

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19666 N

Thema

Entwicklung einer Methode zur quantitativen, mehrdimensionalen Fabriklayoutplanung mittels mathematischer Modellierung von fabrikplanungsrelevanten Eigenschaften

Berichtszeitraum

01.09.2017 - 29.02.2020

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik e.V. - BVL

Forschungseinrichtung(en)

Institut für Integriert Produktion Hannover gGmbH

Hannover, 15.06.2020

Ort, Datum

Aurich, Paul



Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Inhalt

Thema.....	1
Berichtszeitraum.....	1
Forschungsvereinigung.....	1
Forschungseinrichtung(en)	1
1. Zusammenfassung	3
2. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	4
3. Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse	5
4. Erzielte Ergebnisse	7
4.1 Analyse der Anforderungen an eine automatisierte Fabriklayoutplanungsmethode	8
4.2 Analyse der Berechnungsvorschriften aus dem Forschungsprojekt „QuaMFaB“ und Entwicklung der Zielstellung.....	9
4.3 Konzeption und Formulierung eines mathematischen Optimierungsmodells.....	11
4.4 Entwicklung des heuristischen Lösungsverfahrens	17
4.5 Entwicklung des vorwettbewerblichen Softwaredemonstrators	24
4.6 Validierung der Methode	26
4.7 Ergebnisdokumentation und Veröffentlichung	28
5. Verwendung der Zuwendung.....	28
6. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	28
7. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen	29
8. Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen.....	29
9. Einschätzung der Realisierbarkeit der geplanten Maßnahmen	32
10. Durchführende Forschungsstelle	32
11. Förderhinweis	33
12. Anhang	34
Anhang 1: Anpassung von Bewertungsvorschriften	34
Anhang 2: Default-Werte für Steuerparameter	43
13. Literaturverzeichnis	44

1. Zusammenfassung

Die Verkürzung von Produktlebenszyklen zwingt Unternehmen immer häufiger zur Anpassung ihrer Produktionsprozesse und gleichzeitig zur Einbindung innovativer Fertigungsverfahren und Technologien. Dies führt nahezu branchenunabhängig zu einer höheren Anzahl von Fabrikplanungsprojekten mit dem Charakter einer Fabrikreorganisation (vgl. [Sch14]). Nach einer Umfrage von KÖBLER UND PLEULER gaben 54,17 % der befragten KMU an, Fabrikplanungsprojekte unterjährig durchzuführen [Köb11]. Gleichzeitig hat die Anordnung von Fabrikobjekten einen signifikanten Einfluss auf die Produktionsprozesse sowie Durchlaufzeiten und damit auch auf die Produktivität und die Produktionskosten [Dri07]. Laut TOMPKINS kann eine gute Anordnung von Fabrikobjekten zu einer Reduzierung der Betriebskosten von bis zu 50 % führen [Tom02]. Die Qualität der Fabriklayoutplanung hat dementsprechend einen erheblichen Einfluss auf den Unternehmenserfolg.

Vor diesem Hintergrund sollte im Rahmen des Forschungsprojekts eine Optimierungsmethode zur quantitativen, mehrdimensionalen Fabriklayoutplanung entwickelt werden. Eine solche Methode kann den Verfahren des Operations Research zugeordnet werden. Die zugrundeliegende Problemstellung ist als *Facility Layout Problem* bekannt [Hos18]. In der Literatur gibt es zahlreiche Lösungsansätze für dieses Problem, jedoch fokussieren diese mehrheitlich die Minimierung des Materialflusses (vgl. [Sha16, Hos18, Dri07]). Dadurch bleiben wichtige Zielkriterien, wie Wandlungsfähigkeit oder Umgebungseinflüsse (vgl. [Wie14]), unberücksichtigt. In dem abgeschlossenen Forschungsprojekt QuaMFaB (IGF-Nr. 18111 N) wurden Berechnungsvorschriften zur Bewertung solcher Zielkriterien entwickelt [Bön17]. Auf dieser Basis wurde die Optimierungsmethode entwickelt, welche möglichst anwendungsnah und einfach anzuwenden sein sollte. Aus diesem Grund wurde die Methode in einen Softwaredemonstrator eingebettet. Zunächst sollten in Zusammenarbeit mit dem Projektbegleitenden Ausschuss Anforderungen an die Optimierungsmethode und den Softwaredemonstrator aufgenommen werden. Die Anforderungen wurden in Restriktionen überführt und diese wurden wiederum als Nebenbedingungen eines mathematischen Optimierungsmodells formuliert. Parallel erfolgte die Analyse und Weiterentwicklung der Berechnungsvorschriften zur Fabrikbewertung aus dem Forschungsprojekt QuaMFaB (IGF-Nr. 18111 N), welche die Zielfunktion des mathematischen Modells darstellen. Mit der Fertigstellung des mathematischen Modells war die Formulierung des Optimierungsproblems abgeschlossen. Im Anschluss wurde die quantitative, mehrdimensionale Optimierungsmethode entwickelt. Hierzu wurden heuristische Lösungsverfahren des Operations Research adaptiert beziehungsweise entwickelt. Um die geforderte einfache Anwendung der Methode zu ermöglichen, wurde anschließend ein Softwaredemonstrator mit zugehörigem Leitfaden entwickelt. Abschließend wurde die Optimierungsmethode validiert. Die Validierung ergab, dass die heuristischen Lösungsverfahren bessere Ergebnisse liefern als eine manuelle Planung durch Fabrikplanungsexperten. Zudem konnte festgestellt werden, dass der Einsatz von exakten Lösungsverfahren nur bei sehr kleinen Probleminstanzen möglich ist. Die besten Ergebnisse ergaben die Tabu Search sowie die Kombination aus den Metaheuristiken Genetischer Algorithmus und Simulated Annealing. Daher wird die Anwendung dieser Lösungsverfahren bei der Verwendung des Softwaredemonstrators empfohlen.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Eine zunehmende Marktdynamik, induziert durch kürzere Produktlebenszyklen sowie eine steigende Individualisierung, erfordert eine verstärkte Integration neuer Produkte in bestehende Produktionsprozesse [Her13, Zäh03]. Infolgedessen müssen Unternehmen immer häufiger ihre Produktionsprozesse anpassen und gleichzeitig innovative Fertigungsverfahren und Technologien einbinden. Dies führt zu einer höheren Anzahl von Fabrikplanungsprojekten und steigenden Anforderungen an die Qualität der Planung [Cis05]. Die Güte eines Fabrikplanungsprojekts wird dabei maßgeblich durch die Layoutplanung beeinflusst [Wie14]. Die Groblayoutplanung, als Bestandteil des Fabrikplanungsprozesses, beschäftigt sich mit der Fragestellung, wie durch eine effiziente Anordnung von Fabrikobjekten (z. B. Fertigung, Montage) das Erreichen der angestrebten Ziele sichergestellt werden kann. Im Rahmen der Planung werden mehrere Layoutvarianten entwickelt, aus denen abschließend das umzusetzende Layout auszuwählen ist. Da es sich bei der Layoutplanung in der Regel um eine langfristig wirkende Planung handelt, kann die Auswahl eines ungeeigneten Layouts den marktgerechten Produktionsbetrieb und Unternehmenserfolg erheblich beeinflussen. So zeigen Untersuchungen, dass sich die Betriebskosten beispielsweise durch eine logistikeffiziente Anordnung der Fabriksegmente um 30 bis 50 % reduzieren lassen [Tom02]. Die Defizite eines unzureichenden Planungsprozesses, wie z. B. eine niedrige Energieeffizienz, eine geringe Prozesstransparenz oder eine unzureichende Wandlungsfähigkeit der Fabrikstrukturen, offenbaren sich in der Regel erst während der Betriebsphase einer Fabrik [Wie14]. Folglich ist eine qualitativ hochwertige Layoutplanung unter Berücksichtigung aller relevanten Faktoren ein elementarer Bestandteil einer erfolgreichen und wirtschaftlichen Produktion. Zur Planung von Fabriklayouts existieren verschiedene Herangehensweisen. Eine Möglichkeit besteht darin, Methoden des Operations Research (OR) zu nutzen, welche unter gegebenen Rahmenbedingungen das hinsichtlich einer klar definierten Zielstellung optimale Fabriklayout berechnen. Hierbei wird durch Verwendung von Algorithmen eine für die modellierte Problemstellung bestmögliche Lösung gefunden; diese erfolgt jedoch bisher lediglich hinsichtlich weniger unterschiedlicher Zielgrößen. Meistens wird auf eine Minimierung der Transportaufwände (Materialfluss) abgezielt. Bei der Layoutplanung sind jedoch zahlreiche weitere Faktoren zu berücksichtigen, beispielsweise können einzelne Fabrikobjekte für bestimmte Flächen weniger geeignet sein (z. B. Lärmemissionen) und es müssen Kriterien wie Energieeffizienz, Kommunikationswege und Wandlungsfähigkeit beachtet werden. Durch die Fokussierung auf wenige Größen sind die OR-basierenden Lösungen zwar modelltechnisch optimal, stellen jedoch nicht das tatsächliche Optimum dar.

Die zweite Herangehensweise ist eine manuelle Planung. Hierbei wird durch Experten ein Layout auf Basis vorab definierter Zielstellungen manuell geplant, wobei verschiedene Zielstellungen betrachtet werden können. Im Gegensatz zu OR-Verfahren ist eine derartige Planung von Fabriklayouts subjektiv, da die Lösungsqualität stark von der Erfahrung und der Methodenkompetenz der Planer abhängt. Dies führt dazu, dass unter allen im Rahmen der Planung erstellten Layoutvarianten oft nicht die objektiv beste Lösung ist.

Da die Bewertung einzelner Lösungsvarianten bislang nur qualitativ möglich war, wurde am IPH in dem Forschungsprojekt QuaMFaB (IGF-Nummer 18111 N) eine Methode zur quantitativen, mehrdimensionalen Bewertung von Fabriklayouts entwickelt, um manuell geplante Layouts quantitativ bewerten zu können [Bön17]. Für die Zielfelder Wandlungsfähigkeit, Materialfluss und Logistik, Umgebungseinflüsse und Kommunikation wurden insgesamt 21 quantitative Bewertungskriterien entwickelt. Mit diesen können verschiedene (bereits erstellte) Layoutvarianten auch ohne

Expertenwissen bewertet werden; die Entwicklung einer proaktiven Planungsunterstützung erfolgte in diesem Forschungsprojekt jedoch nicht.

3. Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse

Die Arbeitshypothese des hier beschriebenen Forschungsvorhabens besteht in der Annahme, dass eine Adaption der Berechnungsvorschriften zur quantitativen Layoutbewertung in ein mathematisches Optimierungsmodell zur Planung von Fabriklayouts eine innovative und effiziente Methode darstellt. Grundlage für diese Hypothese ist die zuvor beschriebene Situation, dass die automatisierte Layoutplanung mit OR-Ansätzen hinsichtlich der Zielstellung zu wenig diversifiziert ist, die manuelle Planung hingegen oftmals nicht die beste Lösung liefert, weil nicht garantiert werden kann, dass das entsprechende Layout zufällig gefunden wird. Das hieraus abgeleitete Forschungsziel ist die Entwicklung einer Methode zur automatisierten mehrdimensionalen, quantitativen Fabriklayoutplanung.

Teilziel 1:

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Das erste Teilziel war die Formulierung eines Optimierungsmodells zur mehrdimensionalen Fabrikplanung auf Basis von Elementarzellen (eine detaillierte Erläuterung zu Elementarzellen befindet sich zu Beginn von Kapitel 4). Außerdem sollte eine Implementierung des mathematischen Modells in der Software GAMS erfolgen, um später der Funktionsfähigkeit der heuristischen Lösungsverfahren prüfen zu können. Ein mathematisches Optimierungsmodell beschreibt eine Planungsaufgabe beziehungsweise eine Planungsproblem in formaler Form anhand von Entscheidungsvariablen, Parametern, beschränkenden Nebenbedingungen und einer Zielfunktion.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens: Das Teilziel wurde durch die Bearbeitung der Arbeitspakete 1 bis 3 des Projektantrags erfüllt (vgl. Kapitel 4.1 bis 4.3). Zunächst wurden durch Literaturrecherchen und Interviews mit Unternehmen aus dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA) Anforderungen an die Layoutplanungsmethode und den Softwaredemonstrator aufgenommen sowie dokumentiert. Anhand dieser Anforderungen wurden obligatorische und optionale Restriktionen sowie notwendige Freiheitsgrade der Optimierung abgeleitet. Parallel wurden die Bewertungskriterien aus dem Forschungsprojekt QuaMFaB (IGF-Nr.: 18111 N) hinsichtlich ihrer Eignung für die Layoutplanung analysiert (vgl. [Bön17]). Die geeigneten Bewertungskriterien wurden gegebenenfalls adaptiert beziehungsweise detailliert. Anhand der Formulierung von Restriktionen und Zielstellung konnte das Optimierungsproblem klassifiziert werden. Anschließend wurde das mathematische Modell formuliert. Hierfür wurden die Entscheidungsvariablen sowie Parameter definiert und die Restriktionen in formale Nebenbedingungen überführt. Die Zielfunktion wurde durch eine gewichtete Summe der Bewertungskriterien erzeugt. Abschließend erfolgte die Implementierung des mathematischen Modells in GAMS.

Teilziel 2:

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Zweites Teilziel war die Entwicklung und Umsetzung eines problemspezifischen heuristischen Lösungsverfahrens für das im Rahmen von Teilziel 1 formulierte mathematische Optimierungsmodell.

Hierdurch sollten die Ergebnisse aus Teilziel 1 in eine praktisch anwendbare Form überführt wer-

den. Zunächst sollte aus verschiedenen heuristischen Lösungsverfahren (z. B. genetische Algorithmen, Simulated Annealing) dasjenige ausgewählt werden, welches am besten für die vorliegende Problemstellung geeignet ist. Daraufhin sollte dieses Lösungsverfahren für die zugrundeliegende Problemstellung adaptiert und in eine Software implementiert werden. Um die Praxistauglichkeit sicherzustellen, sollte die Implementierung des Algorithmus in einem Softwaredemonstrator erfolgen, welcher mit einer grafischen Benutzeroberfläche zur Dateneingabe sowie Ergebnisvisualisierung ausgestattet ist. Um eine systemunabhängige, vorwettbewerbliche Anwendbarkeit zu gewährleisten, sollte für die Erstellung des Softwaredemonstrators Standardsoftware wie Java (Algorithmus) und MS Excel (Dateneingabe, Ergebnisvisualisierung) verwendet werden. Zur Erhöhung der Praxistauglichkeit sollte bei der abschließenden (grafischen) Ergebnisdarstellung nicht nur das beste Layout angezeigt werden, sondern auch weitere Layoutvarianten, welche hinsichtlich ihres Zielwerts nahe der besten Lösung sind.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens: Das Teilziel wurde durch die Bearbeitung der Arbeitspakete 4 bis 5 des Projektantrags erfüllt (vgl. Kapitel 4.4 und 4.5). Zur Auswahl des heuristischen Lösungsverfahrens erfolgte zunächst eine umfangreiche Literaturrecherche. Dabei konnte die Eignung exakter Lösungsverfahren für die zugrundeliegende Problemstellung ausgeschlossen werden. Basierend auf der Klassifikation der Problemstellung wurden die Metaheuristiken Simulated Annealing, Tabu Search und Genetische Algorithmen für eine weitere Betrachtung ausgewählt. Da diese Methoden per Definition problemunspezifisch sind, wurden entsprechenden Sub-Heuristiken konzeptioniert (vgl. Kapitel 4.4). Daraufhin erfolgte die Entwicklung des Softwaredemonstrators in Python, wobei die Implementierung in zwei Komponenten, das Front-End (grafisches Userinterface, kurz GUI) und das Back-End (Optimierungsmethode), aufgeteilt wurde. Des Weiteren wurde eine detaillierte Dokumentation des Softwaredemonstrators in Form eines Leitfadens erstellt.

Teilziel 3:

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Das dritte Teilziel bestand in der Validierung der vorangegangenen Arbeiten durch Anwendung des im Rahmen von Teilziel 2 entwickelten Softwaredemonstrators. Auf Basis von Testszenarien sollten die Projektergebnisse auf ihre Praxistauglichkeit überprüft und ggf. angepasst werden. In Zusammenarbeit mit den Unternehmen des PA sollten vergangene Layoutplanungsprojekte nachgestellt und die von der Methode gelieferten Ergebnisse mit den tatsächlich umgesetzten Planungsergebnissen verglichen werden.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens: Der Softwaredemonstrator wurde anhand von einem aktuellen Planungsproblem eines Unternehmens des PA sowie zwei synthetisch erzeugten Planungsszenarien validiert (vgl. Kapitel 4.6). Die Validierung erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurde das kleinste Planungsszenario mittels GAMS-Solver sowie Softwaredemonstrator optimiert und die Ergebnisse anschließend verglichen. Die Optimierung komplexer Szenarien war mit dem GAMS-Solver nicht möglich. Für die weiteren Datensätze wurden die Ergebnisse des Softwaredemonstrator mit manuell von Fabrikplanungsexperten erzeugten Layoutvarianten verglichen. Das Ergebnis der Validierung kann in zwei Kernaussagen zusammengefasst werden:

- Die vom Softwaredemonstrator erzeugten Layoutvarianten sind hinsichtlich aller Restriktionen bzw. Nebenbedingungen zulässige Lösungen.
- Die vom Softwaredemonstrator erzeugten Layoutvarianten sind bezüglich der gewählten Zielfunktionen gleichwertig oder besser als die von Fabrikplanungsexperten manuell erzeugten Layouts.

