teilmodell der Gebäudetechnik sowie der geplanten Produktionseinrichtung

¹⁷⁹ Borrmann, A. u. a., 2015., S.4

Kollisionsprüfungen durch und spürt dadurch Fehler in der Planung auf, womit teure Änderungen während der Bauzeit aufgrund von Abstimmungsfehlern reduziert werden können.

Das Building Information Model wird von den Produktions- und Logistikplanern in frühen Projektphasen als Tool zur Darstellung und Prüfung des mit dem Auftraggeber erarbeiteten Flächenprogramms eingesetzt. Im weiteren Projektverlauf werden einzelne Produktionseinrichtungen hinzugefügt und in der Datenbank den Räumen beziehungsweise Raumbereichen automatisch zugeordnet. Zusätzlich können in dem Modell wichtige Parameter, wie beispielsweise das Gewicht, Anschlusswerte für Strom oder Druckluft und besondere Anforderungen an eine statische Entkopplung, ergänzt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass BIM nicht nur ein Tool, sondern ein Prozess ist, der Nutzer, Planer und ausführende Unternehmen dabei unterstützt, die steigende Informationsmenge und die Komplexität von Fabrikplanungsprojekten zu beherrschen. Die vielfältigen Synergien, Effizienz- und Qualitätssteigerungen rechtfertigen den erhöhten Aufwand und die notwendige Disziplin im Planungsprozess.

3 Virtual Reality

Im folgenden Kapitel wird zunächst der Begriff Virtual Reality definiert, mit besonderem Augenmerk darauf, die Unterschiede zu Augmented und Mixed Reality hervorzuheben. Anschließend werden die physikalischen und technologischen Grundlagen von virtueller Realität erläutert sowie in den darauffolgenden Unterkapiteln die aktuell verfügbare Hard- und Software am Markt recherchiert. Zum Abschluss des Kapitels werden mögliche Schwachstellen und Grenzen dieser Technologie erörtert, wobei sich diese aufgrund von den rasanten Entwicklungen in dem Bereich von VR schnell verschieben oder ganz verschwinden können.

3.1 Begriffsdefinition

Eine einheitliche, wissenschaftliche Definition des Begriffes Virtual Reality liegt aktuell noch nicht vor, da VR ein relativ junges Wissenschaftsgebiet ist und durch rasante Fortschritte, vor allem im Bereich der verfügbaren Hardware, getrieben ist. Trotzdem findet man in der Literatur Merkmale und Definitionen von VR, welche im Wesentlichen in nahezu allen früheren und auch aktuellen Veröffentlichungen beschrieben sind.¹⁸⁰

Unter Virtual Reality versteht man grundsätzlich den vollständigen Ersatz der realen durch eine virtuelle Welt. Das bedeutet, das alles, was der Benutzer sieht, digital erstellt oder bearbeitet wurde.¹⁸¹

Maschmann beschreibt VR als eine vom Computer generierte virtuelle Welt, die einer real existierenden Person ermöglicht, diese zu betreten. Dies wird durch Sinnestäuschungen möglich, welche durch externe Peripheriegeräte gestützt werden.¹⁸²

Stärker technologieorientiert können VR Systeme als eine Technologie beschrieben werden, die spezielle Ein- und Ausgabegeräte, beispielsweise am Kopf des Nutzers (Head Mounted Display) oder Datenhandschuhe verwendet, um die virtuelle Welt darzustellen und mit ihr zu interagieren. An solchen Definitionen ist allerdings gefährlich, dass sie durch technologische Fortschritte rasch an Gültigkeit verlieren können.¹⁸³

Der VDI liefert in der Richtlinie 3633 Blatt 11 eine ausführlichere Definition: „Die Virtual Reality ist eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, die es erlaubt, in eine computergenerierte, dreidimensionale virtuelle Welt einzutauchen, diese als Realität wahrzunehmen, Bestandteil dieser zu sein und mit ihr zu interagieren. Als Teil der

¹⁸⁰ Vgl. Dörner, R. u. a., 2013., S:12

¹⁸¹ Vgl. Hauber, A., 2018., S.10

¹⁸² Vgl. Maschmann, M. C., 2017., S.11

¹⁸³ Vgl. Dörner, R. u. a., 2013., S.12-13

computergenerierten Welt kann man diese von verschiedenen Positionen aus betrachten und sie unmittelbar verändern.“¹⁸⁴

Virtual Reality kann auch als eine Technologie beschrieben werden, bei der mit der virtuellen Welt auf eine realistische Art und Weise interagiert werden kann. Ein Beispiel wäre das folgende: Man sitzt in einem virtuellen Restaurant und bestellt auf einer virtuellen Speisekarte ein virtuelles Gericht und bekommt dies in der virtuellen Welt serviert, ohne jedoch in der Realität wirklich etwas zu erhalten.¹⁸⁵

Eine etwas andere Definition von VR legt mehr Gewicht auf das Ziel der Erschaffung von Mensch-Maschine Schnittstellen, mit denen im Vergleich zu traditionellen Benutzungsschnittstellen besonders natürlich oder intuitiv mit der dreidimensionalen Umgebung interagiert werden kann.¹⁸⁶

Wesentliche Merkmale, die die virtuelle Realität von 3D-Computergrafik unterscheiden, sind in Tabelle 8 dargestellt.

3D-Computergrafik	Virtuelle Realität
Rein visuelle Präsentation	Multimodale Präsentation: visuell, akustisch, haptisch
Präsentation nicht notwendigerweise zeitkritisch	Echtzeitdarstellung
Betrachterunabhängige Präsentation (exozentrische Perspektive)	Betrachterabhängige Präsentation (egozentrische Perspektive)
Statische Szene oder vorberechnete Animation	Echtzeitinteraktion und -simulation
2-D Interaktion (Maus, Tastatur)	3-D Interaktion (Körperbewegung, Hand-, Kopf- und Körpergestik) + Spracheingabe
Nicht immersive Präsentation	Immersive Präsentation

Tabelle 8: Merkmale von VR¹⁸⁷

Virtual Reality ist einer von drei Begriffen, die in facheinschlägiger Literatur häufig unter dem Begriff Mixed Reality zusammengefasst werden, siehe Abbildung 29. Beim Einsatz einer dieser Technologie ist allerdings nicht festgelegt, ob Brillen (Head Mounted Displays), Smartphone Bildschirme, Beamer, Caves etc. verwendet werden, die Definition ist also unabhängig von den verwendeten technologischen Hilfsmitteln. Virtual- und Augmented Reality sind dabei als eigenständige Begriffe zu sehen, welche nicht direkt miteinander zu tun haben und sich in den Einsatzmöglichkeiten teilweise stark unterscheiden.¹⁸⁸

¹⁸⁴ VDI 3633 Blatt 11., S.3

¹⁸⁵ Vgl. Korgel, D., 2018., S.11

¹⁸⁶ Vgl. Dörner, R. u. a., 2013., S.15

¹⁸⁷ Vgl. Dörner, R. u. a., 2013., S.14

¹⁸⁸ Vgl. Korgel, D., 2018., S.11

Die beiden Extreme in Abbildung 29 bilden dabei die Realität sowie die Virtualität, da klarerweise nichts realer als die Realität und nichts künstlicher als die vollständige Virtualität sein kann.¹⁸⁹

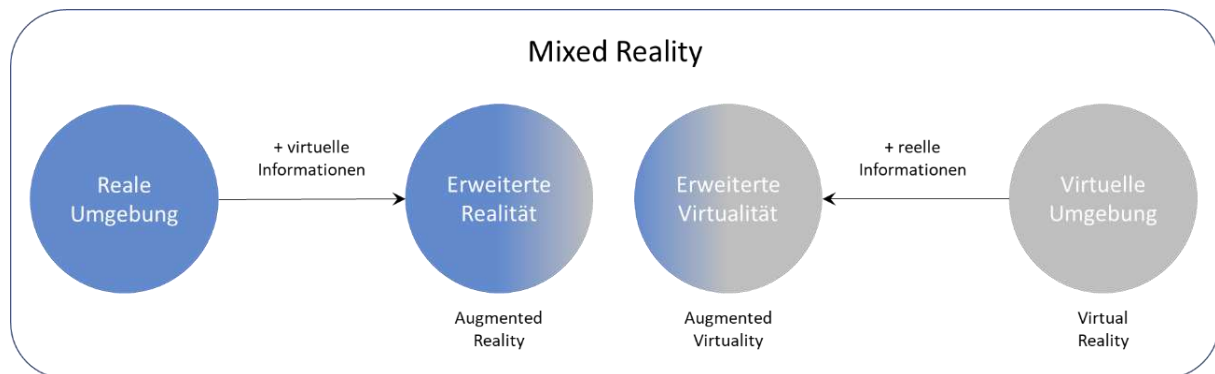


Abbildung 29: Begriffsabgrenzung Virtual Reality (eigene Darstellung)¹⁹⁰

Um die Unterscheidungsmerkmale zwischen diesen Technologien hervorzuheben werden in Tabelle 9 jeweils die Kurzbeschreibung sowie ein Beispiel einer jeweiligen Anwendungsmöglichkeit angeführt.

Virtual Reality	
Kurzbeschreibung	Beispiel
Technologie, mit der man mit einer virtuellen Welt auf eine realistische Art und Weise interagieren kann	Der Nutzer bestellt ein virtuelles Essen von einer virtuellen Speisekarte in einer virtuellen Welt, ohne jedoch in der Realität je etwas zu erhalten
Augmented Virtuality	
Kurzbeschreibung	Beispiel
Überlagerung von der virtuellen Welt mit Elementen aus der realen Welt	Ein reales Essen wird in einem virtuellen Restaurant verspeist. Der Nutzer sieht von der realen Welt also nur das Essen sowie seine Hände, der Rest ist virtuell.
Augmented Reality	
Kurzbeschreibung	Beispiel
Erweiterung der echten Welt um virtuelle Informationen beziehungsweise Objekte	Der Nutzer befindet sich in einem realen Restaurant mit einer realen Speisekarte und sobald er beispielsweise auf ein Gericht in der Karte deutet, erscheint dieses virtuell und dreidimensional vor ihm.

Tabelle 9: Kurzbeschreibung und Beispiele zu Mixed Reality^{191 192}

Der Begriff Augmented Virtuality wird in der Praxis allerdings eher selten verwendet und häufig auch einfach als Virtual Reality bezeichnet. Zusätzlich kursieren im Internet auch noch weitere Begriffe, wie beispielsweise Extended Reality, Cross Reality und X

¹⁸⁹ Vgl. <https://www.essert.com/augmented-reality-virtual-reality-mixed-reality-die-feinen-unterschiede>.

¹⁹⁰ Vgl. Korgel, D., 2018., S.11

¹⁹¹ Vgl. VDI 3633 Blatt 11., S.3

¹⁹² Vgl. Korgel, D., 2018., S.11

Reality.^{193 194} Diese tauchen allerdings in facheinschlägiger Literatur eher selten auf und werden somit in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

3.2 Grundlagen

Im folgenden Abschnitt gibt der Autor dieser Arbeit einen kurzen Überblick über die physiologischen und physikalischen Grundlagen von Virtual Reality. Anschließend werden aktuelle technische Lösungen sowie deren Umsetzungen in VR fähigen Geräten erläutert, um den State-of-the-Art von virtueller Realität zu dokumentieren.

Physiologische Grundlagen

Um ein Objekt wahrnehmen zu können, muss Licht auf dieses fallen, welches vom betrachteten Gegenstand reflektiert und vom Sehsystem verarbeitet wird. Diese zurückgeworfenen Lichtstrahlen treffen zunächst auf die Binde- und die Hornhaut und durchdringen letztere. Anschließend durchqueren sie die vordere Augenkammer sowie die Pupille, um zur Augenlinse zu gelangen, wo die Lichtstrahlen gebündelt und an die photosensible Netzhaut weitergeleitet werden. In der Netzhaut werden durch Stäbchen (Hell-Dunkel Sehen) und Zapfen (Schärfe und Farben) Informationen über das Gesehene gesammelt und sortiert und anschließend an den Sehnerv weitergegeben, welcher sie auf direktem Weg ins Gehirn transportiert. Dort erfolgt eine Auswertung, Interpretation sowie Zusammensetzung, um schlussendlich das Bild zu erhalten, das wir sehen.¹⁹⁵

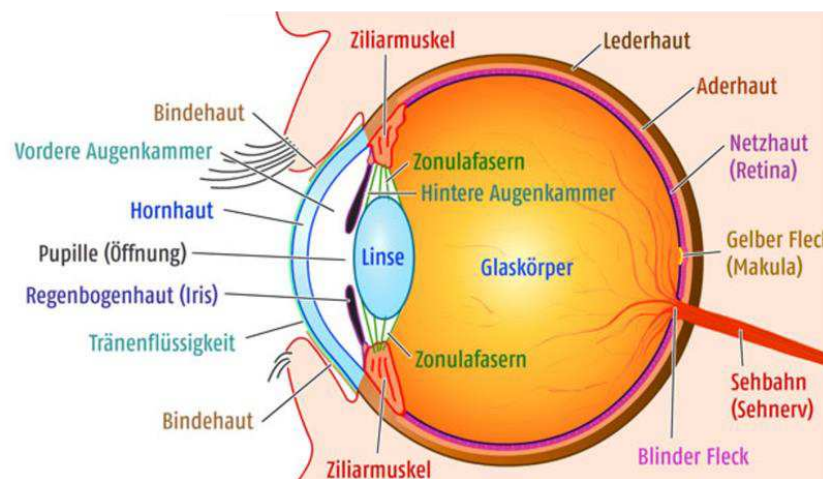


Abbildung 30: Aufbau des Auges¹⁹⁶

¹⁹³ Vgl. <https://www.essert.com/augmented-reality-virtual-reality-mixed-reality-die-feinen-unterschiede>.

¹⁹⁴ Vgl. <https://medium.com/@northof41/what-really-is-the-difference-between-ar-mr-vr-xr-35bed1da1a4e>.

¹⁹⁵ <https://www.zeiss.de/vision-care/besser-sehen/sehen-verstehen/das-menschliche-auge.html>.

¹⁹⁶ <https://www.brillen-sehhilfen.de/auge/netzhaut-retina.php>.

Auf der Netzhaut des Auges kommen zweidimensionale Bilder an. Trotzdem sehen Menschen, die an keiner den Sehsinn beeinträchtigenden Krankheit leiden, die Welt dreidimensional und können Abstände sowie Distanzen sehr gut einschätzen. Das liegt zum einen daran, dass das Gehirn zusätzliche Informationen wie Schatten, Überlagerungen und Erfahrungswerte über Größen dazu verwendet, um ein dreidimensionales Bild zu erzeugen. Der visuelle Cortex im Gehirn ermöglicht es zusätzlich, aus der retinalen Disparität, also dem unterschiedlichen Sichtwinkel beider Augen auf ein Objekt im Raum, dessen Position zu bestimmen. Durch dieses Zusammenfügen zweier Bilder zu einem sowie über die Position der Augäpfel beim Fixieren eines Punktes im Raum errechnet das Gehirn weitere Informationen über die Tiefe des Raumes.¹⁹⁷

Stereoskopisches Sehen^{198 199}

Darunter wird die Fähigkeit verstanden, mit Hilfe von zwei funktionstüchtigen Augen einen räumlichen Seheindruck zu gewinnen. Stellt man sich zwei Sehstrahlen vor, die zentral durch die Augenlinse auf die Mitte der Netzhaut treffen, sind diese nicht parallel, sondern stehen in einem gewissen Winkel zueinander und haben einen Schnittpunkt in der Ferne, siehe Abbildung 31.

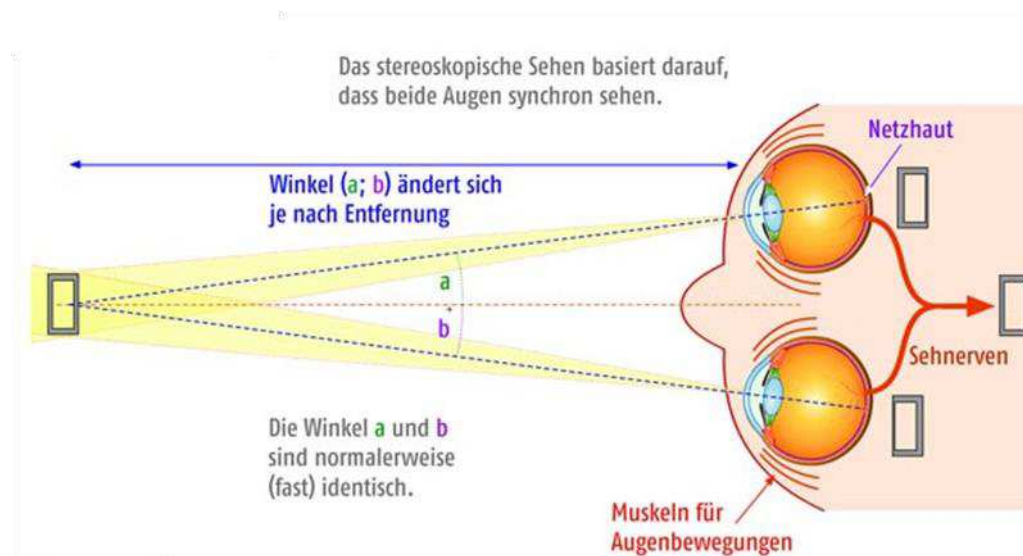


Abbildung 31: Stereoskopisches Sehen beim Menschen²⁰⁰

Diese beiden Winkel sind idealerweise, bezogen auf eine gedachte Mittelachse, die zwischen dem Mittelpunkt der beiden Augen sowie dem anvisierten Objekt verläuft, gleich groß. Die Winkel wiederum sind abhängig von dem Abstand zu diesem Objekt, je weiter entfernt dieses ist, umso kleiner werden diese Winkel.

¹⁹⁷ Vgl. Drimalla, H., 2010.

¹⁹⁸ Vgl. <https://www.brillen-sehhilfen.de/auge/netzhaut-retina.php>.

¹⁹⁹ Vgl. Dörner, R. u. a., 2013., S.36-43

²⁰⁰ <https://www.brillen-sehhilfen.de/auge/netzhaut-retina.php>.

Zusätzlich führt der Abstand zwischen den Augen dazu, dass diese separat Informationen über das betrachtete Objekt sammeln, allerdings aus verschiedenen Blickwinkeln. Das rechte Auge beispielsweise nimmt minimal mehr Informationen von der rechten Seite des Objektes auf, das linke Auge genau anders herum, siehe Abbildung 32.

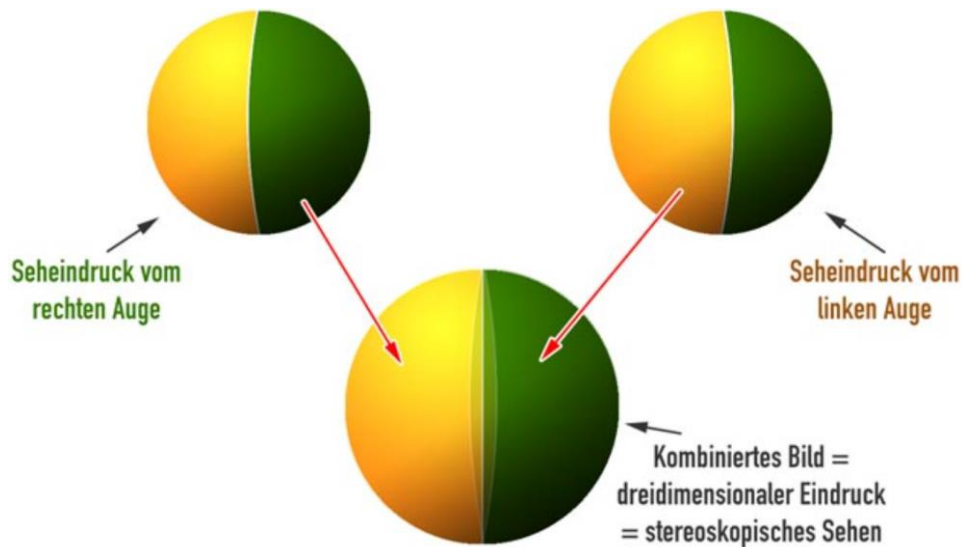


Abbildung 32: Seheindrücke Stereoskopisches Sehen²⁰¹

Diese Informationen werden gefiltert und über den Sehnerv ins Gehirn übertragen, wo die beiden minimal unterschiedlichen Perspektiven kombiniert und zusammen mit den im vorigen Absatz beschriebenen zusätzlichen Daten und Erfahrungen vom Gehirn dazu verwendet werden, eine räumliche Wahrnehmung zu ermöglichen.

Umsetzung in VR Headsets^{202 203 204 205}

Das stereoskopische beziehungsweise auch doppeläugige Sehen stellt die Grundlage für VR-Headsets dar, welche einen großen Schritt in die Verschmelzung der realen mit der virtuellen Welt ermöglichen. Dabei wird die Illusion des 3-dimensionalen Sehens erzeugt, in dem auf dem Display im HMD für das linke und rechte Auge jeweils leicht unterschiedliche Bilder dargestellt werden. Unterschiedlich in dem Sinne, dass der gleiche Inhalt aus zwei minimal unterschiedlichen Perspektiven dargestellt wird, also genau, wie es in der realen Welt auch ist.

Diese stereoskopische Differenz, welche vom Computerprogramm simuliert wird, ermöglicht dem Gehirn die Berechnung eines dreidimensionalen Eindruckes der virtuellen Umgebung. Die grundlegende Funktionsweise eines Head Mounted Displays

²⁰¹ <https://www.brillen-sehhilfen.de/auge/netzhaut-retina.php>.

²⁰² Vgl. <https://www.zeiss.de/vision-care/ueber-uns/newsroom/news-overview/hoerblicke-mit-zeiss/virtual-reality-so-funktionieren-vr-brillen.html>.

²⁰³ Vgl. <https://monitortest.de/wie-funktioniert-eine-vr-brille/>.

²⁰⁴ Vgl. Dörner, R. u. a., 2013., S.36-43

²⁰⁵ Vgl. <https://www.brillen-sehhilfen.de/vr-brillen/funktionsweise-vr-brille.php>.

ist in Abbildung 33 dargestellt. Die unterschiedlichen Perspektiven werden dabei durch den gelb bzw. grün markierten Bereich der Ellipse veranschaulicht.

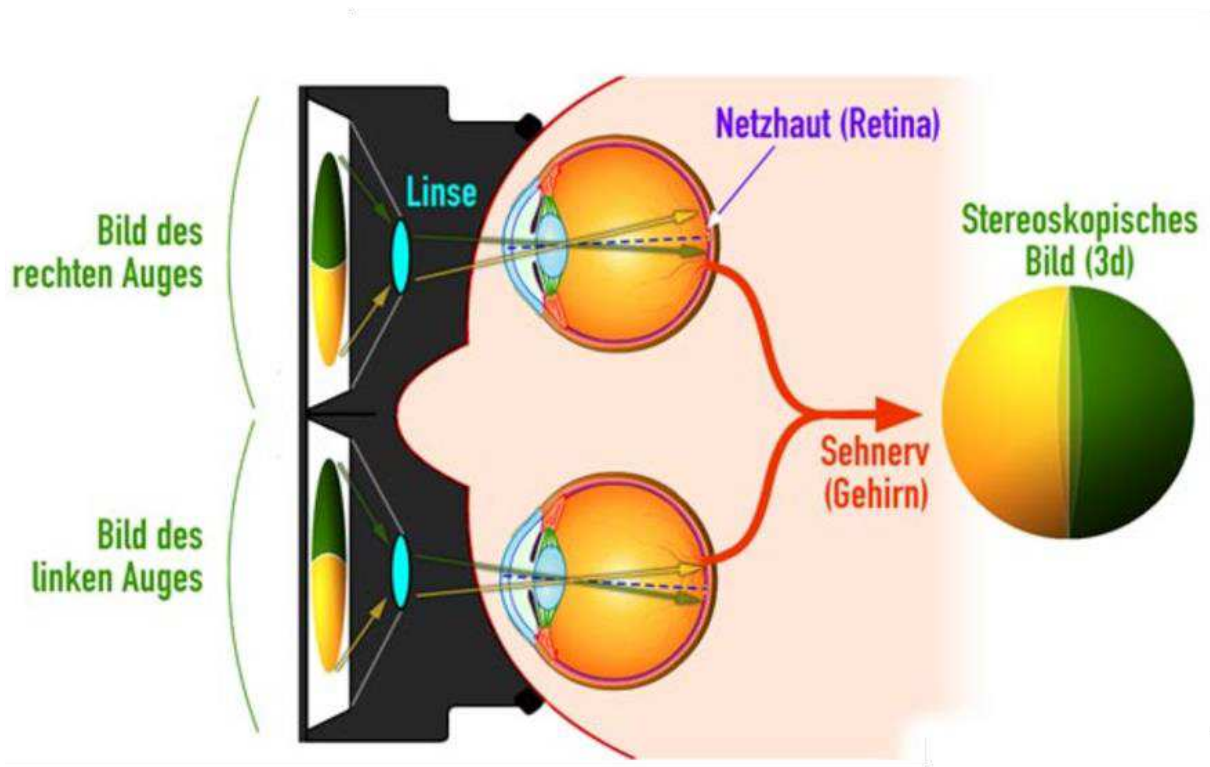


Abbildung 33: Funktionsweise VR-Headset²⁰⁶

Damit Objekte vom menschlichen Auge in ausreichender Schärfe erkannt werden können, ist ein gewisser Abstand, auch Minimale Objekt Distanz (MOD) genannt, zwischen diesem und dem betrachteten Objekt notwendig.

Die MOD ist je nach Person unterschiedlich, kann mit steigendem Alter größer werden und ist im Regelfall ungefähr zehn Zentimeter. In Head Mounted Displays beträgt der Abstand zwischen Auge und Bildschirm allerdings nur fünf bis acht Zentimeter, weshalb durch Akkommodation, also die physiologische Scharfstellung, kein scharfes Bild für den Benutzer möglich ist.

Deshalb sind in VR-Brillen Linsen integriert, welche das Bild des Displays so brechen, damit es auf der Netzhaut scharf dargestellt wird. Die Funktionsweise ähnelt dabei der einer sehr starken Lesebrille und es können theoretisch auch Fehlsichtigkeiten durch diese Linsen korrigiert werden, sodass keine Sehbehelfe unter dem Headset getragen werden müssen.

Abbildung 34 verdeutlicht noch einmal das Prinzip des stereoskopischen Sehens. Im VR-Headset werden für das linke und das rechte Auge zwei unterschiedliche Bilder

²⁰⁶ <https://www.brillen-sehhilfen.de/vr-brillen/funktionsweise-vr-brille.php>.

vom Computer errechnet, welche anschließend vom Gehirn zu einem dreidimensionalen Bild zusammengesetzt werden.

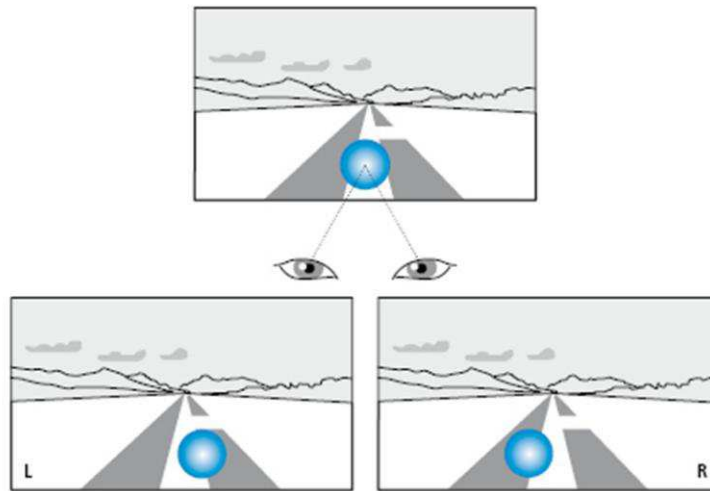


Abbildung 34: Darstellung in der VR-Brille²⁰⁷

Mobiles und Stationäres HMD ^{208 209 210}

Bei den Head Mounted Displays lassen sich grundsätzlich zwei Arten unterscheiden: die mobile und die stationäre Variante. Bei der mobilen Variante kann das Smartphone als Rechner und als Display verwendet werden, in dem der Bildschirm einfach in der Mitte geteilt wird und das Gerät in ein dafür vorgesehenes Headset eingesetzt wird.



Abbildung 35: Mobile VR-Brille für Smartphones²¹¹

²⁰⁷ <https://www.zeiss.de/content/dam/Vision/Vision/International/images/Articles/zeiss-how3d-3d-eng.jpg>.

²⁰⁸ Vgl. Korgel, D., 2018., S.15-24

²⁰⁹ Vgl. <https://www.com-magazin.de/news/virtual-reality/hp-stellt-mobilen-rucksack-pc-vr-1241523.html>.

²¹⁰ Vgl. <https://www.vergleich.org/vr-brille-smartphone/>.

²¹¹ <https://www.vergleich.org/vr-brille-smartphone/>.

Zur Ermittlung der Bewegungen sowie der Neigung und Drehung des Kopfes werden dabei die im Handy integrierten Sensoren verwendet. Smartphones haben natürlich bei weitem nicht die Leistung, die ein für VR-konzipierter Rechner hat und auch die Display Auflösung ist nicht optimal. Deshalb werden aktuell mobile HMD entwickelt, welche Rechner sowie Displays integriert haben, ein leistungsfähiges und serientaugliches Gerät ist zurzeit allerdings noch nicht auf dem Markt.



Abbildung 36: Stationäres VR-Headset²¹²

Stationäre Headsets hingegen sind durch mehrere Kabel mit einem Rechner verbunden und haben somit eine weit höhere Leistungsfähigkeit, da weder das Volumen, die Kühlung noch das Gewicht des Rechners eine Einschränkung darstellen. In der Brille integriert sind diverse Sensoren sowie eventuell Kameras, welche Daten für die Berechnung der Perspektiven, der Haltung des Kopfes sowie der Position im Raum liefern. Diese Daten werden an den stationären Rechner übertragen, ausgewertet und das Bild kabelgebunden an die hochauflösenden Displays gesendet und dargestellt.



Abbildung 37: Mobiler VR-Rechner²¹³

²¹² <https://www.androidcentral.com/htc-vive>.

²¹³ <https://www.com-magazin.de/news/virtual-reality/hp-stellt-mobilen-rucksack-pc-vr-1241523.html>.

Einen sehr vielversprechenden Ansatz, welcher die Vorteile der mobilen (hohe Bewegungsfreiheit und Flexibilität) und stationären VR-Brille (hohe Rechnerleistung und flüssige, hochauflösende Darstellung) vereint, ist der mobile VR-Rechner, welcher am Körper, beispielsweise an der Hüfte oder am Rücken, mitgetragen wird, siehe Abbildung 37.

Inside-Out und Outside-In-Tracking ^{214 215 216 217}

Unter Tracking versteht man im Zusammenhang mit Virtual Reality, wie die Orientierung und Position des Headsets und auch der Motion Controller im Raum verfolgt werden kann.

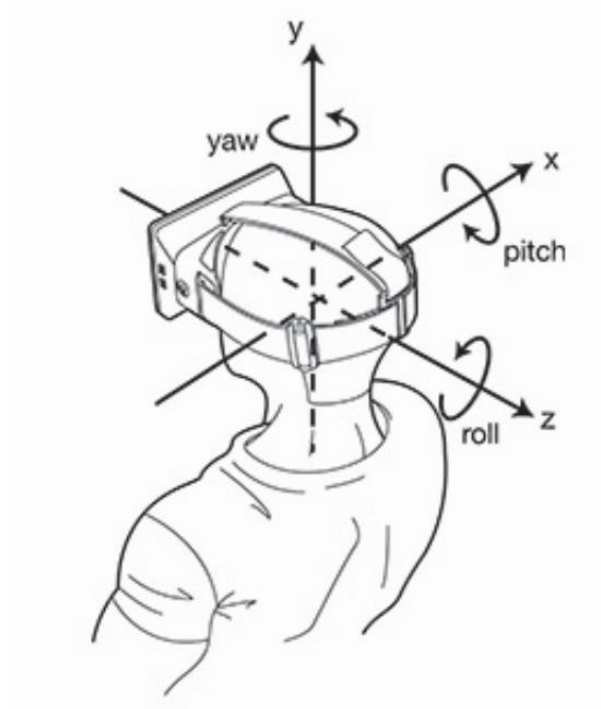


Abbildung 38: Bewegungen des HMD ²¹⁸

Ziel ist es unter anderem, sämtliche Bewegungen des Kopfes im dreidimensionalen Raum (Kopffrotationen sowie lineare Bewegungen) zu erfassen, um dem Nutzer das bestmögliche VR-Erlebnis zu bieten. Dazu sind diverse Sensoren, wie beispielsweise Gyroskop/Gyrometer, Beschleunigungssensoren sowie Sensoren zur Positionsermittlung, im Headset verbaut. Die ermittelten Daten werden von der Software kombiniert und dadurch die Orientierung sowie die Position im Raum errechnet. Ähnliches gilt für die Motion Controller, die bei den meisten HMD im Lieferumfang enthalten sind.

²¹⁴ Vgl. Dörner, R. u. a., 2013., S.107-109

²¹⁵ Vgl. <https://www.wearable.com/vr/inside-out-vs-outside-in-vr-tracking-343>.

²¹⁶ Vgl. <https://vrdummies.org/vr-technologie/tracking/>.

²¹⁷ Vgl. https://xinreality.com/wiki/Inside-out_tracking.

²¹⁸ <https://vrdummies.org/vr-technologie/tracking/>.

Dabei lassen sich grundsätzlich zwei Ansätze unterscheiden: Das Inside-Out sowie das Outside-In-Tracking, siehe Abbildung 39.

Beim erstgenannten sind neben dem HMD keine zusätzlichen Geräte erforderlich, um die Position und Orientierung im Raum zu ermitteln. Diverse Sensoren und Kameras im Headset werden eingesetzt, um Positionswechsel relativ zur Umgebung festzustellen, die Software verarbeitet diese Informationen entsprechend und erzeugt die Bilder in der VR-Brille, um eine Bewegung in der virtuellen Welt zu simulieren. Diese Systeme können mit oder ohne Positionsmarker, die oft nichts weiter als kleine, reflektierende, in der Umgebung angebrachte Sticker sind, funktionieren. Die Windows Mixed Reality Headsets beispielsweise kommen ohne diese Marker aus, das Headset alleine reicht für das Tracking.

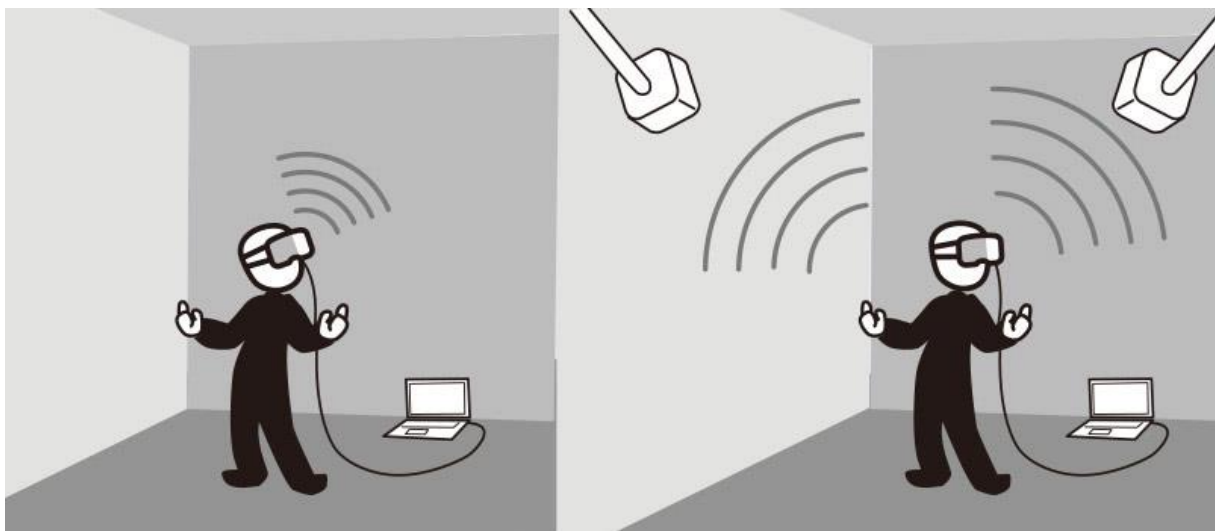


Abbildung 39: Inside-Out vs. Outside-In-Tracking²¹⁹

Der große Vorteil von Inside-Out-Tracking ist die große Freiheit und Flexibilität, die dadurch geboten wird. Um das System zu verwenden, wird nur das Headset aufgesetzt, weitere Schritte, wie beispielsweise das Aufstellen und Kalibrieren externer Tracking-Einrichtungen, entfallen vollständig. Das ist ein sehr wesentlicher Punkt, speziell, wenn das VR-System transportabel sein soll.

Nachteile davon sind allerdings die verminderte Genauigkeit im Vergleich zum Outside-In Tracking sowie eine möglicherweise auftretende Latenz, also eine gewisse Verzögerung der virtuellen Bewegung gegenüber der realen. Beim Einsatz von Motion Controllern müssen diese zusätzlich immer im Sichtbereich des HMD sein, da ansonsten die Positionserkennung unterbrochen wird und die Funktion dieser damit teilweise verloren geht.

Bei Outside-In-Tracking Systemen sind immer zusätzliche Hilfsmittel für die Positionsfeststellung und Orientierungsermittlung notwendig. Dabei werden neben

²¹⁹ <https://www.acer.com/ac/en/GB/content/series-design/wmr>.

den Sensoren im Headset weitere Sensoren oder Kameras eingesetzt, um der Software ausreichend genaue Informationen für die Darstellung der Bewegung im virtuellen Raum bereitzustellen. Diese werden stationär angebracht und ermöglichen das Tracken des frei in einem definierten Raum beweglichen HMD. Typischerweise werden dafür Infrarot-Marker und Kameras eingesetzt. Die durch Sensoren und Kameras ermittelten Daten werden von der Software am Computer verarbeitet und dadurch die entsprechende Bewegung im virtuellen Raum simuliert.

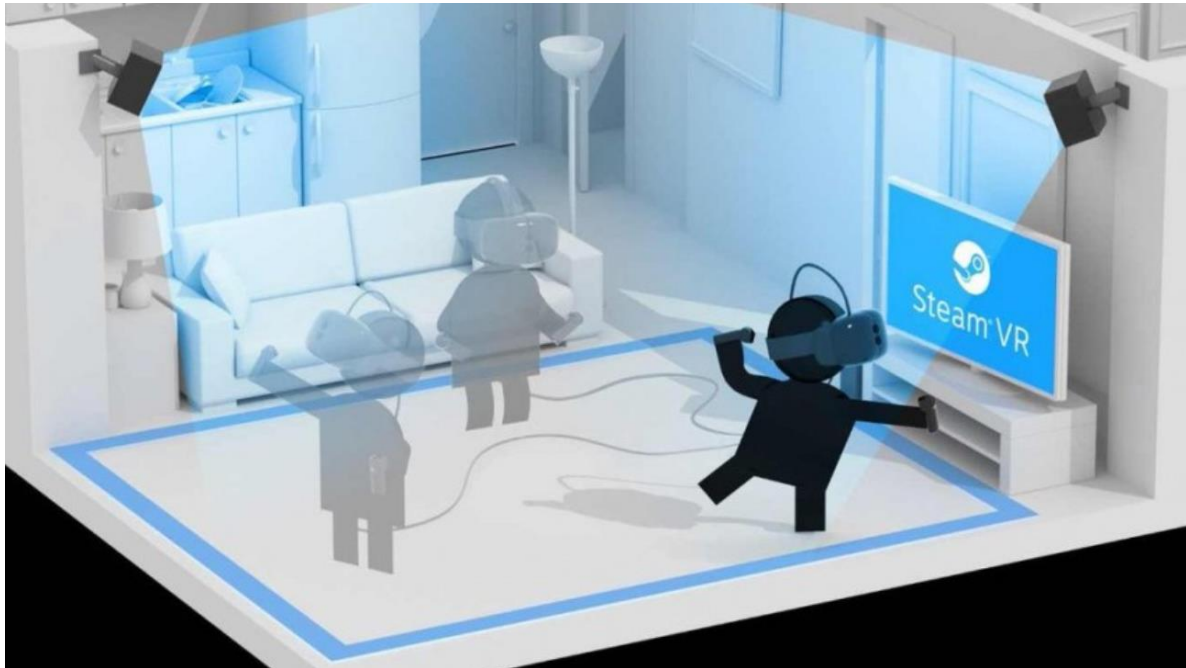


Abbildung 40: Tracking HTC Vive²²⁰

In Abbildung 40 wird die Funktionsweise der Outside-In Variante anhand des Setups des HTC Vive Headset demonstriert. In der Grundvariante werden zwei Basisstationen diagonal gegenüber im Raum platziert, idealerweise in einer Höhe von über zwei Metern beziehungsweise unter der Decke. Diese Basisstationen, auch Lighthouse Stationen genannt, legen den Bewegungsbereich fest, der meist vier mal vier Meter umfasst, und benötigen lediglich eine Stromversorgung. Eine Verbindung zum PC ist nicht erforderlich. Als wesentliche Komponenten beinhalten sie eine Fläche an Infrarot-LEDs sowie zwei Laser, jeweils einen für die horizontale und einen für die vertikale Achse.²²¹

Alle zu trackenden Objekte im Raum sind mit mehreren kleinen Sensoren ausgestattet, welche die Infrarot-Signale der Basisstation empfangen und an den Rechner weitergeben, wodurch von der Software die Position sowie die Rotation bestimmt werden kann. Die Basisstationen senden dabei immer dieselben Signale in sehr schnellen Intervallen: Die Infrarot-LEDs leuchten kurz auf, anschließend durchfährt der

²²⁰ <https://www.wearable.com/vr/inside-out-vs-outside-in-vr-tracking-343>.

²²¹ Vgl. <http://www.vrjump.de/lighthouse-erklart>.

horizontale Laser den Raum von links nach rechts (120°), dann sind wieder die LEDs an der Reihe und zum Abschluss schwenkt der vertikale Laser von oben nach unten (120°) durch den Raum. Die Sensoren empfangen die in genau definierten Zeitabständen gesendeten Signale und speichern den jeweiligen Empfangszeitpunkt exakt ab, womit eine Berechnung des Winkels zwischen Sensor und Basisstation anhand der fixen Zeitdifferenz zwischen LED-Blitz und Empfangen des Laserstrahls möglich wird.²²²

Die Vorteile vom Outside-In-Tracking sind, neben der höheren Genauigkeit im Vergleich zum Inside-Out-Tracking, die geringere Latenz von Bewegungen sowie die stabilere Verfolgung der Motion Controller. Speziell beim Einsatz erweiterter Systeme mit zusätzlichen Kameras beziehungsweise Sensoren, wodurch gleichzeitig die Tracking-Genauigkeit noch weiter erhöht wird, hat das Outside-In-Tracking seine Vorzüge. Wird das System nicht ständig am selben Ort betrieben, muss allerdings das Equipment jedes Mal auf- und abgebaut sowie kalibriert und eingerichtet werden, was einen nicht unerheblichen Mehraufwand bedeutet. Ein weiterer Nachteil ist der Verlust des Trackings und damit der Immersion, wenn man den definierten beziehungsweise abgedeckten Raum verlässt oder Hindernisse im Weg sind, was speziell bei eingegengten Platzverhältnissen zum Problem werden kann.

Caves^{223 224}

Cave ist ein rekursives Akronym und steht für Cave Automatic Virtual Environment. Darunter versteht man eine projektionsbasierte VR-Darstellung, welche vom Electronic Visualization Laboratory in Chicago entwickelt und 1992 erstmals präsentiert wurde.

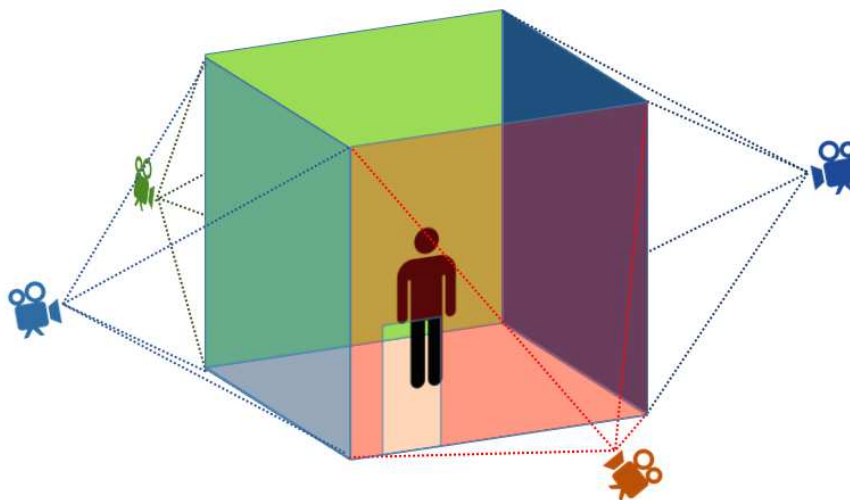


Abbildung 41: Schematischer Aufbau CAVE²²⁵

²²² Vgl. <http://www.vrjump.de/lighthouse-erklart>.

²²³ Vgl. <http://www.visbox.com/products/cave/>.

²²⁴ Vgl. <https://www.themarketingtechnologist.co/virtual-reality-connecting-unity-to-the-cave/>.

²²⁵ <https://www.themarketingtechnologist.co/virtual-reality-connecting-unity-to-the-cave/>.

Grundsätzlich versteht man darunter einen Raum, in dem durch die Projektion hochauflösender Stereo-Inhalte die virtuelle Umgebung erzeugt wird und in dem sich ein oder mehrere Benutzer aufhalten beziehungsweise bewegen können. In Abbildung 41 ist der schematische Aufbau eines CAVes für virtuelle Realität dargestellt.

Häufig werden dabei drei Wände eines Raumes als Display verwendet, wobei pro Wand mindestens ein designierter Projektor erforderlich ist. Um die Immersion noch zu verbessern, können auch alle Wände sowie der Boden und/oder die Decke als Display verwendet werden.

Spezielle Brillen ermöglichen es, dem rechten und dem linken Auge jeweils nur einen Kanal dieser Projektion zu zeigen, wodurch eine plastische 3D-Darstellung erzeugt wird. Dabei kann man zwischen aktiven und passiven Technologien unterscheiden: Bei der aktiven Projektion wird der 3D-Eindruck durch zeitgesteuerte Shutterbrillen erzeugt, bei der passiven Variante hingegen durch einfache Polarisationsbrillen.²²⁶

Ein großer Vorteil von CAVes gegenüber Head Mounted Displays ist, dass die Inhalte gleichzeitig für mehrere Personen dargestellt werden und mehrere Personen zur selben Zeit mit derselben virtuellen Umgebung interagieren können.



Abbildung 42: Anwendungsbeispiel CAVE: Virtuelle Begehung einer Fabrik²²⁷

In Abbildung 42 ist ein fünf-Seiten Cave der TU-Chemnitz mit der Passiv-Stereo Technologie und einer Kantenlänge der Projektionsflächen von drei Metern dargestellt. Im Einsatz sind dabei 20 Projektoren, die Position des Nutzers wird über ein optisches Trackingsystem ermittelt.²²⁸

²²⁶ Vgl. <https://www.computerwoche.de/a/forschung-in-der-sechs-seiten-cave>, 1.

²²⁷ <https://www.tu-chemnitz.de/mb/WerkzMasch/lufa/vrcp/#ausstattung>.

²²⁸ Vgl. <https://www.tu-chemnitz.de/mb/WerkzMasch/lufa/vrcp/#ausstattung>.

3.3 Software für Virtual Reality

Im Zusammenhang mit VR wird eine Vielzahl unterschiedlicher Software eingesetzt, sei es zur Erstellung von Programmen, zum Konvertieren und Übertragen von 3D-Software auf das HMD oder als Home-Anwendungsprogramm für das VR-Headset. In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über potenziell in dieser Arbeit verwendbare Programme, Anwendungen, Plugins etc. gegeben, da der Großteil dieser auch in zumindest einem der in Kapitel 6 erarbeiteten Vorgehensmodelle zum Einsatz kommt.

Unity^{229 230 231}

Unity ist eine Echtzeit-3D-Entwicklungsplattform, mit der zwei- und dreidimensionale Spiele, Anwendungen und Erfahrungen erstellt werden können. Zugleich ist es auch das bevorzugte Entwicklungstool für VR- und AR-Erfahrungen, welches beispielsweise von Game-Studios, Werbeagenturen, der NASA, Hollywood-Regisseuren sowie Google eingesetzt wird. Zu den Zielplattformen zählen neben PCs Spielkonsolen, mobile Geräte sowie Webbrowser.

Der Unity-Editor kann an die jeweiligen Bedürfnisse einfach per Drag and Drop der Fenster angepasst werden. Um den grundlegenden Aufbau zu beschreiben, wird die in Abbildung 43 dargestellte Standardansicht kurz erläutert.



Abbildung 43: Standardsansicht im Unity-Editor²³²

²²⁹ Vgl. <https://unity.com/de>.

²³⁰ Vgl. Korgel, D., 2018., S.40

²³¹ Vgl. Ong, S., 2017., S.29

²³² Korgel, D., 2018., S.40

Diese kann grundsätzlich in fünf Bereiche eingeteilt werden:

Bereich	Beschreibung
1. Project- und Console-Bereich	In diesem Bereich befinden sich die beiden Reiter „Project“ und „Console“. Der Project-Reiter stellt die Projektansicht dar, in der alle zu einem Projekt gehörenden Dateien angezeigt werden. Im Console-Reiter hingegen werden Debug-Informationen, Warnungen und Fehler angezeigt, während die Anwendung getestet wird.
2. Hierarchy-Bereich	Hier werden alle Objekte, wie beispielsweise Modelle, Lichter und Kameras, der aktuellen Ansicht in einem eigenen Eintrag dargestellt. Die Game Objects können per Drag and Drop um- und hierarchisch sortiert werden.
3. Scene-, Game- und Asset-Store-Bereich	Standardmäßig befinden sich in diesem Bereich drei Reiter: Scene-, Game- und Asset-Store-Reiter. Der wichtigste davon, der Scene-Reiter, enthält eine Echtzeit Vorschau der aktuellen Szene und wird deshalb auch Scene View genannt. In der Game-Ansicht wird während des Testens im Editor die Perspektive dargestellt, welche der Nutzer auch in der fertigen Anwendung haben würde. Im Reiter Asset-Store befindet sich ein integrierter Store, in dem Modelle, Sounds und Plug-ins gekauft und heruntergeladen werden können.
4. Toolbar-/Werkzeug-Bereich	In diesem Bereich befinden sich, analog zu vielen anderen Programmen, die klassische sowie die Unity-spezifische Toolbar
5. Inspector-Bereich	Dieser Bereich ist dynamisch und passt sich immer an die aktuelle Tätigkeit an. Wird beispielsweise ein Game Object im Scene View oder der Hierarchy ausgewählt, werden im Inspector-Bereich detaillierte Informationen dazu dargestellt. Zusätzlich werden darin auch diverse Einstellungsfenster angezeigt, die über die Toolbar aufgerufen wurden.

Tabelle 10: Bereiche im Unity Editor²³³

²³³ Vgl. Korgel, D., 2018., S.41

Ein typischer Workflow zur Erstellung von VR-Anwendungen mit Unity ist in Abbildung 44 dargestellt. In einem ersten Schritt werden 3D-Objekte und andere Assets in Unity importiert. Anschließend folgt die Programmierung, wie der Nutzer mit verschiedenen Objekten sowie diese mit ihm, anderen Objekten und der restlichen, virtuellen Welt interagieren können. Dazu können vorgefertigte Toolkits, Plug-ins und auch eigene Codes verwendet werden. Darauf folgt der Test der App, welcher direkt in Unity gestartet wird, sowie der finale Export, damit diese am gewünschten Gerät installiert und verwendet werden kann.



