

Schlussbericht vom 31.03.2023

zu IGF-Vorhaben Nr. 21514 N

Thema

Methode zur optimalen Planung des Umzugs von Fabrikobjekten im Zuge der Realisierung eines neuen Fabriklayouts (OptiFaU)

Berichtszeitraum

01.01.2021 – 31.03.2023

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik e.V. - BVL

Forschungseinrichtung(en)

Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH

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. Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen in der Realisierung von Fabriklayoutkonzepten.....	7
4.2. Ableitung von möglichen Entscheidungsalternativen in der Realisierung von Fabriklayoutkonzepten.....	10
4.3. Konzeption und Formulierung eines mathematischen Optimierungsmodells	13
4.4. Implementierung des Modells in einer Lösungsheuristik.....	17
4.5. Übertragung der Projektergebnisse in einen Software-Demonstrator	22
4.6. Validierung der Projektergebnisse mittels Praxisbeispielen in einer Parameterstudie.....	25
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
13. Literaturverzeichnis.....	57

1. Zusammenfassung

Die Realisierung eines geplanten Layoutkonzepts ist mit zahlreichen Fragestellungen und Unsicherheiten verbunden. Welcher Zeitraum ist für die Realisierung vorzusehen? Kann der Umzug während der laufenden Produktion erfolgen? Welche internen Transportmittel können verwendet werden? Sind externe Experten in die Planung und Durchführung zu involvieren. Die Antworten auf viele dieser Fragen erfolgt nach heutigem Stand auf Basis von Expertenwissen. Insbesondere in KMU ist dieses Expertenwissen meist nicht vorhanden. Die Erfahrung aus Beratungsprojekten zeigt außerdem, dass die Planung meist nach Bauchgefühl erfolgt.

Vor diesem Hintergrund sollte im Rahmen des Forschungsprojekts eine Methode zur optimalen Planung eines Umzugs entwickelt werden. Grundsätzlich handelt es sich bei der Umzugsplanung als Teil der Realisierungsvorbereitung im Fabrikplanungsprozess [VDI11] um ein Problem der Termin- oder Projektplanung. Da zusätzlich beschränkte Ressourcen (insb. Personal) Berücksichtigung finden müssen, bildet die Problemklasse *der Ressource Constrained Project Scheduling Problems (RCPSP)* die Grundlage für die Entwicklung der Planungsmethode [Hab18]. Zur Erzeugung eines Umzugsplans (bzw. Termin- oder Projektplans für den Umzug) sind die vorhandenen layoutseitigen Restriktionen als bedingte Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen in ein RCPSP zu integrieren. Nach aktuellem Kenntnisstand existiert keine Methode, die diese Problemstellung adressiert. Da derartig komplexe mathematische Optimierungsprobleme nicht exakt lösbar sind, ist die Entwicklung heuristischer Lösungsverfahren notwendig.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden zunächst relevante Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen in der Planung und Durchführung von Fabrikumzügen gemeinsam mit dem Projektbegleitenden Ausschuss diskutiert und validiert. Darauf aufbauend konnten erste Anforderungen an die Planungsmethode und den zu entwickelnden Software-Demonstrator abgeleitet werden. Als Ergebnisse der Einflussanalyse wurden jene Faktoren identifiziert, welche den Rahmen der Optimierung bilden. Einige dieser Faktoren wurden in eine Auswahlunterstützung für proaktive Entscheidungen in Form von Umzugs-Strategien überführt (z. B. externe Durchführung). Die Planungsmethode zur Erzeugung optimaler Umzugspläne fußt auf einem mathematischen Optimierungsmodell. Hierfür wurden die definierten Anforderungen in Restriktionen überführt und wiederum als Nebenbedingungen formuliert. Die Zielfunktion des Modells setzt sich aus der Minimierung der Umzugsdauer und einer Minimierung der Stillstandzeiten der Fabrikobjekte zusammen. Die auf dem Modell aufbauende Methode zur Erzeugung optimaler Umzugspläne basiert auf einem Genetischen Algorithmus als heuristisches Lösungsverfahren. Zur einfachen Anwendung der Projektergebnisse wurde die Planungsmethode in einem vorwettbewerblichen Software-Demonstrator mit zugehörigem Leitfaden implementiert. Der Demonstrator bietet Nutzern neben der Durchführung eines Optimierungsdurchlaufs auch die Möglichkeit, vorgegebene Umzugs-Reihenfolgen auf Machbarkeit zu prüfen. Abschließend wurden die Planungsmethode und der Software-Demonstrator mittels Praxisbeispielen validiert. Die Beispieldaten wurden synthetisch erzeugt und durch den Projektbegleitenden Ausschuss bestätigt. Die Validierung ergab, dass sich bereits nach etwa 20 Generationen eine sehr gute Ergebnisqualität der erzeugten Umzugspläne einstellt. Weiterhin hat der vorhandene Flächennutzungsgrad einen Einfluss auf eine erhöhte Dauer der Optimierung und die entsprechende Lösungsgüte. Eine exakte Lösung des gesamten Optimierungsproblems ist bereits bei einer kleinen Probleminstanz von fünf Fabrikobjekten innerhalb von 24 Stunden nicht gelungen. Die Notwendigkeit der Nutzung eines heuristischen Lösungsverfahrens konnte daher bestätigt werden.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Die Verkürzung von Produktlebenszyklen und der gleichzeitig zunehmende Kundenanspruch zur Produktindividualisierung erfordert eine immer häufigere und schnellere Integration neuer Produkte in die Produktionsprozesse von Unternehmen [Her13, Zäh03, Wie14]. Die Einbindung neuer Betriebsmittel ist überwiegend mit einer Anpassung des Fabriklayouts verbunden. Dies führt nahezu branchenunabhängig zu einer höheren Anzahl von Fabrikplanungsprojekten mit dem Charakter einer Fabrikreorganisation (vgl. [Sch14]). Bei einer Fabrikreorganisation wird das Layout einer bestehenden Fabrik umgestaltet, wobei die Umsetzung parallel zum laufenden Betrieb erfolgt [VDI11]. Die Realisierung eines neuen Layouts ist einer der größten Aufwands- und Kostentreiber im Rahmen eines Fabrikplanungsprojekts [Gru15]. Der Realisierungsaufwand wird maßgeblich durch den Grad der Veränderung zwischen Ist- und Soll-Layout (Anzahl der verschobenen Fabrikobjekte) und durch die Güte der Realisierungsvorbereitung beeinflusst. Entsprechend des Fabrikplanungsprozesses der VDI-Richtlinie 5200 erfolgt die Realisierungsvorbereitung nach der Detailplanung eines Soll-Fabriklayouts [VDI11]. Wesentlicher Bestandteil der Realisierungsvorbereitung ist die Umzugsplanung. Im Rahmen der Umzugsplanung muss für die Fabrikobjekte (z. B. Maschinen, Arbeitsplätze) eine zeitliche Abfolge von Umzugsschritten (z. B. Ab- und Aufbau, Transport, Vorbereitungsdauer für Fundamente oder technische Gebäudeausstattung) unter Berücksichtigung von Restriktionen (minimale Unterbrechung der Produktion, begrenzte Personalverfügbarkeit) erstellt werden (vgl. [Cis05, Gru15]). Die Umzugsschritte der einzelnen Fabrikobjekte können in Form von Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen dargestellt werden. Darüber hinaus sind diese Beziehungen der Fabrikobjekte untereinander verknüpft. Bspw. muss zunächst der Abbau eines Fabrikobjekts erfolgen, bevor der Aufbau eines anderen Fabrikobjekts an dieser Stelle stattfinden kann. Dabei muss das abgebaute Fabrikobjekt sowie die zugehörigen Einrichtungen (z. B. Schaltschränke, Pufferregale) direkt auf der neuen Stellfläche oder einer Freifläche platziert werden können. Diese Abhängigkeiten können als bedingte Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen dargestellt werden und prägen maßgeblich die Komplexität des Planungsproblems.

Die derzeit am häufigsten von produzierenden KMU sowie externen Umzugsdienstleistern genutzte methodische Unterstützung zur Umzugsplanung ist die Netzplantechnik (vgl. [Paw14]). Dabei wird unter Berücksichtigung der Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen und der Dauer der Umzugsschritte ein Umzugsplan erstellt (vgl. [Sch15b]). Die Qualität der manuellen Anwendung der Netzplantechnik hängt allerdings stark von der Erfahrung und Methodenkompetenz der planenden Personen ab. Mit algorithmischen Lösungsansätzen der Netzplantechnik können die beschriebenen Probleme der manuellen Planung überwunden werden. Jedoch setzt die Modellierung des Umzugsproblems eine tiefgreifende Methodenkompetenz und Programmierkenntnisse voraus. Die manuelle oder algorithmische Netzplantechnik ist für KMU auf Grund des fehlenden Fachpersonals (vgl. Kapitel 2.2.1) häufig nur schwer anwendbar. Der größte Nachteil der Netzplantechnik ist, dass nur eine zeitliche Planung erfolgt (vgl. [Zim08, Dom15]). Die Verfügbarkeit von Freiflächen zum Transportieren, Puffern, Lagern oder Zwischenbetreiben von Fabrikobjekten kann während der Planung nicht berücksichtigt werden. Unternehmen benötigen eine Entscheidungsunterstützung zur Umzugsplanung, mit welcher sowohl zeitliche als auch räumliche Restriktionen berücksichtigt werden können. Durch eine solche Methode soll KMU die Möglichkeit gegeben werden, die bereits heute im Rahmen der Grundlagenermittlung und Realisierungsvorbereitung erhobenen Informationen (z. B. Umzugsschritte und -dauer sowie deren Abhängigkeiten, Freiflächen) für einen objektiven und transparenten Umzugsplanungsprozess nutzen zu können.

3. Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse

Die zentrale forschungsleitende Hypothese des Forschungsvorhabens lautet:

Eine durch Methoden des Operations Research unterstützte Umzugsplanung, welche zeitliche und räumliche Restriktionen berücksichtigt, liefert im Vergleich zu einer manuellen bzw. Netzplantechnik basierten Planung Ergebnisse mit kürzeren Umzugs- und Produktionsausfallzeiten sowie reduzierten Umzugsschritten.