4. Erzielte Ergebnisse

Zur Darstellung der Ergebnisse wird von der Reihenfolge der Arbeitspakete abgewichen, da die Zusammenhänge der durchgeführten Arbeitsschritte so besser erläutert werden können. Zur Beschreibung der Methodenentwicklung wird zunächst die Anforderungsanalyse dargestellt, auf deren Basis die Restriktionen abgeleitet wurden. Es folgt die Erläuterung der Zielstellung der Optimierungsmethode basierend auf der Analyse der Berechnungsvorschriften aus dem Forschungsprojekt QuaMFaB (Arbeitspaket 1 | IGF-Nr.: 18111 N), der Auswahl einer Gewichtungsmethode (Arbeitspaket 1) und der Zusammenführung der Bewertungskriterien durch deren Normierung und Gewichtung zu einer gewichteten Zielstellung (Arbeitspaket 2). Die Beschreibung der Arbeitsschritte Formulierung der Restriktionen und Formulierung des mathematischen Modells wird kombiniert, da es sich bei den Restriktionen um eine verbale Formulierung der mathematischen Nebenbedingungen handelt. Die Beschreibung der darauffolgenden Arbeitsschritte (Entwicklung eines heuristischen Lösungsverfahrens, Entwicklung eines vorwettbewerblichen Software demonstrators und Validierung der Methode) folgt der Reihenfolge der Arbeitspakete des Forschungsantrags.

Elementarzellen

Zum besseren Verständnis der folgenden Kapitel ist die Definition des Begriffs „Elementarzelle“ notwendig. Die Bewertungsvorschrift des Forschungsprojekts QuaMFaB (IGF-Nr. 18111 N) basieren maßgeblich auf Elementarzellen (vgl. [Bön17]). Elementarzellen sind Flächenabschnitte mit gleichen Abmessungen und quadratischer Form. Sie werden als Raster über die Fabrikgrundfläche sowie die Fabrikobjekte gelegt und dienen der Strukturierung dieser Flächen. Den Elementarzellen werden fabrikplanungsrelevante Eigenschaften zugeordnet (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Eigenschaften von Elementarzellen (Auswahl)

allgemein	Elementarzellen-ID	ID
	Abmessungen	[m]
Eigenschaften der Fabrikgrundfläche	Koordinaten	[x; y]
	Flächenart	[Fertigung, Montage, Sozialflächen etc.]
	Deckenhöhe	[m]
	Bodentraglast	[t/m ²]
	Deckentraglast	[t/m ²]
	Beleuchtung	[lx]
	Medienverfügbarkeit	[Strom; Druckluft; Wasser; Kühlwasser etc.]
Eigenschaften der Fabrikobjekte	Position	[x; y]
	relative Quellenposition	[x; y]
	relative Senkenposition	[x; y]
	Beleuchtung	[lx]
	Ruhebedarf	[dB]
	Lärmemission	[dB]

Bei der Layoutplanung werden die Elementarzellen der Fabrikobjekte deckungsgleich auf die Elementarzellen der Fabrikgrundfläche gelegt. Auf diese Weise können die Eigenschaften der übereinanderliegenden Zellen miteinander verglichen werden. So kann beispielsweise geprüft werden, ob eine Medienanforderung eines Fabrikobjekts an der zugewiesenen Position erfüllt wird. Andererseits können Restriktionen, wie beispielsweise zulässige Bodentraglasten, überprüft werden.

4.1 Analyse der Anforderungen an eine automatisierte Fabriklayoutplanungsmethode

Der erste Arbeitsschritt diente der Identifikation und Analyse von Anforderungen an eine automatisierte, quantitative, mehrdimensionale Fabriklayoutplanungsmethode. Hierzu wurden zunächst mehrere Fabrikplanungsprozesse analysiert (vgl. [Wie14, Gru15, VDI11]). Dabei wurden die für eine Fabriklayoutplanung relevanten Arbeitsschritte ermittelt. Darüber hinaus wurden die notwendigen Übergabeparameter der vor- und nachgelagerten Planungsschritte der Fabriklayoutplanung bestimmt, welche die notwendigen Eingangs- und Ausgangsdaten der Methode darstellen. Im Rahmen des ersten Treffens des PA wurde ein Workshop zur Anforderungsanalyse durchgeführt. Im ersten Schritt wurden dabei, basierend auf dem bestehenden Planungswissen der Ausschussmitglieder, Anforderungen hinsichtlich der Fabriklayoutplanungsmethode und des Softwaredemonstrators gesammelt. Diese Anforderungen wurden mit denen der zuvor erfolgten Literaturrecherche zusammengeführt. Im zweiten Schritt des Workshops wurden die identifizierten Anforderungen diskutiert und hinsichtlich ihrer Relevanz für das Projekt bewertet. Im Anschluss an das Projekttreffen wurden die Ergebnisse strukturiert und erweitert.

Die Fabriklayoutplanung wird in allen genannten Fabrikplanungsprozessen in die Phasen Ideal-, Grob- und Feinlayoutplanung unterteilt. Basierend auf der Anforderungsanalyse erfolgte eine Fokussierung hinsichtlich der Groblayoutplanung; wobei die freie Skalierbarkeit der Elementarzellen eine eingeschränkte Feinlayoutplanung ermöglicht. Die relevanten Anforderungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die Anforderungen an den geplanten Softwaredemonstrator bilden das Lastenheft für dessen Entwicklung.

Tabelle 2: Anforderungen an die Fabriklayoutplanungsmethode und den Softwaredemonstrator

Anforderung	Ausprägung / Beschreibung
Layoutplanungsmethode	
Planungsfall	- Neuplanung und Reorganisationsplanung
Detaillierungsgrad	- freie Skalierbarkeit über die Elementarzellengröße - Materialflüsse innerhalb von Bereichen werden nicht berücksichtigt
Fertigungsprinzipien	- keine Beschränkung der zu berücksichtigenden Fertigungsprinzipien
Fertigungsart	- keine Beschränkung der zu berücksichtigenden Fertigungsart
Organisationsformen	- keine Beschränkung berücksichtigender Organisationsformen - eine automatisierte Planung verschiedener Organisationsformen wird jedoch nicht berücksichtigt
Informationsbasis	- deterministische Planungsdaten
Betrachtungsgrenzen bzw. Betrachtungsgegenstand	- einzelne Fabrikhalle mit fixierten Abmessungen - Werksgelände mit mehreren Fabrikhallen - keine Abbildung mehrerer Etagen je Fabrikhalle - standardisierte Wegbreite
Eingangsdaten	- Fabrikobjektbezogene Daten: <ul style="list-style-type: none"> o eindeutige Bezeichnung (Primärschlüssel) o Flächenart (bspw. Fertigung, Montage, Sozialflächen etc.) o Abteilungszugehörigkeit [numerisch] o Abmessungen: Fläche [m²], minimale Kantenlänge [m], Höhe [m] mit regulärer Flächenform (Rechteck oder Quadrat) o Traglasten: Decken- und Bodentraglast [t/m²]

	<ul style="list-style-type: none"> ○ Umgebungsfaktoren: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schall: Ruhebedarf, Lärmexposition [dB] ▪ Licht: Lichtbedarf [lx] ▪ Vibration: Erschütterungsempfindlichkeit und -exposition [-] ▪ Temperatur [-] ▪ Sauberkeit [-] ○ Medienbedarfe (Energie, Wasser, Ethernet, etc.) [binär] ○ Mitarbeiteranzahl [numerisch, ganzzahlig] ○ Außenwandpositionierung [binär] ○ Positionsfixierung [binär Koordinaten] ○ Quell- und Senkenposition [Koordinaten] - Materialflussmatrix [Menge/Zeiteinheit] - Kommunikationsflussmatrix [Menge/Zeiteinheit] - Medienverfügbarkeit [binär je Elementarzelle]
Ausgangsdaten	<ul style="list-style-type: none"> - graphische Darstellung des Layouts - Positionsdaten je Fabrikobjekt [Koordinaten, Drehung] - Wegpunkte der Material- und Kommunikationsflüsse - Zielfunktionswerte
Softwaredemonstrator	
Userinterface	<ul style="list-style-type: none"> - vorgegebener Ablauf der Dateneingabe - aktive Eingabeaufforderung zur Vermeidung des Übergehens planungsrelevanter Daten - Eingabe optionaler Daten kann übersprungen werden - Vorgabe von Standardwerten für die Steuerparameter der Optimierungsmethode basierend auf der Parameterstudie
Datenbasis	<ul style="list-style-type: none"> - Verwendung von Excel zur Aggregation planungsrelevanter Daten, da diese ohnehin meist in diesem Format vorliegen - ggf. Implementierung einer Datenbankschnittstelle (nicht umgesetzt)
Datenausgabe	<ul style="list-style-type: none"> - graphische Darstellung <ul style="list-style-type: none"> ○ mit Maßen und Koordinaten der Flächen ○ Ansicht je Bewertungskriterium ○ parallele Darstellung mehrerer Varianten zum direkten Vergleich - tabellarische Darstellung <ul style="list-style-type: none"> ○ relevante Kennwerte bzw. Zielkriterien ○ Übersicht von Konflikten, welche die Bewertung negativ beeinflussen als Handlungsaufforderung

4.2 Analyse der Berechnungsvorschriften aus dem Forschungsprojekt „QuaMFaB“ und Entwicklung der Zielstellung

Parallel zur in Kapitel 4.1 beschriebenen Anforderungsanalyse erfolgt die Analyse der im Rahmen des Forschungsprojektes QuaMFaB (IGF-Nr. 18111 N) erarbeiteten Berechnungsvorschriften (vgl. [Bön17]). Die Berechnungsvorschriften wurden hinsichtlich ihrer Eignung für die Fabriklayoutplanung überprüft. Dabei wurden zwölf der 21 Bewertungsvorschriften für die weitere Berücksichtigung als Zielfunktionen der Optimierung ausgewählt. Hinsichtlich des Bewertungsfelds Wandlungsfähigkeit konnten lediglich die medienbezogenen Bewertungsvorschriften übernommen werden. Dem entsprechend kann bei der Optimierung nur ein Auszug der Wandlungsfähigkeit von Fabriken berücksichtigt werden (vgl. [Wie14]).

Die nicht geeigneten Berechnungsvorschriften wurden wegen ihrer beschränkten Beeinflussbarkeit aussortiert. Beispielsweise führt eine Änderung des Layouts, durch Verschieben eines Fabrikobjekts, nicht zur Anpassung des Ergebnismwerts der Berechnungsvorschrift Universalität.

Diese kann nur durch eine Änderung der Form der Fabrikhalle beeinflusst werden. Eine Anforderung an die Methode waren fixierte Abmessungen der Fabrikhalle. Das heißt, während der Optimierung dürfen die Abmessungen der Fabrikhalle nicht geändert werden. Somit würde die Berechnungsvorschrift für ein Planungsszenario immer denselben Ergebniswert zurückgeben.

Die für das Projekt relevanten Bewertungsvorschriften sind in Tabelle 3 aufgeführt. Die Berechnungsvorschriften wurden für die Verwendung in einer Methode des Operations Research angepasst beziehungsweise detailliert. Zusätzlich wurde die Bewertungsvorschrift Medienverfügbarkeit entwickelt. Die Dokumentation der Bewertungsvorschriften befinden sich in Anhang 1: Anpassung von Bewertungsvorschriften.

Tabelle 3: Berechnungsvorschriften, die als Zielkriterien der Optimierung verwendet werden (mit deren Formelzeichen)

Bewertungsfeld	Wandlungsfähigkeit		Kommunikation	
Bewertungsvorschrift	Medienkompatibilität	MS_v	Direkte Kommunikation	DC_v
	Medienverfügbarkeit	PEA_v	Formale Kommunikation	FC_v
Bewertungsfeld	Umgebungseinflüsse		Materialfluss & Logistik	
Bewertungsvorschrift	Beleuchtung	IL_v	Materialflusslänge	MF_v
	Ruhe / Lärm	$Noise_v$	Überschneidungsfreiheit	MFO_v
	Vibration	MV_v	Stetigkeit des Materialflusses	MFC_v
	Temperatur	$Temp_v$	Flächennutzungsgrad	AUR_v
	Sauberkeit	$Clean_v$		

Entwicklung der Zielstellung

Basierend auf den gewählten Bewertungsvorschriften wurde eine Zielstellung für die Optimierung entwickelt. Deren mathematische Formulierung ist in Kapitel 4.3 unter dem Punkt Zielfunktion dargestellt. Die, dem Projekt zugrundeliegenden, multikriterielle Zielstellung erfordert die Anwendung beziehungsweise Entwicklung einer Methode zur multikriteriellen Entscheidungsfindung. Es wurden bestehende Methoden der multikriteriellen Entscheidungsfindung hinsichtlich der Eignung für den Einsatz in einer anwendungsorientierten, KMU-fokussierten Fabriklayoutplanungsmethode untersucht. Als Methoden der multikriteriellen Entscheidungsfindung wurden die gewichtete Summe ausgewählt. Die Gewichtung der Zielkriterien für ein konkretes Planungsszenario erfolgt durch einen paarweisen Vergleich der Kriterien. Der paarweise Vergleich zeichnet sich durch seine einfache Anwendbarkeit aus und ist ohne Vorwissen des Anwenders durchführbar. Damit wird sie dem anwendungsorientierten Fokus gerecht.

Eine Normierung der Berechnungsvorschriften war nicht notwendig. Die Ergebniswerte aller Berechnungsvorschriften sind prozentuale Angaben mit einem Wertbereich von [0, 100]. Diese ergeben sich aus dem Vergleich von Layoutvarianten. Wobei ein Bewertungszwischenergebnis einer aktuellen Layoutvariante mit dem besten bekannten Bewertungszwischenergebnis des jeweiligen Bewertungskriteriums verglichen wird. Das beste bekannte Bewertungszwischenergebnis wird während der Optimierung stetig aktualisiert, sofern es eine bessere Lösung gibt. Durch diese Modellierung ist eine direkte Vergleichbarkeit beziehungsweise Überführbarkeit gewährleistet. Die Modellierung ermöglicht auch die Kombination von zu minimierenden und zu maximierenden Zielstellungen. Beispielsweise kann der Abstand zwischen lärmempfindlichen und lärmemittierenden Fabrikobjekten maximiert werden, während die Materialflusslänge minimiert wird.

4.3 Konzeption und Formulierung eines mathematischen Optimierungsmodells

Basierend auf den identifizierten Anforderungen (vgl. Kapitel 4.1) wurden Restriktionen bezüglich der Fabriklayoutplanungsmethode formuliert. Diese wurden im Rahmen einer Literaturrecherche über existierende mathematische Optimierungsmodelle um weitere Restriktionen ergänzt. Die Restriktionen und die daraus resultierenden Freiheitsgrade wurden im Anschluss mit verschiedenen Unternehmen des PA diskutiert und detailliert.

Anhand der Restriktionen und der Zielstellung (vgl. Kapitel 4.2) wurde das Optimierungsproblem klassifiziert. Die Klassifizierung basiert auf Klassifikationen von HOSSEINI-NASAB ET AL. [Hos18] sowie DRIRA ET AL. [Dri07] und ist in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Klassifizierung des Optimierungsproblems

Charakteristika	Ausprägung / Beschreibung
Planungshorizont	- statisches Layoutproblem
Datentyp	- deterministische Planungsdaten
Eigenschaften von Funktionsflächen	- reguläre Form (Rechteck, Quadrat) - unteilbar und unveränderliche Geometrie
Eigenschaften des Materialflusses	- Backtracking (Zurückkehren zu bereits besuchten Fabrikobjekten) - Bypassing (Auslassen von Fabrikobjekten im Materialfluss)
Layoutkonfiguration	- Open Field Layout
Problemrepräsentation	- diskret (durch Elementarzellen)
Modellierung	- Quadratic Set Covering
Zielstellung	- multikriterielle quantitative Zielfunktion (vgl. Tabelle 3) - gewichtete Summe
Restriktionen	- Fabrikobjekte liegen innerhalb der Fabrikgrundfläche - Fabrikobjekte müssen überlappungsfrei positioniert werden - Fabrikobjekte haben Quellen und Senken - Fabrikobjekte haben eine Orientierung im Raum (Drehung) - Ein Abstand zwischen Fabrikobjekten ist nicht notwendig, jedoch muss die Zugänglichkeit der Quellen und Senken gewährleistet sein

Mathematisches Modell

Das mathematische Optimierungsmodell wurde anhand der Restriktionen und Zielstellung formuliert. Zur Entwicklung des Modells wurde das mathematische Modell von BOCK UND HOBERG [Boc07] adaptiert, welches für ein hinsichtlich Parametern, Layoutkonfiguration und Nebenbedingungen sehr ähnliches Optimierungsproblem aufgestellt wurde. Dabei wurde die grundlegende Funktionsweise sowie die Formulierung von maßgeblichen Bestandteilen, wie Parametern, Entscheidungsvariablen und Nebenbedingungen, übernommen und sofern notwendig im Detail an die zugrundeliegende Problemstellung angepasst. Die Formulierung der Zielfunktion unterscheidet sich grundlegend von BOCK UND HOBERG. Diese basiert, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, auf den Bewertungskriterien aus dem Forschungsprojekt QuaMFaB (IGF-Nr. 18111 N). Um die Anwendung der Bewertungskriterien zu ermöglichen wurden zusätzliche Parameter eingeführt.

Das, auf den nächsten Seiten formal beschriebene, mathematische Modell ist in die vier Abschnitte Parameter, Entscheidungsvariablen, Zielfunktion und Nebenbedingungen unterteilt. Die Erläuterung der Nebenbedingungen ist gleichzeitig die Aufführung der verbalen Formulierung der Restriktionen.

