



## Materialflussoptimierung mittels Digitalen Zwillings

Robert Riks  
Florian Bross  
Jürgen Wunderlich

Erschienen am 22.12.2022

### *Landshuter Arbeitsberichte zur Wirtschaftsinformatik*

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Wunderlich, Prof. Dr. Dieter Greipl,  
Prof. Dr. Peter Scholz, Prof. Dr. Christian Seel († 2019)

**Landshuter Arbeitsberichte zur Wirtschaftsinformatik**

ISSN: 2197-4497

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Wunderlich, Prof. Dr. Dieter Greipl,  
Prof. Dr. Peter Scholz, Prof. Dr. Christian Seel († 2019)

Kontakt: Hochschule Landshut, Am Lurzenhof 1, 84036 Landshut

Webadresse:

<https://www.haw-landshut.de/hochschule/fakultaeten/informatik/forschung/publikationen.html>

## **Gendererklärung**

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in diesem Arbeitsbericht die Sprachform des generischen Maskulinums angewendet. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die ausschließliche Verwendung der männlichen Form geschlechtsunabhängig verstanden werden soll.

# Inhaltsverzeichnis

I.	Abkürzungsverzeichnis .....	III
II.	Abstract .....	IV
1	Einleitung.....	- 1 -
1.1	Problemstellung .....	- 1 -
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise .....	- 2 -
2	Theorie und Grundlagen .....	- 2 -
2.1	Definitionen.....	- 2 -
2.1.1	Simulation.....	- 2 -
2.1.2	Digitales Modell.....	- 3 -
2.1.3	Digitaler Zwilling.....	- 3 -
2.1.4	Digitaler Schatten .....	- 4 -
2.1.5	Digitaler Thread.....	- 4 -
2.1.6	System .....	- 5 -
2.1.7	Materialfluss.....	- 5 -
2.1.8	Informationsfluss.....	- 5 -
2.2	Grundlagen zur Materialflussoptimierung.....	- 5 -
2.2.1	Ursachen.....	- 5 -
2.2.2	Ziel .....	- 6 -
2.2.3	Materialflussanalyse.....	- 6 -
2.2.4	Materialflussplanung/-optimierung.....	- 12 -
2.3	Grundlagen zum Digitalen Zwilling.....	- 16 -
2.3.1	Stand der Technik.....	- 16 -
2.3.2	Typen von digitalen Zwillingen .....	- 18 -
2.3.3	Herausforderungen bei der Erstellung.....	- 19 -
2.3.4	Datenakquise.....	- 20 -
2.3.5	Identifikation & Import von Objekten.....	- 21 -
2.3.6	Zusammenfassung zum Digitalen Zwilling .....	- 22 -
2.3.7	Abgrenzung zur Simulation .....	- 22 -
2.4	Vorstellung der Softwareprogramme .....	- 23 -
2.4.1	Tecnomatix Plant Simulation.....	- 23 -
2.4.2	visTABLE® .....	- 24 -
3	Vergleich der Softwareprogramme.....	- 26 -

3.1	Vorbereitung .....	- 27 -
3.2	Beurteilung der Programme.....	- 27 -
4	Vorgehen zur Materialflussoptimierung mittels Digitalen Zwillings.....	- 32 -
4.1	Materialflussanalyse im IST-Modell .....	- 32 -
4.1.1	Ziel- und Ergebnisdefinition .....	- 33 -
4.1.2	Datenakquise.....	- 33 -
4.1.3	Auswertung der Daten .....	- 35 -
4.1.4	Darstellung der Daten .....	- 36 -
4.1.5	Beurteilung & Schwachstellenanalyse .....	- 37 -
4.2	Bestimmung des SOLL-Modells .....	- 37 -
4.2.1	Grobplanung.....	- 38 -
4.2.2	Feinplanung .....	- 39 -
5	Anwendung/ Validierung.....	- 40 -
5.1	Ausgangssituation .....	- 40 -
5.2	Materialflussanalyse im Ist-Modell .....	- 41 -
5.2.1	Datenakquise.....	- 41 -
5.2.2	Aufbau des Ist-Modells.....	- 42 -
5.2.3	Sankey-Diagramm .....	- 43 -
5.2.4	Beurteilung & Schwachstellenanalyse .....	- 44 -
5.3	Materialflussplanung mit dem Soll-Modell.....	- 45 -
5.3.1	Groblayoutplanung.....	- 45 -
5.3.2	Feinlayoutplanung.....	- 49 -
6	Erkenntnisse und Schlussfolgerung.....	- 50 -
6.1	Erkenntnisse aus dem Vergleich.....	- 50 -
6.2	Erkenntnisse aus der Anwendung.....	- 51 -
6.3	Schlusswort .....	- 53 -
I.	Abbildungsverzeichnis.....	V
II.	Literaturverzeichnis.....	VII
a.	Schriftliche Quellen .....	VII
b.	Online Quellen.....	VII
III.	Anhang.....	IX

## I. Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
bzw.	Beziehungsweise
CRM	Customer-Relationship-Management
DZ	Digitaler Zwilling
ERP	Enterprise-Resource-Planning
etc.	et cetera
ETO	Engineering to order
evtl.	eventuell
ggf.	gegebenfalls
IoT	Internet of Things
MFA	Materialflussanalyse
PDM	Produktdatenmanagement
PLM	Produktlebenszyklus
PZ	Physischer Zwilling
vgl.	vergleiche
z.B	Zum Beispiel

## II. Abstract

Das Ziel dieses Arbeitsberichts ist die Darstellung einer Vorgehensweise zur Optimierung des Materialflusses mit Hilfe eines Digitalen Zwillinges und welche Vorteile sich daraus ergeben. Bei der Vorgehensweise wird dabei zwischen der Materialflussanalyse und der anschließenden Planung bzw. Optimierung des Flusses unterschieden und vom Digitalen Zwilling als Tool bei der Durchführung unterstützt. Des Weiteren soll ersichtlich gemacht werden, was der Unterschied zwischen einem Digitalen Zwilling und einer klassischen Simulation ist. Für eine Validierung der Vorgehensweise wird diese anschließend innerhalb eines Einsatzes in einem realen Industrieprojekt auf die Wirksamkeit und Effizienz geprüft. Bei der Aufgabe des Projekts handelt es sich dabei um eine Optimierung und Umstrukturierung des Materialflusses aufgrund der Verlagerung einer Produktionshalle an einen neuen Standort. Ein weiteres Ziel besteht darin, zwei aus der Industrie bekannte Softwareprogramme, welche für den Einsatz in der Materialflussoptimierung eingesetzt werden können, betreffend ihre Eignung für diesen konkreten Anwendungsfall zu beurteilen. Bei den Programmen handelt es sich dabei um Tecnomatix Plant Simulation von Siemens und visTABLE<sup>®</sup> von der plavis GmbH. Für die Beurteilung werden beide zunächst anhand verschiedener Kriterien miteinander verglichen und anschließend innerhalb der Vorgehensweise in einem konkreten Beispiel eingesetzt. Der Einsatz soll dabei aber nicht als direkter Vergleich dienen, sondern die Eignung beurteilen und die Potenziale bei einer Kombination der beiden Digitalen Zwillinge aufzeigen. Als Ergebnis werden dabei die jeweiligen Stärken sowie die Unterschiede der Tools ersichtlich gemacht und dargestellt für welche Aufgaben sich das jeweilige Programm am besten eignet.

**Schlagwörter:** Digitaler Zwilling, Materialflussanalyse, Materialflussoptimierung

# 1 Einleitung

Zu Beginn werden in der Einleitung die Problemstellung bzw. die Bedeutung des Themas dargestellt. Außerdem wird auf das Ziel und die Vorgehensweise eingegangen.

## 1.1 Problemstellung

Globalisierung, ein beschleunigter technologischer Fortschritt in Kombination mit dem Einsatz von Industrie 4.0, Individualisierung und ein zunehmendes dynamisches Umfeld stellen produzierende Unternehmen heutzutage vor eine große Herausforderung. Zusätzlich dazu erschwert der Ausbruch des Virus SARS-Cov-2 die allgemeinen Arbeitsbedingungen. Diese und weitere Faktoren sorgen nicht nur für einen höheren Planungsaufwand, komplexere Produktionslinien bzw. die Produktion generell, sondern erschweren ebenfalls ganzheitliche Entscheidungen in der Produktion. Eine stetige Optimierung und Verbesserung der Prozesse, sowie eine Digitalisierung in der Produktion sind dabei unvermeidbar, um am Markt auch zukünftig präsent sein zu können. Eine Möglichkeit diese Probleme und Herausforderungen, besonders in Bezug auf Industrie 4.0 und der Digitalisierung, effektiv zu bewältigen und potentielle Optimierungen effizient aufzeigen zu können ist die Durchführung einer Materialflussanalyse anhand eines Digitalen Zwillinges. Der Digitale Zwilling verbindet dabei die reale und digitale Welt mit Hilfe einer virtuellen Nachbildung von realen Objekten und schafft die Möglichkeit Konzepte und Prozesse im Vorfeld zu testen und zu validieren (DiConneX 2019).

Dennoch bedarf der Einsatz von Digitalen Zwillingen weiterer Forschung und kann aktuell nur das Potential aufzeigen, welches dieses Hilfsmittel für die zukünftige Prozessoptimierung und Digitalisierung bietet. Gründe hierfür sind, dass der Digitale Zwilling immer noch nicht weit verbreitet ist, die Anwendungsmöglichkeiten zu vielfältig sind, sowie aktuell noch kein einheitlicher Standard vorhanden ist (Eigner 2020, S.3). Außerdem stellt der Digitale Zwilling den Nutzer vor einige Hindernisse. Beispielsweise erfordert die Arbeit mit einem Digitalen Zwilling ein fundiertes Fachwissen im Bereich der Informationstechnologie. Ein weiterer Fehler, der häufig vorkommt, ist, dass der Begriff des Digitalen Zwillinges oft falsch interpretiert wird und es sich eigentlich gar nicht um einen Zwilling, sondern zum Beispiel um einen Digitalen Schatten oder gar eine klassische Simulation handelt.

Des Weiteren stellt neben dem eigentlichen Digitalen Zwilling die Auswahl des Programms zur Realisierung eines solchen Zwillinges eine eigene Herausforderung dar. Jedes Programm besitzt nämlich seine eigenen Simulationswerkzeuge, Möglichkeiten zur Optimierung oder unterschiedliche Anschaffungskosten und muss je nach Anwendungswunsch sorgfältig ausgesucht werden. Hinzu kommt, dass jedes Programm auf unterschiedliche Anwendungsgebiete spezialisiert ist. Viele Unternehmen erkunden die Möglichkeiten der Programme nicht sorgfältig genug und wählen das Programm nicht nach Anwendungsfall, sondern zum Beispiel nach Bekanntheit oder Hersteller aus. Dies kann nicht nur für zusätzliche unnötige Kosten, sondern auch für Zeitverluste sorgen, da dann der Aufwand für die Anwendung höher als der eigentliche Nutzen ist. Nicht nur bei der Erstellung eines Digitalen Zwillinges müssen Hürden überwunden werden, sondern auch bei der Durchführung einer Materialflussoptimierung. Denn diese muss sorgfältig geplant werden, um dem Unternehmen auch tatsächlich Verbesserungspotentiale aufzeigen zu können und nicht nur für zusätzlichen Aufwand zu sorgen.



## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das primäre Ziel ist die Beschreibung der Vorgehensweise einer Materialflussanalyse, welche von einem Digitalen Zwilling unterstützt wird. Diese soll Möglichkeiten der Optimierung des Materialflusses und Erkenntnisse zur Produktivitätserhöhung, potentiellen Kostensenkung und Effizienzsteigerung liefern. Außerdem soll erkenntlich gemacht werden, welche Daten für die Materialflussplanung notwendig sind, wie diese verarbeitet werden müssen und welche Schnittstellen zwischen realer und virtueller Welt zur Datenintegration genutzt werden können. Der Einsatz der Vorgehensweise in einem realen Industrieprojekt soll diese validieren. Des Weiteren werden zwei Softwareprogramme zur Erstellung eines Digitalen Zwillings, die für eine Materialflussoptimierung eingesetzt werden können, vorgestellt. Als Ziel sollen Unterschiede sowie Stärken ersichtlich gemacht und die Eignung beurteilt werden. Bei den Programmen handelt es sich um Tecnomatix Plant Simulation von der Siemens AG und visTABLE® von der plavis GmbH.

Zu Beginn werden die wichtigsten Begriffe, welche für das Verständnis nötig sind, erläutert und auf den aktuellen Stand der Technik, sowie auf die grundlegende Theorie des Digitalen Zwillings eingegangen. Darüber hinaus wird die klassische Materialflussanalyse sowie -optimierung anhand einer standardmäßigen Vorgehensweise erklärt. Außerdem soll der genaue Unterschied zwischen einer klassischen Simulation und einem DZ ersichtlich gemacht werden.

Die Hauptarbeit besteht aus der Beschreibung und Anwendung der Vorgehensweise einer Materialflussoptimierung mit Hilfe des Digitalen Zwillings im Sinne eines Digitalen Modells. Dies beinhaltet die Analyse der aktuellen Material- und Informationsflussdaten und die daraus abgeleitete Schwachstellenbestimmung. Aus den Erkenntnissen dieser gehen Alternativen zur Optimierung des Materialflusses hervor, welche anhand einer anschließenden Beurteilung dargestellt werden. Die Validierung und Bewertung der Vorgehensweise wird anhand eines Einsatzes in einem realen Industrieprojekt durchgeführt. Außerdem soll ein Vergleich der zwei zuvor genannten Softwareprogramme die jeweiligen Unterschiede, Stärken und Einsatzmöglichkeiten aufzeigen.

Die Erkenntnisse und Ergebnisse werden schließlich zusammengefasst dargestellt und eine Schlussfolgerung in Bezug auf den Einsatz und die Wirksamkeit in der Praxis gezogen.

## 2 Theorie und Grundlagen

Jede wissenschaftliche Arbeit basiert auf einem soliden theoretischen Fundament. Dieses wird in diesem Kapitel kompakt dargestellt.

### 2.1 Definitionen

Für ein besseres Verständnis der weiteren Kapitel werden nachfolgend einige Begriffe ausführlich erläutert und die Theorie bzw. Grundlagen zur Materialflussoptimierung, dem Digitalen Zwilling und unterschiedlichen Softwareprogrammen zur Erstellung von DZ dargestellt.

#### 2.1.1 Simulation

Die Richtlinie VDI 3633 definiert die Simulation als „das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ (VDI-Richtlinie 3633 2018). Dabei wird die Simulation primär für die Neuplanung genutzt, wobei nur das nachgebildet wird, was gerade benötigt wird.

### 2.1.2 Digitales Modell

Das Digitale Modell stellt eine digitale Nachbildung eines bestehenden oder geplanten Objekts dar, das keinerlei automatischen Austausch von Daten vom physischen zum digitalen Objekt vornimmt. Das Modell verfügt über mehr oder weniger Informationen über das physische Objekt und kann mathematische Modelle von neuen Produkten oder anderen Modellen des physischen Objekts beinhalten. Zu beachten ist, dass keinerlei automatische Datenintegration durchgeführt wird und ein Datenaustausch ausschließlich manuell erfolgt. Dies hat zur Folge, dass eine Zustandsänderung des physischen Objekts das digitale Gegenstück nicht beeinflusst und umgekehrt. (Kritzinger et al. 2018, S.1017)

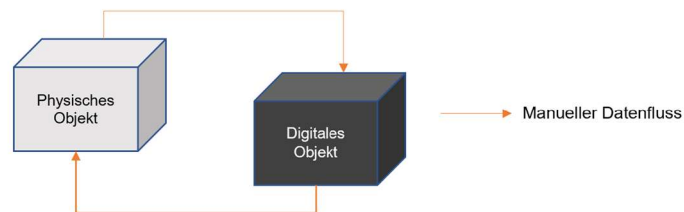


Abbildung 1: Datenfluss im Digitalen Modell (Kritzinger et al. 2018)

### 2.1.3 Digitaler Zwilling

Eine der ersten Definitionen eines Digitalen Zwillings wurde 2002 von Michael Grieves (Grieves 2002) geschaffen. Er definierte den Digitalen Zwilling innerhalb einer Präsentation über das Produktlebenszyklus-management als ein digitales Informationskonstrukt, das auf einem physischen System basiert und mit diesem verknüpft ist (Grieves und Vickers 2017). Die Datenflüsse sind in beide Richtungen vollständig integriert, wodurch ein Digitaler Zwilling auch als Kontrollinstanz für das physische Objekt dargestellt werden kann (Kritzinger et al. 2018, S.1017). Eine Zustandsänderung des physischen Objekts sorgt immer auch für eine Änderung des Zustandes des digitalen Objekts und umgekehrt (Kritzinger et al. 2018, S.1017).

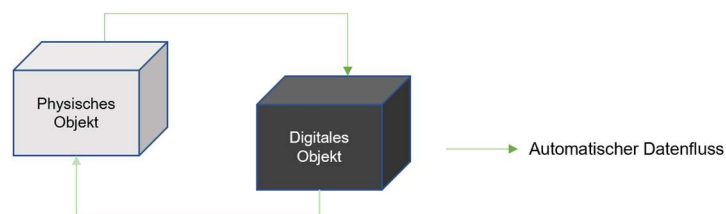


Abbildung 2: Datenfluss im Digitalen Zwilling (Kritzinger et al. 2018)

Allgemein wird der Digitale Zwilling als „eine digitale Repräsentation einer Produktinstanz verstanden, bei der es sich um materielle oder immaterielle Objekte, sowie Produkte, Systeme, Dienstleistungen oder Prozesse handeln kann“ (Eigner 2020, S.3). Das Fraunhofer IOSB wiederum sieht den DZ als „ein Konzept mit dem Produkte sowie Maschinen und deren Komponenten, unter Einbeziehung aller geometrischen, kinematischen und logistischen Daten, mit Hilfe von digitalen Werkzeugen modelliert werden“ (Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB 2022).

Ein Vergleich der verschiedenen Definitionen zeigt, dass ein DZ als eine exakte digitale Nachbildung eines physischen Systems gesehen werden kann. Der DZ und der PZ stehen dabei in Verbindung, wodurch sich Änderungen auf beiden Seiten immer auf den Gegenpart auswirken. Aus diesem Grund wird ein DZ meist für bereits bestehende Anlagen verwendet. Außerdem wird im Gegensatz zur Simulation im DZ alles abgebildet, ohne zu wissen, ob dies im Moment überhaupt benötigt wird.

### 2.1.4 Digitaler Schatten

Nach der allgemeine Definition stellt der Digitale Schatten eine virtuelle Nachbildung von allen relevanten Daten aus einer Produktion, der Entwicklung und den Bereichen innerhalb der Systemgrenze dar (elunic - professional services for the connected industry 2022). Beim Digitalen Schatten findet im Gegensatz zum Digitalen Modell und Zwilling ein automatisierter einseitiger Datenfluss zwischen dem physischen und digitalen Objekt statt (Kritzinger et al. 2018, S.1017). Eine Zustandsänderung beim physischen Objekt sorgt für eine Änderung beim digitalen Gegenstück, aber nicht umgekehrt (Kritzinger et al. 2018, S.1017).

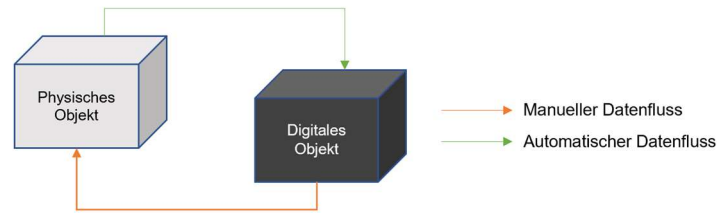


Abbildung 3: Datenfluss im digitalen Schatten (Kritzinger et al. 2018)

### 2.1.5 Digitaler Thread

Der Digitale Thread bezeichnet eine Art Verbindung zwischen allen Teilmodellen und erstreckt sich dabei über den gesamten Produktlebenszyklus. Des Weiteren fungiert er als Schnittstelle für diese und kann Informationen von anderen IT-Systemen (z.B. CRM) einbinden. Er sorgt außerdem für eine Traceability und ermöglicht es bei Problemen einer Komponente rückwärtsartig nach dem Problem zu suchen und die Ursache zu ermitteln. Dies ermöglicht Optimierungen über den gesamten Wertschöpfungsprozess hinweg. (Eigner 2020, S.5)

Die nachfolgende Abbildung zeigt zusammenfassend den Zusammenhang zwischen dem Digitalen Modell, Digitalen Zwilling, Digitalen Schatten und Digitalen Thread in Bezug auf den Produktlebenszyklus und die Anwendersicht.

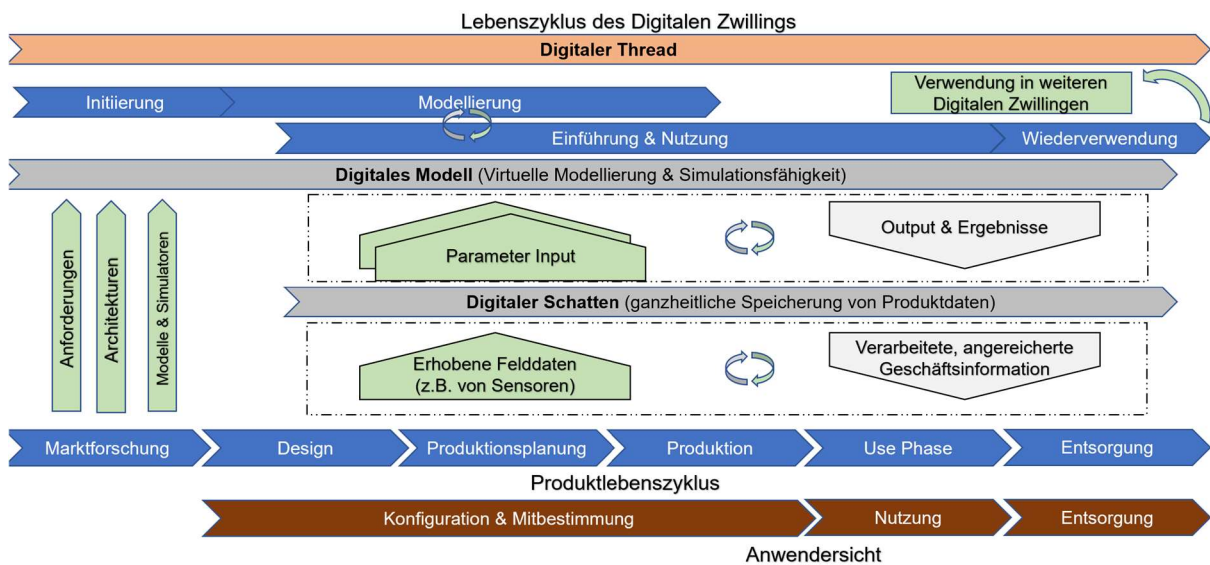


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Digitalem Modell, Digitalem Zwilling, Digitalem Schatten und Digitalem Thread in Bezug auf den Produktlebenszyklus (Dornig 2020)

### 2.1.6 System

Ein System kann als ein Konstrukt aus Elementen, welche in Beziehung zueinander stehen, betrachtet werden (REFA Consulting 2022). Die Systemgrenze fungiert hierbei als Grenze zwischen dem System und der Systemumgebung. Bekannte Systeme wären zum Beispiel (REFA Consulting 2022):

- Technische Systeme
- Soziale Systeme
- Thermodynamische Systeme

### 2.1.7 Materialfluss

Laut der Richtlinie VDI 2689 wird der Materialfluss als „die Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie bei der Verteilung von Gütern innerhalb festgelegter Bereiche“ verstanden (VDI-Richtlinie 2689 2019). In einer Gesamtbetrachtung im Unternehmen wird der Bereich als die gesamte Logistikkette vom Lieferanten bis zum Endverbraucher gesehen (REFA.de 2022). Der Materialfluss beinhaltet dabei alle Prozesse von der Gewinnung des Rohstoffes über die Be- und Verarbeitung bis hin zum Kunden (REFA.de 2022). Zusätzlich wird sowohl der Transport als auch die Lagerung und Abnahme des Produkts im Materialfluss berücksichtigt (REFA.de 2022). Als innerbetrieblicher Materialfluss wird dabei der Prozess innerhalb eines Unternehmens verstanden (REFA.de 2022).

### 2.1.8 Informationsfluss

Da der Materialfluss in Kombination mit dem Informationsfluss zu sehen ist, muss dieser Begriff ebenfalls erläutert werden.

Allgemein wird als Informationsfluss „die Gesamtheit aller Daten und Information, die in einem Unternehmen entstehen und gesammelt werden“ verstanden (proLogistik 2022). Hierzu gehören außerdem alle Verbindungspunkte zur internen Kommunikation vom Absender bis zum Empfänger (proLogistik 2022).

## 2.2 Grundlagen zur Materialflussoptimierung

In der Produktion verändern sich Prozesse stetig und bleiben nie gleich. Dies kann sich nicht nur auf einzelne Bereiche, sondern auf den gesamten Material- und Informationsfluss negativ auswirken. Um am Wettbewerb auch weiterhin präsent sein zu können, bedarf es aus diesem Grund einer Optimierung.

### 2.2.1 Ursachen

Die Gründe für eine Materialflussoptimierung innerhalb des Unternehmens sind dabei vielfältig. Anlässe hierfür wären z.B. (Martin 2016, S.30):

- Hohe Durchlaufzeiten, Engpässe und Störungen
- Erhöhte Variantenvielfalt und steigende Produktionsmengen
- Aufwändige Produktionsplanung
- Hohe Transport- und Lagerkosten
- Fehlende Arbeitspläne
- Kundenverluste aufgrund von unvermeidbaren Preissteigerungen

### 2.2.2 Ziel

Eine Materialflussoptimierung verfolgt stets ein Ziel, welches sich häufig nach den zuvor dargestellten Ursachen richtet. Beispiele für mögliche Ziele wären (MES GmbH 2022):

- Beseitigung von Schwachstellen bzw. Bottlenecks
- Organisierung und Strukturierung des Materialflusses
- Verbesserung der allgemeinen Produktivität

### 2.2.3 Materialflussanalyse

Um den Material- und Informationsfluss optimieren zu können muss dieser aber zunächst analysiert werden. Hierfür wird eine sogenannte Materialflussanalyse bzw. -untersuchung durchgeführt. Mit Hilfe der Analyse sollen alle Transport- und Lagervorgänge aller Materialien innerhalb zuvor definierter Bereiche in einem Unternehmen erfasst werden, wobei die prinzipielle Vorgehensweise immer gleich ist (Martin 2016, S.29-30). Einen allgemein gültigen Ablauf zeigt die folgende Abbildung:

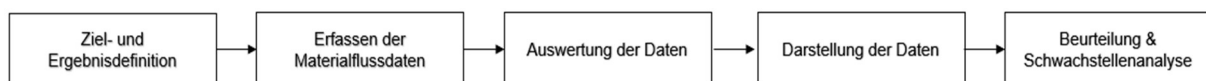


Abbildung 5: Vorgehensweise einer Materialflussanalyse (Martin 2016, S.31-41)

#### Ziel- und Ergebnisdefinition

Bevor die Materialflussanalyse durchgeführt werden kann, müssen zunächst die Ziele bzw. die gewünschten Ergebnisse definiert werden, welche mit Hilfe der Materialflussanalyse erreicht werden sollen. Mögliche Ziele sind zum Beispiel:

- Reduzierung der Durchlaufzeiten
- Senkung von Lager- und Transportkosten
- Strukturiertere Produktionsplanung
- Bottlenecks ermitteln

#### Erfassen der Materialflussdaten

Jede Analyse basiert dabei auf Daten und ist nur so aussagekräftig, wie die Qualität der Daten. Aus diesem Grund müssen die Daten des Material- und Informationsflusses, welche für die Analyse genutzt werden sollen, erfasst werden. Die Erfassung erfolgt prinzipiell mit Hilfe einer Primär- oder Sekundärerhebung (Arnold und Furmans 2019, S.253).