Neben der Untersuchung der Arbeitshypothese sollen die identifizierten Optimierungsziele (bspw. Minimierung der Umzugsdauer oder der Anzahl der Umzugsschritte) hinsichtlich gegenseitiger Wechselwirkungen untersucht werden. Ziel des Forschungsvorhabens ist dementsprechend die Entwicklung einer Methode zur optimalen Planung des Umzugs von Fabrikobjekten im Zuge der Realisierung eines neuen Fabriklayouts unter Berücksichtigung zeitlicher und räumlicher Restriktionen. Dabei soll für den Fall einer Reorganisation des Layouts einer bestehenden Fabrikhalle bei laufendem Betrieb die optimale zeitliche Abfolge von Umzugsschritten mittels Verfahren des Operations Research ermittelt werden. Die zentrale Innovation besteht in der erstmaligen Kombination der Problemstellungen aus Graphentheorie und Facility Layout Problem zur Modellierung des Planungsproblems, welches der Umzugsplanung zugrunde liegt.

Im Rahmen des angestrebten Forschungsvorhabens soll eine zweistufige Entscheidungsunterstützung für die Umzugsplanung entwickelt werden. In der ersten Stufe soll mit Hilfe eines computergestützten morphologischen Kastens die Auswahl einer Umzugs-Strategie erleichtert werden. Der morphologische Kasten soll KMU zunächst als Leitfaden bei der Erhebung notwendiger Informationen für die Umzugsplanung dienen (bspw. verfügbare Freiflächen, Traglast des Hallenkrans). Im Weiteren sollen KMU bei der Entscheidung unterstützt werden, welche Umzugsschritte intern durch eigenes Personal und welche durch einen externen Lieferanten (bspw. Fundamentbauer, Elektroinstallateur) ausgeführt werden sollen. Dies hilft KMU unmittelbar bei der Leistungsbeschreibung für die Angebotseinholung der fremd zu vergebenden Umzugsschritte. Basierend auf der ausgewählten Umzugs-Strategie und nach Abschluss des Vergabeverfahrens, bei dem die notwendigen Umzugsschritte im Rahmen der Pflichtenhefterstellung durch die Lieferanten präzisiert wurden, werden KMU in der zweiten Stufe durch Methoden des Operations Research bei der eigentlichen Umzugsplanung unterstützt [Nit21]. Durch den Einsatz eines heuristischen Lösungsverfahrens wird ein Umzugsplan generiert, bei dem für jeden Umzugsschritt eine ausreichende Freifläche zum Transport, Puffern oder Zwischenbetrieb von Fabrikobjekten verfügbar ist. Zur Erfüllung des Gesamtziels sind nachfolgende Teilziele zu erreichen:

Teilziel 1:

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag:

Teilziel 1 ist die Entwicklung einer Entscheidungsunterstützung für die unternehmensindividuelle Auswahl von zuvor abgeleiteten Umzugs-Strategien.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:

Im Rahmen des ersten Arbeitspakets wurden zunächst die Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen auf die Planung und Durchführung von Fabrikumzügen im Rahmen von Reorganisationsprojekten mit dem Projektbegleitenden Ausschuss identifiziert und diskutiert. Darauf aufbauend wurde eine Einflussanalyse durchgeführt, um jene Faktoren zu extrahieren, die einen hohen Einfluss auf das Umzugsprojekt ausüben und andere Faktoren, die stark beeinflusst werden. Im Ergebnis wurden die extrahierten Faktoren in ein Wirkmodell überführt, welches die Zusammenhänge der Aufgaben in der Planung und Durchführung von Fabrikumzügen visualisiert. Als Umzugs-Strategie wurden in diesem Zusammenhang proaktive Entscheidungskriterien und deren mögliche Ausprägung in Relation zu den vorhandenen Rahmenbedingungen gesetzt. Folgende Elemente kann eine Umzugs-Strategie demnach beinhalten:

- Demontageoption
- Vorproduktion
- Umzugsabschnitte
- Zwischenlageroption
- Umzugszeitpunkt
- Verantwortlichkeiten

Die Ergebnisse wurden in eine Entscheidungs-Matrix überführt und in MS Excel implementiert. Die zentralen Ergebnisse sind Abschnitt 4.2 sowie dem Anhang A2-A7 zu entnehmen. Das Teilziel wurde erfüllt.

Teilziel 2:

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag:

Teilziel 2 ist die Entwicklung einer Methode zur optimalen Planung des Umzugs von Fabrikobjekten im Zuge der Realisierung eines neuen Fabriklayouts.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:

Fußend auf den Ergebnissen der Einflussanalyse und der Extrahierung proaktiver Entscheidungsalternativen wurde ein mathematisches Modell formuliert, welches aus einem Layoutkonzept für eine Reorganisation einen Terminplan erzeugt. Da insbesondere die Kombination aus layoutseitigen, zeitlichen und ressourcenseitigen Restriktionen zu einer sehr hohen Komplexität des Problems führt, wurde ein heuristisches Lösungsverfahren zur Erzeugung optimaler Terminpläne in Form eines Genetischen Algorithmus entwickelt. Die Planungsmethode generiert zunächst eine definierte Anzahl an Startlösungen. Die Lösungen setzen sich dabei aus drei Lösungs-Sequenzen zusammen. Sie enthalten alle Informationen bzgl. der Umzugsreihenfolge, der gewählten Demontage-Optionen sowie der Lagerungs-Zeitpunkte aller Fabrikobjekte. Basierend auf den Startlösungen erfolgt die Verbesserung der Lösungen über mehrere Generationen mittels Kreuzung, Mutation und Selektion. Die zentralen Ergebnisse sind Abschnitt 4.3 und 4.4 zu entnehmen. Das Teilziel wurde erfüllt.

Teilziel 3:

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag:

Teilziel 3 ist die Implementierung und Validierung der Optimierungsmethode anhand von Praxisbeispielen und die Ableitung von verallgemeinerbarem Wissen aus einer Parameterstudie.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:

Zur aufwandsarmen Anwendbarkeit der Projektergebnisse wurde die entwickelte Planungsmethode in einem vorwettbewerblichen Software-Demonstrator implementiert. Ein potenzieller Nutzer hat dabei die Möglichkeit, neben einem gesamten Optimierungs-Durchgang auch einzelne Lösungen auf Machbarkeit zu prüfen. Sowohl die Methode als auch der Demonstrator bieten demnach eine hilfreiche Unterstützung in Entscheidungssituationen im Rahmen der Planung von Fabrikumzügen. Im Rahmen einer Parameterstudie wurde weiterhin der Zusammenhang zwischen Flächennutzungsgrad, Größe der Fabrikobjekte auf die Demontagetiefe und Zwischenlagerung der Fabrikobjekte untersucht. Ebenfalls wurde eine Relation zur Gewichtung der Zielgrößen hergestellt. Die Schlussfolgerungen aus den Untersuchungsergebnissen stehen in Abhängigkeit zu den gewählten Untersuchungs-Szenarien, welche stark abhängig von den Eigenschaften der betrachteten Fabrikobjekte (insb. Zeit- und Ressourcendaten der Umzugsvorgänge) und den layoutseitigen Eigenschaften (insb. Größe, Flächennutzungsgrad, Anordnung der Objekte) sind. Die Untersuchung hat gezeigt, dass durch die Planungsmethode eine sukzessive Verbesserung der Zielkriterien erfolgt (Validierung). Verallgemeinerbares Wissen konnte in Bezug auf die gewählten Szenarien geschaffen werden. Das Teilziel wurde erfüllt.

4. Erzielte Ergebnisse

4.1. Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen in der Realisierung von Fabriklayoutkonzepten

Die Realisierung eines geplanten Fabriklayouts ist ein zentraler Bestandteil des Fabrikplanungsprozesses nach VDI 5200 [VDI11]. Auf die Phase der Detail- oder Feinplanung folgen die Schritte Realisierungsvorbereitung, Realisierungsüberwachung und Hochlaufbetreuung. Die Umzugsplanung, deren wesentlicher Teil die terminliche Planung des Umzugsprojekts ist, wird wiederum in die Phase der Realisierungsvorbereitung eingeordnet. Inhalt der Umzugsplanung ist die Ermittlung der notwendigen Umzugsvorgänge, die Erfassung vorhandener Restriktionen (z. B. gebäudeseitig) sowie die zeitliche Anordnung der Umzugsvorgänge unter Berücksichtigung vorhandener Ressourcen (z. B. Personal oder Lagerfläche). Hierzu ist zunächst ein tiefgehendes Verständnis für die Herausforderungen in der Planung und Durchführung von Fabrikumzügen im Rahmen von Reorganisationsprojekten geschaffen worden. Auf Basis einer umfassenden Literaturanalyse wurden bekannte Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen aus den Disziplinen Fabrikplanung, Terminplanung und Projektplanung in Bezug auf Fabrikumzüge analysiert. Anschließend wurden die ermittelten Faktoren durch Experteninterviews im Rahmen des projektbegleitenden Ausschusses (PA) bestätigt und ergänzt. Um eine Betrachtung der Problemstellung aus verschiedenen Perspektiven zu ermöglichen, wurde auf das Wissen und den Erfahrungsschatz von Umzugsdienstleister:innen (z. B. Scholpp GmbH), Fabrikplaner:innen (z. B. Munschek GmbH) und produzierenden Unternehmen (z. B. INNO TAPE GmbH) gleichsam zurückgegriffen. Daraus wurde ersichtlich, dass die Herausforderungen in der Planung teilweise von den Anforderungen in der Durchführung eines Umzugsprojekts abweichen können [Nit22]. Planerisch ist bspw. relevant, welche Zeitpunkte an externe Gewerke kommuniziert werden müssen (z. B. Meilensteine). In der Durchführung liegt ein zentraler Fokus auf der Minimierung des unternehmerischen Risikos, bspw. in Bezug auf Beschädigungen oder langen Produktionsstillständen. Das erste Zwischenergebnis beinhaltet einen Katalog relevanter Faktoren im Kontext von Umzugsprojekten. Diese Faktoren wurden weiterhin inhaltlich kategorisiert. Unterschieden wurde zwischen technischen, logistischen, organisatorischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Faktoren mit einer Relevanz für die vorhandene Problemstellung (s. Bild 1). Eine vollständige Auflistung ist in Anhang A1 einzusehen.