Bei Verwendung des Modells müssen zunächst verschiedene Parameter angegeben werden. Beispielsweise die Abmessungen der Fabrikgrundfläche (X, Y) sowie der Fabrikobjekte (DX^n, DY^n) oder Informationen zu Medien, wie deren Verfügbarkeit in der Fabrikgrundfläche ($PEAS_{x,y,u}$) und deren Bedarf der Fabrikobjekte ($PEAR_u^n$). Darüber hinaus kann Elementarzellen ein Verwendungszweck vorgeben werden, beispielsweise können permanente Weg-Elemente definiert werden. Diese Elementarzellen können nicht durch Fabrikobjekte belegt werden. Wege können diese nutzen, müssen aber nicht. Die Optimierung erfolgt durch die Variation der Entscheidungsvariablen $Pos_{x,y,r}^n$ und $Path_{x,y,k}^{n,m}$, welche dazu dienen, die Fabrikobjekte und Wege innerhalb der Fabrikgrundfläche zu positionieren. Bild 1 visualisiert eine Konfiguration von Entscheidungsvariablen in Zusammenhang mit ausgewählten Parametern, welche nachfolgend dokumentiert sind.

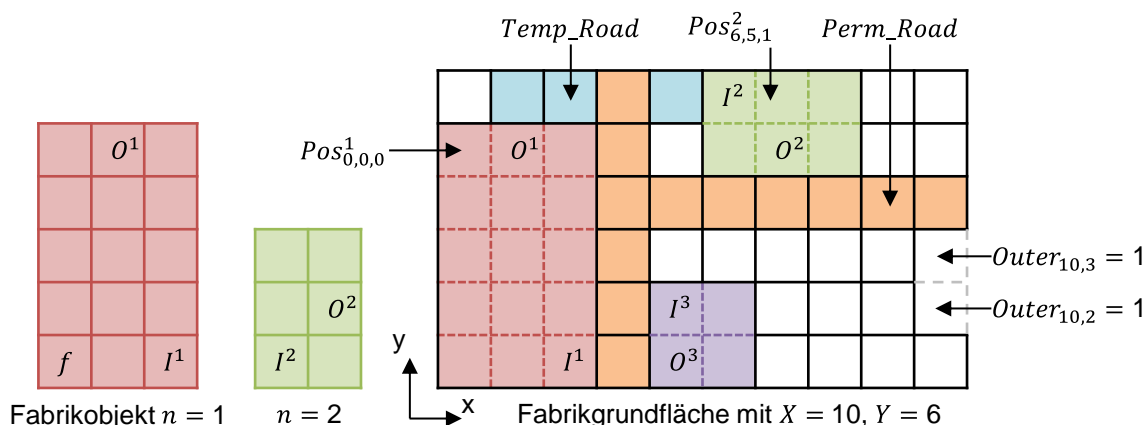


Bild 1: Visualisierung der Entscheidungsvariablen und ausgewählter Parameter des mathematischen Modells

Parameter

Die Parameter repräsentieren die Eingangsdaten des Optimierungsproblems.

Benutzereingaben

$X, Y \in \mathbb{N}$ Maße der Fabrikgrundfläche

$N \in \mathbb{N}$ Anzahl der Fabrikobjekte

$Type^n \in \{1,2\}, n \in \{1, \dots, N\}$ Ausprägung von Fabrikobjekten:

$Type^n = 1 \leftrightarrow$ Maschine/Anlage/Bereich

$Type^n = 2 \leftrightarrow$ Meetingraum

$DX^n \in \{1, \dots, X\}, n \in \{1, \dots, N\}$ Ausdehnung von Fabrikobjekt n in X -Richtung

$DY^n \in \{1, \dots, Y\}, n \in \{1, \dots, N\}$ Ausdehnung von Fabrikobjekt n in Y -Richtung

$I^n \in DX^n \times DY^n, n \in \{1, \dots, N\}$ relative Koordinaten des Input-Elements von Fabrikobjekt n

$O^n \in DX^n \times DY^n, n \in \{1, \dots, N\}$	relative Koordinaten des Output-Elements von Fabrikobjekt n
$Flow \in R_{\geq 0}^{N,N}$	Materialflussmatrix
$Komm \in R_{\geq 0}^{N,N}$	Kommunikationsflussmatrix
$Rest_{x,y} \in \{0,1\}, (x,y) \in X \times Y$	gibt an, ob es sich bei Elementarzelle (x,y) um ein gesperrtes Element der Fabrikgrundfläche handelt, welches nicht beplant werden darf
$Outer_{x,y} \in \{0,1\}, (x,y) \in X \times Y$	gibt an, ob Elementarzelle (x,y) außerhalb der Fabrikgrundfläche liegt. Dient der Modellierung einer nicht rechteckigen Fabrikgrundfläche (Aussparungen, Vorsprünge)
$U \in \mathbb{N}$	Anzahl an verschiedenen Produktionsmedien
$PEAS_{x,y,u} \in \{0,1\}, (x,y) \in X \times Y, u \in \{1, \dots, U\}$	Verfügbarkeit von Produktionsmedien u für Elementarzelle (x,y)
$PEAR_u^n \in \{0, \dots, F_n\}, n \in \{1, \dots, N\}, u \in \{1, \dots, U\}$	gibt an, wie viele Zellen f von Fabrikobjekt n mindestens mit Produktionsmedium u versorgt werden müssen.
$ILRF^n \in \{1, \dots, 7\}, n \in \{1, \dots, N\}$	Beleuchtungsanforderung von Fabrikobjekt n
$ILS_{x,y} \in \{1, \dots, 7\}, (x,y) \in X \times Y$	Beleuchtungsintensität von Elementarzelle (x,y)
$NSF^n \in \{1,2,3\}, n \in \{1, \dots, N\}$	Lärmempfindlichkeit von Fabrikobjekt n
$NE^n \in \{1,2,3\}, n \in \{1, \dots, N\}$	Lärmverursachung von Fabrikobjekt n
$MVE^n \in \{1,2,3\}, n \in \{1, \dots, N\}$	Vibrationsverursachung von Fabrikobjekt n
$MVS^n \in \{1,2,3\}, n \in \{1, \dots, N\}$	Vibrationsempfindlichkeit von Fabrikobjekt n

Abgeleitete Parameter

$Area = \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (1 - Outer_{x,y}) \cdot (1 - Rest_{x,y})$	Anzahl an Elementarzellen, die zur Platzierung zur Verfügung stehen
$Num^M = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \chi^{\mathbb{R}^+}(Flow_{n,m})$	Anzahl der Materialflüsse, mit $\chi^{\mathbb{R}^+}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$
$F_n \in \mathbb{N} \mid F_n = DX^n \cdot DY^n$	Anzahl der Elementarzellen f , die zu Fabrikobjekt n gehören
$E_{f,dx,dy}^n \in \{0,1\}, n \in \{1, \dots, N\}, f \in \{1, \dots, F_n\}, (dx, dy) \in DX^n \times DY^n$	Position der f -ten Elementarzelle von Fabrikobjekt n
$E_{1,dx,dy}^n = 1, \text{ für } (dx, dy) = I^n$	Position des Input-Element (Quelle) von Fabrikobjekt n
$E_{2,dx,dy}^n = 1, \text{ für } (dx, dy) = O^n$	Position des Output-Element (Senke) von Fabrikobjekt n

$\forall f > 2: E_{f,dx,dy}^n = 1$, falls $\sum_{j=1}^{F_n} E_{j,dx,dy}^n = 0$ und $\sum_a^{DX^n} \sum_b^{DY^n} E_{f,a,b}^n = 0$ Position der f -ten Elementarzelle von Fabrikobjekt n

$F_{Area} = \sum_{n=1}^N F_n$ Anzahl der Elementarzellen, die zum Fabrikobjekt n gehören

$Perm_Road_{x,y} \in \{0,1\}$ gibt an, ob auf Elementarzelle (x, y) ein permanentes Wegelement platziert wurde

$Path_{max} \in \mathbb{N}$ maximale Länge eines Transportweges zwischen zwei Fabrikobjekten (Hilfsvariable), aus Wegelementen k

Hilfsfunktionen

$Greater(x, y) \in \{0,1\} \mid Greater(x, y) = \frac{\max(x,y)-y}{\max(1,x-y)}$ mit $x, y \in \mathbb{N}$ gibt an, ob $x > y \triangleq \begin{cases} 1, & x > y \\ 0, & x \leq y \end{cases}$

$Ident(x, y) \in \{0,1\} \mid Ident(x, y) = (1 - Greater(x, y)) \cdot (1 - Greater(y, x))$ mit $x, y \in \mathbb{N}$ gibt an, ob $x = y$

$cmax(x, y) = \frac{x+y+|x-y|}{2}$ entspricht $\max(x, y)$, hat den Vorteil, dass es eine Funktion zusammengesetzt aus Summen, Quotienten und Beträgen ist

$cmin(x, y) = \frac{x+y-|x-y|}{2}$ siehe $cmax$

Entscheidungsvariablen

Entscheidungsvariablen sind Variablen, die während der Optimierung variiert werden, um neue Lösungen zu erzeugen.

$Pos_{x,y,r}^n \in \{0,1\}, n \in \{1, \dots, N\}, (x, y) \in X \times Y, r \in \{0,1,2,3\}$

Fabrikobjekt n ist der Elementarzelle (x, y) mit Rotation r zugeordnet. Dabei entspricht $r \in \{0,1,2,3\}$ einer Rotation um $r \cdot 90^\circ$ im Uhrzeigersinn.

$Path_{x,y,k}^{n,m} \in \{0,1\}, n, m \in \{1, \dots, N\}, (x, y) \in X \times Y, w \in \{1, \dots, Path_{max}\}$

Das k -te Element des Transportweges von Fabrikobjekt n zu m ist Elementarzelle (x, y) zugeordnet.

Von Entscheidungsvariablen abhängige Parameter

$Loc_{f,x,y}^n \in \{0,1\}, n \in \{1, \dots, N\}, f \in \{1, \dots, F_n\}, (x, y) \in X \times Y$ gibt an, ob das f -te Element von Fabrikobjekt n den Koordinaten bzw. der Elementarzelle (x, y) zugeordnet ist:

$$\begin{aligned} Loc_{f,x,y}^n &= \sum_{dx=\max((x-DX^n+1),1)}^x \sum_{dy=\max((y-DY^n+1),1)}^y Pos_{dx,dy,0}^n \cdot E_{f,1+x-dx,1+y-dy}^n \\ &+ \sum_{dx=\max((x-DY^n+1),1)}^x \sum_{dy=\max((y-DX^n+1),1)}^y Pos_{dx,dy,1}^n \cdot E_{f,1+y-dy,1+x-dx-(x-dx)}^n \\ &+ \sum_{dx=\max((x-DX^n+1),1)}^x \sum_{dy=\max((y-DY^n+1),1)}^y Pos_{dx,dy,2}^n \cdot E_{f,DX^n-(x-dx),DY^n-(y-dy)}^n \\ &+ \sum_{dx=\max((x-DY^n+1),1)}^x \sum_{dy=\max((y-DX^n+1),1)}^y Pos_{dx,dy,3}^n \cdot E_{f,DX^n-(y-dy),x+1-dx}^n \end{aligned}$$

$In_{x,y}^n \in \{0,1\}, n \in \{1, \dots, N\}, (x, y) \in X \times Y$	gibt an, ob Elementarzelle (x, y) das Input-Element von Fabrikobjekt n ist: $In_{x,y}^n = Loc_{1,x,y}^n$
$Out_{x,y}^n \in \{0,1\}, n \in \{1, \dots, N\}, (x, y) \in X \times Y$	gibt an, ob Elementarzelle (x, y) das Output-Element von Fabrikobjekt n ist: $Out_{x,y}^n = Loc_{2,x,y}^n$
$EL_{x,y}^n \in \{0,1\}, n \in \{1, \dots, N\}, (x, y) \in X \times Y$	gibt an, ob Elementarzelle (x, y) zu Fabrikobjekt n gehört: $EL_{x,y}^n = Greater\left(\sum_{f=1}^F Loc_{f,x,y}^n, 0\right)$
$MP^n = (MP_1^n, MP_2^n) \in R_{\geq 0}^2, n \in \{1, \dots, N\}$	Mittelpunkt von Fabrikobjekt n
$MP_1^n = \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \left((Pos_{x,y,0}^n + Pos_{x,y,2}^n) \cdot \left(x + \frac{DX^n}{2}\right) + (Pos_{x,y,1}^n + Pos_{x,y,3}^n) \cdot \left(x + \frac{DY^n}{2}\right) \right)$	
$MP_2^n = \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \left((Pos_{x,y,0}^n + Pos_{x,y,2}^n) \cdot \left(y + \frac{DY^n}{2}\right) + (Pos_{x,y,1}^n + Pos_{x,y,3}^n) \cdot \left(y + \frac{DX^n}{2}\right) \right)$	
$dist_eu_{n,m} \in \mathbb{R}_{\geq 0}, n, m \in \{1, \dots, N\}$	Euklidische Distanz zwischen den Mittelpunkten der Fabrikobjekte n und m :
$dist_eu_{n,m} = \ MP^n - MP^m\ _2 = \sqrt{(MP_1^n - MP_1^m)^2 + (MP_2^n - MP_2^m)^2}$	
$Temp_Road_{\{x,y\}} \in \{0,1\}, (x, y) \in X \times Y$	gibt an, ob es sich bei Elementarzelle (x, y) um ein temporäres Transport-Element handelt:
$Temp_Road_{\{x,y\}} = Greater\left(\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{Path_{max}} Path_{x,y,k}^{n,m}, 0\right) \cdot (1 - Perm_Road_{x,y})$	
$Road_{x,y} \in \{0,1\}, (x, y) \in X \times Y$	gibt an, ob Elementarzelle (x, y) ein Transportelement ist: $Road_{x,y} = Perm_Road_{x,y} + Temp_Road_{x,y}$
$PCE_{x,y} \in \{0,1\}, (x, y) \in X \times Y$	gibt an, ob es sich bei Elementarzelle (x, y) um eine Wegkreuzung handelt:
$PCE_{x,y} = Greater(Road_{x-1,y} + Road_{x,y-1} + Road_{x+1,y} + Road_{x,y+1}, 2)$	
$Length_{n,m} \in \mathbb{N}, n, m \in \{1, \dots, N\}$	Länge des Transportweges von Fabrikobjekt n zu m :
$Length_{\{n,m\}} = 1 + \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{k=1}^{Path_{max}} Path_{x,y,k}^{n,m}$	

Zielfunktion

Die Zielfunktion ist die mathematische Form der Zielstellung, hier dargestellt als gewichtete Summe aus Zielfunktionsvektor und Gewichtungsvektor. Der Zielfunktionsvektor umfasst die Berechnungsvorschriften der Fabriklayoutbewertung (vgl. Kapitel 4.2 und Anhang 1: Anpassung von Bewertungsvorschriften).

$ZF_v = GWV \cdot ZFV_v^T$	Zielfunktion für Variante v wobei gilt:
$GWV \in [0,1]^{Num^Z}$	Gewichtungsvektor: $GWV \triangleq \sum_{j=1}^{Num^Z} GWV_j = 1$ mit $Num^Z = 12$
ZFV	Zielfunktionsvektor:
$ZFV_v = (MS_v, PEA_v, MF_v, MFO_v, MFC_v, AUR_v, IL_v, Noise_v, MV_v, Temp_v, Clean_v, DC_v, FC_v)$	

Nebenbedingungen

Nebenbedingungen sind die mathematische Form der Restriktionen und beschränken den Lösungsraum.

Jedes Fabrikobjekt n hat eine eindeutige Position und Orientierung in der Fabrikgrundfläche:

$$\forall n \in \{1, \dots, N\}: \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{r=0}^3 Pos_{x,y,r}^n = 1$$

Jedes Element eines Fabrikobjekts n hat eine eindeutige Position in der Fabrikgrundfläche:

$$\forall n \in \{1, \dots, N\}: \forall f \in \{1, \dots, F_n\}: \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Loc_{f,x,y}^n = 1$$

Jede Elementarzelle der Fabrikgrundfläche gehört zu maximal einem Fabrikobjekt:

$$\forall n, m \in \{1, \dots, N\}, n \neq m: \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y EL_{x,y}^n \cdot EL_{x,y}^m = 0$$

Elemente von Fabrikobjekten überschneiden sich nicht mit gesperrten Elementarzellen der Fabrikgrundfläche oder Weegelementen:

$$\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{n=1}^N EL_{x,y}^n \cdot (Rest_{x,y} + Road_{x,y}) = 0$$

Fabrikobjekte befinden sich innerhalb der Fabrik:

$$\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{n=1}^N EL_{x,y}^n \cdot Outer_{x,y} = 0$$

Das k -te Weegelement kommt nur maximal einmal vor:

$$\forall n, m \in \{1, \dots, N\}, n \neq m: \forall k \in \{1, \dots, Path_{max}\}: \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Path_{x,y,k}^{n,m} \leq 1$$

Das k -te Weegelement kommt nur vor, wenn alle Elemente davor auch vorkommen:

$$\forall n, m \in \{1, \dots, N\}, n \neq m: \forall k \in \{2, \dots, Path_{max}\}: \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Path_{x,y,k-1}^{n,m} \geq Path_{x,y,k}^{n,m}$$

Weegelemente überschneiden sich nicht mit gesperrten Elementarzellen der Fabrikgrundfläche oder Elementen außerhalb der Fabrik:

$$Road_{x,y} \cdot (Rest_{x,y} + Outer_{x,y}) = 0$$

Implementierung in GAMS

Im Anschluss an die Modellierung wurde das mathematische Optimierungsmodell zur Validierung in der Software GAMS umgesetzt. Die Implementierung erfolgt mit der Programmiersprache Python. Durch die Softwarebibliothek pyomo können Python und GAMS verknüpft werden. So ist es möglich ausgehend von einem Python-Interpreter automatisch ein GAMS-Modell zu generieren und zu berechnen.