Abbildung 44: Workflow in Unity für VR-Anwendung²³⁴

Unity gibt es für Windows, macOS sowie Linux in drei unterschiedlichen Varianten:

- Kostenlos, wenn der Umsatz oder die erhaltenen Fördergelder 100.000 \$ pro Jahr nicht überschreiten
- 20 €/Monat, falls der Umsatz bzw. die erhaltenen Fördergelder 100.000 \$ pro Jahr übersteigen, wobei eingeschränkter Support inkludiert ist
- 115 €/Monat, wenn die 100.000 \$ Grenze überschritten wird und vollumfänglicher Support gewünscht wird

In dieser Arbeit wird die kostenlose Version von Unity eingesetzt, da diese nur im Rahmen der Diplomarbeit und somit ohne kommerziellen Nutzen verwendet wird.

Pixyz Plugin²³⁵

Pixzy Plugin ermöglicht den automatischen Import von CAD-Daten in VR-Engines wie Unity oder Unreal, wodurch eine Brücke zwischen der CAD und der virtuellen Welt geschlagen wird. Es wird zwar in dieser Arbeit nicht verwendet, als Ergänzung in Vorgehensmodell 1 könnte es jedoch sinnvoll sein.

Es wird eine Vielzahl an Import-Einstellungen (Beibehaltung der Produkthierarchie, Einstellungen für Tessellation, Tausch der Achsen etc.) geboten, um die 3D-Daten optimal verwenden zu können und für Unity besteht zusätzlich die Möglichkeit, die CAD-Daten in Echtzeit in der fertigen Anwendung zu importieren. Beim Import der Daten wird das Netz zusätzlich von einem speziellen Algorithmus automatisch optimiert, um eine bestmögliche Qualität bei einer möglichst geringen Anzahl an Polygonen zu erreichen.

²³⁴ Vgl. Ong, S., 2017., S.29

²³⁵ Vgl. <https://www.pixyz-software.com/plugin/>.

Unterstützt werden die meisten gängigen CAD-Programme wie beispielsweise Catia, Siemens NX, AutoCad Inventor, SolidWorks etc. Verfügbar ist eine 7-Tage Testversion sowie eine Node-Locked Lizenz, welche jährlich 1.000 € exklusive Steuern kostet.

Mixed Reality Toolkit^{236 237}

Das MR-Toolkit Open Source-Projekt, welches die fundamentalen Bestandteile für das Programmieren von MR-Anwendungen in Unity liefert, macht das Entwickeln von Anwendungen deutlich einfacher und beschleunigt diese. Die neueste Version des Toolkits beinhaltet die Basisbausteine für HoloLens, HoloLens 2, Windows Mixed Reality sowie OpenVR. Der Toolkit unterstützt bei den richtigen Einstellungen in Unity, der Programmierung der Teleportation, dem Einrichten der Kamera und vielen weiteren Bereichen, die den Rahmen dieser Diplomarbeit übersteigen.

In Abbildung 45 ist ein Auszug der Bausteine des Mixed Reality Toolkits abgebildet.

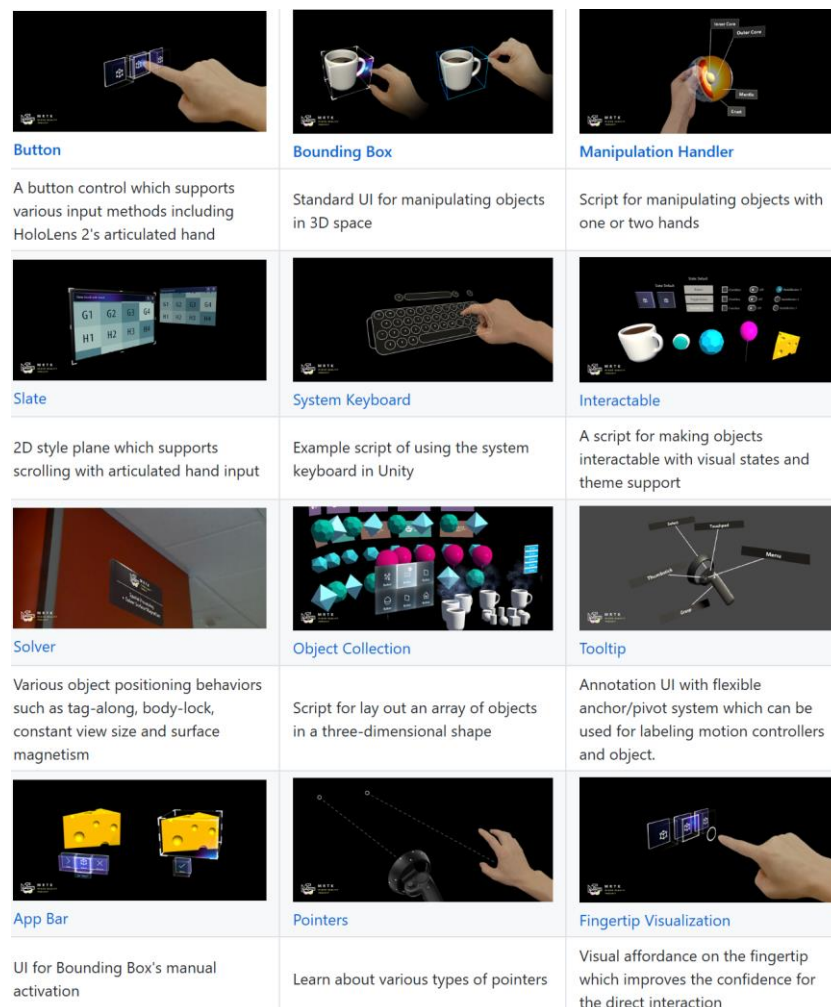


Abbildung 45: Auszug Bausteine des MRTK²³⁸

²³⁶ Vgl. Ong, S., 2017., S.81

²³⁷ Vgl. <https://github.com/Microsoft/MixedRealityToolkit-Unity>.

²³⁸ <https://github.com/Microsoft/MixedRealityToolkit-Unity>.

Der Toolkit kann kostenlos bei Github heruntergeladen werden und wird ständig weiterentwickelt, deshalb wird empfohlen, öfter zu kontrollieren, ob noch die aktuellste Version verwendet wird. Zusätzlich findet man auf dieser Seite eine umfangreiche Dokumentation aller Funktionen des Mixed Reality Toolkits sowie zahlreiche Hilfestellungen.

moreViz²³⁹

MoreViz ist eine Software von der deutschen Firma more3D, mit der aus diversen Anwenderprogrammen (Vistable, PlanSimulation, Siemens NX etc.) VR-Erfahrungen generiert werden können. MoreViz arbeitet wie ein Plugin, es extrahiert die Daten mit einer Grabing-Engine aus der laufenden Anwendung am moreViz Server und verpackt, verschlüsselt und versendet diese an einen oder mehrere VR-Visualisierungsclients, wodurch eine kontinuierliche Echtzeit-Darstellung ohne aufwändige Konvertierungs- und Aufbereitungsaufgaben möglich wird.

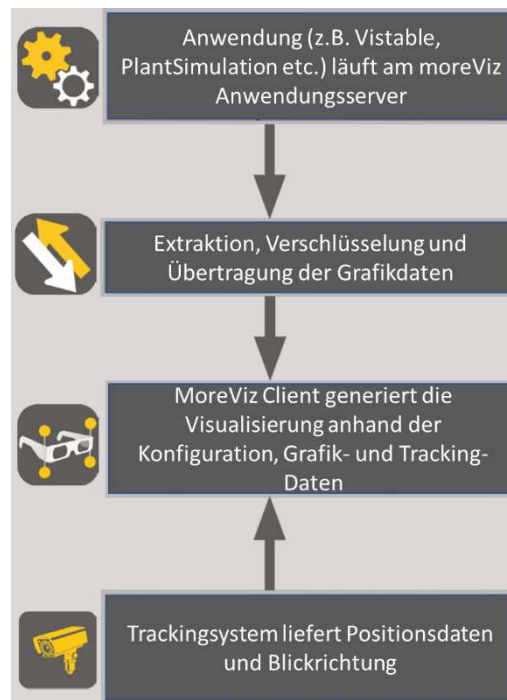


Abbildung 46: typischer Workflow MoreViz²⁴⁰

Die Ausgabe kann, abhängig von der Clienteneinstellung, über Virtual Reality Brillen, Caves sowie 3D-Monitore oder 3D-Fernseher erfolgen. Dabei werden alle Trackingsysteme und Eingabegeräte in der generierten Virtual Reality Darstellung unterstützt. Da die Clients alle Änderungen im Programm in Echtzeit widerspiegeln, werden vorgenommene Änderungen sofort visualisiert als auch vorgefertigte Animationen übernommen.

²³⁹ Vgl. <http://more3d.com/more3d/index.php?id=234>.

²⁴⁰ <http://more3d.com/more3d/index.php?id=234>.

In Abbildung 46 ist der typische Workflow der MoreViz Software zur Generierung einer Virtual Reality Erfahrung abgebildet.

Die Kosten für die Software belaufen sich laut Angebot vom 17.03.2019 auf 4.990 € einmalig sowie eine jährliche Service-Pauschale von 898,20 €. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird eine Testlizenz verwendet, die dankenswerterweise von Herrn Kinas und Herrn Koch von more3D für mehrere Wochen zur Verfügung gestellt wurde.

Windows Mixed Reality Portal²⁴¹

Die Desktop-App, mit der das Setup von Windows Mixed Reality durchgeführt werden kann, heißt WMR-Portal. Dieses funktioniert gleichzeitig auch als Befehlscenter für alle Windows Mixed Reality Erfahrungen am PC.

Das WMR-Portal bietet unter anderem die folgenden Funktionen:

- Darstellung eines Livestreams der Ansicht im Headset (allerdings nur bei Windows Mixed Reality Ultra verfügbar)
- Statusanzeige des Headsets sowie der Controller
- Einrichten der Controller
- Aktivieren, Deaktivieren sowie Einrichten von Grenzen
- Abrufen von Windows Mixed Reality Fotos
- Download und Kauf von Mixed Reality Apps und Spielen

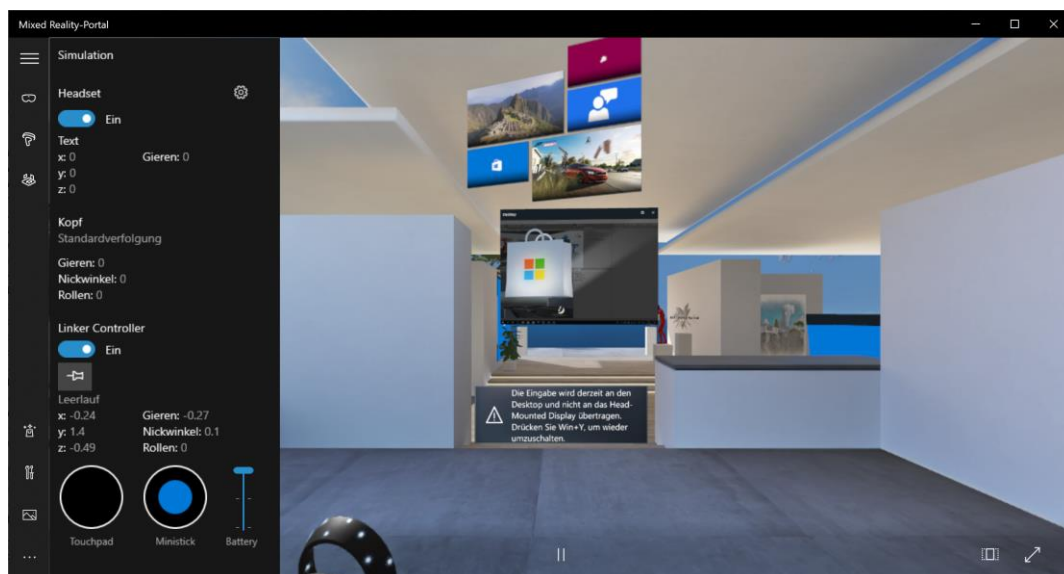


Abbildung 47: Entwickleransicht Windows Mixed Reality Portal

Eine weitere, sehr nützliche Funktion des Portals ist die Entwickleransicht, welche in Abbildung 47 dargestellt ist. Damit können Anwendungen ohne VR-Device getestet werden, da in dieser Ansicht alles exakt so angezeigt wird, wie es später auch am Headset aussieht. Zusätzlich stehen in Abbildung 47 links auch beinahe alle

²⁴¹ Vgl. <https://support.microsoft.com/de-at/help/4041252/windows-10-use-mixed-reality-portal>.

Funktionen der Motion Controller zum Testen zur Verfügung. Zwischendurch und auf jeden Fall am Ende sollte natürlich trotzdem mit dem HMD getestet werden, um die Darstellungsqualität zu überprüfen sowie eine benutzerfreundliche Bedienbarkeit sicherzustellen.

Das Windows Mixed Reality Portal ist bei Windows 10 entweder standardmäßig installiert oder kann von der Microsoft Homepage kostenlos heruntergeladen werden.

4 State-of-the-Art-Analyse Virtual Reality

Im folgenden Kapitel gibt der Autor einen Überblick über aktuelle Anwendungsfälle von Virtual Reality im Bereich der Fabrikplanung und verwandten Einsatzgebieten. Dazu zählen auch virtuelle Begehungen von geplanten Anlagen, um beispielsweise zu überprüfen, wie das geplante Gebäude räumlich ausgestaltet ist, wie die zukünftigen Arbeitsbedingungen sein werden und welche Lichtverhältnisse herrschen.²⁴² Da die Fabrikplanung häufig eng mit den 3D-Modellen der (Industrie-)Architektur verbunden ist, werden in diesem Unterkapitel auch Anwendungsfälle aus der Architektur angeführt.

Neben den Anwendungsfällen aus dem Bereich der Fabrikplanung existieren noch viele weitere Branchen, in denen mit der VR-Technologie experimentiert wird beziehungsweise in denen VR bereits im Einsatz ist. Diese werden allerdings in dieser Arbeit nicht im Detail behandelt. Weitere Anwendungsfälle lassen sich beispielsweise in der Medizin (Diagnose, Operationsunterstützung etc.), der Produktentwicklung (Präsentation von Entwürfen, Computersimulationen etc.), der Automobilindustrie (Prototyp, Autohaus etc.) und in verschiedensten Schulungs- und Trainingseinrichtungen finden.²⁴³

4.1 VR in der Fabrikplanung und ähnlichen Einsatzgebieten

Das Aufnehmen und Verstehen von Daten kann durch die virtuelle Realität erheblich erleichtert werden. Architekten beispielsweise haben durch die jahrelange Erfahrung in Beruf und Studium die Fähigkeit erworben, sich anhand von 2D-Bauplänen das Gebäude geistig dreidimensional vorstellen zu können. Viele Bauherren und Entscheidungsträger haben diese Fähigkeiten allerdings nicht. Virtuelle Realität bietet Möglichkeiten, die Daten in den Bauplänen so zu visualisieren, dass alle Beteiligten, unabhängig von ihren Vorkenntnissen und gesammelten Erfahrungen, schnell einen sehr guten Eindruck vom Gebäude beziehungsweise der Anlage erhalten und somit Entscheidungen hinsichtlich Realisierungsalternativen fundierter treffen können.²⁴⁴

²⁴² Vgl. Bracht, U./Geckler, D./Wenzel, S., 2018., S.145

²⁴³ Vgl. Bracht, U./Geckler, D./Wenzel, S., 2018., S.145

²⁴⁴ Vgl. Dörner, R. u. a., 2013., S.9

Fabrikplanung^{245 246 247 248 249 250 251}

In einem Fabrikplanungsprozess, in dem komplexe Fragestellungen bearbeitet werden, welche nicht allein anhand von Algorithmen gelöst werden können, stellen virtuelle Techniken (VR, AR, DMU, Laserscans, Simulationen etc.) wertvolle Werkzeuge dar. Speziell Virtual Reality kann bei räumlich-geometrischen Aufgaben, bei denen der Mensch als Entscheidungsinstanz auftritt, sinnvoll eingesetzt werden.

Zusätzlich liegt, aufgrund der Vielzahl der am Planungsprozess beteiligten Stakeholder, eine der größten Herausforderungen im Fabrikplanungsprozess im Informationsaustausch zwischen den Expertengruppen. Dieser Austausch kann durch den Einsatz von virtueller Realität positiv beeinflusst werden, da durch die Integration von VR in den Planungsprozess Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Teilgebieten besser sichtbar gemacht und in der Planung berücksichtigt werden können.

Zumindest im Moment kann VR nicht in allen Bereichen des Fabrikplanungsprozesses eingesetzt werden, sinnvolle mögliche Einsatzfelder sind allerdings beispielsweise die Gebäude- und Layoutplanung sowie die Produktionsanlagenplanung. Eine Übersicht, in welchen Abschnitten des in Kapitel 2 definierten Fabrikplanungsprozess virtuelle Techniken beziehungsweise Virtual Reality sinnvoll eingesetzt werden können, ist in Abbildung 48 dargestellt.

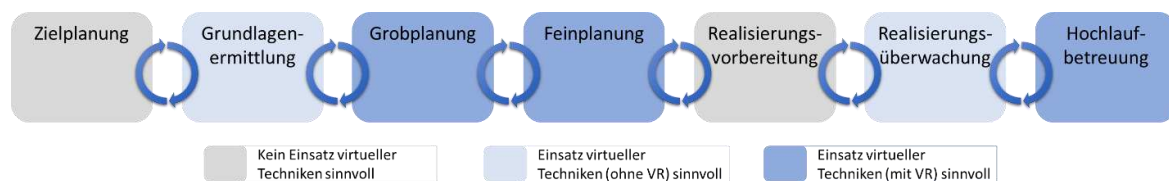


Abbildung 48: Einsatz virtueller Techniken im Fabrikplanungsprozess (eigene Darstellung)

In der Zielplanung, in der hauptsächlich Unternehmens- und Projektziele erarbeitet und Bewertungskriterien festgelegt werden sowie in der Realisierungsvorbereitung, in der die Angebotsbeschaffung, die Vergabe und die Überwachung der Ausführungsplanung zu den Hauptaufgaben zählen, lassen sich bisher keine sinnvollen Anwendungen für VR, aber auch nicht für andere virtuelle Techniken identifizieren.

Zur Grundlagenermittlung, speziell bei Umplanungsprojekten, können virtuelle Techniken beispielsweise zur Dokumentation des Ist-Zustandes (Laserscans) und für

²⁴⁵ Vgl. Runde, C./Cannarozzi, M., 2016., S.183-185

²⁴⁶ Vgl. Gausemeier, J./Grafe, M./Meyer auf der Heide, F., 2015, S.141

²⁴⁷ Vgl. Goldhahn, L./Müller-Eppendorfer, K., 2017, S.239-240

²⁴⁸ Vgl. Bracht, U./Geckler, D./Wenzel, S., 2018, S.145-146

²⁴⁹ Vgl. Yang, X./Malak, J./Aurich, C., 2011., S.110-114

²⁵⁰ Vgl. Kunz, A. u. a., 2016., S.161-162

²⁵¹ Vgl. Bracht, U./Schlegel, M., 2018., S.255

Soll-Ist Abgleiche (Augmented Reality) eingesetzt werden. In der Phase der Realisierungsüberwachung kann ebenfalls der Einsatz von Mischdatenverarbeitung, also dem Abgleich der Daten eines Laserscans mit der 3D-Konstruktion, beziehungsweise die Überblendung der Soll-Planung mit der realen Perspektive mittels AR, siehe Abbildung 49, sinnvoll sein.

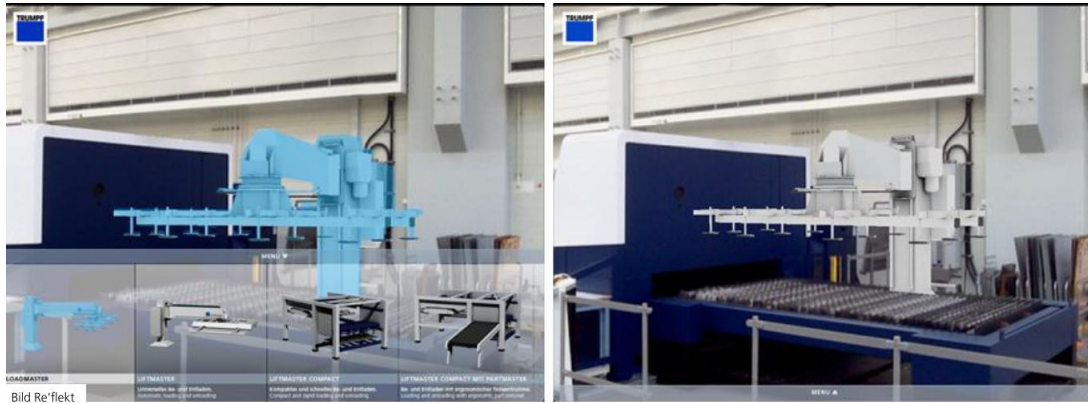


Abbildung 49: Überblendung Soll-Planung und reale Perspektive²⁵²

Im Gegensatz zu den vier eben genannten Phasen lassen sich in der Grob- und Feinplanung sowie der Hochlaufbetreuung aber bereits heute sinnvolle Einsatzfelder für virtuelle Realität finden. So kann zum Beispiel in der Grobplanung VR zur Variantenvisualisierung der Generalbebauung, des Fabrikgebäudes, der Gebäudeinfrastruktur (Mediensysteme, Anschlüsse etc.) sowie des Groblayouts verwendet werden. Durch den Einsatz von VR-Modellen lassen sich außerdem die räumliche Ausgestaltung des Gebäudes sowie die darin herrschenden Lichtverhältnisse meist besser darstellen. Aber auch die Dimensionierung von Produktions-, Lager- und Verkehrsflächen kann durch den Einsatz von VR-Brillen überprüft werden.



Abbildung 50: Virtueller Walkthrough im Cave²⁵³

²⁵² Runde, C./Cannarozzi, M., 2015., S.21

²⁵³ Runde, C./Cannarozzi, M., 2015., S.9

In der Feinplanung geht es unter anderem um die optimale Anordnung von Maschinen, Anlagen, Montagesystemen, Robotik, Automatisierungs- und Fördertechnik etc. zur Erreichung von Effizienz-, Sicherheits- und Ergonomie-Zielen. Der Einsatz von Virtual Reality wird in dieser Phase von vielen Autoren in der Bewertung von verschiedenen, bereits vorab vorbereiteten Layoutvarianten als hilfreich erachtet. Ziel ist eine bestmögliche geometrische, funktionale sowie produktionstechnische Integration aller Komponenten im Gesamtlayout sicherzustellen.

Dabei kann VR sowohl als Unterstützung in der Gestaltung der einzelnen Arbeitsplätze, zur Beurteilung der zukünftigen Arbeitsbedingungen als auch zur Integration von Teilsystemen in das Gesamtsystem eingesetzt werden.

In der letzten Phase des Fabrikplanungsprozesses, der Hochlaufbetreuung, kann virtuelle Realität ebenfalls sinnvoll eingesetzt werden, nämlich beispielsweise für einen simulativen Trockenlauf der Produktion in der virtuellen Welt. Mitarbeiter können schon vor dem eigentlichen Produktionsstart in die neue Arbeitsumgebung eingearbeitet und Prozesse geübt werden, wodurch Zeit und Kosten beim Hochlauf eingespart werden können, näheres dazu weiter unten bei den Schulungen.

(Industrie)-Architektur und Baubranche^{254 255 256 257 258}

Virtual Reality findet auch in der Architektur und dem Bauwesen Anwendung, indem beispielsweise Begehungen und Besichtigungen von Objekten gemeinsam mit dem Makler gemacht werden können, obwohl das Objekt erst gebaut wird oder in einer anderen Stadt beziehungsweise gar in einem anderen Land steht. Aber auch in der Planung spielt diese Technologie eine immer größere Rolle, da es dadurch leichter wird, Planungsfehler, unschöne Entscheidungen in der Konzeption sowie falsche Größenverhältnisse zu vermeiden.

Die begrenzte menschliche Vorstellungskraft ist für viele Probleme in der Bauindustrie verantwortlich. Komplett erfassen können Architekten und Bauingenieure ein Projekt meist erst, wenn es fertig konstruiert wurde. Werden Fehler zu spät entdeckt, weil sie auf dem Papier nicht sichtbar waren, führt das meist zu zeit- und kostenintensiven Problemen beim Bau.

Miniaturmodelle, welche häufig eingesetzt werden, erlauben eine Abschätzung der Relation der einzelnen Objekte zueinander, allerdings nicht in der späteren Dimension und die Wirkung des Gebäudes oder der Räumlichkeiten wird verzerrt. Bei 3D-

²⁵⁴ Vgl. <http://www.vrjump.de/architektur>.

²⁵⁵ Vgl. <https://www.virtual-reality-magazin.de/virtuelle-meetings-autodesk-bim-360>.

²⁵⁶ Vgl. Du, J. u. a., 2018, S.1

²⁵⁷ Vgl. Shi, Y. u. a., 2016, S.126

²⁵⁸ Vgl. <https://allgemeinebauzeitung.de/abz/digitale-hilfe-virtual-reality-erweitert-horizont-der-bauindustrie-24928.html>.

Modellen am PC fehlt die Tiefendimension, wodurch nicht klar ersichtlich ist, wie ein geplantes Objekt nach der Fertigstellung wirklich aussehen wird.

Virtual Reality unterstützt dabei, tief in Projekte einzutauchen und unterschiedliche Konstruktionsmöglichkeiten in der virtuellen Welt auszuprobieren, bevor Monate oder Jahre in den Bau investiert werden.



Abbildung 51: Multi-User Meeting zur Besprechung von BIM-Daten²⁵⁹

Speziell durch die Kombination von BIM und VR-Tools ergeben sich neue interessante Einsatzmöglichkeiten, durch die der Workflow von der Planung bis zum Bau effizienter gestaltet werden kann. So können zum Beispiel Meetings zwischen Architekten und Ingenieuren, welche BIM einsetzen, in der virtuellen Realität stattfinden, ohne die Notwendigkeit, dass alle Teilnehmer am selben Ort sind, siehe Abbildung 51. Dadurch wird der gesamte Informationsaustausch verbessert. Es können Aufgaben leichter koordiniert werden, Fragen in der Koordination besprochen, komplexe Systeme evaluiert und Kollisionen frühzeitig entdeckt werden.

Bei Victualic, dem, laut eigenen Angaben, führenden Hersteller von Kupplungen und Rohrverbindungs-lösungen, wird VR schon eingesetzt, um Konstruktionsprojekte schneller zu planen, zu designen und durchzuführen. Brandschutzsysteme und Rohrverbindungen können durch VR-Brillen so wahrgenommen werden, als wären sie tatsächlich schon installiert. Ein Anwendungsbeispiel ist in Abbildung 52 dargestellt.

Potenzielle Konflikte und notwendige Änderungen können somit schon während der Planungsphase von allen Projektbeteiligten leichter entdeckt und besprochen werden. Dadurch wird die Fehlkommunikation zwischen Designer, Konstrukteuren und Kunden reduziert, was zu einem schnelleren und präziseren Konstruktions- und

²⁵⁹ <https://integrations.bim360.autodesk.com/InsiteVR/InsiteVR/>.

Im Bereich der VR-Visualisierung von BIM-Daten wird gerade intensiv geforscht, da Schnittstellen noch nicht ausreichend vorhanden sind und die VR-Daten oft aufwändig manuell erstellt werden müssen. Zusätzlich muss die Darstellungsqualität weiter verbessert werden, um Abbildungen realitätsnäher darzustellen sowie Interaktionsmöglichkeiten, wie verschieben oder hinzufügen von Objekten, integriert werden. Abbildung 53 zeigt beispielhaft, aus welchen Komponenten ein System für solche Multi-User Meetings bestehen kann.^{261 262 263}



264 *Shi, Y. u. a., 2016., S.123*

Lehre²⁶⁵

Durch Lernfabriken wird es möglich, Methoden im Ingenieurwesen auf eine innovative und praxisbezogene Art zu vermitteln. Im Bereich der Fabrikplanung scheiterten physische Lernfabriken bisher allerdings an nur schwer und unter großem Aufwand realisierbaren Umsetzungs- und Evaluationsmöglichkeiten. An der TU Kaiserslautern wurde deshalb der Ansatz einer rein virtuellen Lernfabrik entwickelt, in der der gesamte Fabrikplanungsprozess digital abgebildet und didaktisch unterstützt wird.

Aufgrund der Einbindung vieler Projektbeteiligter und der konkurrierenden Zielgrößen im Fabrikplanungsprozess sowie der daraus resultierenden Komplexität, würde dies den Umfang eines klassischen Lernfabrikworkshops, welche in der Regel drei bis fünf Tage dauern, sprengen. Zusätzlich ist für die Umsetzung der Ergebnisse der Fabrikplanung oftmals eine tiefgreifende Änderung der Maschinen- und Betriebsmittelanordnung notwendig, was den Umsetzungsaufwand in einer physischen Modellfabrik unverhältnismäßig erhöhen würde. Aus der Notwendigkeit, Fabrikplaner trotzdem bestmöglich auszubilden, entstand die Idee einer rein virtuellen, VR-unterstützten Lernfabrik, siehe Abbildung 54.



Abbildung 54: Virtuelle Lernfabrik Kaiserslautern²⁶⁶

Ziel in der Lernfabrik ist es, ein komplettes Fabrikplanungsprojekt im industrienahen Maßstab inklusive der Realisierungsphase abzubilden. Dabei werden Analysen und Optimierungen direkt an einem bestehenden, virtuellen Fabrikmodell durchgeführt und anschließend VR-unterstützt evaluiert. Da keine physische, sondern eine rein virtuelle

²⁶⁵ Vgl. Weidig, C./Aurich, J. C., 2014., S.747-750

²⁶⁶ <https://idw-online.de/de/event60029>.

Modellfabrik betrachtet wird, ist es möglich, einen viel umfassenderen Fabrikbereich zu betrachten.

Darin können tiefgreifende und umfassende Änderungsvorschläge durchgeführt und bewertet werden, ohne einen aufwändigen Umbau der physischen Produktionsumgebung vorzunehmen. Der mögliche Lösungsraum kann durch frei wählbare Restriktionen beschränkt werden, wodurch theoretisch eine Vielzahl vorstellbarer Lösungsvorschläge virtuell umgesetzt und evaluiert werden können.

Der Fokus in der Lernfabrik Kaiserslautern liegt auf den Arbeitsabläufen in den beiden Phasen Grob- und Feinplanung. Im Gegensatz zu realen Fabrikplanungsprojekten, in denen häufig inkonsistente Daten aus verschiedenen Quellen zusammengetragen werden müssen, werden den Teilnehmern des Workshops als Informationsgrundlage die Ergebnisse der Zieldefinition sowie der Vorarbeiten inklusive einheitlicher, vollständiger und konkret abgegrenzter Rahmenbedingungen zur Verfügung gestellt.

In der Grob- und Feinplanung wird das Ziel verfolgt, ingenieurwissenschaftliche Methoden der VR-unterstützten, virtuellen Fabrikplanung anzuwenden und zu trainieren, siehe Abbildung 55. Es sollen kreative Lösungen unter Berücksichtigung unterschiedlichster Rahmenbedingungen und konkurrierender Zielgrößen erarbeitet werden.

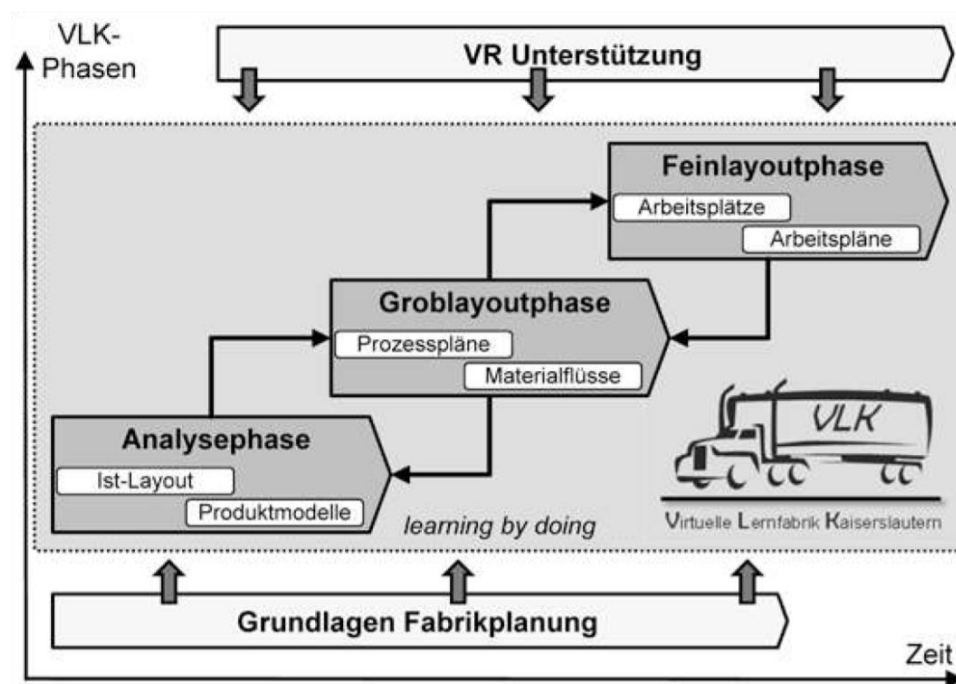


Abbildung 55: Phasen der virtuellen Lernfabrik Kaiserslautern²⁶⁷

Zum Abschluss werden die normalerweise in der Ausführungsplanung und der Ausführung umgesetzten Lösungsvorschläge VR-unterstützt in der CAVE evaluiert,

²⁶⁷ Weidig, C./Aurich, J. C., 2014., S.749

wodurch Aussagen über die Planungsqualität ohne den zeit- und kostenintensiven Aufbau einer physischen Modellfabrik getroffen werden können.

Da sich die virtuelle Lernfabrik schnell und flexibel anpassen lässt, soll diese in zukünftigen Projekten an Fragestellungen der Industrie angepasst werden. Dadurch soll analysiert werden, ob durch die unternehmensspezifische Anpassung an reale Fabrikplanungsprojekte die Aussagekraft und der Lerneffekt für die betreffenden Unternehmen gesteigert sowie die Einarbeitungszeit in eine Problemstellung reduziert werden kann.

Logistik^{268 269 270}

Auch im Bereich der Logistik ist die vermehrte Anwendung von Virtual Reality zu beobachten. Neben gängigen 3D-Planungssoftware-Herstellern, welche ihre Programme mit Add-ons erweitern, damit Modelle in der virtuellen Realität dargestellt werden können, bieten beispielsweise auch die beiden Flurförderfahrzeuge-Hersteller Jungheinrich und Hyster virtuelle Staplerfahrten an. Im Fokus aktueller Forschungen stehen die Ermittlung von Potentialen beim Einsatz von VR sowie die Weiterentwicklung heutiger VR-basierten Planungen logistischer Systeme.

Dabei ist die Anwendung eher in der Intra- beziehungsweise innerbetrieblichen Logistik sinnvoll, um verschiedene Layouts eines Produktionslogistiksystems oder Distributionszentrums zu visualisieren. In der Transport-, Beschaffungs- und Distributionslogistik geht man aktuell davon aus, dass es aufgrund der Weitläufigkeit im räumlichen Sinne und der Dimension der Planungsgegenstände keine sinnvollen Einsatzgebiete für Virtual Reality gibt.

Speziell in der Layoutplanung erhöht sich der Stellenwert von VR ständig, da diese Technik eine entscheidende Unterstützung in den Planungsphasen bieten kann. Durch die Visualisierung des aktuellen Planungszustandes und einer möglichen Interaktion mit diesem wird die Bewertung und Validierung vereinfacht und Verbesserungspotentiale können besser abgeleitet werden.

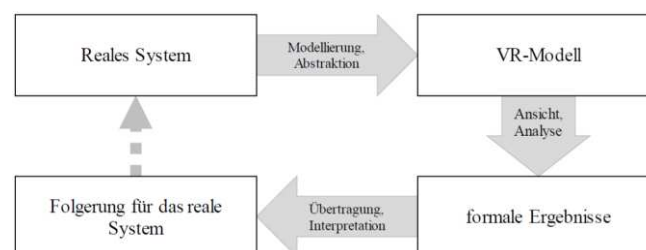


Abbildung 56: Regelkreis der VR-Visualisierung²⁷¹

²⁶⁸ Vgl. *Pfleger, D./Wehking, K.-H.*, 2017, S.1-5

²⁶⁹ Vgl. *Günthner, W.*, 2011., S.12-14

²⁷⁰ Vgl. *Goldhahn, L./Müller-Eppendorfer, K.*, 2017, S.233-235

²⁷¹ *Pfleger, D./Wehking, K.-H.*, 2017., S.2

In Abbildung 56 ist beispielhaft ein prinzipieller Ablauf einer VR-Visualisierung abgebildet, bei dem das reale beziehungsweise geplante System in ein VR-Modell überführt wird, welches zur Ansicht dient und in dem Analysen durchgeführt werden. Die daraus resultierenden Ergebnisse werden beurteilt und in das reale beziehungsweise zukünftige Modell übertragen.

Durch die Visualisierung komplexer Sachverhalte, die durch diese Vorgehensweise erreicht wird, kann die Planungsgeschwindigkeit, speziell beim Einsatz unerfahrener Mitarbeiter in der Planung, gesteigert werden. Diese erhalten dadurch einen intuitiven Zugang und können sich somit einen besseren und schnelleren Überblick über das Planungsproblem verschaffen. Weiters wird durch das immersive Eintauchen in das VR-Modell die Akzeptanz des Planungsergebnisses gesteigert.

Desweiteren können auch Systeme zur Materialbereitstellung mit VR-Modellen qualitativ hochwertiger und zielgenauer geplant werden, wodurch Planungsfehler frühzeitig erkannt oder gleich vermieden werden können. Um eine Planung mit virtueller Realität erfolgreich durchführen zu können, muss die Technik allerdings systematisch in den Planungsablauf integriert sein. Sinnvoll ist der Einsatz von VR dabei in der Analyse, der groben sowie der feinen Materialbereitstellungsplanung.

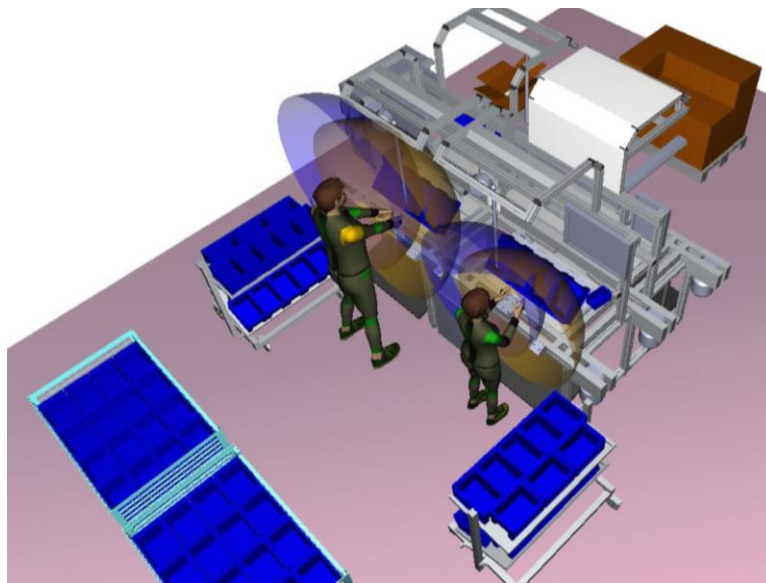


Abbildung 57: Darstellung der Greifbereiche²⁷²

Zusätzlich können in der virtuellen Welt Menschenmodelle verwendet werden, um Ergonomie-Analysen durchzuführen. Dadurch kann beispielsweise die Planung von Arbeitssystemen hinsichtlich der Anordnung und Bereitstellung von Paletten und Behältern an Arbeitsplätzen aus ergonomischen Gesichtspunkten überprüft werden, siehe Abbildung 57.

²⁷² Goldhahn, L./Müller-Eppendorfer, K., 2017., S.240

Gleichzeitig kann die VR-Anwendung als Basis für den Aufbau einer Kooperations- und Kommunikationsplattform zur interdisziplinären Planung verwendet werden, welche das direkte oder indirekte Zusammenarbeiten unterstützt. Speziell bei dem komplexen und stark interdisziplinären Fabrikplanungsprozess, bei dem Produktionsplaner, Logistikplaner, Bauingenieure, Architekten etc., beteiligt sind, könnte dadurch die Zusammenarbeit sowie der Informationsaustausch verbessert werden.

Schulungen^{273 274 275 276 277}

Die Weiterentwicklung der Belegschaft stellt für Unternehmen eine immer wichtigere Aufgabe dar. Werden neue Arbeitssysteme ein- beziehungsweise Änderungen an bestehenden Arbeitsplätzen durchgeführt, steigt meistens zugleich der Qualifizierungsbedarf der Mitarbeiter. Damit die Optimierungspotentiale neuer Systeme bestmöglich genutzt werden können, ist es notwendig, die Qualifizierung so zu organisieren, dass tatsächlich Wettbewerbsvorteile entstehen. Virtuelle Realität eignet sich insofern als Schulungsmedium, da dadurch die reale Welt kostengünstig nachgebildet werden kann und darin ohne Sicherheitsrisiko Schulungen durchgeführt werden können.

Durch eine gewisse Aufbereitung können die in der Planung erstellten Modelle auch dazu genutzt werden, um bereits vor der Realisierung Schulungen durchzuführen. Durch sogenannte Operational-Training-Simulatoren kann das Personal gefahrlos und kostengünstig, da keine realen Ressourcen belegt werden, trainiert werden. In der virtuellen Umgebung kann der Trainee räumlich explorieren, sich motorische Fähigkeiten aneignen und prozedural lernen. Zu diesem Zweck können im VR-Modell die folgenden vier Wissensarten abgebildet werden:

- Positionswissen („Wo ist was?“)
- Strukturwissen („Was hängt womit zusammen?“)
- Verhaltenswissen („Wie verhält sich das System? Wie verhalte ich mich?“)
- Prozedurwissen („Welche Aktion löst was aus?“)

Bei Jungheinrich, dem Hamburger Intralogistikanbieter, wurde bereits ein Training Center eingerichtet, in dem Kundendiensttechniker aus ganz Europa aus- und weitergebildet werden. Dazu werden sie während des VR-Trainings in eine virtuelle

²⁷³ Vgl. <https://www.jungheinrich.com/presse-events/pressemitteilungen/virtual-reality-training-von-jungheinrich-mit-immersive-learning-award-ausgezeichnet-327034>.

²⁷⁴ Vgl. Günthner, W., 2011., S.10-11

²⁷⁵ Vgl. Pfleger, D./Wehking, K.-H., 2017., S:1-2

²⁷⁶ Vgl. Runde, C./Cannarozzi, M., 2016., S.184-185

²⁷⁷ Vgl. Bracht, U./Schlegel, M., 2018., S.255

Lagerumgebung versetzt, in der sämtliche Jungheinrich Fahrzeuge in unterschiedlichen Arbeitssituationen abgebildet werden können, siehe Abbildung 58.

So können, ohne Sach- oder Personenschäden zu riskieren, die verschiedensten Einsatzszenarien in einem sicheren Umfeld trainiert werden. In der virtuellen Welt, welche vollkommen real scheint, können Jungheinrich Fahrzeuge von allen Seiten betrachtet, Funktionen bedient, ins Innere geblickt sowie mit passenden Werkzeugen Reparaturen vorgenommen werden. Dabei sind sämtliche Fahrzeugkomponenten einzeln demontierbar und auch logistische Funktionen und Abläufe sind realitätsnah erlebbar.

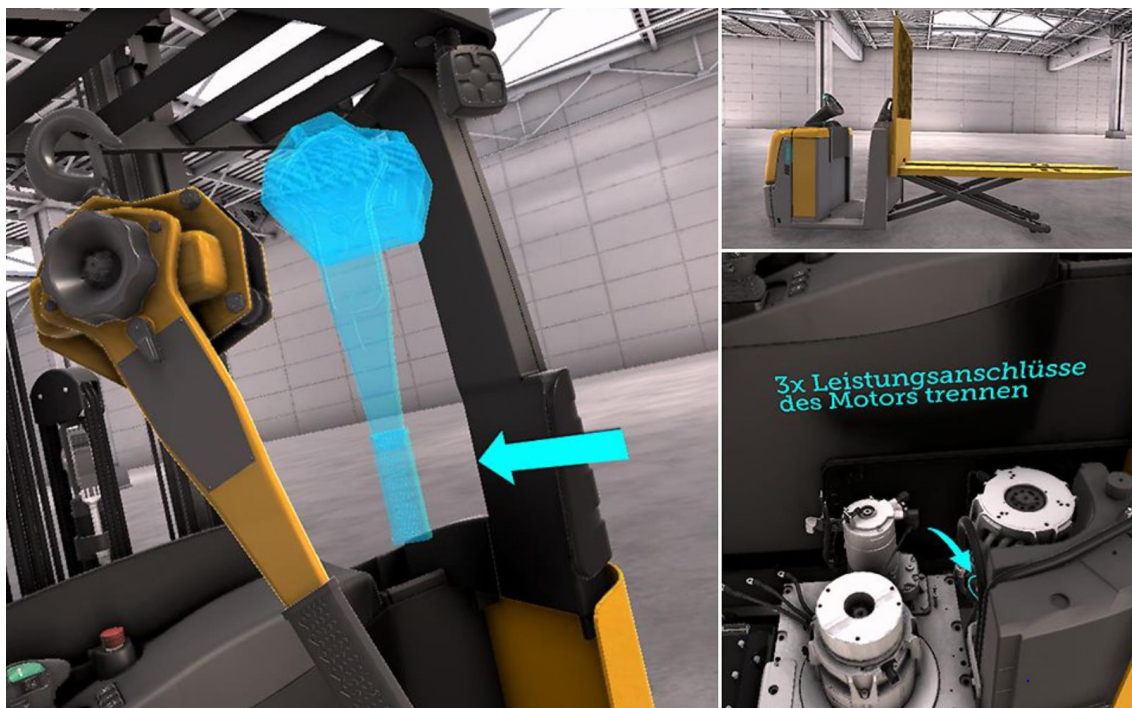


Abbildung 58: VR-Training Center Jungheinrich²⁷⁸

Erfahrungen von Jungheinrich haben gezeigt, dass zuvor im VR-Training erlernte Handgriffe später in der realen Anwendung deutlich besser und mit viel geringeren Fehlerquoten ausgeführt werden.

4.2 Aktuelle Grenzen und Schwachstellen der Technologie

In diesem Absatz werden kurz die in der Praxis am häufigsten vorkommenden Probleme von Virtual Reality thematisiert. Für eine detaillierte Analyse von weiteren Problemen, speziell hinsichtlich der Wahrnehmung in der virtuellen Welt, wird die in diesem Unterkapitel zitierte Literatur empfohlen.

²⁷⁸ <https://www.jungheinrich.com/presse-events/pressemitteilungen/virtual-reality-training-von-jungheinrich-mit-immersive-learning-award-ausgezeichnet-327034>.

Hardwareanforderungen ^{279 280}

Die Stabilität spielt bei Virtual Reality Anwendungen eine sehr große Rolle. Bei einem normalen Computerbildschirm fällt es beispielsweise nicht sofort auf, wenn die Frames per Second für kurze Zeit unter 60 fallen. Bei VR-Brillen hingegen sollten, für optimale Immersion, 90 fps erreicht werden, weswegen viele Hersteller wie HTC, Oculus oder auch Windows für volle VR-Kompatibilität sehr hohe Anforderungen an die empfohlene Hardware stellen.

	Windows Mixed Reality	Windows Mixed Reality Ultra
Betriebssystem	Windows 10 Fall Creators Update oder höher	Windows 10 Fall Creators Update oder höher
Prozessor	Intel® Core™ i5 7200U (7. Generation Mobile), Dual Core mit aktivierter Intel® Hyperthreading-Technologie oder höher AMD Ryzen 5 1400 3,4 GHz (Desktop), Quad Core oder höher	Intel® Core™ i5 4590 (4. Generation Desktop), Quad-Core oder höher AMD Ryzen 5 1400 3,4 GHz (Desktop), Quad Core oder höher
RAM	8 GB DDR3 Dual Channel	8 GB DDR3 oder höher
Speicherplatz	10 GB	10 GB
Grafikkarte	Kompatible GPUs: • Integrierte Intel HD Graphics 620- oder höhere DX12-fähige integrierte GPU • Nvidia MX150 separate GPU • Nvidia GeForce GTX 1050 separate GPU • Nvidia 965M separate GPU • AMD Radeon RX 460/560 Hinweis: Ältere Intel-GPUs wie HD Graphics 4xx, 5xx, 2xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx und 6xxx werden nicht unterstützt.	Kompatible GPUs: • NVidia Geforce GTX 1060 oder höhere DX12-fähige separate GPU • AMD Radeon RX 470/570 oder höhere DX12-fähige separate GPU
Grafiktreiber	Windows Display Driver Model (WDDM) 2.2	Windows Display Driver Model (WDDM) 2.2
Grafikanzeigeport	HDMI 1.4 oder DisplayPort 1.2	HDMI 2.0 oder DisplayPort 1.2
Monitor	Externer oder integrierter VGA-Monitor (800x600)	Externer oder integrierter VGA-Monitor (800x600)
USB-Typ	USB 3.0 Typ-A oder Typ-C	USB 3.0 Typ-A oder Typ-C
Bluetooth-Typ (für Controller)* * Einige Headsets verfügen über integrierte Bluetooth-Funktionen. In diesem Fall ist Bluetooth 4.0 nicht auf dem PC erforderlich.	Bluetooth 4.0	Bluetooth 4.0

Abbildung 59: Hardwareanforderungen Windows Mixed Reality²⁸¹

Abbildung 59 zeigt beispielsweise die Anforderungen für WMR (60 fps) und WMR-Ultra (90 fps). Darin ist ersichtlich, dass speziell die für WMR-Ultra erforderliche Grafikkarte in keinem Standard-Notebook verbaut ist. Bei geringerer Rechnerleistung ist eine Verwendung häufig trotzdem möglich, es kann allerdings zu einer eingeschränkten VR-Erfahrung kommen. Für den Fall, dass die Frames per Second unter 90 fallen, besitzen die meisten VR-Brillen zwar eine technische Funktion

²⁷⁹ Vgl. *Neugebauer, R.*, 2018., S.40

²⁸⁰ Vgl. *Korgel, D.*, 2018., S.27

²⁸¹ <https://support.microsoft.com/de-de/help/4039260/windows-10-mixed-reality-pc-hardware-guidelines>.

namens Timewarp, die einen kurzzeitigen fps-Abfall abfangen kann, diese funktioniert allerdings nicht immer zuverlässig.

Obwohl die Leistungsfähigkeit moderner Grafikkarte konstant wächst, stellt die Visualisierung von massiven 3D-Datensätzen eine nicht zu unterschätzende Herausforderung dar. Da dieses Problem nicht nur durch mehr Grafikkartenspeicher und eine höhere Geschwindigkeit der Rasterisierung gelöst werden kann, muss zusätzlich auch die Software stetig weiterentwickelt werden. So sollen beispielsweise anstelle der hochkomplexen Geometrien nur deren Hüllkörper visualisiert werden.

Cybersickness, Simulator-Sickness^{282 283 284}

Cyber- oder Simulator-Sickness ist eine Form der Motion-Sickness und beschreibt ein durch die simulierte Umgebung verursachtes Unwohlsein. Diese Simulator-Sickness entsteht, wenn Reize, die der Mensch aus verschiedenen Sinnesmodalitäten über seine Lage im Raum erhält, nicht übereinstimmen. Verantwortlich dafür können viele Dinge sein, die oft auch nur unterbewusst wahrgenommen werden.