Kategorie	Einflussgröße	Ausprägungen
Logistische Einflussfaktoren	Transportmittel	Art, maximale Traglast, Flurbindung
	Transportstrecke	Distanz, Engstellen, Untergrund
	Transportsicherung	Sicherungsmaterial, Verpackung, Notwendige Transportlage Objekte
Technische Einflussfaktoren	Objekteigenschaften	Gewicht, Abmessungen, Aufnahmepunkte Transport, geometrischer Aufbau, Medienanschlüsse
	Demontagetiefe	Zerlegbarkeit der Objekte, Komplexitätsgrad De- und Remontage, Risiko von Beschädigungen
	Platzbedarf Objekt	Räumliche Restriktionen unterschiedliche

Bild 1: Einflussfaktoren auf die Planung und Durchführung von Fabrikumzügen (Auszug) [Nit22]

In einer frühen Phase der Realisierungsvorbereitung stehen Unternehmen in vielen Fällen vor der Fragestellung, ob es unterschiedliche Möglichkeiten der Durchführung eines Fabrikumzugs

geben kann. Diese Entscheidungen beeinflussen die nachfolgende Terminplanung maßgeblich, weil dadurch Rahmenbedingungen geschaffen und entsprechende Restriktionen für die terminliche Planung des Umzugs gesetzt werden. Dies kann wiederum auch einen Einfluss auf die vorliegende Zielsetzung des Fabrikumzugs haben. Bevor mit der Konzeptionierung und Formulierung eines mathematischen Optimierungsmodells begonnen werden konnte, mussten diese Entscheidungsalternativen zunächst identifiziert und diskutiert werden. Hierfür bilden die Ergebnisse der initialen Erfassung relevanter Faktoren auf die Planung und Durchführung von Umzugsprojekten die Basis für weiterführende Untersuchungen. Aufbauend auf den ersten Diskussionen wurde eine Einflussanalyse der identifizierten Faktoren durchgeführt, um deren Beeinflussbarkeit, sowie die Einflussstärke im Rahmen von Umzugsprojekten bewerten zu können. Hierzu sind die ermittelten Faktoren in einer Einflussmatrix gegenübergestellt und hinsichtlich der gegenseitigen Einflussnahme in Gesprächen mit den Mitgliedern des PA bewertet worden. Die Bewertung erfolgte unter der Maßgabe, die Aufgabe der Planung von Fabrikumzügen zu fokussieren und Aspekte der Durchführung aus planerischer Sicht zu beurteilen. Die Ergebnisse der Einflussanalyse wurden anschließend in ein Diagramm übertragen, um die Faktoren hinsichtlich Ihrer Einflussstärke und Beeinflussbarkeit kategorisieren zu können (s. Bild 2).

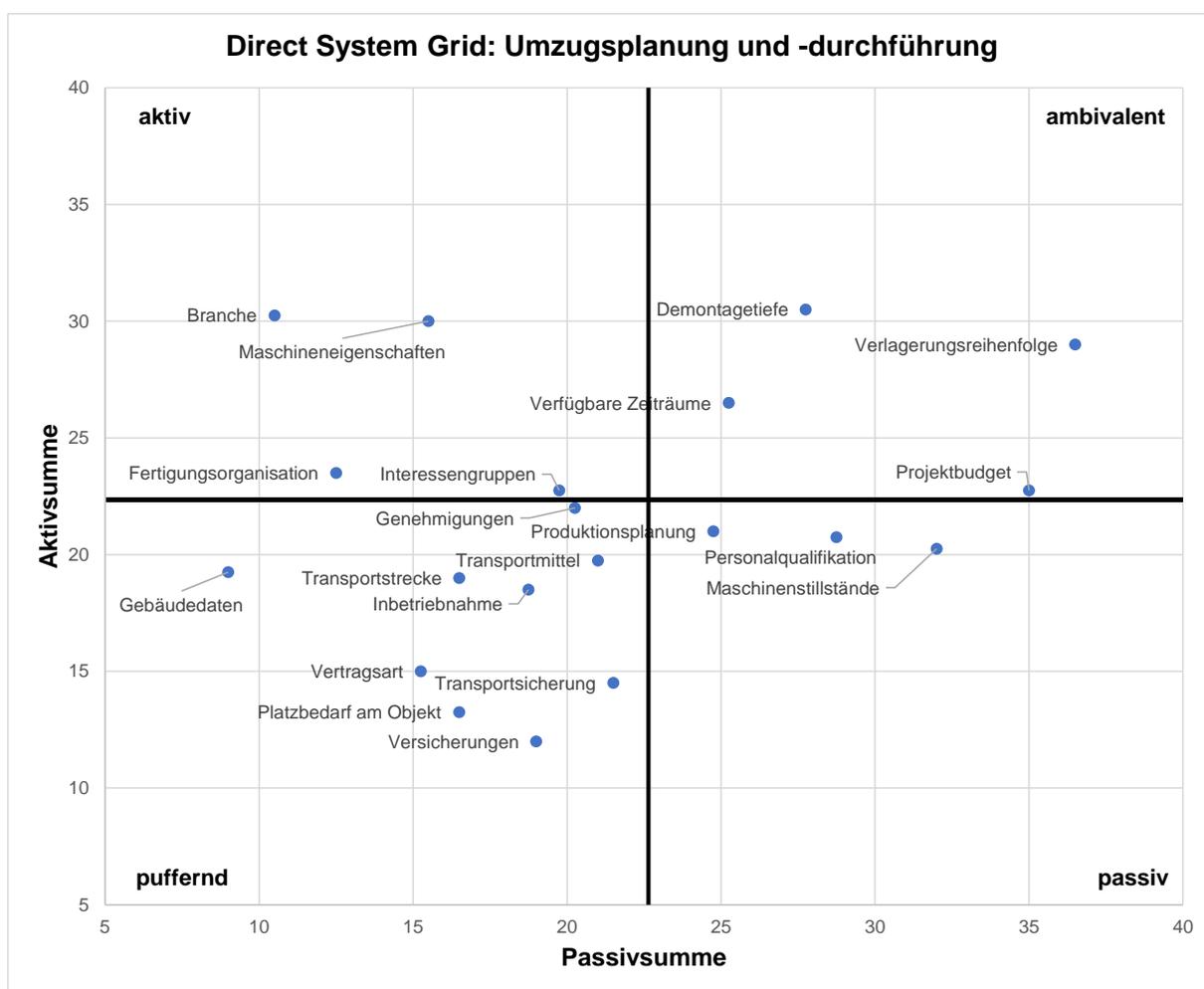


Bild 2: Einflussanalyse relevanter Faktoren in der Planung und Durchführung von Fabrikumzügen [Nit23a]

Die bewerteten Einflussfaktoren lassen sich vier verschiedenen Kategorien zuordnen. Puffernde Faktoren weisen weder eine hohe Beeinflussbarkeit noch eine hohe Einflussstärke auf und können daher weitgehend vernachlässigt werden. Passive Faktoren unterliegen zwar einer hohen Beeinflussung, wirken sich aber kaum auf andere Faktoren aus. Aktive Faktoren sind wiederum kaum beeinflussbar, haben aber einen signifikanten Einfluss auf das Gesamtsystem. Schließlich sind die ambivalenten Faktoren jene mit einer hohen Einflussstärke bei gleichzeitig hoher Beeinflussbarkeit. Die ambivalenten Größen werden zunächst durch die Demontagetiefe, welche den

Grad der Demontage eines einzelnen Fabrikobjekts darstellt, beschrieben. Das Projektbudget ist weiterhin von Relevanz, da das Projekt in kurzer Zeit und bei minimalem Ressourcenaufwand durchgeführt werden soll. Verfügbare Zeiträume sind zu betrachten, wenn das Projekt ggf. während der laufenden Produktion durchgeführt werden muss. Ein weiterer entscheidender Faktor wird durch die Verlagerungsreihenfolge der Fabrikobjekte adressiert. Im Bereich der passiven Größen befinden sich weiterhin die entstehenden Maschinenstillstände, die notwendige Personalqualifikation sowie Aspekte der Produktionsplanung (z. B. Bestandsbildung). Als aktive Größen sind die Maschineneigenschaften, die Fertigungsorganisation und auch Interessengruppen (z. B. Maschinenhersteller) zu berücksichtigen. Die Branchenabhängigkeit wurde meist im Kontext der Fertigungsorganisation genannt, daher soll diese Größe ausgeklammert werden [Nit23a].

Die Einflussanalyse mit anschließender Einordnung der identifizierten Faktoren in die vier vorgestellten Kategorien bildet die Grundlage für die Übertragung in ein qualitatives Wirkmodell (s. Bild 3). Das Wirkmodell soll eine zusammenfassende, übersichtliche Darstellung zentraler Wirkzusammenhänge in der Planung und Durchführung von Fabrikumzügen bereitstellen. Die ermittelten Zielgrößen werden durch die Minimierung von Ausfallzeiten der Fabrikobjekte, einer minimalen Umzugsdauer und einem nivellierten Ressourceneinsatz beschrieben. Das Modell verknüpft nun die zentralen Aufgaben in der Planung und Durchführung von Fabrikumzügen mit den genannten Zielgrößen. Im Rahmen der Produktionsplanung werden bspw. Belegungspläne der Maschinen oder das vorhandene Schichtmodell festgelegt. Im Kontext der Fertigungssteuerung können Bestandsaufbau oder alternative Fertigungsmöglichkeiten mögliche Stellgrößen darstellen. Aus der Layoutplanung ergibt sich zwangsweise die Verlagerungsreihenfolge der zu betrachtenden Fabrikobjekte (z. B. Maschinen oder Arbeitsplätze). Im Zuge der Demontageplanung werden sowohl die Demontagetiefe der Objekte (bzw. Maschinen), als auch der entsprechende Ressourcenbedarf der Vorgänge festgelegt. Schließlich muss im Rahmen der Ressourcenplanung noch das vorhandene Ressourcenangebot definiert werden. Setzt man die genannten Stellgrößen in Relation, so ergeben sich die Stillstandzeiten der Fabrikobjekte, die Startzeitpunkte und Dauer der Vorgänge, als auch die Ressourcenauslastung als zentrale Regelgrößen innerhalb der Umzugsplanung.