Zur Optimierung wurde der Solver Baron verwendet. Dabei konnte festgestellt werden, dass nur für kleine Probleminstanzen, bis circa 10 Fabrikobjekte, in kurzer Zeit eine optimale Lösung hinsichtlich monokriterieller Zielfunktionen gefunden werden konnte. Bei größeren Probleminstanzen sowie multikriteriellen Zielfunktionen konnten keine Optima gefunden werden. Der Solver terminierte durch ein zeitliches Abbruchkriterium. Anhand dieses Verhaltens kann abgeleitet werden, dass exakte Lösungsverfahren nicht zur Optimierung der zugrundeliegenden Problemstel-

lung geeignet sind. Die geforderte Praxistauglichkeit bedingt die Optimierung größerer Probleminstanzen, wie es mit dem Softwaredemonstrator möglich ist (vgl. Kapitel 4.6).
 Des Weiteren konnte die Wegeplanung nicht umgesetzt werden. Durch die zusätzlichen Entscheidungsvariablen und die damit verbundene Steigerung der Komplexität, konnte GAMS das Optimierungsmodell nicht generieren und dementsprechend nicht lösen. Zur Bestimmung von Entfernungen wurde jeweils die euklidische Distanz zwischen zwei Elementarzellen (bspw. zwischen Quellen und Senken) berechnet.

4.4 Entwicklung des heuristischen Lösungsverfahrens

Anhand der Klassifizierung des Optimierungsproblems wurden im Rahmen einer Literaturrecherche Lösungsverfahren des Operations Research hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit analysiert. Das Optimierungsproblem wurde als NP-schwer klassifiziert, daher sind exakte Optimierungsverfahren (bspw. vollständige Enumeration oder Branch and Bound) nicht zur Lösung des Optimierungsproblems geeignet (vgl. Implementierung in GAMS in Kapitel 4.3). Für die weitere Betrachtung wurden die nach den Studien von HOSSEINI-NASAB ET AL., DRIRA ET AL., SHARMA ET AL. sowie SINGH ET AL. am häufigsten verwendeten Metaheuristiken Simulated Annealing, Tabu Search und Genetische Algorithmen ausgewählt (vgl. [Hos18, Dri07, Sha16, Sin06]). Es wurden mehrere Metaheuristiken gewählt, um deren Lösungsqualität bei Einzelanwendung und Kombination analysieren zu können.

Im nächsten Schritt wurden die heuristischen Lösungsverfahren konzeptioniert. Dazu wurden zunächst die Eingangs- und Ausgangsdaten sowie deren Datenformate und Verfügbarkeit mit den Unternehmen des PA abgestimmt. Eine Übersicht der Eingangs- und Ausgangsdaten ist in Bild 2 dargestellt. Darauf folgend wurde die Struktur der Optimierungsmethode erstellt (siehe Bild 3).

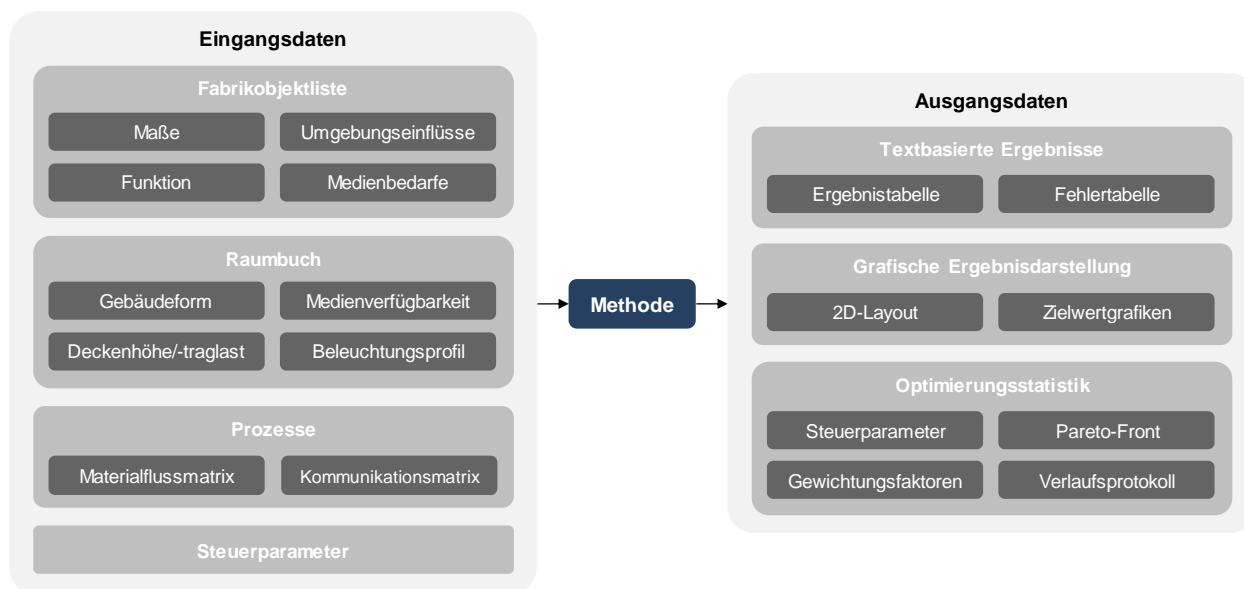


Bild 2: Übersicht der Eingangs- und Ausgangsdaten der Optimierung

Es folgte die Konzeptionierung von Subheuristiken. Diese sind bei der Anwendung von Metaheuristiken notwendig, da es sich bei Metaheuristiken um problemunspezifische Methoden handelt. Die Metaheuristiken steuern den Verlauf der Optimierung durch Akzeptieren oder Verwerfen von Layoutvarianten. Die Subheuristiken dienen dem Entwurf von zulässigen Layoutvarianten. Darüber hinaus wurden Methoden zur Prüfung der Restriktionseinhaltung erstellt. Nach der Konzeptionierung wurden die Heuristiken mit Python implementiert und getestet.

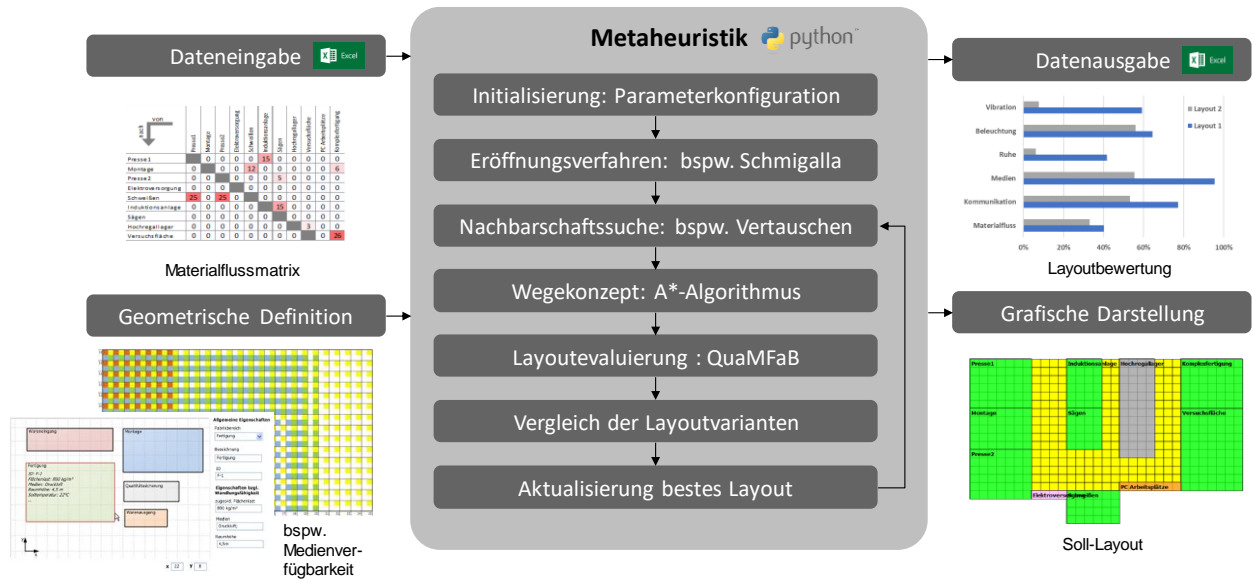


Bild 3: Generalisierte Struktur der Optimierungsmethoden

Lokale Suchalgorithmen

Die Metaheuristiken Simulated Annealing und Tabu Search sind sogenannte lokale Suchverfahren [Dom15]. Im Gegensatz zu populationsbasierten Verfahren wie dem genetischen Algorithmus haben lokale Suchverfahren nur eine aktuelle Lösungsvariante. Durch einen Transformationschritt (bspw. Verschieben von Fabrikobjekten) einer sogenannte Nachbarschaftssuche werden neue Layoutvarianten (Nachbarlösungen) erzeugt und basierend auf deren Zielfunktionswerten mit der aktuellen Lösungsvariante verglichen. Auf Basis der jeweiligen Logik des Suchverfahrens wird entschieden, ob die aktuelle Lösungsvariante durch die Nachbarlösung überschrieben wird oder ob die Nachbarlösung verworfen wird. Bei Erreichen eines vordefinierten Abbruchkriteriums wird die beste Lösungsvariante ausgegeben.

Simulated Annealing

Das Simulated Annealing (SA) ist ein von der Natur inspiriertes lokales Suchverfahren, welches von KIRKPATRICK ET AL. und CERNY parallel entwickelt und vorgestellt wurde [Kir83, Čer85]. Es simuliert das Abkühlen von Festkörpern, wie beispielsweise Metallen, in einem Wärmebad, deren Ziel es ist einen energiearmen Zustand im Atomgitter, respektive eine möglichst optimale Kombination der Entscheidungsvariablen, zu erreichen [Bur14]. Die Steuerung des Suchverlaufs basiert auf der Auswahl von Nachbarlösungen. Wenn die Nachbarschaftssuche zu einer besseren Lösung führt, wird diese direkt übernommen. Ist die Nachbarlösung schlechter als die aktuelle Lösungsvariante wird anhand der Boltzmann-Gleichung (vgl. Pseudocode 1) entschieden, ob die aktuelle Lösungsvariante durch die Nachbarlösung überschrieben wird oder nicht. Pseudocode 1 veranschaulicht den Ablauf des Verfahrens. Nähere Informationen können beispielsweise bei BURKE UND KENDALL oder PIRLOT gefunden werden [Bur14, Pir96].

Pseudocode 1: Simulated Annealing

```

set control parameter  $Temp, Temp_0, t := 0, CoolingRate, StepSize$ 
generate initial layout  $v$ 
evaluate  $v \rightarrow ZF_v$ 
 $v^* := v$  (set best layout variant  $v^*$ )
while  $Temp > Temp_0$ :
  for  $i$  in  $StepSize$ :
    generate neighbour variant  $v'$ 
    evaluate  $v' \rightarrow ZF_{v'}$ 
    if  $ZF_{v'} > ZF_v$ :
       $v := v'$  (overwrite  $v$  with  $v'$ )
      if  $ZF_{v'} > ZF_{v^*}$ :
         $v^* := v'$ 
    else
      calc  $p_{random} = \text{rand}[0,1)$  and  $p_B = e^{-\frac{ZV_{v'} - ZV_v}{Temp}}$ 
      if  $p_{random} < p_B$ :
         $v := v'$ 
   $Temp := Temp_0 \cdot CoolingRate^t$ 
   $t := t + 1$ 

```

Tabu Search

Die Tabu Search (TS) ist wie das Simulated Annealing ein lokales Suchverfahren, welches von GLOVER entwickelt wurde [Glo86]. Die Methode basiert auf dem „tabu“-setzen von Transformationsschritten. Im Rahmen einer Iteration wird im Gegensatz zum Simulated Annealing die gesamte Nachbarschaft, oder ein großer Teil dessen, durchsucht. Es wird die beste Nachbarlösung akzeptiert. Der dahinterstehende Transformationsschritt (bspw. verschiebe Fabrikobjekt n auf Position (x, y)) wird „tabu“-gesetzt und in eine Tabu-Liste eingetragen. Führt dieser Transformationsschritt im Anschluss wieder zur besten Lösung in der Nachbarschaft, wird dieser nicht ausgewählt, sondern die nächstbeste Nachbarlösung. Über die Länge der Tabu-Liste wird gesteuert, wie lange eine Lösung „tabu“ bleibt. Auf diese Weise wird das Kreisen um ein lokales Optimum vermieden. Sollte eine „tabu“-gesetzte Lösung besser als die beste bekannte Lösungsvariante sein, wird der Tabu-Mechanismus übergangen; es handelt sich dabei um ein sogenanntes Aspirationskriterium. Der Ablauf der Tabu Search ist in Pseudocode 2 veranschaulicht. Weiterführende Informationen finden sich in BURKE UND KENDALL, GENDREAU ET AL. sowie PIRLOT [Bur14, Gen10, Pir96].

```

set control parameter  $TL$  (tabu list),  $l$  (length of the tabu list),  $MaxIterations$ 
generate initial layout  $v$ 
evaluate  $v \rightarrow ZF_v$ 
 $v^* := v$  (set best layout variant  $v^*$ )
for  $i$  in  $MaxIterations$ :
    generate all neighbour variants  $N(v)$ 
    evaluate  $N(v) \rightarrow ZF_{v'} \forall v' \in N(v)$ 
    choose  $v' := \min(ZF_{v'})$  in  $N(v) \setminus TL$ 
     $v := v'$  (overwrite  $v$  with  $v'$ )
    if  $ZF_{v'} > ZF_{v^*}$ :
         $v^* := v'$ 
    update  $TL$ 

```

Subheuristiken der lokalen Suchverfahren

Layoutinitialisierung

Zu Beginn der lokalen Suchverfahren muss eine zulässige Ausgangslösung erstellt werden. Hierfür wurde zum einen das Dreiecksverfahren nach SCHMIGALLA adaptiert, zum anderen wurde eine zufallsbasierte Anordnung entwickelt. Zu Beginn dieser Methode werden die Fabrikobjekte sortiert. Dies erfolgt entweder zufällig oder absteigend nach deren Flächeninhalt. Anhand dieser Reihenfolge werden die Fabrikobjekte an eine zufällige Position mit ebenso zufälliger Drehung gesetzt. Sollte eine Anordnung nicht möglich sein, wird die Methode erneut gestartet.

Verbesserungsverfahren

Verschieben von Fabrikobjekten

Die Methode des Verschiebens von Fabrikobjekten ist eine Adaption der *Local Reallocation Search* von BOCK UND HOBERG. Dabei wird probiert, ein zufällig ausgewähltes Fabrikobjekt an eine zufällige Position zu verschieben. Die Rotation des Fabrikobjekts wird ebenfalls zufällig gewählt. Sofern eine Prüfung ergibt, dass alle Restriktionen eingehalten werden, wird das Fabrikobjekt gesetzt und die Methode verlassen. Sofern Restriktionen verletzt werden würden, wird eine neue zufällige Position und Rotation gewählt und erneut geprüft. Dieser Vorgang wird bis zu einem a priori gesetztem Iterationsmaximum wiederholt. Sollte dieses erreicht werden, wird zufällig ein neues Fabrikobjekt gewählt und der Prozess beginnt von vorne. Die maximale zulässige Entfernung zur ursprünglichen Position dient als Steuerparameter der Subheuristik.

Free Area Search

Bei der Free Area Search wird zunächst ein zufälliges Fabrikobjekt ausgewählt. Danach wird die Größe aller Freiflächen im Layout berechnet, in die das gewählte Fabrikobjekt passen könnte. Die ermittelten Freiflächen werden absteigend nach ihrer Größe sortiert. Es wird geprüft, ob das Fabrikobjekt unter Einhaltung der Restriktionen positioniert werden könnte. Ist dies der Fall, wird das Fabrikobjekt gesetzt und die Methode verlassen. Würden Restriktionen verletzt werden, wird die nächstgrößere Freifläche in der Liste geprüft. Sollte keine passende Freifläche vorhanden

sein, wird zufällig ein neues Fabrikobjekt gewählt und der Prozess beginnt von vorne. Bild 4 zeigt die Anwendung der Free Area Search bezüglich des Fabrikobjekts $n = 3$. Freifläche₃ würde in diesem Beispiel als erstes für die Prüfung ausgewählt.

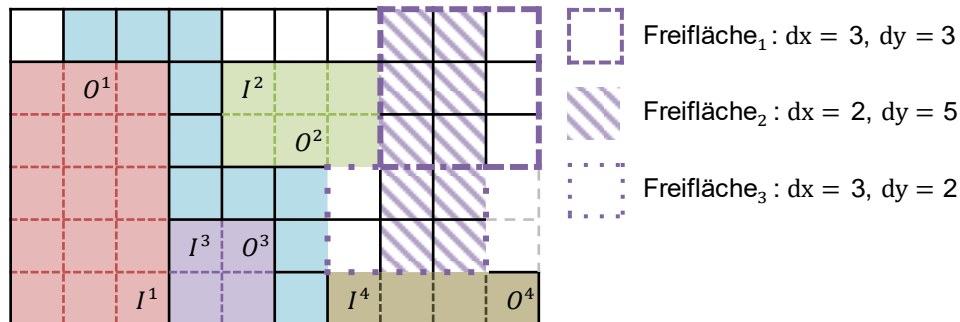


Bild 4: Beispiel für mögliche Freiflächen für Fabrikobjekt $n = 3$ bei Anwendung der Free Area Search

Vertauschen von Fabrikobjekten

Die Methode des Vertauschens von Fabrikobjekten ist von der *Multiple Elements Cyclic Exchange Search* von BOCK UND HOBERG inspiriert. Es werden zunächst zufällig mehrere Fabrikobjekte ausgewählt. Die Anzahl muss a priori vom Nutzer festgelegt werden. Dabei kann es sich auch um einen Bereich handeln, aus dem die Anzahl zufällig gezogen wird. Die Mindestanzahl ist zwei. Bei der Auswahl muss eine Größenanforderung eingehalten werden. Die gewählten Fabrikobjekte dürfen sich hinsichtlich des Flächeninhalts nur um den Faktor 1,5 unterscheiden. Dies erhöhte die Wahrscheinlichkeit, dass beim Positionstausch die (flächenbezogenen) Restriktionen eingehalten werden. Die gewählten Fabrikobjekte werden aus dem Layout entfernt. Im nächsten Schritt wird probiert, die Fabrikobjekte an der vorherigen Position der anderen Fabrikobjekte neu zu positionieren. Die Zuordnung der neuen Sollposition erfolgt in der Reihenfolge, in der sie ausgewählt wurden. Zur eigentlichen Positionierung wird die Methode Verschieben von Fabrikobjekten auf das zu positionierende Fabrikobjekt und die jeweilige Sollposition angewendet. Wobei der Steuerparameter maximale Entfernung zur Sollposition geringer gewählt wird als beim reinen Verschieben von Fabrikobjekten. Sofern alle Fabrikobjekte erfolgreich gesetzt werden konnten, wird die Methode verlassen. Sofern dies nicht möglich ist, werden zufällig neue Fabrikobjekte gewählt und die Methode von vorne ausgeführt.