#### Primärerhebung

Die Primärerhebung wird durchgeführt, sofern die benötigten Daten gar nicht oder in ungenügender Qualität vorliegen (Arnold und Furmans 2019, S.253). Mittels verschiedener Methoden können diese ermittelt werden. Unterschieden wird dabei zwischen einer direkten und indirekten Datenanalyse. Bei der direkten Analyse wird die Erhebung direkt im Unternehmen durchgeführt wie zum Beispiel durch eine Dauerbeobachtung der Fertigung. Eine indirekte Analyse erfolgt beispielsweise durch Fragebögen, welche von Mitarbeitern ausgefüllt werden. Eine Übersicht über mögliche Methoden zur Primärerhebung ist in Abbildung 6 zu finden (Arnold und Furmans 2019, S.253).

## Sekundärerhebung

Die Sekundärerhebung erfolgt, indem bereits bestehende Daten ausgewertet werden (Arnold und Furmans 2019, S.255). Hierbei ist die Qualität dieser von hoher Bedeutung und sollte vor der Auswertung überprüft werden. Es sollte darauf geachtet werden, dass die Daten vollständig, plausibel, redundanzfrei und konsistent sind (Arnold und Furmans 2019, S.255). Die Daten können hierbei in unternehmensexterne und -interne Daten unterteilt werden, wobei innerhalb der unternehmensinternen Daten zwischen Stamm-, Bewegungs- und Bestandsdaten unterschieden wird (Arnold und Furmans 2019, S.253-259). Die Stammdaten bilden hierbei die Grundlage für den Arbeitsablauf eines Produkts oder Produktionsprozesses (Arnold und Furmans 2019, S.253-259). Die Bewegungsdaten wiederum beschreiben die Transport- und Lagervorgänge, woraus sich die Bestandsdaten bilden.

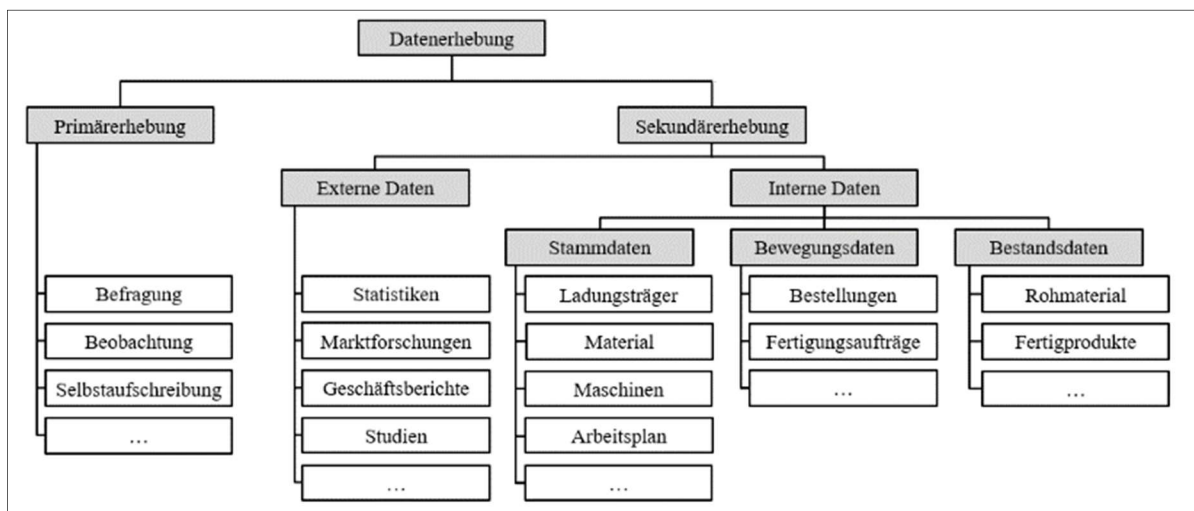


Abbildung 6: Möglichkeiten einer Datenerhebung (Arnold und Furmans 2019, S.253)

Bei der Datenerhebung gibt es eine Vielzahl von Parametern, welche ermittelt werden können. Die folgende Auflistung soll die wichtigsten aufzeigen (Arnold und Furmans 2019, S.253):

- Prozesse des Materialflusses (z.B. Lieferungsprozesse)
- Prozesse des Informationsflusses
- Systeme zur Informationsverarbeitung (z.B. ERP)
- Materialdaten (z.B. Mengen)
- Fördermittel- und Lageranlagedaten (z.B. Kapazitäten)
- Produktionstechnische Daten (z.B. Aufträge)
- Daten des externen Warentransports (z.B. Lieferantenbeziehung)
- Betriebswirtschaftliche Daten (z.B. Betriebskosten)
- Weitere: Gebäudedaten, Grundstücksdaten etc.

### *Auswertung der Daten*

Nachdem alle relevanten Daten und Informationen ermittelt wurden, müssen diese ausgewertet werden. Das dient dazu diese zu ordnen, zusammenzufassen und nach bestimmten Bereichen zu gliedern (Martin 2016, S.34). Hierfür bieten sich zum Beispiel Programme der elektronischen Datenverarbeitung (EDV) an (Martin 2016, S.34).

### *Darstellung der Daten*

Nach der Erfassung und Auswertung der Daten kann der Material- und Informationsfluss auf unterschiedliche Weisen dargestellt werden. Die Darstellung hängt hierbei von den zuvor definierten Zielen und gewünschten Ergebnissen ab. Unterschieden wird dabei immer zwischen qualitativer und quantitativer Darstellung. Bei der qualitativen Darstellung wird der Material- und Informationsfluss ohne Berücksichtigung der Intensität der Beziehungen dargestellt (Arnold und Furmans 2019, S.269).

## Sankey-Diagramm

Eine Möglichkeit den Material- und Informationsfluss grafisch darzustellen ist ein Sankey-Diagramm (Flussdiagramm). Hierfür werden Daten über den Produktionsablauf benötigt, um visuell zeigen zu können, welches Produkt in welcher Menge welche Bearbeitungsstationen durchläuft (ingenieur.de 2020). Daraus ergeben sich anschließend Flüsse, welche auf dem Layout des zu betrachtenden Systems grafisch dargestellt werden (ingenieur.de 2020).

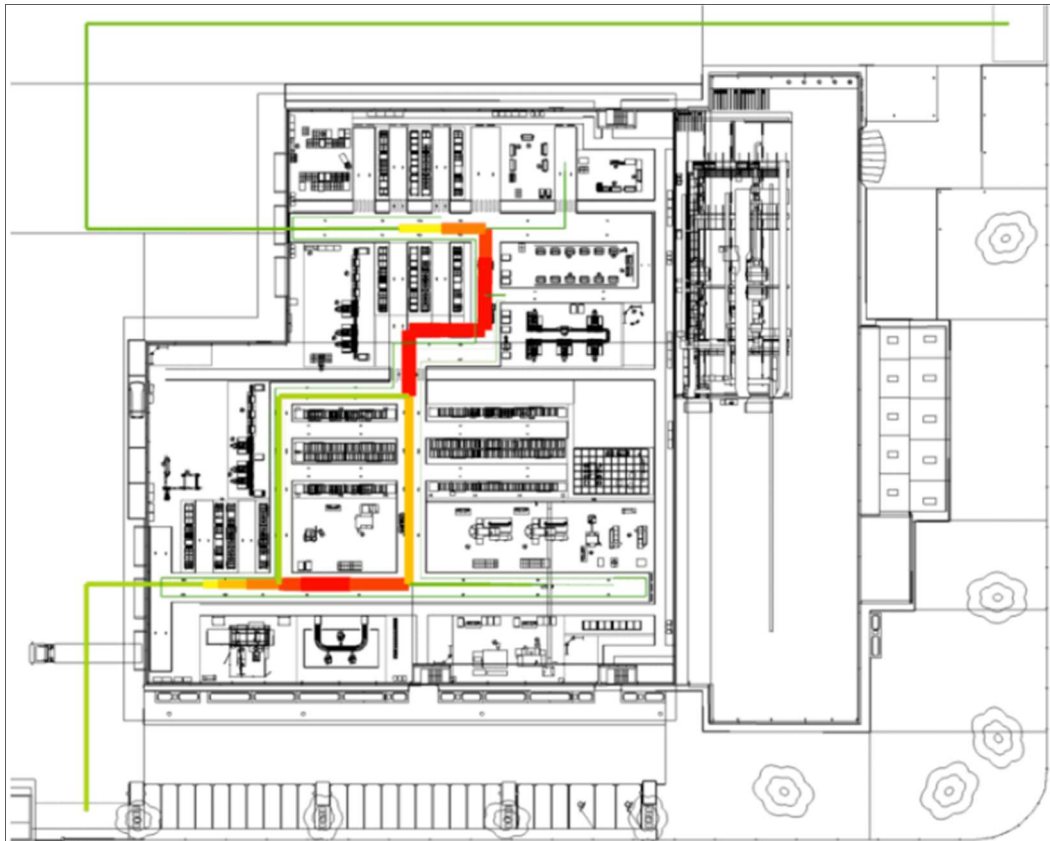


Abbildung 7: Sankey-Diagramm mit Transportnetzauslastung (Riegel 2022)

Folgende Daten werden für ein aussagekräftiges Sankey-Diagramm zwingend benötigt (ingenieur.de 2020):

- Quelle und Senke
- Produktbezeichnung
- Stückzahl
- Arbeitsplan (Was wird wo bearbeitet?)
- Produktionsprogramm

Die Abbildung 8 zeigt eine Zusammenfassung der zuvor aufgezeigten notwendigen Informationen in einem Datenbankmodell aus Sicht eines stationären Elements (ingenieur.de 2020). Jeder Kasten repräsentiert eine Entität (Einheit), welche einen bestimmten Datensatz enthält (ingenieur.de 2020). Bei der Beschreibung des Datensatzes bedarf es dabei einer klaren Bezeichnung (Beispiel: Stations-ID).



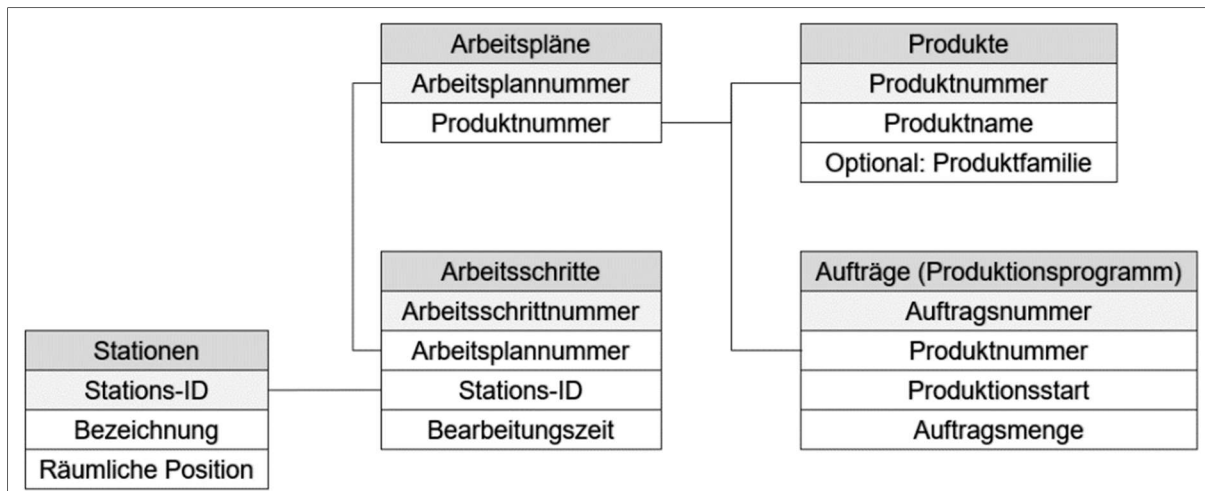


Abbildung 8: Datenbankmodell (ingenieur.de 2020)

### Wertstromanalyse

Eine weitere Möglichkeit den Materialfluss in Kombination mit dem Informationsfluss darzustellen ist die Wertstromanalyse. Hierbei sollen Prozesse, welche für die Produktion nicht wertschöpfend sind, hervorgehoben und potentielle Verschwendungen aufgezeigt werden. Standardmäßig wird dafür grafisch mit Symbolen des Material- und Informationsflusses der aktuelle Zustand des Systems dargestellt. Die fertige Grafik illustriert dabei den exakten Fluss zum Zeitpunkt der Aufnahme. Dadurch können z.B. zu lange Durchlauf-, Bearbeitungs- und Wartezeiten ersichtlich gemacht werden.

Materialflusssymbole:

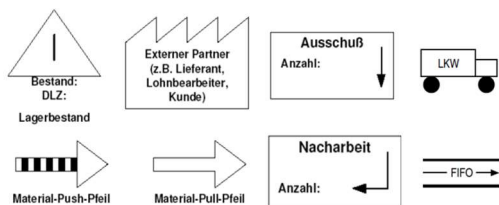


Abbildung 9: Materialflusssymbole

Informationsflusssymbole:

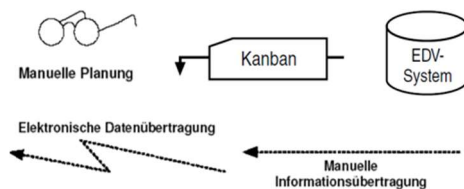


Abbildung 10: Informationsflusssymbole

Zunächst wird der Gesamtprozess visualisiert. Anschließend werden die Teilprozesse detailliert, wodurch sich ein Modell des aktuellen Wertstromes ergibt. Dieses Modell vermittelt ein Verständnis über den aktuellen Produktionsablauf und eine transparente Darstellung des kompletten Wertstroms mit allen wichtigen Kenndaten. Das fertige Modell muss anschließend durch eine Beurteilung und Schwachstellenanalyse nach potentiellen Verbesserungen im Ablauf- und Produktionsprozess durchsucht werden. Die Umsetzung der Optimierungen wird als ein SOLL-Konzept dargestellt.

Mögliche Prozessgrößen die bei der Wertstromanalyse berücksichtigt werden müssen sind:

- Rüstzeiten
- Prozesszeiten
- Losgrößen
- Verfügbarkeiten
- etc.

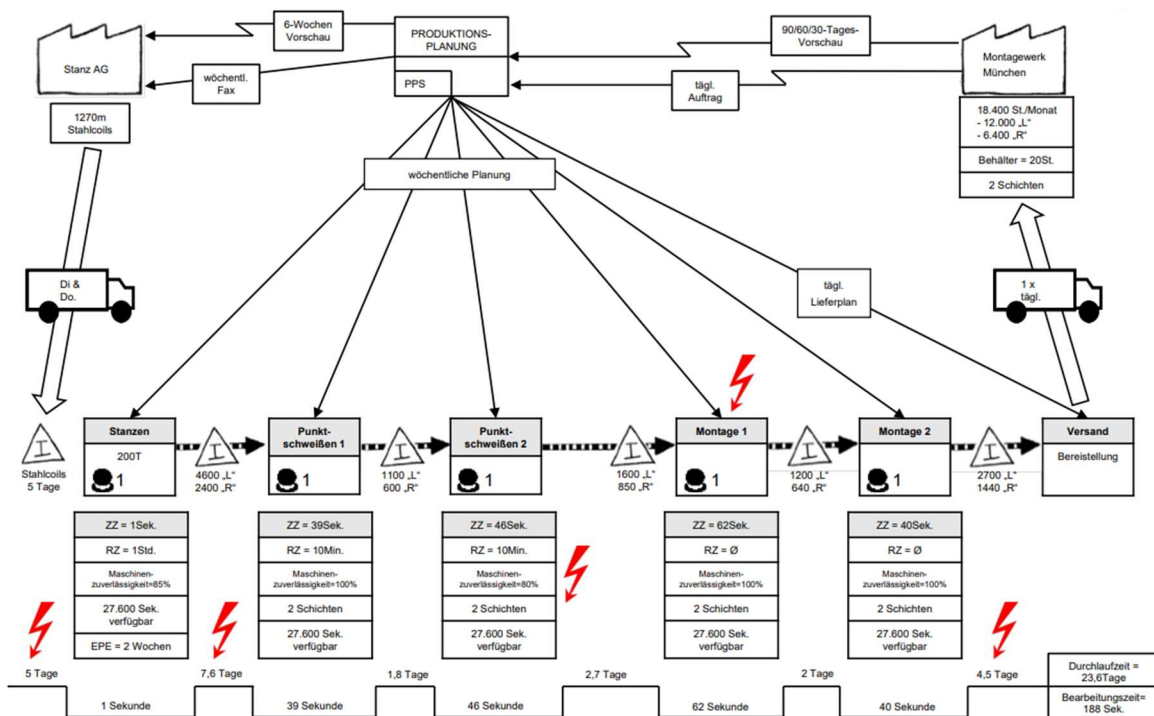


Abbildung 11: Beispiel für die Darstellung einer Wertstromanalyse

### Beurteilung und Schwachstellenanalyse

Nach der Darstellung der Daten erfolgt die Beurteilung und Schwachstellenanalyse des Material- und Informationsflusses. Hierbei erleichtert die grafische Darstellung die Erkennung von Verbesserungspotentialen (Martin 2016, S.35). Um den Erfolg der Materialflussanalyse einfacher beurteilen und dokumentieren zu können werden eine Vielzahl von Kennzahlen verwendet, welche die Daten und Vorgänge im Betrieb während der Materialflussanalyse und -planung vergleichen (Martin 2016, S.37).

Beispiele für solche Kennzahlen wären (Martin 2016, S.37):

- Mechanisierungs-/Automatisierungsgrad
- Lager- und Transportkosten
- Flächenanteil der Verkehrswege
- Durchlaufleistungsgrad
- Anteil Lagerfläche zu Fertigungsfläche

Die eigentliche Beurteilung der Materialflussanalyse erfolgt nach bestimmten Beurteilungskriterien. Mögliche Kriterien sind hierbei (Martin 2016, S.38-39):

- Auslastung der Maschinen und Transportmittel
- Lager- und Transportkosten
- Struktur des Gebäudes (damit verbundene Erweiterungsmöglichkeit)
- Energieverbrauch

Nach erfolgreicher Beurteilung und Analyse der Schwachstellen liegt ein bereinigtes Datenmodell vom aktuellen Zustand des Material- und Informationsflusses vor. Dieses Datenmodell dient als Vorlage für die eigentliche Optimierung bzw. Planung. Hierfür werden verschiedene Lösungsansätze und Maßnahmen am Datenmodell durchgeführt und anschließend bewertet.

#### **2.2.4 Materialflussplanung/-optimierung**

Das Ergebnis einer Materialflussanalyse stellt ein bereinigtes IST-Modell des Materialflusses dar, welches Schwachstellen und Optimierungspotentiale aufzeigt. Aus dem IST-Modell wird anschließend mit Hilfe der Materialflussoptimierung ein SOLL-Modell geschaffen, welches alle zwingend zu realisierenden Verbesserungen enthält. Hierfür werden die zuvor definierten Ziel- und Ergebnisvorstellungen auf das bereinigte IST-Modell angewandt, um die SOLL-Planungsdaten zu generieren (Martin 2016, S.39). Für eine Optimierung des Materialflusses stehen zudem verschiedene Gestaltungsgrundsätze zur Verfügung, welche auf den aktuellen Material- und Informationsfluss angewendet werden und bei der Entscheidungsfindung helfen können (Martin 2016, S.39). Einige Gestaltungsgrundsätze wären (Martin 2016, S.39):

- Wege verkürzen, um Transportmittel optimal auszulasten
- Geringe Auftragsdurchlaufzeiten
- Lagerung vermeiden, um Lagerflächen einzusparen
- Verknüpfung von Transport und Fertigung

Wichtig bei der letztendlichen Materialflussoptimierung bzw. -planung ist dabei zuvor zu klären, ob es sich um eine Greenfield- (Neuplanung) oder Brownfieldplanung (Umplanung) handelt. Im Falle einer Umplanung müssen bestimmte Randbedingungen in Bezug auf das Gebäude eingehalten werden wie zum Beispiel die Belastbarkeit des Bodens oder ein spezieller Stützenabstand (Martin 2016, S.39).

Zu beachten ist außerdem, dass der Materialfluss aufgrund seiner hohen Bedeutung für die Planung von Fabriken, Transport- und Lagervorgängen etc. immer ganzheitlich in Kombination mit dem Informations-, Personen- und Energiefluss zu betrachten ist (Martin 2016, S.39-40).

Ähnlich wie bei der Materialflussanalyse gibt es auch bei der Planung/Optimierung eine klassische Vorgehensweise, welche wie folgt aussehen kann (Arnold und Furmans 2019, S.286-319):

1. Erarbeitung von Planungsstufen
2. Beurteilung der Planungsalternativen
3. Layoutplanung

### **Erarbeitung von Planungsstufen**

Jede Planung hat mit verschiedenen Restriktionen zu kämpfen, welche berücksichtigt und eingeplant werden müssen. Mögliche Restriktionen wären beispielsweise einzuhaltende Termine oder ein Kapazitätsmangel. Aus diesem Grund ist die Einteilung der Planung des Material- und Informationsflusses in verschiedene Stufen eine gute Möglichkeit, um die Chancen einer Realisierung zu erhöhen. Üblicherweise wird in der Materialflussplanung zwischen Grob-, Ideal-, Real- und Detailplanung unterschieden (Arnold und Furmans 2019, S.288). Zu beachten ist dabei, dass alle Stufen nicht voneinander getrennt sind, sondern aufeinander aufbauen. Außerdem dürfen keine wichtigen Entscheidungen in einer frühen Planungsphase auf Basis von unsicheren Informationen getroffen werden (Arnold und Furmans 2019, S.288).

### **Grobplanung**

Die Hauptaufgaben der Grobplanung sind (Arnold und Furmans 2019, S.288):

- Materialflusskonzepte erstellen
- Darstellung von Alternativen
- Vorbereitung auf Grundsatzentscheidung der Unternehmensleitung

Die Hauptaufgabe der Grobplanung besteht darin verschiedene Konzepte bzw. Alternativen zu erstellen, in denen alle Betriebsmittel und Betriebsabläufe innerhalb des zu betrachtenden Systems optimal nach dem Materialfluss ausgerichtet sind. Hierfür bieten sich in der klassischen Analyse eine Vielzahl von Möglichkeiten, wobei der Einsatz von Materialflussmatrizen in der klassischen MFA am sinnvollsten ist (Arnold und Furmans 2019, S.288).

### **Idealplanung**

In der Idealplanung wird die, für die zuvor definierten Ziele, aussichtsreichste Lösung beschrieben, wobei Restriktionen aller Art zunächst nicht berücksichtigt werden (Arnold und Furmans 2019, S.291). Die aus der Planung resultierende Lösung stellt eine Lösung zur Optimierung des Materialflusses und der räumlichen Anordnung dar. Aus der Idealplanung erfolgen generell mehrere Lösungsansätze, welche z.B. verschiedene Sichtweisen des Blocklayouts darstellen (Arnold und Furmans 2019, S.291). Als Blocklayout wird dabei die grobe Darstellung des zu betrachtenden Systems verstanden, wobei die verschiedenen Funktionsbereiche als Blöcke visualisiert werden (IPH 2022).

## Realplanung

In der Realplanung wird anhand der bisherigen Resultate an einer realisierbaren Variante gearbeitet, welche alle Erkenntnisse aus den vorherigen Planungsstufen enthält. Zusätzlich werden alle verbleibenden Restriktionen und Freiheitsgrade berücksichtigt (Arnold und Furmans 2019, S.291). Als Ergebnis ergibt sich eine, nach den zuvor definierten Zielen, optimale Planungsvariante.

## Detailplanung

In der Detailplanung bzw. Feinplanung werden alle Vorkehrungen getroffen, um das optimierte Materialflusssystem zu realisieren. Hierzu werden beispielsweise (Arnold und Furmans 2019, S.292):

- Technischen Daten geprüft und vervollständigt
- Fragen zur Bau-, Haus- und Steuerungstechnik geklärt
- Termin- und Organisationspläne erstellt
- etc.

## Beurteilung der Planungsalternativen

Eine erfolgreiche Planung zeichnet sich stets durch eine Variation an Lösungskonzepten aus. Diese müssen aber zunächst beurteilt werden, um die aussichtsreichste Lösung zu finden. Hierzu dienen quantitative Methoden wie die Nutzwertanalyse (Arnold und Furmans 2019, S.293).

## Nutzwertanalyse

Eine Möglichkeit die Planungsalternativen systematisch zu beurteilen ist die Durchführung einer Nutzwertanalyse (Scoring Modell). Die Analyse folgt hierbei grundsätzlich folgendem Schema (Arnold und Furmans 2019, S.293):

1. Bestimmung der *Bewertungskriterien*  $K_i$ : Diese legen fest, nach welchen Kriterien die Alternativen überhaupt bewertet werden sollen.
2. Bestimmung des *Gewichtungsfaktors*  $G_i$ : Der Gewichtungsfaktor legt die Bedeutsamkeit der Bewertungskriterien fest. Je höher der Gewichtungsfaktor desto höher die Bedeutung. Zu beachten ist, dass der Gewichtungsfaktor teilweise subjektiv gewählt wird, um eine gewisse Präferenz des Entscheidungsträgers zu folgen.
3. Bestimmung des Bewertungsverfahrens: Zuletzt muss das Bewertungsverfahren bestimmt werden. Ein bewährtes Verfahren ist die Bewertung nach Punkten oder Noten. Üblicherweise wird hierbei ein Bewertungsbereich von  $P = 1$  bis 10 bzw.  $P = 1$  bis 5 oder in Prozent von 0-100% bzw. 0-1 genutzt.

Der daraus resultierende Nutzwert  $N_j$  für die Alternativen  $A_i$  für  $j = 1..m$  lässt sich wie folgt bestimmen (Arnold und Furmans 2019, S.293):

$$N_j = \sum_{i=1}^n G_i \cdot P_{ij} \text{ für } j = 1..m$$

Der Nutzwert bestimmt hierbei die Stärke der Entscheidung in Bezug auf die Planungsalternativen gegenüber den anderen.

Nutzwertanalyse Förderhilfsmittel							
	Kriterium	Gewicht, freie Vergabe		Gewicht normiert auf insg. 100 %	Bewertungen, Skala 0...1 (gelbe Felder befüllen)		
		- eingeben -			Stapler	Gabelzug	FTS
<b>Fördermittelmaße</b>		5		29,41	29,41	15,52	25,49
	Länge		8	13,07	1,00	1,00	0,70
	Breite		10	16,34	1,00	0,15	1,00
	Höhe		0	0,00	1,00	1,00	1,00
				0,00			
<b>Technische Leistung</b>		4		23,53	8,09	16,47	16,47
	Hubhöhe		6	8,82	0,50	0,70	0,70
	Wenderadius		10	14,71	0,25	0,70	0,70
	Stapelvermögen		0	0,00	1,00	0,60	0,60
				0,00			
				0,00			
<b>Wirtschaftliche Faktoren</b>		6		35,29	20,50	29,59	20,50
	Gesamtkosten		10	13,57	0,70	1,00	0,70
	Benötigtes Personal		9	12,22	0,20	1,00	0,20
	Lastzeit-Nutzungsgrad		7	9,50	0,90	0,40	0,90
				0,00			
<b>Sonstige</b>		2		11,76	5,88	9,41	8,24
	Anzahl benötigter Fahrzeuge		10	11,76	0,50	0,80	0,70
				0,00	1,00	0,70	0,05
				0,00	0,90	0,30	0,05
				0,00			
<b>Nutzwert in %</b>					<b>63,88</b>	<b>71,00</b>	<b>70,69</b>

Abbildung 12: Beispiel für eine Nutzwertanalyse (Wagner 2018)

### Layoutplanung

Als letzter Schritt erfolgt die Layoutplanung. Diese hat das Ziel die Betriebsmittel und -flächen räumlich nach der optimalen Materialflussbeziehung zu ordnen (Arnold und Furmans 2019, S.307). Ebenfalls kann eine Anordnung angestrebt werden, welche am kostengünstigsten für das Unternehmen ist. Die Bewertung des Layouts richtet sich hierbei nach zuvor gewählten Bewertungsgrößen.

Eine Bewertungsgröße, welche für die Layoutplanung betrachtet werden kann, ist der Transportaufwand  $T$  (Arnold und Furmans 2019, S.308).

Dabei kann der Transportaufwand  $T$  für ein Materialflusssystem mit  $n$  Betriebsmitteln an  $n$  Orten wie folgt berechnet werden (Arnold und Furmans 2019, S.308):

$$T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n I_{ij} d_{ij} \quad \text{mit } d_{ij} = d_{ji}, i, j = 1..n$$

$d_{ij}$  beschreibt die Distanzen zwischen den Betriebsmitteln (Arnold und Furmans 2019).