Eine der häufigsten Ursachen ist jedoch, dass über die VR-Brille simuliert wird, dass man sich bewegt und dieses Signal wird auch von den Augen an das Gehirn gesendet. Der Gleichgewichtssinn jedoch meldet dem Gehirn, dass man aktuell steht oder sitzt. Also genau das Gegenteil was vielen Menschen beim Lesen während einer Autofahrt passiert. Diese widersprüchlichen Signale können die Ursache für Übelkeit, erhöhten Speichelfluss, Benommenheit, Schwindelgefühl oder sogar Erbrechen sein.

Werden Brillen aus der aktuellen VR-Generation verwendet, ist die Wahrscheinlichkeit bereits viel geringer, eine Cybersickness zu spüren. Trotzdem sollte darauf geachtet werden, die Diskrepanz zwischen simulierter und empfundener Bewegung möglichst gering zu halten. Dadurch wird auch deutlich, wie wichtig eine geringe Latenz in der virtuellen Welt ist: Folgt das Bild in VR den Kopfbewegungen nur mit starker Verzögerung, tritt die Simulator Sickness auch bei ansonsten unempfindlichen Usern auf.

Grundsätzlich sollte auch darauf geachtet werden, VR-Sessions am Anfang nicht zu lange zu gestalten, damit sich die Nutzer langsam an diese Erfahrung gewöhnen können und die Dauer erst mit der Zeit steigern.

²⁸² Vgl. Korgel, D., 2018., S.26

²⁸³ Vgl. Pfleger, D./Wehking, K.-H., 2017., S.2

²⁸⁴ Vgl. Conradi, J./Alexander, T., 2013., S.2-3

Displayauflösung, Fliegengitter-Effekt²⁸⁵

Der erste Development Kit von Oculus hatte nur eine Auflösung von 1280x720 Pixel, was 640x720 Pixel pro Auge entspricht. Bei einer so geringen Pixeldichte ist ein feines Gitter sichtbar, das sich durch das gesamte Bild zieht und es scheint so, als würde man durch ein Fliegengitter aus einem Fenster schauen. Dieses wird durch sichtbare Abstände zwischen den einzelnen Pixeln des Displays hervorgerufen.

Bei der neuesten Generation von VR-Brillen kann man einzelne Pixel kaum mehr erkennen. Dies liegt zum einen an der deutlich höheren Auflösung (Oculus 2160x1200 Pixel) und zum anderen an Tricks, die von Herstellern angewendet werden. Trotz allem ist die Auflösung des Displays noch nicht hoch genug, da man speziell kleine Objekte mit vielen Details, die in einer gewissen Entfernung stehen, oft nur schlecht erkennen kann.

Bullaugen-Effekt, Field of View²⁸⁶

Das menschliche Auge hat normalerweise ein Sichtfeld von ungefähr 180°. Speziell ältere und günstige VR-Brillen haben allerdings ein sehr eingeschränktes Sichtfeld, auch Field of View genannt, das nur 30-40° beträgt, zum Beispiel der Zeiss Cinemizer OLED.

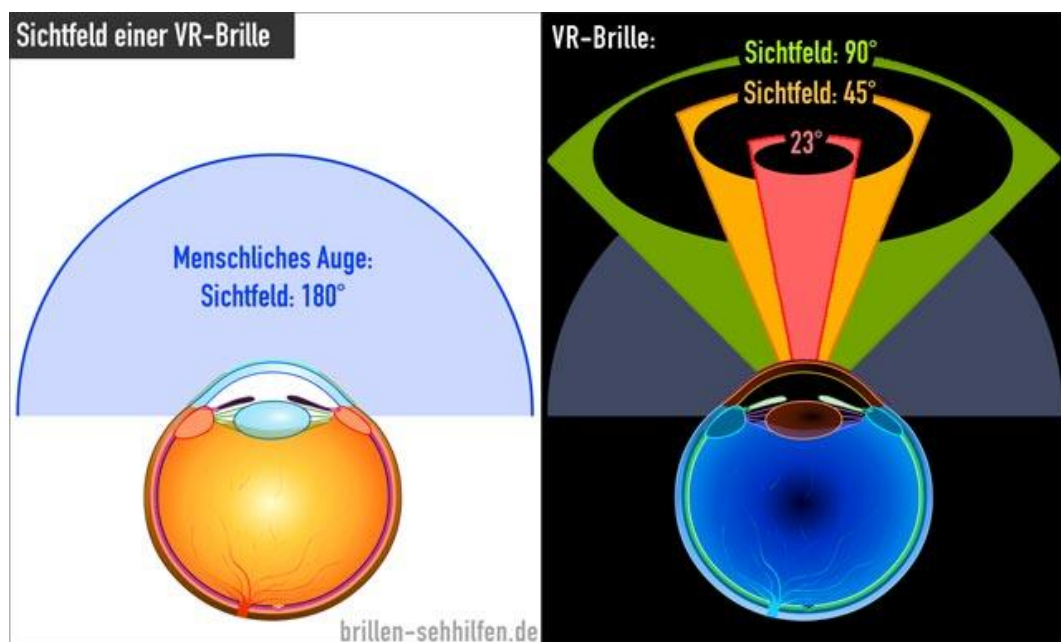


Abbildung 60: Field of View²⁸⁷

²⁸⁵ Vgl. Korgel, D., 2018., S.26

²⁸⁶ Vgl. <https://www.brillen-sehhilfen.de/vr-brillen/funktionsweise-vr-brille.php>.

²⁸⁷ <https://www.brillen-sehhilfen.de/vr-brillen/funktionsweise-vr-brille.php>.

Deshalb hat sich der Begriff Bullaugen-Effekt etabliert, da immer ein schwarzer Rand im Bild zu sehen war, so als würde man bei einem Kreuzfahrtschiff aus den sehr kleinen Bullaugen hinausblicken.

Durch ständige Entwicklungen in diesem Bereich erreichen moderne VR-Brillen ein Field of View von ungefähr 110° , wodurch der Bullaugen-Effekt nahezu verschwunden beziehungsweise nicht mehr störend ist. Aktuelle Entwicklungstendenzen lassen vermuten, dass die nächste Generation von VR-Brillen, neben einer höheren Displayauflösung, auch über ein noch größeres Sichtfeld verfügen wird.

4.3 Vergleich der verfügbaren VR-Hardware

Im nächsten Schritt wird ein geeignetes Head Mounted Display ausgewählt, mit dem die in Kapitel 6 entwickelten Vorgehensmodelle getestet werden. Obwohl diese für möglichst viele am Markt verfügbaren HMD Gültigkeit haben sollten, wird aus Kostengründen nur mit einer VR-Brille getestet. Prinzipiell funktionieren aber alle entwickelten Modelle zumindest für die gängigsten HMD von HTC, Oculus und Windows Mixed Reality.

	Kosten	Transportabilität/Einrichtungsaufwand	Systemstabilität	Gewicht	Software	Field of View	Display Auflösung	Mindestanforderungen PC	Menge Verbindungskabel	Lieferkonditionen	verfügbare Apps	Foren, Unterlagen etc.	Controller	Summe	Rang		Gewichtung
Kosten	0	0	1	1	1	0	0	0	1	2	2	0	1	8	9	0,05298013	5,30%
Transportabilität/Einrichtungsaufwand	2	1	2	2	1	0	1	2	2	2	1	1	17	5	0,11258278	11,26%	
Systemstabilität	2	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	20	1	0,13245033	13,25%	
Gewicht	1	0	0	1	0	0	0	1	2	2	1	1	9	7	0,05960265	5,96%	
Software	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	5	11	0,03311258	3,31%	
Field of View	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	20	1	0,13245033	13,25%	
Display Auflösung	2	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	20	1	0,13245033	13,25%	
Mindestanforderungen PC	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	20	1	0,13245033	13,25%	
Menge Verbindungskabel	1	0	0	1	1	0	0	0	2	2	0	0	7	10	0,04635762	4,64%	
Lieferkonditionen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	12	0,01324503	1,32%	
verfügbare Apps	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	13	0,00662252	0,66%	
Foren, Unterlagen etc.	2	1	0	1	1	0	0	0	2	2	2	2	13	6	0,08609272	8,61%	
Controller	1	1	0	1	1	0	0	0	2	1	2	0	9	7	0,05960265	5,96%	

Tabelle 11: paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien

Dazu werden zuerst Bewertungskriterien definiert, welche mit dem paarweisen Vergleich, wie in Tabelle 11 dargestellt, gewichtet werden. Anschließend werden alle notwendigen Daten recherchiert und in Tabellen zusammengefasst, um daraus mit einer Nutzwertanalyse das am besten geeignete Headset ermitteln zu können.

	HTC Vive	Oculus Rift	Lenovo Explorer
Kosten	599,00 €	399,00 €	289,90 €
Transportabilität/ Einrichtungsaufwand	Zusätzlicher Transport und Einrichtung der Basisstationen inkl. Stativ	Zusätzlicher Transport und Einrichtung der Sensoren	Durch das Inside-Out Tracking ist kein Transport/ Einrichtung zusätzlicher Elemente notwendig
Systemstabilität	Laut Testberichten und Foren höchste Stabilität	Laut Testberichten und Foren höchste Stabilität	Bei diesem HMD wurde von seltenen Tracking-Ausfällen berichtet aufgrund des Inside Out-Trackings
Gewicht	561g	470g	380g
Software	Viveport Desktop App	Oculus App	Windows Mixed Reality Portal
Field of View	110°	110°	110°
Display Auflösung	2160x1200 Pixel	2160x1200 Pixel	2889x1440 Pixel
Mindestanforderungen PC	Hat laut Herstellerangaben und Systemtests geringere Mindestanforderungen an Hardware als HTC, aber höhere als WMR	Hat laut Herstellerangaben und Systemtests die höchsten Mindestanforderungen an die Hardware	Hat laut Herstellerangaben und Systemtests die geringsten Mindestanforderungen an die Hardware
Menge Verbindungskabel	5	5	2
Lieferkonditionen	Kostenloser Versand und Rückgabe, sofort verfügbar	Kostenloser Versand und Rückgabe, sofort verfügbar	Kostenloser Versand und Rückgabe, sofort verfügbar
Verfügbare Apps	Aktuell noch nicht so viele Apps verfügbar	Größte Anzahl an verfügbaren Apps	Aktuell noch nicht so viele Apps verfügbar
Foren, Unterlagen, etc.	Viele Foren und Unterlagen online verfügbar, weil HMD sehr verbreitet	Viele Foren und Unterlagen online verfügbar, weil HMD sehr verbreitet	Nicht so viele Foren und Unterlagen online verfügbar, weil HMD noch nicht so verbreitet
Controller	Laut Produkttests ist die Verarbeitung und Stabilität der Controller nicht so gut wie bei Oculus	Laut Produkttests die besten und zuverlässigsten Controller	Laut Produkttests können in gewissen Situationen Tracking-schwierigkeiten und Verbindungsprobleme auftreten

Tabelle 12: Bewertung der VR Headsets

Die in Tabelle 12 gesammelten, aus diversen Datenblättern und einer Internetrecherche stammenden Informationen, spiegeln die wichtigsten Daten der drei gängigsten VR-Headsets wider. Aufbauend auf diesen Informationen wurde die in Tabelle 13 abgebildete Nutzwertanalyse von verfügbaren Head Mounted Displays durchgeführt.

Aus dieser ging das Windows Mixed Reality Headset „Lenovo Explorer“ als Sieger hervor, weshalb dieses angeschafft und für Tests und die Vorstellung von Use Cases eingesetzt wird. Aufgrund der schnellen und rasanten Entwicklungen im Bereich der VR-Headsets sowie der eingeschränkten Verfügbarkeit von leistungsstarken Rechnern im Rahmen dieser Arbeit stellt diese Nutzwertanalyse natürlich keine allgemeingültige Empfehlung dar, sondern vielmehr nur eine sinnvolle Wahl entsprechend den Rahmenbedingungen dieser Arbeit und Berücksichtigung der aktuellen Leistungsdaten der HMD's.

Nutzwertanalyse VR-Headsets		HTC VIVE		Oculus Rift		Windows Mixed Reality Headsets (Lenovo)	
Kriterium	Gewichtung	Rang	Punkte	Rang	Punkte	Rang	Punkte
Kosten	5,30%	3	0,159	2	0,106	1	0,053
Transportabilität/Einrichtungsaufwand	11,26%	3	0,338	2	0,225	1	0,113
Systemstabilität	13,25%	1	0,132	1	0,132	3	0,397
Gewicht	5,96%	3	0,179	2	0,119	1	0,060
Software	3,31%	1	0,033	1	0,033	1	0,033
Field of View	13,25%	1	0,132	1	0,132	1	0,132
Display Auflösung	13,25%	2	0,265	2	0,265	1	0,132
Mindestanforderungen PC	13,25%	2	0,265	3	0,397	1	0,132
Menge Verbindungskabel	4,64%	2	0,093	2	0,093	1	0,046
Lieferkonditionen	1,32%	1	0,013	1	0,013	1	0,013
verfügbare Apps	0,66%	2	0,013	1	0,007	2	0,013
Foren, Unterlagen etc.	8,61%	1	0,086	1	0,086	3	0,258
Controller	5,96%	2	0,119	1	0,060	2	0,119
Summe			1,82781457		1,66887417		1,50331126

Tabelle 13: Nutzwertanalyse VR Headsets

5 Visualisierung in der Fabrikplanung

Mit zunehmender Rechnerunterstützung in der Fabrikplanung veränderte sich auch der Planungsprozess. Tabellenkalkulationen, Software zur Prozessmodellierung, Simulationsmodelle und digitale 2D-Planung von Layouts sind schnell zu beliebten Werkzeugen für die Planungsingenieure geworden, siehe Abbildung 61.

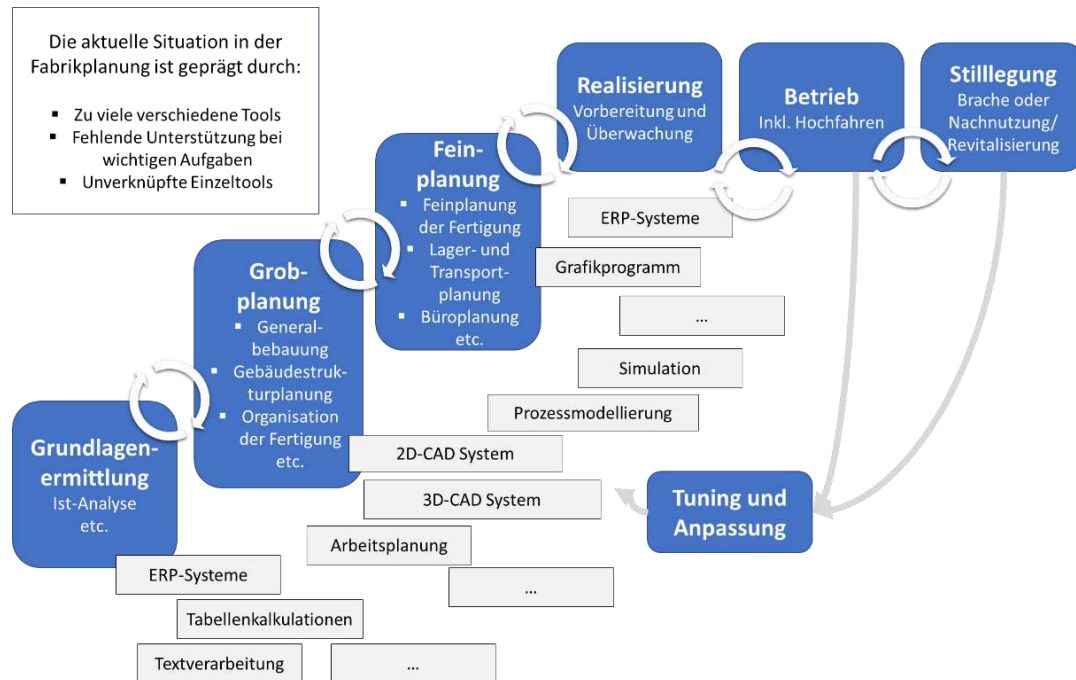


Abbildung 61: Rechnerunterstützung in der Fabrikplanung (eigene Darstellung)²⁸⁸

Mit steigender Leistung der Rechner und der Grafikkarten wurde auch die dreidimensionale Visualisierung von Fabriklayouts und Arbeitsplätzen möglich. Es entstanden viele Tools, die eine synchrone 2D- und 3D-Planung der Fabrik ermöglichen und für die dreidimensionale Visualisierung geeignete Modelle lieferten. Ein wesentliches Problem all dieser Werkzeuge ist, dass sie nicht miteinander verknüpft sind und viele Schnittstellen für den Datenaustausch, die häufig vorhanden sind, manuell angepasst werden müssen.²⁸⁹

Da VR und Visualisierung auf bestem Weg dazu sind, etablierte Werkzeuge im Fabrikplanungsprozess zu werden, sollten weitere komplizierte Schnittstellen und unnötige Datenaustauschformate mit VR-spezifischer Software vermieden werden.²⁹⁰

Im folgenden Abschnitt werden die aktuell im Einsatz befindlichen Softwarepakete GrAPPA, Vistable Touch und Plant Simulation kurz vorgestellt, da diese auch dazu verwendet werden können, die für die VR-Visualisierung notwendigen 3D-Daten zu

²⁸⁸ Vgl. Dombrowski, U./Marx, S., 2018., S.72

²⁸⁹ Vgl. Dombrowski, U./Marx, S., 2018., S.72

²⁹⁰ Vgl. Gausemeier, J./Grafe, M./Meyer auf der Heide, F., 2015., S.141

erstellen. Zusätzlich wird in dieser Arbeit auch noch der Einsatz von Autodesk Factory Design Utilities zur Erstellung der Modelldaten geprüft, weshalb auch dieses Plugin für AutoCad und Inventor kurz erläutert wird.

5.1 GrAPPA

Der Graphische Anlagen- und Produktlinien-Planungs-Assistent, kurz GrAPPA genannt, ist eine Anwendung, die von den beiden Fraunhofer Austria Geschäftsbereichen Visual Computing und Produktions- und Logistikmanagement entwickelt wurde, um Ingenieuren die Planungsarbeit zu erleichtern. GrAPPA macht es möglich, mehrere Aufgaben, wie beispielsweise die 2D- und 3D-Planung verschiedener Varianten sowie eine Materialflussanalyse inklusive der Berechnung von Transportaufwänden und -intensitäten in einem Tool zu erledigen.

Die Software ist dabei für die Planung großer Fabrikhallen und auf dementsprechend große Datenmengen ausgelegt. In Abbildung 62 ist der Startbildschirm eines neuen Projektes in GrAPPA dargestellt.

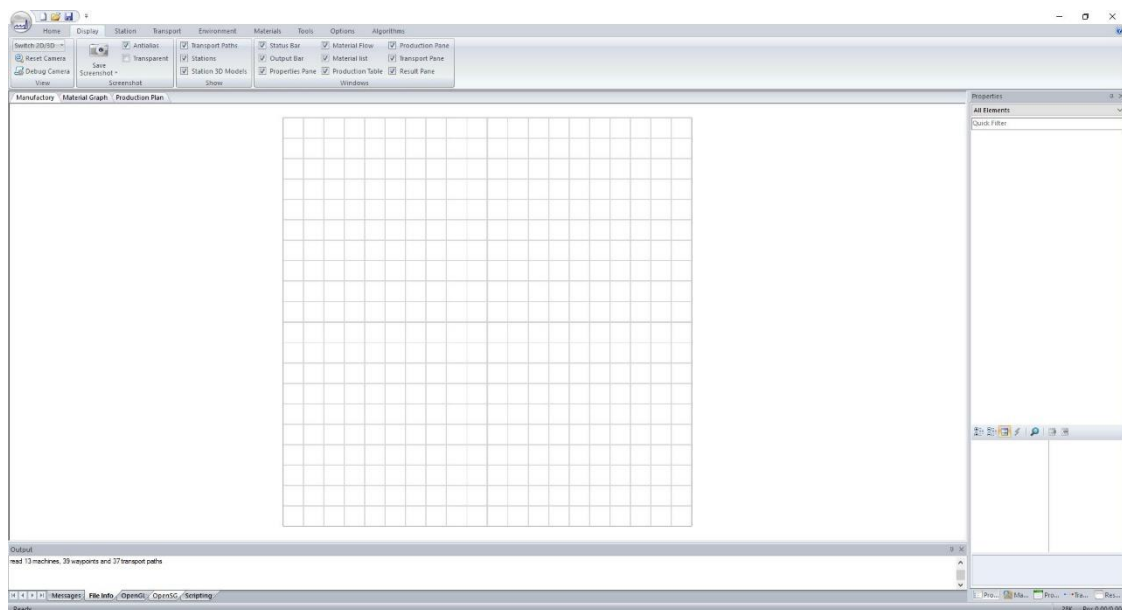


Abbildung 62: GrAPPA

Zu den Funktionen von GrAPPA gehören unter anderem:

- Planen von Produktionsanlagen in Fabriken ohne zusätzliche Berechnungsprogramme
- Bündelung aller Kernfunktionen der bisher verteilten Planungswerkzeuge
- Planung von Fabriken im zwei- und dreidimensionalen Raum
- Anpassung von Algorithmen oder Integrierung von eigenen Berechnungen dank einfach zu erlernender Scriptsprache
- Berechnung von Transportaufwand und -intensität

- Aufspüren von Schwachstellen und Engpässen im Transportweg
- Darstellung von unterschiedlichen Transportszenarien

In Abbildung 63 ist die 2D-Ansicht eines Beispielprojektes in GrAPPA abgebildet. Die blauen Pfeile stellen darin die Materialflüsse zwischen den einzelnen Stationen dar und können beispielsweise über ein Excel File importiert werden.

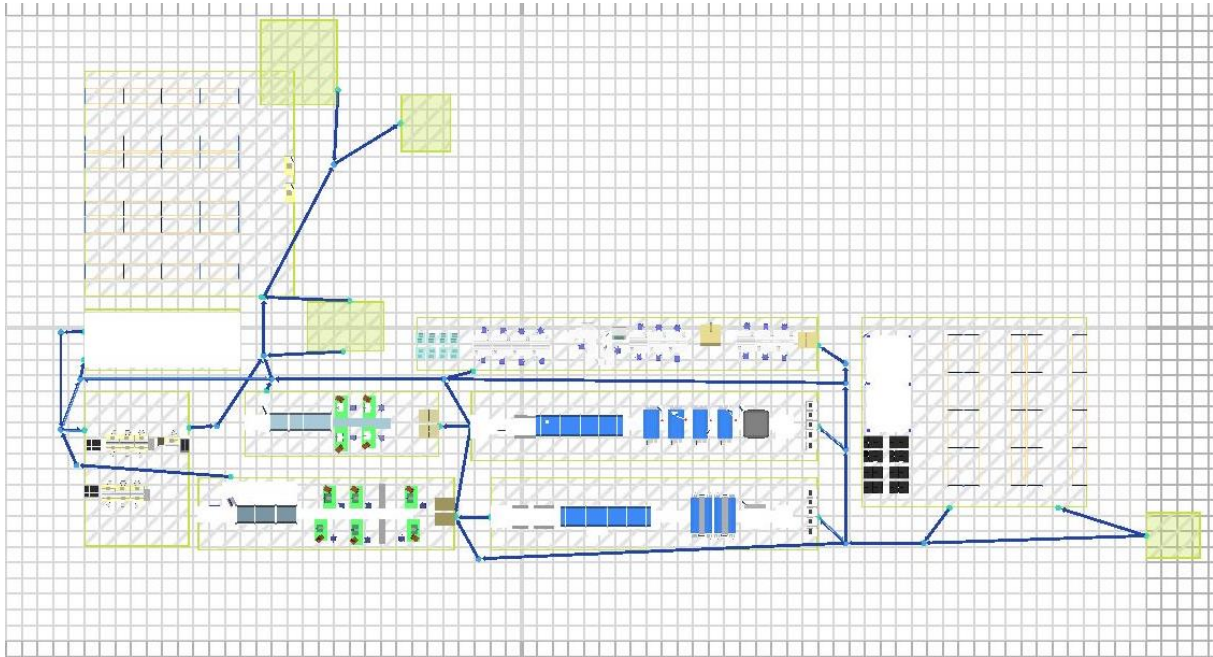


Abbildung 63: 2D-Beispiel Grappa

Die 3D-Ansicht in Abbildung 64 wird automatisch mit der 2D-Ansicht synchronisiert und die Materialflüsse werden dort ebenfalls angezeigt. CAD Modelle können einfach importiert werden und werden automatisch in die definierte Größe der Blöcke übertragen.

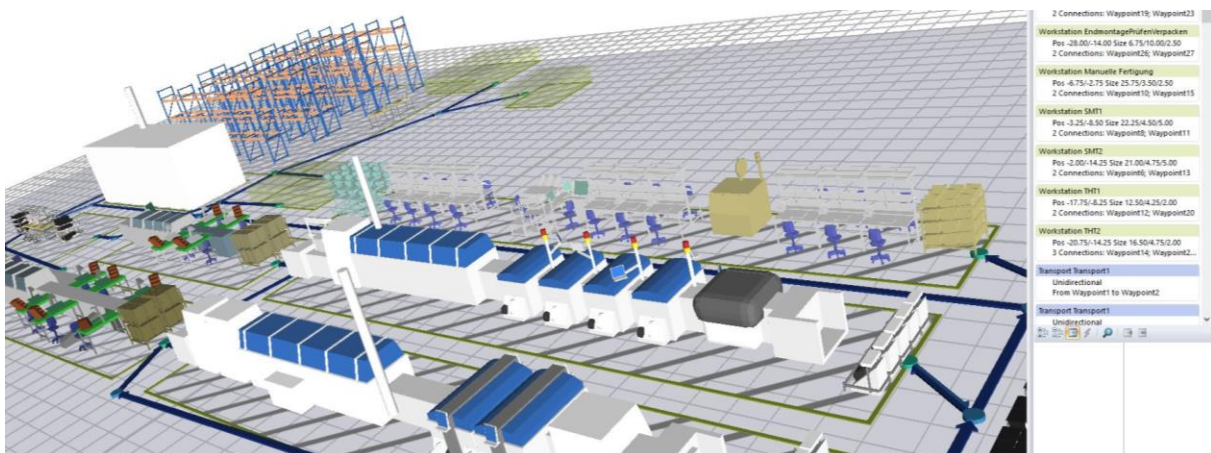


Abbildung 64: 3D-Beispiel Grappa

5.2 Vistable

Vistable Touch ist eine Software, die von der deutschen Firma Plavis entwickelt wurde und unter anderem zur Werks- und Layoutplanung, zur Materialflussanalyse, zur Prozessoptimierung in der Logistik sowie zur Montageplanung eingesetzt werden kann.

In der in Abbildung 65 dargestellten 2D-Ansicht können Objekte aus der rechts dargestellten Modellbibliothek einfach per Drag&Drop in das Layout gezogen werden.

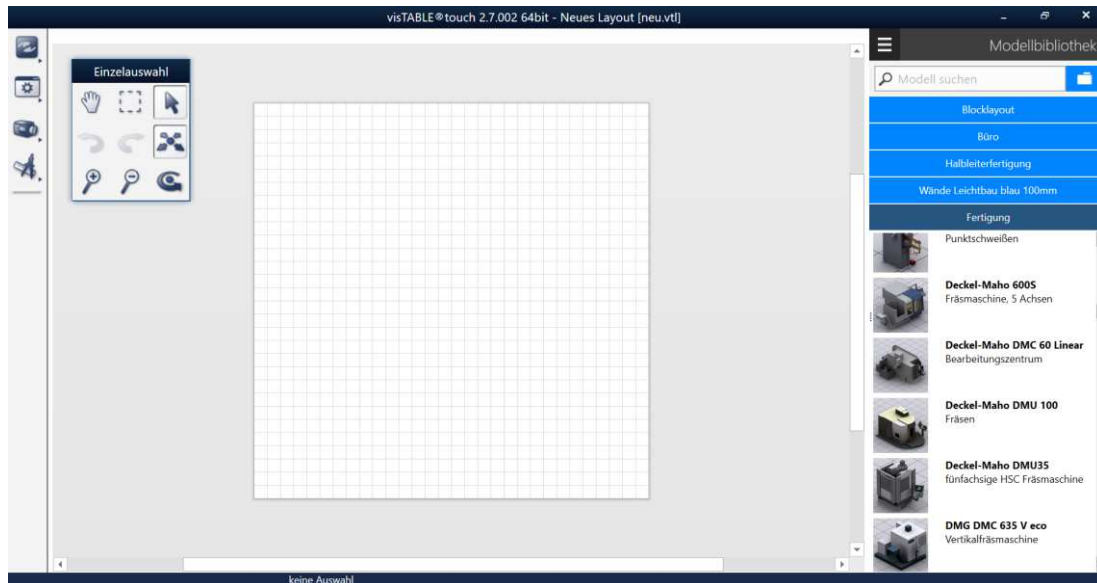


Abbildung 65: Vistable Touch

Dieses in der 2D-Ansicht geplante Layout wird synchron in dem in Abbildung 66 dargestellten 3D-Viewer von Vistable, in dem man sich mit der Maus beliebig bewegen kann, visualisiert.

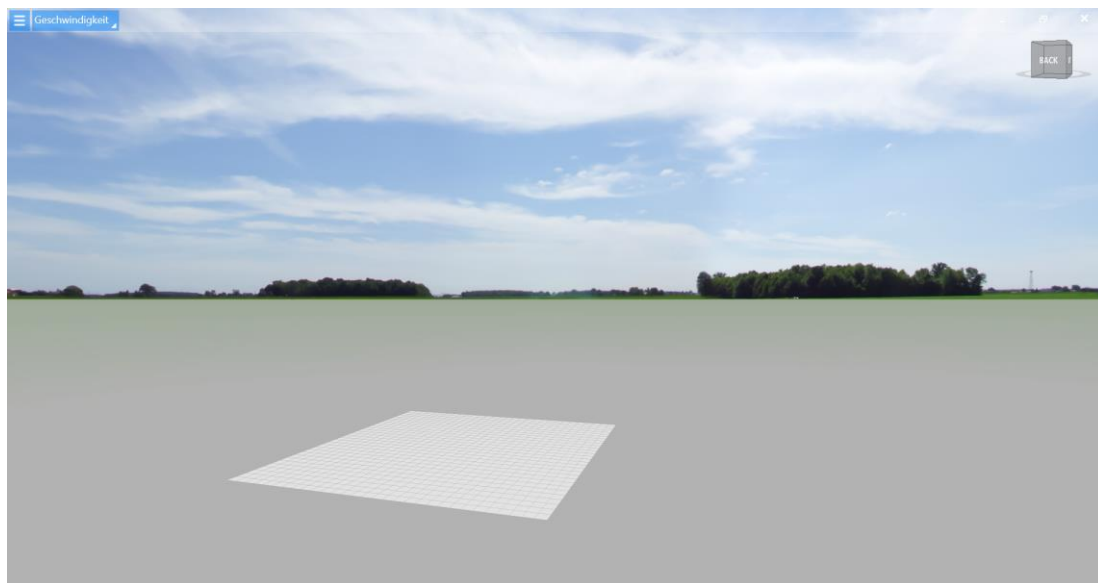


Abbildung 66: 3D-Viewer Vistable

Zum Leistungsumfang von Vistable gehören unter anderem:

- Materialflüsse und Transportwege
- Echtzeit Sankey Darstellung im Layout
- Analyse und Optimierung von Materialflüssen
- Optimierung des Layouts
- Echtzeit 3D-Visualisierung
- Bemaßung und Vermessen
- Erweiterbare Modellbibliothek (standardmäßig 1500 Modelle)

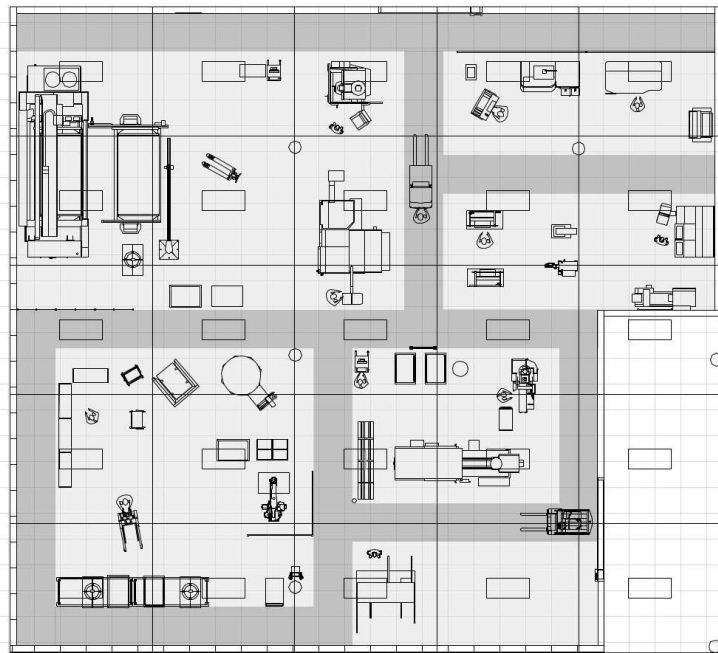


Abbildung 67: 2D-Beispiel Vistable Touch

In Abbildung 67 beziehungsweise Abbildung 68 ist eine Beispielfabrik in der 2D/3D-Ansicht dargestellt. Änderungen, die im 2D-Layout durchgeführt werden, können ohne Zeitverzögerung in der 3D-Ansicht betrachtet werden.



Abbildung 68: 3D-Beispiel Vistable Touch

5.3 Plant Simulation

Plant Simulation zählt, gemeinsam mit den Produkten der Digitalen Fabrik und des Digital Manufacturing, zu den Product-Lifecycle-Management Produkten, welche aktuell von Siemens weiterentwickelt und vertrieben werden.

Eingesetzt wird diese Software zur Simulation, Analyse, Visualisierung und Optimierung von Produktionsprozessen, Materialflüssen und logistischen Abläufen.

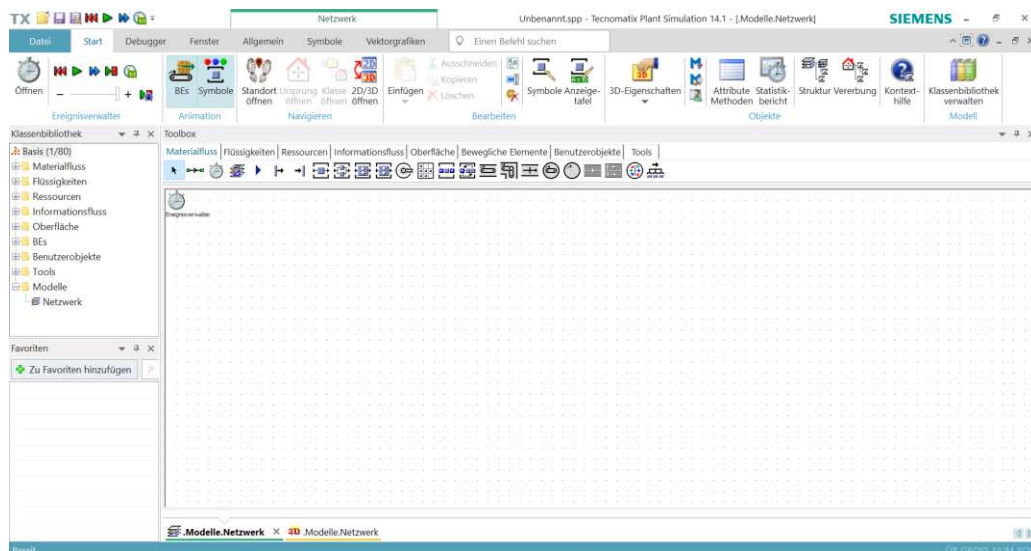


Abbildung 69: Plant Simulation - 2D Ansicht

Die Ansichten in Abbildung 69 und Abbildung 70 erinnern stark an eine Programmier-Umgebung und lassen schon vermuten, dass Siemens den Schwerpunkt bei Plant Simulation auf die Simulation und Analyse von Produktionsabläufen und ähnliche Aufgaben gelegt hat und nicht auf die Erstellung von 2D- und 3D-Layouts von Fabriken.

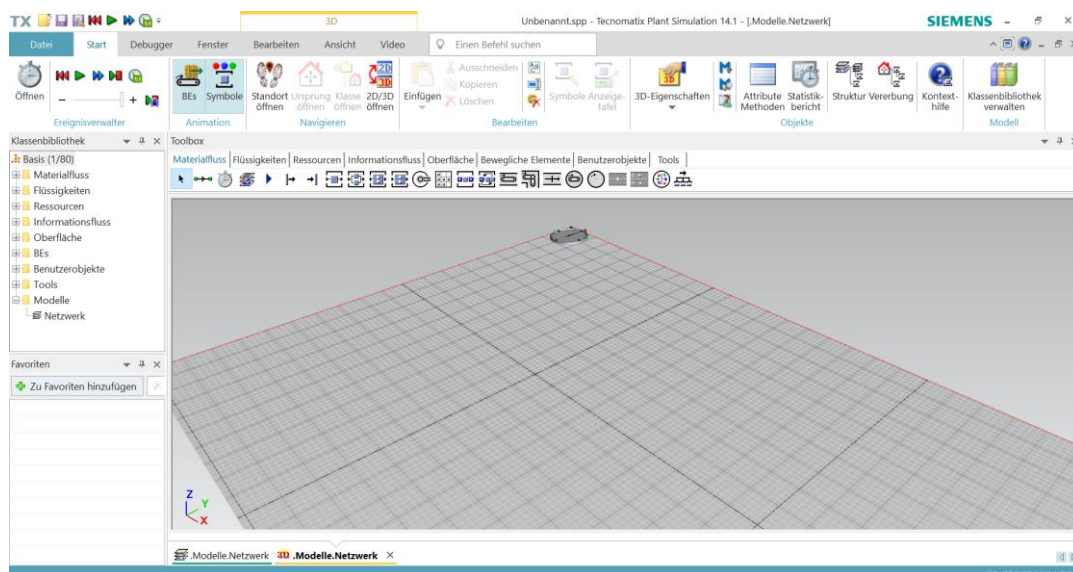


Abbildung 70: Plant Simulation - 3D-Ansicht

Plant Simulation wird in dieser Arbeit trotzdem berücksichtigt, da weder GrAPPA noch Vistable Möglichkeiten zur Bewegungssimulation oder Ähnlichem bieten, dies allerdings gerade zur Untersuchung von Mensch-Roboter-Kollaborationssystemen in der virtuellen Welt nützlich sein könnte und die Software mit einer Studentenlizenz erhältlich ist.

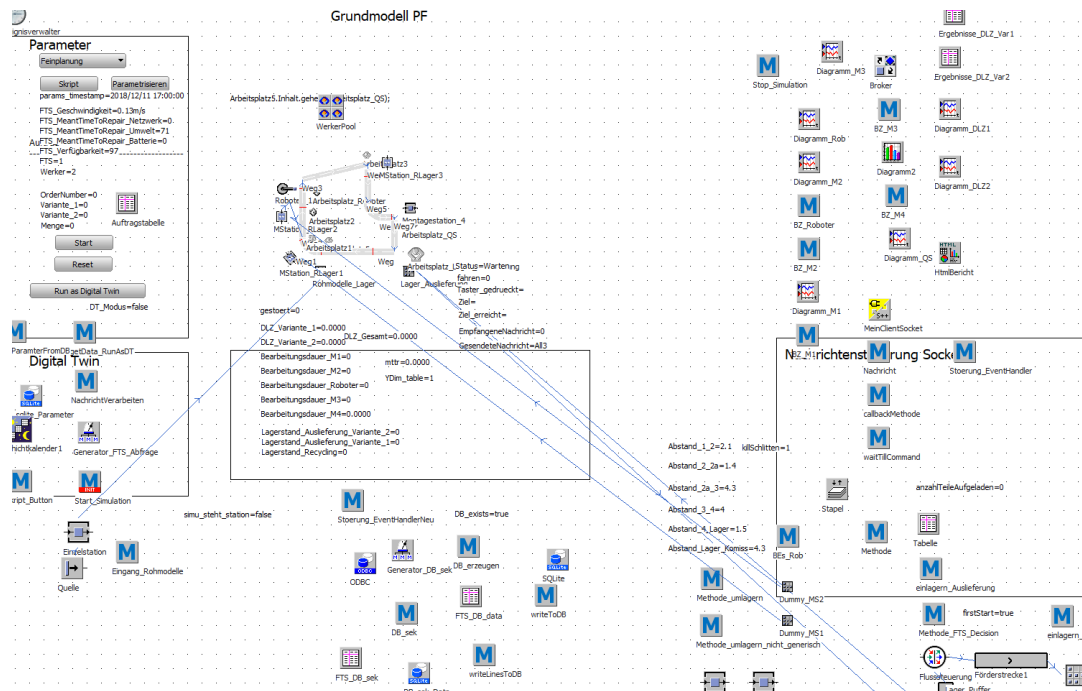


Abbildung 71: 2D-Beispiel Plant Simulation

In der 2D-Ansicht in Abbildung 71 ist ein vereinfachtes Modell der Pilotfabrik der TU-Wien in der Seestadt Aspern abgebildet, in dem auch Bewegungssimulationen von Personen, des Roboters und eines fahrerlosen Transportsystems integriert sind.

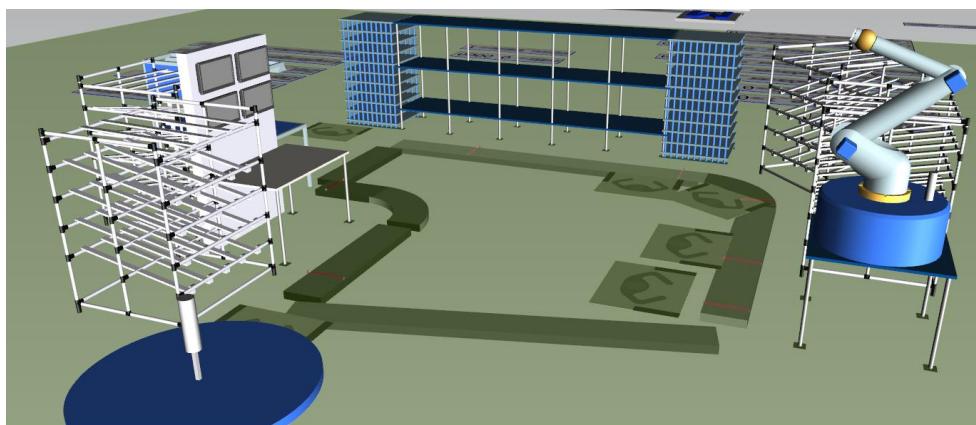


Abbildung 72: 3D-Beispiel Plant Simulation

Das Einfügen der in Abbildung 72 dargestellten 3D-Modelle gestaltet sich ebenfalls aufwändiger als in anderen Fabrikplanungsprogrammen und ist, neben der offensichtlich schlechteren Qualität der 3D-Darstellung, einer der Hauptgründe, warum Plant Simulation normalerweise nicht zur Layoutplanung eingesetzt wird.

5.4 Factory Design Utilities

Factory Design Utilities von Autodesk ist Teil der Product Design und Manufacturing Collection, zu der auch weitere in der Fabrikplanung nützliche Anwendungen wie Inventor, AutoCad und Navisworks gehören und ist eine Software zur Fabrikplanung und -optimierung.

Durch die Installation von Factory Design Utilities wird es möglich, die Fabrikplanung entweder in der 2D-Umgebung von AutoCad (Abbildung 73) oder der 3D-Umgebung von Inventor (Abbildung 74) durchzuführen.

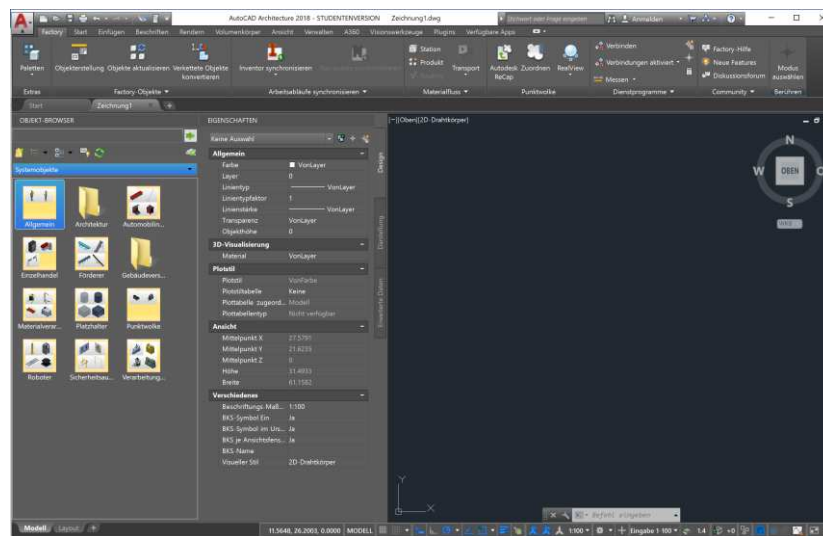


Abbildung 73: AutoCad Architecture Factory Design Utilities

Auf der linken Seite in den jeweiligen Abbildungen ist die Modellbibliothek dargestellt, in der eine Vielzahl an Objekten standardmäßig hinterlegt ist und der weitere hinzugefügt werden können, welche per Drag&Drop in das 2D- bzw. 3D-Layout gezogen werden können.

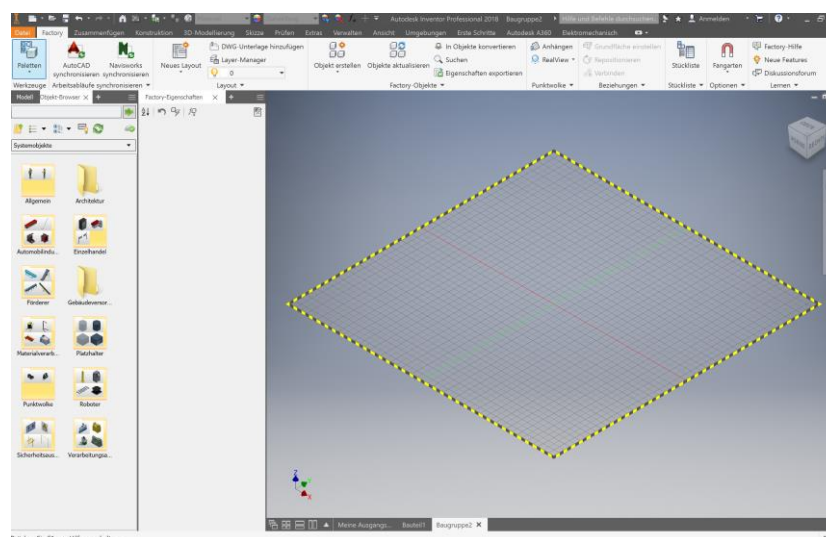


Abbildung 74: Inventor Factory Design Utilities

Sehr nützlich ist dabei die bidirektionale Assoziativität, welche es ermöglicht, die 2D- und die 3D-Ansicht jederzeit zu synchronisieren. Das bedeutet also, dass beispielsweise mit der Erstellung des Layouts in AutoCad begonnen und laufend mit dem Inventor synchronisiert werden kann, da anstelle der 2D-Komponenten automatisch die zugehörigen 3D-Objekte eingefügt werden.

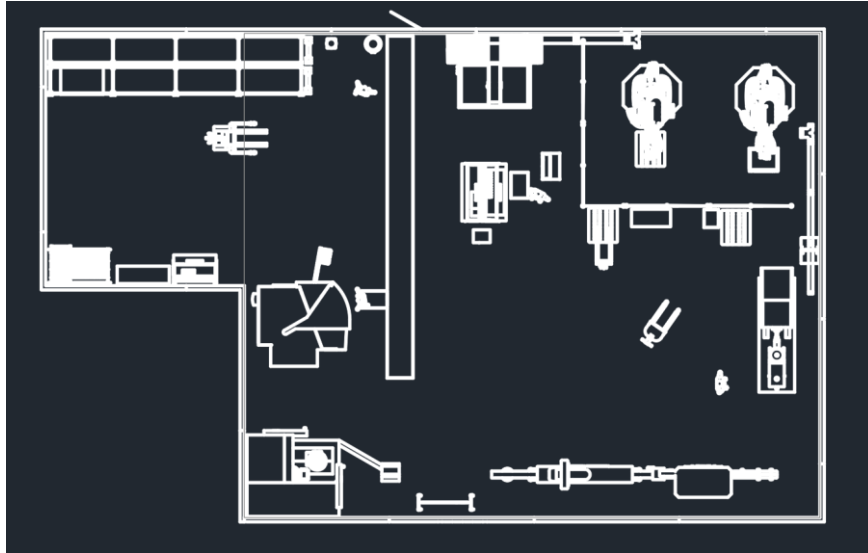


Abbildung 75: 2D-Beispiel AutoCad Architecture

Im 3D-Layout können dann weitere Objekte hinzugefügt oder bereits bestehende verschoben werden. Per Knopfdruck synchronisiert Factory Design Utilities wieder das AutoCad-Layout mit dem des Inventors und alle im 3D-Layout durchgeführten Änderungen werden in das 2D-File übernommen.



Abbildung 76: 3D-Beispiel Inventor

Zusätzlich können mit Factory Design Utilities auch Materialflüsse dargestellt, Fertigungsprozesse modelliert, visualisiert und funktionale Modelle der Fertigungslinie, der Fabrik oder Ähnlichem erstellt werden.

6 Vorgehensmodelle für VR Fabrikmodelle

Um die generierten 3D-Daten VR-fähig zu machen, existieren bisher keine standardisierten Prozesse im Unternehmen und auch keines der in Kapitel 5 erwähnten Softwarepakete erlaubt es, direkt Daten in der virtuellen Realität darzustellen. In diesem Kapitel werden nun Vorgehensmodelle, welche gewisse Anforderungen erfüllen sollen, entwickelt und erprobt.

Dazu werden zuerst Anforderungen definiert, welche von einem solchen Modell zu erfüllen sind, um die nötige Praxistauglichkeit zu erreichen.

Die entwickelten Vorgehensmodelle werden in Kapitel 6.2 definiert, wobei besonders auf eine ausführliche Beschreibung der Einrichtung der erforderlichen Software, dem Vornehmen der erforderlichen Einstellungen sowie dem anschließenden Hochfahren des Systems gelegt wird.

Zum Abschluss dieses Kapitels werden die Vorgehensmodelle einer Bewertung unterzogen, wie gut diese die definierten Anforderungen erfüllen, um ein bis zwei Prozesse anhand von Use Cases auf deren Praxistauglichkeit zu überprüfen und mögliche Potentiale einer VR-Visualisierung im Fabrikplanungsprozess zu entdecken.

6.1 Anforderungen an das Vorgehensmodell

In der folgenden Tabelle werden alle Anforderungen, die an die entwickelten Vorgehensmodelle gestellt werden, kategorisiert, beschrieben und übersichtlich aufgeführt. Erarbeitet wurden diese beim Kickoff-Gespräch sowie bei weiteren Folgeterminen während des Verfassens dieser Arbeit. Diese Anforderungen stellen auch die Basis für die in Kapitel 6.3 durchgeführte Bewertung der Vorgehensmodelle dar.

Anforderungskategorie	Anforderung	Beschreibung
Planungssoftware	Software für die Erstellung der 3D-Modelle soll bereits im Einsatz sein	Da bereits verschiedene Fabrikplanungsanwendungen im Unternehmen im Einsatz sind, sollte, wenn möglich, auf diese zurückgegriffen werden.
	Synchrone Erstellung des 2D-Layouts und des 3D-Modells	In der für das 3D-Modell verwendeten Planungssoftware kann das 3D- mit dem 2D-Layout bei Bedarf synchronisiert werden.
	Vorhandene Modellbibliothek	Es soll eine möglichst umfangreiche Bibliothek mit vielen nützlichen Objekten vorhanden sein.