Populationsbasierte Verfahren

Bei populationsbasierten Verfahren, wie den genetischen Algorithmen, werden im Gegensatz zu lokalen Suchverfahren mehrere aktuelle Lösungsvarianten parallel optimiert. Die Nachbarschaftssuche erfolgt ebenfalls anhand von Transformationsschritten. Zusätzlich können zur Transformation auch Eigenschaften respektive Entscheidungsvariablen zwischen den einzelnen Lösungsvarianten der Population ausgetauscht werden. Dies ermöglicht eine breite Durchsuchung des Lösungsraums. Die Auswahl der Lösungsvarianten basiert wiederum auf dem Vergleich der Zielfunktionswerte sowie der Auswahllogik des jeweiligen Verfahrens. Bei Erreichen eines vordefinierten Abbruchkriteriums wird die beste Lösungsvariante aus der Population zurückgegeben. Darüber hinaus können auch zwischengespeicherte Lösungsvarianten mit einem entsprechenden Zielfunktionswert zurückgegeben werden.

Genetischer Algorithmus

Die Genetischen Algorithmen (GA) gehören zu den von der Natur inspirierten populationsbasierten Metaheuristiken. Sie adaptieren die Vorgänge von DNA-Kreuzung und -Mutation über mehrere Generationen und simulieren dadurch eine Evolution. Der Begriff Genetische Algorithmen wurde von HOLLAND geprägt [Hol75]. Ein Genetischer Algorithmus besteht in der Regel aus den drei Komponenten Crossover (dt. Kreuzung), Mutation und Selektion, welche nachfolgend anhand ihrer Umsetzung erläutert werden. Im Rahmen von Genetischen Algorithmen werden zur Benennung von Lösungsvarianten häufig Begriffe der Biologie verwendet. Elternindividuen entsprechen den aktuellen Lösungsvarianten, beispielsweise werden bei der Initialisierung zunächst Elternindividuen erzeugt. Kinderindividuen werden bei der Nachbarschaftssuche durch Kreuzung von Eltern-DNA und Mutation erzeugt. Der Ablauf des Genetischen Algorithmus ist in Pseudocode 3 veranschaulicht. Weiterführende Informationen finden sich unter anderen in BURKE UND KENDALL SOWIE GENDREAU ET AL. [BUR14, GEN10].

Pseudocode 3: Genetischer Algorithmus

```

set control parameter  $g$  (number of generations),  $p$  (population size),  $mr$  (mutation rate),
generate initial population  $P$  of layouts  $v \in P$ 
evaluate  $P \rightarrow ZF_v \forall v \in P$ 
sort  $P$  based on  $ZF_v$  and store elite layouts  $v^+ \in EP$ 
 $v^* := v$  (set best layout variant  $v^*$ )
for  $i$  in  $g$ :
    generate children layouts  $v' \in C$  by crossover layouts  $v \in P$  with elite layouts  $v^+ \in EP$ 
    mutate  $v' \in C$  with probability  $mr$ 
    evaluate  $C \rightarrow ZF_{v'} \forall v' \in C$ 
    sort  $v, v'$  on descending  $ZF_v$ 
    select  $p$  layouts for new Population  $P$ 
     $v := v'$  (overwrite  $v$  with  $v'$ )
    if  $ZF_v > ZF_{v^*}: (\forall v \in P)$ 
         $v^* := v$ 

```

Codierung und Decodierung

Um Layouts mit einem Genetischen Algorithmus optimieren zu können, ist es notwendig diese in eine DNA-ähnliche Struktur zu bringen. Genauer müssen die Entscheidungsvariablen in Form von Chromosomen dargestellt werden. Hierzu wurde der Ansatz des Key Genetic Algorithm adaptiert (vgl. [Gon15]). Jedes Gen ist eine Kombination aus einem Positionsindex bezüglich der Reihenfolge im Chromosomen, der Entscheidungsvariable $Pos_{x,y,r,s}^n$ des jeweiligen Fabrikobjekts (vgl. mathematisches Modell in Kapitel 4.3) und dem euklidischen Abstand der Position (x, y) zum Koordinatenursprung $(x = 0, y = 0)$, siehe Bild 5.

Chromosom = ((1; (2; 2; 3); 2,828),..., (Gen-Nr.; (x; y; r); dist_eu_{n,(0,0)}),...)

Bild 5: Codiertes Layout dargestellt als Chromosom

Die **Codierung** erfolgt auf Basis des euklidischen Abstands zum Koordinatenursprung. Dieser wird für jedes Fabrikobjekt berechnet. Anschließend werden die Fabrikobjekte anhand dessen aufsteigend sortiert. Abschließend wird der Positionsindex zugeordnet.

Die **Decodierung**, also das Generieren eines Layouts aus einem Chromosom, erfolgt ebenfalls mit Hilfe von euklidischen Abständen. Ausgehend vom Koordinatenursprung werden die nächstgelegenen freien Elementarzellen der Fabrikgrundfläche bestimmt. Sollten mehrere infrage kommende Elementarzellen gleichweit entfernt sein, wird zusätzlich der Abstand zur vorherigen Position des Fabrikobjekts in die Entscheidung einbezogen. Anschließend wird geprüft, ob das jeweilige Fabrikobjekt an dieser Elementarzelle positioniert werden kann. Ist dies der Fall wird das Fabrikobjekt gesetzt. Anderenfalls wird die nächste freie Elementarzelle geprüft. Sollte es nicht möglich sein ein Fabrikobjekt auf der Fabrikgrundfläche zu positionieren, wird zunächst die Free Area Search auf das Fabrikobjekt angewendet. Sollte dies ebenfalls scheitern, wird das Chromosom von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Initialisierung

Die Initialisierung der Population erfolgt anhand drei verschiedener Methoden. Die ersten beiden Individuen der Population werden mit den zuvor beschriebenen Methoden Dreiecksverfahren nach SCHMIGALLA und zufallsbasierte Anordnung der Fabrikobjekte nach Flächeninhalt gebildet. Die weiteren Individuen der Population werden durch eine zufällige Zuweisung des Positionsindex im Chromosom gebildet.

Crossover

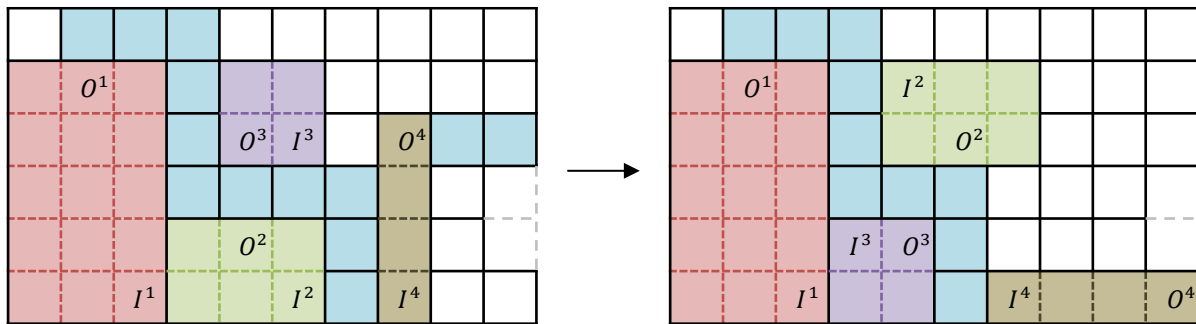
Der Crossover, also die Kreuzung von Elternindividuen beziehungsweise Chromosomen, basiert auf einem *elite parent crossover*. *Elite parents* sind die besten Layoutvarianten einer Population. Die Anzahl der *elite parents* kann vom Nutzer festgelegt werden.

Die Chromosomen der Population werden nacheinander zum Crossover herangezogen, um zusammen mit einem zufällig gewählten *elite parent* ein neues Individuum zu bilden. Die *elite parents* selbst werden übersprungen, sie können nur durch Mutation geändert werden. Beim eigentlichen Crossover wird für jedes Gen entschieden, ob der bestehende Positionsindex erhalten bleibt oder ob dieser durch den des *elite parent*-Gens überschrieben wird. Die Auswahl erfolgt mit einer vom Nutzer definierten Wahrscheinlichkeit (*crossover rate*).

Mutation

Die Wahrscheinlichkeit einer Mutation wird mit Hilfe, der vom Nutzer festgelegten *mutation rate* berechnet, indem dieser mit einem Zufallswert $\{0,1\}$ verglichen wird. Es wurden zwei Mutationsmethoden implementiert. Beide basieren auf der Veränderung der Position eines Gens im Chromosom.

Bei der Verschiebe-Mutation wird ein zufällig gewähltes Gen um eine zufällige Schrittweite im Chromosom vor- oder zurückverschoben. Die maximale Schrittweite kann vom Nutzer festgelegt werden. Bild 6 zeigt die resultierende Änderung im Layout bei der Decodierung des, um eine Stelle im Chromosom, vorwärtsverschobenen Gens von Fabrikobjekt $n = 3$.

Bild 6: Layoutänderung durch Verschiebe-Mutation von Fabrikobjekt $n = 3$

Bei der Vertausch-Mutation werden zunächst mehrere Gene zufällig ausgewählt. Die Anzahl der Gene kann vom Nutzer festgelegt werden, die Mindestanzahl ist zwei. Anschließend werden die Gene an eine bisherige Position eines anderen Gens verschoben.

Welche Mutationsmethode bei der Optimierung verwendet werden soll, kann vom Nutzer ausgewählt werden. Sofern beide Methoden gewählt wurden, wird zufällig ausgewählt, welche angewendet wird.

Selektion

Als Selektionsmethode wurde eine einfache *best fitness selection* genutzt. Hierbei werden alle der Eltern- und Kindindividuen herangezogen und anhand ihres Zielfunktionswerts ZF_v absteigend sortiert. Die besten Individuen werden nacheinander der neuen Population hinzugefügt, bis die Populationsgröße erreicht ist. Anschließend wird die Menge der *elite parents* aktualisiert.

Kombinationen von Metaheuristiken

Neben der alleinstehenden Nutzung der vorgestellten Metaheuristiken wurden auch die beiden Kombinationen Genetischer Algorithmus und Tabu Search (GA-TS) sowie Genetischer Algorithmus und Simulated Annealing (GA-SA) entwickelt. Dies erfolgte auf Basis von ersten Experimenten, die zeigten, dass der Genetische Algorithmus eine bessere Breitensuche und dass Tabu Search und Simulated Annealing eine bessere Tiefensuche ermöglichen. Die Kopplung der Metaheuristiken ist für beide Kombinationen gleich aufgebaut. Zunächst wird mit dem Genetische Algorithmus optimiert. Nach dessen Abbruch wird für die *elite parents* (vgl. Crossover) eine Tabu Search oder ein Simulated Annealing ausgeführt, wobei der Schritt der Layoutinitialisierung übersprungen wird.

4.5 Entwicklung des vorwettbewerblichen Softwaredemonstrators

Zu Beginn der Entwicklung des Softwaredemonstrators wurden die aufgenommenen Anforderungen (vgl. Kapitel 4.1) präzisiert und erweitert. Darüber hinaus wurden die Bestandteile des Softwaredemonstrators des Forschungsprojekts QuaMFaB (IGF-Nr. 18111 N) hinsichtlich einer Weiterverwendung analysiert. Es wurde entschieden den Softwaredemonstrator von Grund auf neu aufzusetzen. Jedoch wurden einige der bestehenden Funktionen und Benutzeransichten übernommen. Die Implementierung wurde in Front-End- und Back-End-Entwicklung aufgeteilt.

Das Front-End ist die Benutzeroberfläche, auch GUI (Graphical User Interface) genannt. Zunächst wurde der grundsätzliche Ablauf der Nutzeranwendung definiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Nutzer die Eingabe von obligatorischen Planungsdaten nicht überspringen kann.

Der erste Schritt der Implementierung war die Erstellung einer Excel-Vorlage für die Eingabe der planungsrelevanten Daten. Anschließend wurden die Eingabefenster und -masken des Software-demonstrators programmiert (siehe Bild 7).

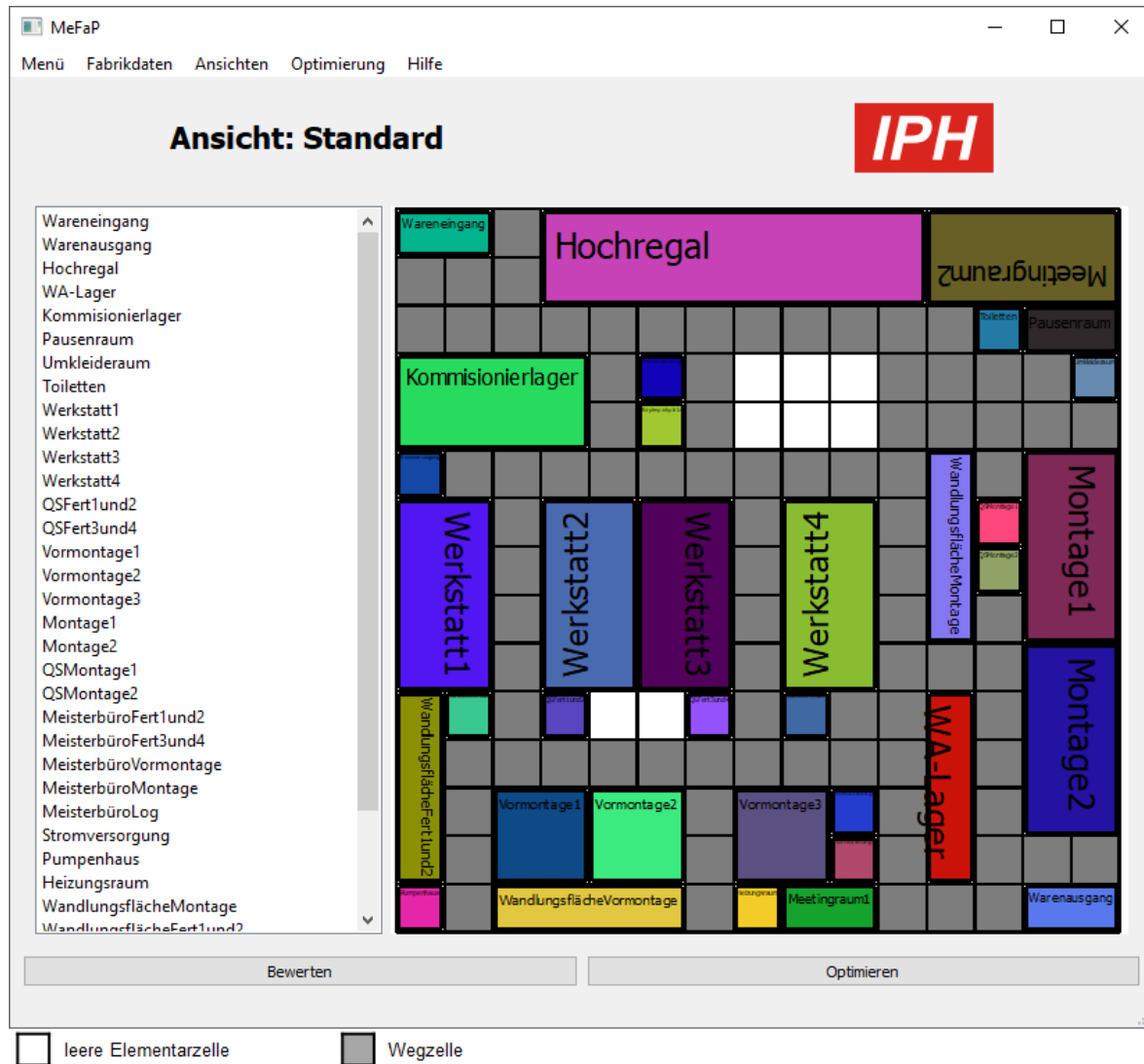


Bild 7: Benutzeroberfläche des Software-demonstrators mit einem manuell geplanten Layout

Abschließend erfolgte die Umsetzung der Ergebnisdarstellung. Hierbei wurde vor allem ein schneller und einfacher Vergleich verschiedener Layoutvarianten durch entsprechende Visualisierungen priorisiert. Die Implementierung erfolgt mit Python. Die Modellierung der grafischen Bestandteile erfolgt unter anderem mit der Softwarebibliothek Qt.

Das Back-End umfasst die im vorherigen Kapitel beschriebenen heuristischen Lösungsverfahren, sowie die Umsetzung weiterer Funktionen zur Datenverarbeitung, wie beispielsweise den Planungsdatenimport aus Excel. Da die heuristischen Lösungsverfahren bereits im vorherigen Arbeitsschritt implementiert wurden, mussten nur kleine Anpassungen an der Datenstruktur vorgenommen werden, um die Kompatibilität mit dem Front-End gewährleisten zu können.