Die Transportintensität  $I_{ij}$  lässt sich mit folgender Formel bestimmen (Arnold und Furmans 2019, S.308):

$$I_{ij} = \lambda_{ij} + \lambda_{ji} \text{ für } i, j = 1..n \text{ und } i < j$$

$$I_{ij} = 0 \text{ für } i, j = 1..n \text{ und } i \geq j$$

Bei einer Optimierung der räumlichen Anordnung nach dem Transportaufwand lautet die Formel für die Zielfunktion der Optimierung (Arnold und Furmans 2019, S.308):

$$\text{MIN} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n I_{ij} d_{ij}$$

Zu beachten ist hierbei, dass jedes Betriebsmittel nur genau einem Ort zugeordnet sein darf (Arnold und Furmans 2019, S.309-320).

Mögliche Verfahren zur konventionellen Layoutplanung wären:

- Dreiecksverfahren
- Vektorbasiertes Verfahren zur Layoutplanung
- Rechnergestütztes Verfahren zur Layoutplanung

Als Ergebnis der Materialflussplanung entsteht, wie zuvor beschrieben, ein SOLL-Modell, welches den optimierten Materialfluss darstellt. Das Ergebnis richtet sich hierbei nach den definierten Zielen und gewünschten Ergebnissen.

## 2.3 Grundlagen zum Digitalen Zwilling

Die Erstellung und der Einsatz eines Digitalen Zwillings erfordern ein fundiertes Fachwissen. Die folgenden Kapitel sollen einen Überblick über den DZ verschaffen und für ein leichteres Verständnis sorgen.

### 2.3.1 Stand der Technik

In der heutigen Zeit sind mehr als 37 Milliarden Gegenstände des Alltags bzw. aus dem Industriebereich mit dem Internet verbunden. Diese Vernetzung wird 1999 von Kevin Ashton als Internet of Things (IoT) bezeichnet. Die Gegenstände, welche dabei über das Internet vernetzt sind, werden als cyber-fähige Produkte bzw. Produktsysteme beschrieben. Aus dem IoT heraus entwickeln sich dadurch immer mehr dienstleistungsorientierte Geschäftsmodelle. Ein weiterer wichtiger zentraler Faktor für den Unternehmenserfolg ist das serviceorientierte Management, welches das Internet of Things in ein Internet of Services umwandelt. Hieraus bilden das Digitale Modell (Digital Master), der Digitale Zwilling, Digitale Schatten und der Digitale Thread die technologische Basis für die Konzepte. Die Grundlage des Digitalen Zwillings wird dabei aus dem Digitalen Modell, anhand von kundenspezifischen Instanzen, gebildet. (Eigner 2020, S.3-4)

Martin Grieves erwähnt 2002 (Grieves 2002) zum ersten Mal die Verwaltung und Ableitung des Digitalen Zwillings aus dem PLM heraus.

Er betont dabei, dass drei wesentliche Elemente benötigt werden (Eigner 2020, S.3):

- Das physische Objekt
- Den dazugehörigen digitalen Doppelgänger
- Informationen, welche beide miteinander verbinden

Der Digitale Zwilling kann dabei anhand von verschiedenen Ebenen aufgebaut werden (Siehe Kapitel 2.3.2). Er ermöglicht dabei den Einsatz für einen sehr begrenzten Bereich und die Erweiterung nach jeweiligem Bedarf. Eine allgemeingültige Definition kann dem Digitalen Zwilling dennoch nicht zugeordnet werden, da es eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten für den DZ gibt. Des Weiteren ist der Digitale Zwilling aktuell immer noch nicht weit verbreitet. Hierfür gibt es zahlreiche Gründe wie zum Beispiel (ingenieur.de 2020):

- Nicht abschätzbare Anschaffungskosten bei der Planung
- Nicht vorhandenes Fachwissen im Bereich der Informatik
- Nicht ausreichende Informationen zu den Simulationswerkzeugen

### **Zusammenhang zwischen Digitalen Modell und Zwilling**

Wie bereits in 2.1.2 erläutert basiert der Digitale Zwilling, auf Basis von kundenspezifischen und auftragspezifischen Instanzen, auf dem Digitalen Modell (Eigner 2020, S.3). Sollte eine Entwicklung und Produktion nach dem ETO Prinzip erfolgen, so kann das Digitale Modell bereits als die zu betrachtende kundenspezifische Instanz angesehen werden (Eigner 2020, S.3). Von einem neutralen Digitalen Modell kann gesprochen werden, wenn die Baukastensystematik des verantwortlichen Programmierers stark ausgeprägt ist (Eigner 2020, S.3). Je nach Detaillierungsgrad der unteren Ebenen können ebenfalls Subtwins innerhalb der unteren Ebenen aufgebaut werden (Vgl. Kapitel 2.3.2). Wichtig ist hierbei die Differenzierung zwischen dem Digitalen Zwilling und dem Subtwin. Dies kann nämlich für Verwechslungen sorgen. Für eine sinnvolle Bezeichnung als DZ muss aus diesem Grund zuvor ein eindeutiges hierarchisches Konzept akzeptiert werden (Eigner 2020, S.3).

### **Zusammenhang zwischen Digitalen und Physischen Zwilling**

Die Verbindungen zwischen dem Digitalen und Physischen Zwilling müssen eindeutig, beispielsweise durch eine Sachnummer oder ähnlichem, identifiziert werden (Eigner 2020, S.4). Die Beziehung zwischen der digitalen und physischen Instanz ist dabei gleich 1 zu n (Eigner 2020, S.4). Nur auf der obersten Ebene muss, im operativen Einsatz, eine eindeutige 1 zu 1 Beziehung stattfinden (Eigner 2020, S.4). Auf den unteren Ebenen ist dies nicht zwingend gegeben, da zum Beispiel ein Motor als eigenständiger DZ oder PZ angesehen werden, aber auch gleichzeitig in viele verschiedene Fahrzeuge eingebaut werden kann. Des Weiteren besteht eine Konvergenz zwischen DZ und PZ, welche ausführlicher in der Definition des Digitalen Zwillings erläutert wird (Eigner 2020, S.4).

### **Traceability**

Traceability beschreibt die Fähigkeit, jederzeit alle möglichen Abhängigkeiten, Verbindungen, zusammenhängende Aktivitäten etc. zu erfassen und nachvollziehen zu können. Diese Traceability ist zwischen DZ und PZ zwingend notwendig und wird dabei vom Digitalen Thread realisiert. Dies ermöglicht

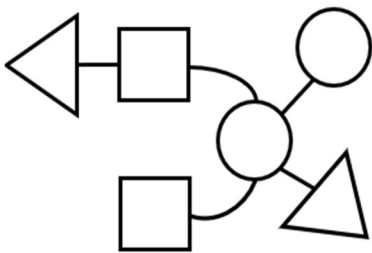


ein effizientes Änderungsmanagement, welches dem Anwender jederzeit erlaubt, bei möglichen Änderungen, Auswirkungen rückwärts und vorwärts nachvollziehbar zu machen. Außerdem muss für eine durchgehende Traceability jede Änderung im Digitalen Zwilling und im Digitalen Modell überprüft werden. (Eigner 2020, S.5)

### 2.3.2 Typen von digitalen Zwillingen

Je nach Größe des Produkts und Art des Anwendungsbereiches wird zwischen verschiedenen Arten von Digitalen Zwillingen unterschieden. Dabei ist es nicht unüblich, dass sie innerhalb eines Systems oder eines Prozesses nebeneinander existieren. Insgesamt wird zwischen vier verschiedenen Typen unterschieden.

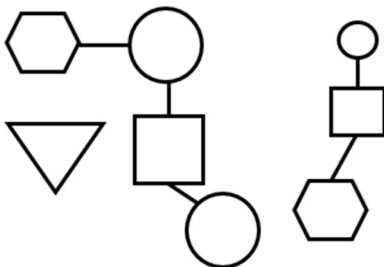
#### Component Twins/ Parts Twins



Die Grundeinheit des Digitalen Zwillings wird als Komponentenzwilling bezeichnet und stellt eine Nachbildung einer einzelnen Komponente des Zwillings dar, welche eine Schlüsselfunktion besitzt (IBM 2022). Des Weiteren gibt es noch den Teilzwilling, der zwar dieselbe Definition wie der Komponentenzwilling besitzt, aber auf Komponenten bezogen ist, die von unrelevanter Bedeutung sind.

Abbildung 13: Component Twin  
(IBM 2022)

#### Asset Twins



Wirken zwei oder mehr einzelnen Komponenten zusammen, so wird dies als Asset bezeichnet. Der Asset-Zwilling stellt dabei die nächsthöhere Stufe des Digitalen Zwillings dar (Plank 2019). Mit Hilfe dessen können die Interaktionen der einzelnen Komponenten untereinander untersucht, dadurch das Zusammenspiel analysiert und Verbesserungspotentiale ersichtlich gemacht werden (Plank 2019).

Abbildung 14: Asset Twin  
(IBM 2022)

#### System Twins/Unit Twins

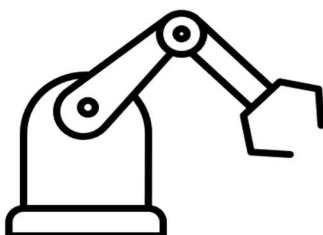


Abbildung 15: System Twin

Der DZ der nächsthöheren Ebene wird als System- oder Einheitszwilling verstanden. Der Systemzwilling vereinigt dabei mehrere Asset-Twins zu einem Gesamtsystem (Plank 2019). Dieses System gibt dabei Aufschlüsse über die Interaktionen bzw. das Zusammenspiel der Assets miteinander und kann verwendet werden, um Potentiale für Leistungsverbesserungen des Systems ersichtlich zu machen (Plank 2019).

## Process Twins

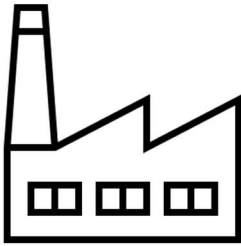


Abbildung 16: Process Twin

Der Prozesszwilling stellt die Makroebene des DZ dar (IBM 2022). Er vereint mehrere Systeme miteinander und zeigt auf, wie die Systeme bzw. alle Einheiten zusammenarbeiten und ob dies synchron geschieht (IBM 2022). So kann der Prozesszwilling beispielsweise eine gesamte Produktionsanlage darstellen. Hieraus soll die größtmögliche Effizienz erzielt werden. Außerdem kann aufgezeigt werden, wie sich Verzögerungen von einem System auf ein anderes auswirken und dadurch die Veränderung der Gesamteffektivität anhand verschiedener Szenarien analysiert werden (IBM 2022).

### 2.3.3 Herausforderungen bei der Erstellung

Bei der Realisierung von Digitalen Zwillingen kommt es zu Herausforderungen, welche es zu überwinden gilt. Im Folgenden wird auf Faktoren, welche für den Einsatz einer Materialflussoptimierung besonders relevant sind, im Detail eingegangen. Hierbei ist zu beachten, dass je nach Anwendungsgebiet weitere Herausforderungen auftreten können, wodurch dieses Kapitel nicht als abschließend betrachtet werden darf.

Beim Einsatz von Digitalen Zwillingen kommt es zu einer enormen Datenlast. Unzählige Daten werden nicht nur erzeugt, bearbeitet, sondern auch gespeichert. Sollen zum Beispiel alle Daten aus dem gesamten Produktlebenszyklus gespeichert werden, so wird eine hohe Speicherkapazität benötigt (Daude 2019, S.62). Hierfür sind zur Datenauswertung in Echtzeit eine hohe Rechenleistung, sowie komplexe Analyse- und Auswertungsmethoden nötig (Daude 2019, S.62). Aus diesem Grund muss eine geeignete Hardware ausgewählt werden.

Wenn Daten im Einsatz sind, müssen immer auch rechtliche und sicherheitstechnische Aspekte betrachtet werden. Beim Digitalen Zwilling werden Daten nicht nur zur Verfügung gestellt, sondern es wird auch mit ihnen kommuniziert. Deshalb muss der Schutz vor unbefugtem Zugriff auf die Daten und vor unerlaubter Steuerung gewährleistet werden. (Daude 2019, S.63)

Bei einer detailgetreuen aufwändigen Simulation in Echtzeit, welche parallel zum aktuellen Betrieb durchgeführt werden soll, muss der DZ besonders gepflegt werden. Dies sorgt nicht nur für einen höheren Aufwand, sondern auch, dass spezielles und ausreichendes Personal benötigt wird, welches mit den Kenntnissen im Bereich des DZ vertraut ist (Daude 2019, S.63). Dies soll außerdem eine fehlerfreie Dokumentation gewährleisten.

Außerdem stellt das Thema Schnittstellen und Integration eine weitere Herausforderung dar (Daude 2019, S.62). Sollen unterschiedliche Modelle innerhalb eines DZ genutzt werden können, so müssen diese miteinander interagieren und kommunizieren können. Werden die Modelle aber mit unterschiedlichen Simulationstools erstellt, so ist eine Kombination der beiden schwer zu realisieren. Um einen lückenlosen Datenaustausch zwischen den Digitalen Zwillingen zu ermöglichen werden hierfür weitere Werkzeuge oder Plattformen benötigt (Daude 2019, S.62).

Je nach Umfang und Einsatzgebiet der Digitalen Zwillinge müssen, wie zu Beginn erwähnt, weitere Herausforderungen berücksichtigt werden.

### 2.3.4 Datenakquise

Wie bereits in der Zielsetzung angeschnitten ist die Datenakquise ein wichtiger Bestandteil bei der Erstellung und dem Einsatz eines Digitalen Zwillings. Ein DZ ist letztendlich nur so gut, wie die Qualität seiner Informationen, die er bekommt. Dieses Kapitel soll einen Überblick über die gesamte Datenakquise vermitteln. Dazu zählen zum einen die richtige Auswahl der Daten, die Datenerfassung, -verwaltung und -verwertung.

Wie in 2.3.3 beschrieben entstehen durch Digitale Zwillinge enorme Datenmengen, welche verwaltet, gepflegt und gespeichert werden müssen. Aus diesem Grund sollte vor der Erstellung eines DZ eine Anforderungsanalyse durchgeführt werden, um zu definieren, welche Daten überhaupt benötigt werden. Das Ergebnis dieser Analyse sollte dabei eine möglichst geringe Menge an Daten und eine Reduzierung der Speicherung dieser auf das Notwendigste sein (Winkler et al. 2020, S.121). Möglichkeiten zur Datenreduktion wären zum Beispiel (Winkler et al. 2020, S.121-122):

- Ausschließliche Berücksichtigung von prozessrelevanten Daten
- Überprüfung der Korrelation von nicht prozessrelevanten Daten
- Vermeidung von zusätzlicher Datenerfassung, durch Bestimmung der Daten aus bereits bestehenden Daten
- Berücksichtigung von aktuellen Entwicklungen für Prognosen von zukünftigen relevanten Daten

Um die Speicherung der Daten zu minimieren können zum Beispiel folgende Verfahren angewandt werden (Winkler et al. 2020, S.122):

- Kopplung der Aufzeichnungsrate eines Parameters an den Prozess
- Datenerfassung nach dem Push-Modell
- Vermeidung von Speicherung der Rohdaten

Außerdem sollte vor Beginn der Datenerfassung die geeigneten Systemgrenzen definiert werden. Je nach zu erfüllender Aufgabe und Zielsetzung des DZ werden diese spezifisch bestimmt und geben den Digitalisierungsgrad wieder (Winkler et al. 2020, S.121).

Nach der Definition der Systemgrenzen und der geeigneten Auswahl müssen die Daten korrekt erfasst werden. Hierfür muss berücksichtigt werden, welche noch erfasst werden müssen und welche bereits vorhanden sind. Normalerweise sind Daten zur Produktentwicklung bereits erfasst und werden in sogenannten PDM-Systemen abgespeichert (Winkler et al. 2020, S.122). Bei Realdaten von Maschinen wie zum Beispiel die Geschwindigkeit oder Kräfte sieht dies anders aus, da diese nicht in solch einem System erfasst werden können (Winkler et al. 2020, S.122). Mit Hilfe von Schnittstellen müssen diese Informationen aus den Maschinen herausgelesen werden. Die Schwierigkeit hierbei besteht darin, wie in 2.3.3 erläutert, geeignete Schnittstellenverbindungen zu schaffen. Dies gestaltet sich besonders bei älteren Maschinen schwierig, da diese meist nur herstellergebundene Schnittstellen besitzen. Darüber hinaus bedeutet das Auslesen von Daten auch immer eine zusätzliche Last für die Rechenkapazität, was zusätzlich berücksichtigt werden muss (Winkler et al. 2020, S.122).

Nachdem die Daten erfasst wurden, müssen diese verwaltet und verarbeitet werden. Hierfür eignet sich ebenfalls der Einsatz eines PDM-Systems. Aus diesem Grund sollte bei der Implementierung eines DZ die Überlegung getätigt werden, ob dies nicht auf Basis eines PDM-Systems geschieht (Winkler et al. 2020, S.123). Im Übrigen sollte zusätzlich, wie bereits in 2.3.3 dargestellt, immer beachtet werden, dass eine enorme Datenmenge beim Arbeiten mit Daten in Echtzeit benötigt wird. So benötigt zum Beispiel allein die Speicherung eines einzelnen Fließkommawertes von 4 Byte ungefähr 33 MB pro Tag, wenn die Abtastrate 100 Hz beträgt (Winkler et al. 2020, S.123). Zusätzlich muss, wie in 2.3.3 bereits erläutert, für die Datenverwaltung und Dokumentation ausreichend spezielles Personal zur Verfügung gestellt werden.

### 2.3.5 Identifikation & Import von Objekten

Neben den Daten sind die eigentlichen Objekte des betrachteten Systems (innerhalb der zuvor definierten Systemgrenzen), wie zum Beispiel Maschinen, ebenfalls relevant für den Digitalen Zwilling. Diese müssen vom physischen in den digitalen Zustand gebracht werden, um für den DZ eingesetzt werden zu können. Entweder sind die digitalen Daten (z.B. im CAD-Format) bereits in einer Datenbank vorhanden und können abgerufen oder sie müssen selbst erzeugt werden (ingenieur.de 2020). Hierfür gibt es verschiedene Methoden. Eine Vorgehensweise ist das Erzeugen einer Punktwolke basierend auf dem Produktionssystem (ingenieur.de 2020). Hierzu wird das Produktionssystem z.B. mit einem Laserscanner gescannt und die Aufnahme mit Hilfe von einer künstlichen Intelligenz in eine 3D-Punktwolke umgewandelt (ingenieur.de 2020). Diese Punktwolke wird anschließend mit Hilfe der Durchführung einer Objekterkennung in eine interpretierte Punktwolke umgewandelt. Für einen Abgleich mit bereits bestehenden Objekten wird eine Referenzdatenbank als Hilfsmittel genutzt (ingenieur.de 2020). Nachfolgend muss diese Punktwolke in ein CAD-Modell umgewandelt werden. Hierfür kann erneut die Referenzdatenbank zum Einsatz kommen, da diese ebenfalls Informationen über CAD-Modelle enthält und die fehlenden Informationen der Punktwolke ergänzen kann (ingenieur.de 2020). Anschließend ist ein fertiges CAD-Modell des Produktionssystems vorhanden, welches für den Digitalen Zwilling genutzt werden kann.

Mit Hilfe der CAD-Daten kann anschließend der Digitale Zwilling bzw. das Simulationsmodell für das zu betrachtende System erstellt werden. Zur Modellierung stehen dem Ersteller dabei zahlreiche Tools, sowie Datenbanken zur Verfügung. Des Weiteren können die zuvor erfassten CAD-Daten anhand der verfügbaren Schnittstellen importiert werden. Das fertige Simulationsmodell beschreibt anschließend das Layout des Produktionssystems mit all seinen Stationen bzw. Maschinen (ingenieur.de 2020).

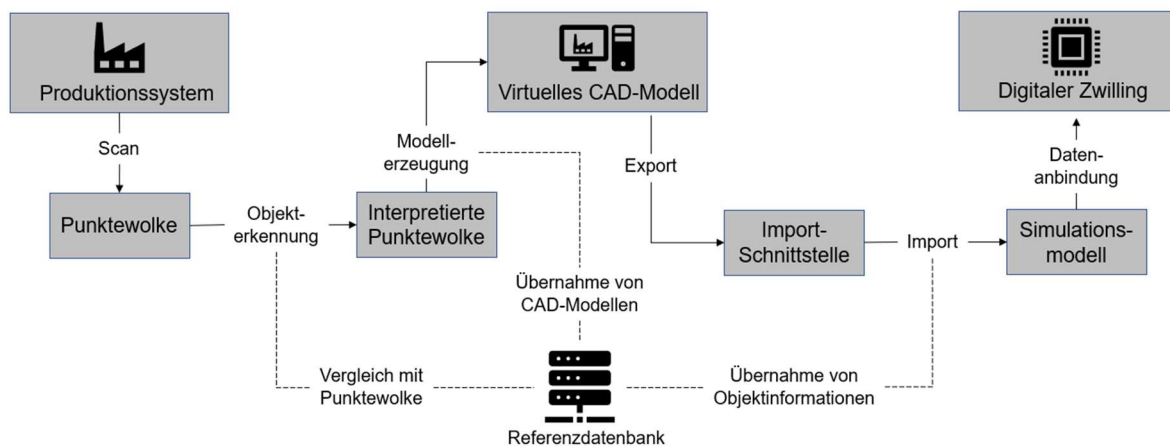


Abbildung 17: Entstehung eines Digitalen Zwillings (ingenieur.de 2020)

### 2.3.6 Zusammenfassung zum Digitalen Zwilling

Der Digitale Zwilling entsteht aus der immer größer werdenden Vernetzung vom Industriebereich mit dem Internet (Internet of Things). Er bildet zusammen mit dem Digitalen Modell, Digitalen Schatten und dem Digitalen Thread eine technologische Basis für ein digitales dienstleistungsorientiertes Konzept. Eine allgemeine Definition kann dem DZ nicht zugeordnet werden, da er je nach Anwendungsfall variiert. Er basiert auf einem physischen Objekt, welches mit Hilfe von Informationen mit einem dazugehörigen digitalen Doppelgänger verbunden ist. Je nach Größe und Anwendungswunsch wird beim DZ dabei nach vier verschiedenen Arten unterschieden. Alle diese Varianten basieren aufeinander und gehen wie beispielsweise bei einer Matroschka immer kleiner ins Detail. Des Weiteren können sie nebeneinander existieren. Bei der Realisierung eines DZ müssen einige Herausforderungen wie zum Beispiel sicherheitstechnische bzw. rechtliche Aspekte berücksichtigt werden. Das Prinzip der Erstellung des DZ erfolgt wie in Abbildung 18. Dabei wird mit Hilfe der Implementierung von CAD-Daten bzw. Modellen ein Simulationsmodell von der zuständigen Person erstellt, welches das Layout des Produktionssystems widerspiegelt und alle Stationen bzw. Maschinen enthält. Nebenbei werden mit Hilfe der Datenakquise alle relevanten Daten des PZ wie zum Beispiel Produkte, Arbeitspläne oder Produktionsprogramme erfasst, verwaltet und verwertet, wobei gerade hier Probleme auftreten können. Wichtig für den Aufbau des Simulationsmodells und der Datenakquise ist das Festlegen einer sinnvollen Systemgrenze, um die Menge an Daten so gering wie möglich zu halten und unnötige Daten zu vermeiden. Mit Hilfe des fertigen DZ können je nach Anwendung verschiedene Aufgaben ausgeführt werden, wie zum Beispiel die Reduzierung des Transportaufwandes in der Produktion. Dabei arbeitet er stets mit Echtzeitdaten, wodurch der DZ jederzeit auf Wunsch, für verschiedene Szenarien, geändert werden kann.

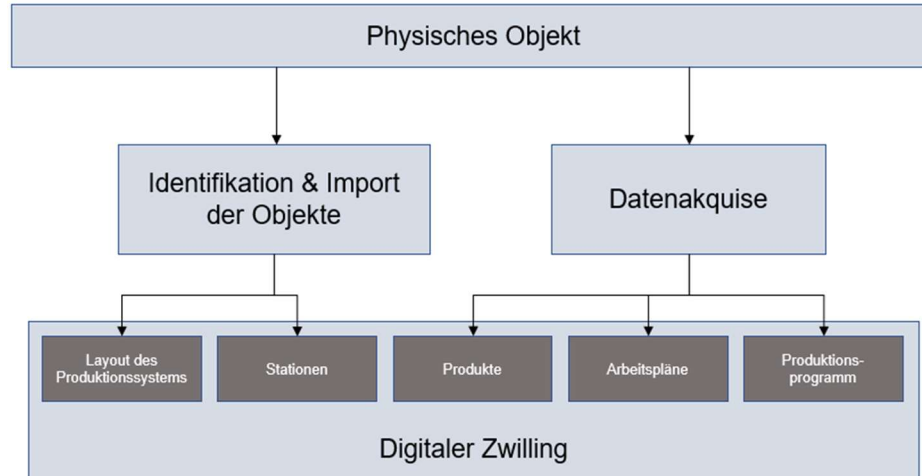


Abbildung 18: Vorgehensweise zur Erstellung eines Digitalen Zwillings (ingenieur.de 2020)

### 2.3.7 Abgrenzung zur Simulation

Die klassische Simulation und der Digitale Zwilling unterscheiden sich bereits in der Definition. Dennoch muss klar abgegrenzt werden, um welches von beiden es sich dabei wirklich handelt. Beide werden verwendet, um Prozesse eines Systems digital nachzubilden bzw. abzubilden, wobei sich die klassische Simulation auf einen spezifisch ausgewählten Prozess fokussiert (IBM 2022). Der Digitale Zwilling dagegen kann mehrere Prozesse simultan analysieren. Außerdem beschränkt sich der DZ nicht nur auf Prozesse, sondern besitzt die Möglichkeit mehrere Objekte gleichzeitig zu untersuchen wie z.B. bei der Überprüfung der Festigkeit von Werkzeugen (IBM 2022). Er kann aufzeigen, ob ein Meißel bricht oder nicht. Aus diesem Grund eignet sich der DZ auch zur Überwachung (IBM 2022).

Ein weiterer wesentlicher Unterschied ist, dass mit einem Digitalen Zwilling eine Simulation in Echtzeit effizienter durchgeführt werden kann. Die konventionelle Simulation wird in einem virtuellen Umfeld durchgeführt, welches auch physische Elemente wie zum Beispiel Layouts enthalten kann (Olding 2020). Hierbei ist zwar eine Simulation in Echtzeit in gewisser Weise möglich, da Echtzeitdaten integriert werden können. Zu beachten ist dabei, dass dies erst über Schnittstellen definiert werden muss. Zusätzlich muss eine geeignete Software gefunden werden. Bei einem Digitalen Zwilling ist dies bereits standardmäßig gegeben. Außerdem findet ein regelmäßiger Austausch von Informationen zwischen dem digitalen und physischen Zwilling statt, wodurch die Simulation in Echtzeit deutlich effizienter durchgeführt werden kann (Olding 2020).

Des Weiteren kann der Digitale Zwilling zum Optimieren des Produktdesigns genutzt werden. Zum Beispiel kann das Verhalten von Stoffen eines Produkts während des gesamten Produktlebenszyklus simuliert und somit eventuell bessere Alternativen gefunden werden. Dies kann eine Verbesserung der Qualität zur Folge haben. Innovative Simulationen sind dagegen in der Lage auf höchstem Niveau viele Variablen auf einmal zu analysieren, um Ergebnisse zu liefern (Olding 2020).

Für eine Produkt- und Prozessoptimierung kann der DZ ebenfalls eingesetzt werden. Die erfassten Daten aus dem Digitalen Zwilling liefern Input für die Verbesserung des Produktdesigns, für analytische Prognosen, die Wartung und vieles weitere (Olding 2020). Eine Simulation dagegen kann nur spekulative Ergebnisse liefern, die den physischen Zwilling beeinflussen (Olding 2020).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Simulationen, wie in der Theorie angeschnitten, eher für die Neuplanung genutzt werden, bei der kein aktueller Stand der Anlage vorhanden ist. Aus diesem Grund können mit Simulationen nur theoretische Vorhersagen über potentielle Ereignisse bei Veränderungen getroffen werden. Des Weiteren ist zwar prinzipiell die Integration von Echtzeitdaten durchaus möglich, was sich aber als sehr aufwendig gestaltet. Ein Digitaler Zwilling dagegen kann aufzeigen, was im gegenwärtigen Moment und zukünftig innerhalb der Prozesse des physischen Zwillings passiert. Aus diesem Grund wird der DZ, wie in der Theorie bereits erwähnt, für bereits bestehende Anlagen erstellt. Dennoch ist zu beachten, dass eine Simulation und ein Digitaler Zwilling nur so genau sind, wie die Genauigkeit der Daten, mit denen sie arbeiten.