Tabelle 14: Anforderungen an die Vorgehensmodelle (Teil 1)

		Geringer Aufwand für Erweiterung der Modellbibliothek	Der 3D-Modellbibliothek können im Planungsvorgang schnell und unkompliziert neue, eigene Objekte hinzugefügt werden.
Datenübertragung		Wenige bzw. einfache Schnittstellen	Die 3D-Daten sollen ohne zusätzliche Programme oder Konvertierungsvorgänge, im besten Fall direkt aus der Fabrikplanungssoftware, für VR verwendet werden können.
		Echtzeitfähigkeit	Änderungen, die im 2D- oder 3D-Layout durchgeführt werden, sollen sofort in der virtuellen Welt visualisiert werden.
		Geringer Mehraufwand für Vorbereitung des 3D-Modelles	Das 3D-Modell kann ohne Änderungen, Nachbearbeitungen und Einschränkungen verwendet werden und es sind keine Übertragungen von Materialdatenbanken, nachträgliche Materialzuweisungen, Ergänzung verloren gegangener Objekte, manuelle Vereinfachungen oder Ähnliches notwendig.
		Flexibilität hinsichtlich Software des 3D-Modelles	Es können möglichst viele verschiedene Ursprungsformate als 3D-Modell eingesetzt werden.
Erstellung VR-Erfahrung		Ohne Programmierkenntnisse einsetzbar	Das Erstellen einer VR-Anwendung und der Einsatz dieser ist ohne spezielle Programmierkenntnisse möglich.
		Adaptierbarkeit	Eigene Funktionen oder andere Änderungen in der VR-Erfahrung können mit entsprechenden Programmierkenntnissen vorgenommen werden.
Einsatz der VR-Erfahrung		Gute Qualität der VR-Darstellung	Die Darstellungsqualität der Inhalte und Objekte soll, unter Berücksichtigung der Qualität der 3D-Eingangsdaten, möglichst verlustfrei sein.
		Ausreichende Stabilität im Betrieb	Das Hochfahren bzw. der Betrieb der VR-Erfahrung müssen bei korrekter Einrichtung und Verwendung stabil funktionieren.
		Flüssige Darstellung des VR-Modelles	Die VR-Erfahrung soll Objekte und Inhalte flüssig darstellen und Bewegungen ohne Verzögerung folgen. Bei der Beurteilung soll auch die eventuell zu leistungsschwache Hardware des Rechners berücksichtigt werden.

Tabelle 15: Anforderungen an die Vorgehensmodelle (Teil 2)

Sonstige Anforderungen	Intuitive Bedienbarkeit	Die Bewegung in der virtuellen Welt sowie die Nutzung spezieller Funktionen soll sofort nach einer kurzen Einschulung möglich sein.
	Integrierte Funktionen	Es sollen möglichst viele Interaktionsmöglichkeiten mit der virtuellen Welt bestehen, wie zum Beispiel Objekte verschieben, Abstände messen etc.
	Volle Transportfähigkeit des Gesamtsystems	Der Aufbau der notwendigen Hardware als auch das Hochfahren der Software soll zügig möglich sein und eine Verwendung aller Komponenten an verschiedensten Orten problemlos möglich sein.
	Möglichst geringe Anforderungen an die Rechner-Hardware	Die Anforderungen an die Hardware des Rechners sollen möglichst gering sein und ein Einsatz mit den verfügbaren Rechnern sollte möglich sein.
	HMD Universalität	Der Einsatz soll für möglichst alle am Markt verfügbaren Head Mounted Displays möglich sein.
	Geringe Kosten für Gesamtsystem	Die Kosten für die notwendige Soft- und Hardware sollen so gering wie möglich gehalten werden.

Tabelle 16: Anforderungen an die Vorgehensmodelle (Teil 3)

6.2 Entwicklung von Vorgehensmodellen

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Rahmenbedingungen, also das zum Einsatz kommende HMD und die möglichen Fabrikplanungsprogramme für die Erstellung des 3D-Modelles, sowie die Anforderungen an die zu entwickelnden Vorgehensmodelle definiert und spezifiziert wurden, werden nun, aufbauend auf einer umfassenden Recherche und einer Vielzahl an Tests, verschiedene Modelle entwickelt und ausführlich dokumentiert.

Für die Darstellung der verschiedenen Vorgehensmodelle wird die in Tabelle 17 dargestellte Legende verwendet.

Symbol	Bedeutung
	Laufende Aktualisierung der Daten, Übertragung in Echtzeit
	Manuelles Einspielen der Daten, keine Aktualisierung in Echtzeit

Tabelle 17: Legende Vorgehensmodelle

6.2.1 Vorgehensmodell 1 – Factory Design Utilities-3DS MAX-Unity-HMD

Das erste Vorgehensmodell wird, ausgehend von der aktuell nicht im Unternehmen im Einsatz befindlichen Software „Factory Design Utilities“ von Autodesk, entwickelt. Ziel ist die Visualisierung am Windows Mixed Reality Headset „Lenovo Explorer“ unter bestmöglicher Berücksichtigung der im vorigen Kapitel definierten Anforderungen.

Da von Autodesk aktuell noch keine adäquate Lösung zur VR-Visualisierung von mit Factory Design Utilities geplanten Objekten angeboten wird, ist eine Vorgehensweise notwendig, mit der 3D-Daten aus dem Inventor über gegebenenfalls benötigte Umwege in der virtuellen Welt visualisiert werden können.

Ausgehend von einer Internet- und Literaturrecherche wird deshalb ein passender VR-Engine bestimmt, mit dem VR-Inhalte erstellt werden können. Aufgrund der weiten Verbreitung und der kostenlosen Verfügbarkeit für den nicht kommerziellen Einsatz wird Unity ausgewählt, eine Alternative stellt der Unreal Engine dar.

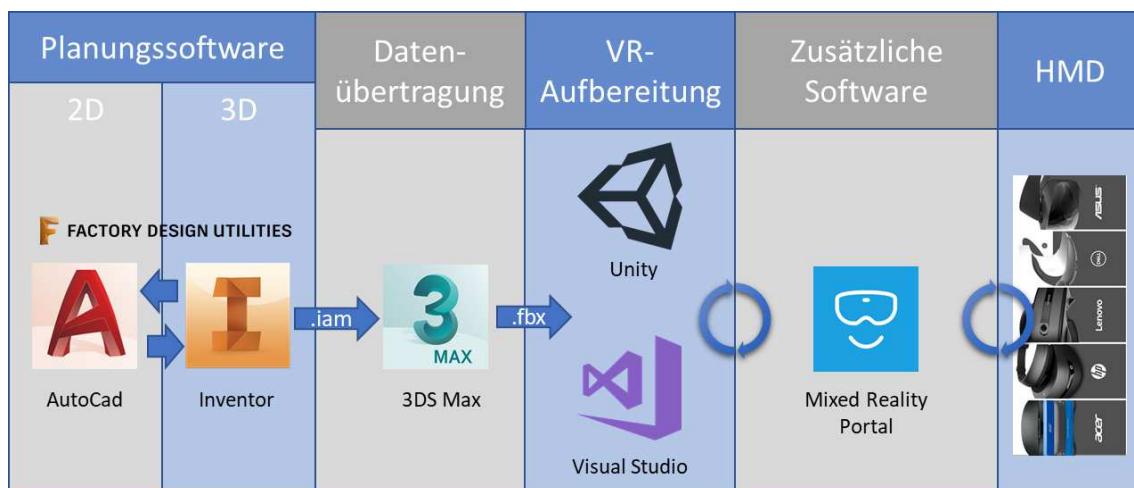


Abbildung 77: Vorgehensmodell 1

Da allerdings Inventor Produkte in keinem für Unity passenden Format gespeichert werden können, ist der Einsatz von 3DS Max zur Konvertierung der Inventor Dateien notwendig. In diesem werden die 3D-Dateien eingespielt und in einem Unity-kompatiblen Format (.fbx, .dae, .3ds etc.) exportiert. Durch diesen Import/Export Prozess sind die Daten allerdings, wie in Abbildung 77 dargestellt, von der ursprünglichen Fabrikplanungssoftware entkoppelt und sofortige Visualisierung von dort vorgenommenen Änderungen wird dadurch unmöglich.

Die wesentlichen Schritte dieses Vorgehensmodelles, also die Einrichtung von Unity, das Einspielen von 3D-Daten sowie die Visualisierung am Head Mounted Display wird nun auf den folgenden Seiten ausführlich beschrieben und dokumentiert.

Einrichtung

Nachdem die notwendige Software heruntergeladen und installiert wurde, kann ein neues Projekt in Unity angelegt werden. Abbildung 78 zeigt den Startbildschirm von Unity, wo einerseits einige Tutorials verfügbar sind, neue Projekte erstellt und vorhandene Projekte geladen werden können.

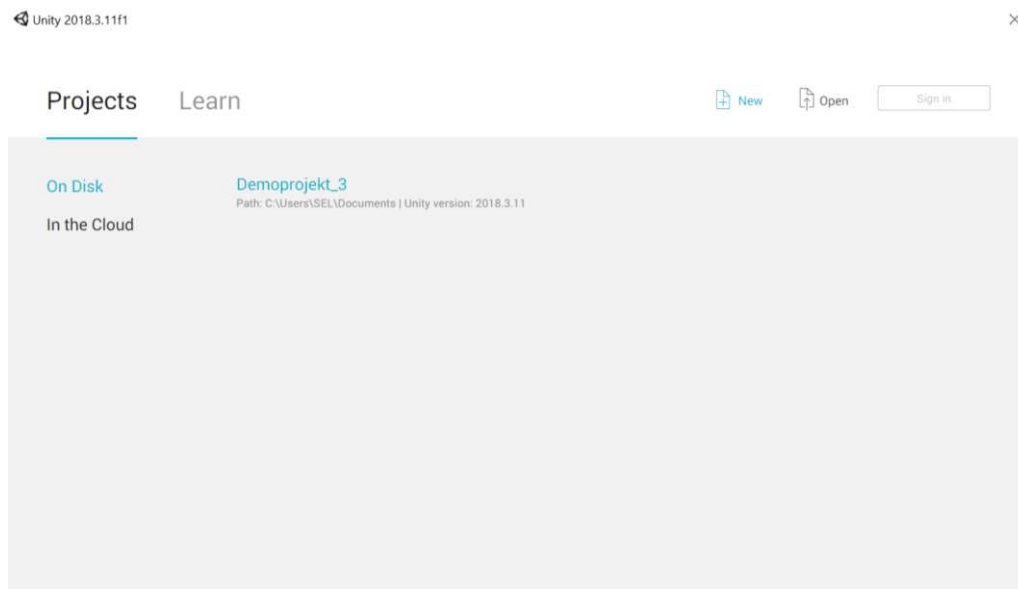


Abbildung 78: Unity Projekt erstellen

Klickt man rechts oben auf „New“, öffnet sich das in Abbildung 79 dargestellte Fenster, in dem ein Projektname und auch der Speicherort definiert werden können. Unbedingt zu beachten ist dabei, bei der Einstellung für das Template „3D“ auszuwählen, da dies ansonsten später zu Problemen führt.

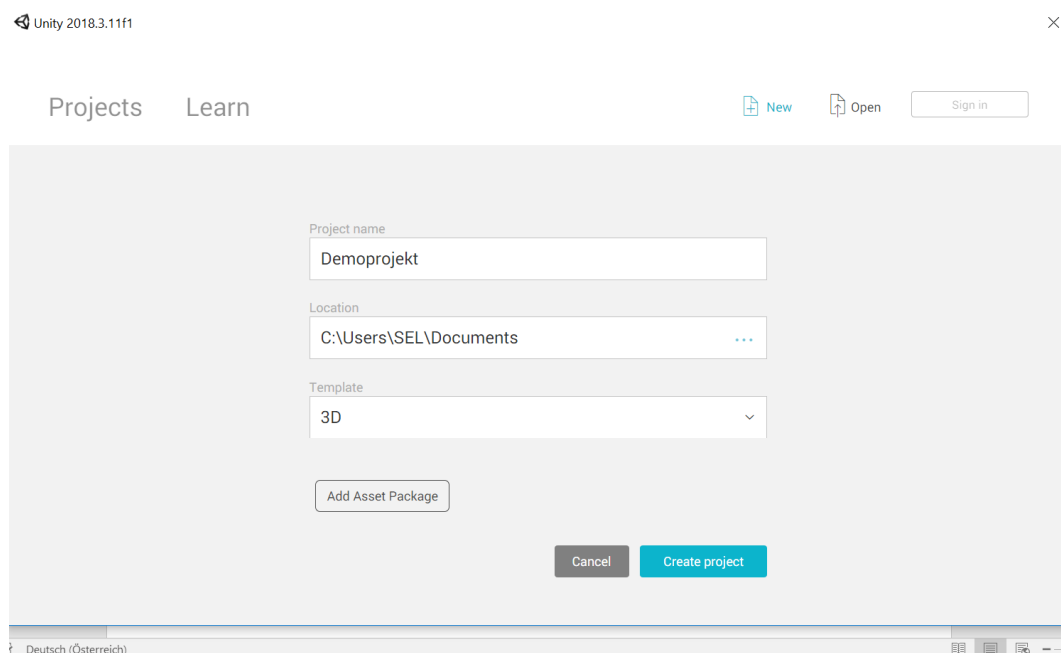


Abbildung 79: Grundeinstellungen neues Projekt

Nach dem Klicken auf „Create Project“ erstellt Unity alle notwendigen Dateien und öffnet nach wenigen Sekunden den Startbildschirm eines neuen Projektes, dessen grundlegender Aufbau bereits in Kapitel 3.3 beschrieben wurde.

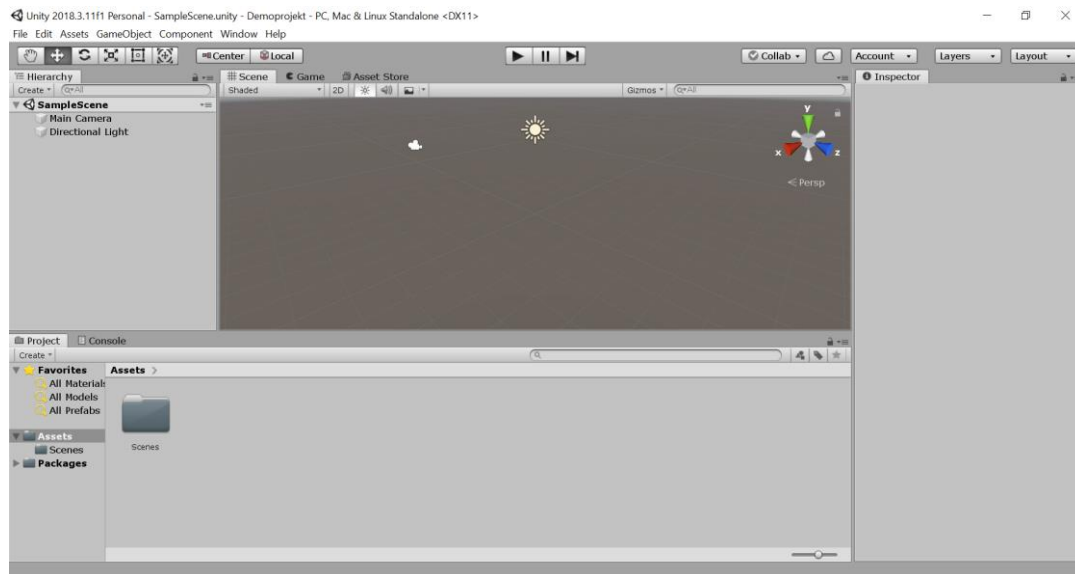


Abbildung 80: Unity Startbildschirm

Um ein Projekt VR-fähig zu machen und den Entwicklungsprozess zu beschleunigen, ist es hilfreich, sogenannte Toolkits zu verwenden, die automatisiert Projekt- und Szeneneinstellungen durchführen und auch noch weitere hilfreiche Scripts bieten, die entweder sofort verwendet werden oder in Visual Studio angepasst und erweitert werden können.

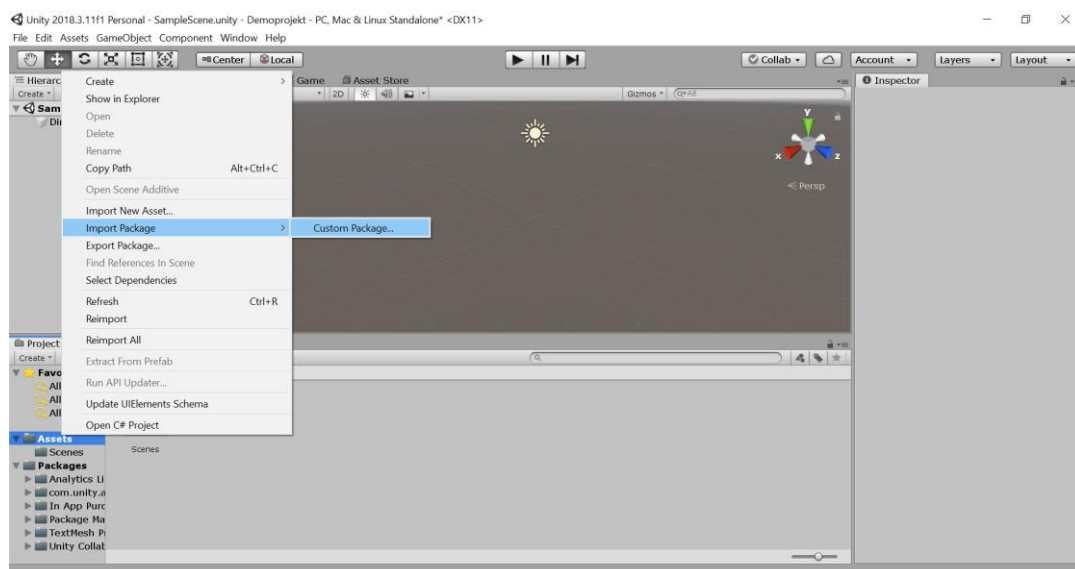


Abbildung 81: Zusatzpakete importieren

Um so einen Toolkit, von dem verschiedenste im Internet kostenlos heruntergeladen werden können, zu importieren, klickt man mit der rechten Maustaste auf „Asset“, anschließend auf „Import Package“ und „Custom Package“.

Darauf öffnet sich ein Fenster, in dem der gewünschte Toolkit ausgewählt und per Doppelklick importiert werden kann. In Abbildung 82 wird dies anhand des HoloToolkits von GitHub, einem Open-Source-Projekt, welcher für Windows Mixed Reality, HoloLens 1+2 sowie OpenVR Headsets wie Oculus Rift und HTC Vive, verwendbar ist, demonstriert.

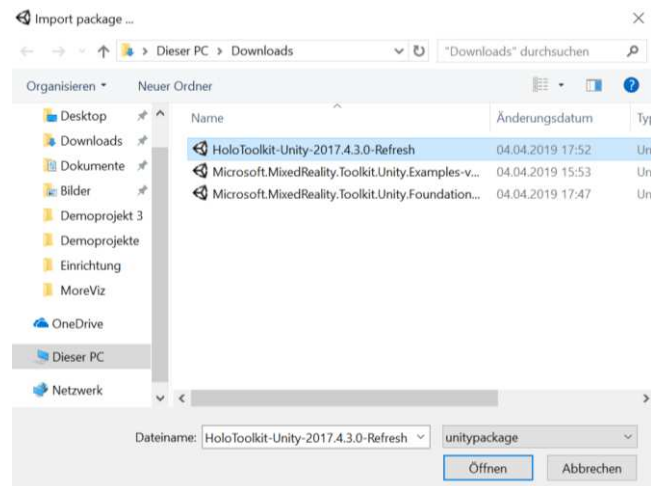


Abbildung 82: Mixed Reality Toolkit importieren

Bevor der Import durchgeführt wird, können noch Einstellungen vorgenommen werden, welche Komponenten genau importiert werden sollen, siehe Abbildung 83. Hier ist es nicht notwendig, Änderungen vorzunehmen und es können alle standardmäßig vorgeschlagenen Pakete importiert werden.

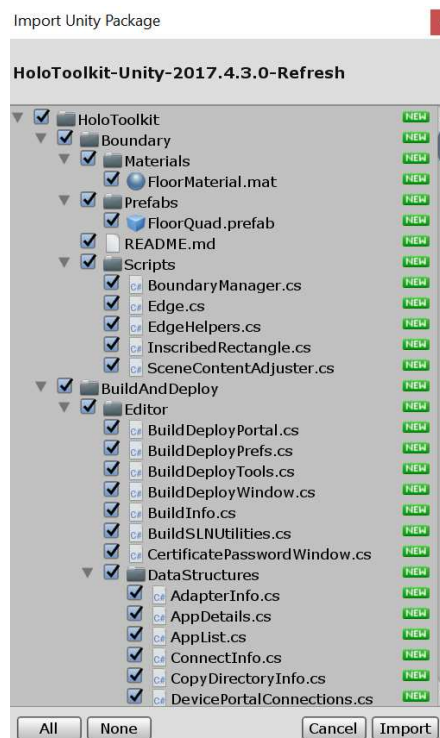


Abbildung 83: Importeinstellungen MR Toolkit

Nach dem Klicken auf „Import“ startet dieser und, je nachdem, wie viele Pakete ausgewählt wurden, erscheint nach höchstens einer Minute ein neuer Reiter in der Toolbar, welcher gleichzeitig signalisiert, dass der Import erfolgreich war. Zusätzlich ist im Projektbaum, welcher sich in der folgenden Abbildung links unten befindet, unter „Assets“ der „HoloToolkit“ hinzugekommen.

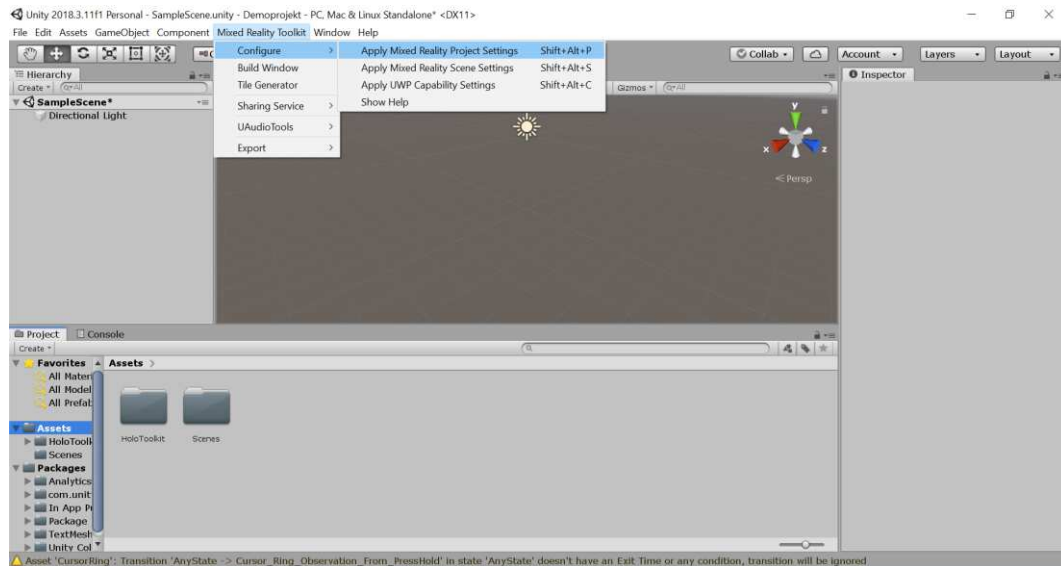


Abbildung 84: MR Projekteinstellungen

In diesem Reiter können unter „Configure“ verschiedene Einstellungen vorgenommen werden, siehe Abbildung 84. Durch Auswählen von „Apply Mixed Reality Project Settings“ wird das erstellte Unity Projekt automatisch für Mixed Reality konfiguriert, was die Änderung verschiedener Einstellungen, welche ansonsten manuell vorgenommen werden müssten, automatisiert durchführt und dadurch Zeit spart und Fehler vermeidet.

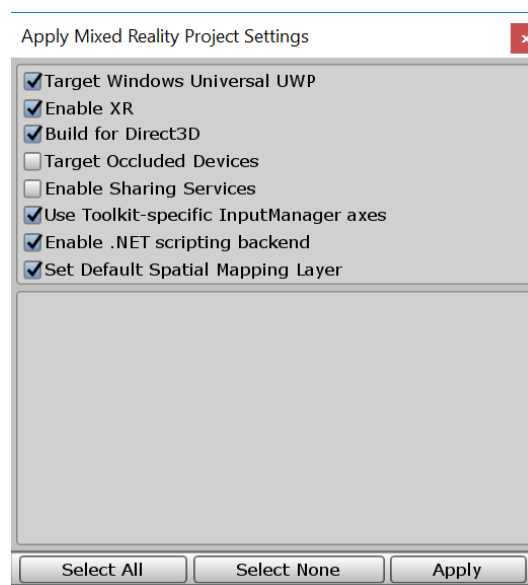


Abbildung 85: Konfiguration MR Projekteinstellungen

Auch hier können wieder die in Abbildung 85 dargestellten Standardeinstellungen für die Anwendung der Projekteinstellungen beibehalten werden.

Spätestens an dieser Stelle kann die in der Beispielszene standardmäßig vorhandene „Main Camera“ gelöscht werden, sodass nurmehr, wie in Abbildung 86 dargestellt, das „Directional Light“ vorhanden ist.

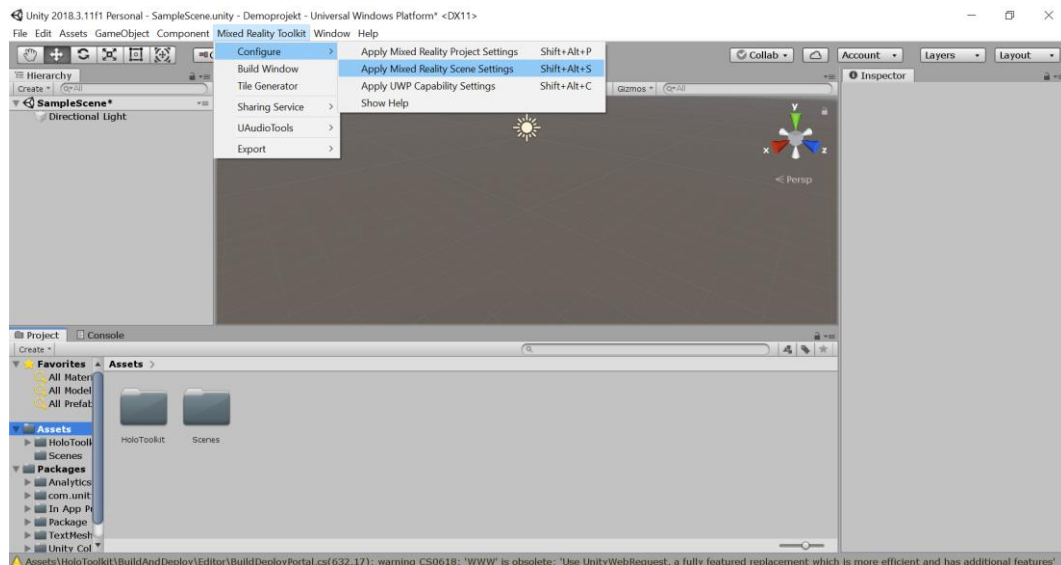


Abbildung 86: MR Szeneneinstellungen

Durch erneutes Klicken auf „Mixed Reality Toolkit“>„Configure“>„Apply Mixed Reality Scene Setting“ werden die Szeneneinstellungen angepasst und alle notwendigen Objekte für die Erstellung der VR-Erfahrung eingefügt. Vor der endgültigen Anwendung der Einstellungen können diese wieder angepasst werden, auch hier empfiehlt es sich, die in Abbildung 87 dargestellte Konfiguration zu übernehmen.

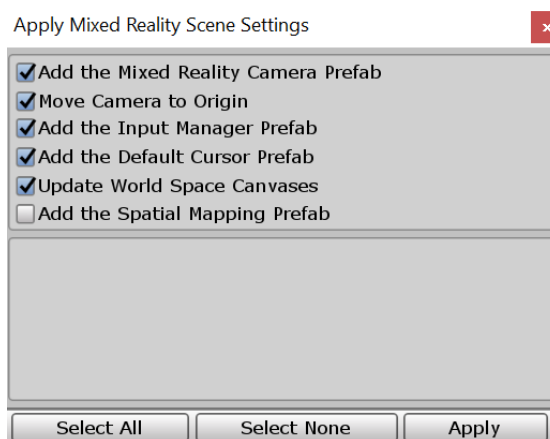


Abbildung 87: Konfiguration MR Szeneneinstellungen

Besonders wichtig dabei ist die „Mixed Reality Camera Parent“, da diese durch die automatisch hinterlegten Scripts die Teleportation, also die Bewegung in der virtuellen Welt, ermöglicht.

Die Vorbereitungen sind nun abgeschlossen und das neu erstellte Projekt fertig konfiguriert. Abbildung 88 zeigt die Standardansicht von Unity, wie sie nun aussehen sollte. Als nächstes können nun die 3D-Modelle den Assets hinzugefügt werden.

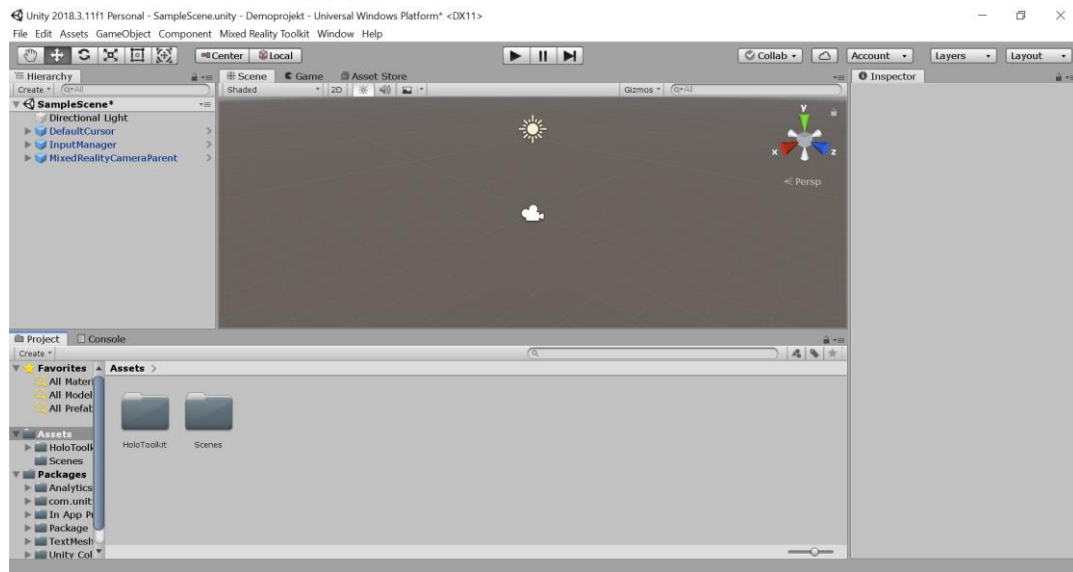


Abbildung 88: Unity Grundkonfiguration für WMR

Hochfahren

Bevor das 3D-Modell allerdings in Unity übernommen werden kann, muss das 3D-Fabrikmodell aus dem Autodesk Inventor in ein Format konvertiert werden, das in Unity importiert werden kann.

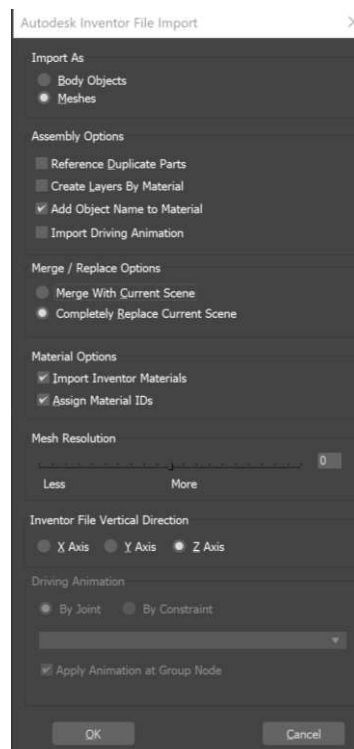


Abbildung 89: Import Einstellungen 3DS Max

Dazu ist es notwendig, das 3D-Modell mit dem Format „Autodesk Inventor-Baugruppe“ in 3DS MAX zu importieren und in einem anderen Format zu exportieren. Veränderungen werden dort keine vorgenommen, 3DS Max dient rein als Software für die Konvertierung in ein passendes Format. Die besten Ergebnisse wurden bisher damit erzielt, wenn die Inventor Baugruppe als Mesh importiert wurde, wie in Abbildung 89 dargestellt ist.

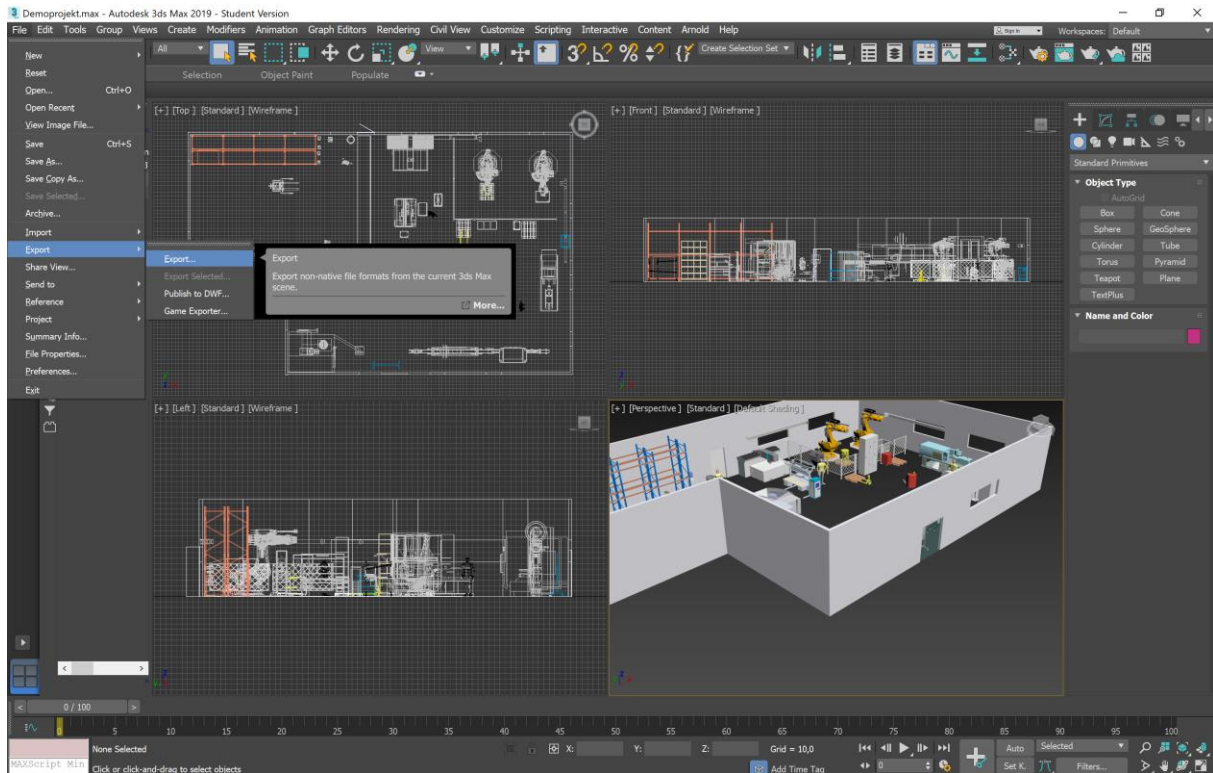


Abbildung 90: Export aus 3DS Max

In Abbildung 90 ist das fertig importierte 3D-Modell aus dem Autodesk Inventor zu sehen, welches über „File“>„Export“>„Export“ sogleich wieder exportiert werden kann.

Als Exportformat stehen dabei prinzipiell mehrere Möglichkeiten, wie FBX oder DAE zur Auswahl, oder auch einfach das Speichern als 3DS Max File ist eine Möglichkeit. Von Unity empfohlen wird das FBX-Format, weshalb dieses auch verwendet wird, es konnten allerdings rein optisch keine wesentlichen Unterschiede festgestellt werden, lediglich die Dateigröße ist bei Verwendung dieses Formats wesentlich geringer und kann durchaus einen Vorteil darstellen.

Nach erfolgreichem Export aus 3DS Max, welcher, je nach Dateigröße, etwas dauern kann, kann dieses FBX-File nun einfach per Drag&Drop den „Assets“ im vorhin erstellten Unity-Projekt hinzugefügt werden, siehe Abbildung 91.

Ist das Modell in Unity fertig geladen, erscheint im Scene-View trotzdem noch keine 3D-Ansicht, da der eben importierte „Asset“ erst der aktuellen Szene hinzugefügt

werden muss. Dazu einfach das neu hinzugekommene 3D-Modell per Drag&Drop vom „Asset“ Bereich in die aktuelle „Sample-Scene“ ziehen.

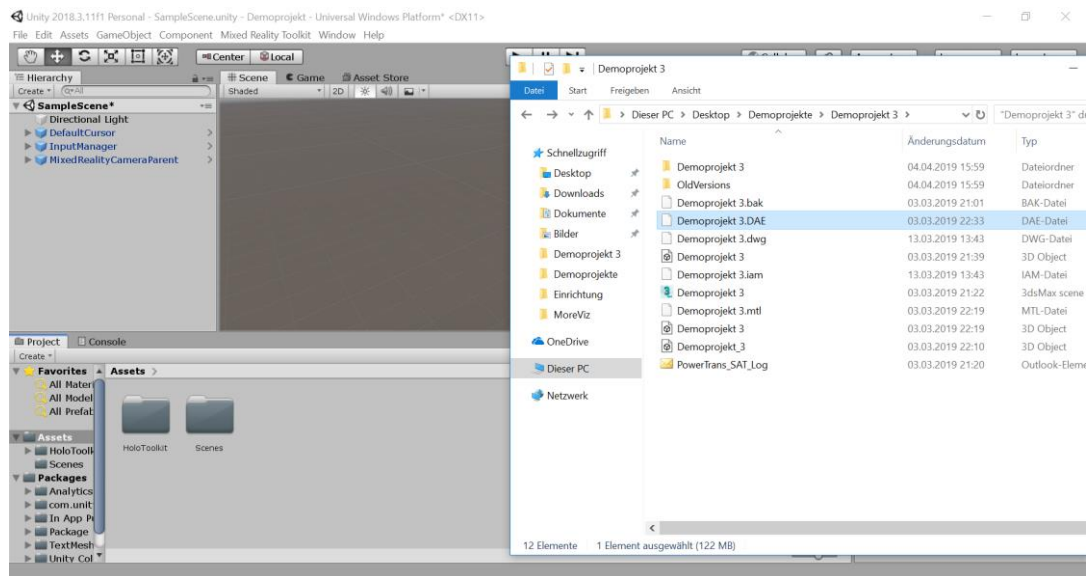


Abbildung 91: Import von 3D Modell in Unity

Wenn alle bisherigen Schritte ordnungsgemäß ausgeführt wurden, sollte die Szene wie in Abbildung 92 aussehen. Falls die Szene trotzdem noch leer ist, sollte die Position der Kamera relativ zum Modell kontrolliert und gegebenenfalls angepasst werden.



Abbildung 92: Szenenerstellung Unity

Ab nun kann die Anwendung auch schon getestet werden: Durch Drücken der Play-Taste wechselt Unity in die Game-Ansicht, in der man sich mit den Tasten W, A, S, D, den Richtungstasten sowie der Maus bereits im virtuellen Fabrikmodell herumbewegen kann.

Unterbricht man den Test und öffnet das Windows Mixed Reality Portal, welches in Abbildung 93 im Entwicklermodus dargestellt ist, in dem ein virtuelles HMD dazu verwendet werden kann, die Funktion einer erstellten Anwendung direkt am PC zu testen, und drückt danach erneut die Play-Taste, befindet man sich nach einigen Sekunden im VR-Fabrikmodell.

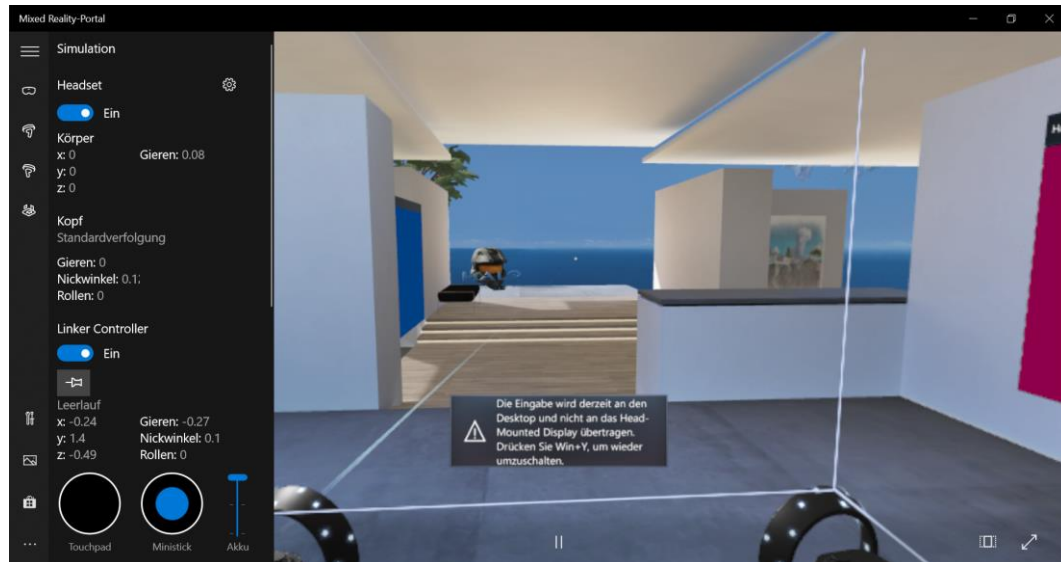


Abbildung 93: Starten Windows Mixed Reality Toolkit

In diesem virtuellen Fabrikmodell, dargestellt in Abbildung 94, kann man sich nun beliebig umschauen und mit den Tasten W, A, S, D herumbewegen. Zusätzlich kann man sich mit dem Joystick der Motioncontroller zurückbewegen und nach links und rechts drehen, was sich beim Verwenden des HMDs im Sitzen als sehr hilfreich erweist. Die Teleportation mittels Motion Controller funktioniert allerdings ohne Adaptierungen in Unity nur in einem sehr eingeschränkten Bereich.



Abbildung 94: Übertragung in Windows Mixed Reality Portal

Auffallend ist auch, dass, im Vergleich zum Inventor und dem 3DS Max File, einige Farb- beziehungsweise Materialzuordnungen verloren gegangen sind. So ist beispielsweise die Ameise, welche ursprünglich rot war, im Unity Modell und auch im virtuellen Fabrikmodell hellgrau, siehe Abbildung 90.

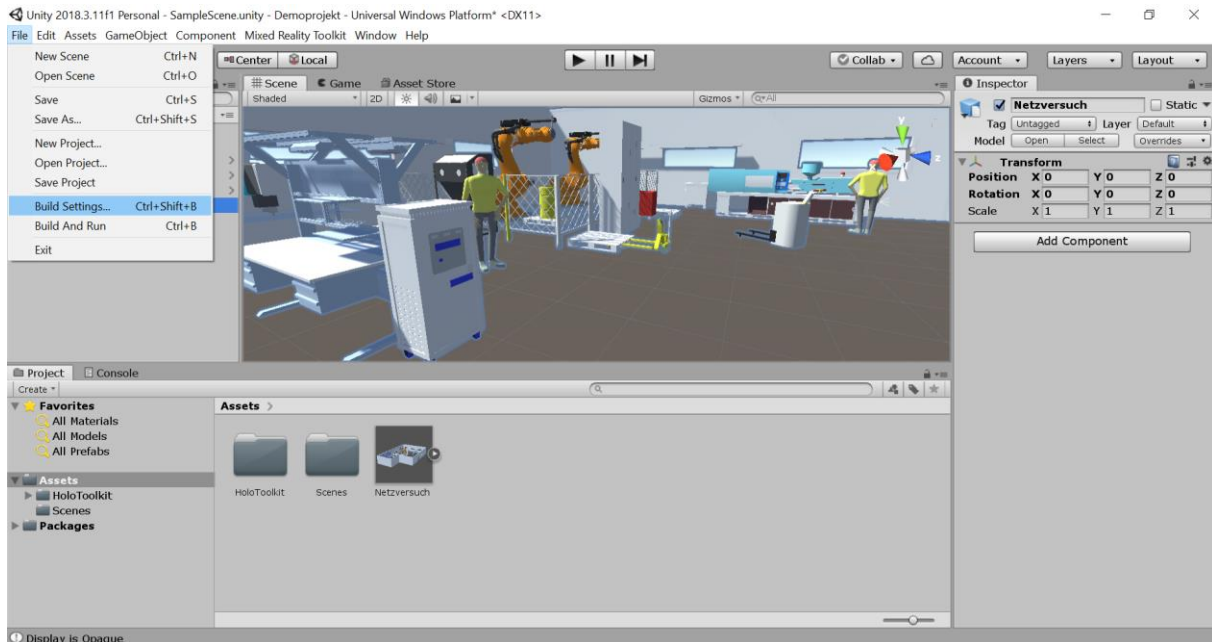


Abbildung 95: Erstellen einer Anwendung

Wurde die Anwendung erfolgreich getestet und alle Funktionen und Objekte im Unity-File umgesetzt beziehungsweise eingefügt, kann das Projekt als Anwendung exportiert werden, wie Abbildung 95 dargestellt ist.

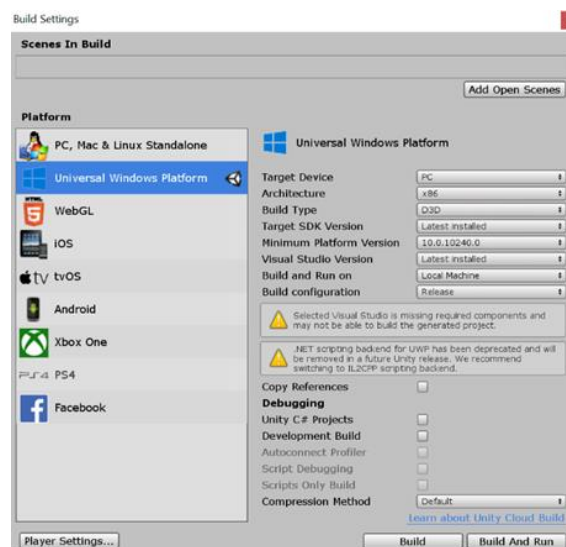


Abbildung 96: Unitys Build Settings

In diesem Fenster stehen, je nach Bedarf, verschiedene Plattformen, wie zum Beispiel die Universal Windows Platform, iOS oder auch Android, zur Verfügung.

6.2.2 Vorgehensmodell 2 – Vistable-MoreViz-HMD

Im zweiten Vorgehensmodell wird die im Unternehmen bei der Layoutplanung bevorzugt eingesetzte Software Vistable Touch von Plavis zur Erstellung des Modells verwendet. Da allerdings auch in dieser Anwendung keine Möglichkeit zur VR-Visualisierung integriert ist, muss eine Möglichkeit gefunden werden, die 3D-Daten zu exportieren und in der virtuellen Welt zu visualisieren.

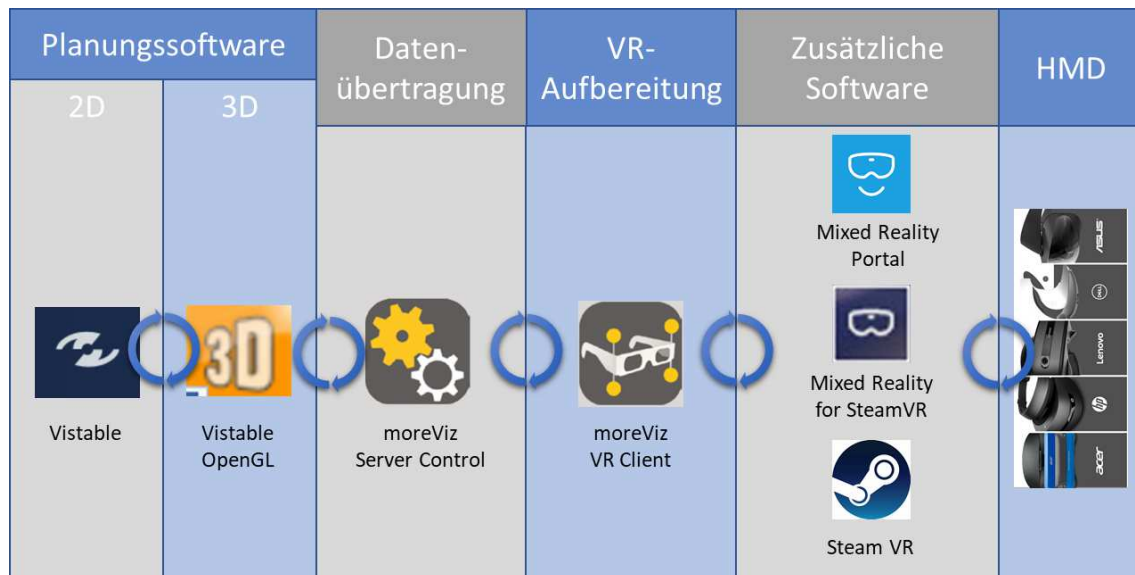


Abbildung 97: Vorgehensmodell 2

Um die Anforderungen bestmöglich zu erfüllen, soll dieses Vorgehensmodell die Echtzeit Visualisierung von Planungsdaten aus Vistable ermöglichen. Deshalb wird nach einer Software gesucht, die 3D-Daten direkt aus Vistable entnimmt und für VR aufbereitet. Zusätzlich sollen möglichst alle gängigen Head Mounted Displays unterstützt werden und der Aufwand für die Erstellung der VR-Erfahrung möglichst gering sein.

Diese Anforderungen erfüllt die Software „moreViz“ von more 3D nahezu perfekt, da die Grabbing-Engine die Daten direkt aus der Anwendungssoftware entnimmt, SteamVR unterstützt wird und nach der durchgeführten Einrichtung der Aufwand für die VR-Visualisierung sehr gering ist. Damit auch Windows Mixed Reality Headsets unterstützt werden, muss lediglich „Mixed Reality for SteamVR“ installiert werden.

Wie in Abbildung 97 ersichtlich, wird dadurch eine vollständige Übertragung der 3D-Daten in Echtzeit über das gesamte Vorgehensmodell ohne Konvertierungsaufgaben möglich.

Bevor auf diese Weise aber Layouts am Head Mounted Display visualisiert werden können, müssen noch diverse Einstellungen in der moreViz Server Control, dem moreViz Client und auch Vistable vorgenommen werden, welche in den folgenden Absätzen beschrieben werden.

Einrichtung

Nach erfolgreicher Installation ist es erforderlich, die einzelnen Komponenten von moreViz einzurichten und entsprechend dem verwendeten Rechner und dem Head Mounted Display zu konfigurieren.

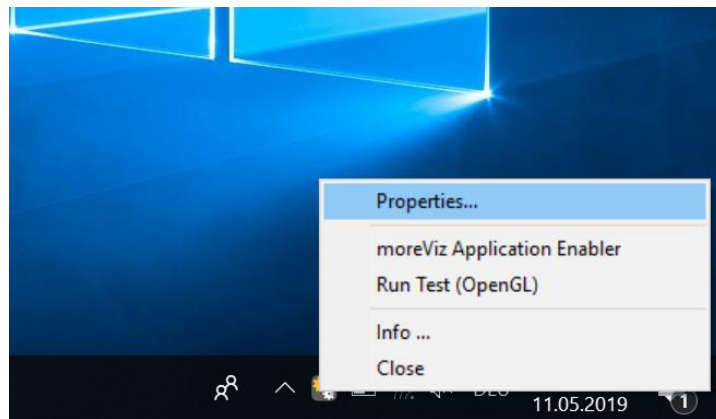


Abbildung 98: MoreViz Servereigenschaften

Dazu müssen zuerst Einstellungen in der MoreViz Server Control vorgenommen werden, die, wie in Abbildung 98 dargestellt, mit einem Rechtsklick auf das entsprechende Icon in der Taskleiste und anschließendem Auswählen von „Properties“ erreicht werden können. Ist dieses Icon nicht vorhanden, ist die moreViz Server Control nicht aktiv und muss durch einen Doppelklick auf das entsprechende Desktop-Symbol gestartet werden.