Nach Abschluss der Implementierungen von Front-End und Back-End wurden diese zusammengeführt. Parallel erfolgte die Programmdokumentation in Form eines Leitfadens, der dem Nutzer eine einfache Anwendung des Software-demonstrators ermöglichen soll.

Neben den heuristischen Optimierungsmethoden zur Fabriklayoutplanung kann ein Nutzer auch

manuell Layoutvarianten planen und bewerten. Damit wurde in den Softwaredemonstrator zusätzlich ein Großteil der Funktionen des Softwaredemonstrators aus dem Forschungsprojekt QuaMFaB (IGF-Nr. 18111 N) integriert.

4.6 Validierung der Methode

Die Validierung der Optimierungsmethode beziehungsweise des Softwaredemonstrators erfolgte in zwei Schritten. Im ersten Schritt wurden mit GAMS und dem Softwaredemonstrator Experimente für eine kleine Problem Instanz durchgeführt und deren Ergebnisse verglichen. Diese Problem Instanz umfasst acht Fabrikobjekte mit in Summe 46 Elementarzellen und eine Fabrikgrundfläche von 10 x 10 Elementarzellen. Da in GAMS keine Wegeplanung umgesetzt werden konnte, wurden die Layouts in den Softwaredemonstrator übertragen und dort erneut bewertet. Die Analyse ergab, dass die heuristischen Lösungsverfahren bessere Ergebnisse liefern als der Solver Baron (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5: Auszug aus den Ergebnissen der Experimente mit kleiner synthetischer Problem Instanz

Zielstellung	MF_v [%]	PEA_v [%]	IL_v [%]	$Noise_v$ [%]	MV_v [%]	DC_v [%]	FC_v [%]	gew. Summe [%]
Gewichtung	15	15	14	14	14	14	14	100
GAMS (Baron)	14	80	58,1	95,4	87,1	67,9	63,2	66
TS	65	84	74,2	95,5	70,6	83,3	83,9	79,4
SA	77	80	68,6	95,5	66,3	85,9	88,2	80,2
GA	41	96	71,3	95,5	82,8	80,3	62,9	75,5
GA-TS	66	92	66,1	93,1	66,5	90,9	85,4	80
GA-SA	78	76	68,6	95,4	67,5	96,5	89,2	81,5

Zielstellung: vgl. Tabelle 3
TS: Tabu Search

SA: Simulated Annealing
GA: Genetischer Algorithmus

GA-TS: Kombination aus GA und TS
GA-SA: Kombination aus GA und SA

Der zweite Schritt der Validierung sollte anhand von zwei abgeschlossenen Layoutplanungsprojekten von Unternehmen des PA erfolgen. Entsprechende Planungsdaten konnten nicht zur Verfügung gestellt werden. Aus diesem Grund wurde ein Planungsprojekt eines Unternehmens des PA herangezogen. Hierfür wurden planungsrelevante Daten aufgenommen und anschließend Experimente durchgeführt. Die Problem Instanz umfasste 44 Fabrikobjekte mit in Summe 2200 Elementarzellen und eine Fabrikgrundfläche von 2500 Elementarzellen. Zum Vergleich wurde unabhängig voneinander von drei Fabrikplanungsexperten eine manuelle Layoutplanung durchgeführt. Die Ergebnisse wurden anschließend verglichen. In gleicher Weise wurde mit einem weiteren synthetischen Planungsproblem verfahren. Dieses umfasste 35 Fabrikobjekte mit in Summe 131 Elementarzellen und eine Fabrikgrundfläche von 16 x 16 Elementarzellen. Die manuelle Layoutplanung wurde jeweils mit einer vorgegebenen Gewichtung der Zielstellung durchgeführt. Die Analyse der Ergebnisse ergab, dass die heuristischen Lösungsverfahren bessere Ergebnisse liefern als die manuelle Planung durch Fabrikplanungsexperten (vgl. Tabelle 6). Die besten Ergebnisse lieferte die Tabu Search sowie die Kombination aus Genetischen Algorithmen und Simulated Annealing. Daher wird die Anwendung dieser Lösungsverfahren bei der Verwendung des Softwaredemonstrators empfohlen.

Tabelle 6: Auszug aus den Ergebnissen der Experimente mit großer synthetischer Problem Instanz

Zielstellung	MF_v [%]	MFO_v [%]	MFC_v [%]	PEA_v [%]	IL_v [%]	$Noise_v$ [%]	MV_v [%]	DC_v [%]	FC_v [%]	gew. Summe [%]
Gewichtung	0,15	0,1	0,1	0,15	0,05	0,15	0,1	0,1	0,1	1
manuell	72	33	12	99	88	83	90	88	77	72
TS	100	100	87	94	78	84	95	73	80	89
SA	74	71	31	97	90	85	95	88	84	80
GA	51	23	13	92	85	84	87	73	86	66
GA-TS	87	80	38	99	82	84	89	68	95	81
GA-SA	85	25	47	100	85	84	88	81	100	78

Zielstellung: vgl. Tabelle 3
TS: Tabu Search

SA: Simulated Annealing
GA: Genetischer Algorithmus

GA-TS: Kombination aus GA und TS
GA-SA: Kombination aus GA und SA

Neben der Validierung der Optimierungsmethode wurde anhand der synthetischen Problem Instanzen eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der Zielfunktion und den Steuerparametern durchgeführt.

Durch Variation der Gewichtungsfaktoren wurden die Zielkriterien untersucht. Dabei wurden zunächst für alle Zielkriterien monokriterielle Optimierungen durchgeführt. Anschließend wurden die Zielkriterien gleichmäßig gewichtet. Darüber hinaus wurden einzelne Zielkriterien paarweise hinsichtlich ihrer Wechselwirkungen untersucht. Zunächst konnte festgestellt werden, dass die Variation der Gewichtungsfaktoren einen Einfluss auf die Optimierung hat. Die monokriteriellen Optimierungen führten hinsichtlich der einzelnen Zielkriterien in der Regel zu besseren Ergebnissen als bei multikriterieller Optimierung mit gleichmäßiger Gewichtung (vgl. Tabelle 7). Darüber hinaus weisen die Zielkriterien Materialflusslänge, Überschneidungsfreiheit und Stetigkeit harmonisierende Tendenzen auf. Diese sind jedoch nicht absolut, weshalb eine generelle Substituierung ausgeschlossen wurde.

Tabelle 7: Vergleich von Ergebniswerten aus mono- und multikriteriellen Optimierungen mit kleiner Problem Instanz

Zielstellung	MF_v	MFO_v	MFC_v	AUR_v	PEA_v	MS_v	
monokriteriell	9.185 m	0	2	10	26	303	
multikriteriell	11.825 m	473	217	33	19	303	
Zielstellung	IL_v	$Noise_v$	MV_v	$Temp_v$	$Clean_v$	DC_v	FC_v
monokriteriell	40	2	1197 m	635 m	926 m	950 m	110 m
multikriteriell	21	2	808 m	428 m	605 m	1140 m	123 m

Basierend auf der Analyse der Steuerparameter der heuristischen Lösungsverfahren und deren Subheuristiken konnten Vorgabewerte für den Softwaredemonstrator abgeleitet werden, welche als Default-Werte gesetzt wurden. Diese sind im Anhang 2: Default-Werte für Steuerparameter dokumentiert. Der Steuerparameter *Länge der Tabuliste* weist eine starke Abhängigkeit zur Problem Instanz, genauer zur Anzahl der betrachteten Fabrikobjekte, auf.

4.7 Ergebnisdokumentation und Veröffentlichung

Die erzielten Ergebnisse wurden während der Projektlaufzeit dokumentiert und veröffentlicht. Die Veröffentlichungen erfolgten durch Artikel in Fachzeitschriften sowie bei der Vorstellung auf unterschiedlichen Veranstaltungen. Die Dokumentation, im Besonderen der Softwareleitfaden, unterstützt die Anwendung des Softwaredemonstrators und hilft damit bei der Verbreitung der Ergebnisse über den PA hinaus. Eine Auflistung der Veröffentlichungen sowie der Transfermaßnahmen ist in Kapitel 8 zu finden.

5. Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
 - 1 wissenschaftlich-technischer Mitarbeiter (TV-L 13) mit besonderen Kenntnissen im Bereich Fabrikplanung für 24 Monate
 - 1 wissenschaftlich-technischer Mitarbeiter (TV-L 13) mit besonderen Kenntnissen im Bereich mathematische Optimierungsmodelle und Heuristiken für 5 Monate
- Hilfskräfte (Einzelansatz A.3 des Finanzierungsplans)
 - wissenschaftliche Hilfskräfte (76h/Monat) als Unterstützung bei der Projektbearbeitung für 24 Monate
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
 - keine Geräte angeschafft
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
 - keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen

6. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit entspricht dem bewilligten Arbeitsplan und war für die Erreichung der im Projekt angestrebten Ziele notwendig. Die durchgeführten Tätigkeiten ermöglichten die Erfüllung der geplanten Ergebnisse der Arbeitspakete und bildeten die Grundlage zur Erreichung der Projektziele. Die Notwendigkeit der geleisteten Arbeit begründet sich darüber hinaus durch eine große Praxisrelevanz. Aus den Diskussionen des PA sowie basierend auf eigenen Erfahrung der durchführenden Forschungsstelle wurde deutlich, dass speziell KMU mit einer Fabriklayoutplanung und der damit verbundenen Investitionsentscheidung überfordert sind und auf externe Berater zugehen oder die Entscheidung subjektiv treffen. Diese Forschungslücke schließt sich mit der erarbeiteten Methode.

Die *Angemessenheit* des Projekts und damit der Arbeitsschritte ergibt sich aus der sachgemäßen Bearbeitung der Teilziele. Als Ergebnis wurde ein Softwaredemonstrator bereitgestellt, welcher produzierende Unternehmen bei der Planung und Bewertung eines Fabrik(grob)layouts unterstützt und damit direkt in der Industrie angewendet werden kann. Für die Entwicklung des Softwaredemonstrators war die gründliche Bearbeitung der Arbeitspakete und das Verwenden von wissenschaftlichen Methoden ein wichtiger grundlegender Faktor. Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete mussten so aufgearbeitet werden, dass sie im Rahmen der Implementierung des Softwaredemonstrators programmiert werden konnten. Die geleistete Arbeit entspricht dem begutachteten sowie bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

7. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen

Die Forschungsergebnisse liefern praxisorientierte Lösungen für produzierende Unternehmen sowie Fabrikplanungsdienstleister. Durch die Nutzung der Optimierungsmethode beziehungsweise des Softwaredemonstrators als objektive Entscheidungsunterstützung werden KMU in die Lage versetzt, stets ein hochwertiges Layout zu ermitteln. Hierdurch können die in Kapitel 2 beschriebenen Vorteile realisiert und die Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens erhöht werden. Der Vorteil gegenüber den bisherigen Verfahren liegt besonders in einer erhöhten Planungs- beziehungsweise Entscheidungssicherheit, wodurch das Risiko eines unwirtschaftlichen Fabrikbetriebs durch Fehlplanungen vermieden wird. Ferner wird der notwendige Planungsaufwand deutlich reduziert. Neben der Substitution bestehender Verfahren ist ein Einsatz zur Unterstützung des Entscheidungs- und Auswahlprozesses im Rahmen bestehender Verfahren denkbar (bspw. automatisierte Generierung eines Layouts als Vergleich zu manuell erstellten, um etwaige bislang nicht erkannte Anordnungsmöglichkeiten zu identifizieren). Darüber hinaus kann durch die quantitative Bewertung eines Ist-Layouts und dessen Vergleich mit einem automatisch generierten und bewerteten Soll-Layout schnell abgeschätzt werden, ob eine Rekonfiguration wirtschaftliche Vorteile bietet. Durch die mehrdimensionale Zielstellung werden Unternehmen zukünftig in die Lage versetzt, eine Layoutplanung ganzheitlich durchzuführen.

8. Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen

Erste Schritte zum Ergebnistransfer wurden bereits während der Projektlaufzeit durchgeführt. Weitere Maßnahmen zur Verwertung und Verbreitung der Projektergebnisse sind im Anschluss an das Forschungsprojekt geplant. Über den Austausch zwischen Forschungsstelle und den Unternehmen des PA sowie weiteren interessierten Unternehmen hat bereits ein erster Wissenstransfer stattgefunden. Dieser ist die Basis für die praktische Umsetzbarkeit der Ergebnisse. Die Mitglieder des PA bestanden aus produzierenden Unternehmen, Fabrikplanungsberatungsunternehmen sowie Hochschulen.

Die bereits durchgeführten sowie noch geplanten Transfermaßnahmen können dem Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft in Tabelle 8 und Tabelle 9 entnommen werden.

Tabelle 8: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft (spezifisch durchgeführt Transfermaßnahmen)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft, Erfahrungsaustausch	1. Abstimmungstreffen: Vorstellung des Forschungsvorhabens, Diskussion der ersten Ergebnisse und Workshop zur Anforderungsanalyse	08.05.2018
		2. Abstimmungstreffen: Vorstellung und Diskussion, der aus den Anforderungen abgeleiteten Restriktionen Vorstellung und Diskussion des Optimierungskonzepts	26.11.2018

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
		3. Abstimmungstreffen: Vorstellung des mathematischen Optimierungsmodells, der heuristischen Lösungsmethode, des Softwaredemonstrators und Diskussion der Ergebnisse von Validierungsexperimenten	05.02.2020
		Arbeitstreffen mit Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses: Diskussion, Datenaufnahme	gesamte Projektlaufzeit
Ansprache potenziell interessierter Unternehmen außerhalb des PA	Gewinnung für die Teilnahme am PA und unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Vorstellung der Projektziele und erzielter Ergebnisse bei interessierten Unternehmen vor Ort sowie fernmündlich	gesamte Projektlaufzeit
Versorgung der interessierten Fachöffentlichkeit, im besonderen KMU, mit Informationen	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Einrichtung einer Projekthomepage: http://mefap.ipf-hannover.de	01/2018
		Pressemitteilung zum Projektbeginn: „Auf Knopfdruck zum Fabriklayout“	10.01.2018
		Veröffentlichung: Aurich, P.; Stonis, M.; Nyhuis, P.: Entwicklung einer Methode zur quantitativen, mehrdimensionalen Fabriklayoutplanung. In: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Carl Hanser Verlag, 113 Jg. (2018), H. 3, S. 117-120. ISSN 0032-678X.	03/2018
		Interview-Beitrag: Fabrikplanung auf mathematischer Basis. In: RFID IM BLICK, Verlag & Freie Medien, 13 Jg. (2018) H. 3	24.04.2018
		Veröffentlichung: Aurich, P.; Stöber, R.; Nitsche, A.; Stonis, M.: Einsatzmöglichkeiten digitaler Werkzeuge im Fabrikplanungsprozess. In: Fabriksoftware, 24 Jg. (2019) H. 1, S. 25-28.	01/2019
		Veröffentlichung (eingereicht): Aurich, P.; Wesebaum, S.; Schulze, O.; Stonis, M.; Nyhuis, P.: A proposal of new and advanced objectives for the facility layout problem. In: OR Spectrum	10/2019
Weiterbildung	Akademische Ausbildung	Betreuung der Bachelorarbeit: „Analyse der Anforderungen an eine Methode zur automatisierten, quantitativen Fabriklayoutplanung“	04/2018 - 07/2018
		Betreuung der Bachelorarbeit: „Identifikation von Restriktionen und deren mathematische Modellierung für die Entwicklung einer Anwendung zur automatisierten, digitalen Fabriklayoutplanung“	07/2018 - 11/2018

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
		Betreuung der Diplomarbeit: „Entwicklung mathematischer Bewertungsmodelle zur Quantifizierung von Medienversorgung und Umgebungseinflüssen im Rahmen der Fabriklayoutplanung und Konzeptionierung einer Optimierungsmethode“	09/2018 - 01/2019
		Betreuung der Masterarbeit: „Entwicklung einer Methode zur automatisierten Optimierung von Fabriklayoutvarianten unter Berücksichtigung von multikriteriellen Zielstellungen“	10/2018 - 04/2019
		Betreuung der Masterarbeit: „Einfluss- und Wechselwirkungsanalyse von Ziel- und Bewertungskriterien bei der quantitativen, mehrdimensionalen Fabriklayoutplanung“	02/2019 - 07/2019
		Betreuung der Masterarbeit: „Entwicklung eines mathematischen Modells zur mehrdimensionalen Optimierung eines Fabriklayoutproblems“	04/2019 - 09/2019
		Betreuung der Studienarbeit: „Analyse der Anforderungen an ein Groblayout im Rahmen der automatisierten, mehrdimensionalen Fabriklayoutplanung“	04/2019 - 10/2019
		Betreuung der Studienarbeit: „Entwicklung und Validierung mathematischer Bewertungsmodelle von Umgebungseinflüssen für eine quantitative mehrdimensionale ad hoc Fabriklayoutbewertung“	04/2019 - 10/2019
		Anstellung von studentischen Hilfskräften	gesamte Projektlaufzeit

Tabelle 9: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft (spezifisch geplante Transfermaßnahmen)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft, Erfahrungsaustausch	Durchführung von weiterführenden Validierungsexperimenten zur stetigen Weiterentwicklung des Softwaredemonstrators	06/2020 ff.
Versorgung der interessierten Fachöffentlichkeit, im besonderen KMU, mit Informationen	Ergebnistransfer in die Wirtschaft und Wissenschaft	Pressemitteilung zum Projektende	07/2020
		Vorstellung der Projektziele und erzielter Ergebnisse bei interessierten Unternehmen vor Ort und fernmündlich	06/2020 ff.
		Veröffentlichung in Fachzeitschrift (European Journal of Operations Research o. ä.): geplante Themenschwerpunkt: - Vorstellung der Lösungsheuristik - Vorstellung der Validierungsexperimente	12/2020

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
	Akademische Ausbildung	Wissenschaftliche Qualifikation des Projektbearbeiters und Weiterverwendung der Projektinhalte zur Unterstützung der Anfertigung einer Dissertationsschrift	06/2020 ff.
		Integration in den Vorlesungsbetrieb der Universität Hannover, bspw. in die Vorlesung Fabrikplanung des Instituts für Fabrikanlagen und Logistik	10/2020 ff.
	Qualifizierung von KMU	Aufnahme von Projektinhalten in das Fabrikplanungsseminar des IPH	06/2020 ff.
Weiterentwicklung des Softwaredemonstrators	Bereitstellung der aktuellsten Version des Softwaredemonstrators	bspw. vollständige Integration der Bewertungsvorschriften aus dem Forschungsprojekt QuaMFaB (IGF-Nr.: 18111 N) [Bön17]	09/2020 ff.
Nutzung des Softwaredemonstrators in eigenen Fabrikplanungsprojekten	Effizienzsteigerung der Projekte	Beratungsangebote des IPH an interessierte KMU	09/2020 ff.