## **2.4 Vorstellung der Softwareprogramme**

Für die Realisierung eines Digitalen Zwillings stehen eine Vielzahl von Softwareprogrammen mit unterschiedlichen Modellierungswerkzeugen und Möglichkeiten zur Verfügung. Nachfolgend werden zwei Programme vorgestellt, welche in der Industrie bereits bekannt sind und für den Einsatz bei einer Materialflussoptimierung verwendet werden können. Bei den Programmen handelt es sich, wie bereits erwähnt, dabei um Tecnomatix Plant Simulation von der Siemens AG und visTABLE® von der plavis GmbH.

### **2.4.1 Tecnomatix Plant Simulation**

Mit Tecnomatix Plant Simulation bietet Siemens eine Softwarelösung zur Simulation, Modellierung und Animation von komplexen Produktionssystemen und Logistikprozessen oder auch ganzen Fabriken (Bangsow 2010). Dadurch eröffnen sich viele Nutzungsmöglichkeiten wie z.B. die Planung und Optimierung des Materialflusses oder der Analyse der Ressourcenauslastung. Das mit Plant Simulation erstellte Modell kann nicht nur für die Analyse des aktuellen Betriebs, sondern auch für potentielle zukünftige Ereignisse bzw. für eine Vorplanung genutzt werden (Bangsow 2010). Hierfür bietet Plant

Simulation eine Reihe von Werkzeugen, Statistiken und Diagramme für eine Analyse und Auswertung. Mögliche Beispiele wären (Softguide 2022):

- Grafiken und Diagramme zur Analyse von Ressourcenauslastungen, Maschinenbelegungen, Durchlaufzeiten etc.
- Analysewerkzeuge wie zum Beispiel zur Analyse von Engpässen, Sankey-Diagramm und Analyse des Energieverbrauchs
- Statistiken
- HTML-Berichte
- Zahlreiche Schnittstellen (z.B. zu MS-Excel)

Die eigens entwickelte Programmiersprache SimTalk erlaubt dem Anwender zusätzliche Möglichkeiten zum Modellieren und Steuern der Simulationen. Hierbei bieten alle Objekte in der integrierten Bibliothek Eigenschaften, welche durch programmierbare Methoden aufgerufen werden können. Dadurch erweitern sich die Möglichkeiten der Erstellung eines Modells um ein Vielfaches. Wenn bestimmte zusätzliche Funktionen oder Eigenschaften benötigt werden, können diese durch eigene Programmierung realisiert werden (Siemens 2022).

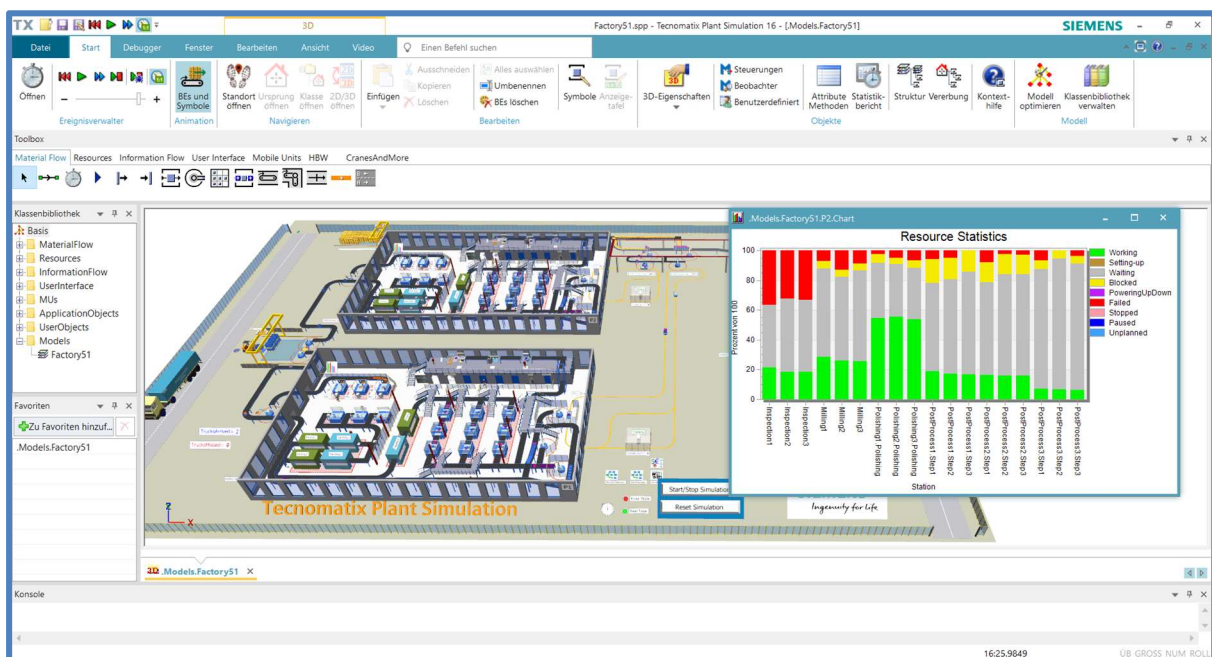


Abbildung 19: Übersicht Tecnomatix Plant Simulation

Plant Simulation bietet außerdem eine nahtlose Schnittstelle, auch während einer Simulation, für die Integration und den Austausch von Daten. Außerdem wird ebenfalls die Steuerung durch andere Programme ermöglicht und das Werkzeug unterstützt eine Vielzahl von Datentypen wie z.B. XML, HTML, XLS oder CAD (Plant Simulation 2022).

#### 2.4.2 visTABLE®

Ein weiteres Softwareprogramm zur Erstellung eines Digitalen Zwillings für den Einsatz einer Materialflussoptimierung stellt die plavis GmbH mit visTABLE® zur Verfügung (visTABLE® Software 2022).

Die Software bietet Lösungen für folgende Anwendungsbereiche (visTABLE® Software 2022):

- Fabrikplanung
- Materialfluss & Intralogistik
- Montageplanung
- Layoutplanung
- Digitale Fabrik
- Wertstromanalyse

visTABLE® stellt hierbei ein Programm mit Drag & Drop Funktion dar, womit in ein komplexes Layout erstellt und Materialflüsse sowie Transportnetze darin visualisiert werden können (visTABLE® Software 2022). Bei anschließenden Änderungen im Layout bezüglich des Materialflusses, des Flächenbedarfs etc., analysiert visTABLE® die Änderungen und bildet diese visuell ab. Ein Beispiel zeigt die Abbildung 20, in dem der Materialfluss im Layout mittels Sankey-Diagramms und der von visTABLE® berechnete Transportaufwand dargestellt wird. Ergeben sich Änderungen im Layout, wie zum Beispiel das Umsetzen von Maschinen, wird eine Neuberechnung des Transportaufwands durchgeführt und die Veränderung in Prozent angezeigt, welche bei einer Verbesserung einen negativen Wert darstellt.

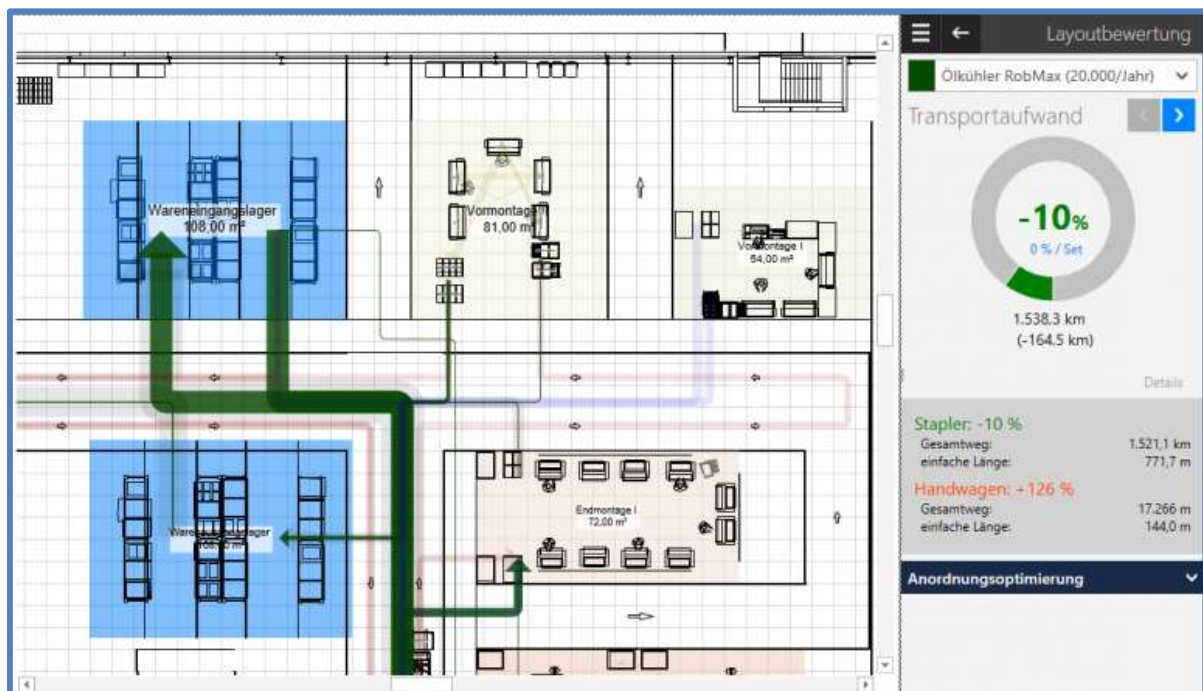


Abbildung 20: Reduzierung des Transportaufwands via visTABLE® (visTABLE® Software 2022)

Das Programm visTABLE® bietet eine Schnittstelle für Excel und .csv, wodurch ERP-Daten ohne erheblichen Aufwand integriert werden können. Dadurch können Wertströme nicht nur ins Layout integriert, sondern auch dargestellt und interaktiv bearbeitet werden (visTABLE® Software 2022). Des Weiteren können CAD-Daten (z.B. im DWG/DXF Format) ebenfalls importiert oder exportiert werden.



Die Bibliothek von visTABLE® umfasst rund 1500 skalierbare Modelle zur 3D-Visualisierung des Layouts. Außerdem kann sie durch den Import von CAD-Daten oder Daten aus 3D-Programmen erweitert werden. Dadurch können Gebäude, Personen, Fertigungsbereiche, Transportmittel und vieles mehr in 3D dargestellt und dem Kunden so einfach aufgezeigt werden (visTABLE® Software 2022).

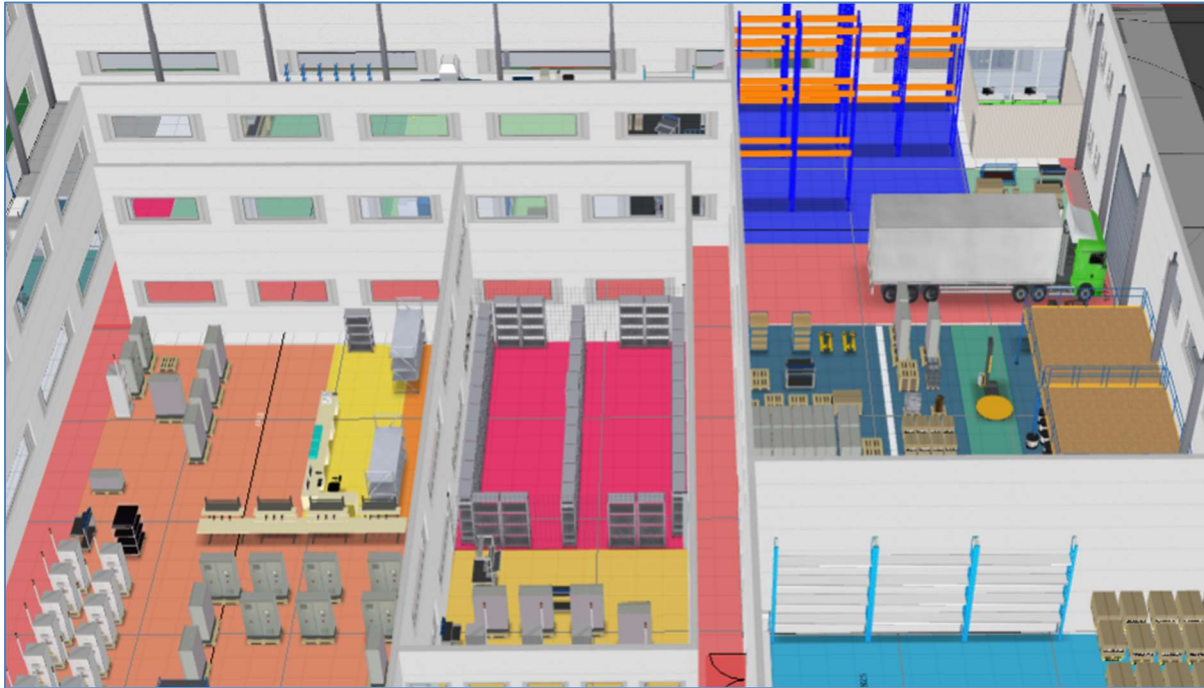


Abbildung 21: 3D-Visualisierung des Layouts mittels visTABLE®

Zusammenfassend bietet visTABLE® für den Bereich der Materialflussanalyse und -optimierung folgende Möglichkeiten:

- Übersichtliche Darstellung des Materialflusses im Layout in 2D und 3D
- Sankey-Diagramm
- Übersichtliche und genaue Bewertung der Logistik
- Excel/ csv / CAD-Daten Schnittstelle

### 3 Vergleich der Softwareprogramme

Wie bereits erwähnt, kann die Auswahl des geeigneten Softwareprogramms für die Erstellung eines Digitalen Zwillings sehr herausfordernd sein. Je nach Anwendungsgebiet und Einsatzzweck stehen eine Vielzahl von Programmen mit unterschiedlichen Modellierungs- und Analysewerkzeugen zur Verfügung.

Der Vergleich zweier Softwareprogramme in einem Pilotprojekt soll vorab relevante Informationen liefern, um Fehlentscheidungen zu verhindern. Bei den ausgewählten Softwareprogrammen handelt es sich wie bereits ausführlich in 2.4 erläutert um visTABLE® der plavis GmbH und Tecnomatix Plant Simulation von Siemens, die beide im Industrie- bzw. Produktionsbereich bekannt und verbreitet sind.

### 3.1 Vorbereitung

Zu Beginn wird zunächst das Anwendungsfeld, in dem die beiden Programme miteinander verglichen werden sollen, festgelegt. Da die Optimierung des Materialflusses im Vordergrund steht, wird auch der Vergleich primär danach ausgerichtet. Eine Übersicht der Kriterien lässt sich in Abbildung 22 betrachten. Die Auswahl orientiert sich dabei an einer an der Hochschule München, im Wintersemester 19/20, durchgeführten Nutzwertanalyse zur Auswahl von Planungssoftware (Weber 2022). Die Beurteilung erfolgt anhand der Erfahrungen aus dem Bachelor- und Masterstudium, sowie aus Online-Foren (z.B. Plant Simulation Forum – Siemens Communities) und internen Anwenderberichten des Unternehmens Bross & Partner Consulting Engineers. Auf einen Vergleich der Kosten zum Erwerb der Lizenzen wird in diesem Vergleich nur bedingt eingegangen, da sich die Leistungsangebote und dadurch der Preis über die Zeit hinweg verändern.

Nr.	Kriterium	Bemerkung
1	Zeitaufwand	Wie hoch ist der Zeitaufwand zum Erlernen der Grundlagen?
2	Benutzerfreundlichkeit	Wie benutzerfreundlich ist die Anwendung des Programms?
3	Modellierungs- & Analysewerkzeuge	Wie umfangreich ist die Auswahl an Werkzeugen zur Optimierung des Materialflusses?
4	Schnittstellen	Welche Schnittstellenanbindung wird ermöglicht?
5	Einsatzgebiet	Wie breit ist das Einsatzgebiet der Software gefächert?
6	Kosten	Wie teuer ist die jeweilige Software?

Abbildung 22: Übersicht der Vergleichskriterien

### 3.2 Beurteilung der Programme

#### Kriterium 1 - Zeitaufwand

Zunächst wird der Zeitaufwand zum Erlernen der Grundlagen der Programme miteinander verglichen. Die plavis GmbH stellt eine Webseite mit allen Grundlagen der Software als Hilfestellung zur Verfügung. Hierbei unterstützen Animationen, Videos und ausführliche Texte mit Bildern beim Einarbeiten in das Programm. Innerhalb von 1-2 Wochen kann dadurch das Programm und seine Funktionen verstanden werden.

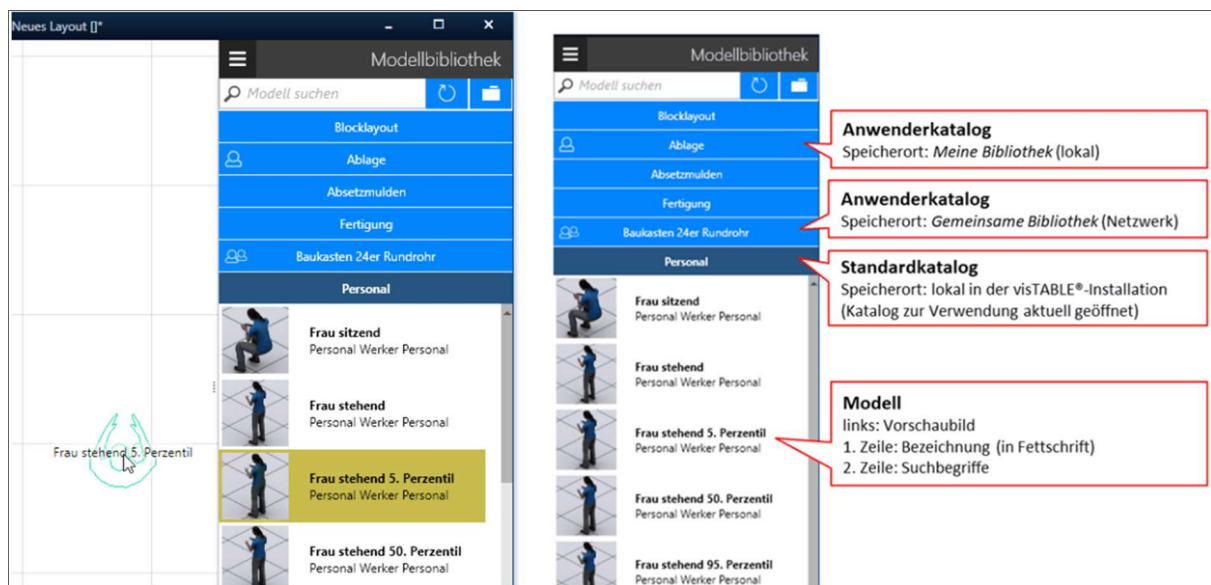


Abbildung 23: Hilfe zum Erlernen der Grundlagen von visTABLE® (visTABLE® Software 2022)

Tecnomatix Plant Simulation bietet dagegen innerhalb der Software einen Guide für einen Schnelleinstieg an. Des Weiteren unterstützen Videos und Beispielmodelle das Erlernen der Grundlagen. Die Dauer beträgt je nach Zeitaufwand ebenfalls 1-2 Wochen, bis ein allgemeines Verständnis über die Funktionen und den Umfang vorhanden ist. Dennoch ist dies für einen detaillierten DZ nicht ausreichend. Für eine umfassende Modellierung muss die softwareeigene Programmiersprache SimTalk verstanden werden. Diese ist sehr umfangreich und kann nur mit einem hohen Zeitaufwand erlernt werden. Als Hilfe kann ein Help-Verzeichnis (Abbildung 24) innerhalb der Software verwendet werden. Des Weiteren bieten ein Community-Forum und der Simulationsspezialist Steffen Bangsow zahlreiche Unterstützung für das Aneignen der Programmierkenntnisse an. Der Aufwand beträgt hierbei schätzungsweise 3-6 Monate, bis die Programmiersprache halbwegs verstanden wurde, doch dann sind die Möglichkeiten nahezu grenzenlos.

The screenshot shows a help page titled 'Abstand / Interval' within the 'Attribute der Quelle' section. It provides the following information:

- Syntax:** `<Pfad>.Start:time`, `<Pfad>.Stop:time`, and `<Pfad>.Abstand:time`.
- Erklärung:** The `Abstand` attribute sets the time interval after which the source produces more BEs. The `Start` attribute sets the start time, and the `Stop` attribute sets the end time.
- Datentyp des Zuweisungswerts:** The value is of type `time`.
- Beispiel:**

```
MeineQuelle.ErzeugungsZeit := "Abstand einstellbar"
MeineQuelle.Start := 3600
MeineQuelle.Stop := str_to_time("1:00:00:00.00")
MeineQuelle.Abstand.setzeParam("Normal", 500, 100, 200, 900)
```
- Verwandte Themen:** Links to [Abstand](#), [Start](#), and [Stop](#).

Abbildung 24: Help-Verzeichnis von Tecnomatix Plant Simulation

## Kriterium 2 - Benutzerfreundlichkeit

Als nächstes wird die Benutzerfreundlichkeit der jeweiligen Programme gegenübergestellt. Aufgrund der bereits erwähnten Bibliothek und der vorhandenen Modelle müssen keine umfangreichen Importe von CAD-Daten durchgeführt werden. Des Weiteren wird eine intuitive Bedienung durch Drag & Drop und ein übersichtliches bzw. eindeutig beschriebenes Menü ermöglicht. Eine Benutzung des Programms über einen Touchscreen kann ebenfalls erfolgen. Die Umwandlung der 2D-Oberfläche in eine visuelle 3D-Ansicht wird automatisch durchgeführt. Das Layout kann außerdem für die Visualisierung in VR exportiert werden.

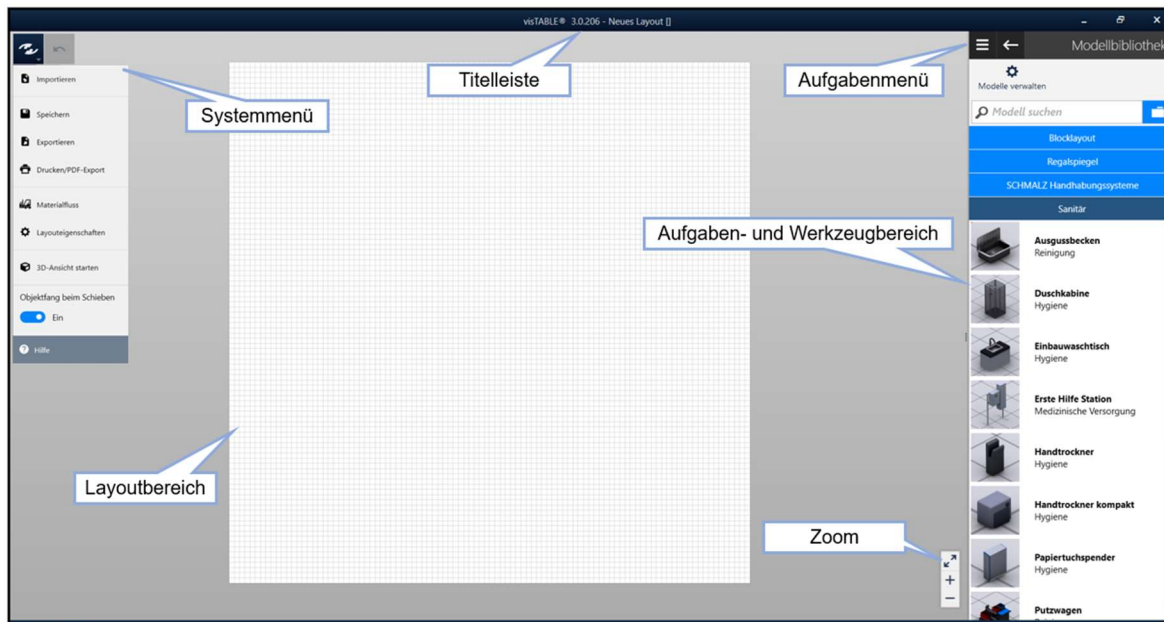


Abbildung 25: Programmfenster von visTABLE®

Plant Simulation bietet ein übersichtliches Programmfenster mit unterschiedlichen sogenannten Andockfenstern, deren Position frei festgelegt werden kann. In der Toolbox sind alle für ein Simulationsmodell relevanten Modellierungs- & Analysewerkzeuge, sowie Objekte nach Kategorien untergebracht. Die restlichen Funktionen wie z.B. der Import/Export von CAD-Daten sind im Menüband zu finden. Eine Umwandlung von einem 2D in ein 3D-Modell ist möglich, aber nicht umgekehrt. Alternativ kann hierfür jedoch eine Planungsansicht aktiviert werden, welche die 2D-Oberfläche des Modells darstellt. Die Programmiersprache SimTalk stellt eine Hürde bei der Benutzerfreundlichkeit dar, da die Behebung von kleinsten Syntaxfehler selbst bei erfahrenen Anwendern eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt.

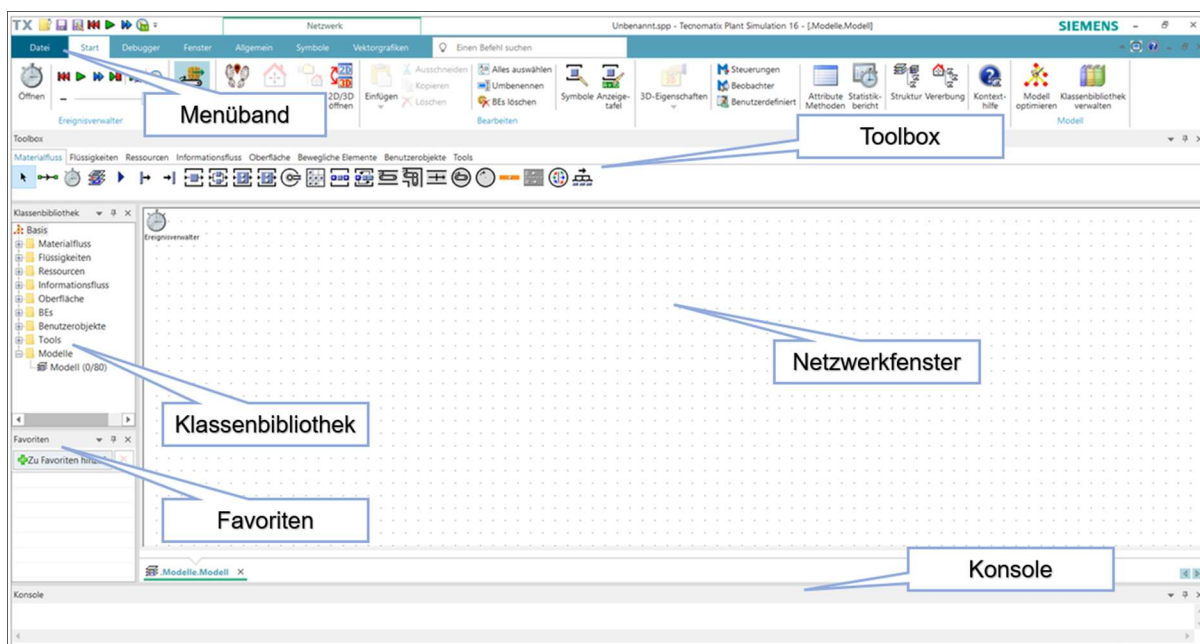


Abbildung 26: Programmfenster von Plant Simulation

### Kriterium 3 - Modellierungs- & Analysewerkzeuge

Das Programm visTABLE® stellt, wie in 2.4.2 bereits beschrieben, eine Bibliothek mit rund knapp 1500 skalierbaren Modellen zur Visualisierung des Layouts zur Verfügung. Des Weiteren können eigene CAD-Daten eingefügt werden. Eine Modellierung ist in 2D und 3D möglich. Außerdem können die internen Prozesse inklusive Mengenangaben, sowie Transportmittel, Behälter und Teile ebenfalls festgelegt und die Transportnetze (Sankey-Diagramm) angezeigt werden. Als Analysewerkzeuge stehen eine Anordnungsoptimierung, Logistikbewertung, Flächenbilanz, Transportnetzbelastung, Ausrüstungsliste und ein Distanz-Intensitäts-Diagramm zur Verfügung.