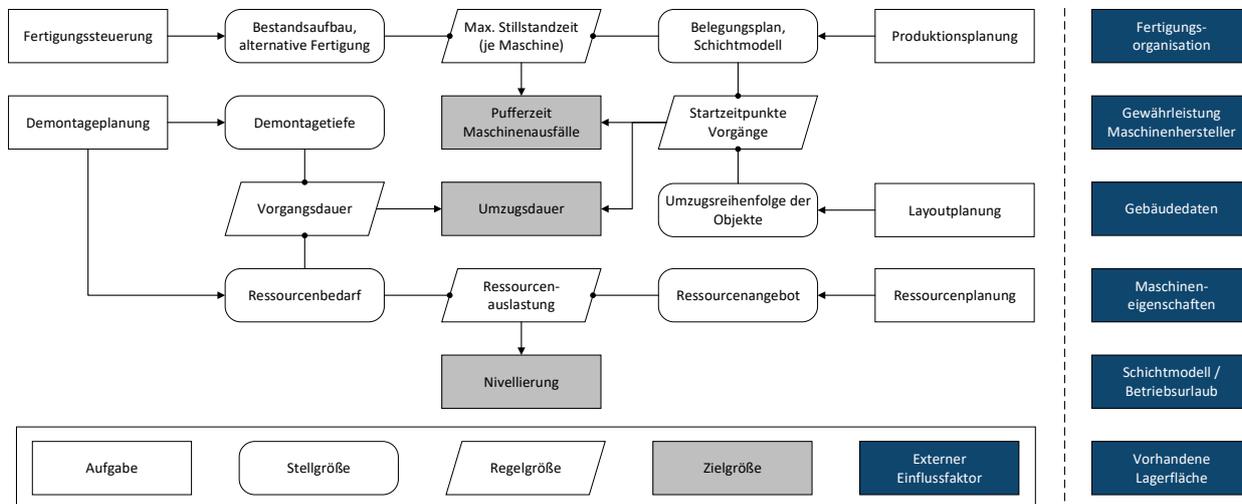


Bild 3: Qualitative Wirkzusammenhänge in der Durchführung von Reorganisationsprojekten [Nit23a]

Zentrale Stellgrößen in der Planung von Fabrikumzügen sind demnach die Verlagerungsreihenfolge der Objekte, deren Demontagetiefe und die Voraussetzungen für einen Produktionsstillstand. Die Möglichkeit der Zwischenlagerung einzelner Objekte vergrößert weiterhin den Lösungsraum. Eine tiefgreifende Untersuchung, welche Ausprägung dieser variablen Faktoren unter gegebenen Voraussetzungen sinnvoll sein kann, soll im Zuge der Parameterstudie erneut aufgegriffen werden.

4.2. Ableitung von möglichen Entscheidungsalternativen in der Realisierung von Fabriklayoutkonzepten

Fußend auf den dargestellten Wirkzusammenhängen konnten erste Rückschlüsse auf mögliche Handlungsalternativen in einer frühen Phase der Realisierungsvorbereitung gezogen werden. Ziel der weiterführenden Untersuchungen war die Ableitung möglicher Umzugs-Strategien. Als Umzugs-Strategie wird in diesem Zusammenhang das Bündel der Ausprägungen unterschiedlicher Handlungsalternativen verstanden und stellt somit die Rahmenbedingungen für die folgende Phase der Terminplan des Fabrikumzugs dar. Zunächst wurden die eingangs vorgestellten und untersuchten Einflussfaktoren spezifiziert, diese mit möglichen Ausprägungen versehen und den möglichen Entscheidungsalternativen gegenübergestellt. In Tabelle 1 sind jene Faktoren aufgelistet, die sich aus der Einflussanalyse ergeben haben und von den Mitgliedern des PA bestätigt wurden

Tabelle 1: Relevante Einflussfaktoren auf die Planung und Durchführung von Fabrikumzügen

Charakterisierungs-Kategorien	Charakterisierungs-Eigenschaften	
Projektspezifische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl Fertigungsprozesse • Bauliche Veränderungen Gebäude • Veränderung Gebäudestruktur • Veränderungen TGA • Erneuerung Fußboden • Verfügbarkeit Deckenkran • Traglast Deckenkran • Flächennutzungsgrad • Verfügbarkeit Zwischenlagerflächen • Homogenität der Transportwege 	<ul style="list-style-type: none"> • Fertigungsprinzip/Organisationsform • Verkettung des Fertigungsprozesses • Homogenität des Produktportfolio • aktuelle Fertigungsstrategie • vorhandenes Schichtmodell • Möglichkeit zur Wochenendarbeit • Meilensteine in der Realisierung • Mittlere Breite der Transportwege • Internes Personal verfügbar
Objektspezifische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Gewicht • Grundfläche • Mittlere Auslastung • Möglichkeit zur Vorproduktion • Alternative Fertigungsmöglichkeit • Teil einer Maschinengruppe • Teil einer Verkettung • Mittlere Auslastung Maschinengruppe 	<ul style="list-style-type: none"> • Betriebs-/Gefahrstoffe • Gewährleistungsansprüche • Sicherung gg. Erschütterungen • Möglichkeit zur Demontage • Komplexität De-/Remontage • Spezifische Medienversorgung

Die dargestellten Faktoren fußen auf den in der Einflussanalyse identifizierten aktiven Faktoren, welche kaum beeinflussbar sind, aber einen entscheidenden Einfluss auf das Gesamtsystem ausüben. Diese Faktoren wurden den vorhandenen Entscheidungsalternativen, welche wiederum auf den ambivalenten und teilweise passiven Faktoren beruhen, gegenübergestellt. Diese Entscheidungsalternativen beziehen sich auf die Faktoren Demontageoption, Vorproduktion, Umzugsabschnitte, Zwischenlagerung, Umzugszeitpunkt und Verantwortlichkeiten.

Demontageoption

Die Demontageoption bezieht sich auf den Grad der Demontage eines Fabrikobjekts, meist einer komplexen Maschine oder Anlage. Zuweilen besteht die Möglichkeit, ein Fabrikobjekt entweder nahezu vollständig, ohne den Abbau von Teilen, von Ihrer aktuellen zu einer gewünschten Zielposition zu transportieren. Weiterhin kann ein Fabrikobjekt unter gewissen Voraussetzungen in mehrere Teile zerlegt werden. Dadurch sinkt die Komplexität des Transports und steigt die Komplexität der De- und Remontage. Die Entscheidungsalternative besteht demnach in der Frage, ob ein Fabrikobjekt in mehrere Teile zerlegt oder im Ganzen transportiert werden sollte.

Vorproduktion

Die Durchführung eines Fabrikumzugs im Kontext einer Reorganisation hat einen direkten Einfluss auf die logistische Leistungsfähigkeit eines Unternehmens. Durch die Stillsetzung der Fabrikobjekte für den Zeitraum der Verlagerung reduzieren sich entsprechend die verfügbaren Zeiträume für die Fertigung. Demnach besteht die Möglichkeit, Verlusten der logistischen Leistungsfähigkeit (z. B. Termintreue) durch einen gezielten Bestandsaufbau vorzubeugen. Die Entscheidungsalternative besteht demnach darin, ob ein Bestandsaufbau an einem Arbeitssystem angestrebt werden sollte oder nicht. Dies ist wiederum abhängig davon, ob auf Basis der Auslastung der betroffenen Arbeitssysteme und der Produkteigenschaften (z. B. Haltbarkeit) überhaupt ein Bestandsaufbau möglich ist.

Umzugsabschnitte

Die Realisierung eines geplanten Layoutkonzepts kann grundsätzlich in mehrere Teilabschnitte unterteilt werden. Das ist beispielsweise abhängig von gebäudeseitigen Anpassungen, umfassenden Vorbereitungsarbeiten (z. B. Medienversorgung oder Fußböden) oder terminlichen Einschränkungen. Auch die fehlende Möglichkeit eines kurzfristigen Bestandsaufbaus oder fehlende Möglichkeiten einer alternativen (externen oder internen) Produktion können dazu führen, den Umzug in mehreren Teilabschnitten durchzuführen. Die Entscheidungsalternative besteht demnach darin, das Reorganisationsprojekt am Stück umzusetzen oder in mindestens zwei Teilabschnitte zu unterteilen.

Zwischenlageroption

In Abhängigkeit des Flächennutzungsgrads kann es vorteilhaft sein, Flächen zur Zwischenlagerung einzelner Fabrikobjekte zu schaffen. Die Option ein Fabrikobjekt zwischenzulagern ist abhängig davon, ob das Fabrikobjekt die Zielfläche anderer Fabrikobjekte oder einen möglichen Transportweg blockiert. Hinderlich für eine Zwischenlagerung kann die Komplexität des Transports sein. In Rücksprache mit Umzugsdienstleister:innen sollte die Handhabung der Fabrikobjekte (u. a. Sicherung, Aufnahme, Transport, Abstellen) auf ein Minimum reduziert werden, um das Risiko bzw. die Wahrscheinlichkeit für Beschädigungen so gering wie möglich zu halten. Die Entscheidungsalternative besteht demnach darin, Zwischenlagerflächen innerhalb oder außerhalb der Fabrikhalle zu schaffen und diese für ausgewählte Maschinen und Anlagen zu nutzen.

Umzugszeitpunkt

Die Festlegung, zu welchem Zeitpunkt oder welchen Zeitpunkten ein Fabrikumzug durchgeführt werden kann, hängt zunächst vom aktuellen Schichtmodell des Unternehmens ab. Produziert das Unternehmen in den zu verlagernden Bereichen bspw. im Einschichtbetrieb, so könnte die Durchführung des Umzugs innerhalb der Spätschicht(en) umgesetzt werden. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Nutzung nicht für die Produktion geplanter Zeiträume wie Wochenenden oder Betriebsferien. Besteht keine Möglichkeit, den Umzug in produktionsfreien Zeiträumen durchzuführen, bleibt nur eine Durchführung während der laufenden Produktion.