9. Einschätzung der Realisierbarkeit der geplanten Maßnahmen

Die Methode zur automatisierten, quantitativen und mehrdimensionalen Fabriklayoutplanung bietet KMU die Möglichkeit aufwandsarm Planungsentscheidungen zu treffen bzw. das aktuelle Fabriklayout zu hinterfragen, um so Investitionsentscheidungen abzusichern. Die Anwendung der entwickelten Methode ist für KMU einfach. Für die Nutzung sind keine zusätzlichen Investitionen (z. B. Gerätebeschaffungen, Beratungsleistungen) nötig. Der in diesem Vorhaben entwickelte Softwaredemonstrator ermöglicht eine aufwandsarme Anwendung der Ergebnisse. Zur Nutzung ist lediglich die Installation des betriebssystemunabhängigen Softwaredemonstrators sowie Standardsoftware (Excel) notwendig. Dies ist insbesondere für KMU mit begrenzten Ressourcen relevant. Da das IPH bezüglich Forschung und Beratung für Fabrikplanung überregional bekannt ist, fragen KMU regelmäßig hinsichtlich einer Unterstützung an. Das IPH wird auf Anfrage sowohl den Softwaredemonstrator als auch die projektbezogene Unterstützung bei der Fabrikplanung anbieten. Der Softwaredemonstrator wird zudem auf der Projekthomepage zum barrierefreien Download zur Verfügung gestellt.

10. Durchführende Forschungsstelle

Das IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH ist eine gemeinnützige Forschungseinrichtung, die eng mit der Universität Hannover kooperiert. Die Gesellschafter des IPH, Prof. Behrens, Prof. Overmeyer und Prof. Nyhuis, sind gleichermaßen Inhaber produktionstechnischer Lehrstühle an der Universität Hannover. Die Gliederung des IPH in die drei Abteilungen „Prozesstechnik“, „Produktionsautomatisierung“ und „Logistik“ spiegelt die Ausrichtung dieser Lehrstühle wider.

Während die universitären Schwesterinstitute des IPH hauptsächlich den Bereich der Grundlagenforschung abdecken, widmet sich das IPH hauptsächlich der anwendungsorientierten For-

sung und Entwicklung. Das IPH wurde 1988 mit Unterstützung des niedersächsischen Wirtschaftsministeriums gegründet und ist besonders der technologischen Förderung mittelständischer Industriebetriebe verpflichtet. Der Technologietransfer von der Universität in die Industrie erfolgt dabei hauptsächlich über gemeinsam mit der Industrie durchgeführte, öffentlich geförderte Verbundforschungsprojekte sowie über Fortbildungsseminare und Arbeitskreise für spezielle Zielgruppen aus Industrie und Handel. Darüber hinaus stellt das IPH laufend in einer Vielzahl ausschließlich industriefinanzierter Beratungsprojekte seine Praxisorientierung und Wettbewerbsfähigkeit unter Beweis.

Leiter der Forschungsstelle

IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis

Geschäftsführender Gesellschafter des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover, Tel.: 0511/27976-119

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer

Geschäftsführender Gesellschafter des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover, Tel.: 0511/27976-119

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Geschäftsführender Gesellschafter des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover, Tel.: 0511/27976-119

Dr.-Ing. Malte Stonis

Koordinierender Geschäftsführer des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover, Tel.: 0511/27976-119

Projektleiter

M. Sc. Paul Aurich

Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Logistik des IPH

11.Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 19666 N der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e. V. wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung sei an dieser Stelle gedankt.

12. Anhang

Anhang 1: Anpassung von Bewertungsvorschriften

In diesem Teil des Anhangs werden die angepassten Formulierungen der Berechnungsvorschriften vorgestellt. Der Zweck der Bewertungsvorschriften wurde nicht geändert, daher kann deren detaillierte Beschreibung dem Abschlussbericht des Forschungsprojekts QuaMFaB entnommen werden [Bön17]. Nachfolgend werden nur die Gründe der Anpassungen sowie die Anpassungen selbst beschrieben.

Medienverfügbarkeit

Mit der Berechnungsvorschrift Medienverfügbarkeit ist es möglich, den Medienbedarf eines Fabrikobjekts direkt mit der Verfügbarkeit auf der Fabrikgrundfläche abzugleichen. Die Bewertungsvorschrift kann für beliebig viele Medien einzeln angewendet werden. Bei der Dateneingabe muss definiert werden, in welchen Bereichen (Elementarzellen) des Layouts ein bestimmtes Medium (z. B. Strom, Druckluft, LAN, Kühlwasser, Gas) zur Verfügung steht ($PEAS_c$). Der Bedarf eines Mediums wird den Fabrikobjekten über eine binäre Variable zugeordnet ($PEAR_f$). Bei der Bewertung des Layouts prüft die Berechnungsvorschrift, ob eine definierte Mindestanzahl der verknüpften Elementarzellen zwischen Fabrikobjekt und Fabrikgrundfläche einen Zugang zum erforderlichen Medium bereitstellen. Die genaue Position des Bedarfspunktes innerhalb eines Fabrikobjekts wird nicht berücksichtigt. Die Positionierung der Maschinen innerhalb eines Fabrikobjekts erfolgt zum einen bei der Feinplanung des Layouts, zum anderen muss der Anschluss einer Maschine an das Versorgungsnetz in der Regel individuell angepasst werden.

$$PEA_v = \frac{PEAV_v}{PEAV_{max}}$$

PEA_v : Ergebniswert der Medienverfügbarkeit in Layoutvariante v [%]

$PEAV_v$: Verfügbarkeit eines Mediums in Layoutvariante v [-]

$PEAV_{max}$: Maximale Verfügbarkeit eines Mediums über alle Variant [-]

$$PEAV_v = \sum_{f=1}^F \sum_{u=1}^U Greater \left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (EL_{x,y}^f \cdot PAES_{x,y,u}), PAER_u^f - 1 \right) \forall s = 1, \dots, S$$

$EL_{x,y}^f$: Element von Fabrikobjekt f an Position (x, y)

$PAES_{x,y,u}$: Verfügbarkeit eines Mediums u in Zelle (x, y) [-]

$PAER_u^f$: Mindestanzahl der Elemente von Fabrikobjekt f , die ein Medium u benötigen [-]

Greater: die Funktion gibt eine 1 zurück, wenn der erste Wert des Terms größer ist als der zweite Wert des Terms; andernfalls wird 0 zurückgegeben.

Medienkompatibilität

Die Bewertungsvorschrift Medienkompatibilität dient der Bewertung der Verteilung aller notwendigen Medien über die Fabrikgrundfläche. Bei der ursprünglichen Formulierung mussten die Medien gegeneinander hinsichtlich ihrer Wichtigkeit gewichtet werden. Diese Gewichtung wurde aus der Bewertungsvorschrift entfernt, um eine zusätzliche subjektive Gewichtung zu umgehen. Dafür wurde die Berechnungsvorschrift Medienverfügbarkeit eingeführt.

$$MS_v = \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{c=1}^C MSA_{s,c}}{Num^s \cdot Num^c} \cdot 100\%$$

MS_v : Ergebniswert der Medien Kompatibilität von Variante v [%]

$MSA_{s,c}$: Verfügbarkeit eines Mediums s in Zelle c [-]

Num^s : Anzahl der Medien [-]

Num^c : Anzahl der Zellen der Fabrikgrundfläche [-]

Materialflusslänge

Die Bewertung der Materialflusslänge wurde an die Nutzung eines Wegenetzes aus Elementarzellen der Fabrikgrundfläche angepasst. Die Anwendung der Formeln setzt die Definition von Quellen und Senken der Fabrikobjekte voraus. Die Ermittlung der Distanz im Wegenetz kann beispielsweise über einen Kürzeste-Wege-Algorithmus (bspw. A*-Algorithmus) erfolgen.

Des Weiteren wurde die Vergleichsfunktion remodelliert. Von der ursprünglichen Funktion wurden 0 % als Ergebniswert zurückgegeben, wenn die Materialflusslänge der Variante doppelt so groß war, wie die beste bekannte Materialflusslänge. Dies beschränkt den Lösungsraum massiv, daher wurde ein unbeschränkter linearer Funktionsverlauf modelliert.

$$MF_v = \left(\frac{MFd_{min}}{MFd_v} \right) \cdot 100\%$$

MF_v : Ergebniswert der Materialflusslänge von Variant v [%]

MFd_v : Intensitätsgewichtete Materialflusslänge der Variant v [m/t]

MFd_{min} : Minimale intensitätsgewichtete Materialflusslänge über alle Varianten [m/t]

$$MFd_v = \sum_{m=1}^M (MFI_m \cdot d_m)$$

d_m : Länge des Materialflusses m [m]

MFI_m : Transportintensität von Materialfluss m [stk./t]

Überschneidungsfreiheit

Die Bewertungsvorschrift der Überschneidungsfreiheit wurde ebenfalls an die Nutzung eines Wegenetzes angepasst. Hierzu mussten Kreuzungspunkte neu definiert werden. Bei einer Elementarzelle im Wegeraster handelt es sich um eine Kreuzung, wenn zwei Materialflüsse nicht dieselben angrenzenden Elementarzellen nutzen (vgl. Bild 8, Bild 9 und Bild 10).

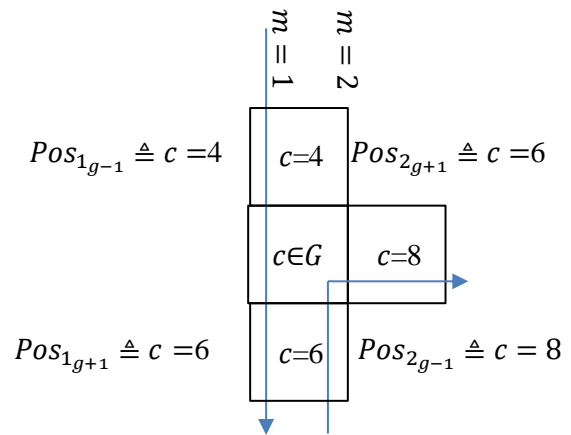
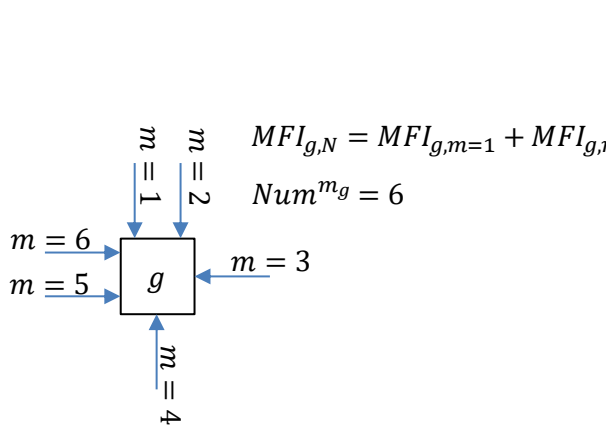


Bild 8: Kreuzung g mit Materialflüssen aus allen Himmelsrichtungen

Bild 9: Beispiel für eine Kreuzung

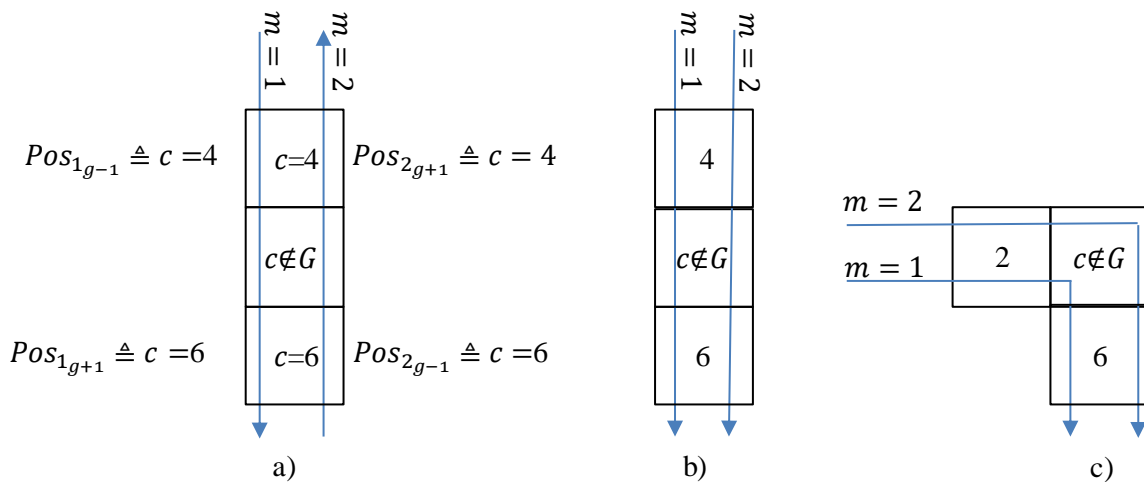


Bild 10: Beispiele für Wegzellen, die keine Kreuzung darstellen

$$MFO_v = \left(\frac{MFCr_{min}}{MFCr_v} \right) \cdot 100\%$$

MFO_v : Ergebniswert der Überschneidungsfreiheit von Variant v [%]

$MFCr_v$: Intensitätsgewichtete Materialflussüberschneidungen in variant v [-]

$MFCr_{min}$: Minimale intensitätsgewichtete Materialflussüberschneidungen über alle Varianten [-]

$$MFCr_v = \sum_{g=1}^G MFI_{g,N} + MFI_{g,E} + MFI_{g,S} + MFI_{g,W} \cdot \frac{Num^{m_g}}{Num^g}$$

$MFI_{g,N}$: Transportintensität der Materialflüsse aus Norden bzgl. Kreuzung g [stk./t]

$MFI_{g,E}$: Transportintensität der Materialflüsse aus Osten bzgl. Kreuzung g [stk./t]

$MFI_{g,S}$: Transportintensität der Materialflüsse aus Süden bzgl. Kreuzung g [stk./t]

$MFI_{g,W}$: Transportintensität der Materialflüsse aus Westen bzgl. Kreuzung g [stk./t]

Num^g : Anzahl der Kreuzungen Variante v , die die Heaviside-Sprungfunktion erfüllen [-]

Num^{m_g} : Anzahl der Materialflüsse aus allen Himmelsrichtungen an einer Kreuzung g [-]

$$FC_c = \sigma \left(\sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^{M'} (|Pos_{m_{n+1}} - Pos_{m'_{n-1}}| + |Pos_{m_{n-1}} - Pos_{m'_{n+1}}|) \cdot (|Pos_{m_{n+1}} - Pos_{m'_{n+1}}| + |Pos_{m_{n-1}} - Pos_{m'_{n-1}}|) \right) \mid Pos_{m_n} \triangleq Pos_{m'_n} \triangleq c$$

FG_c : Binärvariable bzgl. Zelle c die angibt, ob diese zur Menge der Kreuzungen gehört G [-]

Pos_{m_n} : Position des Knoten n von Materialfluss m [-]

σ : Sprungfunktion mit $\sigma \begin{cases} > 0 \rightarrow c \in G \mid FC_c = 1 \\ \leq 0 \rightarrow c \notin G \mid FC_c = 0 \end{cases}$ [-]

Der erste Term der letzten Gleichung bestimmt, ob die Vorgängerzelle von m gleich der Nachfolgerzelle von m' ist und umgekehrt. Der zweite Term wird verwendet, um zu bestimmen, ob die Materialflüsse dieselbe Vorgängerzelle und dieselbe Nachfolgerzelle haben.