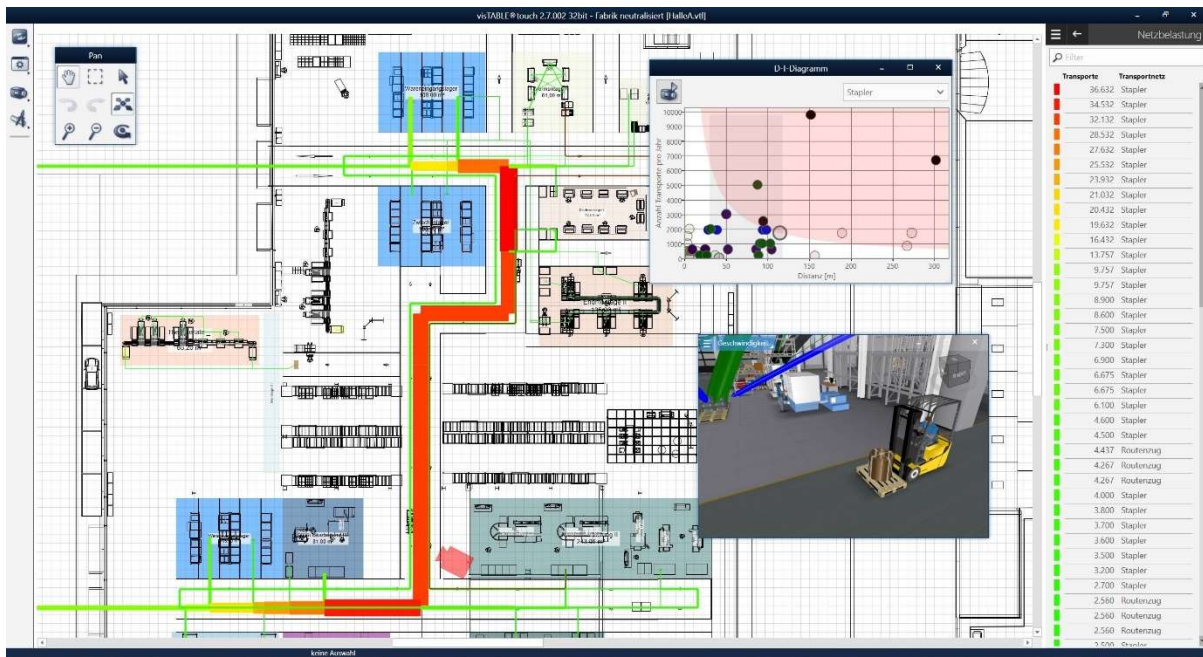


Abbildung 27: Beispiel für eine Transportnetzbelastung in visTABLE® (Softguide 2022)

Die Auswahl an Modellierungs- und Analysewerkzeugen ist in Plant Simulation äußerst umfangreich. Die Toolbox ermöglicht dem Anwender ein komplexes Modell in 2D oder 3D aufzubauen. Sie beinhaltet neben Objekten des Material- und Informationsflusses sowie Ressourcen und beweglichen Elementen, auch zahlreiche Analysewerkzeuge wie zum Beispiel eine Engpass- und Kostenanalyse oder ein Sankey-Diagramm. Layouts des zu betrachtenden physischen Objekts können ebenfalls importiert werden. Zusätzlich können eigenen Grafiken erzeugt oder eingefügt werden.



Abbildung 28: Toolbox-Plant Simulation

### Kriterium 4 - Schnittstellen

Als Schnittstellen bietet visTABLE® eine Excel- und csv-Schnittstelle für die Integration von ERP-Daten und dem Import und Export von Blocklayouttabellen und Warenströmen (Abbildung 29). Außerdem ist eine CAD-Schnittstelle für den Import und Export von CAD-Daten vorhanden. Das Format kann wahlweise DXF/DWG/STEP/IGES/STL betragen. Hierbei ist zu beachten, dass das 2D-Layout nur in DXF bzw. DWG exportiert bzw. importiert werden kann. Zusätzlich besteht aber die Möglichkeit eine 3D-Szene

des Layouts als 3D-PDF oder als WaveFront-OBJ File zu speichern. Außerdem wird der Import bzw. Export des Layouts als Bitmap Grafik oder Blocklayoutlist ermöglicht. Für den Import von Modellen der Modellbibliothek kann das Format wiederum DXF/DWG/STEP/IGES/STL betragen. Erweiternd dazu besteht die Möglichkeit die Modelle als DAE/3DS/WRL/IFC/JT zu importieren.

Quelle	Senke	Operation an der Quelle	Operation an der Senke	Produktfamilie
Wareneingang	Drahtkonfektionierung	Wareneingang	Drahtkonfektionierung	NSHV1_1700052_
Wareneingang	Kardex Lager	Wareneingang	Kardex Hauptlager	NSHV1_1700052_
Wareneingang		Wareneingang	Bodenlager NSHV Schränke	NSHV1_1700052_
Wareneingang	Hutschienekonfektion	Wareneingang	Hutschienekonfektion	NSHV1_1700052_
Drahtkonfektionierung	Elektromontage NSHV	Drahtkonfektionierung	Elektromontage NSHV	NSHV1_1700052_
Elektromontage NSHV	QS Station	Elektromontage NSHV	QS-Station	NSHV1_1700052_
QS Station	Verpackungsbereich	QS-Station	Verpackung	NSHV1_1700052_
QS Station	Nacharbeit	QS-Station	Nacharbeit	NSHV1_1700052_
Verpackungsbereich	Warenausgang	Verpackung	Warenausgang	NSHV1_1700052_

Abbildung 29: Beispiel für den Excel-Export der Warenströme

Tecnomatix Plant Simulation bietet die Möglichkeit von anderen Programmen manipuliert und gesteuert zu werden. Aus diesem Grund besitzt Plant Simulation eine Vielzahl von Schnittstellen, welche in Abbildung 30 dargestellt sind. Des Weiteren können die Daten vor und während der Simulation des Modells ausgetauscht werden. Der Import oder Export von Tabellen ist ebenfalls möglich, wodurch umfangreiche Arbeitspläne oder Stücklisten integriert werden können.

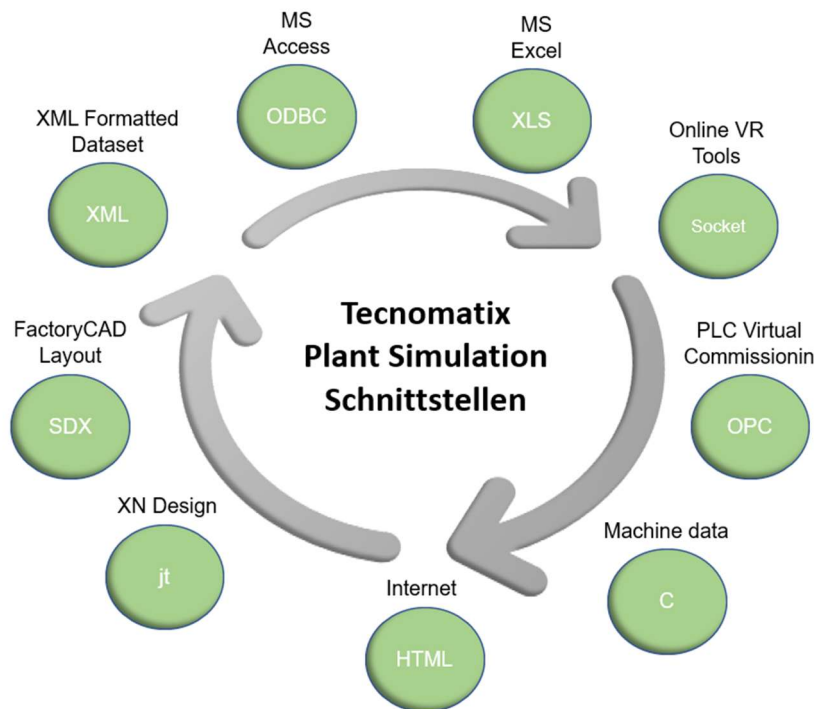


Abbildung 30: Schnittstellen Tecnomatix Plant Simulation (Plant Simulation 2022)

### **Kriterium 5 - Einsatzgebiet**

Das Programm visTABLE<sup>®</sup> bietet sich eher für eine statische Materialflussoptimierung und einer Flächenplanung (2D & 3D) an. Mit Hilfe der Bibliothek und der Schnittstellen kann ein detailgetreues Layout mit realistischen Maßstäben, aufgrund der 3D-Modellbausteine und Schnittstellen, in 3D erstellt werden. Dieses Layout kann mit Hilfe eines virtuellen Rundgangs mit VR betrachtet werden. Mögliche Ziele die mit Hilfe von visTABLE<sup>®</sup> erreicht werden können sind z.B.:

- Reduzierung des Transportaufwands
- Flächeneffizienz
- Optimierung der internen Prozesse

Im Gegensatz dazu kann Tecnomatix Plant Simulation aufgrund seiner visuellen Objekte, der Programmiersprache SimTalk und Funktionen eher für eine dynamische Materialflusssimulation eingesetzt werden. Ein tatsächlicher visueller Fluss, über den ganzen Lebenszyklus hinweg, kann realisiert werden. Mitarbeiter können in Kombination mit einem Schichtkalender ebenfalls mit integriert werden. Des Weiteren können aufgrund der Programmiermöglichkeiten zahlreiche verschiedene Diagramme erstellt werden, wodurch die Auswertoptionen vielfältig sind. Die potentiellen Ziele, die mit Plant Simulation erreicht werden können, sind ebenfalls umfangreich. Einige Beispiele für mögliche Ziele wären:

- Steigerung der Auslastung
- Reduzierung von Transportaufwand, -zeiten und Kosten
- Reduzierung von Lieferengpässen

### **Kriterium 6 – Kosten**

Das Thema Kosten spielt bei der Auswahl der Software ebenfalls eine entscheidende Rolle. Hierbei muss zunächst jedoch gesagt werden, dass die Kosten nicht im Detail miteinander verglichen werden können, da beide Hersteller unterschiedliche Lizenzarten anbieten und je nach Umfang und Funktionsinhalten der Preis für die jeweilige Lizenz variiert. Des Weiteren können sich die Kosten, aufgrund von wirtschaftlichen Ereignissen, über einen längeren Zeitraum ebenfalls verändern. Eine Standardlizenz für einen Nutzer kostet schätzungsweise aktuell bei Plant Simulation ungefähr 30.000€. Im Gegensatz dazu kann für visTABLE<sup>®</sup> bereits eine Small Business Lizenz für einen Nutzer für ungefähr knapp 8.000€ - 11.000€ erworben werden.

## **4 Vorgehen zur Materialflussoptimierung mittels Digitalen Zwillings**

Im folgenden Kapitel wird die in der Zielsetzung angesprochene Vorgehensweise zur Optimierung des Materialflusses mit Hilfe eines Digitalen Zwillings vorgestellt, wobei dieser als Tool im Sinne eines Digitalen Modells für den Einsatz verwendet wird. Die Vorgehensweise lässt sich dabei in Materialflussanalyse und die anschließende Optimierung bzw. Planung unterteilen.

### **4.1 Materialflussanalyse im IST-Modell**

Zu Beginn der Optimierung muss zunächst der aktuelle Material- und Informationsfluss analysiert werden. Dabei soll der Digitale Zwilling als Tool für die Durchführung der MFA dienen. Die nachfolgende Abbildung zeigt visuell, wie er während der Analyse als Tool eingesetzt wird.



**Abbildung 31: Vorgehensweise der Materialflussanalyse und Verwendung des DZ als Tool**

Für ein besseres Verständnis über die Möglichkeiten und zur Darstellung, wie eine Kombination von Digitalen Zwillingen aktuell realisiert werden kann, werden beide Softwareprogramme für ein Beispiel eingesetzt. Mit Plant Simulation soll dabei ein Digitaler Zwilling als Digitales Modell zur Analyse der Durchlaufzeiten in einer mechanischen Fertigung aufgebaut werden. Anhand eines DZ (ebenfalls in Form eines Digitalen Modells) in visTABLE® soll der Transportaufwand innerhalb der Fertigung ersichtlich gemacht werden. Aus der Analyse sollen Optimierungsmöglichkeiten hervorgehen.

#### 4.1.1 Ziel- und Ergebnisdefinition

Wie bereits erläutert müssen zu Beginn einer Materialflussanalyse die Ziele und Ergebnisse herausgearbeitet werden, die erreicht werden sollen. Infolgedessen wird dabei auch die Wahl des Softwareprogrammes zur Erstellung des Digitalen Zwillings getroffen, da jedes Programm, wie im vorherigen Kapitel 3 ausführlich dargestellt, verschiedene Einsatzmöglichkeiten bietet.

Für das Beispiel werden, wie in 4.1 erwähnt, die Softwareprogramme Tecnomatix Plant Simulation und visTABLE® ausgewählt. Hierbei sollen mit Plant Simulation die Durchlaufzeiten und mit visTABLE® der Transportaufwand innerhalb der Fertigung analysiert werden.

#### 4.1.2 Datenakquise

Anhand der Ziele werden die benötigten Daten ersichtlich, die für den Digitalen Zwilling und die Materialflussanalyse benötigt werden. Die Datenakquise kann dabei wie bereits beschrieben durch eine Primär- oder Sekundärdatenerhebung durchgeführt werden. Des Weiteren sollten die Punkte, die in 2.3.4 erläutert wurden, Beachtung finden. Dazu zählt zum Beispiel die Reduzierung der Datenmengen durch die ausschließliche Betrachtung von prozessrelevanten Daten. Wurden alle notwendigen Daten erhoben, kann der Digitale Zwilling auf dieser Basis erstellt werden.

Im Beispiel werden für Plant Simulation Stücklisten, Arbeitspläne, Maschinendaten und die Struktur des Gebäudes vom Kunden bereitgestellt. Diese müssen anschließend auf Vollständigkeit, Plausibilität, Redundanzfreiheit und Konsistenz überprüft werden. Der Transport und die Bearbeitung werden innerhalb der Fertigung von Mitarbeitern durchgeführt, wodurch Transport- und Bearbeitungszeiten anhand einer Primärdatenerhebung aufgenommen werden müssen.

Nr.	Transport	Ziel	Zeiten nach Befragung	Gemessene Zeit (Durchschnitt)	Bemerkung
1,0	Eingang Fertigung	Maschine 1	10 Sekunden	15 Sekunden	
2,0	Eingang Fertigung	Maschine 2	12 Sekunden	18 Sekunden	
3,0	Maschine 1	Maschine 3	10 Sekunden	8 Sekunden	
4,0	Maschine 2	Maschine 4	10 Sekunden	9 Sekunden	

**Abbildung 32: Beispiel für das Ergebnis einer Primärdatenerhebung der Transportzeiten**



Die Oberfläche des fertigen Digitalen Zwillings im Sinne eines Digitalen Modells mit Tecnomatix Plant Simulation sieht für das Beispiel dabei folgendermaßen aus:

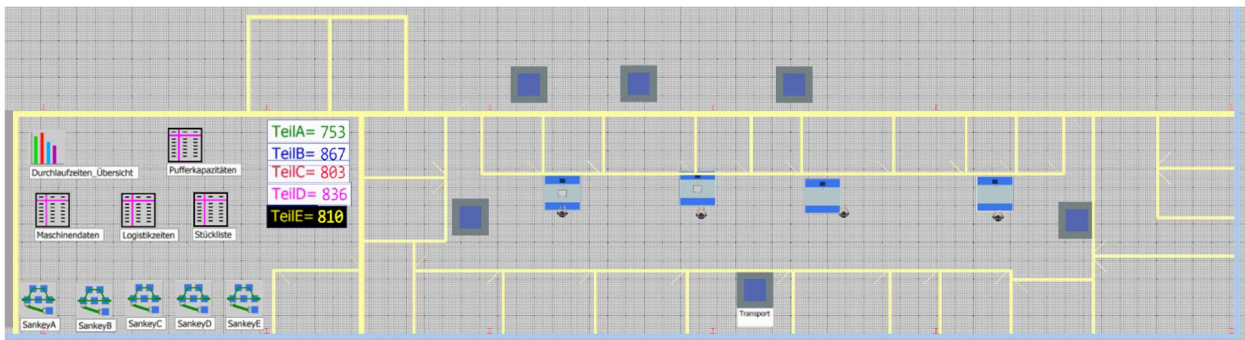


Abbildung 33: Planungsansicht des Digitalen Zwillings für das Beispiel

Das Modell beinhaltet dabei:

- Tabellen zur Konfiguration des Zwillings
- Sankey-Diagramme
- Histogramm zur Darstellung der Durchlaufzeiten
- Unternetzwerke zur Repräsentation der Transportwege (Simulation der Transportzeiten)
- Maschinen
- Unternetzwerke für die Experimente und Methoden
- Visuelle Anzeige für die Anzahl an bearbeiteten Produkten

Für visTABLE® stehen dieselben Daten zur Verfügung, woraus sich folgender DZ (ebenfalls in Form eines Digitalen Modells) ergibt:

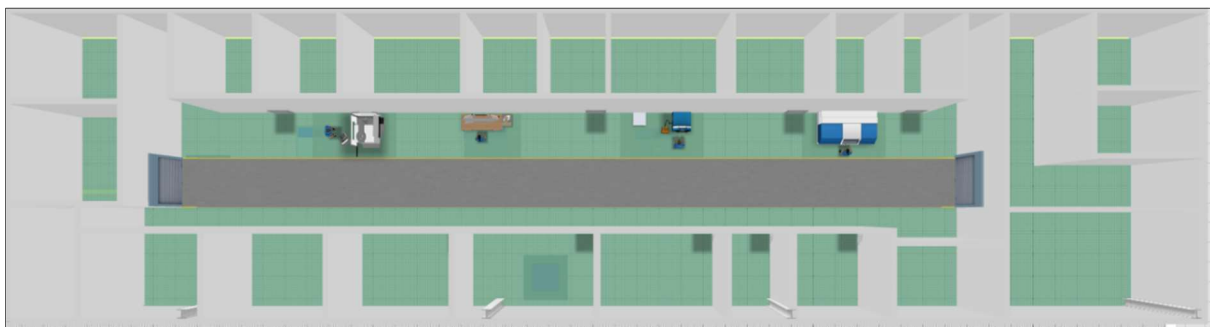


Abbildung 34: 3D-Ansicht des Digitalen Zwillings für das Beispiel

Das Modell beinhaltet hierbei folgendes:

- Transportwege
- Maschinen
- Wareneingang und -ausgang
- Internen Prozesse zur Darstellung der Transportflüsse

#### 4.1.3 Auswertung der Daten

Der Digitale Zwilling übernimmt die Auswertung der Daten in einer Materialflussanalyse selbst. Hierfür bieten die verschiedenen Programme unterschiedliche Methoden an, welche dynamisch oder statisch sein können.

Für das Beispiel sollen mit Plant Simulation die Durchlaufzeiten analysiert werden können. Eine zuvor mit SimTalk programmierte Methode zeichnet hierfür die Durchlaufzeiten nach jedem bearbeiteten Teil von verschiedenen Produkten mit Hilfe einer Tabelle auf und stellt diese in einem Histogramm anschaulich dar. Eine Obergrenze definiert dabei die maximale zugelassene Durchlaufzeit. Standardmäßig bietet Plant Simulation zwar bereits Bausteine an, um die Durchlaufzeit analysieren können, jedoch ist ein Histogramm visuell schöner und dynamisch.

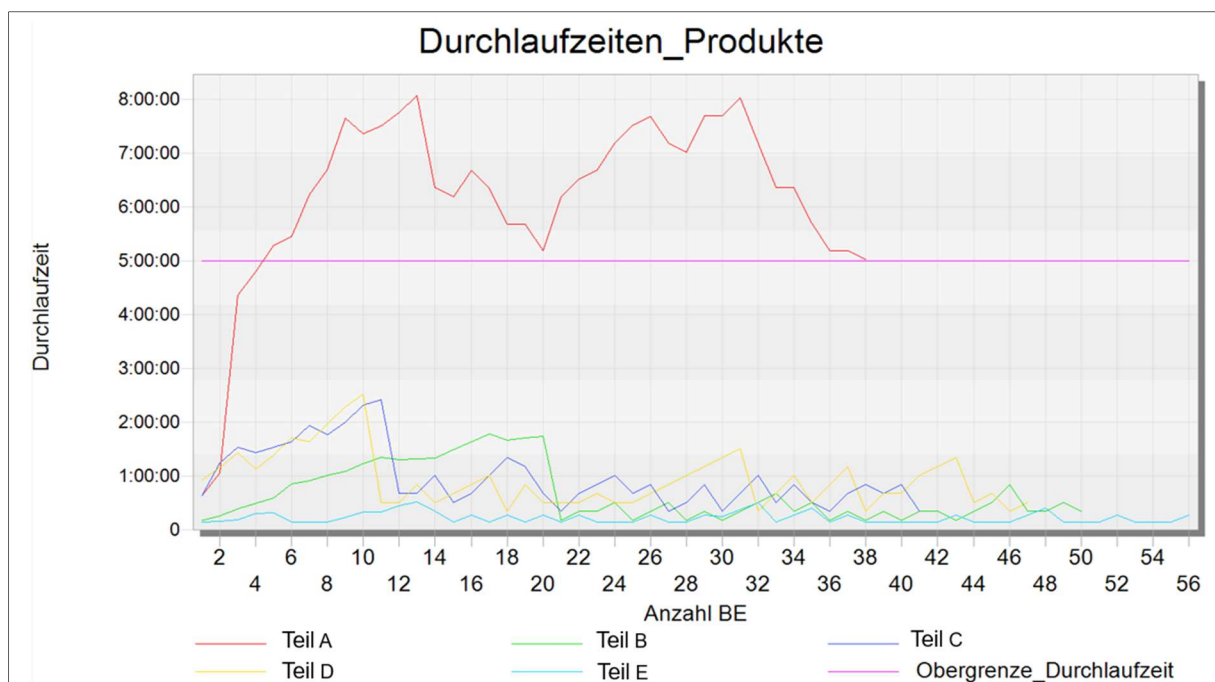


Abbildung 35: Histogramm zur Darstellung der Durchlaufzeiten

Im DZ von visTABLE<sup>®</sup> soll der Transportaufwand reduziert werden. Dafür können mit Hilfe eines Analyserwerkzeugs die Daten über den benötigten Aufwand ausgewertet und dadurch die Logistik bewertet werden. In Abbildung 36 wird der Transportaufwand für das Produkt A dargestellt. Zu beachten ist hierbei, dass 0% den Referenzwert darstellt und jede Optimierung für einen negativen Prozentwert sorgt.

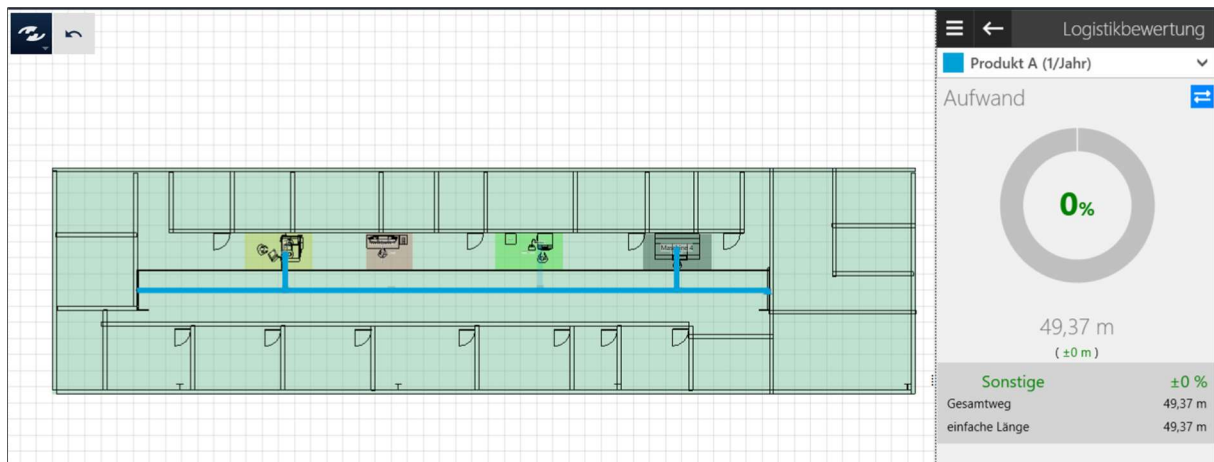


Abbildung 36: Datenauswertung mittels Logistikbewertung

#### 4.1.4 Darstellung der Daten

Auch die grafische Darstellung wird mit Hilfe des Digitalen Zwillings realisiert. Die verschiedenen Programme bieten hierfür unterschiedliche Möglichkeiten an. In Plant Simulation kann beispielsweise ein detailliertes Wertstromdesign erstellt werden. Für die Fertigung im Beispiel wird der Material- und Informationsfluss als Sankey-Diagramm dargestellt.

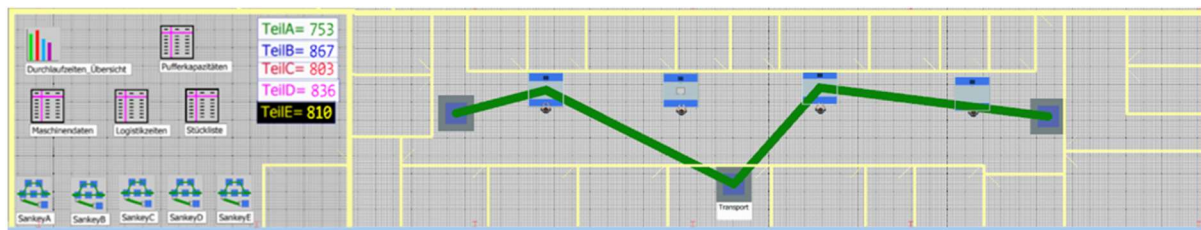


Abbildung 37: Sankey-Diagramm von Produkt A mit Tecnomatix Plant Simulation

In Tecnomatix Plant Simulation visualisieren die grünen Pfeile den Fluss. Das Unternetzwerk Transport symbolisiert für eine einfachere Darstellung die Transportzeiten von Maschine zu Maschine.

In visTABLE® wird das Sankey-Diagramm bzw. der Fluss über skalierbare Transportnetze strukturiert gegliedert dargestellt.

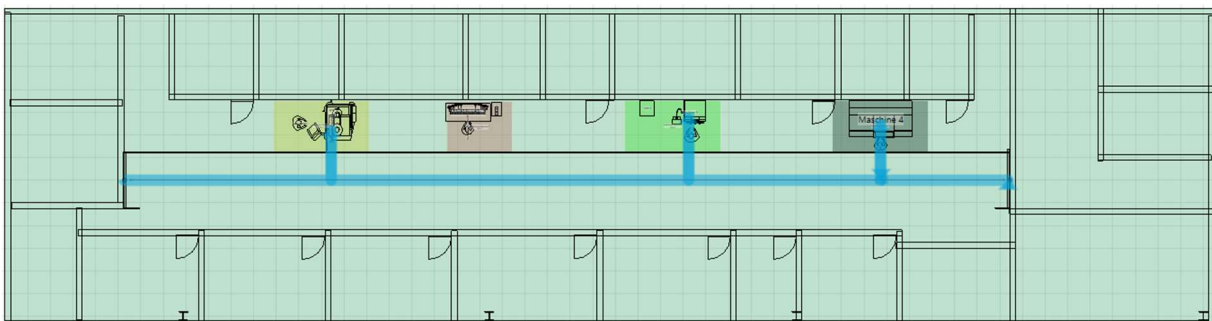


Abbildung 38: Sankey-Diagramm aller Produkte mit visTABLE®

#### 4.1.5 Beurteilung & Schwachstellenanalyse

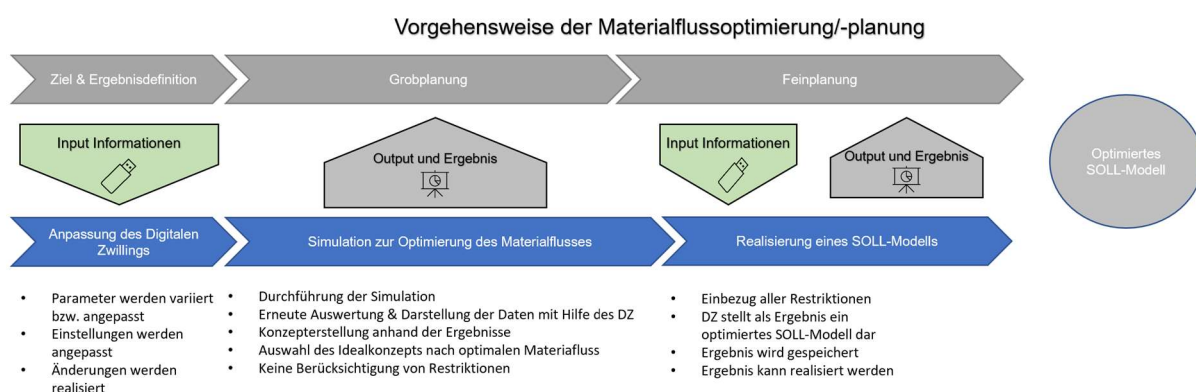
Die Beurteilung und Schwachstellenanalyse erfolgt prinzipiell wie bei einer klassischen Materialflussanalyse. Anhand von Kennzahlen und Beurteilungskriterien werden die Erkenntnisse aus dem Digitalen Zwilling betrachtet. Als Ergebnis liegt, wie auch in der klassischen Analyse, ein bereinigtes Datenmodell des aktuellen Materialflusses vor, womit nun die Materialflussplanung bzw. -optimierung durchgeführt werden kann.