Verantwortlichkeiten

Schließlich ist proaktiv zu prüfen, inwiefern externe Partner (z. B. Hersteller) in die Verlagerung einzelner Maschinen und Anlagen oder in die Durchführung des gesamten Verlagerungsprojekts einzubeziehen sind. Bestehen bspw. Gewährleistungsansprüche gegenüber dem Anlagenhersteller, kann eine interne Durchführung nachteilig sein. Für eine interne Durchführung kann die erhöhte Flexibilität sprechen, kurzfristig mit eigenem Personal auf Planänderungen innerhalb des Fabrikumzugs reagieren zu können. Die Involvierung unterschiedlicher Gewerke für die baulichen Anpassung am Gebäude oder der Anpassung der Medienversorgung innerhalb des Gebäudes kann dazu führen, die komplette Durchführung des Fabrikumzugs von einem externen Partner durchführen zu lassen.

Bewertung der Entscheidungsalternativen

Die Auswahl einer geeigneten Umzugs-Strategie wird durch die Bündelung der Ausprägungen der verschiedenen Entscheidungsalternativen beschrieben. Hierzu wurden die vorgestellten Charakterisierungseigenschaften (inkl. möglicher Ausprägungen) den Entscheidungsalternativen in einer Matrix gegenübergestellt. Mit den Mitgliedern des PA wurden die möglichen Alternativen im Hinblick auf die Ausprägung der jeweiligen Charakterisierungseigenschaft diskutiert. Dabei wurde neben einer normalen Zuordnung der Ausprägung einer Charakterisierungseigenschaft zur Ausprägung einer Entscheidungsalternative auch die Definition von KO-Kriterien vorgesehen. Im Ergebnis steht eine Entscheidungsmatrix, welche vollständig in den Anhängen A1-A7 dargestellt ist. Anhand dieser Matrix kann ein Nutzer nun die Charakterisierungseigenschaften für seinen eigenen Anwendungsfall bewerten (Ausprägungen festlegen). In Tabelle 2 ist der Zusammenhang zwischen den Faktoren „Flächennutzungsgrad“ sowie „Möglichkeit zum Bestandsaufbau“ und dem Entscheidungskriterium „Vorproduktion“ dargestellt. Für einen hohen Flächennutzungsgrad kann unterstellt werden, dass eher ein Bestandsaufbau sinnvoll ist, um einzelne Fabrikobjekte für einen längeren Zeitraum zwischenzulagern, um wiederum Platz zu schaffen. Besteht bspw. aufgrund von Produkteigenschaften keine Möglichkeit zum Bestandsaufbau, schließt dieses Kriterium wiederum einen Bestandsaufbau aus.

Tabelle 2: Exemplarische Darstellung der Entscheidungslogik

Eigenschaft	Ausprägung	Vorproduktion	
		Bestandsaufbau	Kein Bestandsaufbau
Flächennutzungsgrad	Niedrig		X
	mittel	X	X
	hoch	X	
Bestandsaufbau möglich (z. B. Produkthaltbarkeit)	Ja	X	X
	nein		K.O.

Im Ergebnis erhält der Nutzer eine Tendenz, welche Entscheidungsalternativen in Form einer Umzugs-Strategie vordergründig/mehrheitlich sinnvoll für seinen Anwendungsfall sind (s. Bild 4, vergrößerte Darstellung in Anhang A8). Der Nutzer kann mit dem Ergebnis gezielt proaktive Maßnahmen, wie bspw. einen gezielten Bestandsaufbau vorbereiten oder die Demontagetiefe unterschiedlicher Fabrikobjekte festlegen. Das Ergebnis der Bewertung in Bild 4 verdeutlicht, dass für die bewerteten Charakterisierungseigenschaften die Entscheidungsalternative „Zwischenlageroption“ eher nicht (mit 70%/30%) wahrgenommen werden sollte. Eine Entscheidung bzgl. „Verantwortlichkeiten“ ist hingegen nicht möglich (50%/50%).

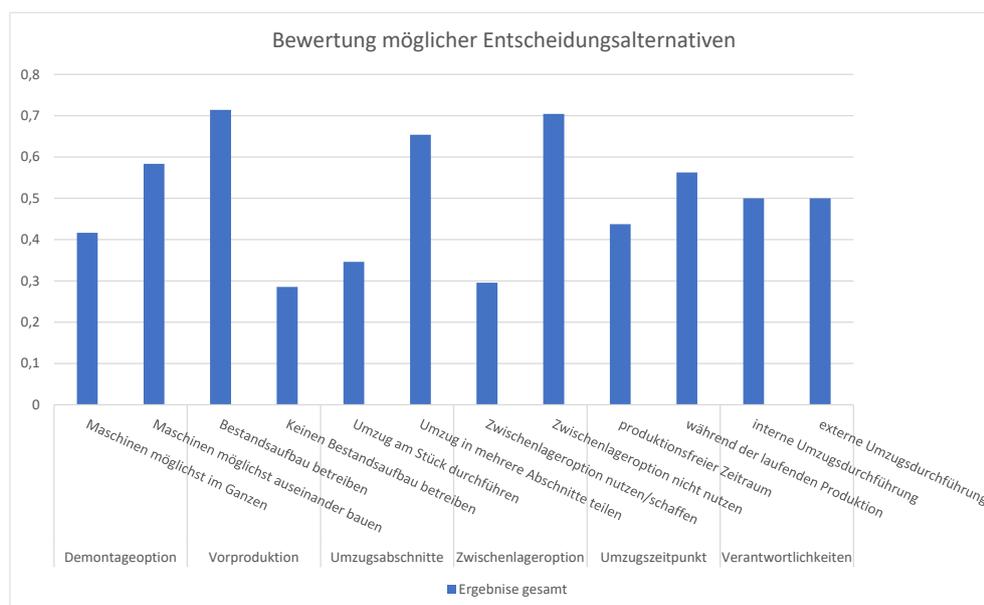


Bild 4: Ergebnis der Bewertung möglicher Entscheidungsalternativen anhand eines Praxisbeispiels

4.3. Konzeption und Formulierung eines mathematischen Optimierungsmodells

Der terminlichen Planung eines Fabrikumzugs liegt ein mathematisches Termin- oder Projektplanungsproblem zugrunde, welches um layoutseitige Restriktionen ergänzt werden muss. Die Problemklasse wird unter dem Oberbegriff der *Ressource Constrained Project Scheduling Problems* (RCPSP) zusammengefasst [Hab18]. Die Charakterisierung des im Forschungsvorhaben konzipierten mathematischen Optimierungsproblems bzgl. Datentyp, spez. Eigenschaften, Zielstellung und Restriktionen ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Charakterisierung des mathematischen Optimierungsproblems

Charakteristika	Ausprägung / Beschreibung
Grundproblem	- Ressource Constrained Project Scheduling Problem
Datentyp	- deterministische Planungsdaten
Eigenschaften von Vorgängen	- können nicht unterbrochen werden - fixe Vorrangbeziehungen der Vorgänge je Fabrikobjekt - bedingte Vorrangbeziehungen aus dem Layout heraus - Ressourcenverbrauch über die Dauer eines Vorgangs konstant
Eigenschaften des Layouts	- Modellierung des Layouts als Zellenraster - Zellen entweder belegt („0“) oder frei für Transport („1“)
Problemrepräsentation	- Ganzzahlige Optimierung des Terminplans - Layoutdaten diskret (durch Zellenraster)
Zielstellung	- multikriterielle quantitative Zielfunktion - gewichtete Summe
Restriktionen	- Fabrikobjekte liegen innerhalb der Fabrikgrundfläche - Fabrikobjekte müssen im Ist- und Soll-Layout überlappungsfrei positioniert werden - Fabrikobjekte haben eine Orientierung im Raum (Drehung) - Lagerbereich nicht ortsveränderlich - Verfügbares Personal darf nicht überschritten werden - Vorrangbeziehungen sind einzuhalten - Transport der Fabrikobjekte nur flurgebunden möglich

Methoden zur Lösung eines solchen Optimierungsproblems verfolgen die Zielstellung, alle zur Projekterfüllung notwendigen Vorgänge in eine zeitliche Reihenfolge zu bringen. Zu berücksichtigen sind dabei sowohl die vorliegenden Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen der Vorgänge als auch die beschränkt vorhandenen Ressourcen, welche zur Durchführung der Vorgänge notwendig sind. Die layoutseitigen Restriktionen stellen wiederum bedingte Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen dar. Das bedeutet, dass diese Beziehungen in Relation zum aktuellen Layout-Zustand stehen. Wird beispielsweise ein Fabrikobjekt an Ihre Zielposition verbracht, kann das dazu führen, dass anschließend ein weiteres Fabrikobjekt blockiert wird. Ändert sich das Layout, ändern sich demnach auch die bedingten Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen beziehungsweise die layoutseitigen Restriktionen. Da bereits ein einfaches RCPSP als np-schwer bezeichnet wird, wurden vorab einige Annahmen getroffen, welche die Komplexität des Planungsproblems reduzieren sollen. Das Layout wird in einem Zellenraster (Koordinatensystem) mit Zellen identischer Kantenlänge dargestellt. Die Fabrikobjekte, welche innerhalb des Layouts angeordnet werden, sind rechteckig. Die Kantenlängen der Objekte stellen Vielfache der Kantenlänge der Zellen des Rasters dar. Die Zellen innerhalb des Layouts können den Wert „1“ (frei) oder „0“ (belegt) annehmen. Zellen können durch Fabrikobjekte, gesperrte Bereiche oder Lagerflächen belegt sein. Jede freie

Zelle steht wiederum für den Transport von Fabrikobjekten zur Verfügung. Die Position der Fabrikobjekte, Lager- und Sperrflächen sind sowohl für das Ist-Layout als auch das Soll-Layout bekannt und fixiert. Demnach besteht die Möglichkeit, ein Fabrikobjekt lediglich an fest definierten Flächen zwischenzulagern. Als Ressource für die Durchführung der Umzugsvorgänge wird das notwendige Personal sowie die vorhandene Lagerkapazität berücksichtigt. Das Personalbedarf ist über die Dauer eines Vorgangs konstant. Die Vorgänge dürfen weiterhin nicht unterbrochen werden. Für jedes Fabrikobjekt sind die Vorgänge Vorbereitung, Demontage, Transport zum Ziel und Remontage einzuplanen (s. Bild 5). Erfolgt eine Zwischenlagerung, wird ein zusätzlicher Transportvorgang ins Lager eingeplant (s. Bild 6). Der Ablauf bezieht sich dabei jeweils auf ein vorhandenes Fabrikobjekt, welches an eine neue Position verbracht wird. Für Fabrikobjekte, die nicht im Soll-Layout eingeplant sind, entfallen der Vorbereitungs- und Remontevorgang. Fabrikobjekte, die wiederum nicht im Ist-Layout existieren, benötigen keine Demontage. Folgend sind die Aufgaben beschrieben, welche in den einzelnen Vorgängen zusammengefasst werden.