Stetigkeit

Die Bewertungsvorschrift Stetigkeit wurde ebenfalls an die Nutzung des Wegenetzes angepasst. Eine Unstetigkeit ist als Richtungswechsel (abbiegen) des Materialflusses definiert.

$$MFC_v = \left(\frac{MFDC_{min}}{MFDC_v} \right) \cdot 100\%$$

MFC_v : Ergebniswert der Stetigkeit von Variant v [%]

$MFDC_v$: Intensitätsgewichtete Anzahl der Richtungswechsel von Variante v [-]

$MFDC_{min}$: Variante v mit der kleinsten intensitätsgewichteten Anzahl an Richtungswechseln [-]

$$MFDC_v = \sum_{m=1}^M (MFI_m \cdot NumDC_m)$$

$NumDC_m$: Anzahl der Richtungswechsel von Materialfluss m [-]

MFI_m : Transportintensität Materialfluss m [stk./t]

Flächennutzungsgrad

Die Bewertungsvorschrift Flächennutzungsgrad wurde nicht angepasst. Sie wird hier zur Vollständigkeit aufgeführt. Lediglich die Benennung der Variablen wurde geändert.

$$AUR_v = \frac{Area_v - Area_{v,o}}{Area_v} \cdot 100\%$$

AUR_v : Flächennutzungsgrad von Variante v [%]

$Area_v$: Fläche der Fabrikgrundfläche [m^2]

$Area_{v,o}$: Summe der Freiflächen in Variante v [m^2]

Beleuchtung

Die Bewertungsvorschrift wurde hinsichtlich der Beleuchtungsintensitäten angepasst. Diese waren zuvor in 4 Stufen unterteilt. Die neuen Stufen der Beleuchtungsintensitäten orientieren sich an der Arbeitsstättenrichtlinie – ASR 3.4 für Arbeitsplatzbeleuchtung und der DIN EN 12464-1. Die in der ASR 3.4 gegebenen Mindestanforderungen an verschiedene Arbeitsplätze wurden anhand einer gleichmäßigen Häufigkeitsverteilung der vorgegeben Beleuchtungsstärken (Lux [lx]) in sieben Stufen eingeteilt (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Stufen der Beleuchtungsintensität

Stufe	Beleuchtungsstärke [lx]
1	≤ 100
2	$> 100 - \leq 200$
3	$> 200 - \leq 300$
4	$> 300 - \leq 500$
5	$> 500 - \leq 750$
6	$> 750 - \leq 1000$
7	$> 1000 - \leq 1500$

$$IL_v = \left(1 - \frac{\sum_{c=1}^c \sigma(ILR_c^f - ILS_c)}{Num^c} \right) \cdot 100\%$$

IL_v : Ergebniswert der Beleuchtungserfüllung in Variante v [%]

Num^c : Anzahl der Zellen im Layout die nicht leer sind [-]

ILR_c^f : Beleuchtungsstärkeanforderungen von Zelle c des Fabrikobjekts f [lx-level]

ILS_c : Beleuchtungsstärke an Zelle c [lx-level]

σ : Heaviside-Sprungfunktion mit $\sigma \begin{cases} (ILR_c^f - ILS_c < 0 \rightarrow \sigma = 0 \\ (ILR_c^f - ILS_c \geq 0 \rightarrow \sigma = 1 \end{cases}$ [-]

Ruhe/Lärm

Die Bewertungsvorschrift basiert auf der Maximierung des Abstands zwischen lärmemittierenden und ruhebedürftigen Fabrikobjekten. Den Fabrikobjekten konnte ein dreistufiger Lärmfaktor zugeordnet werden (lärmemittierend, neutral, ruhebedürftig).

Die angepasste Modellierung basiert auf den tatsächlichen Ruheanforderungen beziehungsweise Lärmemissionen in Form eines zugeordneten Schalldruckpegels. Den Fabrikobjekten wird sowohl ein maximaler Schalldruckpegel als Ruheanforderungen sowie eine resultierende Schalldruckpegel als Lärmemission zugeordnet. Ausgehend vom Mittelpunkt der positionierten Fabrikobjekte und der gegebenen Lärmexposition wird für alle Elementarzellen der Fabrikgrundfläche der ankommende Schalldruckpegel berechnet. Berechnung basiert auf den Formeln der entfernungsbedingten Schalldruckpegelabnahme und der Addition von Schalldruckpegeln.

Für die entfernungsbedingten Schalldruckpegelabnahme wird von einer idealisierten Schallausbreitung im Freien ausgegangen, jedoch mit schallhartem Boden. Dies führt zu einer Schalldruckpegelreduktion von 6 dB bei Abstandsverdopplung.

$$L_2 = L_1 - 20 \log_{10} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$$

L_1 : Schalldruckpegel mit Referenzabstand r_1 zur Lärmquelle

L_2 : Schalldruckpegel mit Referenzabstand r_2 zur Lärmquelle

r_1 : Der Referenzabstand wird mit $r_1 = 1$ Meter für idealisierte Punktquellen angenommen

Die Addition von Schalldruckpegeln verschiedener Lärmquellen an einer Elementarzelle ergibt sich durch:

$$L_{Sum} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_n}{10}} \right)$$

Die Bewertungsvorschrift vergleicht die summierte Lärmemission an den Elementarzellen mit der Ruheanforderung der Fabrikobjekte.

$$Noise_v = \left(1 - \frac{\sum_{c=1}^c \sigma(NE_c - NS_c^f)}{Num^c} \right) \cdot 100\%$$

$Noise_v$: Ergebniswert des Lärms für Variante v [%]

Num^c : Anzahl der Elementarzellen die in der Layoutvariante v nicht leer sind [-]

NS_c^f : Ruhebedarf der Zelle c von Fabrikobjekt f [-]

NE_c : Lärmemission an Zelle c [-]

σ : Heaviside-Sprungfunktion mit $\sigma \begin{cases} NE_c - NS_c < 0 \rightarrow \sigma = 0 \\ NE_c - NS_c \geq 0 \rightarrow \sigma = 1 \end{cases}$ [-]

Erschütterungsfreiheit/Vibration

Die Bewertungsvorschrift Erschütterungsfreiheit wurde ebenfalls linearisiert. Darüber hinaus wurde die Detaillierung der Vibrationsanregung und -empfindlichkeit erhöht. Zuvor gab es drei Stufen (stark erschütterungsemittierend, normal erschütterungsemittierend und normal erschütterungsempfindlich, stark erschütterungsempfindlich). Mit der neuen Detaillierung kann jedem Fabrikobjekt ein dreistufiger und separater Anregungs- und Empfindlichkeitsfaktoren zugeordnet werden. Daraus ergibt sich eine stärkere Differenzierung der Vibrationsbeziehungen (siehe Tabelle 11). Beispiele für die Einordnung sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 11: resultierende Vibrationsfaktoren

			Sensitivitätsfaktor: $MVS_{f'}$		
			niedrig	mittel	hoch
			2	3	4
Anregungsfaktor: MVE_f	niedrig	2	4	5	6
	mittel	3	5	6	7
	hoch	4	6	7	8

Tabelle 12: Beispiele für die Kategorisierung bzgl. Anregungs- und Empfindlichkeitsfaktor

Anregungsfaktor	Beispiele
$MVE_f = 2$ (niedrig)	Montage, Logistik- & Lagerbereiche, Messlabore etc.
$MVE_f = 3$ (mittel)	Fräsen, Bohren, Schleifen etc.
$MVE_f = 4$ (hoch)	Pressen, Stanzen etc.
Sensitivitätsfaktor	Beispiele
$MVS_{f'} = 2$ (niedrig)	Pressen, Stanzen, Logistik- & Lagerbereiche etc.
$MVS_{f'} = 3$ (mittel)	Fräsen, Bohren, Montage etc.
$MVS_{f'} = 4$ (hoch)	Messlabore, Schleifen, Honen, Läppen, manuelle Feinmontage etc.

$$MV_v = \left(\frac{MVd_v}{MVd_{max}} \right) \cdot 100\%$$

MV_v : Ergebniswert der Erschütterungsfreiheit in Variante v [-]

MVd_v : Vibrationsgewichtete Distanz in Variante v [m]

MVd_{max} : Variante v mit der größten vibrationsgewichteten Distanz [m]

$$MVD_v = \frac{1}{8} \cdot \sum_{f=1}^F \sum_{f'=1}^{F'} \left(\frac{MVF_{f,f'}}{=MVS_f + MVE_{f'}} \cdot \sqrt{(x_{Cen_f} - x_{Cen_{f'}})^2 + (y_{Cen_f} - y_{Cen_{f'}})^2} \right)$$

x_{Cen_f}, y_{Cen_f} : Schwerpunktkoordinate des anregenden Fabrikobjekts f [-]

$x_{Cen_{f'}}, y_{Cen_{f'}}$: Schwerpunktkoordinate des angeregten Fabrikobjekts f' [-]

$MVF_{f,f'}$: Vibrationsfaktor der Beziehung der Fabrikobjekte f und f' [-]

MVE_f : Anregungsfaktor von Fabrikobjekt f [-]

$MVS_{f'}$: Empfindlichkeitsfaktor von Fabrikobjekt f' [-]

Temperatur

Die Berechnungsvorschrift Temperatur wurde ebenfalls linearisiert.

$$Temp_v = \left(\frac{Tempd_v}{Tempd_{max}} \right) \cdot 100\%$$

$Temp_v$: Ergebniswert der Temperatur in Variante v [-]

$Tempd_v$: Temperaturgewichtete Distanz in Variante v [m]

$Tempd_{max}$: Variante v mit der größten temperaturgewichteten Distanz [m]

$$Temp_v = \frac{1}{2} \cdot \sum_{f=1}^F \sum_{f'=1}^{F'} \left(|TE_f - TE_{f'}| \cdot \sqrt{(x_{Cen_f} - x_{Cen_{f'}})^2 + (y_{Cen_f} - y_{Cen_{f'}})^2} \right)$$

x_{Cen_f}, y_{Cen_f} : Schwerpunktkoordinate des Fabrikobjekts f [-]

$x_{Cen_{f'}}, y_{Cen_{f'}}$: Schwerpunktkoordinate des Fabrikobjekts f' [-]

TE_f : Faktor der Hitze bzw. Hitzeempfindlichkeit des Fabrikobjekts f [-]

$TE_{f'}$: Faktor der Hitze bzw. Hitzeempfindlichkeit des Fabrikobjekts f' [-]

Sauberkeit

Die Berechnungsvorschrift Sauberkeit wurde ebenfalls linearisiert.

$$Clean_v = \left(\frac{Cleand_v}{Cleand_{max}} \right) \cdot 100\%$$

$Clean_v$: Ergebniswert der Sauberkeit in Variante v [%]

$Cleand_v$: Sauberkeitsgewichtete Distanz in Variante v [m]

$Cleand_{max}$: Variante mit der größten sauberkeitsgewichteten Distanz [m]

$$S_v = \frac{1}{2} \cdot \sum_{f=1}^F \sum_{f'=1}^{F'} \left(|CE_f - CE_{f'}| \cdot \sqrt{(x_{Cen_f} - x_{Cen_{f'}})^2 + (y_{Cen_f} - y_{Cen_{f'}})^2} \right)$$

x_{Cen_f}, y_{Cen_f} : Schwerpunktkoordinate des Fabrikobjekts f [-]

$x_{Cen_{f'}}, y_{Cen_{f'}}$: Schwerpunktkoordinate des Fabrikobjekts f' [-]

CE_f : Faktor der Verschmutzung bzw. Schmutzempfindlichkeit des Fabrikobjekts f [-]

$CE_{f'}$: Faktor der Verschmutzung bzw. Schmutzempfindlichkeit des Fabrikobjekts f' [-]

Direkte Kommunikation

Die Bewertungsvorschrift direkte Kommunikation wurde entsprechender der Bewertungsvorschrift Materialflusslänge an das Wegenetz angepasst und linearisiert.

$$DC_v = \left(\frac{DCd_{min}}{DCd_v} \right) \cdot 100\%$$

DC_v : Ergebniswert für den direkten Kommunikation von Variante v [%]

DCd_v : Länge des intensitätsgewichteten direkten Kommunikationsfluss in Variante v [m/t]

DCd_{min} : Minimale Länge des intensitätsgewichteten direkten Kommunikationsfluss über alle Variante [m/t]

$$DCd_v = \sum_{k=1}^K (CFI_k \cdot d_k)$$

CFI_k : Kommunikationsintensität der Kommunikationsbeziehung k [-/t]

d_k : Länge des Kommunikationsfluss der Kommunikationsbeziehung k [m]

Formale Kommunikation

Die Bewertungsvorschrift formale Kommunikation wurden ebenfalls linearisiert.

$$FC_v = \left(\frac{FCd_{min}}{FCd_v} \right) \cdot 100\%$$

FC_v : Ergebniswert der formalen Kommunikation von Variante v [%]

FCd_v : Länge des formalen Kommunikationsfluss in Variante v [m]

FCd_{min} : Minimale Länge des formalen Kommunikationsfluss über alle Varianten [m]

$$FCd_v = \sum_{f=1}^F \min \left\{ \sqrt{(x_f - x_{f^{Meeting}})^2 + (y_f - y_{f^{Meeting}})^2} \mid f^{Meeting} \in \{1, \dots, F^{Meeting}\} \right\}$$

x_f, y_f : Schwerpunktkoordinaten des Fabrikobjekts f in Variante v [-]

$x_{f^{Meeting}}, y_{f^{Meeting}}$: Schwerpunktkoordinaten des Meetingraums $f^{Meeting}$ in Variante v [m]

Anhang 2: Default-Werte für Steuerparameter

Tabelle 13: Default-Steuerparameter der Tabu Search

Steuerparameter	Default-Wert
Länge der Tabu Liste	$\frac{1}{3}$ · Anzahl der Fabrikobjekte
Anzahl der Iterationen	1000 - 2000
Eröffnungsverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • zufallsbasierte Anordnung der Fabrikobjekte nach Flächeninhalt • Schmigalla
Verbesserungsverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Verschieben von Fabrikobjekten (Schrittweite: Mittelwert der Fabrikobjektkantenlänge) • Free Area Search

Tabelle 14: Default-Steuerparameter des Simulated Annealing

Steuerparameter	Default-Wert
Starttemperatur	10 - 15
Abkühlungsrate	0,8 - 0,9
Schrittweite	250 - 1000
Eröffnungsverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • zufallsbasierte Anordnung der Fabrikobjekte nach Flächeninhalt • Schmigalla
Verbesserungsverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Verschieben von Fabrikobjekten (Schrittweite: Mittelwert der Fabrikobjektkantenlänge) • Free Area Search • Vertauschen von Fabrikobjekten (Objektanzahl: 2 - 3)

Tabelle 15: Default-Steuerparameter des Genetischen Algorithmus

Steuerparameter	Default-Wert
Generationsanzahl	1000 - 2500
Populationsgröße	25 - 50
Crossover-Rate	0,05 - 0,15
Anzahl <i>Elite parents</i>	5 - 10
Mutationsrate	0,05 - 0,15
Mutationsverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Verschiebe-Mutation (Schrittweite: 3 - 5) • Vertausch-Mutation (Objektanzahl: 2 - 4)

13. Literaturverzeichnis

- [Boc07] Bock, S.; Hoberg, K.: Detailed layout planning for irregularly-shaped machines with transportation path design. In: European Journal of Operational Research, 177. Jg. (2007), H. 2, S. 693-718.
- [Bön17] Böning, C.: Abschlussbericht: Quantitative, mehrdimensionale ad hoc Fabrikbewertung mittels mathematischer Modellierung von fabrikplanungsrelevanten Eigenschaften. 2017.
- [Bur14] Burke, E.K.; Kendall, G. (Hrsg.): Search methodologies, Introductory tutorials in optimization and decision support techniques. 2. Aufl., Springer, New York, 2014.
- [Čer85] Černý, V.: Thermodynamical approach to the traveling salesman problem, An efficient simulation algorithm. In: Journal of Optimization Theory and Applications, 45. Jg. (1985), H. 1, S. 41-51.
- [Cis05] Cisek, R.: Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen. Herbert Utz Verlag, München, 2005.
- [Dom15] Domschke, W.; Drexl, A.; Klein, R. et al.: Einführung in Operations Research. 9. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [Dri07] Drira, A.; Pierreval, H.; Hajri-Gabouj, S.: Facility layout problems: A survey. In: Annual Reviews in Control, 31. Jg. (2007), H. 2, S. 255-267.
- [Gen10] Gendreau, M.; Potvin, J.-Y. (Hrsg.): Handbook of Metaheuristics. Springer, Boston, MA, USA, 2010.
- [Glo86] Glover, F.: Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. In: Computers & Operations Research, 13. Jg. (1986), H. 5, S. 533-549.
- [Gon15] Gonçalves, J. F.; Resende, M. G.C.: A biased random-key genetic algorithm for the unequal area facility layout problem. In: European Journal of Operational Research, 246. Jg. (2015), H. 1, S. 86-107.
- [Gru15] Grundig, C.-G.: Fabrikplanung. 5. Aufl., Hanser, München, 2015.
- [Her13] Hering, N.; Schmidt, C.; Brandenburg, U. et al.: Gestaltung eines wandlungsfähigen Produktionssystems für den Maschinen- und Anlagenbau. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 108. Jg. (2013), H. 12, S. 967-971.
- [Hol75] Holland, J. H.: Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. MIT press, Cambridge, London, 1975.
- [Hos18] Hosseini-Nasab, H.; Fereidouni, S.; Fatemi Ghomi, S. M. T. et al.: Classification of facility layout problems, A review study. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94. Jg. (2018), H. 3, S. 957-977.

- [Kir83] Kirkpatrick, S.; Gelatt, C. D., JR; Vecchi, M. P.: Optimization by simulated annealing. In: Science. vol. 220, (1983), no. 4598, pp. 671-680.
- [Köb11] Köbler, J.; Pleuler, M.: Digitale Fabrikplanung bei KMUs. In: Beiträge aus Forschung & Technik,(2011), S. 105-107.
- [Pir96] Pirlot, M.: General local search methods. In: European Journal of Operational Research, 92. Jg. (1996), H. 3, S. 493-511.
- [Sch14] Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [Sha16] Sharma, P.; Singhal, S.: A review of objectives and solution approaches for facility layout problems. In: International Journal of Industrial and Systems Engineering, 24. Jg. (2016), H. 4, S. 469-489.
- [Sin06] Singh, S. P.; Sharma, R. R. K.: A review of different approaches to the facility layout problems. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 30. Jg. (2006), H. 5-6, S. 425-433.
- [Tom02] Tompkins, J. A.; Withe, J. A.; Bozer, Y. A. et al.: Facilities Planning. 3. Aufl., Wiley, New York, 2002.
- [VDI11] Verein Deutscher Ingenieure: Fabrikplanung, Blatt 1: Planungsvorgehen. Februar 2011.
- [Wie14] Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung. 2. Aufl., Hanser, München, Wien, 2014.
- [Zäh03] Zäh, M. F.; Cisek, R.; Sudhoff, W. et al.: Mit Mobilität zu mehr Strukturvariabilität. In: wt Werkstattstechnik online, 93. Jg. (2003), H. 4, 327-331.