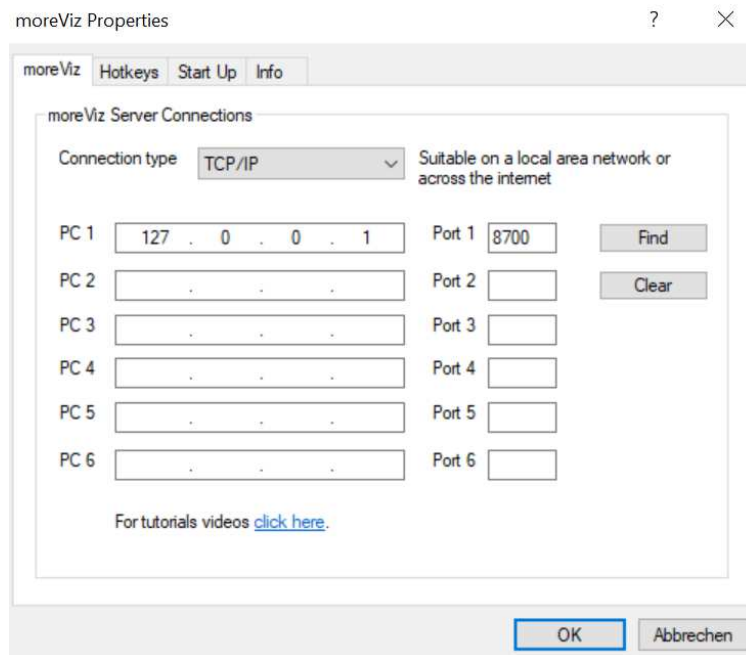


Abbildung 99: moreViz Serververbindungen

In dem im Anschluss erscheinenden Fenster mit vier Reitern (Abbildung 99) können diverse Einstellungen vorgenommen werden. Bei der Auswahl des Verbindungstyps

ist bei HMD aus Geschwindigkeitsgründen prinzipiell die Einstellung „Shared Memory“ zu bevorzugen. Falls allerdings der im Einsatz befindliche Rechner nicht die entsprechende Hardware für VR verbaut hat beziehungsweise die Datenübertragung von der Anwendung zum HMD nicht funktioniert, ist es empfehlenswert, auf den TCP/IP Verbindungstyp zu wechseln, da dieser eine größere Timeout-Toleranz aufweist.

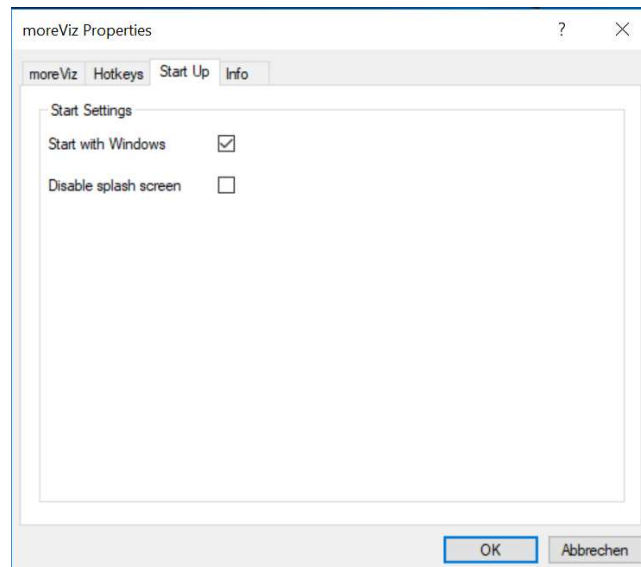


Abbildung 100: moreViz Server Starteinstellungen

Unter dem in Abbildung 100 dargestellten Reiter „Start Up“ kann konfiguriert werden, ob MoreViz beim Start von Windows automatisch hochgefahren werden soll oder nach jedem Neustart vor der Verwendung manuell gestartet werden muss. Da die moreViz Server Control lediglich 10MB RAM belegt, stellt der automatische Start dieser kein Problem dar.

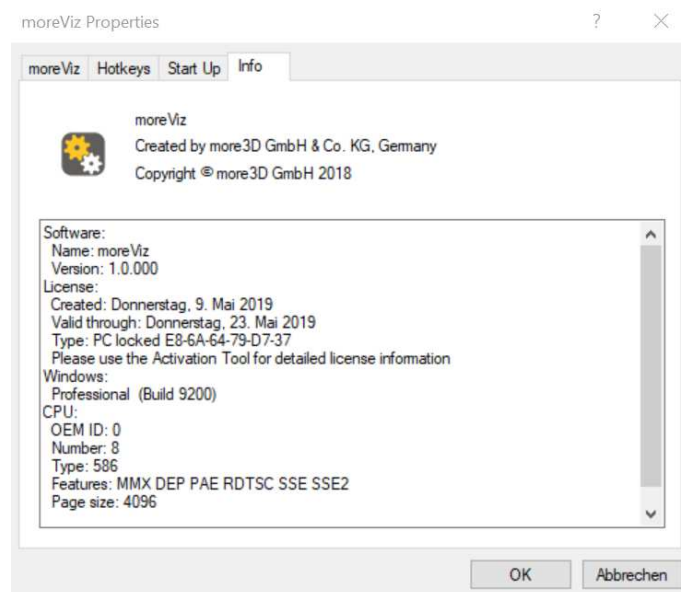


Abbildung 101: moreViz Server Info

Der Reiter „Info“ liefert zusätzlich noch hilfreiche Informationen über die Soft- und Hardware und die verwendete Lizenz. In Abbildung 101 ist beispielsweise ersichtlich, dass die in dieser Arbeit verwendete zweiwöchige Testlizenz bis zum 23.Mai 2019 gültig ist.

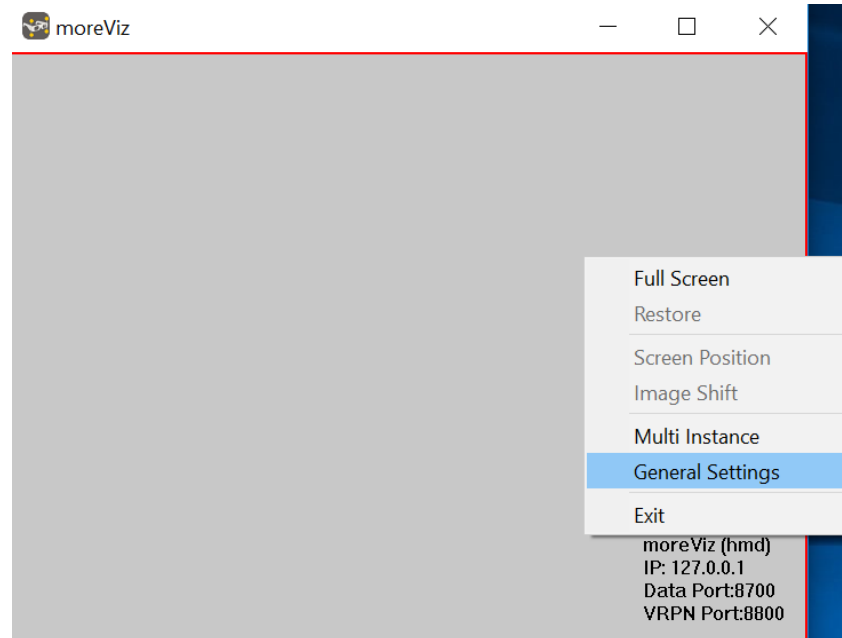


Abbildung 102: moreViz VR-Client allgemeine Einstellungen

Weiters müssen die Einstellungen des moreViz Clients noch an das verwendete Headset angepasst werden. Dazu einfach über das Desktop Icon oder das Startmenü („more3D“>„moreViz“) den moreViz Client starten. Durch einen Rechtsklick in das erscheinende Fenster und der Auswahl von „General Settings“ gelangt man zu den in Abbildung 103 dargestellten allgemeinen Einstellungen.

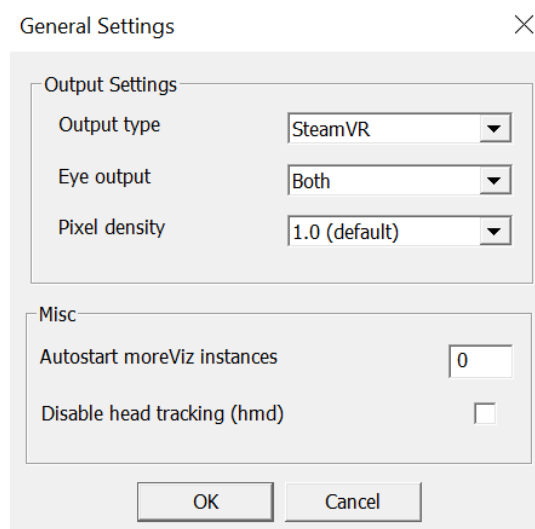


Abbildung 103: moreViz VR-Client Output Einstellungen

Bei Verwendung eines Windows Mixed Reality, HTC Vive oder Oculus Rift Headsets muss als Output-Typ „SteamVR“ konfiguriert werden. Daneben stehen noch verschiedene Varianten für eine Ausgabe im Cave (Quad Buffer, Side-by-Side und Anaglyph) sowie einer für HeroVR zur Verfügung. Bei der Einstellung der Pixeldichte sollte die Leistungsfähigkeit der Grafikkarte als auch die Komplexität des Modells berücksichtigt werden. Eine Dichte von eins bedeutet, dass moreViz exakt mit der Auflösung für die HTC Vive rendert.

Bei einem höheren Wert verbessert sich die Bildqualität, allerdings führt dies gleichzeitig auch zu einer höheren Beanspruchung der Grafikkarte, was in einer instabilen Bildübertragung beziehungsweise einer verzögerten Verfolgung der Bewegungen des HMDs resultieren kann. Ein kleinerer Wert als eins wiederum reduziert die Leistungsanforderungen an die GPU und steigert die Qualität des Renderings (mehr FPS etc.), allerdings bei schlechterer Bildqualität.

Hier gilt es, in Abhängigkeit des Rechners und des Modells, einen Kompromiss hinsichtlich Darstellungsqualität und Leistungsanforderungen für eine optimale VR-Erfahrung zu erreichen. Nachdem alle Einstellungen vorgenommen wurden, sollte der Client neu gestartet werden, damit diese auch sicher übernommen werden.

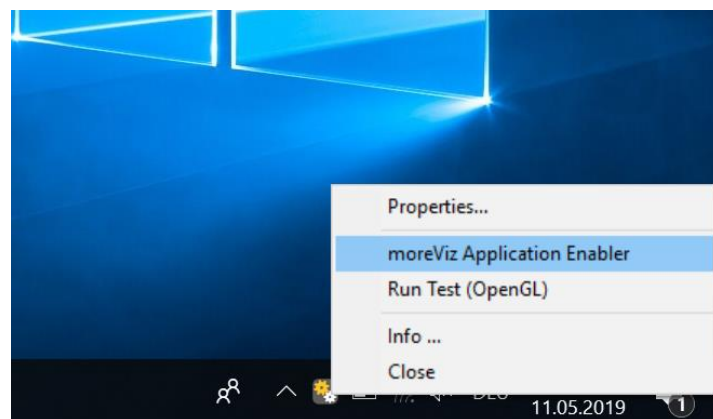


Abbildung 104: moreViz Anwendungsaktivierung

Im letzten Schritt müssen noch die Zugriffsrechte von moreViz festgelegt werden, damit die 3D-Daten aus der verwendeten Software extrahiert werden können. Unterstützt werden dabei, neben den häufig in der Fabrikplanung zum Einsatz kommenden Anwendungen Vistable Touch und Plant Simulation, viele weitere Softwarepakete wie beispielsweise Catia, SketchUp, Siemens NX, JT2GO, Creo und SimPack.

Dazu muss wieder die moreViz Server Control gestartet werden und auf das erscheinende Icon in der Taskleiste mit der rechten Maustaste geklickt und, wie in Abbildung 104 dargestellt, der „moreViz Application Enabler“ ausgewählt werden.

In dem anschließend erscheinenden Fenster können nun Softwarepakete dem Zugriffsbereich von moreViz hinzugefügt und mit dem Setzen des Häkchens bei „Enabled“ der Zugriff auf die 3D-Daten erlaubt werden.

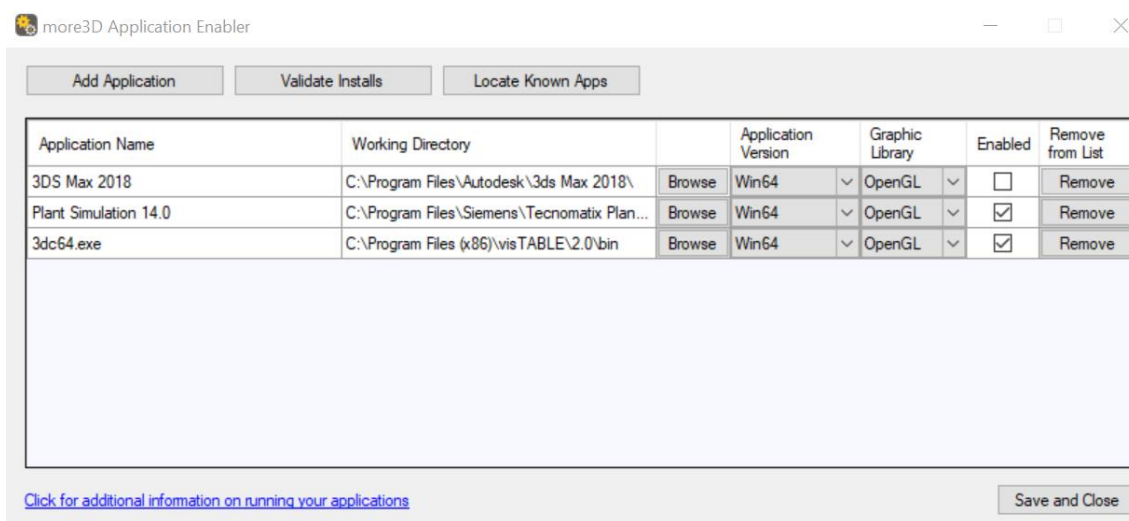


Abbildung 105: Anwendung hinzufügen

Ist die gewünschte Software nicht in dieser Liste vorhanden, kann über „Locate Known Apps“ das Standardverzeichnis aller unterstützen Programme automatisch durchsucht oder über „Add Application“ eine Anwendung, die nicht im Standardverzeichnis installiert wurde, manuell hinzugefügt werden, siehe Abbildung 106.

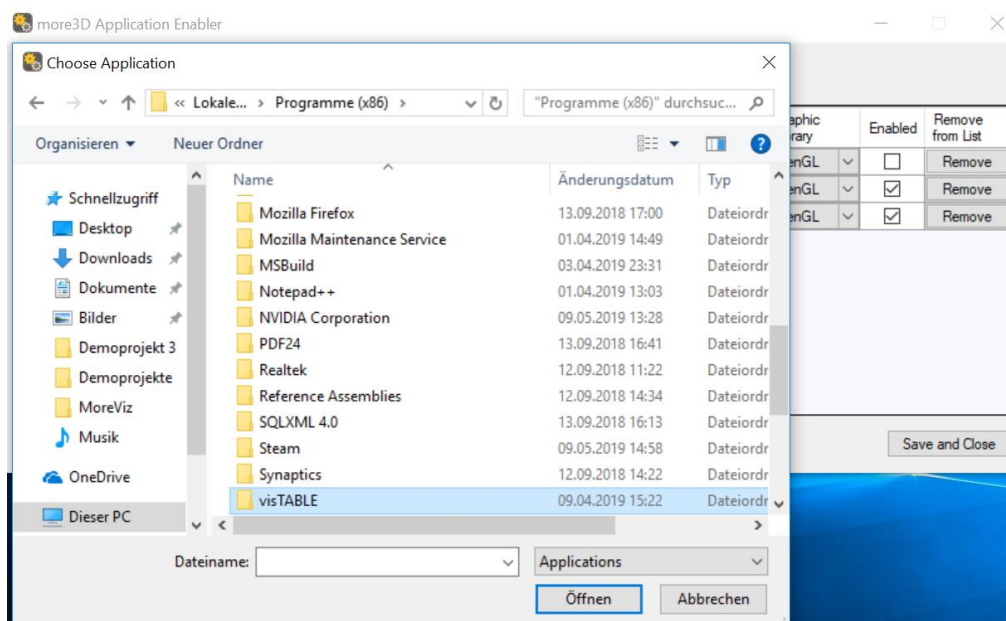


Abbildung 106: Vistable hinzufügen

Damit die 3D-Daten aus Vistable extrahiert werden können, muss von more3D.com noch das Vistable Support Package heruntergeladen und der „Vistable_OpenGL.Ink“ in das folgende Verzeichnis kopiert werden: „C:\ProgramFiles(x86)\visTABLE\2.0\bin“.

Nun muss noch eine Einstellung in Vistable vorgenommen werden, dazu zuerst Vistable und dann die neue Anwendung Vistable_OpenGL starten. Im Anschluss daran in dieser durch einen Klick links oben auf die drei Balken die Einstellungen von Vistable:OpenGL öffnen, siehe Abbildung 107.

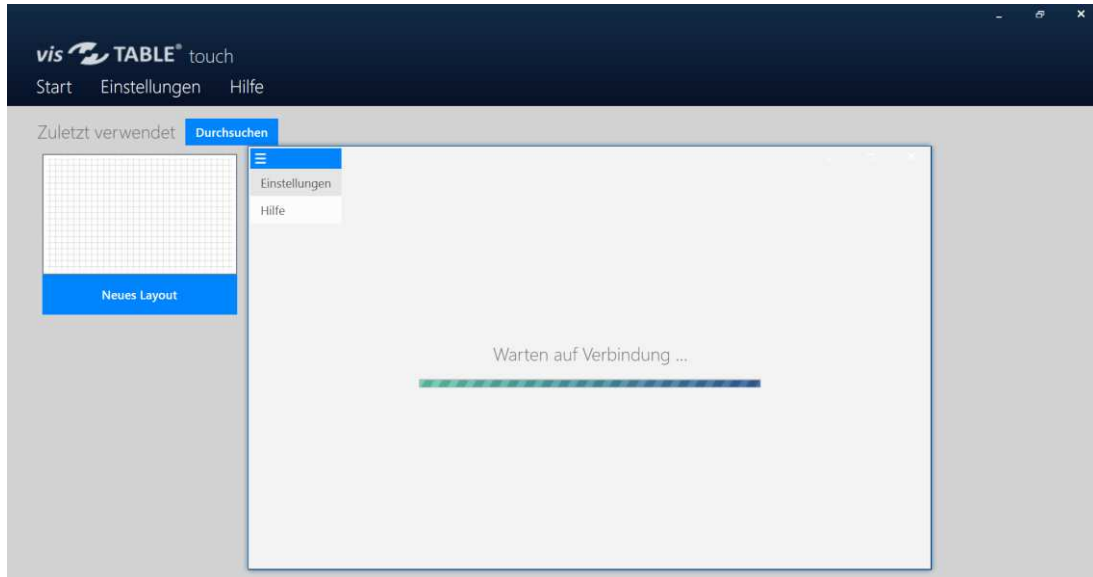


Abbildung 107: Vistable 3D Einstellungen

Abbildung 108 zeigt das Fenster mit den Einstellungen, in dem die Anzeige der Umgebung deaktiviert werden muss, damit die Grafikdaten ordnungsgemäß aus Vistable extrahiert werden können.



Abbildung 108: Umgebung anzeigen deaktivieren

Nun können alle laufenden Programme geschlossen werden und mit dem Hochfahren des Systems begonnen werden.

Hochfahren

Um eine reibungslose Funktionsweise der VR-Erfahrung zu gewährleisten, hat sich die folgende Reihenfolge beim Starten der jeweiligen Anwendungen als optimal herausgestellt.



Abbildung 109: Start des moreViz Servers

Falls beim Einrichten der Software das automatische Hochfahren beim Neustart von Windows deaktiviert wurde, muss immer erst die moreViz Server Control gestartet werden. Wird nach dem Hochfahren des Rechners nicht kurz das in Abbildung 109 dargestellte Fenster eingeblendet, ist ein manueller Start der Server Control erforderlich.

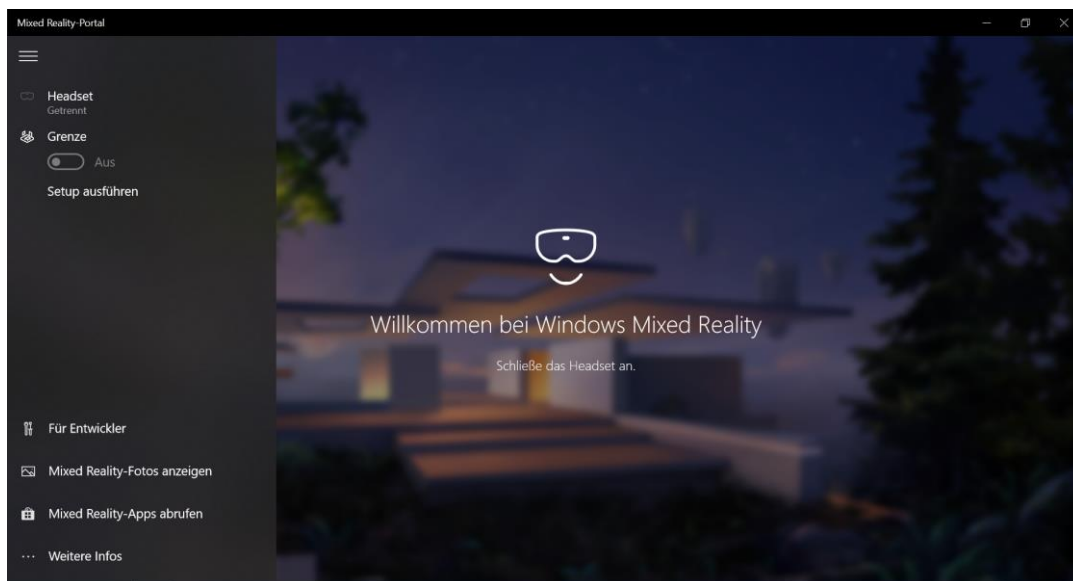


Abbildung 110: Starten des Windows Mixed Reality Portals

Im Anschluss daran wird das in Abbildung 110 dargestellte Windows Mixed Reality Portal hochgefahren und, abhängig davon, ob man mit dem VR-Emulator oder mit einem HMD die virtuelle Erfahrung starten möchte, der Entwicklermodus und das simulierte Headset am Rechner aktiviert oder die VR-Brille angeschlossen.

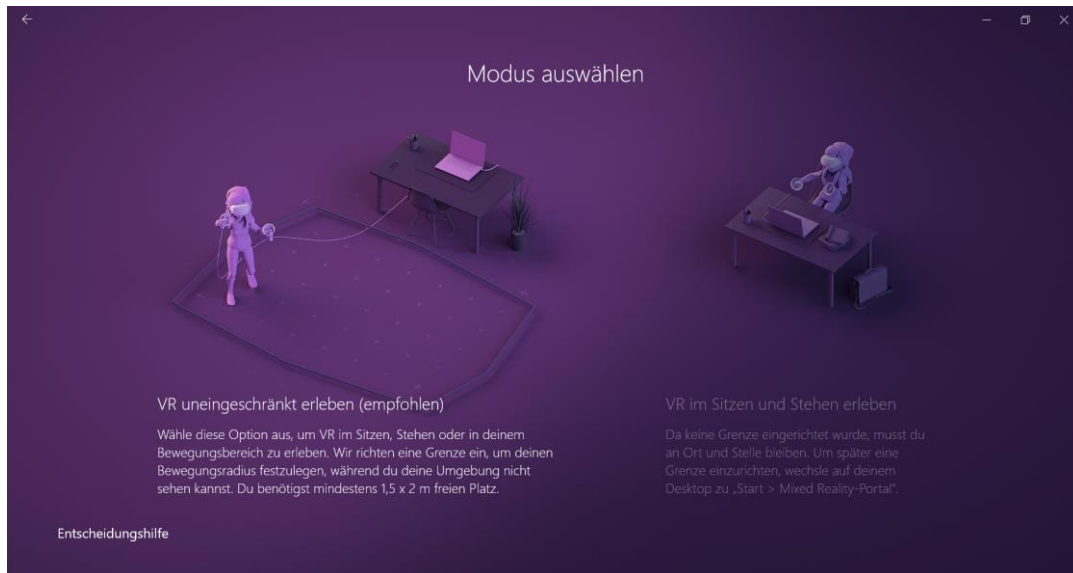


Abbildung 111: Einrichten der Raumgrenzen

Benutzt man ein HMD und verwendet dieses in einem Raum zum ersten Mal, ist eine Kalibrierung notwendig, falls, wie in Abbildung 111 dargestellt, VR uneingeschränkt verwendbar sein soll. Diese Einstellung ist jedenfalls zu empfehlen, da ansonsten nur Drehungen des Kopfes in der virtuellen Welt umgesetzt werden. Tatsächlich durchgeführte horizontale und vertikale Bewegungen werden bei Auswahl des Modus „VR im Stehen und Sitzen erleben“ nicht in die virtuelle Welt übernommen und auch das Herumgehen in den definierten Raumgrenzen ist nicht möglich.

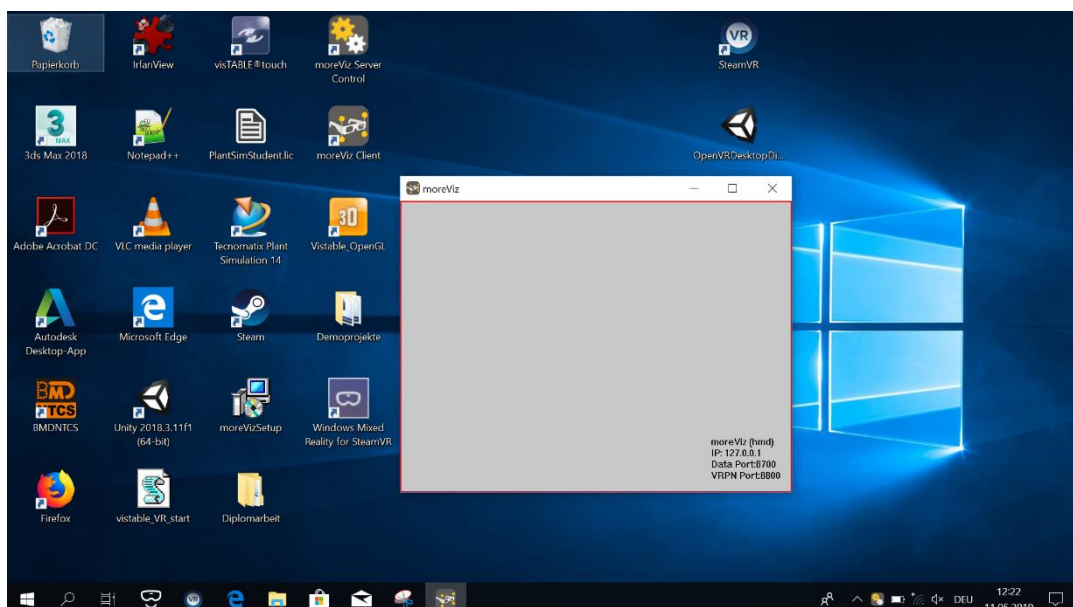


Abbildung 112: Start des moreViz VR Clients

Wählt man die empfohlene Option „VR uneingeschränkt erleben“ leitet einen das Mixed Reality Portal ausführlich durch die Konfiguration der Raumgrenzen. Wird der Modus „VR im Sitzen und Stehen erleben“ gewählt, ist keine weitere Konfiguration notwendig.

Nach dem erfolgreichen Einrichten des HMD im WMR-Portal muss der moreViz Client gestartet werden. Wurde die Einrichtung wie beschrieben durchgeführt, muss in dem erscheinenden Fenster in der rechten unteren Ecke „moreViz (hmd)“ stehen. Ist dies nicht der Fall, müssen die Client Einstellungen überprüft werden.

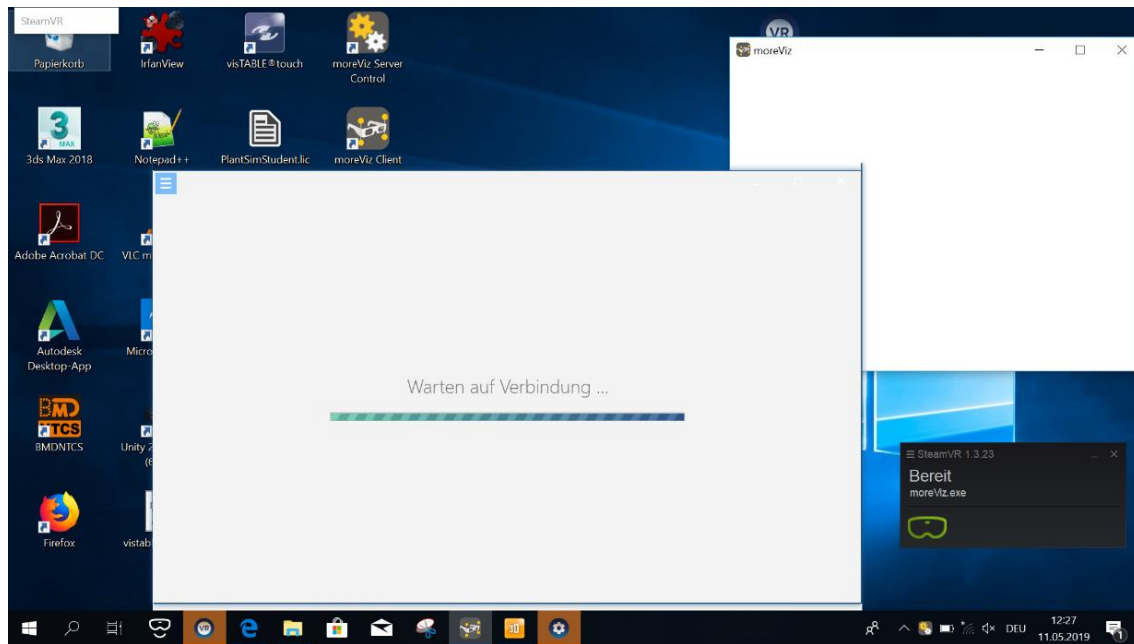


Abbildung 113: Start der Vistable Open GL Anwendung

Ein entscheidender Unterschied zum normalen Start von Vistable ist, dass zuvor der vorhin installierte 3D-Viewer „Vistable_OpenGL“ gestartet werden muss. Dieser initiiert, wie in Abbildung 113 in der Taskleiste zu sehen, auch das Hochfahren von „Windows Mixed Reality for SteamVR“ und „Steam VR“. Das erscheinende Pop-Up Fenster signalisiert die Bereitschaft vom HMD, sobald dieses mit SteamVR verbunden ist.

Im Anschluss daran kann, wie im normalen Betrieb, Vistable gestartet und ein Layout geöffnet werden. Nach wenigen Sekunden lädt die 2D-Ansicht und im Anschluss daran die 3D-Ansicht, welche dann sofort auch im moreViz Client und auch am HMD angezeigt wird.

Ab diesem Zeitpunkt kann man sich mit dem HMD uneingeschränkt in dem geplanten Layout, welches nun in der virtuellen Realität betrachtet werden kann, herumbewegen und moreViz vollumfänglich nutzen. Änderungen, die im Layout durchgeführt werden, sind sofort auch am HMD sichtbar, da die 3D-Grafik in Echtzeit aus „Vistable_OpenGL“ extrahiert und verarbeitet wird.

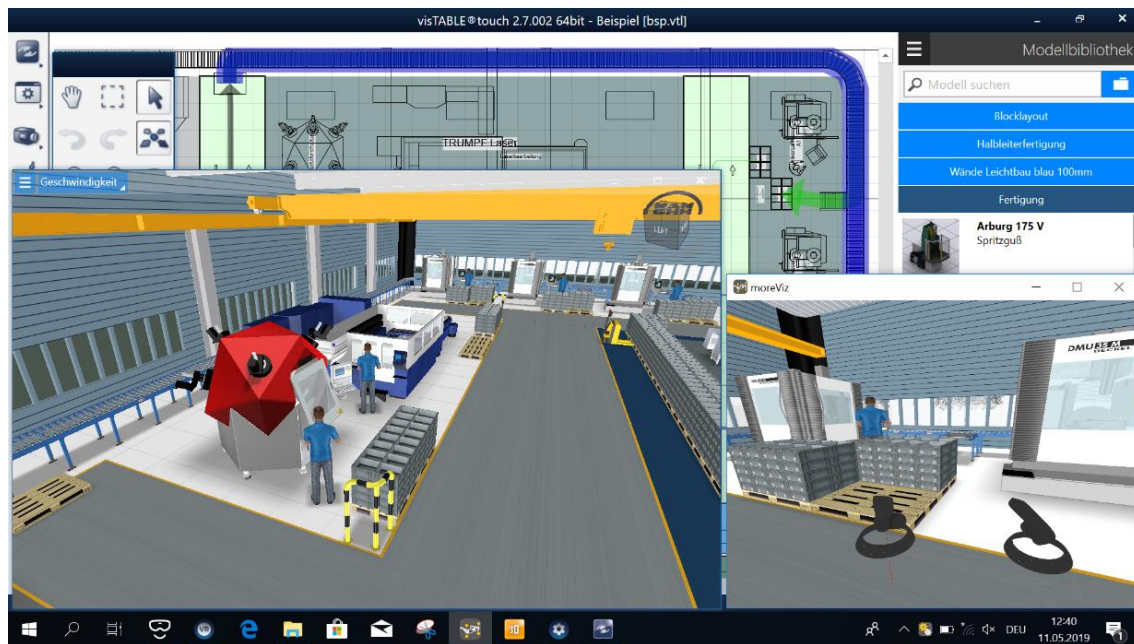


Abbildung 114: Start von Vistable

Treten an dieser Stelle Probleme auf, sind in Tabelle 18 bis Tabelle 19 die wichtigsten Hinweise zur Problembehandlung zusammengefasst.

Problem	Handlungsempfehlung
In der Realität durchgeführte Bewegungen werden in der virtuellen Welt nicht umgesetzt (Gehen, Bücken etc.)	Tritt dieses Problem auf, ist es wahrscheinlich, dass das Setup der Grenzen nicht ordnungsgemäß durchgeführt wurde oder der Modus „VR im Sitzen und Stehen erleben“ gewählt wurde. Zur Problembeseitigung alle Anwendungen schließen und im Mixed Reality Portal auf die drei Balken am oberen linken Bildschirmrand klicken und das Setup der Raumgrenzen erneut ausführen. Dazu am besten nach dem Betätigen von „Setup ausführen“ das HMD kurz aufsetzen und mit dem Controller den gewünschten Modus auswählen. Anschließend das Headset wieder absetzen und den Anweisungen am Bildschirm folgen. Danach sollten die Bewegungen in der realen mit denen in der virtuellen Welt übereinstimmen.
Gar kein, stark ruckelndes oder flackerndes Bild	Dies kann mehrere Ursachen haben. Wenn die Hardware des Rechners für VR nicht gerüstet ist, kann versucht werden, wie weiter oben unter Einrichtung beschrieben, die Pixeldichte des moreViz Clients herabzusetzen oder ein einfacheres 3D-Modell zu verwenden, um die Leistungsanforderungen an den Rechner zu senken. Weiters sollte in den Grafikeinstellungen überprüft werden, ob die dezidierte Grafikkarte standardmäßig für das Rendern verwendet wird und nicht der interne Grafik-Chip im Prozessor. Diese Einstellungen gegebenenfalls ändern.

Tabelle 18: Problembehandlung Vorgehensmodell 2 (Teil 1)

	Eine weitere Ursache könnte noch ein nicht ordnungsgemäß eingestecktes oder defektes HDMI Kabel bzw. ein defekter oder zu leistungsschwacher HDMI Port sein. Dazu am besten alle Steckverbindungen prüfen und verschiedene HDMI-Ports verwenden, bei Gelegenheit kann auch ein Adapter verwendet werden, um das USB- und das HDMI-Kabel beispielsweise an einen USC-C-Port anzuschließen.
Der moreViz Client minimiert sich ständig am Desktop	Damit bei Präsentationen oder Ähnlichem alle Teilnehmer die Ansicht der Person, die das HMD trägt, mitverfolgen können, am besten den Vollbildmodus von moreViz aktivieren. Dazu die rechte Maustaste im Fenster „moreViz Client“ drücken und „Full Screen“ wählen.
Bewegungsrichtung stimmt nicht mit der des Lasers überein	Die Bewegungsrichtung wurde mit dem Touchpad am Controller geändert. Um die Bewegungsrichtung wieder der Richtung des Lasers anzupassen, einfach am Touchpad des Controllers nach vorne drücken.

Tabelle 19: Problembehandlung Vorgehensmodell 2 (Teil 2)

6.2.3 Vorgehensmodell 3 – Plant Simulation-MoreViz-HMD

Das Vorgehensmodell drei, das dem zweiten sehr ähnlich ist, basiert auf 3D-Daten, welche mit Plant Simulation generiert wurden. Auch in diesem Fall liegt der Fokus auf der Echtzeitfähigkeit des Vorgehensmodelles, da ansonsten der größte Vorteil dieses Modelles, die VR-Visualisierung von Simulationen, nicht genutzt werden kann.

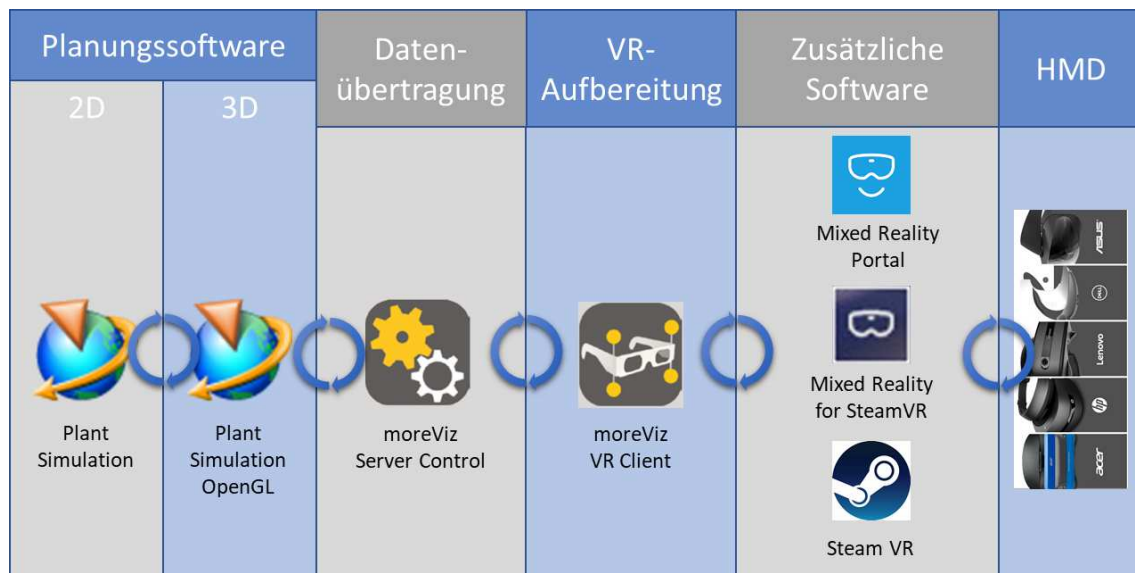


Abbildung 115: Vorgehensmodell 3

Deshalb wird auch in diesem Vorgehensmodell moreViz eingesetzt, da Plant Simulation, wie bereits in Kapitel 3.3 erwähnt, ebenfalls zu den unterstützten Anwendungsprogrammen gehört. Die notwendige Software ist, bis auf Plant Simulation anstatt Vistable und Vistable_OpenGL, identisch zu der in

Vorgehensmodell drei. Plant Simulation OpenGL muss nicht zusätzlich installiert werden, da es bereits in Plant Simulation integriert ist.

Abbildung 115 zeigt eine Übersicht über dieses dritte Vorgehensmodell, in dem ersichtlich wird, dass auch in diesem die vollständige Datendurchgängigkeit gegeben ist und alle durchgeführten Änderungen und programmierten Simulationen in Plant Simulation in Echtzeit in der virtuellen Welt visualisiert werden.

Aufgrund der starken Ähnlichkeit zu dem vorigen Vorgehensmodell ist auf den folgenden Seiten lediglich das Hochfahren des Systems sowie die Änderungen einer Plant Simulation Einstellung beschrieben, da die sonstige Vorgehensweise identisch zu der in Vorgehensmodell zwei ist.

Einrichtung

Die Vorgehensweise bei der Einrichtung von moreViz für Plant Simulation funktioniert analog der von Vistable. Lediglich der Download von „Vistable_OpenGL“ ist nicht notwendig und kann entfallen.

Es müssen allerdings Änderungen in Plant Simulation vorgenommen werden, welche im folgenden Abschnitt anhand der Version 14.1 demonstriert werden.

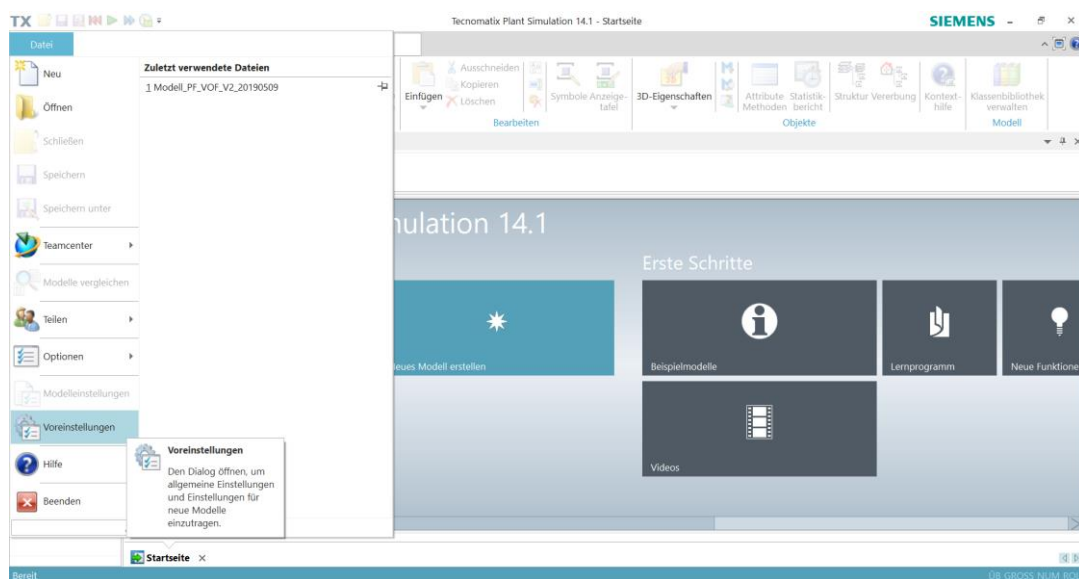


Abbildung 116: Voreinstellungen Plant Simulation

In den Voreinstellungen von Plant Simulation, die man über, wie in Abbildung 116 dargestellt, „Datei“→„Voreinstellungen“ erreicht, müssen Änderungen im Reiter „3D“ durchgeführt werden. Die Open_GL Version der Software muss 1.5 Vertex Buffer Objects geändert werden, um die Extraktion der 3D-Daten zu ermöglichen.

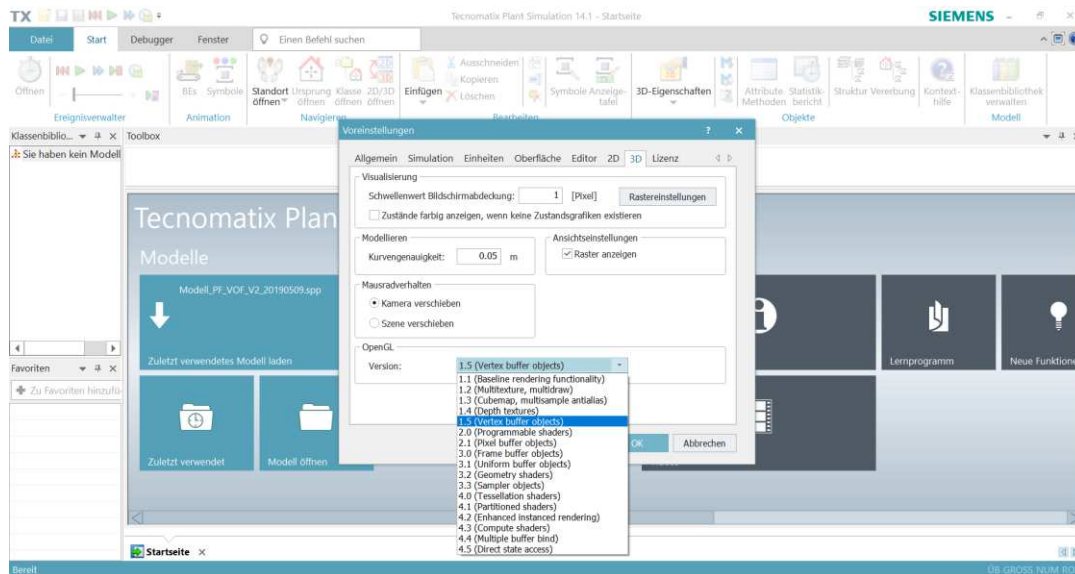


Abbildung 117: Open GL Version Einstellung

Nachdem die entsprechenden Änderungen durchgeführt wurden, wird Plant Simulation wieder geschlossen und moreViz der Zugriff ermöglicht. Dazu wird wieder, wie in Abbildung 104 beziehungsweise Abbildung 105 demonstriert, der „Application Enabler“ geöffnet und die gewünschte Version von Plant Simulation hinzugefügt.

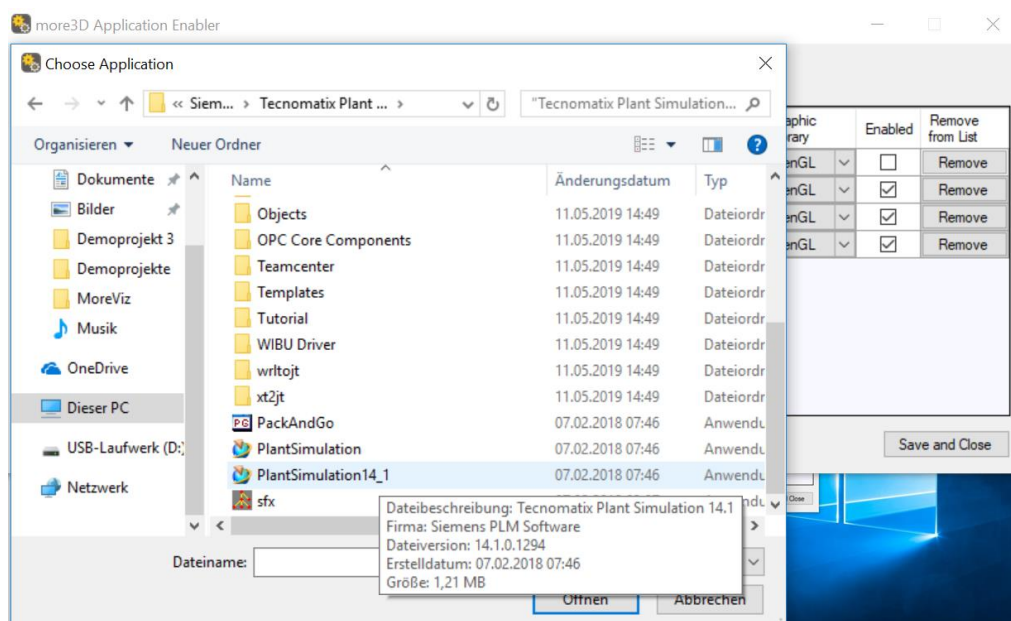


Abbildung 118: Plant Simulation hinzufügen

Falls die Software nicht automatisch gefunden wurde, kann diese wieder, wie in Abbildung 118, manuell hinzugefügt werden. Abschließend muss noch das Häkchen bei „Enabled“ gesetzt werden, damit moreViz Zugriff auf die 3D-Daten bekommt.

Hochfahren

Um ein Plant Simulation Modell in der virtuellen Welt betrachten zu können, kann ebenfalls fast exakt die Vorgehensweise wie bei Vistable angewendet werden. Der wesentliche Unterschied besteht wieder darin, dass nach dem Starten des „moreViz Clients“ nicht „Vistable_OpenGL“ hochgefahren werden muss, da die 3D-Daten direkt aus Plant Simulation extrahiert werden, was auch der Grund für die Änderungen der Einstellungen, welche im vorigen Absatz beschrieben wurden, ist.

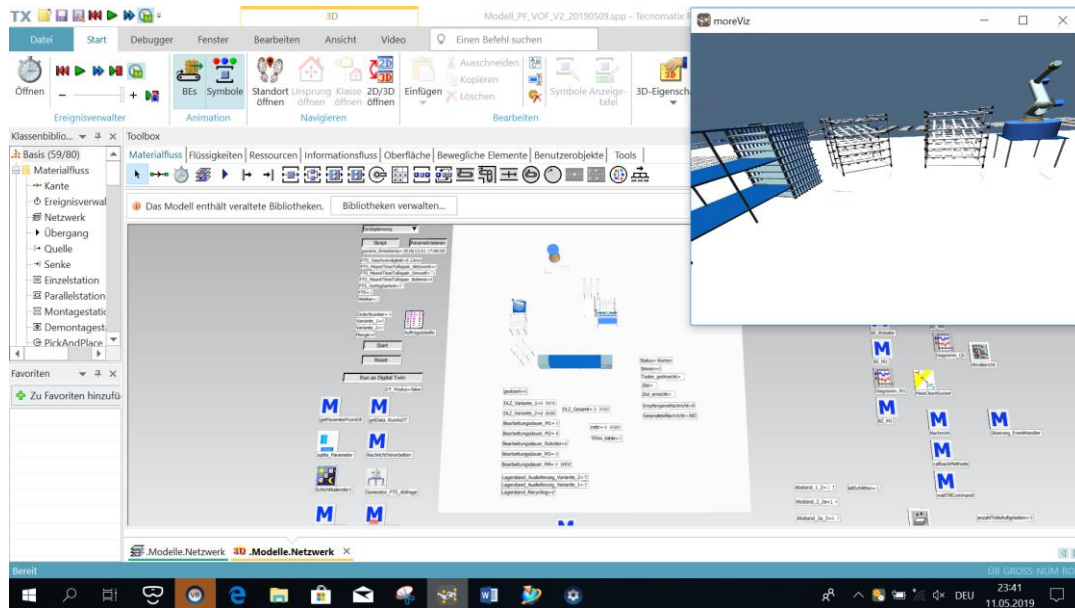


Abbildung 119: Starten von Plant Simulation

„SteamVR“ und die notwendige Zusatzsoftware bei Verwendung eines Windows Mixed Reality Headset („Windows Mixed Reality for SteamVR“) fährt dadurch, bei aktiviertem HMD, erst beim Starten von Plant Simulation hoch. Wurde das Modell fertig geladen und durch das rechts unten erscheinende PopUp-Fenster von SteamVR signalisiert, dass die Datenübertragung zwischen Rechner und HMD eingerichtet ist, kann das Modell in der virtuellen Welt betrachtet werden.

Änderungen im Layout und durchgeführte Simulationen werden, wie auch schon die Layoutänderungen in Vistable, in Echtzeit im moreViz Client und am Head Mounted Display visualisiert.