Für das Beispiel wird mit Hilfe von visTABLE® der Transportaufwand analysiert. Dabei fällt auf, dass Produkt A und Produkt C jeweils in zwei Maschinen bearbeitet werden müssen. Der Werker muss bei Produkt C zunächst zu Maschine 3 und anschließend zurück zu Maschine 1 laufen, um das Produkt zu fertigen. Produkt A wird in Maschine 1 und anschließend Maschine 4 gefertigt. Dies sorgt für einen zusätzlichen Transportaufwand. Die restlichen Produkte müssen nur jeweils in einer Maschine bearbeitet werden.

Im Modell von Plant Simulation fällt beim Betrachten des Diagramms in Abbildung 35 auf, dass Produkt A die Obergrenze von 5 Stunden für die Durchlaufzeit deutlich überschreitet. Der Grund hierfür könnte die Bearbeitung des Produkts in zwei verschiedenen Maschinen sein. Doch wird, wie zuvor erwähnt, Produkt C ebenfalls in mehreren Schritten gefertigt. Eine Ursache für die hohe Durchlaufzeit könnte außerdem eine zu geringe Lieferzeit oder zu wenig Parallelstationen sein, wodurch es bei Maschine 1 zu Wartezeiten kommen kann. Der Grund hier ist, dass jeweils drei Produkte in Maschine 1 bearbeitet werden müssen.

## 4.2 Bestimmung des SOLL-Modells

Wie auch in der klassischen Materialflussplanung werden mit dem Digitalen Zwilling zunächst die Ziele bzw. Gründe für eine Optimierung festgelegt. Wie in 2.2.4 bereits beschrieben können Gründe zum Beispiel eine Umplanung oder Neuplanung aufgrund einer Betriebsverlagerung sein. Außerdem müssen die Planungsstufen herausgearbeitet werden. In der klassischen Materialflussplanung werden bis zu vier Stufen durchgeführt, bis ein fertiges SOLL-Modell realisiert wurde. In dieser Vorgehensweise werden lediglich zwei Stufen durchgeführt, die jedoch alle Schritte der klassischen Materialflussoptimierung berücksichtigen. Die nachfolgende Abbildung stellt visuell den Einsatz des DZ während der Bestimmung des SOLL-Modells dar.



**Abbildung 39: Visualisierung der Vorgehensweise zur Materialflussoptimierung/-planung**

Für ein besseres Verständnis wird als Beispiel eine Umplanung der Fertigung anhand der Ergebnisse aus der Analyse durchgeführt. Mit Hilfe des DZ von visTABLE® soll als Ziel der allgemeine Transportaufwand und mit Tecnomatix Plant Simulation die Durchlaufzeit von Produkt A reduziert werden. Zu beachten ist hier, dass dies keinen direkten Vergleich der Programme darstellen, sondern lediglich die konkrete Anwendung dieser aufzeigen soll.

#### 4.2.1 Grobplanung

In der Grobplanung müssen zunächst Konzepte zur Umsetzung entwickelt werden. Hierbei steht auch, wie in der klassischen Materialflussoptimierung, die Ordnung der Betriebsmittel nach dem optimalen Material- und Informationsfluss sowie der funktionale Nutzen im Vordergrund. Zu beachten ist auch hier, dass Restriktionen aller Art zunächst nicht berücksichtigt werden. Anhand der verschiedenen Konzepte wird anschließend die aussichtsreichste Lösung ausgewählt. Je nach Anwendungsprogramm und Anwendungsfall kann ein Konzept entweder einen neuen alternativen Digitalen Zwilling oder eine Übersicht der zu ändernden Parameter (Beispiel Reduzierung der Liefermengen) darstellen.

Im Beispiel soll mit dem DZ von visTABLE® der Transportaufwand reduziert werden. Dafür wird in der Grobplanung zunächst das Blocklayout der Fertigung betrachtet, um die Fertigungsbereiche zu planen. Betriebsmittel werden dabei zunächst nicht integriert. Mit Hilfe der Ergebnisse aus der Analyse werden verschiedene Anordnungen ausprobiert und mit Hilfe der Logistikkwertung die Einsparungen des Transportaufwands miteinander verglichen. Als Ergebnis entsteht ein Konzept mit einer Reduzierung um 12%, bei dem die Fertigungsbereiche von Maschine 3 und Maschine 1 miteinander getauscht werden.

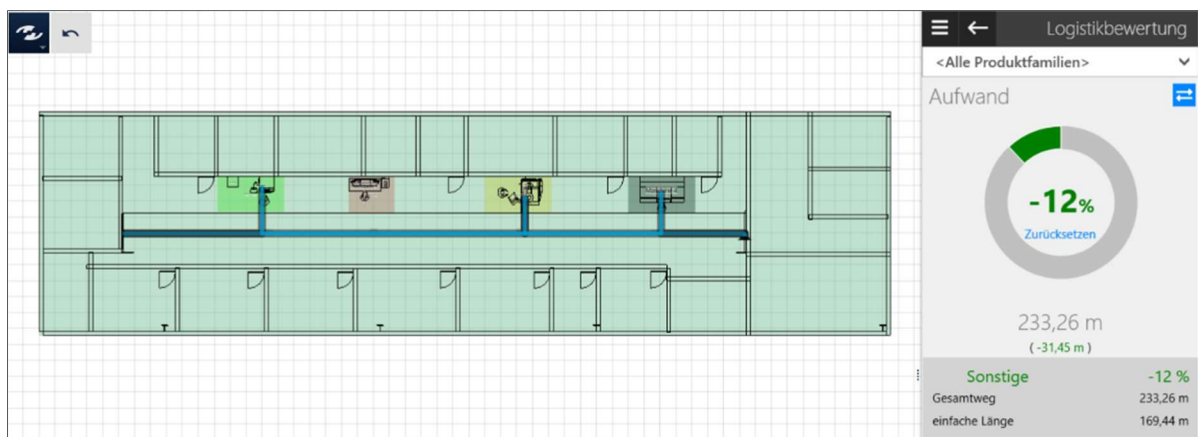


Abbildung 40: Ergebnis der Grobplanung mit visTABLE®

Bei der Reduzierung der Durchlaufzeiten in Plant Simulation gibt es zahlreiche Möglichkeiten die Grobplanung durchzuführen. Eine effektive Variante ist dabei die Durchführung von Experimenten. Diese können je nach Belieben und Auswertungswunsch konfiguriert werden. Anschließend gibt eine Übersicht Auskunft über die Erkenntnisse aus den zuvor definierten Eingabe- und Ausgabewerte. Für das Beispiel soll ersichtlich werden, in welchen Abständen die Teile für die Fertigung maximal geliefert werden dürfen (Quellenzeit), damit es nicht zu Wartezeiten bei der Bearbeitung der Teile kommt. Hierfür werden als Eingabewert acht verschiedene Quellenzeiten eingetragen und als Ausgabewert die Durchlaufzeiten der fünf Produkttypen (TeilX). Insgesamt werden 50 Experimente hintereinander durchgeführt und ein Durchschnittswert gebildet. Die Abbildung 41 zeigt die Auswertung des Experiments.

Experiment	root.Zeiten ["Bearbeitungszeit", "Quellenzeit"]	Durchlaufzeit TeilA	Durchlaufzeit TeilB	Durchlaufzeit TeilC	Durchlaufzeit TeilD	Durchlaufzeit TeilE
Exp 1	30:00.0000	34:22.0633	17:10.4023	33:09.6631	19:02.5279	28:14.5852
Exp 2	25:00.0000	35:37.7748	17:53.9108	33:46.8077	20:13.5963	28:14.2566
Exp 3	20:00.0000	37:46.8067	18:42.4745	35:35.1690	22:25.7520	28:04.0416
Exp 4	15:00.0000	43:26.0356	20:52.0784	39:48.7774	26:57.9043	28:14.3390
Exp 5	10:00.0000	1:47:28.7838	24:31.8845	59:59.2333	47:54.9881	31:57.8834
Exp 6	5:00.0000	8:04:31.9634	36:02.1702	1:48:30.8257	1:25:48.3176	56:40.6971
Exp 7	2:00.0000	9:24:36.2979	55:32.8834	2:21:03.2894	1:50:43.8705	1:24:12.1192
Exp 8	1:00.0000	9:37:24.0179	1:02:36.7570	2:28:29.0622	1:57:51.0366	1:32:26.1700

Abbildung 41: Experiment zur Reduzierung der Durchlaufzeit

Die Auswertung zeigt, dass zwischen einer Quellenzeit von 5:00 und 10:00 Minuten die Durchlaufzeit von Produkt A über die Obergrenze von 5 Stunden steigt. Ein weiteres Experiment soll die genaue Quellenzeit weiter eingrenzen. Hierfür werden diesmal Werte gewählt, die zwischen 5:00 und 10:00 Minuten liegen.

Experiment	root.Zeiten ["Bearbeitungszeit", "Quellenzeit"]	Durchlaufzeit TeilA	Durchlaufzeit TeilB	Durchlaufzeit TeilC	Durchlaufzeit TeilD	Durchlaufzeit TeilE
Exp 1	10:00.0000	1:47:28.7838	24:31.8845	59:59.2333	47:54.9881	31:57.8834
Exp 2	9:30.0000	2:15:07.1860	25:26.2586	1:03:41.0348	52:27.3039	33:34.2914
Exp 3	9:00.0000	2:50:41.5072	26:38.9305	1:09:08.4297	56:44.6850	35:10.6861
Exp 4	8:00.0000	4:23:16.5388	28:40.3180	1:18:09.4417	1:05:23.0535	40:06.8134
Exp 5	7:30.0000	5:13:08.5381	29:49.2995	1:24:55.3884	1:09:52.5105	44:07.8334
Exp 6	6:30.0000	6:37:08.0708	32:09.5480	1:34:28.5878	1:16:28.1357	49:17.6727
Exp 7	5:45.0000	7:30:09.1491	34:14.2334	1:41:11.2134	1:19:54.2968	51:46.2836
Exp 8	5:00.0000	8:04:31.9634	36:02.1702	1:48:30.8257	1:25:48.3176	56:40.6971

Abbildung 42: Eingrenzung der Quellenzeit

Die Eingrenzung der Quellenzeit zeigt, dass zwischen 7:30 und 8:00 Minuten die 5 Stundengrenze überschritten wird. Dies zeigt, dass die neuen Teile maximal alle 8 Minuten eintreffen dürfen.

#### 4.2.2 Feinplanung

In der Feinplanung wird anhand der Ergebnisse aus der Grobplanung an einer realen Lösung gearbeitet, die alle Restriktionen und Freiheitsgrade berücksichtigt. Des Weiteren werden alle Vorkehrungen getroffen, um eine Realisierung ermöglichen zu können. Als Ergebnis steht ein DZ zur Verfügung, der das SOLL-Modell der klassischen Materialflussoptimierung widerspiegelt.

Im DZ von visTABLE® werden in der Feinplanung alle Restriktionen berücksichtigt. Alle Anschlüsse wie zum Beispiel Strom sind an beiden Plätzen vorhanden. Es werden auch keine gebäude- oder sicherheitstechnischen Verstöße begangen, wodurch die Variante finalisiert werden kann. Nun werden alle Vorkehrungen wie zum Beispiel die Erstellung von den Termin- und Organisationsplänen getroffen, um die Variante zu realisieren und die Maschinen auszutauschen.

In Plant Simulation werden die Lieferpläne so angepasst, dass maximal nur noch alle 8:00 Minuten die Teile in die Fertigung zur Bearbeitung eintreffen.

Das Gesamtergebnis stellt eine optimierte Fertigung dar, in der die Transportaufwände und Durchlaufzeiten für die Herstellung der Produkte reduziert wurden.

## 5 Anwendung/ Validierung

Um den in Kapitel 4 vorgestellten Ablauf der Materialflussoptimierung auf seine Wirksamkeit zu überprüfen, muss dieser validiert werden. Dies lässt sich am besten in der realen Anwendung durchführen. Hierfür wird die Vorgehensweise anhand eines Projekts in der Industrie eingesetzt und auf die Realisierbarkeit bzw. Effektivität überprüft. Als Projekt hierfür dient in diesem Fall eine Werksneuplanung eines Herstellers für Schaltanlagen. Zu beachten ist hierbei, dass nur eine Software innerhalb des Projekts, aufgrund der zu erreichenden Ziele, zum Einsatz kommt und nicht beide Programme genutzt werden.

### 5.1 Ausgangssituation

An ihrem aktuellen Standort fertigt eine Firma ihre Schaltschränke oder routet sie vor dem Versand ins Ausland. Die Flächen für die Produktion, sowie die Lagerung der fertigen Produkte werden dabei immer kleiner und unübersichtlicher. Besonders betroffen aber ist die Lagerung der großen Kupferschienen und der etlichen Kleinteile, welche in den Schaltschränken verbaut werden. Für diese Teile herrscht ein akuter Platzmangel. Durch die sich immer stetig vergrößernden Produktionskapazitäten hat sich die Firma aus diesem Grund entschlossen ihr aktuelles Werk an einem neuen Standort neu auszurichten. Für eine optimale Platzausnutzung und einen bestmöglichen Material- und Informationsfluss möchte das Unternehmen vor Realisierung der neuen Produktionsstätte mit Hilfe eines Digitalen Zwillings die aktuelle Situation in der Produktion digital auf den neuen Standort abbilden und optimieren. Des Weiteren soll der Material- und Informationsfluss im aktuellen Werk analysiert und die Bottlenecks für den neuen Standort vermieden, sowie Transportwege optimiert werden. Als Software soll dafür das Programm visTABLE<sup>®</sup> genutzt werden (Kapitel 2.4.2). Dies soll zum einen für die einfache visuelle Darstellung und zur Analyse von einzelnen zusammenhängenden Prozessschritten genutzt werden. Zum anderen soll mit Hilfe des generierten 3D-Modells eine effiziente Planung der Platzwahl der einzelnen Produktionsbereiche und somit ein optimaler Materialfluss möglich gemacht werden.

Einige der gewünschten Ziele für den neuen Standort wären:

- Hohe Flexibilität, aber dennoch hohe Effizienz
- Möglichkeit für das Be- und Entladen der LKWs möglichst nah zu der mechanischen Fertigung
- Potentieller Schweißplatz im neuen Standort
- Reduzierung von Bottlenecks
- Effiziente Lagerung durch den Einsatz von Kardex

Eine Übersicht der Anforderungen und Wünsche des Kunden ist im Anhang zu finden (Siehe Abbildung 57).

## 5.2 Materialflussanalyse im Ist-Modell

### 5.2.1 Datenakquise

Nach der Definition der gewünschten Ziele und Ursachen für den Einsatz des Digitalen Zwillings muss, wie in der Theorie bereits beschrieben, vor dem Aufbau des IST-Modells eine ausführliche Datenakquise durchgeführt werden.

Zunächst wird für die Erstellung eines Raumbuches und zur genauen Übersicht der Standorte der einzelnen Produktionsbereiche, sowie der Anzahl und Art der einzelnen Maschinen, eine Begehung der Produktionshalle durchgeführt. Während der Besichtigung werden mit Hilfe von Fotos alle Bereiche der Halle und der Geräte für eine Orientierung festgehalten. Zudem werden alle Abschnitte, Wege, Maschinen und weitere relevante Objekte innerhalb der Halle mit einem Laser-Entfernungsmesser vermessen. Nach Erfassung aller, für das Layout relevante, Daten werden diese in einem digitalen Raumbuch zusammengetragen. Innerhalb dieser Aufzeichnungen kann dabei auf die einzelnen Bilder zugegriffen werden.

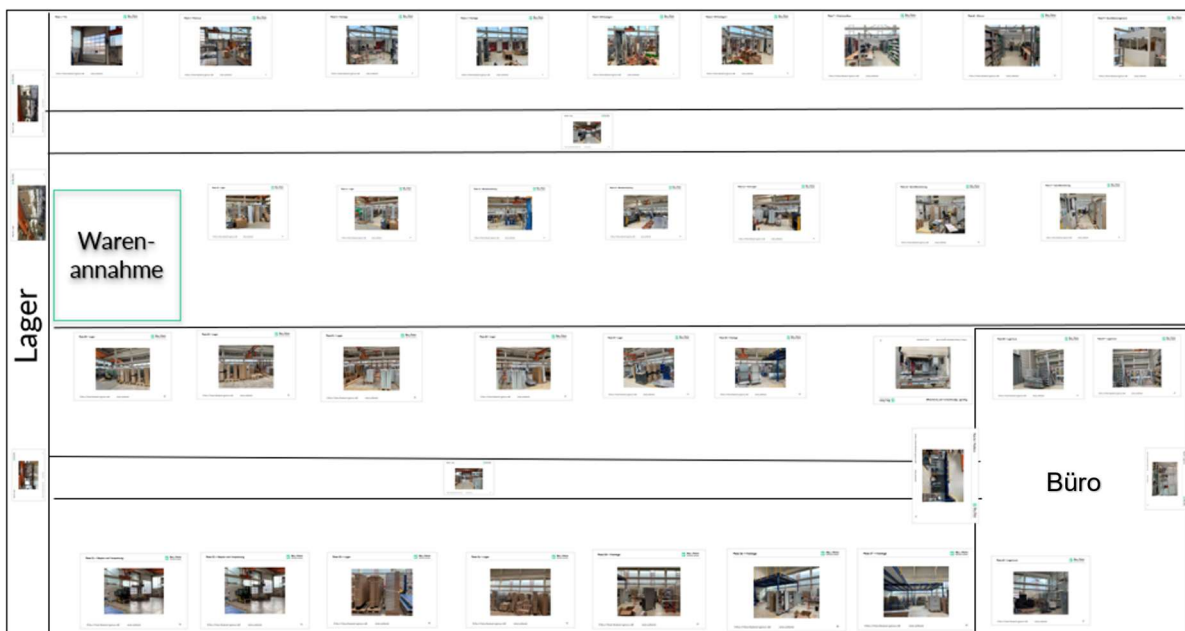


Abbildung 43: Darstellung des Raumbuches mit Power Point

Darüber hinaus werden alle restlichen benötigten Daten durch den Schaltanlagenhersteller bereitgestellt. Diese Informationen müssen, wie bereits erläutert, vor dem Einsatz überprüft werden. Zu den Daten gehören unter anderem:

- Relevante CAD-Daten (Layout und Maschinen mit allen wichtigen Maßangaben)
- Arbeitspläne
- Lagepläne
- Stücklisten
- Stromlaufpläne



### 5.2.2 Aufbau des Ist-Modells

Nach dem Zusammentragen aller relevanten Daten und Fakten für den Digitalen Zwilling und der Materialflussanalyse, kann das IST-Modell des aktuellen Standorts aufgebaut werden. Hierzu wird neben der Standardbibliothek von visTABLE® der CAD-Import im Objektmanager für die Erstellung des Digitalen Zwillings genutzt. Durch Drag & Drop lassen sich alle gewünschten Maschinen und Objekte auf ihren, in der Halle, zugeschriebenen Platz positionieren. Die unterschiedlichen Produktionsbereiche, Lagerplätze, Wege und Büros werden mit verschiedenen Farben eingefärbt, um den Digitalen Zwilling übersichtlich zu gestalten. Stützen und Wände, sowie Tore und Türen werden ebenfalls eingefügt. Die Maße aller in dem Produktionssystem relevanten Objekte werden nach den Ergebnissen aus der Datenakquise auf das Modell angepasst. Als Folge entsteht somit nicht nur ein fertiges detailgetreues 2D-Modell (Abbildung 44) des aktuellen Produktionssystems, sondern auch ein 3D-Modell (Abbildung 45). Zu beachten ist dabei, dass die Platzierung der Objekte so detailliert wie möglich erfolgt, um einen realen Bezug zum physischen Objekt zu haben.

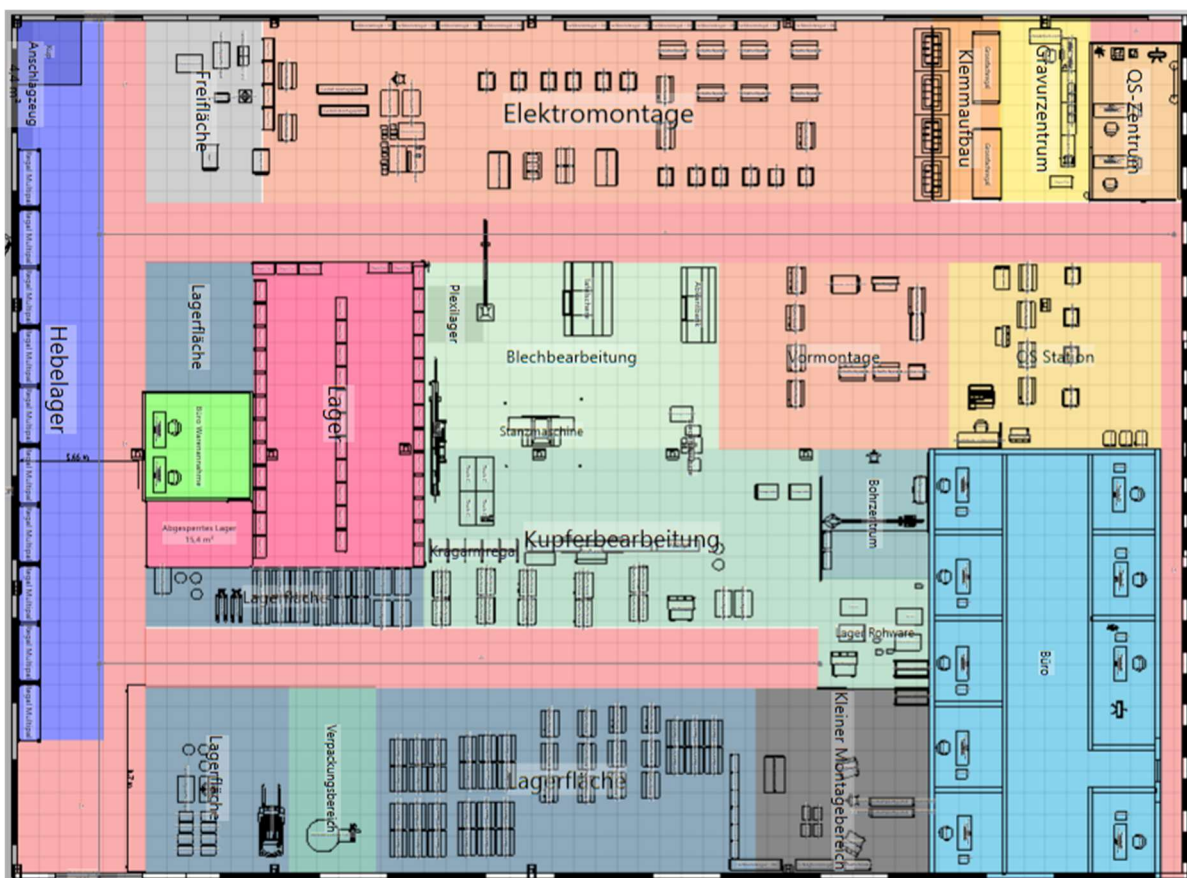


Abbildung 44: 2D IST-Modell des aktuellen Standorts

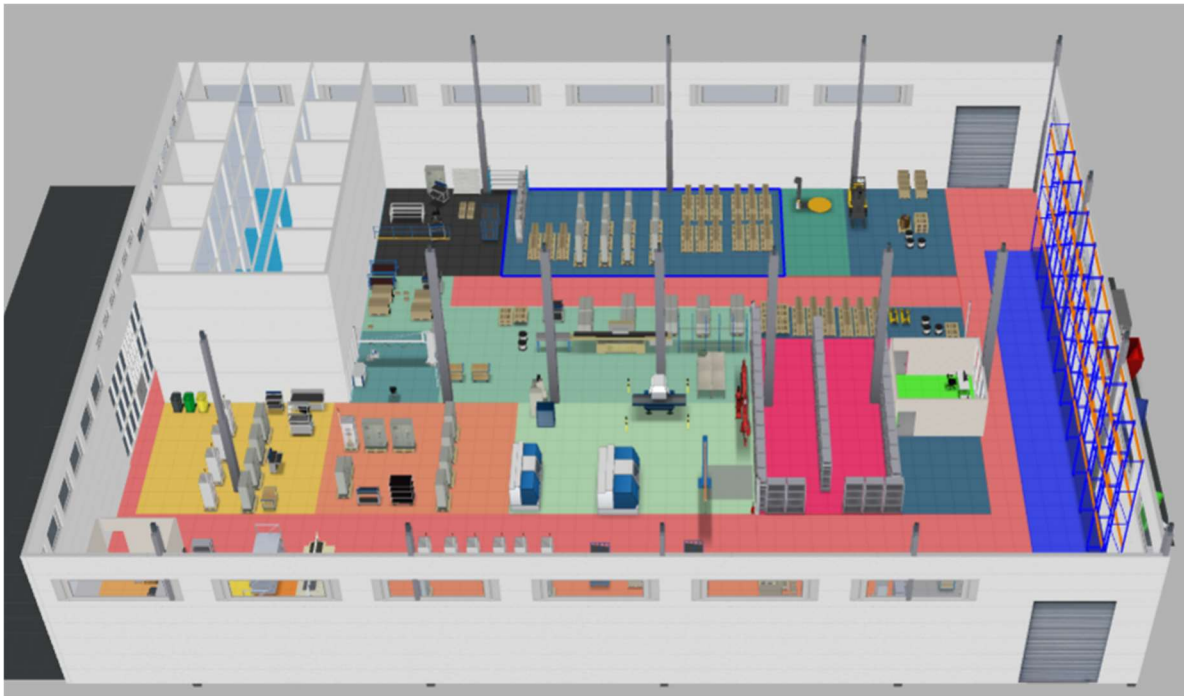


Abbildung 45: 3D IST-Modell des aktuellen Standorts

### 5.2.3 Sankey-Diagramm

Nachdem das IST-Modell des aktuellen Standorts als Digitaler Zwilling fertiggestellt ist, müssen die internen Prozesse innerhalb der Produktion ersichtlich gemacht werden. Dafür bietet visTABLE® die Möglichkeit alle diese miteinander zu verbinden, um so einen Material- und Informationsfluss darstellen zu können. Abbildung 46 zeigt den standardmäßigen innerbetrieblichen Ablauf innerhalb des aktuellen Standorts.

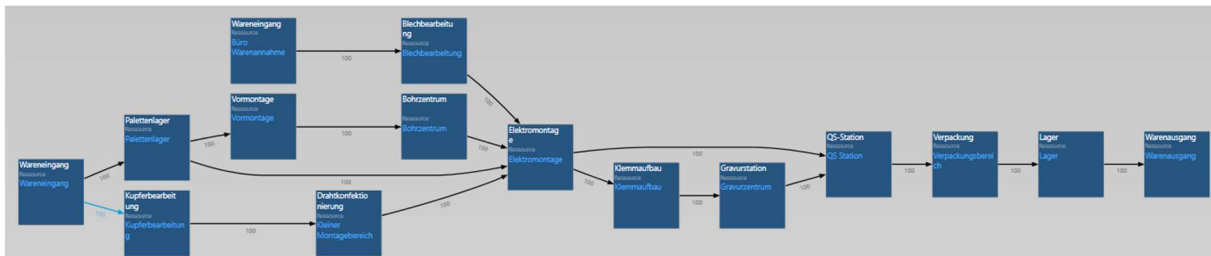


Abbildung 46: Visuelle Darstellung der internen Prozesse

Mit Hilfe dieses Prozesses lässt sich anschließend der Material- und Informationsfluss mittels Sankey-Diagramms im Digitalen Zwilling darstellen. Abbildung 47 zeigt die 2D Ansicht des Digitalen Zwillings unter Einbezug der innerbetrieblichen Prozesse.