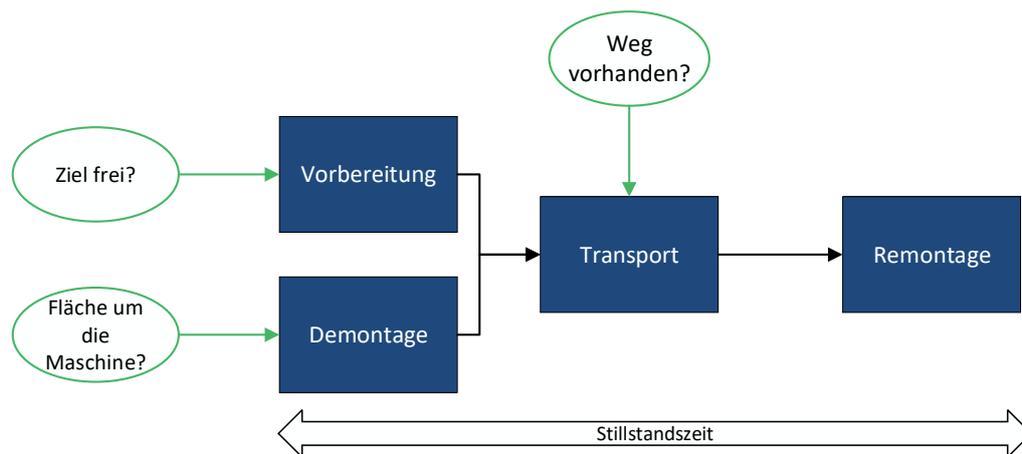


Bild 5: Ablauf des Umzugs eines Fabrikobjekts ohne Zwischenlagerung

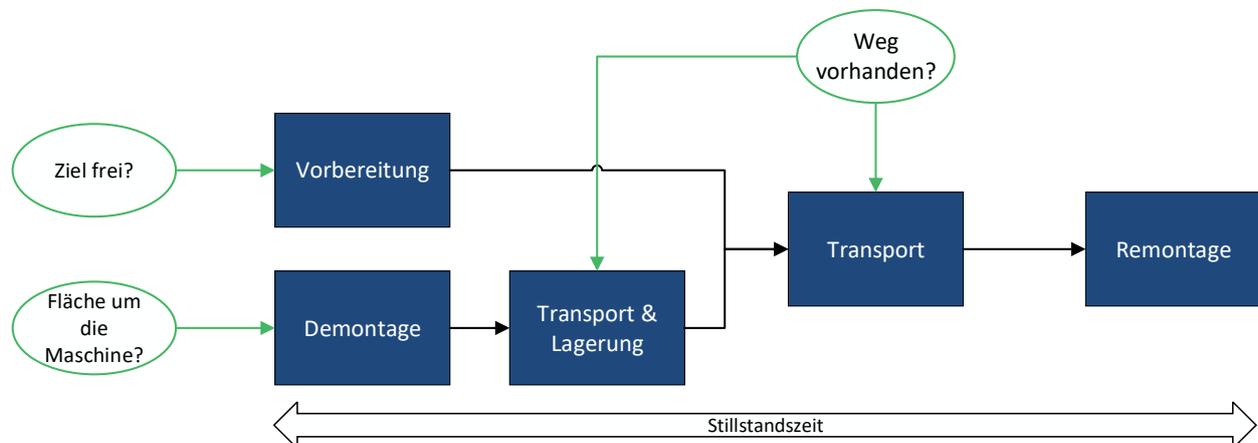


Bild 6: Ablauf des Umzugs eines Fabrikobjekts inklusive Zwischenlagerung

Vorbereitung

Die Vorbereitung eines Fabrikobjekts bezieht sich auf alle notwendigen Arbeitsschritte, welche an der Zielfläche des Fabrikobjekts durchgeführt werden müssen. Dies können Fundamentarbeiten, die Anpassung der Medienversorgung oder das Aufbringen individueller Bodenmarkierungen umfassen. Demnach kann der Vorbereitungs-Vorgang eines Fabrikobjekts erst eingeplant werden, wenn die Zielfläche im Layout frei zur Verfügung steht.

Demontage und Remontage

Die Demontage des Fabrikobjekts umfasst das Trennen der Medienversorgung und die Zerlegung in verschiedene Komponenten. Je nach Umfang der Demontage kann zwischen einer mi-

nimalen („Fabrikobjekt im Ganzen“) und maximalen („Fabrikobjekt zerlegen“) Demontagetiefe unterschieden werden. Der Demontagevorgang kann jederzeit durchgeführt werden, insofern ausreichend Personalressourcen zur Verfügung stehen. Die notwendige Fläche um das Fabrikobjekt ist bereits in der Flächenbetrachtung inkludiert und muss nicht separat geprüft werden. Die Remontage ist analog der Demontage durchzuführen.

Transport

Der Transport eines Fabrikobjekts beinhaltet das Anheben und Aufladen, die Sicherung, die Durchführung und das Absetzen nach erfolgreicher Durchführung. Der Transport kann sowohl an die Zielfläche als auch in das vorhandene Lager erfolgen. Erforderlich sind jeweils eine freie Zielfläche sowie ein vorhandener Weg. Ebenso muss die Demontage des Fabrikobjekts abgeschlossen sein.

Konzipierung des Mathematischen Optimierungsproblems

Da die Ermittlung der bedingten Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen aus dem Layout heraus bereits bei einer sehr kleiner Problemistanz (5 Fabrikobjekte, 672 Zellen) eine hohe Rechenzeit (ca. 2 Stunden) zur Folge hatte, wurde auf eine Übertragung des gesamten mathematischen Modells in einen konventionellen Solver (z. B. mittels GAMS) verzichtet. Die Eingangsdaten, Restriktionen und Zielgrößen des beschriebenen Terminplanungsproblem seien dennoch folgend verbal zusammengefasst. Sie dienen als Grundlage für die Implementierung in einem Heuristischen Lösungsverfahren (s. Abschnitt 4.4).

Eingangsdaten Layout:

- (1) Layout-Matrix bestehend aus Zellen
- (2) Menge an Fabrikobjekten
- (3) Größe der Fabrikobjekte (X- und Y-Richtung)
- (4) Ist-Position der Fabrikobjekte im Layout (belegte Zellen)
- (5) Soll-Position der Fabrikobjekte im Layout (belegte Zellen)
- (6) Position der vorhandenen Lagerfläche (zur Vereinfachung nur eine) im Layout
- (7) Größe der vorhandenen Lagerfläche
- (8) Positionen gesperrter Flächen innerhalb der Layout-Matrix

Eingangsdaten Terminplanung:

- (9) Gesamtmenge an einzuplanenden Vorgängen
- (10) Teilmenge an Vorbereitungs-Vorgängen (1 Vorgang je Fabrikobjekt)
- (11) Teilmenge an Demontage-Vorgängen (1 Vorgang je Fabrikobjekt)
- (12) Teilmenge an Transport-Vorgängen an die Zielfläche (1 Vorgang je Fabrikobjekt)
- (13) Teilmenge an Transport-Vorgängen in das Lager (1 Vorgang je Fabrikobjekt, wenn Lageroption aktiv)
- (14) Teilmenge an Remontage-Vorgängen (1 Vorgang je Fabrikobjekt)
- (15) Teilmenge an Vorgänger-Vorgängen (für jeden einzuplanenden Vorgang)
- (16) Dauer der Vorgänge für Demontagestufe „0“ und „1“
- (17) Menge an Zeitpunkten
- (18) Menge an Ressourcen (z. B. Elektriker, Mechaniker, Helfer, Stapler, Kran etc.)
- (19) Ressourcenbedarf eines Vorgangs bzgl. einer Ressource für Demontagestufe „0“ und „1“
- (20) Ressourcenangebot von einzelnen Ressourcen
- (21) Menge an Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen je Fabrikobjekt
- (22) Menge an bedingten Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zwischen den Fabrikobjekten

Entscheidungsvariablen

- (23) Demontagestufe jedes Fabrikobjekts
- (24) Lagerungs-Zeitpunkt jedes Fabrikobjekts

- (25) Reihenfolge aller Transportvorgänge (an die Zielposition und in das Lager)
- (26) Startzeitpunkte der Vorgänge

Abgeleitete Parameter

- (27) Menge von Layout-Stufen in Abhängigkeit der Transportvorgänge (Ist-Layout und je Transportvorgang ein zusätzliches Layout)

Zielfunktion

- (28) Minimierung der Projektlaufzeit
- (29) Minimierung der Stillstandzeiten über alle Fabrikobjekte

Restriktionen

- (30) Jede Zelle im Layout-Raster ist zu jedem Zeitpunkt nur einmal belegt
- (31) Transportvorgang ist in zugehöriger Layout-Stufe realisierbar (Weg vorhanden und Zielfläche verfügbar)
- (32) Jeder Vorgang muss eingeplant werden
- (33) Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen müssen eingehalten werden
- (34) Dummy-Vorgang „0“ wird zu Beginn verplant
- (35) Vorbereitungsvorgänge erst, wenn die Zielfläche des Fabrikobjekts frei ist
- (36) Transportvorgang ins Lager, wenn Weg ins Lager frei und Demontage des Fabrikobjekts abgeschlossen
- (37) Transportvorgang zur Zielposition, wenn Demontage und Vorbereitung abgeschlossen, Zielposition frei und Weg vorhanden
- (38) Remontage, wenn Transport zur Zielposition abgeschlossen
- (39) Dummy-Vorgang wird eingeplant, sobald alle Remontevorgänge eingeplant sind
- (40) Einhaltung der Ressourcen-Beschränkung zu jedem Zeitpunkt