6.3 Bewertung der Vorgehensmodelle

In dem nun folgenden Absatz werden die entwickelten Modelle hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen bewertet und gegenübergestellt. Dazu wurden diese in einem Workshop Experten im Bereich der Fabrikplanung von Fraunhofer Austria ausführlich präsentiert, vorgeführt, diskutiert und anschließend einer Bewertung unterzogen.

Dabei wurde die in Tabelle 20 dargestellte Skala zur Bewertung der Erfüllung der Anforderungen festgelegt.

Bewertung	Bedeutung
5	Erfüllt die Anforderungen ohne Einschränkung
4	Erfüllt die Anforderungen mit kleinen Einschränkungen
3	Erfüllt die Anforderungen zum Teil
2	Erfüllt die Anforderungen nur mit sehr großen Einschränkungen
1	Erfüllt die Anforderungen überhaupt nicht

Tabelle 20: Bewertungsskala für Vorgehensmodelle

Der Erfüllungsgrad der definierten Anforderungen wurde ausführlich diskutiert und in den folgenden Tabellen festgehalten. Dabei wurde jedes Vorgehensmodell analysiert, eine Bewertung laut der definierten Skala vorgenommen und die ausschlaggebende Begründung ebenfalls festgehalten.

Bewertung von Vorgehensmodell 1: Factory Design Utilities – 3DS MAX – Unity – Head Mounted Display

Anforderungskategorie	Anforderung	Bewertung	Begründung
Planungssoftware	Software für die Erstellung der 3D-Modelle soll bereits im Einsatz sein	3	AutoCad und Inventor sind zwar im Einsatz, allerdings müsste Factory Design Utilities zusätzlich erworben werden
	Synchrone Erstellung des 2D-Layouts und des 3D-Modells	5	2D- und 3D- Layout können synchronisiert werden
	Vorhandene Modellbibliothek	4	Eine umfangreiche Modellbibliothek ist vorhanden, ist allerdings nicht immer ausreichend
	Geringer Aufwand für Erweiterung der Modellbibliothek	5	Eigene Objekte können problemlos hinzugefügt werden
Datenübertragung	Wenige bzw. einfache Schnittstellen	2	Es ist keine direkte Datenübertragung möglich, diese müssen vorher konvertiert werden und auch dann ist mit Datenverlust zu rechnen
	Echtzeitfähigkeit	1	Durch die notwendigen Konvertierungen besteht keine Möglichkeit für Echtzeitfähigkeit

Tabelle 21: Bewertung Vorgehensmodell 1 (Teil 1)

	Geringer Mehraufwand für Vorbereitung des 3D-Modelles	5	Das Inventor Modell kann ohne Änderungen übernommen werden
	Flexibilität hinsichtlich Software des 3D-Modelles	4	Durch die Flexibilität von Unity besteht grundsätzlich die Möglichkeit, 3D-Modelle aus vielen Quellen zu verarbeiten
Erstellung VR-Erfahrung	Ohne Programmierkenntnisse einsetzbar	1	Selbst mit diversen Toolkits ist eine zufriedenstellende VR-Erfahrung nur mit Programmierkenntnissen umsetzbar
	Adaptierbarkeit	4	Mit entsprechenden Programmierkenntnissen bestehen viele Möglichkeiten, die VR-Erfahrung an eigene Bedürfnisse anzupassen, durch das Fehlen der Verknüpfung mit den Ursprungsdaten bestehen trotzdem gewisse Einschränkungen
Einsatz VR-Erfahrung	Gute Qualität der VR-Darstellung	2	Durch die Konvertierungen nimmt auch die Qualität ab, die Qualität der Inventor Modelle ist wesentlich höher als die in VR
	Ausreichende Stabilität im Betrieb	5	Bei Tests lief die Software immer ausreichend stabil
	Flüssige Darstellung des VR-Modelles	5	Dadurch, dass keine Daten während des Betriebes extrahiert werden müssen, sind auch die Anforderungen an den Rechner geringer und die Darstellung ist flüssig
	Intuitive Bedienbarkeit	2	Die Bewegungen mit dem Motion Controller funktionieren nur sehr eingeschränkt
	Integrierte Funktionen	1	Es sind keine für die Fabrikplanung nützlichen Funktionen integriert, diese müssen selbst programmiert werden
	Volle Transportfähigkeit des Gesamtsystems	5	HMD und Rechner können problemlos transportiert werden

Tabelle 22: Bewertung Vorgehensmodell 1 (Teil 2)

Sonstige Anforderungen	Möglichst geringe Anforderungen an die Rechner-Hardware	4	Dadurch, dass keine Daten während des Betriebes extrahiert werden müssen, sind auch die Anforderungen an den Rechner geringer
	HMD Universalität	5	Da Unity universell einsetzbar ist, werden alle gängigen HMD unterstützt
	Geringe Kosten für Gesamtsystem	4	Factory Design Utilities und Unity müssen angeschafft werden, bei HMD besteht dafür die freie Auswahl, da alle unterstützt werden

Tabelle 23: Bewertung Vorgehensmodell 1 (Teil 3)

Bewertung von Vorgehensmodell 2: Vistable Touch – moreViz – Head Mounted Display

Anforderungskategorie	Anforderung	Bewertung	Begründung
Planungssoftware	Software für die Erstellung der 3D-Modelle soll bereits im Einsatz sein	5	Vistable ist unabhängig von VR schon länger im Einsatz und umfangreiches Know-how steht zur Verfügung
	Synchrone Erstellung des 2D-Layouts und des 3D-Modells	5	Aus dem 2D-Layout wird gleichzeitig automatisch das 3D-Layout aufgebaut
	Vorhandene Modellbibliothek	4	Eine umfangreiche Modellbibliothek ist vorhanden, ist allerdings nicht immer ausreichend
	Geringer Aufwand für Erweiterung der Modellbibliothek	5	Eigene Objekte können problemlos hinzugefügt werden
Datenübertragung	Wenige bzw. einfache Schnittstellen	5	Ist das System einmal eingerichtet und konfiguriert, können die Daten direkt aus Vistable_OpenGL extrahiert werden
	Echtzeitfähigkeit	5	Durch die automatisierten Schnittstellen werden Änderungen sofort in der virtuellen Welt realisiert

Tabelle 24: Bewertung Vorgehensmodell 2 (Teil 1)

	Geringer Mehraufwand für Vorbereitung des 3D-Modelles	5	Das 3D-Modell kann ohne Mehraufwand verwendet werden
	Flexibilität hinsichtlich Software des 3D-Modelles	3	Es werden zwar viele Programme unterstützt, GrAPPA und Factory Design Utilities aber noch nicht bzw. nur über Umwege
Erstellung VR-Erfahrung	Ohne Programmierkenntnisse einsetzbar	5	Es sind keine Programmierkenntnisse erforderlich, da das Programm eine funktionsfähige Lösung darstellt
	Adaptierbarkeit	2	Selbst können keine Änderungen vorgenommen werden, über more3D sind eventuell Anpassungen möglich
Einsatz VR-Erfahrung	Gute Qualität der VR-Darstellung	5	Die Qualität der VR-Darstellung entspricht bei den entsprechenden Einstellungen der des schon sehr guten Vistable 3D-Modelles
	Ausreichende Stabilität im Betrieb	5	Bei Tests lief die Software immer ausreichend stabil
	Flüssige Darstellung des VR-Modelles	5	Grundsätzlich lief die Darstellung flüssig, bei längerem Betrieb und entsprechend steigender Temperatur des aktuellen Rechners waren teilweise Verzögerungen zu bemerken, welche allerdings beim Einsatz VR-geeigneter Rechner nicht mehr auftreten werden
	Intuitive Bedienbarkeit	5	Mit einem Motion Controller kann man sich nach kurzer Einschulung selbstständig im Layout herumbewegen und auch die Menüführung ist sehr gut gestaltet
	Integrierte Funktionen	4	Einige nützliche Funktionen (Messen, Flaggen, Fly/Walk) sind bereits integriert, weitere Funktionen (Modelle verschieben, etwas markieren, Fotos erstellen etc.) würden die Einsatzmöglichkeiten noch erweitern

Tabelle 25: Bewertung Vorgehensmodell 2 (Teil 2)

Sonstige Anforderungen	Volle Transportfähigkeit des Gesamtsystems	5	HMD und Rechner können problemlos transportiert werden
	Möglichst geringe Anforderungen an die Rechner-Hardware	3	Mit dem aktuell verwendeten Rechner können nur kleine Modelle gerendert werden, größere werden nur unvollständig visualisiert
	HMD Universalität	5	Alle gängigen Headsets werden unterstützt
	Geringe Kosten für Gesamtsystem	3	Vistable wird bereits verwendet und bei den Headsets kann frei gewählt werden, moreViz muss allerdings neu angeschafft werden

Tabelle 26: Bewertung Vorgehensmodell 2 (Teil 3)

Bewertung von Vorgehensmodell 2: Plant Simulation – moreViz – Head Mounted Display

Anforderungskategorie	Anforderung	Bewertung	Begründung
Planungssoftware	Software für die Erstellung der 3D-Modelle soll bereits im Einsatz sein	5	Plant Simulation ist unabhängig von VR schon länger im Einsatz und umfangreiches Know-how steht zur Verfügung
	Synchrone Erstellung des 2D-Layouts und des 3D-Modells	4	Das 2D-Layout entspricht mehr einer Draufsicht auf das 3D-Layout und ist nur eingeschränkt verwendbar
	Vorhandene Modellbibliothek	3	Es sind nur wenige Standardobjekte in der vorhandene Bibliothek verfügbar
	Geringer Aufwand für Erweiterung der Modellbibliothek	3	Die Vorbereitung der Modelle und der Import in Plant Simulation ist deutlich aufwändiger als in den anderen beiden Vorgehensmodellen
Datenübertragung	Wenige bzw. einfache Schnittstellen	5	Ist das System einmal eingerichtet und konfiguriert, können die Daten direkt aus Plant Simulation extrahiert werden

Tabelle 27: Bewertung Vorgehensmodell 3 (Teil 1)

	Echtzeitfähigkeit	5	Durch die automatisierten Schnittstellen werden Änderungen sofort in der virtuellen Welt realisiert
	Geringer Mehraufwand für Vorbereitung des 3D-Modelles	5	Das 3D-Modell kann ohne Mehraufwand verwendet werden
	Flexibilität hinsichtlich Software des 3D-Modelles	3	Es werden zwar viele Programme unterstützt, GrAPPA und Factory Design Utilities aber noch nicht bzw. nur über Umwege
Erstellung VR-Erfahrung	Ohne Programmierkenntnisse einsetzbar	5	Es sind keine Programmierkenntnisse erforderlich, da das Programm eine funktionsfähige Lösung darstellt
	Adaptierbarkeit	2	Selbst können keine Änderungen vorgenommen werden, über more3D sind eventuell Anpassungen möglich
Einsatz VR-Erfahrung	Gute Qualität der VR-Darstellung	4	Die Qualität der VR-Darstellung entspricht bei den entsprechenden Einstellungen der von Plant Simulation, die 3D-Modelle in Plant Simulation sind teilweise aber nicht so detailliert
	Ausreichende Stabilität im Betrieb	5	Bei Tests lief die Software immer ausreichend stabil
	Flüssige Darstellung des VR-Modelles	5	Grundsätzlich lief die Darstellung flüssig, speziell ohne Simulationen konnten die 3D-Modelle problemlos gerendert werden, bei Bewegungssimulationen allerdings reichte in manchen Fällen die Leistung des Rechners nicht aus, beim Einsatz VR-gerechter Rechner sollte das allerdings nicht mehr auftreten

Tabelle 28: Bewertung Vorgehensmodell 3 (Teil 2)

	Intuitive Bedienbarkeit	5	Mit einem Motion Controller kann man sich nach kurzer Einschulung selbstständig im Layout herumbewegen und auch die Menüführung ist sehr gut gestaltet
	Integrierte Funktionen	4	Einige nützliche Funktionen (Messen, Flaggen, Fly/Walk)) sind bereits integriert, weitere Funktionen (Start/Stop Simulation etc.) würden die Einsatzmöglichkeiten noch erweitern
Sonstige Anforderungen	Volle Transportfähigkeit des Gesamtsystems	5	HMD und Rechner können problemlos transportiert werden
	Möglichst geringe Anforderungen an die Rechner-Hardware	3	Mit dem aktuell verwendeten Rechner können nur kleine Modelle gerendert werden, größere werden nicht visualisiert
	HMD Universalität	5	Alle gängigen Headsets werden unterstützt
	Geringe Kosten für Gesamtsystem	2	Plant Simulation wird bereits verwendet und bei den Headsets kann frei gewählt werden, moreViz und eventuell eine weitere Plant Simulation Lizenz müssen allerdings neu angeschafft werden

Tabelle 29: Bewertung Vorgehensmodell 3 (Teil 3)

In Tabelle 30 ist eine Zusammenfassung der Bewertung aller Vorgehensmodelle dargestellt. Darin ist ersichtlich, dass besonders das zweite Vorgehensmodell einen großen Teil der Anforderungen sehr gut erfüllt. Als größte Schwächen von diesem wurden, neben den hohen Kosten für das Gesamtsystem und der Anforderungen an die Hardware, die nur bedingt vorhandene Flexibilität hinsichtlich der Fabrikplanungssoftware sowie die eingeschränkte Adaptierbarkeit der VR-Software identifiziert.

Auch das Vorgehensmodell drei erreicht im Schnitt einen sehr hohen Wert hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen, obwohl die Darstellungsqualität nicht optimal und die Kosten für Software aufgrund des Einsatzes von Plant Simulation noch höher sind. Da dieses Vorgehensmodell allerdings Simulationen, im speziellen Bewegungssimulationen, ermöglicht, wird auch dieses Modell im folgenden Kapitel einem Praxistest unterzogen.

Das Vorgehensmodell eins, das zwar hohe Flexibilität bietet und die geringsten Kosten verursacht, dafür aber fortgeschrittene Programmierkenntnisse voraussetzt und die Echtzeit-Datenübertragung aus der Fabrikplanungssoftware verhindert, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht mehr weiter untersucht.

Anforderungs-kategorie	Anforderung	Vorgehens- modell 1	Vorgehens- modell 2	Vorgehens- modell 3
Planungs- software	Software für die Erstellung der 3D-Modelle soll bereits im Einsatz sein	3	5	5
	Synchrone Erstellung des 2D-Layouts und des 3D-Modells	5	5	4
	Vorhandene Modellbibliothek	4	4	3
	Geringer Aufwand für Erweiterung der Modellbibliothek	5	5	3
Daten- übertragung	Wenige bzw. einfache Schnittstellen	2	5	5
	Echtzeitfähigkeit	1	5	5
	Geringer Mehraufwand für Vorbereitung des 3D-Modelles	5	5	5
	Flexibilität hinsichtlich Software des 3D-Modelles	4	3	3
Erstellung VR- Erfahrung	Ohne Programmierkenntnisse einsetzbar	1	5	5
	Adaptierbarkeit	4	2	2
Einsatz VR-Erfahrung	Gute Qualität der VR-Darstellung	2	5	4
	Ausreichende Stabilität im Betrieb	5	5	5
	Flüssige Darstellung des VR-Modelles	5	5	5
	Intuitive Bedienbarkeit	2	5	5
	Integrierte Funktionen	1	4	4
sonstige An- forderungen	Volle Transportfähigkeit des Gesamtsystems	5	5	5
	Möglichst geringe Anforderungen an die Rechner-Hardware	4	3	3
	HMD Universalität	5	5	5
	Geringe Kosten für Gesamtsystem	4	3	2
	Mittelwert von den Erfüllungsgraden der Anforderungen	3,53	4,42	4,11

Tabelle 30: Vergleich der Vorgehensmodelle

7 Praxiseinsatz und Auswertung

In diesem Kapitel werden die am besten bewerteten Vorgehensmodelle einem Praxistest unterzogen, um deren Funktionstauglichkeit unter Beweis zu stellen und den Einsatz von Virtual Reality zur Visualisierung von Planungsergebnissen im Unternehmen zu demonstrieren.

Danach werden die Ergebnisse einer Befragung über den Einsatz von Virtual Reality in der Fabrikplanung analysiert, welche mit einem 5-seitigen Fragebogen im Anschluss an die jeweiligen Demonstrationen der Use Cases durchgeführt wurde. Ergänzend zu der Analyse der Fragebögen werden noch Experteninterviews durchgeführt, mit deren Hilfe noch detailliertere Informationen über VR und den daraus resultierenden Möglichkeiten und Chancen, aber auch die noch bevorstehenden Herausforderungen für eine erfolgreiche Integration im Fabrikplanungsprozess, gesammelt werden sollen.

7.1 Praxiseinsatz in Use Cases

In diesem Kapitel werden jeweils kurz die Use Cases in der Planungssoftware vorgestellt und die VR-Visualisierung demonstriert.



Abbildung 120: Aufbau Demonstration Use Cases

Abbildung 120 zeigt den Aufbau bei der Demonstration von den Use Cases. Verwendet wurde dabei das Windows Mixed Reality Headset Lenovo Explorer, ein Motion Controller sowie ein Rechner, der per USB und HDMI Kabel mit der Brille verbunden war.

Die Raumgrenzen wurden dabei aufgrund der beschränkten Platzverhältnisse mit etwa 1,5x3,5m eingerichtet. In diesem Raum konnten sich die Personen bei der Demonstration frei in der Virtuellen Welt bewegen. Um weitere Distanzen zurückzulegen, musste der Joystick am Motion Controller verwendet werden. Mit der Joystick-Bewegung der Person bewegten sich gleichzeitig auch die kalibrierten Raumgrenzen mit.

7.1.1 Use Case Bürogebäude

Den ersten Anwendungsfall stellt die Planung eines mehrstöckigen Bürogebäudes dar, in dem alle nicht tragenden Wände entfernt werden können und somit viele mögliche Varianten zur Debatte stehen.

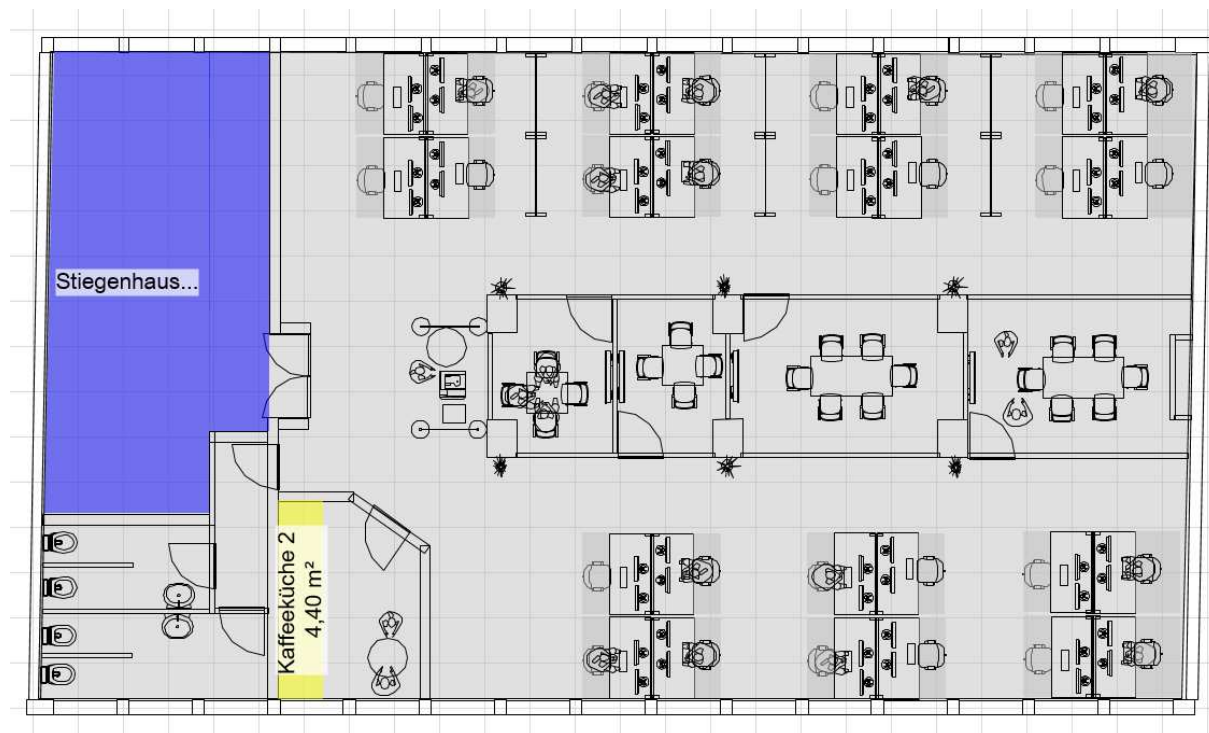


Abbildung 121: Grundriss Use Case Bürogebäude

In Abbildung 121 ist der Grundriss einer Variante eines Stockwerkes dargestellt. Restriktionen stellen darin nur das Stiegenhaus, die WC-Anlagen und die 6 tragenden Säulen in der Mitte der Räumlichkeiten dar. Ein wesentliches Ziel war es dabei, möglichst viele Arbeitsplätze bei trotzdem angenehmer Arbeitsatmosphäre zu planen.

Um die Darstellungsqualität in Vistable mit der der VR-Visualisierung des Bürogebäudes vergleichen zu können, ist in Abbildung 122 ein kleiner Ausschnitt der Vistable 3D-Ansicht dargestellt. Das 2D- als auch das 3D-Modell wurden dabei vollständig mit der in der Planungssoftware verfügbaren Modellbibliothek erstellt. Lediglich der Gebäudegrundriss wurde aus AutoCad importiert.



Abbildung 122: 3D-Ansicht Use Case Bürogebäude

Die in Abbildung 123 bis Abbildung 125 dargestellte VR-Visualisierung wurde dabei, neben dem 2D- und 3D-Layout, als Unterstützung in der Planung eingesetzt. Mittig im Bild zu sehen ist immer ein Motion Controller, der für die Bewegung im Layout als auch für die Nutzung der integrierten Funktionen verwendet wird.



Abbildung 123: VR-Ansicht Büro-Arbeitsplatz

Der rote Laserstrahl, der ein und ausgeblendet werden kann, dient einerseits als Orientierungshilfe, in welche Richtung man sich beim Betätigen der Taste am Motion Controller mit dem Zeigefinger bewegen wird. Andererseits kann er auch als Laserpointer zum Einsatz kommen, um das Planungsteam, das am Rechner dasselbe

Bild wie die Person mit dem HMD zu sehen bekommt, auf gewisse Sachen aufmerksam zu machen.

Dies ist besonders hilfreich, wenn beispielsweise Objekte entfernt, ausgetauscht oder verschoben werden müssen, da man dadurch der am Rechner sitzenden Person klare Anweisungen erteilen kann, welche Änderungen in Vistable durchgeführt werden sollen.



Abbildung 124: VR-Ansicht Besprechungsraum

Durch die stereoskopische Darstellung und die dadurch entstehende Tiefenwirkung können unter anderem Räumlichkeiten besser gestaltet werden. So ist es beispielsweise schwierig abzuschätzen, wie der in Abbildung 124 dargestellte Besprechungsraum in der Realität wirken wird und ob der darin eingeplane Tisch für 6 Personen zu klein oder zu groß ist.

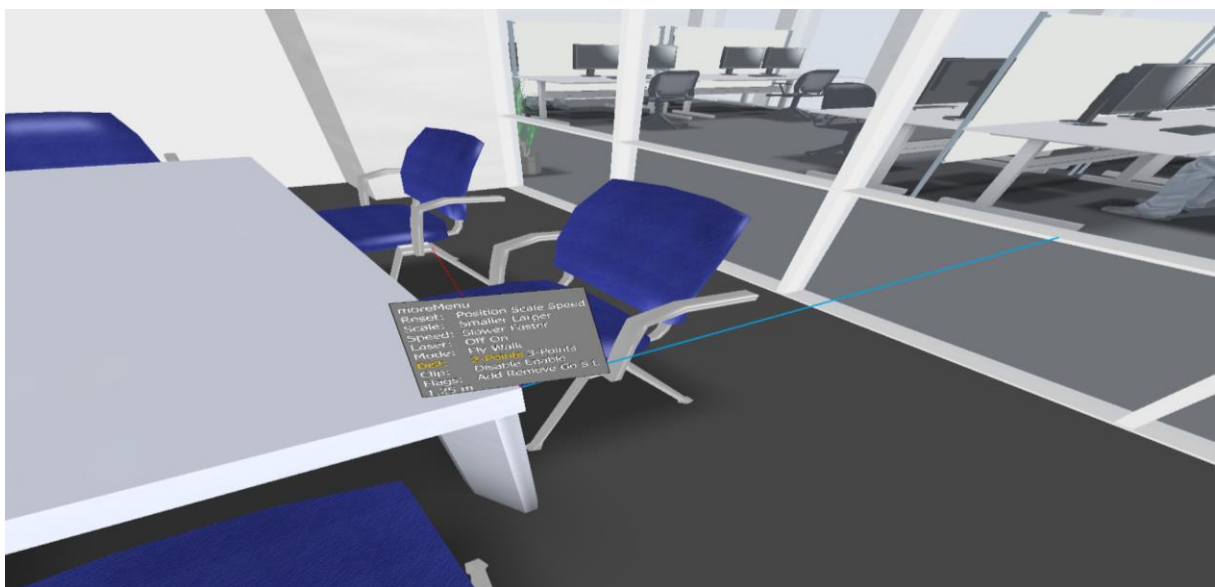


Abbildung 125: VR-Ansicht einer Abstandsmessung

Mit dem HMD ist die Darstellung näher an der Realität und das geplante Layout kann mit VR-Unterstützung validiert werden. Ist man bei Abständen oder Ähnlichem trotzdem unsicher oder muss gesetzliche Bestimmungen oder sonstige Anforderungen einhalten, kann, wie in Abbildung 125 dargestellt, die integrierte Messfunktion zur Prüfung verwendet werden. Diese wird über das moreViz Menü aufgerufen, um Abstände zwischen zwei oder drei Punkten zu messen.



Abbildung 126: VR-Ansicht Vogelperspektive Büro

Will man sich in der virtuellen Welt einen Überblick über das geplante Layout verschaffen, kann man über dieses Menü vom „Walk“ in den „Fly“ Modus wechseln und ist dadurch nicht mehr an die konfigurierte Höhe gebunden.

7.1.2 Use Case Beispielfabrik

In einem weiteren Use Case wurde die Beispielfabrik aus Vistable in der virtuellen Welt untersucht, da diese einen mittleren Komplexitätsgrad aufweist und von more3d als Test- beziehungsweise Demonstrationsobjekt empfohlen wird.

In dieser Fabrik ist im linken Teil ein kleiner Lagerbereich, von dem eine Rollenbahn Material zu den Fertigungsstationen befördert. Im unteren Bereich sind zusätzlich drei Montagestationen untergebracht, wodurch viele in der Fabrikplanung häufig vorkommende Objekte dargestellt sind. Das Layout besteht wieder vollständig aus der in Vistable integrierten Modellbibliothek.

Das Modell konnte allerdings, aufgrund der Größe beziehungsweise der vielen Objekte, vom verwendeten Rechner nicht vollständig in der virtuellen Welt dargestellt werden. Das linke Drittel des dargestellten Layouts, also der Lagerbereich und Teile des Gebäudes, wurde nur teilweise visualisiert.

In Abbildung 127 ist das 2D-Layout der im vorigen Absatz beschriebenen Beispielfabrik dargestellt. In hellgrün sind dabei die Verkehrswege und in dunkelblau die Materialflüsse abgebildet.

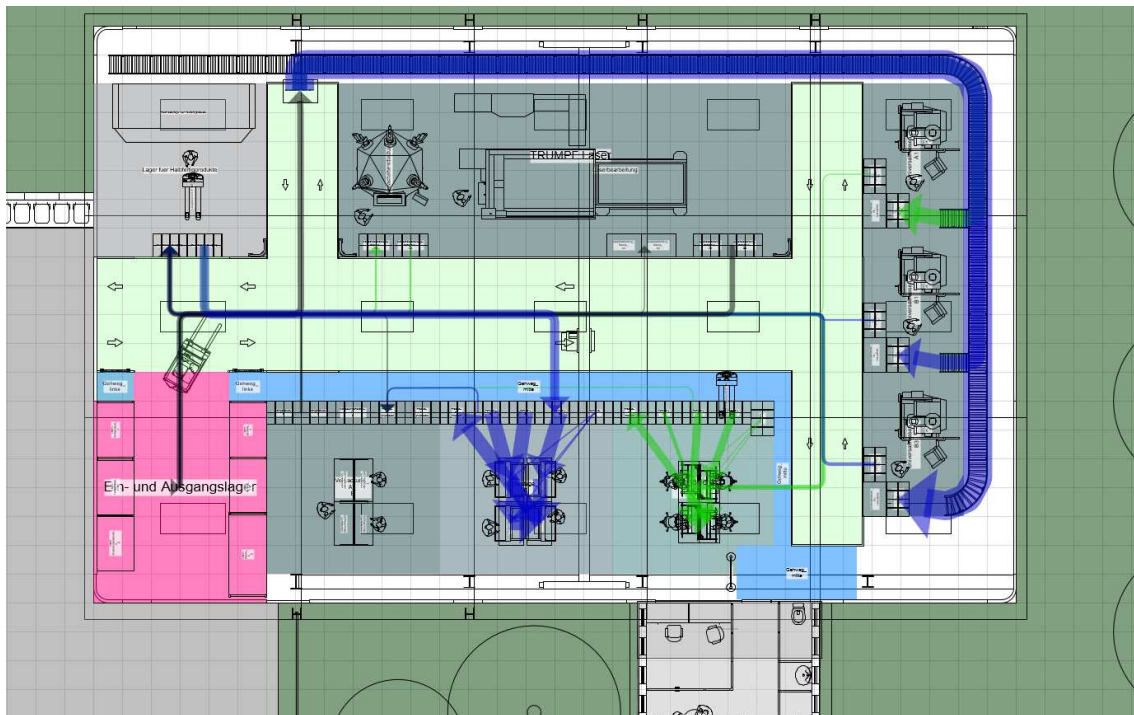


Abbildung 127: Grundriss Use Case Beispielfabrik

Abermals ist, zum Vergleich der Darstellungsqualität des 3D-Layouts mit der VR-Visualisierung, in Abbildung 128 die Vistable 3D-Ansicht abgebildet. Auf der rechten Seite sind dabei die Montagestationen und gegenüber sowie dahinter die Fertigungsanlagen zu sehen.



Abbildung 128: 3D-Ansicht Use Case Beispielfabrik

Bei komplexeren Objekten ist es hilfreich, sich zuerst von oben einen Überblick über das Layout zu verschaffen. Gerade aus dieser Perspektive wäre gegebenenfalls die

Einblendung von Materialflüssen interessant, da moreViz allerdings nur die Daten der 3D-Ansicht extrahiert, ist dies, zumindest mit der aktuellen Version, nicht möglich. Der eingeblendete Laser erweist sich auch in solchen Situationen zur Vorstellung eines geplanten Layouts als sehr hilfreich.



Abbildung 129: VR-Ansicht Vogelperspektive Fabrik

Um Objekte aus der Nähe betrachten zu können, zeigt man einfach mit dem Laserstrahl auf diese und drückt die Bewegungstaste am Motion-Controller. Abbildung 130 zeigt eine Montagestation aus der Nähe, bei der man in der virtuellen Welt beispielsweise untersuchen kann, wie einzelne Objekte vom Arbeitsplatz aus zu erreichen sind und somit eine Beurteilung ermöglicht, ob ein Arbeitsplatz ergonomisch gestaltet ist. Auch eine Schulung von Mitarbeitern an geplanten, aber noch nicht realisierten Arbeitsplätzen, ist in so einem Fall sehr gut vorstellbar.



Abbildung 130: VR-Ansicht Fabrik Montageplatz

Die Messfunktion erweist sich auch in diesem Fall wieder als sehr nützlich, da damit einfach und unkompliziert Abstände, Kisten oder Paletten abgemessen werden können. Der stereoskopische Effekt kam besonders bei den in Abbildung 131 dargestellten Kisten zu Geltung und die Darstellung war sehr plastisch und realitätsnah, was allerdings auf Bildern natürlich nicht zu erkennen ist.

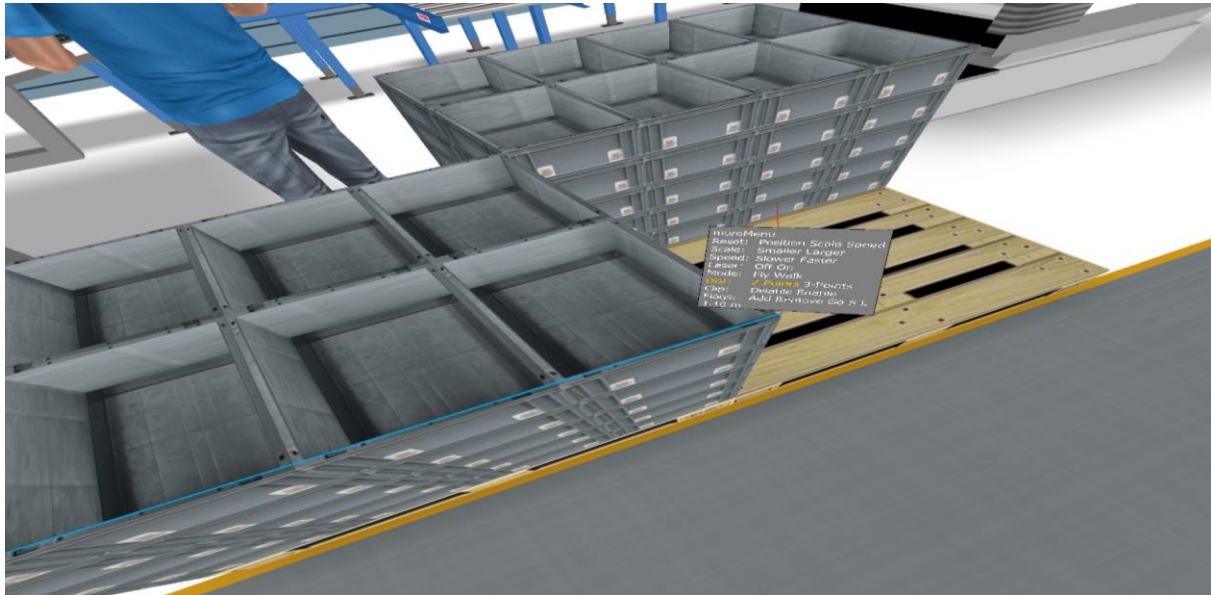


Abbildung 131: VR-Ansicht Längenmessung

Zusätzlich können über das moreViz Menü Flaggen an bestimmte Stellen gesetzt werden. Diese können beispielsweise an den Startpunkt oder an kritische beziehungsweise besonders interessante Stellen gesetzt werden, damit man selbst oder die Person, die das HMD als nächstes verwendet, per Knopfdruck wieder zu diesen springen kann.

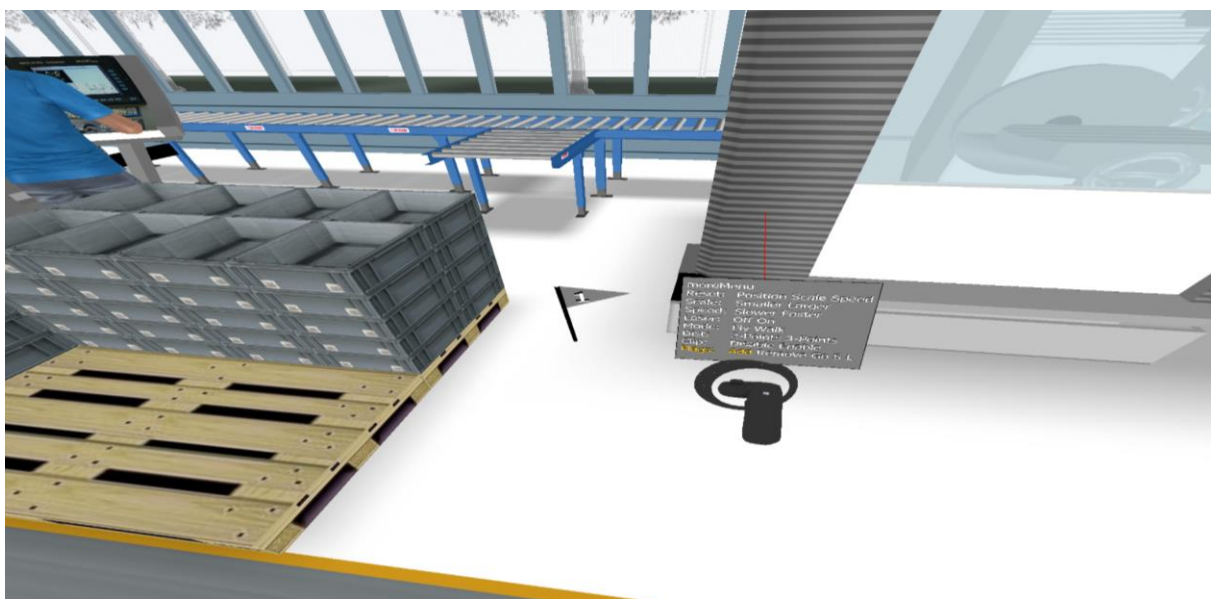


Abbildung 132: VR-Ansicht Flagge setzen

7.1.3 Use Case Pilotfabrik TU Wien

Im folgenden Use Case, in dem ein Plant Simulation Modell der Pilotfabrik der TU Wien verwendet wird, das im Zuge der Erstellung eines Digital Twin des realen Modells in der Seestadt Aspern entstanden ist, wird das Vorgehensmodell 3 validiert und demonstriert.

Abbildung 133 zeigt das vereinfachte Modell eines Teiles der Pilotfabrik, das in diesem Anwendungsfall für die VR-Visualisierung verwendet wird. Darin werden auch Bewegungssimulationen der Werker, des links im Bild befindlichen Roboters sowie eines fahrerlosen Transportsystems visualisiert.

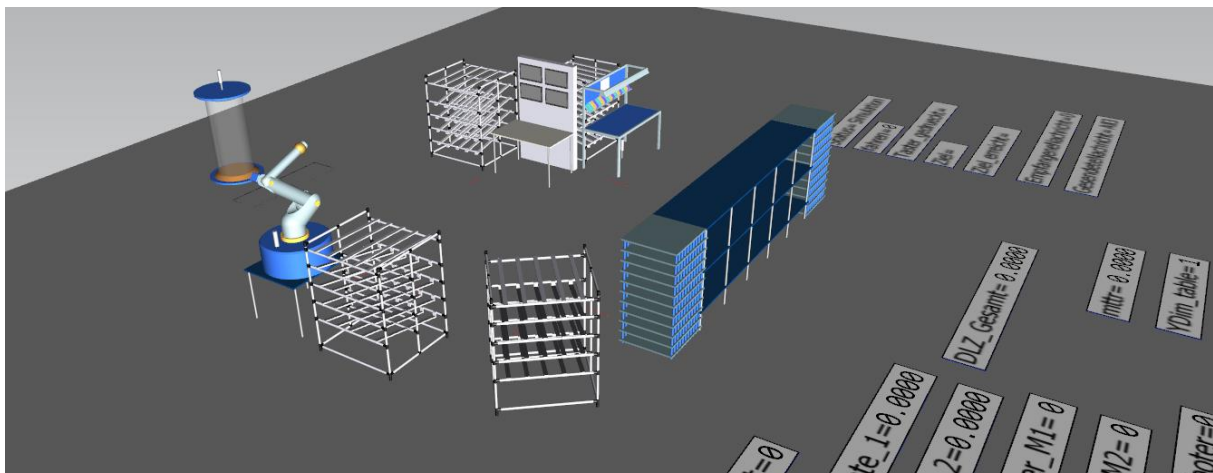


Abbildung 133: 3D-Ansicht Use Case Pilotfabrik TU Wien

Die Steuerung als auch die verwendbaren Funktionen sind, nach dem Einrichten und Hochfahren der Software, exakt dieselben wie in dem Vorgehensmodell, in dem Vistable als Planungssoftware verwendet wird. In Abbildung 134 ist die VR-Darstellung des obigen Modells abgebildet, in dem bereits ersichtlich wird, dass die Darstellungsqualität etwas schlechter als in Vistable ist.

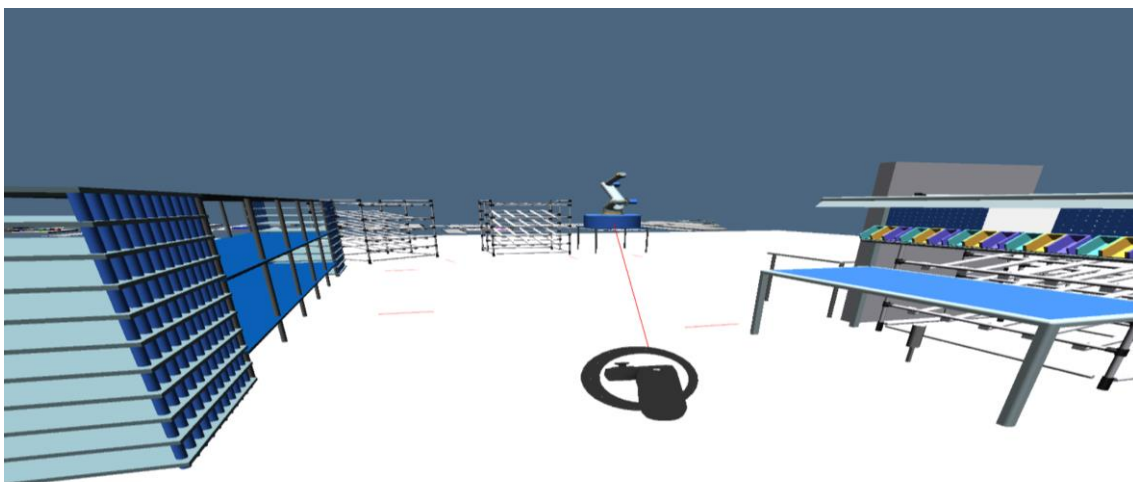


Abbildung 134: VR-Ansicht TU Wien Pilotfabrik

Der große Vorteil bei dem Vorgehensmodell mit Plant Simulation ist allerdings, dass Simulationen, also beispielsweise die Bewegungen von Maschinen, Roboter, Werkern oder auch von Materialien und Produkten visualisiert werden können. So ist es möglich, in der Fabrik oder an Arbeitsplätzen Wege zu visualisieren, Kollisionen zu entdecken und Produkte in der virtuellen Welt zu verfolgen.

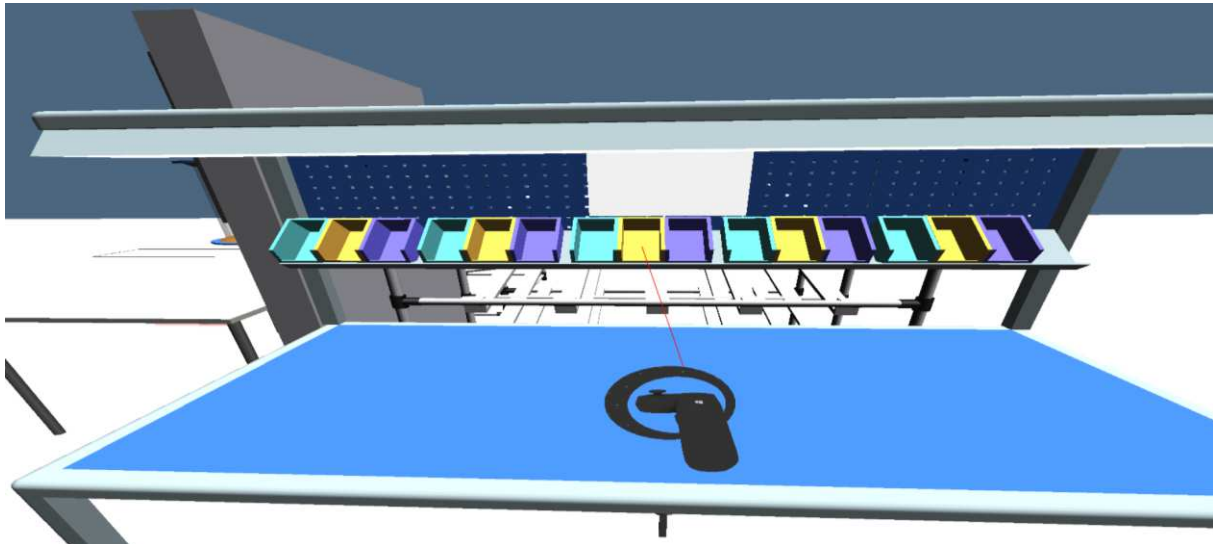


Abbildung 135: VR-Ansicht TU Wien Pilotfabrik Montageplatz

Der in Abbildung 135 dargestellte Montageplatz kann ebenfalls wieder hinsichtlich ergonomischer Gestaltung untersucht und bewertet werden und für Schulungen in der virtuellen Welt verwendet werden. Besonders an Arbeitsplätzen, an denen Roboter beziehungsweise Maschinen mit Menschen gemeinsam arbeiten, wäre eine solche Schulung zum Beispiel aus sicherheitstechnischen Gründen sinnvoll, um später Unfälle durch Kollisionen oder Ähnliches zu vermeiden.

7.1.4 Use Case Roboterzelle

Um Roboter und die Möglichkeiten einer Bewegungssimulation noch weiter zu untersuchen, wird im folgenden Use Case eine Roboterzelle von Steffen Bangsow, welche kostenlos von seiner Homepage²⁹¹ downloadbar ist, in der virtuellen Welt visualisiert.

Diese besteht, wie in Abbildung 136 dargestellt, im wesentlichen aus 3 Robotern, einer Quelle und einer Senke sowie dem zugehörigen Sicherheitszaun. Die Roboter bewegen dabei die kleinen, gelb dargestellten Bauteile und übergeben diese an den nächsten Roboter, bis das Produkt von links nach rechts gewandert ist.

Nach dem Hochfahren der moreViz Server Control, dem VR-Client sowie Plant Simulation wird die Roboterzelle, wie in Abbildung 137 bis Abbildung 139 dargestellt,

²⁹¹ https://www.bangsow.eu/suche_kategorie.php?kategorie=7.

in der virtuellen Welt visualisiert. Die Darstellungsqualität der Objekte in Plant Simulation und damit auch in der Virtual Reality ist zwar besser als im vorigen Modell, trotzdem erscheinen die Objekte aus Vistable im HMD detailgenauer und realitätsnäher.

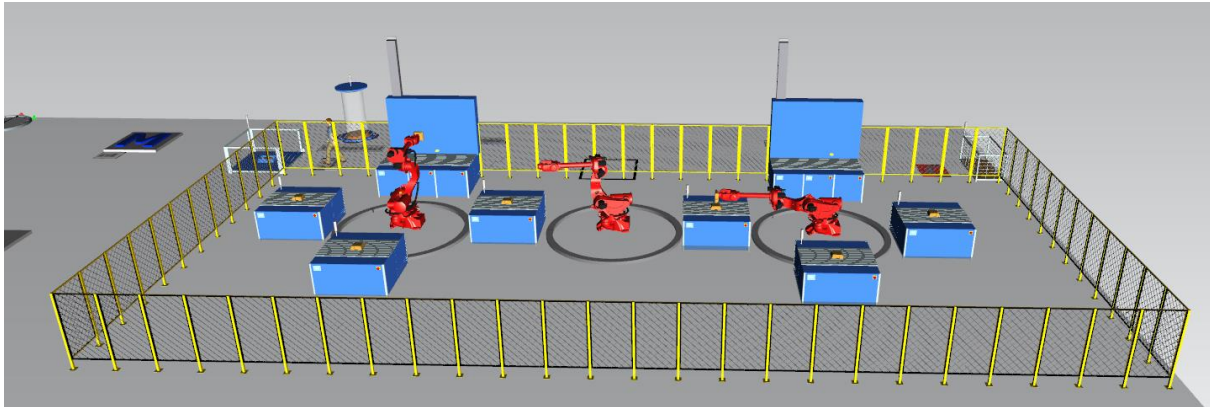


Abbildung 136: 3D-Ansicht Use Case Roboterzelle

Die Bewegungssimulation kann, wie gewohnt, mit der grünen Play Taste in Plant Simulation gestartet werden und wird sofort in der virtuellen Roboterzelle visualisiert. Falls das Modell in einer neueren Version der Software geöffnet wird, muss zuvor ein Reset der Simulation durchgeführt werden.

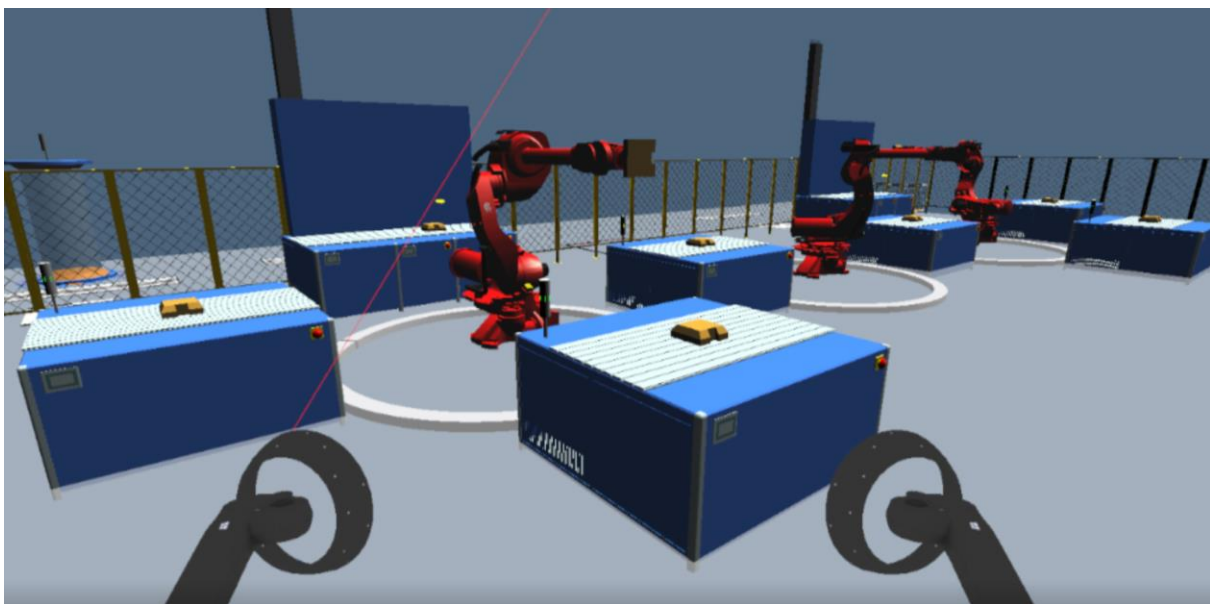


Abbildung 137: VR-Ansicht Roboterzelle 1

Bewegungssimulationen und deren VR-Visualisierung stellen hohe Anforderungen an die Hardware des Rechners, was dazu führen kann, dass es, speziell bei komplexeren Modellen auf leistungsschwächeren Rechnern, zu Unterbrechungen der Übertragung zum HMD oder zu verzögertem Tracking der Kopfbewegungen kommen kann.

Abbildung 138 zeigt eine Betrachtung der virtuellen Roboterzelle aus einer sicheren Entfernung außerhalb des Zaunes. Aus dieser Perspektive kann man sich einen guten Überblick über den Prozess und den Materialfluss machen. Der Laserstrahl kann auch in diesem Fall wieder als Hilfsmittel zur Präsentation der geplanten Roboterzelle verwendet werden, da alle Personen die Visualisierung am Rechner im VR-Client mitverfolgen können.