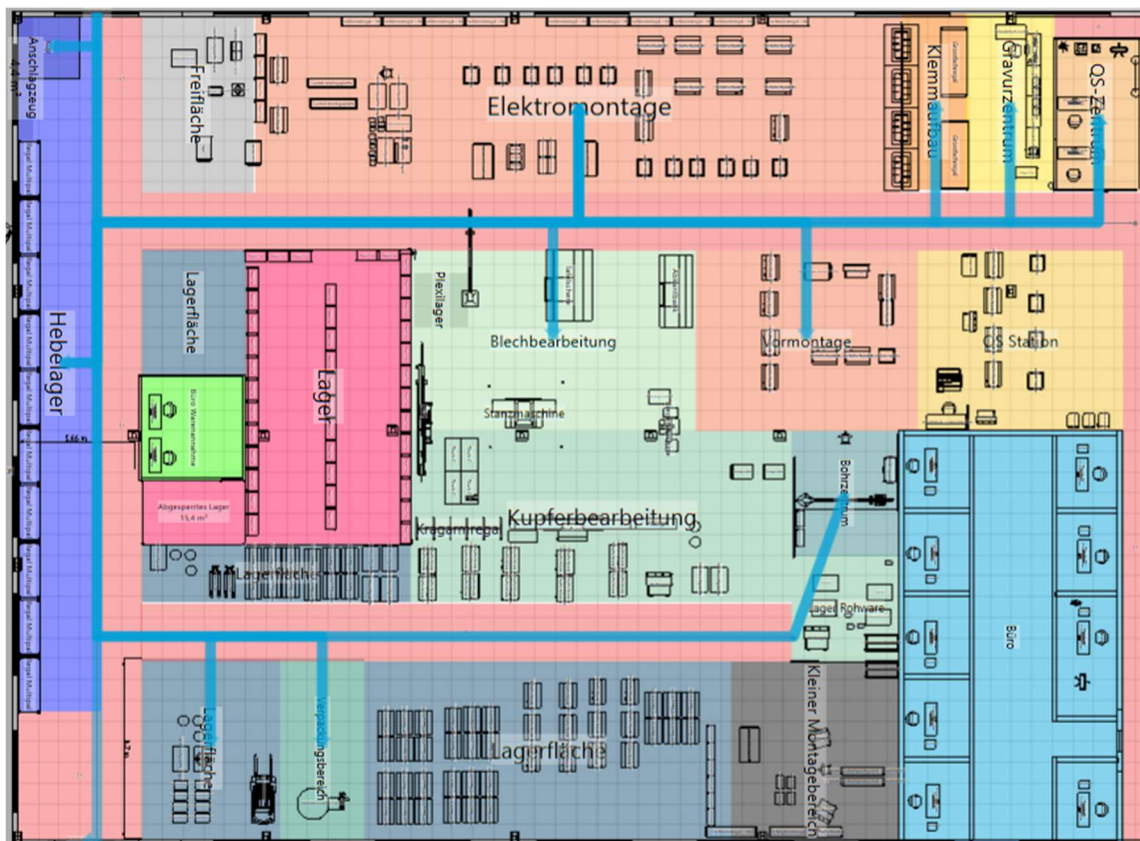


Abbildung 47: Darstellung der Materialflüsse mittels Sankey-Diagramms

#### 5.2.4 Beurteilung & Schwachstellenanalyse

Die erste Beurteilung bezieht sich auf die Lagerung. Es ist zu erkennen, dass diese aktuell ineffizient ist. Viele Kartons und Paletten haben keinen festen Abstellplatz und werden einfach wahllos platziert, bis sie benötigt werden. Außerdem sind die Lagerflächen in der gesamten Halle verteilt. Dies sorgt nicht nur für einen höheren Zeitaufwand, sondern reduziert auch die möglichen Produktionsflächen. Des Weiteren ist die Aufbewahrung der Teile zum Aufbau der Schaltschränke wie z.B. der Klemmen ebenfalls unökonomisch, da diese in einem Fachbodenregallager gelagert werden. Dieses Areal ist umzäunt und darf im Regelfall nur von ausgewähltem Personal wie, z.B. der Kommissionierer, betreten werden, um den Bestand genauestens regulieren zu können. Dennoch erfolgt eine Entnahme durch Mitarbeiter unkontrolliert (fehlende Aufzeichnungen). Das Kragarmregal für die schweren Kupferschienen befindet sich aktuell auch nicht in unmittelbarer Nähe der Be- und Entladungsstation der LKWs. Dies gestaltet den Transport zum Regal aufwändiger, da die Schienen ein hohes Gewicht besitzen. Des Weiteren gibt es keine vorgegebenen Arbeitsplätze an dem die Kommissionierer arbeiten können.

Hieraus resultieren schließlich folgende Verbesserungen, welche umgesetzt werden müssen:

- Umstrukturierung der Lagerflächen
- Fachbodenregallager durch Lagersysteme ersetzen (z.B. Kardex)
- Bereich für Kommissionierer bereitstellen
- Regulierung und Kontrolle der Bestandsentnahme
- Lagerung der Kupferschienen in der Nähe der Be- und Entladungsstation

Als nächstes werden die Transportvorgänge analysiert. Auf Abbildung 47 fällt auf, dass es bei dem Transport des Materials zu unnötigem Zeitaufwand kommen kann. Dies liegt daran, dass offiziell nur drei große Transportwege vorhanden sind und es bei der ausschließlichen Verwendung dieser zu Umwegen kommen kann. Außerdem kann das Bohrzentrum nicht über einen offiziellen Weg erreicht werden. Daraus wird ersichtlich, dass folgendes für den neuen Standort beachtet werden muss:

- Effizientere Anordnung und Platzierung der Produktionsbereiche
- Reduzierung des Transportaufwands
- Mehr offizielle Transportwege einplanen

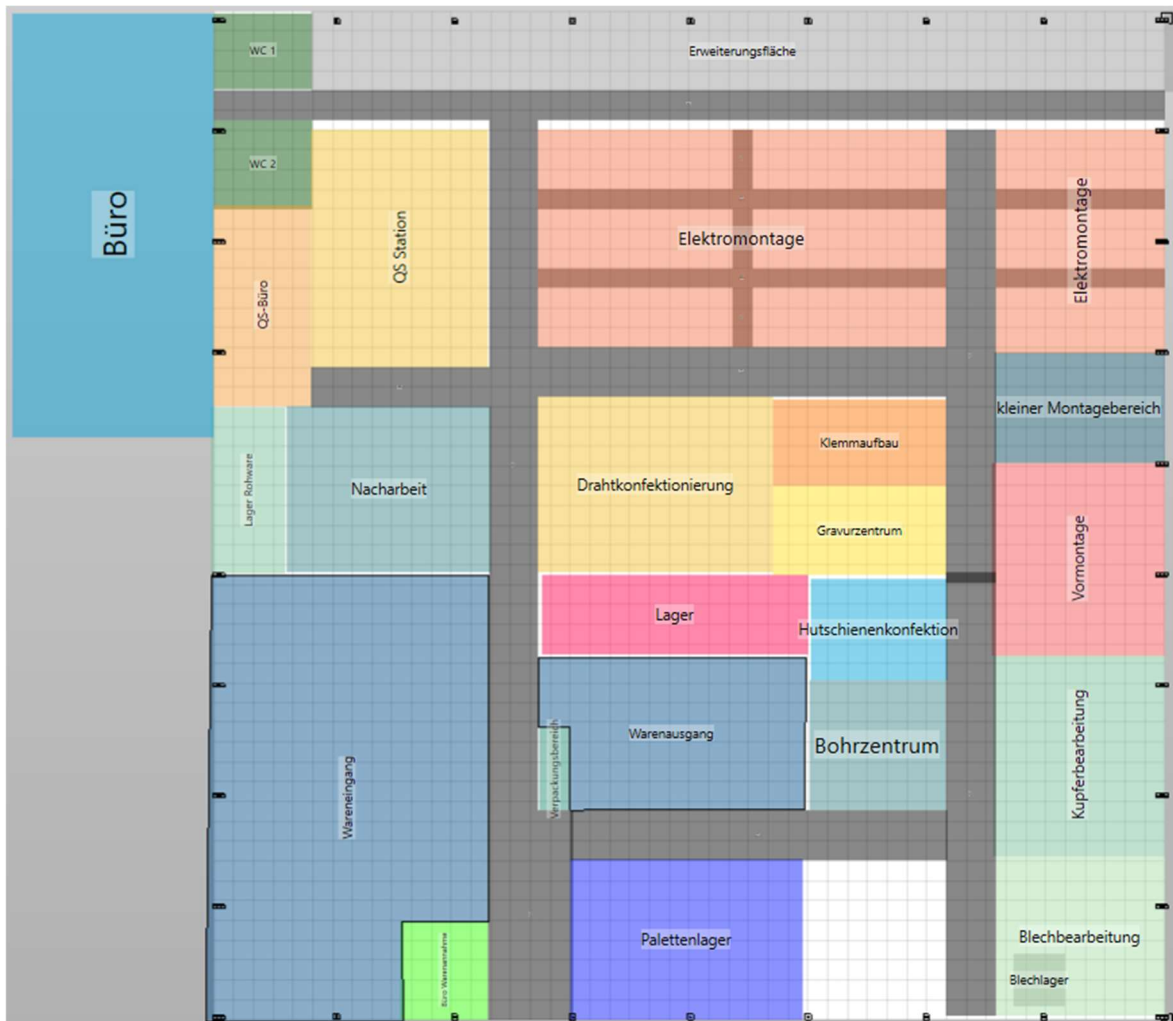
Des Weiteren lässt sich außerdem allgemein erkennen, dass ein genereller Platzmangel herrscht, wodurch es schwer fällt bei Bedarf einzelne Bereiche der Produktion zu erweitern.

### **5.3 Materialflussplanung mit dem Soll-Modell**

Nachdem die aktuelle Produktionshalle digital mit all ihren Prozessen nachgebildet wurde, muss diese auf die zukünftige Stätte übertragen werden. Somit kann anschließend mit dem neuen Standort der Material- und Informationsfluss, sowie die optimale Auslegung der Produktion geplant werden.

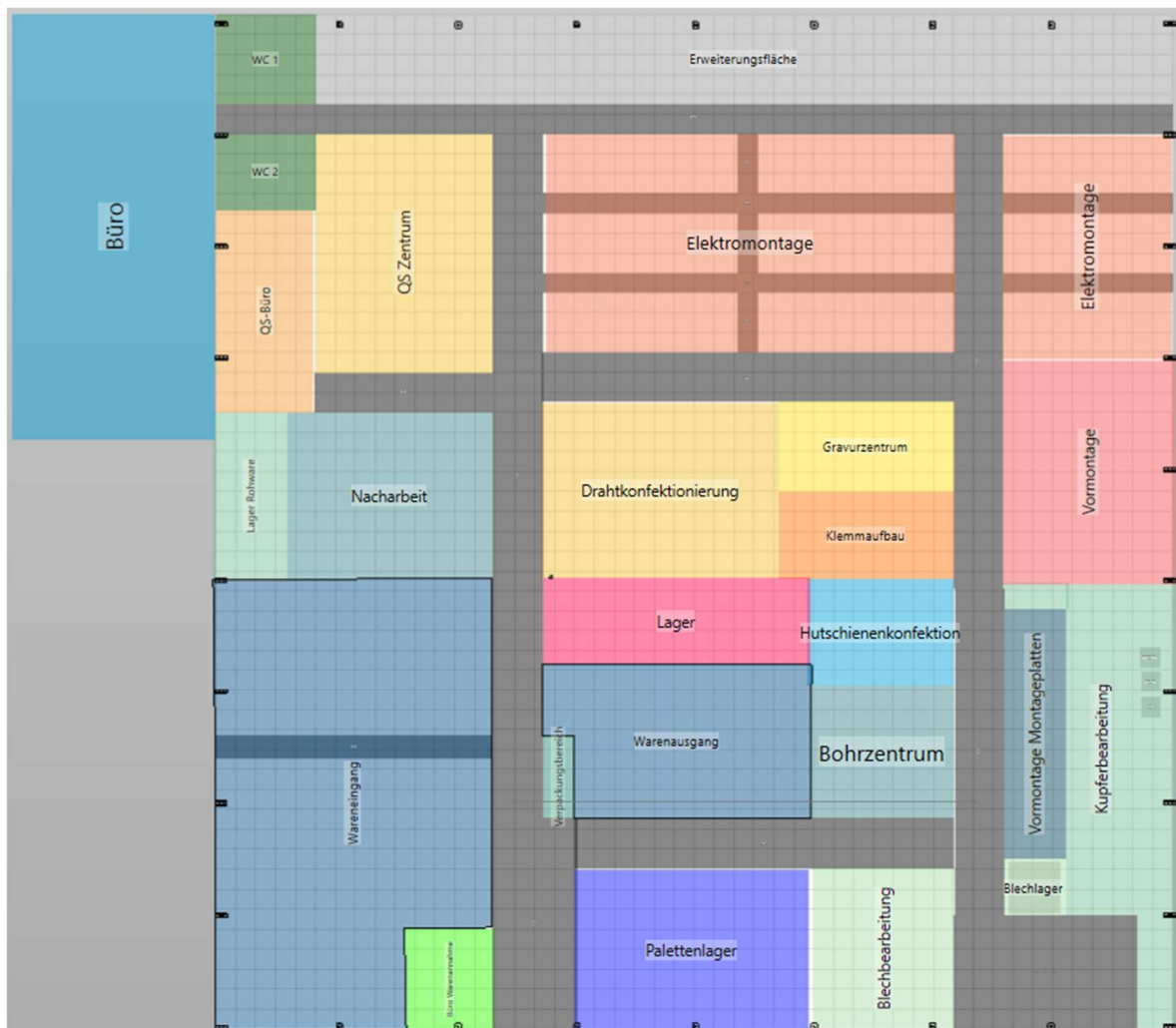
#### **5.3.1 Groblayoutplanung**

Zu beachten ist, dass lediglich die Umplanung auf den neuen Standort und eine Optimierung des Materialflusses im Vordergrund stehen. Aus diesem Grund ist der erste Schritt die Übertragung des aktuellen Produktionssystems auf den zukünftigen Standort. Die einzelnen Flächenbedarfe der Produktionsbereiche richten sich dementsprechend nach den Gegebenheiten im alten Standort. Für die Übertragung werden die visTABLE® Daten aus dem alten Standort exportiert und in das Layout des neuen Digitalen Zwillinges importiert. Anschließend werden unterschiedliche 2D-Blocklayout Konzepte mit den einzelnen Produktions-, Transport- und Lagerungsbereichen angefertigt, welche als Diskussionsgrundlage mit dem Kunden dienen (Abbildung 48). Die Maschinen und Objekte werden dabei zunächst nicht berücksichtigt.



**Abbildung 48: Blocklayout Konzept des neuen Standorts**

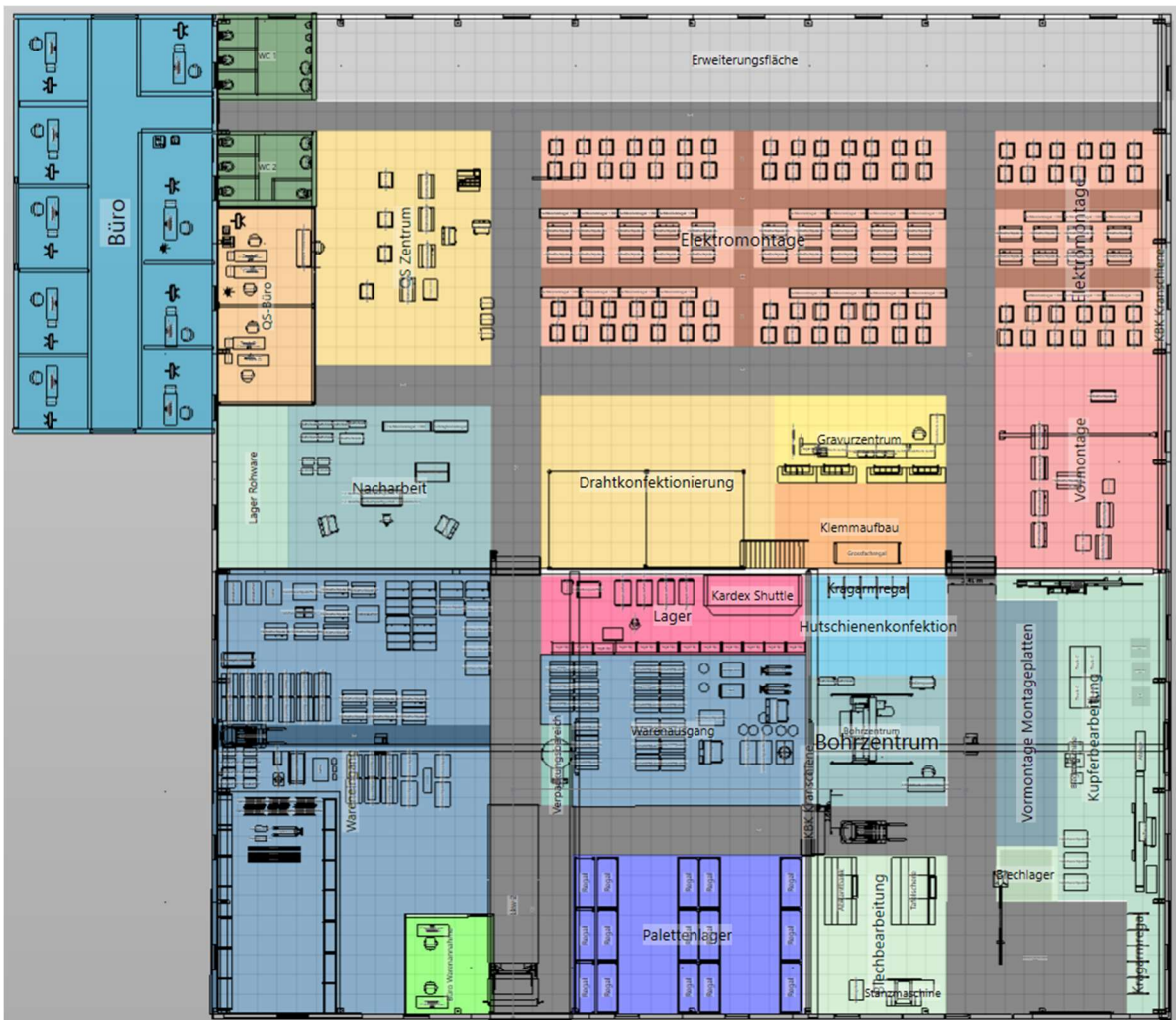
Maßgeblich für den Erfolg der Neuplanung ist die Kommunikation mit dem Kunden. Aus diesem Grund wird mit Hilfe von verschiedenen Konzepten im nächsten Schritt in mehreren Workshops mit diesem versucht die passende Anordnung der einzelnen Produktionsbereiche zu finden. Die Konzepte basieren dabei auf dem DZ von visTABLE® mit unterschiedlichen Anordnungen innerhalb des Blocklayouts. Dementsprechend stehen zunächst die Ziele und Anforderungen des Kunden im Vordergrund. Des Weiteren müssen Anschlüsse für die benötigte Abluft-, Zuluft-, Kühl- und Energieversorgung, sowie für Medien berücksichtigt werden. Beispielsweise benötigt das Gravurzentrum eine Stromversorgung und einen Netzwerkanschluss. Außerdem muss eine Abluftanlage vorhanden sein, um den Abrieb vom Gravurlaser ableiten zu können.



**Abbildung 49: Optimiertes Blocklayout**

Als Ergebnis entsteht ein, nach den im Workshop zusammengetragenen Kundenzielen und Betriebsabläufen ausgerichtetes, optimales Blocklayout. Die Erkenntnisse aus der Schwachstellenanalyse fließen ebenfalls mit ein. In Abbildung 49 kann das daraus resultierende optimierte Blocklayout betrachtet werden. Nun werden die Betriebsmittel mit einbezogen. Hierzu werden diese mit Hilfe der visTABLE<sup>®</sup> Schnittstelle in das Layout importiert und in die einzelnen Produktionsbereiche eingefügt. Die Anordnung der einzelnen Betriebsmittel richtet sich nach den folgenden Kriterien:

- Planungszielen und Anforderungen des Kunden
- Erfahrungen aus der Groblayoutplanung
- Erkenntnissen aus der Schwachstellenanalyse
- Standortabhängigkeiten



**Abbildung 50: Optimiertes Blocklayout mit Einbezug der Betriebsmittel**

Nachdem alle Betriebsmittel und Einrichtungsgegenstände einbezogen wurden, werden anschließend die innerbetrieblichen Prozesse realisiert. Dazu werden erneut mit Hilfe des Modellierungswerkzeugs die Produktionsabläufe in visTABLE® angelegt. Anschließend werden einige Varianten herausgearbeitet und mit dem Kunden nach den Anforderungen analysiert. Als Ergebnis entsteht eine Vorzugsvariante (Abbildung 51), welche in der Feinlayoutplanung für eine Realisierung optimiert werden muss.

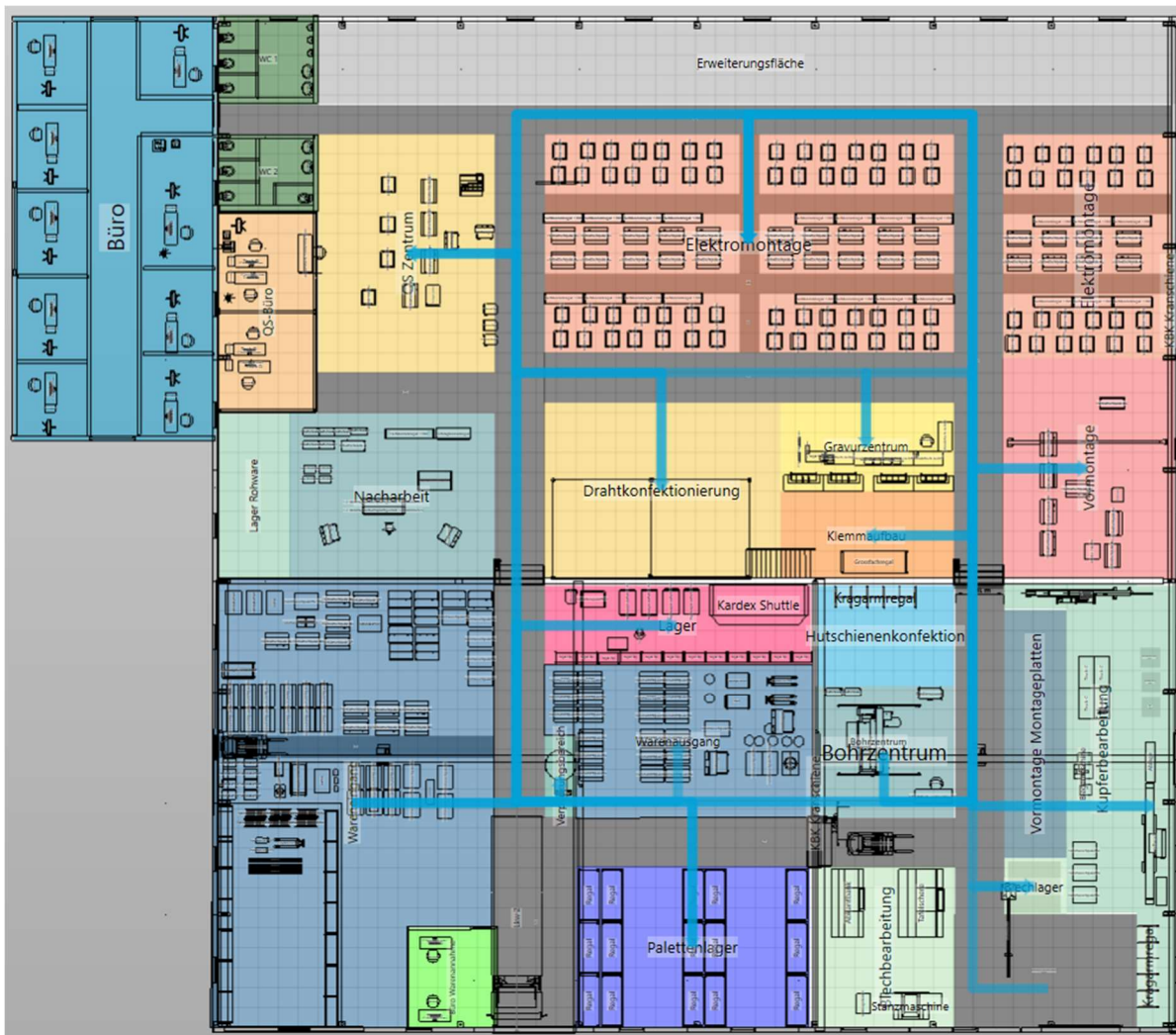
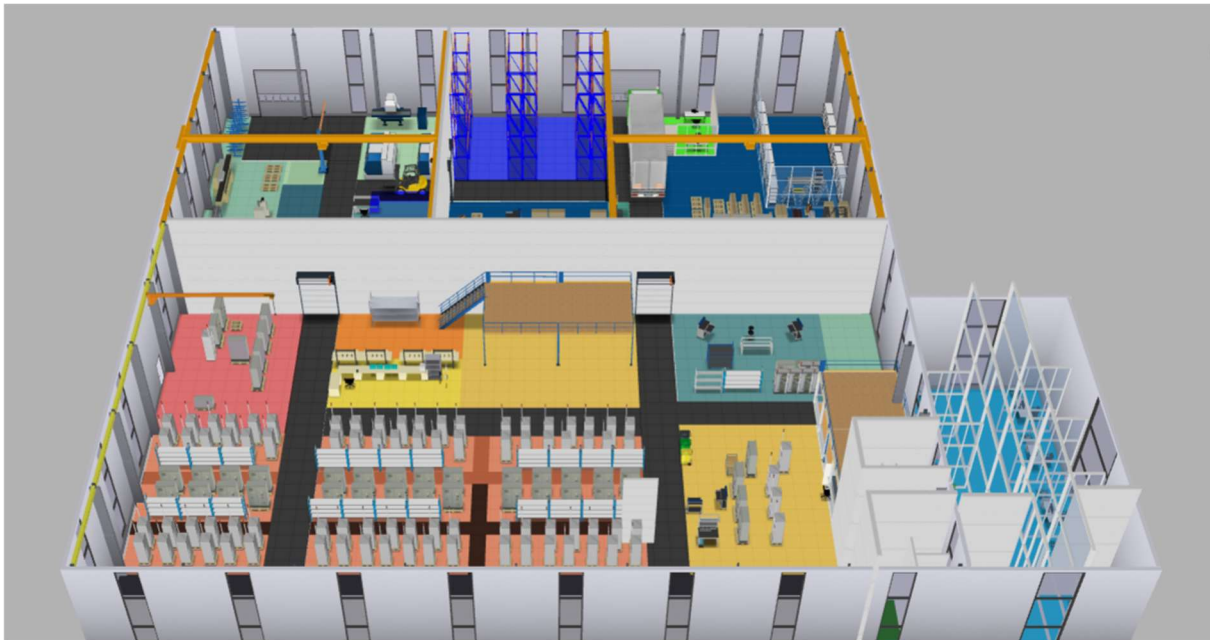


Abbildung 51: Vorzugsvariante mit Einbezug aller Betriebsmittel

### 5.3.2 Feinlayoutplanung

Abschließend erfolgt die Feinlayoutplanung der Vorzugsvariante. Hierbei werden nach Absprache mit dem Architekten und der Finalisierung des Konzepts der neuen Produktionshalle weitere Restriktionen ins Modell mit einbezogen. Gebäudetechnische Änderungen wie Umplatzierungen von Stützen oder Neuplatzierung von Türen und Notausgängen müssen im Modell berücksichtigt werden. Des Weiteren müssen alle sicherheitstechnischen Aspekte und arbeitstechnische Vorschriften ebenfalls mit einbezogen werden. Nach Einbezug aller Restriktionen und der Überprüfung auf die Möglichkeit einer Realisierung steht das finale Konzept. Anschließend können Termin- und Organisationspläne erstellt und ausgearbeitet werden, um das finale Modell in der Realität umzusetzen.