Aufgrund der beschriebenen Komplexität soll das Problem dahingehend vereinfacht werden, dass bedingte Vorrangbeziehungen durch das Festsetzen einer Reihenfolge des Umzugs der Fabrikobjekte in fixe Vorrangbeziehungen überführt werden. Das vereinfachte mathematische Optimierungsmodell inkl. überführter layoutseitiger Restriktionen (bedingte Vorrangbeziehungen) in fixe Vorrangbeziehungen kann wie folgt beschrieben werden:

Eingangsdaten

- Menge an Fabrikobjekten $m \in M$
- Menge an Vorgängen $j \in J$ (inkl. Start- und Endvorgang)
- Menge an erneuerbaren Ressourcen $r \in R$
- Teilmenge an Nachfolger-Vorgängen $i \in J$
- Teilmenge an Demontage-Vorgängen je Fabrikobjekt $D_m \subseteq J$
- Teilmenge an Vorbereitungs-Vorgängen je Fabrikobjekt $V_m \subseteq J$
- Teilmenge an Transport-Vorgängen ins Lager je Fabrikobjekt $TL_m \subseteq J$
- Teilmenge an Transport-Vorgängen ans Ziel je Fabrikobjekt $TZ_m \subseteq J$
- Teilmenge an Remontage-Vorgängen je Fabrikobjekt $R_m \subseteq J$
- Menge an Vorgänger-Nachfolgerbeziehungen $(j, i) \in S$
- Menge an Zeitpunkten $t \in T$
- Dauer der Vorgänge p_j
- Dauer der Vorgänge in Abhängigkeit der Demontagetiefe p_{j,DT_m}
- Ressourcenverbrauch der Vorgänge $u_{(j,r)}$
- Ressourcenverbrauch der Vorgänge in Abhängigkeit der Demontagetiefe $u_{(j,DT_m,r)}$
- Kapazitätsangebot einer Ressource c_r

Entscheidungsvariablen

- Entscheidungsvariable $x_{(j,t)} \rightarrow$ Start Vorgang j zu Zeitpunkt t
- Entscheidungsvariable Demontagetiefe DT_m

➤ Entscheidungsvariable Lagerung $stor_m$

Zielfunktion

$\alpha * \sum_{t \in T} t * x_{(n+1,t)} + (1 - \alpha) * \sum_{m \in M} (\sum_{t \in T} (t * x_{(R_m,t)}) + p_{R_m} - \sum_{t \in T} (t * x_{(D_m,t)})) \rightarrow$ Minimierung der Projektlaufzeit und Stillstandzeit mit Gewichtungsfaktor α , mit $j = D_m$ für den Demontagevorgang und $j = R_m$ für den Remontagevorgang von Fabrikobjekt m .

Nebenbedingungen

$\sum_{t \in T} x_{(V_m,t)} = 1 \forall m \in M \rightarrow$ Jeder Vorgang kann nur einmalig begonnen werden

$\sum_{t \in T} x_{(D_m,t)} = 1 \forall m \in M$

$\sum_{t \in T} x_{(TZ_m,t)} = 1 \forall m \in M$

$\sum_{t \in T} x_{(R_m,t)} = 1 \forall m \in M$

$\sum_{t \in T} x_{(TL_m,t)} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } stor_m = 1 \\ 0, & \text{wenn } stor_m = 0 \end{cases} \forall m \in M$

$p_{D_m} = p_{D_m,0} * (1 - DT_m) + p_{D_m,1} * DT_m \forall m \in M$

$p_{TZ_m} = p_{TZ_m,0} * (1 - DT_m) + p_{TZ_m,1} * DT_m \forall m \in M$

$p_{TL_m} = p_{TL_m,0} * (1 - DT_m) + p_{TL_m,1} * DT_m \forall m \in M$

$p_{R_m} = p_{R_m,0} * (1 - DT_m) + p_{R_m,1} * DT_m \forall m \in M$

$u_{(D_m,r)} = u_{(D_m,0,r)} * (1 - DT_m) + u_{(D_m,1,r)} * DT_m \forall m \in M, r \in R$

$u_{(TZ_m,r)} = u_{(TZ_m,0,r)} * (1 - DT_m) + u_{(TZ_m,1,r)} * DT_m \forall m \in M, r \in R$

$u_{(TL_m,r)} = u_{(TL_m,0,r)} * (1 - DT_m) + u_{(TL_m,1,r)} * DT_m \forall m \in M, r \in R$

$u_{(R_m,r)} = u_{(R_m,0,r)} * (1 - DT_m) + u_{(R_m,1,r)} * DT_m \forall m \in M, r \in R$

$\sum_{j \in J} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} \sum_{t_2=t-p_j+1}^t (u_{(j,r)} * x_{(j,t_2)}) \leq c_r \rightarrow$ Ressourcenbeschränkungen

$\sum_{t \in T} t * x_{(i,t)} - \sum_{t \in T} t * x_{(j,t)} \geq p_j \forall (j, i) \in S \rightarrow$ Vorrangbeziehungen

$x_{(j,t)} \in \{0,1\} \forall j \in J, t \in T$

$DT_m \in \{0,1\} \forall m \in M$

$stor_m \in \{0,1\} \forall m \in M$

Für das vereinfachte RCPSPP besteht die Möglichkeit einer Implementierung in einem geeigneten Solver zur Erzeugung exakter Lösungen. Auf die Implementierung soll im folgenden Abschnitt näher eingegangen werden.

4.4. Implementierung des Modells in einer Lösungsheuristik

Das im vorigen Abschnitt beschriebene mathematische Optimierungsproblem wurde in einer Lösungsheuristik implementiert. Zentrales Ziel der Implementierung war eine aufwandsarme Nutzbarkeit bei gleichzeitig kurzer Rechenzeit zur Lösung des Optimierungsproblems. Die daraus entstandene Methode erzeugt aus den beschriebenen Eingangsdaten (Layout- und Zeitdaten) verschiedene realisierbare Terminpläne unter Berücksichtigung der vorhandenen layout- und ressourcenseitigen Restriktionen. Als Meta-Heuristik wurde ein Genetischer Algorithmus verwendet,

welcher wiederum den von der Natur inspirierten populationsbasierten Verfahren zugeordnet werden kann. Im Kern adaptieren derartige Verfahren die Vorgänge von DNA-Kreuzung und -Mutation über mehrere Generationen und simulieren dadurch eine Evolution [Hol75]. Ein Genetischer Algorithmus setzt sich demnach aus den drei Komponenten Crossover, Mutation und Selektion zusammen. Weiterhin muss eine Lösung des Optimierungsproblems als Chromosom dargestellt werden (Codierung), damit die Vorgänge Crossover, Mutation und Selektion vollzogen werden können. Für die Nutzung eines populationsbasierten Verfahrens ist außerdem eine Startpopulation zulässiger Lösungen notwendig (Initialisierung), welche den Ausgangspunkt der Evolution darstellt. Da es sich bei Meta-Heuristiken um problemunspezifische Methoden handelt, ist für deren Anwendung die Konzeptionierung von Sub-Heuristiken notwendig. Während Meta-Heuristiken den Verlauf der Optimierung durch Akzeptieren und Verwerfen von Lösungen steuern, dienen die Sub-Heuristiken dem Entwurf zulässiger Lösungen. Die vorliegenden Sub-Heuristiken prüfen demnach eine vorhandene Lösung (Chromosom) auf Zulässigkeit, überführen sie in ein vereinfachtes Terminplanungsproblem und berechnen einen bestmöglichen Terminplan.

Codierung

Um Umzugspläne mit einem Genetischen Algorithmus optimieren zu können, ist es notwendig, vorhandene Lösungen in eine DNA-ähnliche Struktur zu überführen. Genauer müssen die Entscheidungsvariablen in Form von Chromosomen dargestellt werden. Die Lösung des Optimierungsproblems (Chromosom) zur Umzugsplanung von Fabrikobjekten setzt sich daher aus drei Lösungs-Sequenzen zusammen. Jede Sequenz besteht aus einer Liste von Zahlen. Der Index innerhalb der jeweiligen Sequenz entspricht der ID des zugehörigen Fabrikobjekts. Die Reihenfolge-Sequenz gibt zunächst an, an welcher Stelle (zeitlich) ein Fabrikobjekt an seine Zielposition transportiert wird. Die Demontage-Sequenz beinhaltet Ziffern der Werte „0“ (minimale Demontage) oder „1“ (maximale Demontage) und legt somit fest, inwiefern ein Fabrikobjekt demontiert werden soll. Schließlich bildet die Lagerungs-Sequenz die Entscheidungsgrundlage zur Zwischenlagerung eines Fabrikobjekts ab. Auch innerhalb dieser Sequenz wird der Zeitpunkt des Transports eines Fabrikobjekts in das Lager festgelegt. Der Wert „2“ bedeutet bspw., dass der Transport dieses Fabrikobjekts vor den zweiten Transportvorgang der Reihenfolgesequenz eingeordnet wird. Der Wert „0“ bedeutet in dieser Sequenz, dass das Fabrikobjekt nicht zwischenlagert wird. Aus den drei Sequenzen ergibt sich folglich ein Gerüst aus Transportvorgängen inkl. der zugehörigen Demontagestufe. Dieses Gerüst bildet die Grundlage zur layoutseitigen Überprüfung der Lösung und kann anschließend in ein Terminplanungsproblem überführt werden. Die Codierung sei anhand eines Beispiels mit fünf Fabrikobjekten beschrieben:

- Fabrikobjekt-ID = (1, 2, 3, 4, 5)
- Reihenfolge-Sequenz = (2, 4, 1, 3, 5)
- Demontage-Sequenz = (0, 1, 1, 0, 0)
- Lagerungs-Sequenz = (0, 2, 0, 0, 1)
- Transportgerüst: $T5_{L,0}; T3_{Z,1}; T2_{L,1}; T1_{Z,0}; T4_{Z,0}; T2_{Z,1}; T5_{Z,0}$

Die Bezeichnung $T5_{L,0}$ beschreibt demnach den Transport von Fabrikobjekt „5“ ins Lager mit einer Demontagestufe von „0“ (minimale Demontage). Das Transportgerüst aller notwendigen Transportvorgänge ergibt sich somit aus den drei Lösungs-Sequenzen. Im Rahmen von Sub-Heuristiken kann dieses Gerüst anschließend auf Machbarkeit überprüft und in ein einfaches Terminplanungsproblem (gemäß Abschnitt 4.3) übersetzt werden. Das dadurch entstehende RCPSP kann mit einem Solver exakt gelöst werden. Das Transportgerüst dient demnach der Vereinfachung der bedingten Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen aus dem Layout und setzt die Transportsequenz als fixe Restriktion. Dadurch wird die Komplexität des mathematischen Problems stark reduziert.