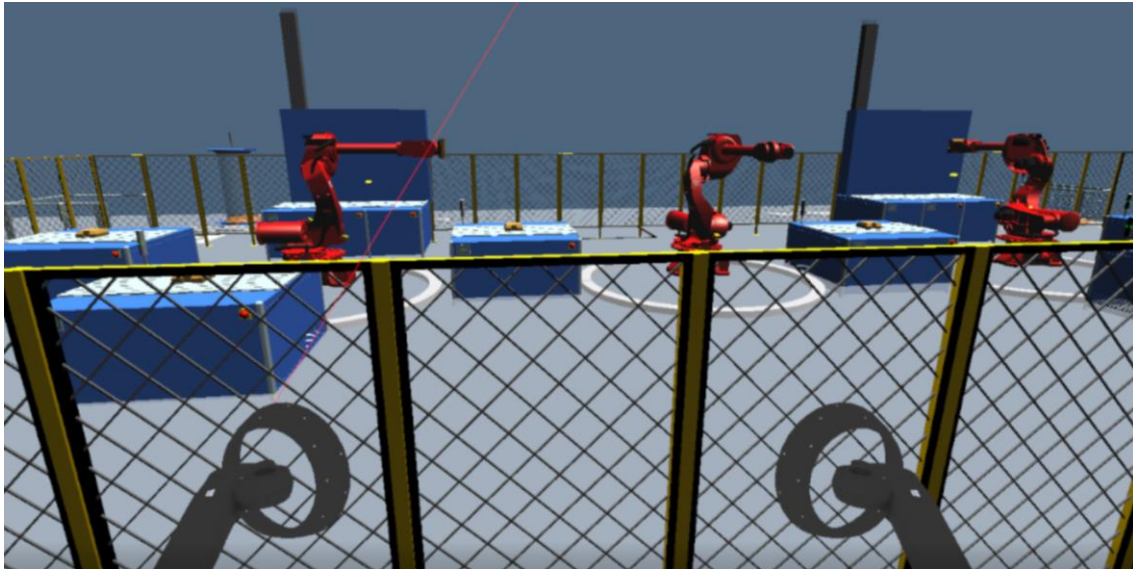


Abbildung 138: VR-Ansicht Roboterzelle 2

Um die Bewegungen der Roboter oder durchgeführte Arbeitsschritte näher zu betrachten, kann man sich wieder mit den Motion Controllern und, falls die Grenzen im Windows Mixed Reality Portal eingerichtet wurden, was in diesem wie auch in allen anderen Use Cases der Fall war, durch Gehen in der realen Welt in diesem Modell bewegen und umsehen. Natürlich stehen die Zusatzfunktionen wie Messen oder Flaggen setzen auch in diesem Anwendungsfall wieder zur Verfügung

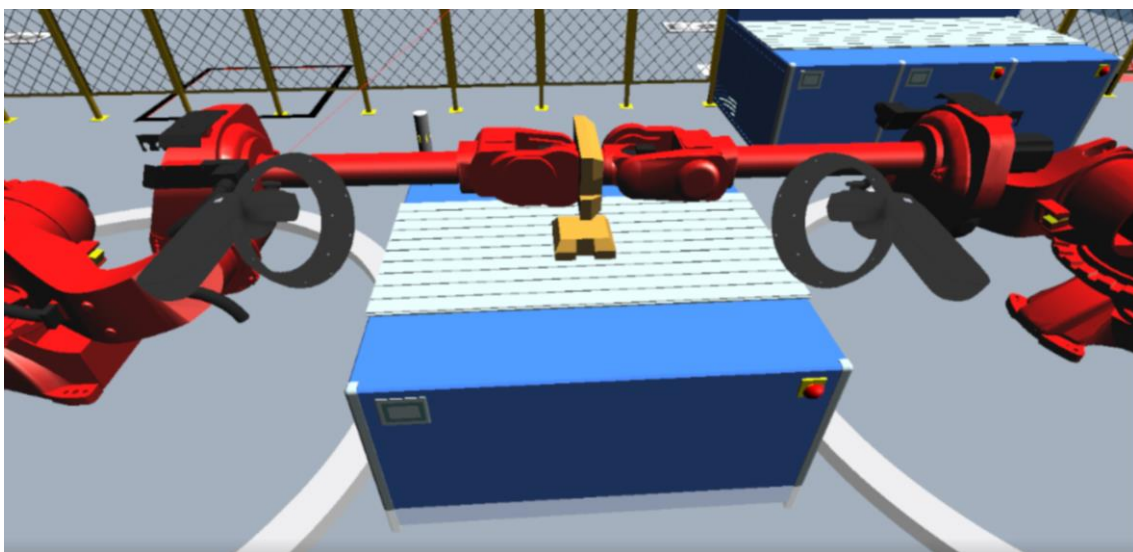


Abbildung 139: VR-Ansicht Detail Roboter

7.2 Auswertung Fragebögen

Zur Evaluierung des Einsatzes von Virtual Reality in der Fabrikplanung wurde ein Fragebogen entworfen, welchen alle Mitarbeiter ausfüllten, die an der Vorstellung zumindest eines Vorgehensmodelles inklusive Präsentation teilgenommen haben. Der Fokus liegt dabei auf den Gruppen „Fabrikplanung und Produktionsorganisation“ sowie den beiden Logistik Gruppen „Logistiksysteme und Transport“ sowie „Intralogistik und Materialwirtschaft“.

Befragt wurden acht Personen aus dem Bereich Fabrikplanung sowie fünf aus dem Logistikbereich, also insgesamt 13 Personen im Unternehmen. Diese wurden für die Befragung ausgewählt, da sie entweder oft 3D-Visualisierungen in Vistable nutzen oder weil sie besonders große Erfahrung im Bereich der Fabrik- oder Lagerplanung aufweisen.

Die Fragebögen werden anschließend in Excel Tabellen ausgewertet und mit Tableau visualisiert, um diese besser interpretieren zu können. Der vollständige Fragebogen befindet sich im Anhang. In diesem Kapitel werden lediglich die grafischen Darstellungen inklusive Interpretation abgebildet.

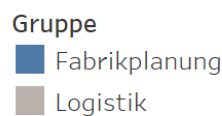


Abbildung 140: Legende Fragebogen-Auswertung

Die in Abbildung 140 dargestellte Legende gilt für alle Diagramme in diesem Unterkapitel. Sie dient dazu, um unterschiedliche Tendenzen der einzelnen Gruppen bei der Auswertung der Fragebögen festzustellen, wodurch gegebenenfalls Rückschlüsse gezogen werden können, ob VR in der Fabrik- und der Lagerplanung in unterschiedlichen Bereichen eingesetzt werden kann oder verschiedene Potentiale zu erwarten sind.

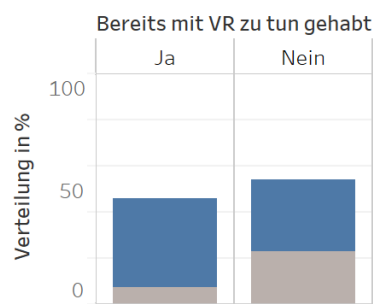


Abbildung 141: Bereits VR-Erfahrung

Dabei hatte etwas weniger als die Hälfte der Befragten bereits vor der Demonstration der Use Cases mit Virtual Reality zu tun, siehe Abbildung 141.

Die Ergebnisse in Abbildung 142 bestätigen die in der Literatur vorherrschende Meinung, dass der Einsatz von VR in der Grob- und Feinplanung und auch in der Hochlaufbetreuung im Phasenmodell des Fabrikplanungsprozesses sinnvoll sein kann, auch wenn nur knapp 40% Einsatzmöglichkeiten für VR in der Hochlaufbetreuung sehen. Der Autor vermutet, dass dies der nicht exakten Abgrenzung von VR und AR von Personen mit wenig Erfahrung in diesen Bereichen geschuldet ist.

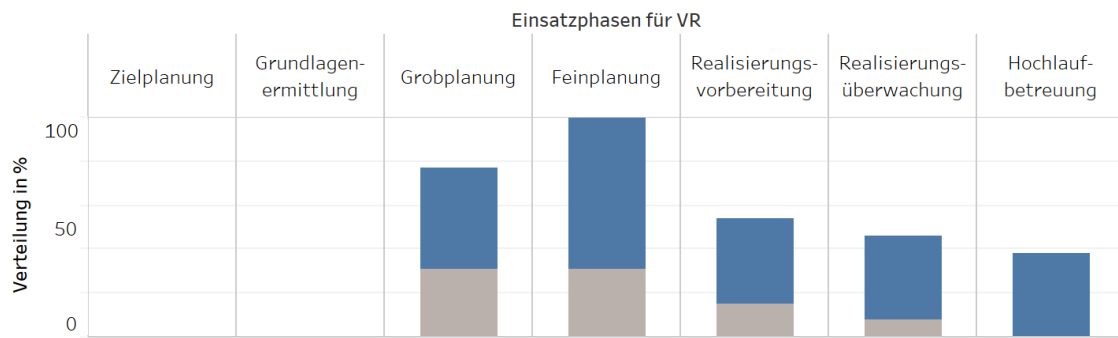


Abbildung 142: Einsatzphasen für VR im Fabrikplanungsprozess

Um den Einsatz von VR in der Realisierungsvorbereitung und der -überwachung zu prüfen, wären Interviews mit den Personen notwendig, die in diesen Phasen Einsatzmöglichkeiten sehen, um herauszufinden, ob sie tatsächlich VR und nicht AR in diesen Phasen einsetzen möchten und in welchen Szenarien sie sich den Einsatz vorstellen können.

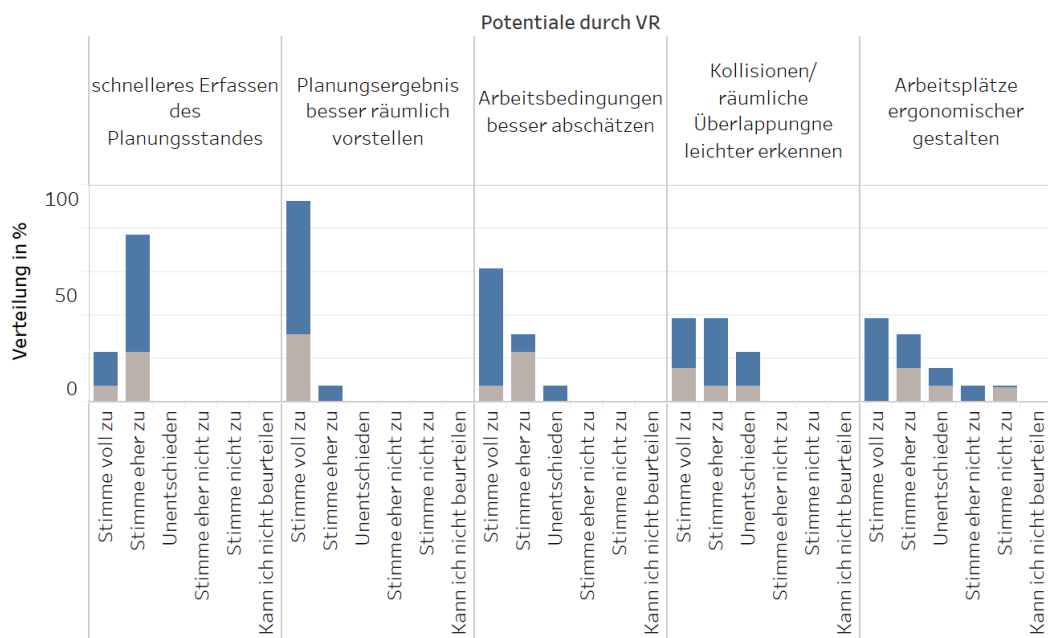


Abbildung 143: Potentiale durch VR in der Fabrikplanung (1/2)

Damit Virtual Reality im Fabrikplanungsprozess verwendet werden kann, müssen dadurch gewisse Potentiale realisiert werden, die den Mehraufwand, egal wie groß oder klein er ist, rechtfertigen. In der Befragung wurden insgesamt neun Potentiale

vorgegeben, bei denen die Befragten einschätzen mussten, ob VR im Zusammenhang mit diesem Potential hilfreich sein kann oder nicht. Abbildung 143 und Abbildung 144 veranschaulichen die Ergebnisse der Potentialabschätzung. Darin ist ersichtlich, dass die VR-Visualisierung vor allem bei der räumlichen Vorstellung des Planungsergebnisses, dem schnelleren Erfassen des Planungsstandes sowie dem besseren Abschätzen der zukünftigen Arbeitsbedingungen unterstützen kann.

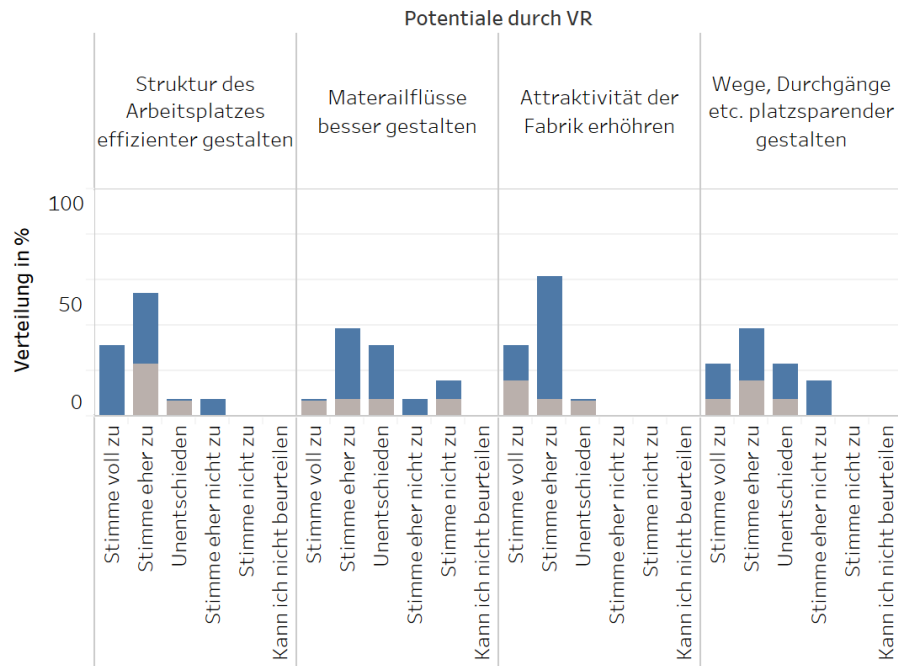


Abbildung 144: Potentiale durch VR in der Fabrikplanung (2/2)

Bei der platzsparenden Gestaltung von Wegen und Durchgängen sowie der Optimierung von Materialflüssen wird hingegen von den Befragten eher geringeres Potential gesehen.

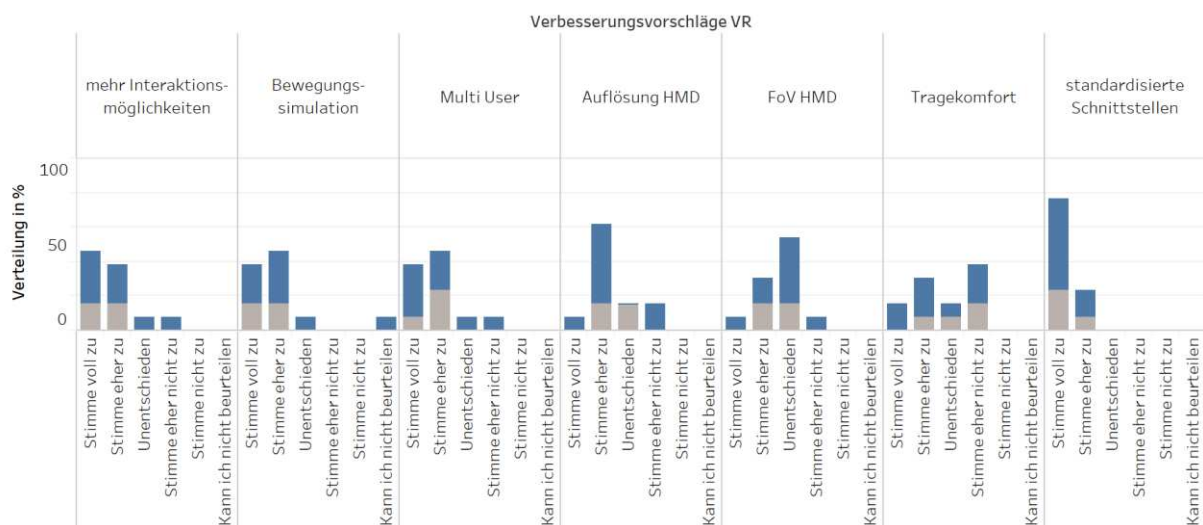


Abbildung 145: Verbesserungsvorschläge für Einsatz von VR

Abbildung 145 zeigt Verbesserungsvorschläge, die die befragten Mitarbeiter an die Fabrikplanungssoftware und an die VR-Hardware haben. Mit der verwendeten Hardware waren diese relativ zufrieden, wohingegen bei der Software integrierte Schnittstellen zur VR-Visualisierung, mehr Interaktionsmöglichkeiten in der virtuellen Welt, in der auch Bewegungssimulationen möglich sein sollen, sowie das Begehen der VR-Visualisierung von mehreren Personen gleichzeitig sehr nützliche Verbesserungen darstellen würden.

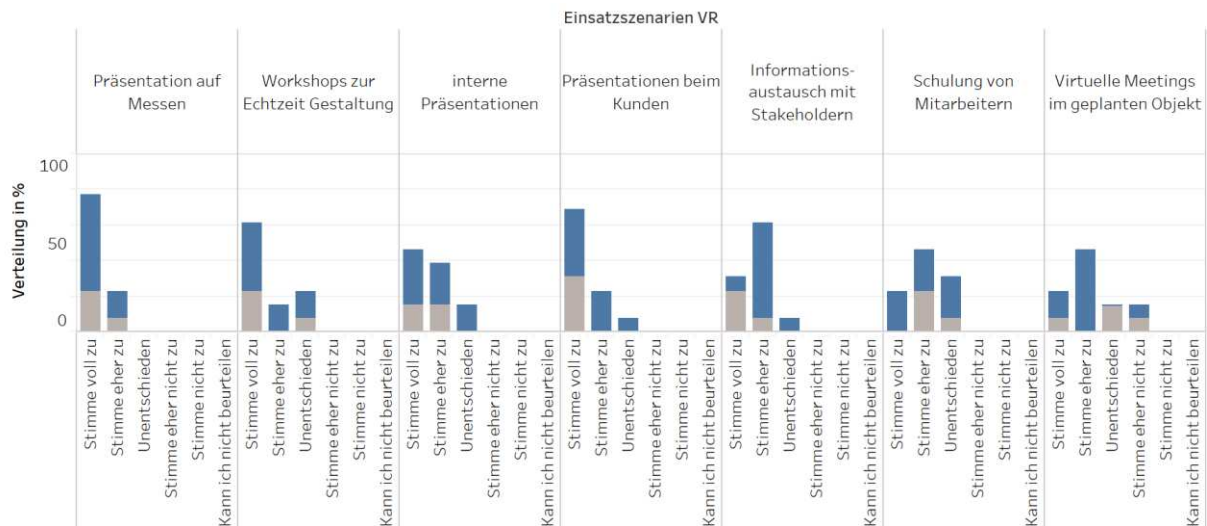


Abbildung 146: Einsatzszenarien für VR in der Fabrikplanung

Bei den Einsatzszenarien wird, wie in Abbildung 146 dargestellt, der Einsatz von VR bei Situationen mit Kundenkontakt als am sinnvollsten erachtet. Speziell zur Präsentation des Leistungsangebotes auf Messen, bei Kundenpräsentationen sowie bei interaktiven Workshops zur Planung sehen die Fabrik- und Lagerplaner das größte Potential. Überraschenderweise werden die speziell im BIM immer häufiger auftretenden Meetings in den virtuellen Objekten bei dieser Befragung als Einsatzszenario nicht präferiert.

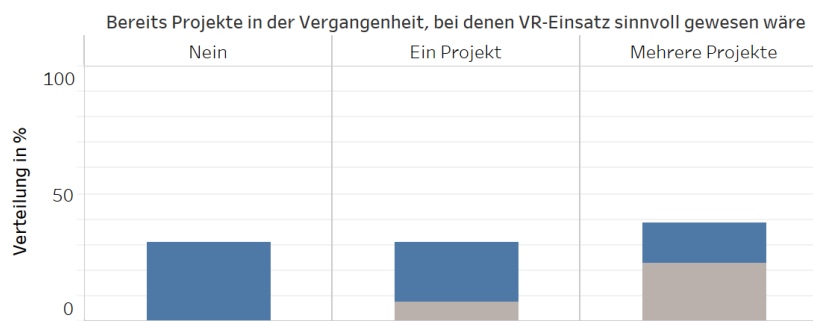


Abbildung 147: bisherige Projekte für VR-Einsatz

Beachtenswert ist ebenfalls, dass circa zwei Drittel der Befragten in der Vergangenheit zumindest an einem Projekt beteiligt waren, in dem sie, im Nachhinein betrachtet, den Einsatz von VR zur Unterstützung als sinnvoll erachtet hätten. Beinahe 40% hätten sich den Einsatz sogar in mehreren Projekten vorstellen können, was ein deutliches

Zeichen dafür ist, dass VR in bestimmten Situationen auf jeden Fall als sinnvolle Ergänzung zu den sonstigen Tools und Werkzeugen im Fabrikplanungsprozess eingesetzt werden kann.

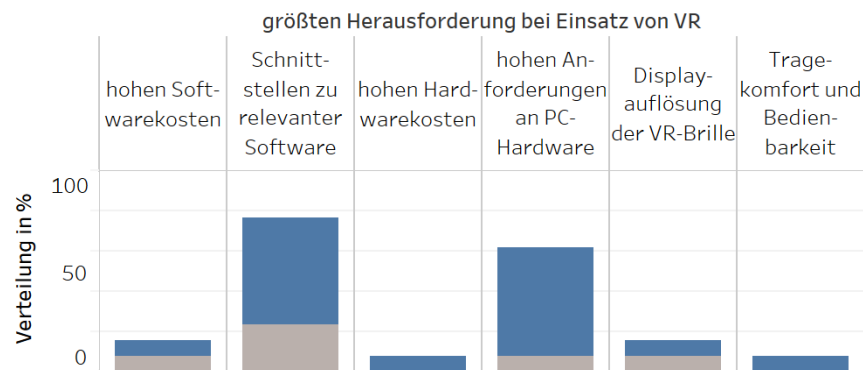


Abbildung 148: Herausforderungen bei Einsatz von VR

Um VR-Visualisierungen sinnvoll einsetzen zu können, müssen allerdings noch einige Herausforderungen bewältigt werden. Ein entscheidender Schritt dafür ist mit dieser Arbeit gelungen, da ein Vorgehensmodell mit definierten Schnittstellen entwickelt wurde, wodurch der Einsatz von VR in Use Cases möglich wurde. Eine rein finanzielle Herausforderung stellt weiters die Beschaffung eines leistungsfähigen Rechners dar, da die standardmäßig im Einsatz befindliche Hardware nur eingeschränkt für die Echtzeit VR-Visualisierung von 3D-Modellen geeignet ist. Alle anderen in Abbildung 148 dargestellten Herausforderungen werden vom Großteil der befragten Mitarbeiter nicht als wesentliche Herausforderung gesehen.

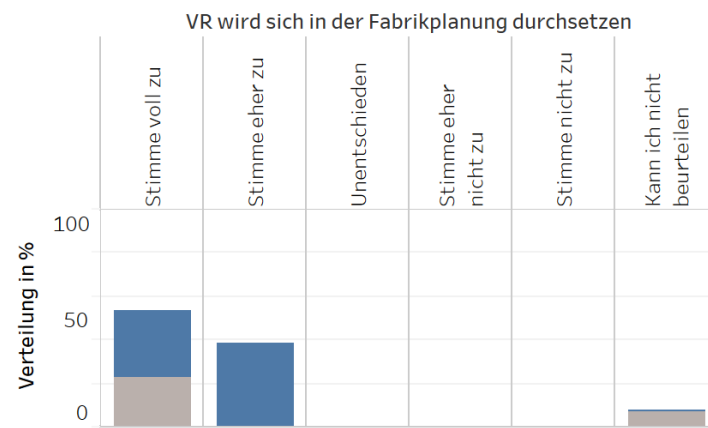


Abbildung 149: VR wird sich im Fabrikplanungsprozess durchsetzen

Abbildung 149 unterstreicht die Sinnhaftigkeit des Einsatzes von Virtual Reality im Fabrikplanungsprozess. Nahezu alle Befragten gehen davon aus, dass sich VR zumindest in gewissen Phasen des Planungsprozesses durchsetzen wird und in Zukunft zu den standardmäßig in Verwendung befindlichen Tools eines Fabrik- und Lagerplaners gehören wird.

7.3 Experteninterviews

Zusätzlich zu der Evaluierung mittels Fragebögen werden in diesem Unterkapitel die wesentlichen Erkenntnisse aus zwei Experteninterviews mit erfahrenen Fabrikplanern zusammengefasst. Interviewt werden dabei der wissenschaftliche Mitarbeiter Marius Lütkemeyer, MSc, sowie Projektleiter Dr. Thomas Sobottka, beide bei der Fraunhofer Austria Research GmbH beschäftigt.

Vor dem Interview wurden die aktuellen Vorgehensweisen sowie verschiedene Use Cases zur VR-Visualisierung präsentiert, damit auch die diese Diplomarbeit betreffenden Fragen entsprechend beantwortet werden können. Um ein strukturiertes Interview zu ermöglichen, wurde außerdem ein Leitfaden für die Durchführung dieser erarbeitet.

Die folgende Zusammenfassung enthält nur die wesentlichen Erkenntnisse aus diesen Interviews, die vollständigen Gesprächsaufzeichnungen befinden sich in textueller Form im Anhang.

Ein wesentliches Problem für den Einsatz von VR in der Fabrikplanung, welches durch die ausgewerteten Fragebögen sowie die Experteninterviews bestätigt wurde und auch der Hauptgrund für diese Arbeit war, ist das Fehlen von standardisierten Schnittstellen beziehungsweise fehlende Vorgehensmodelle für die VR-Visualisierung von Planungsergebnissen.

Weiters war der Einsatz von zusätzlichen Visualisierungsmöglichkeiten in bisherigen Projekten nicht zwingend notwendig, da trotzdem immer zufriedenstellende Lösungen erreicht werden konnten und der Planungsprozess auch so funktionierte. Und da unklar war, wie viel Mehraufwand eine VR-Visualisierung mit sich bringen würde, welcher Nutzen dadurch entsteht und häufig keine 3D-Planung durchgeführt wurde, wurde diese Technologie bisher nicht berücksichtigt.

Herr Dr. Sobottka hatte auch bereits in der Vergangenheit mit VR und AR zu tun und empfand damals die Technologie noch nicht als ausgereift genug sowie als zu leistungshungrig bezüglich der damals verfügbaren Hardware.

Da aber auch Planungsprozesse ständig verbessert werden müssen und neue Entwicklungen im VR-Bereich durchaus dazu führen können, dass diese Technologie sinnvoll eingesetzt werden kann, stehen beide Experten diesem Thema mit einer positiven Einstellung gegenüber.

Als sehr wesentlichen Vorteil erwarten sie die frühere Einbindung des Kunden und anderer Stakeholder, wie beispielsweise Arbeitswissenschaftler oder Architekten, in den Planungsprozess und dadurch eine Effizienzsteigerung sowie die Möglichkeit einer partizipativen Fabrikplanung.

Menschen mit wenig Erfahrung im Bereich der Fabrikplanung können sich unter 2D-Blocklayouts oft schwer das Ergebnis vorstellen. Bindet man beispielsweise das Management, Meister oder ausgewählte Produktionsmitarbeiter früher in den Planungsprozess ein, kann man einerseits auf zusätzliches Wissen und Erfahrungen zurückgreifen und andererseits die Akzeptanz des Planungsergebnisses steigern.

Ein weiterer Aspekt, der Dr. Sobottka bei dem präsentierten Bürolayout auffiel, war, dass man durch die Immersion mit dem HMD besser abschätzen kann, ob man sich in einer gewissen Umgebung wohlfühlen würde oder nicht. Das subjektive Empfinden wird verbessert und die Entscheidung „Fühle ich mich hier wohl?“ kann durch VR-Unterstützung wesentlich besser getroffen werden.

Herr Lütkemeyer geht außerdem von einer Steigerung der Planungsqualität und einer Verringerung der Planungszeit aus, da man Objekte in der Detailplanung besser positionieren und potentielle Fehler früher entdecken kann, wodurch nachträgliche Umplanungen entfallen können. Zusätzlich sieht er durch VR großes Potential, um Lieferanten von Lagertechnik oder Ähnlichem und Industriearchitekten noch besser in den Planungsprozess zu integrieren sowie fundiertere Entscheidungen in der Technologieauswahl treffen zu können.

Bei der Akquise könnte, laut Dr. Sobottka, das Anbieten einer VR-Visualisierung einen noch professionelleren Eindruck der Planungsmethoden vermitteln und somit ein zusätzliches Verkaufsargument sein. Besonders interessant wäre außerdem, aus 2D-Modellen mit Hilfe von Artificial Intelligence automatisch 3D-Objekte generieren zu können. Das würde den Aufwand für die Erstellung des 3D-Modelles stark verringern und dadurch den Einsatz von VR noch attraktiver machen.

Um den aktuellen Mehraufwand an Personentagen für die 3D-Modellierung und die VR-Erfahrung rechtfertigen zu können, halten es beide Experten für entscheidend, die gesparte Zeit beziehungsweise gesparten Kosten zu quantifizieren. Dazu ist es jedenfalls notwendig, VR in realen Projekten anzuwenden, den tatsächlichen Mehraufwand festzustellen sowie den Nutzen dadurch bestmöglich zu quantifizieren.

In den bisher von Herrn Lütkemeyer bearbeiteten Fabrikplanungsprojekten waren schon potentielle Anwendungsfälle für VR dabei, weshalb es sich anbieten würde, interessierten Kunden das Zusatzpaket VR-Visualisierung kostenlos anzubieten und mit Ihnen gemeinsam den Nutzen dieser Technologie zu diskutieren. Herr Dr. Sobottka hatte VR bereits in der Vergangenheit bei der Planung einer Fabrik in der Elektronikindustrie im Einsatz, da dort durch die SMT-Anlagen lange Gänge und somit besonders vorausschauende Planungen notwendig sind.

Die in dieser Diplomarbeit entwickelten Vorgehensmodellen sind, nach Meinung der Experten, jedenfalls praxistauglich und können für Kundenprojekte zum Einsatz kommen. Lösungen für Verbesserungsvorschläge, wie beispielsweise die kabellose

Übertragung auf das HMD sowie die Verbesserung integrierter Funktionen, können laufend durchgeführt und entwickelt werden.

Bevor allerdings Kundenprojekte mit VR-Unterstützung abgewickelt werden können, muss noch in zumindest einen, für Virtual Reality geeigneten, Rechner sowie notwendige Softwarepakete investiert werden. Die aktuell standardmäßig verwendeten Rechner sind nicht für Visualisierungen von größeren Objekten ausgelegt, da die Grafikkarte beim Rendern von umfangreichen Planungsergebnissen an ihre Grenzen stößt und nicht das gesamte Projekt visualisiert wird.

Beide Experten sind der Meinung, dass sich Virtual, aber auch Augmented Reality, langfristig im Fabrikplanungsprozess durchsetzen wird, wobei dies natürlich stark von den technologischen Fortschritten in diesem Bereich sowie der Standardisierung von VR- Schnittstellen zur Fabrikplanungssoftware abhängig ist.

Virtual Reality wird dabei aber keine disruptive Technologie sein, die den gesamten Fabrikplanungsprozess von Grund auf verändert, sondern vielmehr als eine sinnvolle Ergänzung beziehungsweise zusätzliches Werkzeug zur Verfügung stehen. Herr Dr. Sobottka geht davon aus, dass sowohl AR als auch VR in Zukunft ihre Einsatzmöglichkeiten haben werden und der Einsatz mittelfristig Standard werden wird. Ob VR ein „Nice-to-have-Thing“ wird oder Kunden es in zukünftigen Projekten explizit fordern werden, hängt davon ab, wie groß der tatsächliche Zusatznutzen ist und wie gut man diesen dem Kunden vermitteln kann.

8 Diskussion und Ausblick

In diesem abschließenden Kapitel werden die Ergebnisse zusammengefasst und kritisch hinterfragt. Zusätzlich werden Einschränkungen der Ergebnisse aber auch der Verwendbarkeit der entwickelten Vorgehensmodelle erörtert sowie mögliche Schritte zur Weiterentwicklung der Vorgehensmodelle und zur Implementierung dieser im Fabrikplanungsprozess definiert.

8.1 Diskussion und Einschränkung der Vorgehensmodelle und Ergebnisse

Aufbauend auf den umfassenden Recherchen im Bereich der Fabrikplanung sowie der virtuellen Realität konnte in dieser Arbeit ein wesentlicher Schritt gemacht werden, um Virtual Reality im Fabrikplanungsprozess zu integrieren. Der Fokus bei der Entwicklung der Vorgehensmodelle lag dabei auf der VR-Visualisierung von Planungsergebnissen.

Durch die Aufarbeitung des State-of-the-Art, die Auswertung der Fragebögen sowie die durchgeführten Experteninterviews konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von VR nicht nur zur Untersuchung von Planungsergebnissen sinnvoll sein kann. Diese Technologie kann beispielsweise auch für Schulungen vor beziehungsweise während der Hochlaufphase sowie zum Erlangen eines besseren Technologieverständnisses und folglich einer fundierten Technologieauswahl eingesetzt werden.

Weiters ist aktuell der Einsatz von Virtual Reality bei Fabrikplanungsprojekten aufgrund des fehlenden Know-hows sowie der noch eher geringen Marktdurchdringung von VR-Hard- und Software ein Unterscheidungsmerkmal zu Mitbewerbern, das besonders in der Akquise und der Projektabschlussphase von Vorteil sein kann. Durch die Quantifizierung des Nutzens beziehungsweise des Mehrwertes während und nach der Fabrikplanung sowie dem Betrieb dieser könnte dieser Effekt noch deutlich verstärkt werden.

Die Potentiale dieser Technologie, welche im Planungsprozess genutzt werden können, wurden mit der Demonstration sowie der Befragung von Experten aus dem Bereich der Fabrik- und Lagerplanung bestätigt. Auch in den Experteninterviews wurde deutlich, dass Virtual Reality in Zukunft ein zusätzliches Werkzeug sein kann, auf welches Fabrikplaner bei Bedarf zurückgreifen und den Fabrikplanungsprozess damit positiv beeinflussen können.

Wie verbreitet diese Technologie eingesetzt werden wird, hängt allerdings von mehreren Faktoren ab. Dazu zählen unter anderem die Schaffung und Integration von Schnittstellen zur Fabrikplanungssoftware, die Entwicklung von Vorgehensmodellen

zur Visualisierung, die einfache Möglichkeit, 3D-Fabrik- und Lagermodelle zu erstellen sowie die Fortschritte in der VR- und PC-Hardware.

Mit den drei entwickelten Vorgehensmodellen wurde eine Basis geschaffen, um virtuelle Realität zukünftig in Fabrikplanungsprojekten einzusetzen. Die definierten Anforderungen werden zumindest von Modell zwei und drei ausreichend erfüllt, um sofort in der Praxis verwendet werden zu können. Modell eins muss für einen besseren praktischen Einsatz noch mit mehr standardisierten Modulen sowie einer verbesserten Übertragung der 3D-Daten ausgestattet werden.

Die Auswertungen der Fragebögen liefern vielversprechende Ergebnisse. Um diese zu bestätigen, müssen die entwickelten Vorgehensmodelle nun in realen Fabrikplanungsprojekten zum Einsatz kommen. Das Verhältnis Nutzen zu Aufwand wird in Zukunft eine wesentliche Rolle spielen, ob beziehungsweise wie oft VR im Fabrikplanungsprozess zum Einsatz kommen wird. Auch wenn der Personalaufwand bei Vorgehensmodell zwei, also der VR-Visualisierung aus Vistable, beispielsweise sehr gering ist, müssen Investitionen in die Hardware (leistungsstarker Rechner und HMD) sowie in die Software (VR-Brückensoftware etc.) getätigt werden, welche durch einen nachgewiesenen Mehrwert mindestens ausgeglichen werden müssen. Langfristig wird der im Experteninterview erwähnte „Coolness-Faktor“ alleine nicht ausreichen, um diese Technologie im Fabrikplanungsprozess dauerhaft und sinnvoll zu integrieren.

Ein im Zusammenhang mit der Visualisierung von Planungsergebnissen stehendes Problem, mit dem Fabrikplaner generell häufig konfrontiert sind, ist die Software für die Erstellung von 3D-Modellen. Viele Anbieter, wie Plavis und Autodesk, haben in den vergangenen Jahren umfangreiche Bibliotheken in ihre Fabrikplanungsanwendungen integriert. Trotzdem sind darin oft nicht alle für ein Projekt notwendigen Objekte enthalten, was die Erstellung von 3D-Modellen und damit auch die Visualisierung in der virtuellen Realität erschweren kann sowie zeit- und kostenintensiver macht. Setzt sich der Trend der letzten Jahre fort und erweitern die Anbieter weiter ihre Bibliotheken, sollte dies allerdings in absehbarer Zukunft keine große Hürde mehr darstellen.

Weiters muss der Rechner bei der Anwendung von Virtual Reality und somit auch bei den entwickelten Vorgehensmodellen gewisse Mindestanforderungen, die vom verwendeten Head Mounted Display abhängig sind, erfüllen, um sinnvoll verwendet werden zu können. Typische Business-Notebooks, welche für klassische Office-Tätigkeiten ausgelegt sind, erfüllen diese Mindestanforderungen in den meisten Fällen nicht, was ein weiteres Hindernis für den Einsatz von VR darstellen kann.

8.2 Mögliche nächste Schritte zur Weiterentwicklung und Implementierung

Damit geplante Fabriken, Lager oder Ähnliches vollständig in der virtuellen Welt betrachten werden können, ist die Anschaffung eines Rechners mit leistungstärkerer Hardware erforderlich. Bei den getesteten Modellen wurden teilweise nicht alle Objekte gerendert, da die Grafikkarte an die Leistungsgrenzen stieß. Es waren beispielsweise in der Vistable Beispielfabrik schon zu viele Objekte für die verwendete PC-Hardware, weswegen keine vollständige VR-Darstellung dieser möglich war. Bei der Auswahl des Rechners müssen deshalb die in dieser Arbeit angeführten Mindestanforderungen an die Hardware beachtet werden.

Um größtmögliche Flexibilität hinsichtlich der Ursprungs-3D-Daten zu erlangen, sollte das Vorgehensmodell eins mit Unity weiterentwickelt und standardisiert werden, damit mit diesem die VR-Visualisierung auch von Personen ohne Programmierkenntnisse erstellt werden kann. Ein Vorteil dieses Vorgehensmodells, der auch schon in der Bewertung deutlich wurde, ist, dass mit entsprechenden Programmierkenntnissen eigene Funktionen integriert sowie die VR-Visualisierungen an spezielle Bedürfnisse angepasst werden können.

Die Weiterentwicklung von Vorgehensmodell eins ist besonders interessant, wenn die im Experteninterview von Dr. Sobottka angesprochene automatische Generierung von dreidimensionalen Modellen aus 2D-Daten mittels Artificial Intelligence gelingt. Denn es ist unwahrscheinlich, dass die generierten 3D-Daten mit der in Vorgehensmodell zwei und drei verwendeten VR-Brücken-Software moreViz verarbeitet werden können, da diese die 3D-Daten nur aus ausgewählte Software-Pakete extrahieren kann. Vorgehensmodell eins ist durch die Einbindung von Unity sowie den möglichen Zwischenschritt über 3DSMax oder andere Konvertierungssoftwares flexibler bezüglich des Ursprungsformates des Modells.

Zur Bestätigung der aus den Fragebögen und Experteninterviews hervorgegangenen Ergebnisse ist die Anwendung von Virtual Reality in zumindest einem Fabrikplanungsprojekt notwendig. Darin sollten die Aufwände für die Erstellung der VR-Erfahrung möglichst exakt dem Nutzen gegenübergestellt werden. Dazu muss allerdings zuerst eine Methode festgelegt werden, mit der man den Nutzen erfassen und bestmöglich quantifizieren kann.

Die Ergebnisse aus dieser Praxisanwendung können anschließend als Referenz für zukünftige Projekte verwendet werden, bei denen VR-Unterstützung potentiell sinnvoll ist.

9 Anhang

9.1 Fragebogen VR in der Fabrikplanung

FRAGEBOGEN
Virtual Reality in der Fabrikplanung

Der folgende Fragebogen, welcher im Anschluss an die Präsentation eines Demonstrationsobjektes mittels einem Windows Mixed Reality Headset ausgefüllt wird, dient dazu, die Einsatzbereiche von VR im Fabrikplanungsprozess zu identifizieren und mögliche Potentiale durch den Einsatz von VR sowie aktuelle Schwachstellen dieser Technologie aufzuzeigen. Zusätzlich soll erhoben werden, wie der Einsatz von VR-Modellen in einem Fabrikplanungsprozess am sinnvollsten erfolgen kann.

Zutreffendes bitte ankreuzen!

1) In welchen Phasen des Fabrikplanungsprozesses sehen Sie mögliche Einsatzfelder für Virtual Reality?

☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Zielplanung Analyse Unternehmensziele und Rahmenbedingungen Festlegung Fabrik- und Projektziele Aufstellung Bewertungskriterien Festlegung Arbeitspakete	Grundlagen-ermittlung Informationsbeschaffung Informationsauswertung	Grobplanung Strukturplanung Dimensionierung Idealplanung Realplanung	Feinplanung Detailplanung Erstellung Genehmigungsanträge Erstellung Leistungsbeschreibung	Realisierungsvorbereitung Umsetzungplanung Angebots-einholung Vergabe Überwachung Ausführungsplanung	Realisierungsüberwachung Koordination, Überwachung und Dokumentation Abschlussdokumentation	Hochlaufbetreuung An- und Hochlaufbetreuung Bewertung der Fabrik

2) Durch den Einsatz von Virtual Reality im Planungsprozess ist es, im Vergleich zum aktuellen Prozess, möglich, ...

a) ... Daten beziehungsweise den aktuellen Stand der Planung schneller zu erfassen.

☐	☐	☐	☐	☐	☐
Stimme voll zu	Stimme eher zu	unentschieden	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Kann ich nicht beurteilen

b) ... sich das Planungsergebnis räumlich besser vorstellen zu können.

☐	☐	☐	☐	☐	☐
Stimme voll zu	Stimme eher zu	unentschieden	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Kann ich nicht beurteilen

c) ... die zukünftigen Arbeitsbedingungen in der geplanten Fabrik besser abzuschätzen.

☐	☐	☐	☐	☐	☐
Stimme voll zu	Stimme eher zu	unentschieden	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Kann ich nicht beurteilen

FRAGEBOGEN

Virtual Reality in der Fabrikplanung

Forts. 2) Durch den Einsatz von Virtual Reality im Planungsprozess ist es, im Vergleich zum aktuellen Prozess, möglich, ...

d)...Kollisionen beziehungsweise räumliche Überlappungen leichter zu erkennen.

☐

Stimme
voll zu

☐

Stimme
eher zu

☐

unentschieden

☐

Stimme
eher
nicht zu

☐

Stimme
nicht zu

☐

Kann ich
nicht
beurteilen

e)...Arbeitsplätze ergonomischer zu gestalten.

☐

Stimme
voll zu

☐

Stimme
eher zu

☐

unentschieden

☐

Stimme
eher
nicht zu

☐

Stimme
nicht zu

☐

Kann ich
nicht
beurteilen

f)...die Struktur eines Arbeitsplatzes effizienter zu gestalten.

☐

Stimme
voll zu

☐

Stimme
eher zu

☐

unentschieden

☐

Stimme
eher
nicht zu

☐

Stimme
nicht zu

☐

Kann ich
nicht
beurteilen

g)...Materialflüsse besser zu gestalten.

☐

Stimme
voll zu

☐

Stimme
eher zu

☐

unentschieden

☐

Stimme
eher
nicht zu

☐

Stimme
nicht zu

☐

Kann ich
nicht
beurteilen

h)...die Attraktivität einer Fabrik zu erhöhen.

☐

Stimme
voll zu

☐

Stimme
eher zu

☐

unentschieden

☐

Stimme
eher
nicht zu

☐

Stimme
nicht zu

☐

Kann ich
nicht
beurteilen

i)...Wege, Durchgänge, Abstände etc. platzsparender zu gestalten.

☐

Stimme
voll zu

☐

Stimme
eher zu

☐

unentschieden

☐

Stimme
eher
nicht zu

☐

Stimme
nicht zu

☐

Kann ich
nicht
beurteilen

h) weitere mögliche Potentiale

.....

.....

.....

.....

FRAGEBOGEN

Virtual Reality in der Fabrikplanung

3) Um Virtual Reality überhaupt oder noch besser im Fabrikplanungsprozess einsetzen zu können, sollte/sollten...

a) ...mehr Interaktionsmöglichkeiten (Verschieben, Markieren, Betätigen etc.) mit der virtuellen Welt bestehen.

☐

Stimme
voll zu

☐

Stimme
eher zu

☐

unentschieden

☐

Stimme
eher
nicht zu

☐

Stimme
nicht zu

☐

Kann ich
nicht
beurteilen

b) ...Bewegungssimulationen in das VR-Modell integriert sein.

☐

Stimme
voll zu

☐

Stimme
eher zu

☐

unentschieden

☐

Stimme
eher
nicht zu

☐

Stimme
nicht zu

☐

Kann ich
nicht
beurteilen

c) ...sich mehrere User gleichzeitig in derselben virtuellen Welt bewegen können.

☐

Stimme
voll zu

☐

Stimme
eher zu

☐

unentschieden

☐

Stimme
eher
nicht zu

☐

Stimme
nicht zu

☐

Kann ich
nicht
beurteilen

d) ...die Auflösung des Headsets (Fliegengittereffekt) höher werden.

☐

Stimme
voll zu

☐

Stimme
eher zu

☐

unentschieden

☐

Stimme
eher
nicht zu

☐

Stimme
nicht zu

☐

Kann ich
nicht
beurteilen

e) ...das Field of View (Sichtbereich, Bullaugeneffekt) vergrößert werden.

☐

Stimme
voll zu

☐

Stimme
eher zu

☐

unentschieden

☐

Stimme
eher
nicht zu

☐

Stimme
nicht zu

☐

Kann ich
nicht
beurteilen

f) ...der Tragekomfort des Headsets verbessert werden.

☐

Stimme
voll zu

☐

Stimme
eher zu

☐

unentschieden

☐

Stimme
eher
nicht zu

☐

Stimme
nicht zu

☐

Kann ich
nicht
beurteilen

g) ...einfache/standardisierte Schnittstellen zwischen der virtuellen Welt und den im Planungsprozess verwendeten Programmen bestehen.

☐

Stimme
voll zu

☐

Stimme
eher zu

☐

unentschieden

☐

Stimme
eher
nicht zu

☐

Stimme
nicht zu

☐

Kann ich
nicht
beurteilen

h) weitere Verbesserungsvorschläge

.....

.....

FRAGEBOGEN					
Virtual Reality in der Fabrikplanung					
4)Ich kann mir den Einsatz von Virtual Reality als Unterstützung im Planungsprozess in den folgenden Szenarien Vorstellen:					
a)Zur Präsentation des Leistungsangebotes oder von Demoprojekten auf Messen etc..					
☐	☐	☐	☐	☐	☐
Stimme voll zu	Stimme eher zu	unentschieden	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Kann ich nicht beurteilen
b)In Workshops zur Echtzeit-Gestaltung von VR-Layouts etc..					
☐	☐	☐	☐	☐	☐
Stimme voll zu	Stimme eher zu	unentschieden	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Kann ich nicht beurteilen
c)In internen Präsentation und Diskussionen der Planungsergebnisse.					
☐	☐	☐	☐	☐	☐
Stimme voll zu	Stimme eher zu	unentschieden	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Kann ich nicht beurteilen
d)In Präsentationen und Diskussionen der Planungsergebnisse beim Kunden					
☐	☐	☐	☐	☐	☐
Stimme voll zu	Stimme eher zu	unentschieden	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Kann ich nicht beurteilen
e)Zum Informationsaustausch mit anderen Stakeholdern im Planungsprozess.					
☐	☐	☐	☐	☐	☐
Stimme voll zu	Stimme eher zu	unentschieden	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Kann ich nicht beurteilen
f)Zur Schulung von Mitarbeitern (Montage, Reparatur etc.) bereits vor der Realisierung.					
☐	☐	☐	☐	☐	☐
Stimme voll zu	Stimme eher zu	unentschieden	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Kann ich nicht beurteilen
g) Virtuelle Meetings im geplanten Objekt, ohne dass alle Personen am selben Ort sein müssen.					
☐	☐	☐	☐	☐	☐
Stimme voll zu	Stimme eher zu	unentschieden	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Kann ich nicht beurteilen
h)weitere mögliche Einsatzszenarien					
.....					
.....					
.....					

FRAGEBOGEN					
Virtual Reality in der Fabrikplanung					
5) Ich hatte in meinem Bereich bereits Projekte, in denen ich den Einsatz von Virtual Reality, im Nachhinein betrachtet, in zumindest einer Phase des Planungsprozesses als sinnvoll oder hilfreich erachtet hätte.					
☐ Nein	☐ Ein Projekt	☐ Mehrere Projekte			
6) Virtual Reality wird zumindest in einem Teil von zukünftigen Fabrikplanungsprozessen fixer Bestandteil sein oder kann zur sinnvollen Unterstützung von diesen eingesetzt werden.					
☐ Stimme voll zu	☐ Stimme eher zu	☐ unentschieden	☐ Stimme eher nicht zu	☐ Stimme nicht zu	☐ Kann ich nicht beurteilen
7) Die größten Herausforderungen für die Implementierung eines VR-Prozesses stellen dar:					
☐ Hohen Softwarekosten	☐ Schnittstellen zu relevanter Software	☐ Hohen Hardwarekosten	☐ Hohen Anforderungen an PC-Hardware	☐ Displayauflösung der VR-Brille	☐ Tragekomfort und Bedienbarkeit der VR-Brille
8) Ich hatte bereits in der Vergangenheit etwas mit Virtual Reality zu tun.					
☐ Ja	☐ Nein				
9) sonstige Anmerkungen 					
10) Ich bin der folgenden Abteilung zugehörig:					
☐ Geschäftsbereichsleitung	☐ Fabrikplanung und Produktionsorganisation	☐ Produktionsplanung und -controlling	☐ Produktionsoptimierung Industrial Engineering	☐ Logistiksysteme und Transport	☐ Intralogistik und Materialwirtschaft
11) Ich habe folgende Use Cases mit der VR-Brille betrachtet:					
☐ Beispielfabrik (Vistable)	☐ Büros Argentinierstraße (Vistable)	☐ TU-Pilotfabrik (PlantSimulation)	☐		

9.2 Experteninterviews

9.2.1 Experteninterview mit Marius Lütkemeyer, MSc.

Experteninterview mit Marius Lütkemeyer, MSc, Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Fabrikplanung und Produktionsorganisation bei der Fraunhofer Austria Research GmbH, durchgeführt am 27.05.2019.

Hast du bisher schon Erfahrungen mit VR gehabt? Wenn ja, welche?

Bis jetzt hatte ich noch keine Erfahrungen in VR, sondern nur verschiedene Anwendungsfälle in Videos gesehen. Selbst bin ich mit dieser Technologie allerdings noch nicht direkt in Berührung gekommen.

VR ist ja bereits in den verschiedensten Branchen im Einsatz. Warum, glaubst du, wurde VR bei uns bisher nicht eingesetzt?

Ich glaube, weil der Fabrikplanungsprozess mit den bestehenden Methoden auch funktioniert hat und aktuell einfach der Ansporn nicht vorhanden war und die Reife dieser Technologie in der Vergangenheit noch nicht ausreichend war. Aber genau das soll sich mit dieser Arbeit ändern.

Was könnten die größten Unterschiede zum Planungsprozess sein, wenn man VR in diesen integriert?