**Abbildung 52: 3D-Modell des optimierten Feinlayouts**

In der 3D-Ansicht kann noch einmal deutlich ersichtlich gemacht werden, wie sich der neue Standort in Bezug auf die Optimierung im Vergleich zur alten Produktionsstätte geändert hat. Bei der Auftragsbearbeitung wurden alle Termine fristgerecht eingehalten und die Kundenwünsche berücksichtigt. Lediglich die Schweißstation wurde nicht mit eingeplant. Die Gründe hierfür sind zum einen Uneinigkeiten bei der Wahl des geeigneten Platzes seitens des Kunden und zum anderen die bis dato niedrige Relevanz dieses Arbeitsplatzes. Doch aufgrund der Erweiterungsfläche besteht prinzipiell die Möglichkeit für eine zusätzliche Schweißstation.

## **6 Erkenntnisse und Schlussfolgerung**

Die Erkenntnisse aus dem Vergleich und aus der Anwendung sowie eine daraus resultierende Schlussfolgerung werden innerhalb dieses Kapitels vorgestellt.

### **6.1 Erkenntnisse aus dem Vergleich**

Bei der Software visTABLE® liegt der Fokus eher darin schnell verstanden und eingesetzt zu werden. Die Einarbeitungszeit ist im Vergleich zu Tecnomatix Plant Simulation deutlich geringer und ermöglicht somit einen raschen Einsatz in der Praxis. Dennoch eignet sich die Software nur für die statischen Materialflusssimulationen oder für die Flächenplanung. Hierfür ermöglicht das Programm eine umfangreiche 3D-Darstellung des DZ und eine sehr genaue Layoutplanung mit Hilfe der Modellbibliothek und den Möglichkeiten an Schnittstellen. Außerdem kann der Transportaufwand effizienter analysiert und detaillierter dargestellt werden. Für Kundenpräsentationen, in denen anhand des DZ die Verbesserungspotentiale visuell aufgezeigt werden sollen, eignet sich der Einsatz von visTABLE® auch eher als mit Plant Simulation. Preislich gehört visTABLE® zu den günstigeren Alternativen, da das Programm, wie bereits erwähnt, darauf ausgelegt ist schnell eingesetzt werden zu können, was den Umfang an Möglichkeiten und Tools eingrenzt.

Tecnomatix Plant Simulation wiederum ermöglicht die Modellierung eines sehr umfangreichen Digitalen Zwillings. Mit Hilfe von SimTalk und den dadurch gegebenen Programmierungsmöglichkeiten kann Plant Simulation in sehr vielen Anwendungsfeldern eingesetzt werden. Des Weiteren ist im Gegensatz

zu visTABLE® eine dynamische Materialflusssimulation möglich, die ein synchrones Mitlaufen des Digitalen Zwillings mit dem physischen Zwilling erlaubt. Außerdem sind die Schnittstellenmöglichkeiten um ein Vielfaches höher als bei Tecnomatix®, wodurch Plant Simulation die Fähigkeit besitzt von anderen Programmen gesteuert bzw. manipuliert zu werden. Zusätzlich dazu ist der Datenaustausch vor und während der Simulation möglich. Dennoch ist der Einarbeitungsaufwand aufgrund des Potentials und der Programmiersprache SimTalk enorm und selbst nach Monaten ist erst ein Grundverständnis vorhanden. Hierbei helfen aber zahlreiche Foren und Bücher dabei die Sprache zu meistern. In Bezug auf die Kosten gehört Tecnomatix Plant Simulation preislich definitiv zu den teureren Softwareprogrammen, was sich aber im großen Umfang der Möglichkeiten widerspiegelt.

Kriterien	Ausprägungen		
Zeitaufwand	hoch	mittel	gering
Benutzerfreundlichkeit	schlecht	mittel	gut
Modellierungs- & Analysewerkzeuge	wenige	mittel	viele
Schnittstellen	wenige	mittel	viele
Kosten	teuer	mittel	günstig
Einsatzgebiet	Statische MFA		Dynamische MFA

- Tecnomatix Plant Simulation  
 — visTABLE®

Abbildung 53: Übersicht über die Möglichkeiten der Softwareprogramme

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass beide Programme unterschiedliche Einsatzschwerpunkte und unterschiedliche Stärken bzw. Möglichkeiten besitzen. Dennoch sind beide Programme für den Einsatz innerhalb der Materialflussoptimierung geeignet, wobei die Auswahl sich nach den zu erreichenden Zielen richten sollte. Die Anschaffungskosten für eine Lizenz sollten vor einer Entscheidung ebenfalls gegenübergestellt werden. Preislich ist visTABLE® dabei trotz unterschiedlicher Pakete und dadurch variierenden Kosten um einiges günstiger, wohingegen der Umfang an Möglichkeiten bei Plant Simulation dafür deutlich höher ist.

## 6.2 Erkenntnisse aus der Anwendung

Innerhalb des Hauptteils wird eine Vorgehensweise vorgestellt, wie der Materialfluss effizient mit Hilfe eines Digitalen Zwillings optimiert werden kann, wobei dieser dabei als neuartiges Tool zur Durchführung dient. Zu beachten ist, dass für das Beispiel zwei Digitale Zwillinge eingesetzt werden, um die Möglichkeiten der vorgestellten Programme gegenüberzustellen und beide auf ihre Eignung zu prüfen. Wie auch bei der klassischen Vorgehensweise wird zunächst der aktuelle Materialfluss analysiert. Dafür werden basierend auf der Ausgangssituation die Ziele und Ergebnisse definiert, die damit erreicht werden sollen. Auf Basis der Ziel- und Ergebnisdefinition sowie der Daten kann der Digitale Zwilling schlussendlich realisiert werden, wobei zusätzlich die in Kapitel 2.3.4 angesprochenen Punkte berücksichtigt werden müssen. Die benötigten Informationen für den Zwilling werden dabei anhand der Datenerhebung zusammengetragen. Die Wahl der Software richtet sich nach dem Anwendungszweck. Dieser muss zuvor berücksichtigt werden, um Zeitverluste und unnötige Kosten zu vermeiden. Mit dem Digitalen Zwillings kann anschließend eine Simulation durchgeführt und die Daten können effizient, mit Hilfe der vorhandenen Tools, ausgewertet werden. Des Weiteren können die Daten visuell direkt im Digitalen Zwilling dargestellt werden. Die anschließende Schwachstellenanalyse kann ebenfalls

nutzbringend durchgeführt werden, da die Daten sehr genau und visuell detailliert dargestellt werden. Das ermöglicht ein schnelleres Aufzeigen von Schwachstellen bzw. Bottlenecks. Der fertige Digitale Zwilling stellt dabei direkt das IST-Modell dar, anhand dessen die Optimierung des Materialflusses durchgeführt werden kann. Die nachfolgende Abbildung zeigt zusammenfassend einige Vorteile, die sich aus der Nutzung des Digitalen Zwillings ergeben.

<b>Geringerer</b> Zeitaufwand bei der Auswertung von Daten	
<b>Höhere</b> Effizienz bei der Beurteilung & Schwachstellenanalyse	
<b>Genauere</b> Darstellung der Daten	
<b>Höhere</b> Datenkonsistenz & -qualität	

**Abbildung 54: Vorteile des DZ beim Einsatz in einer Materialflussanalyse**

Für die anschließende Optimierung bzw. Planung können die benötigten Informationen, welche sich durch die Schwachstellenanalyse ergeben haben, effizient im DZ berücksichtigt werden. Die Anpassung von Parametern oder Einstellungen kann direkt erfolgen. Bei der Grobplanung können mit Hilfe des Digitalen Zwillings und einer erneuten Simulation zeitsparend diverse Konzepte erstellt und ein Ideal-konzept ausgewählt werden, welches den optimierten Materialfluss sowie die Kundenwünsche darstellt. Mögliche kurzfristige Änderungen können ebenfalls sofort berücksichtigt werden. Dies ist für die Feinplanung auch von Vorteil, da in diesem Schritt alle Restriktionen zusätzlich eingebunden werden müssen, wodurch sich weitere Veränderungen ergeben können. Als Ergebnis stellt der Digitale Zwilling dann das optimierte SOLL-Modell dar, welches die Ziele, die gewünschten Änderungen und einen optimierten Materialfluss enthält, der vom Unternehmen realisiert werden kann. Abbildung 55 zeigt die Vorteile für die Verwendung eines Digitalen Zwillings in der Materialflussoptimierung auf.

<b>Höhere</b> Effizienz bei der Berücksichtigung von Änderungen	
<b>Genauere</b> Qualitative Darstellung des SOLL-Modells	
<b>Weniger</b> Zeitaufwand bei der Erstellung von diversen Konzepten	

**Abbildung 55: Vorteile des DZ bei dem Einsatz in der Materialflussoptimierung/-planung**

Bei dem Einsatz der Vorgehensweise in einem realen Industrieprojekt wurden folgende Vorteile ersichtlich:

- Effiziente Darstellung des IST-Modells des aktuellen Standorts des Schaltanlagenherstellers mit Hilfe des Digitalen Zwillings
- Effektive Analyse der Schwachstellen und Darstellung der Optimierungspotentiale für den neuen Standort
- Schnelle Übertragung der Produktionsbereiche in das neue Layout

- Sofortige Umsetzung von Änderungen möglich
- Detaillierte Darstellung des SOLL-Modells für eine Präsentation beim Kunden
- Fehlerfreie Optimierung des Materialflusses anhand der internen Prozesse

### 6.3 Schlusswort

Der Einsatz eines Digitalen Zwillings für die Materialflussoptimierung ist eine effiziente und effektive Methode und kann dem Unternehmen nicht nur Zeit- und Kosteneinsparungen bringen, sondern unterstützt auch gleichzeitig den Schritt in Richtung Industrie 4.0. Der Vergleich mit der klassischen Materialflussoptimierung zeigt, dass einige Methoden wie zum Beispiel die Berechnung von Materialflussmatrizen mit Hilfe von Excel nicht mehr zeitgemäß sind und dass ein Wandel in Richtung Digitalisierung und Automatisierung durchgeführt werden muss. Das vorgestellte Vorgehensmodell soll dabei als Hilfestellung für die Umsetzung dienen und dem Unternehmen so Zeiteinsparungen ermöglichen und eine effektive Lösung liefern. Dennoch ist bei dem Einsatz eines Digitalen Zwillings weiterhin Vorsicht geboten, da dieses Gebiet immer noch sehr unerforscht ist und auf vieles geachtet werden muss. Außerdem zeigt die Erfahrung, dass bei der Verwendung eines DZ das Softwareprogramm vorher sorgfältig ausgewählt werden muss und auch Alternativen in Betracht gezogen werden sollen. Dies wird in diesem Arbeitsbericht aber nicht betrachtet, da dieser sich auf die eigentliche Vorgehensweise fokussiert und beispielhaft die Anwendung anhand von zwei, in der Industrie bereits bekannten, Programmen aufzeigt. Des Weiteren sollte bei dem Einsatz eines Digitalen Zwillings ein Spezialist für das jeweilige Programm zu Rate gezogen werden, da die Realisierung oft zeitlich unterschätzt wird und der Aufwand vorher nicht genau messbar ist. Dadurch können Meilensteine nicht fristgerecht erreicht werden, da das Wissen über das jeweilige Programm zu gering ist.

Die Verwendung der beiden Softwareprogramme innerhalb der Vorgehensweise zeigt, dass eine Kombination von zwei Digitalen Zwillingen aktuell noch nicht realisierbar ist, da jeder ein Unikat darstellt. Als zukünftiges Ideal ist ein Metazwilling das Ziel, bei dem die Daten von einem Programm in das andere ohne Verluste übernommen werden können. Ein Beispiel wäre hierfür der Import des Digitalen Zwillings von Plant Simulation in visTABLE®, bei dem alle Informationen und Auswertungen mit enthalten sind und somit künftig nicht zwei benötigt werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt dazu zusammenfassend die aktuelle Situation bei der Kombination von Digitalen Zwillingen und das zukünftige Ideal.

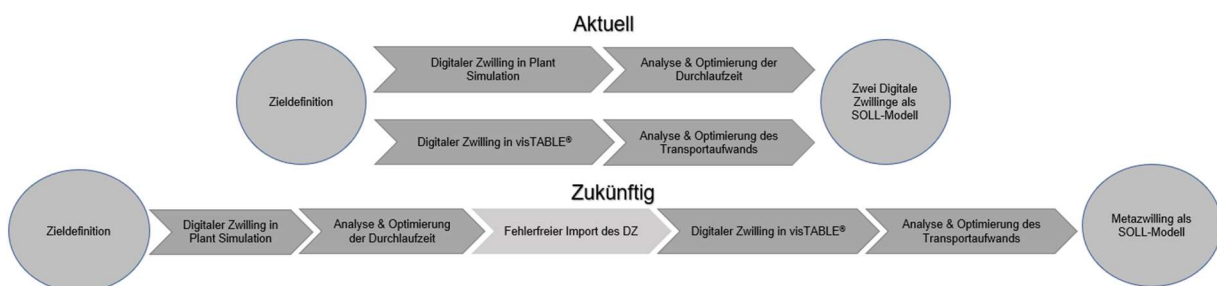


Abbildung 56: Ausblick auf die Kombination von Digitalen Zwillingen

## I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Datenfluss im Digitalen Modell (Kritzinger et al. 2018) .....	- 3 -
Abbildung 2: Datenfluss im Digitalen Zwilling (Kritzinger et al. 2018) .....	- 3 -
Abbildung 3: Datenfluss im digitalen Schatten (Kritzinger et al. 2018) .....	- 4 -
Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Digitalem Modell, Digitalem Zwilling, Digitalem Schatten und Digitalem Thread in Bezug auf den Produktlebenszyklus (Dornig 2020) .....	- 4 -
Abbildung 5: Vorgehensweise einer Materialflussanalyse (Martin 2016, S.31-41) .....	- 6 -
Abbildung 6: Möglichkeiten einer Datenerhebung (Arnold und Furmans 2019, S.253).....	- 7 -
Abbildung 7: Sankey-Diagramm mit Transportnetzauslastung (Riegel 2022).....	- 9 -
Abbildung 8: Datenbankmodell (ingenieur.de 2020).....	- 10 -
Abbildung 9: Materialflusssymbole.....	- 10 -
Abbildung 10: Informationsflusssymbole.....	- 10 -
Abbildung 11: Beispiel für die Darstellung einer Wertstromanalyse.....	- 11 -
Abbildung 12: Beispiel für eine Nutzwertanalyse (Wagner 2018) .....	- 15 -
Abbildung 13: Component Twin (IBM 2022).....	- 18 -
Abbildung 14: Asset Twin (IBM 2022) .....	- 18 -
Abbildung 15: System Twin .....	- 18 -
Abbildung 16: Process Twin .....	- 19 -
Abbildung 17: Entstehung eines Digitalen Zwillings (ingenieur.de 2020).....	- 21 -
Abbildung 18: Vorgehensweise zur Erstellung eines Digitalen Zwillings (ingenieur.de 2020).....	- 22 -
Abbildung 19: Übersicht Tecnomatix Plant Simulation.....	- 24 -
Abbildung 20: Reduzierung des Transportaufwands via visTABLE® (visTABLE® Software 2022) .....	- 25 -
Abbildung 21: 3D-Visualisierung des Layouts mittels visTABLE® .....	- 26 -
Abbildung 22: Übersicht der Vergleichskriterien .....	- 27 -
Abbildung 23: Hilfe zum Erlernen der Grundlagen von visTABLE® (visTABLE® Software 2022).....	- 27 -
Abbildung 24: Help-Verzeichnis von Tecnomatix Plant Simulation .....	- 28 -
Abbildung 25: Programmfenster von visTABLE® .....	- 29 -
Abbildung 26: Programmfenster von Plant Simulation.....	- 29 -
Abbildung 27: Beispiel für eine Transportnetzbelastung in visTABLE® (Softguide 2022) .....	- 30 -
Abbildung 28: Toolbox-Plant Simulation.....	- 30 -
Abbildung 29: Beispiel für den Excel-Export der Warenströme.....	- 31 -
Abbildung 30: Schnittstellen Tecnomatix Plant Simulation (Plant Simulation 2022) .....	- 31 -
Abbildung 31: Vorgehensweise der Materialflussanalyse und Verwendung des DZ als Tool.....	- 33 -
Abbildung 32: Beispiel für das Ergebnis einer Primärdatenerhebung der Transportzeiten .....	- 33 -
Abbildung 33: Planungsansicht des Digitalen Zwillings für das Beispiel .....	- 34 -
Abbildung 34: 3D-Ansicht des Digitalen Zwillings für das Beispiel.....	- 34 -
Abbildung 35: Histogramm zur Darstellung der Durchlaufzeiten .....	- 35 -
Abbildung 36: Datenauswertung mittels Logistikbewertung.....	- 36 -
Abbildung 37: Sankey-Diagramm von Produkt A mit Tecnomatix Plant Simulation.....	- 36 -
Abbildung 38: Sankey-Diagramm aller Produkte mit visTABLE® .....	- 36 -
Abbildung 39: Visualisierung der Vorgehensweise zur Materialflussoptimierung/-planung .....	- 37 -
Abbildung 40: Ergebnis der Grobplanung mit visTABLE® .....	- 38 -
Abbildung 41: Experiment zur Reduzierung der Durchlaufzeit.....	- 39 -
Abbildung 42: Eingrenzung der Quellenzeit.....	- 39 -

Abbildung 43: Darstellung des Raumbuches mit Power Point.....	- 41 -
Abbildung 44: 2D IST-Modell des aktuellen Standorts.....	- 42 -
Abbildung 45: 3D IST-Modell des aktuellen Standorts.....	- 43 -
Abbildung 46: Visuelle Darstellung der internen Prozesse .....	- 43 -
Abbildung 47: Darstellung der Materialflüsse mittels Sankey-Diagramms.....	- 44 -
Abbildung 48: Blocklayout Konzept des neuen Standorts .....	- 46 -
Abbildung 49: Optimierte Blocklayout .....	- 47 -
Abbildung 50: Optimierte Blocklayout mit Einbezug der Betriebsmittel .....	- 48 -
Abbildung 51: Vorzugsvariante mit Einbezug aller Betriebsmittel .....	- 49 -
Abbildung 52: 3D-Modell des optimierten Feinlayouts .....	- 50 -
Abbildung 53: Übersicht über die Möglichkeiten der Softwareprogramme.....	- 51 -
Abbildung 54: Vorteile des DZ beim Einsatz in einer Materialflussanalyse .....	- 52 -
Abbildung 55: Vorteile des DZ bei dem Einsatz in der Materialflussoptimierung/-planung .....	- 52 -
Abbildung 56: Ausblick auf die Kombination von Digitalen Zwillingen .....	- 53 -
Abbildung 57: Projektzielplan .....	IX

## II. Literaturverzeichnis

### a. Schriftliche Quellen

- Arnold, Dieter/Furmans, Kai (2019). Materialfluss in Logistiksystemen. 7. Aufl. Berlin, Germany, Springer Vieweg.
- Bangsow, Steffen (2010) Manufacturing Simulation with Plant Simulation and SimTalk. Usage and Programming with Examples and Solutions. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- Daude, Daniel (2019). Konzept zur Erstellung eines Digitalen Zwillings einer LEGO®-Lernfabrik auf Basis eines ereignisdiskreten Simulationsmodells in Tecnomatix Plant Simulation. Bachelorarbeit. Kassel, Universität Kassel.
- Eigner, Martin (2020). Digitaler Zwilling. Stand der Technik. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115 (s1), 3-6.
- Grieves, Michael/Vickers, John (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Franz-Josef Kahlen/Shannon Flumerfelt/Anabela Alves (Hg.). Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham, Springer International Publishing, 85–113.
- Grieves, Michael (2002). Product Lifecycle Management. University of Michigan.
- Kritzinger, Werner/Karner, Matthias/Traar, Georg/Henjes, Jan/Sihn, Wilfried (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine 51 (11), 1016–1022.
- Martin, Heinrich (2016). Transport- und Lagerlogistik. Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Wagner, Ulrich (2018). Konstruktion/CAD-Grundlagen 2. Vorlesung. München, Hochschule für angewandte Wissenschaften München.
- VDI-Richtlinie 2689 (2019). Leitfaden für Materialflussuntersuchungen.
- VDI-Richtlinie 3633 (2018). Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen.
- Winkler, Sven/Schumann, Marco/Apitzsch, René/Klimant, Franziska/Klimant, Philipp (2020). Der Digitale Zwilling – Probleme und Lösungsansätze. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115 (s1), 121–124.

### b. Online Quellen

- DiConneX (Hrsg.) (2019). Digitaler Zwilling – Was ist das und warum es für Ihr Unternehmen wichtig ist. Online verfügbar unter <https://diconnex.com/blog/2019/04/26/digitaler-zwilling-was-ist-das-und-warum-es-fuer-ihre-unternehmen-wichtig-ist/#:~:text=Der%20digitale%20Zwilling%20bietet%20eine,verschiedene%20Bereiche%20von%20Unternehmen%20erm%C3%B6glicht>. (abgerufen am 14.03.2022).
- Dornig, Pauline (2020). Mit dem Digitalen Zwilling zum datengetriebenen Betrieb - Onlineportal von IT-Management. IT-Verlag für Informationstechnik GmbH vom 07.07.2020. Online verfügbar unter <https://www.it-daily.net/it-management/industrie-rpa/mit-dem-digitalen-zwilling-zum-datengetriebenen-betrieb> (abgerufen am 09.08.2022).
- elunic - professional services for the connected industry (2022). Digitaler Schatten - elunic - professional services for the connected industry. Online verfügbar unter <https://www.elunic.com/de/digitaler-schatten/> (abgerufen am 20.06.2022).

- Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB (2022). Digitaler Zwilling – das Schlüsselkonzept für Industrie 4.0 - Fraunhofer IOSB. Online verfügbar unter <https://www.iosb.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/automatisierung-digitalisierung/anwendungsfelder/digitaler-zwilling.html> (abgerufen am 14.06.2022).
- IBM (2022). Was ist ein digitaler Zwilling?. Online verfügbar unter <https://www.ibm.com/de-de/topics/what-is-a-digital-twin> (abgerufen am 02.05.2022).
- ingenieur.de (2020). Produktionsplanung mit dem digitalen Zwilling. Online verfügbar unter <https://www.ingenieur.de/fachmedien/wt-werkstattstechnik/bmbf-produktionsforschung-wt-werkstattstechnik/produktionsplanung-mit-dem-digitalen-zwilling/> (abgerufen am 19.04.2022).
- IPH (2022). Fabriklayout erstellen: Schritt für Schritt erklärt. Online verfügbar unter <https://www.iph-hannover.de/de/information/fabrikplanung/layoutplanung/> (abgerufen am 11.07.2022).
- MES GmbH (2022). Materialflussplanung Materialflussoptimierung Produktivität. Online verfügbar unter <https://www.m-e-s.de/industriemontagen/materialflussplanung/> (abgerufen am 03.05.2022).
- Olding, Mark (2020). Was ist der Unterschied zwischen einer Simulation und einem digitalen Zwilling? Online verfügbar unter <https://www.exorint.com/de/blog/was-ist-der-unterschied-zwischen-einer-simulation-und-einem-digitalen-zwilling> (abgerufen am 20.04.2022).
- Plank, Thomas (2019). Digital Twins: The 4 types & the characteristics | Tributech. Online verfügbar unter <https://tributech.io/blog/the-4-types-of-digital-twins> (abgerufen am 14.06.2022).
- Plant Simulation (2022). Produktüberblick Plant Simulation. Online verfügbar unter <https://plant-simulation.de/produktueberblick/> (abgerufen am 13.07.2022).
- proLogistik (2022). Informationsfluss in der Logistik. Online verfügbar unter <https://www.prologistik.com/logistik-lexikon/informationsfluss/> (abgerufen am 22.08.2022).
- REFA.de (2022). Materialfluss. Online verfügbar unter <https://refa.de/service/refa-lexikon/materialfluss> (abgerufen am 25.05.2022).
- REFA Consulting (2022). System Definition. Online verfügbar unter <https://refa-consulting.de/refa-lexikon/s/system> (abgerufen am 11.05.2022).
- Riegel, Jörg (2022). Sankey Diagramm – Vorteile für die Layoutplanung. plavis GmbH vom 05.09.2022. Online verfügbar unter <https://www.vistable.com/de/blog/sankey-diagramm-vorteile-fur-die-layoutplanung/> (abgerufen am 19.07.2022).
- Siemens (2022). SimTalk Reference. Online verfügbar unter [https://docs.plm.automation.siemens.com/content/plant\\_sim\\_help/15/plant\\_sim\\_all\\_in\\_one\\_html/en\\_US/tecnomatix\\_plant\\_simulation\\_help/simtalk\\_reference/simtalk\\_reference\\_1/simtalk\\_reference.html](https://docs.plm.automation.siemens.com/content/plant_sim_help/15/plant_sim_all_in_one_html/en_US/tecnomatix_plant_simulation_help/simtalk_reference/simtalk_reference_1/simtalk_reference.html) (abgerufen am 24.05.2022).
- Softguide (Hrsg.) (2022). Software: visTABLE®. Fabrikplanung mit intuitiver Bedienbarkeit und methodischer Unterstützung. Online verfügbar unter <https://www.softguide.de/programm/vistable-touch-fabrikplanungssoftware> (abgerufen am 24.05.2022).
- visTABLE® Software (2022). Software | visTABLE®. Online verfügbar unter <https://www.vistable.com/de/software/> (abgerufen am 24.05.2022).
- Weber, Thomas (2022). Nutzwertanalyse zur Auswahl von Planungssoftware 28.03.2022. Online verfügbar unter <https://www.vistable.com/de/blog/nutzwertanalyse-zur-auswahl-von-planungssoftware/> (abgerufen am 26.09.2022).



### III. Anhang

Projektzielplan			
Zielart	Kundenziele	Frist	
Projektziel (Output):	Neuplanung einer Produktionshalle für einen neuen Standort	01.07.2022	
Teilziele:	1. Aufbau eines Digitalen Zwillings des aktuellen Standorts zur Analyse des Materialflusses	01.04.2022	
	2. Übertragung der Daten des Digitalen Zwillings auf den neuen Standort	01.04.2022	
	3. Groblayoutplanung zur finalen Festlegung der Architektur durch den Architekten	01.05.2022	
	4. Feinlayoutplanung	01.07.2022	
Wünsche & Restriktionen	Planung eines effizienten Kommissionierbereichs: 1. Einplanung von 10-15 Kommissionierwägen 2. Platzierung des Kommissionierbereichs nahe der Lager 3. Einsatz eines Kadex zur effizienteren Lagerung der Kleinteile 4. Einplanung eines Kommissioniertisches		
	Optimierung der Transportwege: 1. Mechanische Fertigung nahe der Warenannahme 2. Lagerung der Kupferschienen nahe der Warenannahme 3. Transportwege zu jedem Produktionsbereich ermöglichen		
	Optimierung der mechanischen Fertigung: 1. Sonderschränke für die Kupfermaschine einplanen 2. Säge nahe des Kragarmregals platzieren 3. Für den Lärmschutz alle mechanischen Bereiche gesammelt planen		
	Effiziente Planung der Bekranung: 1. Wareneingang/Warenausgang jeweils ein Kran (min. 3,2 Tonnen) 2. Ein Kran in der mechanischen Fertigung (min. 3,2 Tonnen) 3. Berücksichtigung von 2-3 weiteren Kränen als Ausleger (2 Tonnen)		
	Sonstige Ziele: 1. Einplanung einer zusätzlichen Schweißstation 2. Zentrale Platzierung des Gravurzentrums 3. Berücksichtigung 1-2 Laufkatzen im Wareneingang/-ausgang		
	Nicht-Ziel	Planung der Gebäudearchitektur des neuen Standortes	
	Projektnutzen Outcome:	Nach einem optimierten Materialfluss ausgerichteter neuer Standort für die Produktionshalle	

Abbildung 57: Projektzielplan