Ich glaube, dass man den Kunden viel besser einbinden kann, da wir uns im Normalfall alles in 2D anschauen und durch unsere Expertise und Erfahrung Fehler auch dort schnell erkennen. Der Kunde kann sich unter diesen Vierecken und Blöcken nichts vorstellen. Wir könnten durch den Einsatz von VR den Kunden früher abholen und schneller in den Planungsprozess integrieren und uns dadurch auch mit anderen Stakeholdern besser vernetzen.

Und ist eine Zeitersparnis oder eine Steigerung der Planungsqualität realistisch?

Gerade die Planungsqualität in einer Detail- oder Montageplanung kann schon gesteigert werden, weil man beispielsweise Regale, Anlagen oder Werkzeuge besser positionieren kann. Eine Zeitersparnis ist ebenfalls möglich denke ich, da man früher auf Fehler stoßen kann, die man sonst erst später erkannt hätte und dadurch Zeit spart. In der klassischen Idealplanung wird man keine Zeit sparen, aber gerade ab der Realplanung wird das interessant.

In welchen Phasen kannst du dir den Einsatz von VR vorstellen?

Auf alle Fälle in der Real- und der Detailplanung. Zum Teil kann man wahrscheinlich auch Mitarbeiter schulen und die Planung mit diesen absprechen, damit man schon vor der Umsetzung oder zumindest vor dem Hochlauf ganz kleine Anpassungen vornehmen kann. Das sind die Phasen, in denen ich den Einsatz auf jeden Fall als sinnvoll erachte.

Kann durch den Einsatz von VR der Austausch mit den Stakeholdern im Planungsprozess verbessert werden? Wenn ja, mit welchen im speziellen?

Also auf jeden Fall mit dem Kunden, darauf liegt der Fokus. Aber auch auf jeden Fall mit dem Zulieferer, also dass wir auch eine bessere Vorstellung von den Technologien und ein besseres Gespür dafür bekommen, was wir als Fabrikplaner jetzt einsetzen müssen. Der Austausch mit dem Industriearchitekten wird bestimmt ebenfalls erleichtert, aber auch Genehmigungen von Behörden oder Ähnlichem könnten dadurch leichter erteilt werden, da man sich durch die Visualisierung alles besser vorstellen kann.

Hattest du bisher schon Projekte, in denen du dir VR als Unterstützung hättest vorstellen können?

Auf alle Fälle, wir hatten schon Projekte, in denen wir mit 3DS Max die Fabrik nachgebaut und so visualisiert haben und praktisch durchgeflogen sind. Aber auch in Vistable haben wir das schon genutzt, aber es ist halt immer noch ein Video und bei weitem nicht so eindrucksvoll wie jetzt die VR-Technologie. Und dadurch, dass man sich mit der VR-Technologie detailliert einzelne Arbeitsplätze genauer anschauen und individuell gestalten kann, ist das nochmal ein riesiger Vorteil.

Du kennst ja mittlerweile die erstellten Vorgehensmodelle. Denkst du, dass diese beziehungsweise zumindest eines davon praxistauglich ist?

Praxistauglich ist es dann, wenn es einfach umsetzbar ist, deswegen würde ich mich auf alle Fälle für den Weg entscheiden, in dem es direkt aus Vistable zur VR-Virtualisierung geht, weil dadurch keine neuen Schnittstellen entstehen und man kein extra Tool dafür benötigt. Das wäre für mich der beste Weg. Der Weg mit Plant Simulation kann ebenfalls sehr interessant werden, wenn sich mehrere Sachen bewegen, das Problem ist allerdings, dass wir dafür keine Rechner mit ausreichender Leistung im Haus haben.

Hast du Verbesserungsvorschläge für die aktuellen Vorgehensmodelle, also beispielsweise für das Modell mit Vistable?

An das Programm oder an diesen Prozess habe ich keine großen Verbesserungsvorschläge. Ein paar Kleinigkeiten, wie beispielsweise das Messen,

könnten noch verbessert werden, beispielsweise damit man mit dem Laser auch weite Entfernungen messen kann, aktuell kann man ja nur mit der Spitze des Controller in der näheren Umgebung messen. Das wäre eine super Sache. Sonst ist die Verbesserung eher auf unserer Seite, also dass wir Hardware anschaffen, mit der auch große Fabrikmodelle visualisiert werden können. Das wäre auch noch eine Anforderung, die allerdings nicht prozessbedingt ist, sondern eine Anforderung an das System.

Du hast ja bereits die Hardware angesprochen. Was sind sonst noch die großen Herausforderungen, die man bewältigen muss, bevor man den Prozess wirklich integrieren kann?

Erstmal muss man das Bewusstsein schaffen, dass es wirklich sinnvoll ist, also dass man beispielsweise die Zeitersparnis wirklich messbar machen kann, damit der Kunde das erkennt und bei einem Projekt auch bereit ist, dafür zu bezahlen. Aber auch um die Mitarbeiter abzuholen, das könnte Richtung Change Management und solche Sachen gehen. Der Kunde muss das Gefühl haben, wir brauchen das, das wäre sinnvoll für uns. Aber das liegt ja auch nicht am Prozess, sondern eher am Einsatz von VR.

Was sollten deiner Meinung nach die nächsten Schritte sein, damit man VR erfolgreich integrieren kann?

Auf Fraunhofer Seite in bessere Hardware investieren, damit wir da keine Probleme haben. Und dann wirklich gezielt in Projekten anwenden, damit Erfahrungen zu sammeln, die Tricks rauszubekommen, sich mit den anderen Stakeholdern auszutauschen und herauszufinden, wie wir sie mit unseren VR-Methoden noch besser unterstützen können.

Glaubst du, dass sich VR auf lange Sicht im Fabrikplanungsprozess durchsetzen wird? Was sind dabei die entscheidenden Faktoren?

Ich glaube, dass die Komplexität der Anwendung entscheidend sein wird. Also falls man es einfach umsetzen kann, dann wird es immer angenehm sein, so etwas zu machen. Ich glaube nicht, dass es jetzt den Standardprozess komplett verändern wird, sondern dass es als Support immer dabei ist zur Visualisierung. Das ist aber extrem abhängig davon, wie schnell man ein Planungsergebnis in die virtuelle Welt überführen kann. Also als Support zur Visualisierung auf alle Fälle, den kompletten Fabrikplanungsprozess revolutionieren wird es, zumindest in den nächsten Jahren, eher nicht.

Vielen Dank für das sehr spannende Interview Marius!

9.2.2 Experteninterview mit Dr. Thomas Sobottka

Experteninterview mit Dr. Thomas Sobottka, Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter im Bereich Fabrikplanung und Produktionsorganisation bei der Fraunhofer Austria Research GmbH, durchgeführt am 07.06.2019.

Hast du bisher schon Erfahrungen mit VR gehabt? Wenn ja, welche?

VR habe ich das erste Mal bei den Grazer Kollegen in der DAFE gesehen, der Definitely Affordable Cave. Die hatten damals das Modell des Wiener Hauptbahnhofes, den die zuerst auf Usability getestet haben und eine Automontage. Später habe ich dann mal selbst das Google Cardboard probiert, das war ok, aber für den Freizeitbereich war damals der Content leider noch ziemlich gering. Man konnte sich beispielsweise in historischen Sehenswürdigkeiten umsehen, aber es fehlte der Content, damit man das langfristig macht. Zum Schluss, das was du uns gezeigt hast, also die Beispielfabrik und die Büros in VR.

VR ist ja bereits in den verschiedensten Bereichen im Einsatz. Warum glaubst du, dass es bei uns noch nicht zum Einsatz gekommen ist?

Aus dem gleichen Grund, warum auch 3D-Planung generell selten bzw. längst nicht bei jeder Planung zum Einsatz kommt. Im Gegensatz zur Layoutplanung, die passieren muss, also Flächen müssen passen, Kollisionen müssen überprüft werden, bietet das 3D einen nicht mehr so eindeutigen Zusatznutzen. Also es bietet einen Nutzen, man kann integrativ oder partizipativ planen, man kann Leute mir reinbringen, die sonst von der Planung nichts wüssten. Ein Meister oder ein Vorarbeiter können sich viel besser vorstellen, wie ihre Fabrik aussieht, wenn sie das in 3D sehen, wie sie das abstrakte Draufschaun nicht immer so gewohnt sind. Das ist schon ein Vorteil, aber gerade die Entscheidungsträger sehen das weniger, die sehen mehr die Kosten, die sich im Bereich von ein paar Personentagen bewegen. Und relativ ähnlich ist es bei VR, wobei da der Coolness-Faktor schon kommen könnte denke ich, gerade in Verbindung mit Augmented oder Mixed Reality, könnte es interessant werden, dass man sich eine zukünftige Fabrik besser vorstellen kann. Ich weiß derzeit noch nicht genau, was langfristig besser ankommen könnte. Ich vermute fast, habe jedenfalls lange Zeit vermutet, Augmented Reality, weil man beispielsweise eine Fabrik im Rohbauzustand durchlaufen kann und man sieht, wie die Objekte darin stehen. Das könnte ein gewisser Nutzen sein, oder dass man sich zum Beispiel ansieht, wie könnte eine neue Maschine in meiner Fabrik aussehen. Aber derzeit ist da die Technik, die wir zur Verfügung haben, noch nicht ausreichend, also die Hololens beispielsweise reicht da absolut noch nicht aus, um das notwendige Immersion-Level zu erreichen. VR ist einfach eine bessere 3D-Planung, also ist das, was man auf dem Bildschirm sehen kann, nur etwas besser. Für bestimmte Sachen, also was zum Beispiel

Bereichs- und Montageplanung angeht, könnte ich es mir gut vorstellen. Aber das machen wir halt relativ selten in unserem Bereich, deswegen kann ich das schwer beurteilen. Aber beispielsweise in der Gruppe, die sich mit Ergonomie, Mensch-Roboter-Kollaboration und Ähnlichem beschäftigen, könnte ich mir vorstellen, dass es dort eher relevant sein könnte. Was wir zum Beispiel in dem Modell der neuen Büros gesehen haben, ist, dass man etwas besser abschätzen kann, wie klaustrophobisch sich eine Situation anfühlt. Das kann man von oben abschätzen, man kann sich auch ein Menschenmodell reinstellen, dann kann man das schon mal ein bisschen besser beurteilen. Aber das subjektive „Fühle ich mich hier wohl“ Gefühl, das kann man sicherlich über VR reingeben, und in solchen Situationen könnte es auch hilfreich sein, Personen aus den Arbeitswissenschaften mit einzubeziehen. Wir haben mit dem ingenieurwissenschaftlichen Blick immer zu sehr das technische Ziel vor Augen und achten eher nur sekundär darauf, wie es dem Menschen damit geht. Gerade mit einem zusätzlichen Blick aus der Arbeitswissenschaft könnte ich mir das sehr gut vorstellen. Die können vielleicht besser beurteilen, wie man sich in der jeweiligen Umgebung fühlt und auf was man achten muss.

Und in welchen Phasen könntest du dir den Einsatz von VR vorstellen?

Also den Einsatz kann ich mir in zwei Phasen vorstellen: In der ersten Phase, wenn es wirklich darum geht zu kommunizieren, wie etwas aussieht und auch wenn es darum geht, Ängste von Mitarbeitern abzubauen, also Umzug in ein neues Greenfield. Da könnte VR helfen, dass die Personen eine gewisse Begeisterung dafür entwickeln. Und zusätzlich in der letzten Phase, wenn es darum geht, die Bereiche zu planen, da könnte ich es mir besonders gut vorstellen, also in der Detailplanung. Also wenn man in der Planung wirklich bis runter auf den Arbeitsplatz geht. Funktionales Arbeitsumfeld kann man, glaube ich, einigermaßen aus Erfahrungswerten sicherstellen, aber dass man einfach diesen subjektiven Aspekt, ob sich die Leute dort wohl fühlen, und die Ästhetik, die nicht ganz unwichtig ist, mitberücksichtigt, ist meiner Meinung nach wichtig. Auch in der Fabrikplanung kommt es oft auf Ästhetik an, also ein Gang soll beispielsweise bis zu einem Ende durchgehen, man möchte eine gerade Flucht haben, nicht alles davon entsteht rein aus dem Materialfluss Aspekt, eher sogar relativ wenig. Vielmehr zählt auch, dass es aufgeräumt und solide aussehen soll, beispielsweise für Kundenbegehungen oder Ähnliches.

Was für ein direkter Nutzen könnte für den Kunden durch den Einsatz von VR entstehen?

Man könnte da mehrere Argumente anführen: Zum einen könnte man sagen, man vermeidet ein späteres erneutes Umplanen, nur wird es das wahrscheinlich nicht sein. Wahrscheinlich ist es eher der Nutzen oder die Zufriedenheit mit dem späteren Ergebnis wird höher sein oder kann verbessert werden. Also beispielsweise auf die Montage oder Bereichsplanung bezogen, man kann sich im Vorhinein schon gewisse

Sachen wünschen, durch die Immersion kann man das vorher schon besser austesten, als wenn man es erst später vor sich sieht und unzufrieden ist. Zu Beginn könnte es zusätzlich vielleicht helfen, also uns ganz persönlich, dass man diesen Professionalitätsaspekt hinzufügen kann, was wir ja auch schon bei der 3D-Planung machen, manchmal geben wir diese ja einfach dazu, damit es ein bisschen cooler aussieht. Dadurch kann man ohne viel Aufwand ein zusätzliches Verkaufsargument hinzufügen. Viel mehr geht da wahrscheinlich noch, wenn man mit Artificial Intelligence Unterstützung aus einem 2D-Layout mit wenigen Schritten ein 3D-Layout erstellen kann. Derzeit ist ja einer der Gründe, warum wir das nicht machen, dass wir das 3D-Modell zusätzlich aufbauen müssen. Wenn man allerdings aus dem Grundriss aus Erfahrungswerten ein 3D-Modell hochziehen könnte, wäre das jedenfalls interessant.

Zur Abstimmung mit welchen Stakeholdern im Planungsprozess könnte VR deiner Meinung nach verwendet werden? Also mit Architekten, Behörden etc.?

Behörden möglicherweise, da hatten wir bisher zu wenig Berührungspunkte mit diesen, um das sicher beurteilen zu können. Architekten in jedem Fall denke ich, weil erstens können die uns Sachen zeigen, die interessant sind, das machen sie ja teilweise schon, da sie zwangsweise in 3D-Planen und viel genauer, haben die immer 3D-Modelle, die sie uns ja oft auch zeigen, das sieht nett aus und in diese kann man sich ja schon sehr gut reinversetzen. Da kommt wieder dieses partizipative Planen ins Spiel, wo es ja beispielsweise auch beim IPA schon die Idee mit dem Planungstisch mit den Blöcken gab, da war es ja die Idee, alle Beteiligten an einen Tisch zu bringen. Ein Fabrikgebäude, das realistisch aussieht, das kann sich ja so ziemlich jeder vorstellen, von der höchsten Führungsebene bis zum Detailplaner, der sich das auch abstrakt vorstellen kann. VR ist eigentlich ein weiterer Weg, um das noch realistischer zu machen. Einen Nachteil hat es, es kann zumindest mit der derzeitigen technischen Ausstattung jeweils nur einer schauen. Eine Lösung wäre zu Beispiel eine CAVE, aber die ist teuer.

Hast du bisher schon Projekte gehabt, bei denen du dir jetzt im Nachhinein denkst, dass der Einsatz von VR dabei sinnvoll gewesen wäre?

Das ist schwierig zu beantworten, weil man die Projekte ja immer irgendwie zufriedenstellend hinbekommt, auch wenn es zwischendurch mal Probleme gibt, aber am Ende ist der Kunde zufrieden, weil man halt so lange rumschleift, bis man etwas hat, mit dem beide gut leben können. Deswegen ist es immer schwierig zu sagen, wo es gefehlt hätte. Ich muss auch sagen, dass ich in den letzten zwei bis drei Jahren gar nicht mehr so viele Fabrikplanungsprojekte gemacht habe. In einem früheren Projekt in der Elektronikfertigung hat es definitiv geholfen, weil beispielsweise durch die SMT-Anlagen ganz lange Gänge entstehen, die auch nicht überwindbar sind, als muss man sich ganz genau überlegen, wie diese Maschinen stehen sollen, damit Wege und Sichtachsen bleiben, die für die Mitarbeiter nutzbar sind, damit diese sich damit täglich

leichter tun. Es gab andere Fabrikplanungen, wo wir 3D-Planung eingesetzt haben. 3D-Planung und VR würde ich ein Stück weit gleichsetzen, da man letztlich Ähnliches sieht. Natürlich ist die Immersion, also das Gefühl, richtig drinnen zu sein, bei VR besser, aber man sieht das Ergebnis auch schon in der 3D-Planung. Aber wo es wirklich gefehlt hat, da muss ich passen. Es gab früher Projekte, wo wir 3D-Planung eingesetzt haben, bei kleineren Projekten haben wir öfter gesagt bei denen muss es nicht zwingend sein oder es war noch in einer sehr groben Planungsphase, wo es nicht notwendig war. Dann gab es trotzdem immer wieder Projekte, in denen wir 3D-Modelle der Planung gemacht haben. Im Wesentlichen ist es eine Mischung aus Notwendigkeit und Möglichkeit, also größere Projekte bieten in der Regel ja die Möglichkeit, so etwas mit abzuhandeln, also da sind 2 Tage mehr für ein 3D-Modell ok. Gleichzeitig steigt aber dabei auch die Notwendigkeit, da das, was dabei neu entsteht, einfach auch größer ist als bei kleinen Projekten, bei denen häufig umgeplant wird, weshalb sich die meisten das eh noch leichter vorstellen können. Aber es gibt auch Kunden, die in nicht so großen Projekten 3D-Planung explizit gefordert haben, beispielsweise um es zu kommunizieren und um es sich besser vorstellen zu können.

Du kennst ja zumindest zwei Vorgehensweisen, mit denen wir VR-Erfahrungen erstellen können. Ist zumindest eine davon praxistauglich?

Ein Problem bei AR ist beispielsweise, wenn die Modelle für die Hardware zu komplex sind, da wäre mittelfristig die Arbeit an einem 3D-Server interessant, wie 3D-Hub glaube ich, bei denen das harte Modell am Rechner gerendert wird und nur noch auf die Brille gestreamt wird. Ich vermute, so etwas Ähnliches wäre auch im VR-Bereich sinnvoll. Wir hatten ja bisher die Begrenzung, dass nur eine gewisse Anzahl an Modellen auf der VR-Brille angezeigt werden kann.

Das Problem ist allerdings rein der Hardware geschuldet. Mit einem entsprechend ausgerüsteten Rechner wäre dieses sofort behoben.

Ok, aber zusätzlich sehe ich das Kabel auch kritisch, das könnte eventuell nervig sein. Aber wenn diese Probleme behoben sind, also wenn man auf die Brille streamen kann und die Ergebnisse wirklich live aus der Planungssoftware mit einer definierten Schnittstelle extrahieren kann ohne Mehraufwand, bei VR ist es mit deiner Vorgehensweise ja möglich, bei AR muss dies noch ausprogrammiert werden. Wenn das erfüllt ist, ist es für uns kaum noch Zusatzaufwand. Wenn man das Modell schon hat, kann man es einfach mitgeben und dann glaube ich, dass ein Kunde im ersten Blick das Projekt und das Vorgehen noch professioneller wahrnimmt. Ein Stück weit ist es ja auch immer ein Antreten gegen die unternehmenseigene Planungsabteilung. Viele versuchen ja, eine Fabrikplanung so nebenbei selbst zu machen. Wenn VR bzw. 3D-Modelle von uns dazukommen, ist es natürlich, neben den ganzen Auswertungen, die wir machen, ein zusätzliches Argument, um es professionell von einem Planer

machen zu lassen. Plus natürlich die Möglichkeit, sich den Planungszustand viel besser vorstellen zu können.

Was sind noch die wesentlichen Herausforderungen, die noch zu bewältigen sind, bevor man VR in den Planungsprozess integrieren kann bzw. was wären die nächsten Schritte?

Das wären wirklich diese Schnittstellen zur vorhandenen Planungssoftware. Weil die verwendete Planungssoftware wird man so schnell nicht wechseln vermutlich. Also braucht es letztendlich eine Schnittstelle, damit man die Daten auf die Brille bekommt, möglichst per Funk, weil das Kabel könnte eben ein Problem darstellen. Ich glaube mit der Hololens dürfte es theoretisch schon gehen, die hat, glaube ich, eine Funkverbindung. Ich will mich nicht zu sehr auf Funk einschließen, bei VR habt ihr ja eigentlich den Schritt mit der Schnittstelle bereits bewältigt, da spricht eigentlich nichts dagegen, wenn man das bei einem Projekt einsetzen würde, bei dem 3D-Modelle erstellt werden. Es spricht auch absolut nichts dagegen, das live beim Kunden zu testen, weil wir einfach nur das Modell, das wir erstellt haben, auf die Brille übertragen, deswegen kann man das jetzt schon nutzen.

Glaubst du, dass sich VR auf lange Sicht im Fabrikplanungsprozess durchsetzen wird oder nicht?

Da ist ein bisschen die Frage, wie sich AR oder Mixed Reality dazu entwickeln wird. Letztendlich haben VR und AR ihren Zweck, AR bringt ja nur etwas, wenn schon ein bisschen was steht, VR kann man dann einsetzen, wenn man komplett Greenfield plant oder ein Bereich noch gar nicht da ist. Ich glaube es haben beide Technologien ihren Einsatzzweck. Ob es jetzt groß den Fabrikplanungsprozess revolutioniert weiß ich nicht, ich glaube es wird mittelfristig eher fast Standard werden. Schon jetzt bieten wir 3D-Planung quasi als ganz normales Standardpaket an, das man für ein bis zwei Tage zu einer Fabrikplanung dazu buchen kann. Hier würde man das wahrscheinlich jetzt einfach mit dazugeben. Die Brillen sind ja jetzt nicht so teuer, also das rechnet sich ja über ein, zwei oder drei Projekte und man bietet das als Zusatznutzen. Ob es jetzt groß den Prozess verändert, weiß ich nicht. In der Regel macht man es ja auch jetzt schon so, dass man eine Workshop-Phase oder eine Bedarfsaufnahme hat, in der man zusammen mit Klötzen etwas macht oder etwas skizziert. Dann haben wir eine Phase, in der wir irgendeine Art von Modell aufbauen und dann macht man, je nachdem, wie groß das Projekt ist, ein bis zwei Workshops mit dem Modell und live Sachen verändert oder man bereitet halt ein paar Planungsstände vor und präsentiert diese dann. Ich glaube von dem Ablauf wird sich wahrscheinlich gar nicht so viel ändern, VR wird einfach ein Standard werden, den man mit nutzt, weil man keinen großen Zusatzaufwand hat und ein zunächst noch kleiner Zusatznutzen entsteht. Dieser Zusatznutzen ist vielleicht größer als bisher angenommen, dazu müssen wir zuerst Erfahrung sammeln. Ich glaube es ist mehr eine „Nice-to-have-Thing“, also ich

glaube niemand wird das explizit fordern, aber kann durchaus sein, dass das Unternehmen das dann zu schätzen lernt, und wenn sie es dann nicht haben, durchaus auch fordern würden.

Super, vielen Dank für das sehr ausführliche Interview und deine Einschätzung zu dem Thema VR in der Fabrikplanung.

10 Literaturverzeichnis

- Berger, Ulrich/Wolff, Daniel/Kulus, Dennis* [2012]: Einsatz digitaler Techniken zur Steigerung der Energieeffizienz in der Automobilindustrie, in: ZWF 107 (2012), S. 587–590
- Bischoff, J.* [2018]: Fabrikplanung und -betrieb: Vorlesungsskriptum, Wien, 2018
- Borrmann, André u. a. (Hrsg.)* [2015]: Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015
- Boton, Conrad* [2018]: Supporting constructability analysis meetings with Immersive Virtual Reality-based collaborative BIM 4D simulation, in: Automation in Construction 96 (2018), S. 1–15
- Bracht, Uwe/Geckler, Dieter/Wenzel, Sigrid* [2018]: Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele: 2., aktualisierte und erweiterte Auflage, Berlin: Springer Vieweg, 2018
- Bracht, Uwe/Schlegel, Marc* [2018]: AR- und VR-Brillen in der Fabrikplanung: Untersuchung der Einastzpotenziale neuer AR- und VR-Brillen für Fabrikplanungsaufgaben, in: wt Werkstatttechnik online, 2018
- Brecher, Christian* [2011]: Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011
- Conradi, Jessica/Alexander, Thomas* [2013]: Zum Einfluss der Immersion bei verschiedenartigen stereoskopischen Displays für Virtuelle Umgebungen, in: Z. Arb. Wiss. 67 (2013), S. 75–81
- Dickmann, Philipp (Hrsg.)* [2015]: Schlanker Materialfluss: Mit Lean Production, Kanban und Innovationen: 3. Auflage, Berlin: Springer Vieweg, 2015
- Diemer, Julia/Zwanzger, Peter* [2019]: Die Entwicklung virtueller Realität als Expositionsverfahren, in: Der Nervenarzt (2019)
- Dombrowski, Uwe/Marx, Sabine (Hrsg.)* [2018]: Klimalng - Planung klimagerechter Fabriken: Problembasiertes Lernen in den Ingenieurwissenschaften, Berlin: Springer Vieweg, 2018
- Dörner, Ralf u. a.* [2013]: Virtual und Augmented Reality (VR/AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013
- Drimalla, H.* [2010]: Sehen in 3D, 2010,
<https://www.dasgehirn.info/wahrnehmen/sehen/sehen-3d> (2018-04-11)

- Du, Jing* u. a. [2018]: Zero latency: Real-time synchronization of BIM data in virtual reality for collaborative decision-making, in: *Automation in Construction* 85 (2018), S. 51–64
- Erlach, Klaus* [2010]: Wertstromdesign: Der Weg zur schlanken Fabrik: 2., bearb. und erweiterte Aufl., Berlin, New York: Springer, 2010
- Gausemeier, Jürgen/Grafe, Michael/Meyer auf der Heide, Friedhelm* (Hrsg.) [2015]: Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung: Grundlagen, Methoden und Werkzeuge - Interaktions- und Visualisierungstechniken - Virtual Prototyping intelligenter technischer Systeme mit AR/VR : 12. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, 23. und 24. April 2015, Heinz Nixdorf MuseumsForum, Paderborn, Band 342, Paderborn: Heinz Nixdorf Institut Universität Paderborn, 2015
- Goldhahn, Leif/Müller-Eppendorfer, Katharina* [2017]: Integrierte Nutzung von Virtual Reality für die Materialbereitstellungsplanung, in: *Z. Arb. Wiss.* 71 (2017), S. 233–241
- Goulding, Jack Steven/Rahimian, Farzad Pour/Wand, Xiangyu* [2014]: Virtual Reality-based cloud BIM platform for integrated AEC projects, in: *Journal of Information Technology in Construction*, 2014
- Grundig, Claus-Gerold* [2018]: Fabrikplanung: Planungssystematik - Methoden - Anwendungen: 6., neu bearbeitete Auflage, München: Hanser, 2018
- Günthner, W.* (Hrsg.) [2011]: Forschungsbericht VR-LogPlan: Virtual Reality Logistik-Planungssystem, München, 2011
- Hauber, Andreas* [2018]: Virtual Reality: Dein Tor zu einer neuen Welt: 1. Auflage, Bergisch Gladbach: Andreas Hauber, 2018
- Helbing, Kurt W./Mund, Horst/Reichel, Martin* [2014]: Handbuch Fabrikprojektierung, Berlin, Heidelberg: Springer, 2014
- Herbig, Norbert* [2016]: Nutzwertanalyse: Eine Methode zur Bewertung von Lösungsalternativen und zur Entscheidungsfindung: 2. Auflage, Norderstedt: BoD - Books on Demand, 2016
- Herr, Dominik* u. a. [2018]: Immersive Modular Factory Layout Planning using Augmented Reality, in: *Procedia CIRP* 72 (2018), S. 1112–1117
- Himmelfreundpointner, Rainer* [2016]: Virtual Reality: Wie die neue Technologie Gesellschaft und Wirtschaft verändern wird, in: *Trend* Nr. 47/2016 v. 25.11.2016, S. 78–88

<http://more3d.com/more3d/index.php?id=234>: VR-Brücke für Ihre Software - MoreViz (2018-04-29)

<http://www.visbox.com/products/cave/>: CAVE Automativ Virtual Environment (2019-04-29)

<http://www.vrjump.de/architektur>: Virtual Reality in der Architektur: Ein unvergleichlicher Vorteil (2019-05-08)

<http://www.vrjump.de/lighthouse-erklart>: Lighthouse von Valve erklärt (2019-04-29)

<https://allgemeinebauzeitung.de/abz/digitale-hilfe-virtual-reality-erweitert-horizont-der-bauindustrie-24928.html>: Virtual Reality erweitert Horizont der Bauindustrie (2019-05-08)

<https://de.victaulic.com/blog/better-less-autodesk-university-recap/>: Autodesk University Recap (2019-05-08)

<https://github.com/Microsoft/MixedRealityToolkit-Unity>: Mixed Reality Toolkit (2019-05-04)

<https://idw-online.de/de/event60029>: Seminar Fabrikplanung - Virtuelle Lernfabrik an der TU Kaiserslautern (2019-05-05)

<https://integrations.bim360.autodesk.com/InsiteVR/InsiteVR/>: InsiteVR (2019-05-08)

<https://medium.com/@northof41/what-really-is-the-difference-between-ar-mr-vr-xr-35bed1da1a4e>: What really is the difference between AR / MR / VR / XR ? (2018-04-02)

<https://monitortest.de/wie-funktioniert-eine-vr-brille/>: Wie funktioniert eine VR-Brille? (2019-04-24)

<https://support.microsoft.com/de-at/help/4041252/windows-10-use-mixed-reality-portal>: Verwenden von Mixed-Reality-Portal (2019-05-01)

<https://support.microsoft.com/de-de/help/4039260/windows-10-mixed-reality-pc-hardware-guidelines>: Hardwarerichtlinien für Windows Mixed Reality-PCs (2019-05-28)

<https://unity.com/de>: The world's leading real-time creation platform (2019-05-01)

<https://vrdummies.org/vr-technologie/tracking/>: Tracking (2019-04-25)

<https://www.acer.com/ac/en/GB/content/series-design/wmr>: Inside-Out Tracking (2019-04-24)

<https://www.androidcentral.com/htc-vive>: HTC Vive (2019-04-24)

https://www.bangsow.eu/suche_kategorie.php?kategorie=7: Beispielsammlung (2019-05-26)

<https://www.brillen-sehhilfen.de/auge/netzhaut-retina.php>: Netzhaut des Auges (Retina): Aufbau und Funktion (2019-04-20)

<https://www.brillen-sehhilfen.de/vr-brillen/funktionsweise-vr-brille.php>: Funktionsweise VR-Brille (2019-04-20)

<https://www.com-magazin.de/news/virtual-reality/hp-stellt-mobilen-rucksack-pc-vr-1241523.html>: HP Z VR Backpack PC: HP stellt mobilen Rucksack-PC für VR vor (2018-04-24)

<https://www.computerwoche.de/a/forschung-in-der-sechs-seiten-cave>, 1069742: Virtual Reality beim Fraunhofer-IAO: Forschung in der Sechs-Seiten Cave (2019-05-01)

<https://www.essert.com/augmented-reality-virtual-reality-mixed-reality-die-feinen-unterschiede>: Augmented Reality, Virtual Reality, Mixed Reality – die feinen Unterschiede (2018-04-02)

<https://www.jungheinrich.com/presse-events/pressemitteilungen/virtual-reality-training-von-jungheinrich-mit-immersive-learning-award-ausgezeichnet-327034>: Virtual-Reality-Training von Jungheinrich mit Immersive Learning Award ausgezeichnet (2019-05-05)

<https://www.pixyz-software.com/plugin/>: Pixyz Plugin (2019-05-04)

<https://www.themarketingtechnologist.co/virtual-reality-connecting-unity-to-the-cave/>: Virtual Reality: Connecting Unity to the CAVE (2019-04-29)

<https://www.tu-chemnitz.de/mb/WerkzMasch/lufa/vrcp/#ausstattung>: 5-Seiten-Cave (2019-04-30)

<https://www.vergleich.org/vr-brille-smartphone/>: Smartphone VR-Brille Vergleich 2019 (2019-04-24)

<https://www.virtual-reality-magazin.de/virtuelle-meetings-autodesk-bim-360>: Virtuelle Meetings in Autodesk BIM 360 (2019-05-08)

<https://www.wearable.com/vr/inside-out-vs-outside-in-vr-tracking-343>: Inside-out v Outside-in: How VR tracking works, and how it's going to change: Positional tracking is one of VR's most interesting challenges (2019-04-24)

<https://www.zeiss.de/content/dam/Vision/Vision/International/images/Articles/zeiss-how3d-3d-eng.jpg>: So funktionieren 3D-Brillen (2019-04-20)

<https://www.zeiss.de/vision-care/besser-sehen/sehen-verstehen/das-menschliche-auge.html>: Das menschliche Auge (2019-04-20)

<https://www.zeiss.de/vision-care/ueber-uns/newsroom/news-overview/hoerblicke-mit-zeiss/virtual-reality-so-funktionieren-vr-brillen.html>: Virtual Reality: So funktionieren VR-Brillen (2019-04-20)

https://xinreality.com/wiki/Inside-out_tracking: Inside Out Tracking (2019-04-25)

Korgel, Daniel [2018]: Virtual Reality-Spiele entwickeln mit Unity®: Grundlagen, Beispielprojekte, Tipps & Tricks ; behandelt Unity 2017, München: Hanser, 2018

Kramme, Rüdiger (Hrsg.) [2016]: Medizintechnik, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016

Kühnapfel, Jörg B. [2014]: Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb, Wiesbaden: Springer-Gabler, 2014

Kunz, Andreas u. a. [2016]: Real Walking in Virtual Environments for Factory Planning and Evaluation, in: *Procedia CIRP* 44 (2016), S. 257–262

Lorenz, D. u. a. [2016]: Eine neue Ära der MANV-Ausbildung? : InSitu - Realitätsnahes Üben in virtuellen Umgebungen, in: *Der Anaesthesist* 65 (2016), S. 703–709

Lutter, T. u. a. [2016]: Zukunft der Consumer Technology: Marktentwicklung, Schlüsselrends, Mediennutzung, Konsumentenverhalten, Neue Technologien, 2016, https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/technology-media-telecommunications/Deloitte_Bitkom-Zukunft-Consumer%20-Technology_08-2016.pdf

Lutz, Ulrich/Galenza, Kerstin [2004]: Industrielles Facility Management, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004

Martin, Heinrich [2016]: Transport- und Lagerlogistik: Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit: 10. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016

Maschmann, Maximilian C. [2017]: Virtual Reality Blueprint: Ein kurzer Einblick in die neue virtuelle Welt der Virtual, Augmented und Mixed Reality, Oberursel: Maximilian C. Maschmann, 2017

Müller, Egon u. a. [2013]: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben, Berlin, Heidelberg: Springer, 2013

Müller-Wittig, Wolfgang [2016]: Virtuelle Realität in der Medizin, in: *Rüdiger Kramme* (Hrsg.), 2016, S. 1–10

- Neugebauer, Reimund* (Hrsg.) [2018]: Digitalisierung: Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft: 1. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018
- Ong, Sean* [2017]: Beginning Windows mixed reality programming: For HoloLens and mixed reality headsets, New York: Apress, 2017
- Pawellek, Günther* [2014]: Ganzheitliche Fabrikplanung: Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung: 2. Aufl., Berlin: Springer Vieweg, 2014
- Pfleger, David/Wehking, Karl-Heinz* [2017]: VR-basierte Planung logistischer Systeme: Entwicklung von Einsatzszenarien und Inbetriebnahme einer Versuchsumgebung: Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik, 2017
- Runde, Christoph/Cannarozzi, Marc* [2016]: Virtuelle Techniken in der Fabrikplanung, in: ZWF 111 (2016), S. 183–186
- Runde, Christoph./Cannarozzi, Marc* [2015]: Virtuelle Techniken in der Fabrikplanung: Anwendungen und Technologien, Whitepaper, 2015
- Schenk, Michael* [2005]: Virtual Reality und Augmented Reality zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme: 8. IFF-Wissenschaftstage, 22. - 24. Juni 2005, [Magdeburg, Magdeburg: IFF, 2005
- Schenk, Michael/Wirth, Siegfried/Müller, Egon* [2014]: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik: 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage 2014, Berlin: Springer Vieweg, 2014
- Schneeweiß, Christoph* [1991]: Planung: Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen, Berlin, Heidelberg: Springer, 1991
- Schulte, H.* [2003]: Planung von Fabrikanlagen I: Vorlesungsskript, Karlsruhe, 2003
- Shi, Yangming* u. a. [2016]: A Multiuser Shared Virtual Environment for Facility Management, in: Procedia Engineering 145 (2016), S. 120–127
- Strunz, Matthias* [2003]: Ressourcenorientierte Fabrikplanungsgrundsätze, in: ZWF 98 (2003), S. 189–197
- Richtlinie, VDI 4499 Blatt 1: Digitale Fabrik, Ausgabe: 02.2008, Berlin: Beuth Verlag GmbH
- Richtlinie, VDI 3633 Blatt 11: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Ausgabe: 10.2009, Berlin: Beuth Verlag GmbH
- Richtlinie, VDI 5200 Blatt 1: Fabrikplanung, Ausgabe: 02.2011, Berlin: Beuth Verlag GmbH

Weidig, Christian/Aurich, Jan C. [2014]: Virtuelle Lernfabrik Kaiserslautern, in: ZWF 109 (2014), S. 747–751

Wiendahl, Hans-Peter/Reichardt, Jürgen/Nyhuis, Peter [2010]: Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten: 1. Aufl., s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2010

Wirth, Siegfried/Schenk, Michael/Müller, Egon [2012]: Wandlungsfähige und ressourceneffiziente Fabriken, in: ZWF 107 (2012), S. 391–397

Wöhe, Günter/Döring, Ulrich/Brösel, Gerrit [2016]: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre: 26., überarbeitete und aktualisierte Auflage, München: Verlag Franz Vahlen, 2016

Yang, X./Malak, J./Aurich, C. [2011]: Analysieren und Planen in virtuellen Umgebungen: Einsatzmöglichkeiten der Virtuellen Realität bei der Gestaltung von Produktionssystemen, in: wt Werkstatttechnik online, Bd. 101, Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, 2011

Zaker, Reza/Coloma, Eloi [2018]: Virtual reality-integrated workflow in BIM-enabled projects collaboration and design review: a case study, in: Vis. in Eng. 6 (2018), S. 230

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: VR-Umsatzprognose in Millionen Euro	1
Abbildung 2: Qualitative Aufwandsschätzung für den Einsatz von VR	4
Abbildung 3: Vorgehensweise theoretische Grundlagen	7
Abbildung 4: Vorgehensweise praktische Umsetzung	8
Abbildung 5: Fabrik als System	10
Abbildung 6: Zielfelder Fabrikkonzept (eigene Darstellung)	14
Abbildung 7: Flexibilität vs. Wandlungsfähigkeit	15
Abbildung 8: Festlegung des Energieverbrauches und tatsächlicher Energieverbrauch über Fabrik-Lebenszyklus	16
Abbildung 9: Struktur-/Planungsebenen einer Fabrik (eigene Darstellung)	17
Abbildung 10: Fabriklebenszyklus und Planungsstufen (eigene Darstellung)	19
Abbildung 11: lang-, mittel- und kurzfristige Anpassungen an Veränderungen	20
Abbildung 12: Planungsgrundsätze Fabrikplanung (eigene Darstellung)	23
Abbildung 13: Phasenmodell Fabrikplanungsprozess (eigene Darstellung)	25
Abbildung 14: festgelegte und entstehende Kosten in den Planungsphasen (eigene Darstellung)	26
Abbildung 15: Schnittstellen und Problememe im klassischen Fabrikplanungsprozess	33
Abbildung 16: Beteiligte am Fabrikplanungsprozess (eigene Darstellung)	34
Abbildung 17: Auszug Tools, Methoden und Werkzeuge im Fabrikplanungsprozess	36
Abbildung 18: Beispiel ABC-Analyse	37
Abbildung 19: Beispiel PQ-Analyse (eigene Darstellung)	37
Abbildung 20: Ablauf Wertstromanalyse (eigene Darstellung)	38
Abbildung 21: Beispiel Wertstromanalyse	39
Abbildung 22: Vorgehensweise bei der Materialflussplanung (eigene Darstellung) ..	40
Abbildung 23: Materialflussvisualisierung (Lineares, Kreis und Matrix Blockdiagramm)	41
Abbildung 24: Wertschöpfungsdarstellung im Blockdiagramm	41
Abbildung 25: Ist-Zustand des Materialflusses im Reallayout	42
Abbildung 26: Trends mit Auswirkungen auf die Fabrikplanung und den Fabrikbetrieb	44
Abbildung 27: ausgewählte Anwendungsfelder der Digitalen Fabrik	46
Abbildung 28: Building Information Modelling	47
Abbildung 29: Begriffsabgrenzung Virtual Reality (eigene Darstellung)	51
Abbildung 30: Aufbau des Auges	52
Abbildung 31: Stereoskopisches Sehen beim Menschen	53
Abbildung 32: Seheindrücke Stereoskopisches Sehen	54
Abbildung 33: Funktionsweise VR-Headset	55

Abbildung 34: Darstellung in der VR-Brille.....	56
Abbildung 35: Mobile VR-Brille für Smartphones.....	56
Abbildung 36: Stationäres VR-Headset	57
Abbildung 37: Mobiler VR-Rechner	57
Abbildung 38: Bewegungen des HMD	58
Abbildung 39: Inside-Out vs. Outside-In-Tracking	59
Abbildung 40: Tracking HTC Vive.....	60
Abbildung 41: Schematischer Aufbau CAVE	61
Abbildung 42: Anwendungsbeispiel CAVE: Virtuelle Begehung einer Fabrik	62
Abbildung 43: Standarsansicht im Unity-Editor.....	63
Abbildung 44: Workflow in Unity für VR-Anwendung	65
Abbildung 45: Auszug Bausteine des MRTK	66
Abbildung 46: typischer Workflow MoreViz.....	67
Abbildung 47: Entwickleransicht Windows Mixed Reality Portal.....	68
Abbildung 48: Einsatz virtueller Techniken im Fabrikplanungsprozess (eigene Darstellung)	71
Abbildung 49: Überblendung Soll-Planung und reale Perspektive	72
Abbildung 50: Virtueller Walkthrough im Cave	72
Abbildung 51: Multi-User Meeting zur Besprechung von BIM-Daten.....	74
Abbildung 52: VR zum Planen von Rohrleitungen	75
Abbildung 53: Framework für Multi-User Kommunikation mit BIM.....	75
Abbildung 54: Virtuelle Lernfabrik Kaiserslautern	76
Abbildung 55: Phasen der virtuellen Lernfabrik Kaiserslautern	77
Abbildung 56: Regelkreis der VR-Visualisierung	78
Abbildung 57: Darstellung der Greifbereiche	79
Abbildung 58: VR-Training Center Jungheinrich.....	81
Abbildung 59: Hardwareanforderungen Windows Mixed Reality	82
Abbildung 60: Field of View	84
Abbildung 61: Rechnerunterstützung in der Fabrikplanung (eigene Darstellung)	88
Abbildung 62: GrAPPA	89
Abbildung 63: 2D-Beispiel Grappa	90
Abbildung 64: 3D-Beispiel Grappa	90
Abbildung 65: Vistable Touch	91
Abbildung 66: 3D-Viewer Vistable	91
Abbildung 67: 2D-Beispiel Vistable Touch.....	92
Abbildung 68: 3D-Beispiel Vistable Touch.....	92
Abbildung 69: Plant Simulation - 2D Ansicht	93
Abbildung 70: Plant Simulation - 3D-Ansicht	93
Abbildung 71: 2D-Beispiel Plant Simulation.....	94
Abbildung 72: 3D-Beispiel Plant Simulation.....	94
Abbildung 73: AutoCad Architecture Factory Design Utilities	95

Abbildung 74: Inventor Factory Design Utilities	95
Abbildung 75: 2D-Beispiel AutoCad Architecture	96
Abbildung 76: 3D-Beispiel Inventor	96
Abbildung 77: Vorgehensmodell 1	100
Abbildung 78: Unity Projekt erstellen	101
Abbildung 79: Grundeinstellungen neues Projekt	101
Abbildung 80: Unity Startbildschirm	102
Abbildung 81: Zusatzpakete importieren	102
Abbildung 82: Mixed Reality Toolkit importieren	103
Abbildung 83: Importeinstellungen MR Toolkit	103
Abbildung 84: MR Projekteinstellungen	104
Abbildung 85: Konfiguration MR Projekteinstellungen	104
Abbildung 86: MR Szeneneinstellungen	105
Abbildung 87: Konfiguration MR Szeneneinstellungen	105
Abbildung 88: Unity Grundkonfiguration für WMR	106
Abbildung 89: Import Einstellungen 3DS Max	106
Abbildung 90: Export aus 3DS Max	107
Abbildung 91: Import von 3D Modell in Unity	108
Abbildung 92: Szenenerstellung Unity	108
Abbildung 93: Starten Windows Mixed Reality Toolkit	109
Abbildung 94: Übertragung in Windows Mixed Reality Portal	109
Abbildung 95: Erstellen einer Anwendung	110
Abbildung 96: Units Build Settings	110
Abbildung 97: Vorgehensmodell 2	111
Abbildung 98: MoreViz Servereigenschaften	112
Abbildung 99: moreViz Serververbindungen	112
Abbildung 100: moreViz Server Starteinstellungen	113
Abbildung 101: moreViz Server Info	113
Abbildung 102: moreViz VR-Client allgemeine Einstellungen	114
Abbildung 103: moreViz VR-Client Output Einstellungen	114
Abbildung 104: moreViz Anwendungsaktivierung	115
Abbildung 105: Anwendung hinzufügen	116
Abbildung 106: Vistable hinzufügen	116
Abbildung 107: Vistable 3D Einstellungen	117
Abbildung 108: Umgebung anzeigen deaktivieren	117
Abbildung 109: Start des moreViz Servers	118
Abbildung 110: Starten des Windows Mixed Reality Portals	118
Abbildung 111: Einrichten der Raumgrenzen	119
Abbildung 112: Start des moreViz VR Clients	119
Abbildung 113: Start der Vistable Open GL Anwendung	120
Abbildung 114: Start von Vistable	121

Abbildung 115: Vorgehensmodell 3.....	122
Abbildung 116: Voreinstellungen Plant Simulation	123
Abbildung 117: Open GL Version Einstellung.....	124
Abbildung 118: Plant Simulation hinzufügen	124
Abbildung 119: Starten von Plant Simulation.....	125
Abbildung 120: Aufbau Demonstration Use Cases.....	134
Abbildung 121: Grundriss Use Case Bürogebäude	135
Abbildung 122: 3D-Ansicht Use Case Bürogebäude	136
Abbildung 123: VR-Ansicht Büro-Arbeitsplatz	136
Abbildung 124: VR-Ansicht Besprechungsraum.....	137
Abbildung 125: VR-Ansicht einer Abstandsmessung	137
Abbildung 126: VR-Ansicht Vogelperspektive Büro.....	138
Abbildung 127: Grundriss Use Case Beispielfabrik	139
Abbildung 128: 3D-Ansicht Use Case Beispielfabrik	139
Abbildung 129: VR-Ansicht Vogelperspektive Fabrik	140
Abbildung 130: VR-Ansicht Fabrik Montageplatz	140
Abbildung 131: VR-Ansicht Längenmessung	141
Abbildung 132: VR-Ansicht Flagge setzen	141
Abbildung 133: 3D-Ansicht Use Case Pilotfabrik TU Wien	142
Abbildung 134: VR-Ansicht TU Wien Pilotfabrik	142
Abbildung 135: VR-Ansicht TU Wien Pilotfabrik Montageplatz.....	143
Abbildung 136: 3D-Ansicht Use Case Roboterzelle	144
Abbildung 137: VR-Ansicht Roboterzelle 1.....	144
Abbildung 138: VR-Ansicht Roboterzelle 2.....	145
Abbildung 139: VR-Ansicht Detail Roboter.....	145
Abbildung 140: Legende Fragebogen-Auswertung	146
Abbildung 141: Bereits VR-Erfahrung.....	146
Abbildung 142: Einsatzphasen für VR im Fabrikplanungsprozess	147
Abbildung 143: Potentiale durch VR in der Fabrikplanung (1/2)	147
Abbildung 144: Potentiale durch VR in der Fabrikplanung (2/2)	148
Abbildung 145: Verbesserungsvorschläge für Einsatz von VR.....	148
Abbildung 146: Einsatzszenarien für VR in der Fabrikplanung.....	149
Abbildung 147: bisherige Projekte für VR-Einsatz	149
Abbildung 148: Herausforderungen bei Einsatz von VR.....	150
Abbildung 149: VR wird sich im Fabrikplanungsprozess durchsetzen.....	150

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beschreibung der Planungsphasen (Teil 1)	26
Tabelle 2: Beschreibung der Planungsphasen (Teil 2)	27
Tabelle 3: Beschreibung der Planungsphasen (Teil 3)	28
Tabelle 4: Beschreibung der Planungsphasen (Teil 4)	29
Tabelle 5: Beschreibung der Planungsphasen (Teil 5)	30
Tabelle 6: Beschreibung der Planungsphasen (Teil 6)	31
Tabelle 7: Beschreibung der Planungsphasen (Teil 7)	32
Tabelle 8: Merkmale von VR	50
Tabelle 9: Kurzbeschreibung und Beispiele zu Mixed Reality	51
Tabelle 10: Bereiche im Unity Editor	64
Tabelle 11: paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien	85
Tabelle 12: Bewertung der VR Headsets	86
Tabelle 13: Nutzwertanalyse VR Headsets	87
Tabelle 14: Anforderungen an die Vorgehensmodelle (Teil 1)	97
Tabelle 15: Anforderungen an die Vorgehensmodelle (Teil 2)	98
Tabelle 16: Anforderungen an die Vorgehensmodelle (Teil 3)	99
Tabelle 17: Legende Vorgehensmodelle	99
Tabelle 18: Problembehandlung Vorgehensmodell 2 (Teil 1)	121
Tabelle 19: Problembehandlung Vorgehensmodell 2 (Teil 2)	122
Tabelle 20: Bewertungsskala für Vorgehensmodelle	126
Tabelle 21: Bewertung Vorgehensmodell 1 (Teil 1)	126
Tabelle 22: Bewertung Vorgehensmodell 1 (Teil 2)	127
Tabelle 23: Bewertung Vorgehensmodell 1 (Teil 3)	128
Tabelle 24: Bewertung Vorgehensmodell 2 (Teil 1)	128
Tabelle 25: Bewertung Vorgehensmodell 2 (Teil 2)	129
Tabelle 26: Bewertung Vorgehensmodell 2 (Teil 3)	130
Tabelle 27: Bewertung Vorgehensmodell 3 (Teil 1)	130
Tabelle 28: Bewertung Vorgehensmodell 3 (Teil 2)	131
Tabelle 29: Bewertung Vorgehensmodell 3 (Teil 3)	132
Tabelle 30: Vergleich der Vorgehensmodelle	133

13 Abkürzungsverzeichnis

AI	Artificial Intelligence
AR	Augmented Reality
BIM	Building Information Modeling
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design
CAVE	Cave Automatic Virtual Environment
DMU	Digital Mock-Up
Dr.	Doktor
\$	Dollar
€	Euro
etc.	et cetera
fps	Frames per Second
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GMK	Groß-Mittel-Klein
HMD	Head Mounted Display
Inkl.	inklusive
LED	Light Emitting Diode
MOD	Minimale Objekt Distanz
MR	Mixed Reality
MRTK	Mixed Reality Toolkit
MSc	Master of Science
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
Stk.	Stück
T€	Tausend Euro
u.a.	Unter anderem
USD	US Dollar
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VR	Virtual Reality
WMR	Windows Mixed Reality
z.B.	zum Beispiel
z.T.	Zum Teil