Sub-Heuristiken

Wie bereits beschrieben wurde das Layout als Elementarzellen-Raster modelliert. Befindet sich ein Fabrikobjekt auf einer Zelle, weist die Zelle einen Wert „0“ aus. Selbiges gilt für Lager- und Sperrflächen. Ist die Zelle für einen Transport verfügbar, weist sie den Wert „1“ aus. Die Prüfung,

ob eine Lösung layoutseitig realisierbar ist, orientiert sich am vorgestellten Transport-Gerüst. Erst durch einen Transportvorgang verändert sich das bestehende Layout maßgeblich. Verkleinerungen bzw. Vergrößerungen der Objektgrundfläche infolge des Demontage- und Remontagevorgangs erzeugen zwar auch minimale Veränderungen des bestehenden Layouts, sollen aber an dieser Stelle vernachlässigt werden, da diese Flächenveränderungen bereits in der Modellierung der Grundfläche des Fabrikobjekts berücksichtigt wurden. Innerhalb der Sub-Heuristiken erfolgt die Prüfung des Transportgerüsts der Reihe nach. Für jedes Transportelement erfolgt zunächst in Abhängigkeit der Lageroption die Prüfung, ob die *Zielfläche frei* oder *Platz im Lager* vorhanden ist. Ist diese Prüfung erfolgreich, wird eine *Wegfindung* vom aktuellen Standort des Fabrikobjekts (Lager oder ursprüngliche Position) zur gewünschten Zielposition (Soll-Position oder Lager) durchgeführt. Ist diese Prüfung erfolgreich, werden die Änderungen der Positionierung des Fabrikobjekts im Layout angepasst. Sind alle Prüfungen entlang des Transportgerüsts erfolgreich durchgeführt worden, gilt die Lösung als realisierbar. Anhand der restriktiven Transportreihenfolge kann eine exakte Berechnung des Terminplans erfolgen.

➤ **Prüfung Zielfläche**

Über die Eingangsdaten ist die Soll-Position eines Fabrikobjekts bekannt. Alle relevanten Zellen im Layoutraster müssen einer Prüfung unterzogen werden. Soll ein Fabrikobjekt an seine angedachte Ziel-Position im Soll-Layout transportiert werden, müssen alle zu belegenden Zellen den Wert 1 annehmen. Für den Transport ins Lager ist eine Prüfung der nicht belegten Lagerfläche ausreichend. Eine exakte Positionierung des Fabrikobjekts im Lager ist nicht vorgesehen.

➤ **Wegfindung**

Für die Wegfindung wurde ein A*-Algorithmus angepasst. Referenzpunkt ist jeweils die nordwestlichste Zelle des Fabrikobjekts („links oben“). Zunächst wird jede Zelle des gesamten Zellenrasters hinsichtlich des verfügbaren Platzes geprüft. Das zu betrachtende Fabrikobjekt kann in horizontaler oder vertikaler Lage mit seiner nordwestlichsten Zelle auf einer Zelle im Layout platziert werden. Eine weitere Prüfung erfolgt für die Überführung von einer vertikalen in eine horizontale Lage („Drehpunkt“). Im Ergebnis ist für jede Zelle im Layoutraster bekannt, ob das betrachtete Fabrikobjekt in der entsprechenden Zelle eine horizontale („h“), vertikale („v“), beidseitige („b“) oder drehbare („d“) Lage einnehmen kann (Lage-Matrix). Ausgangspunkt der Suche nach einem möglichen Weg ist anschließend die aktuelle Position des zu betrachtenden Fabrikobjekts, dementsprechend die Position im Ist-Layout oder das Lager. Zielposition kann wiederum ebenfalls das Lager oder die Position im Soll-Layout sein. Anhand dieser Parameter (Start, Ziel und Lage-Matrix) kann das Layout nach einem möglichen Weg von der Start- zur Zielposition abgesucht werden.

➤ **Berechnung Terminplan**

War die Prüfung des Chromosoms auf layoutseitige Realisierbarkeit erfolgreich, können die Daten in ein einfaches RCPSP überführt werden. Durch die festgelegten Lagerungs-Optionen ist die Anzahl einzuplanender Vorgänge bekannt. Die Relationen zwischen den vorhandenen Vorgängen ergeben sich aus dem Transportgerüst und können in Form von Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen festgelegt werden. Die Lösung des RCPSP erfolgte mithilfe der Python-Bibliothek „MIP“ für ganzzahlige Optimierungsprobleme. Im Ergebnis können für alle Vorgänge die Start- und Endzeitpunkte sowie der Ressourcenverbrauch über die gesamte Projektdauer ausgegeben werden.

Initialisierung

Die Initialisierung der Population bzw. die Erzeugung einer Startpopulation erfolgt wahlweise zufallsbasiert oder systematisch. Für die zufällige Erzeugung umsetzbarer Lösungen werden die Lösungssequenzen mit einem Zufallsgenerator erzeugt und anschließend geprüft. Im Rahmen der systematischen Erzeugung der Startlösungen werden Lösungen unter einer fortlaufenden Prüfung generiert. Eine abschließende Prüfung der Lösungen ist dadurch nicht mehr notwendig. Je höher der Flächennutzungsgrad und dementsprechend kleiner die Freiflächen im Layout, desto geeigneter ist eine systematische Erzeugung von Startlösungen.

Crossover

Das Crossover, also die Kreuzung von Lösungen (Elternindividuen), basiert auf einem *elite parent crossover*. *Elite parents* sind die besten Lösungen einer Population hinsichtlich ihrer Zielfunktionswerte. Die Anzahl der *elite parents* (*elite rate*) kann vom Nutzer festgelegt werden. Die Lösungen der Population werden im Crossover miteinander kombiniert, um neue Individuen (Kinderindividuen) zu bilden. Der Anteil zufällig ausgewählter Lösungen (*random rate*) kann ebenso wie der Anteil der *elite parents* (*weighted rate*) am Crossover individuell eingestellt werden. Beim eigentlichen Crossover wird die Reihenfolge-Sequenz der beiden Elternindividuen an zwei zufälligen Punkten zerschnitten. Die jeweils drei entstehenden Teile der Sequenz werden anschließend in unterschiedlicher Reihenfolge wieder zusammengesetzt. Selbiges gilt für die Lagerungs- und Demontage-Sequenz. Dadurch sollen pro Elternpaar mindestens zwei zulässige neue Lösungen erzeugt werden.

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. Die Vertausch-Mutation wird für die Reihenfolge-Sequenz angewendet, indem zwei zufällige Positionen innerhalb der Sequenz miteinander vertauscht werden. Eine Verschiebe-Mutation erfolgt für die Lagerungs- und Demontagesequenz. Ein zufälliger Wert innerhalb der Sequenz wird dabei um 1 erhöht oder reduziert.

Selektion

Als Selektionsmethode wurde eine einfache *best fitness selection* genutzt. Hierbei werden alle der Eltern- und Kindindividuen herangezogen und anhand ihres Zielfunktionswerts (z. B. Projektdauer) absteigend sortiert. Die besten Individuen werden nacheinander der neuen Population (nächste Generation) hinzugefügt, bis die Populationsgröße erreicht ist. Anschließend beginnt der Ablauf für die nächste Generation von vorn.

Planungsablauf

Sobald alle planungsrelevanten Daten eingepflegt wurden und eine individuelle Gewichtung der Zielkriterien (Umzugsdauer und Stillstandzeiten) erfolgt ist, kann die Optimierung des Umzugsplans beginnen. Der methodische Ablauf setzt sich aus dem beschriebenen Initialisierungs- und Optimierungsverfahren zusammen (s. Bild 7). Zusammenfassend sei der Planungsablauf an dieser Stelle erneut umrissen. Das Eröffnungsverfahren erzeugt zunächst eine Menge an Lösungen, welche alle Restriktionen einhalten, bewertet diese und speichert das Ergebnis ab. Eine Lösung setzt sich dabei aus drei Lösungs-Sequenzen zusammen. Einer Reihenfolge-Sequenz, welche die Reihenfolge der Fabrikobjekte in der Verlagerung beinhaltet, einer Demontage-Sequenz, welche die gewählte Demontage-Option je Fabrikobjekt umfasst und eine Lagerungs-Sequenz, welche die Information beinhaltet, ob und wann ein Fabrikobjekt zwischengelagert wird. Aus dieser Lösung wird nun ein Terminplan erzeugt. Zunächst erfolgt die Prüfung, ob die Lösung layoutseitig realisierbar ist. Wenn diese Prüfung positiv abgeschlossen werden kann, werden die layoutseitigen Restriktionen in Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen überführt. Dadurch wird das Problem auf ein klassisches RCPSP reduziert, welches mit einem Solver gelöst werden kann. Im Ergebnis wird ein Terminplan erzeugt, der die zeitliche Anordnung aller notwendigen Vorgänge beinhaltet und den Ressourcenverbrauch visualisiert. Das Eröffnungsverfahren wird nun so lange durchlaufen, bis eine individuell einstellbare Grenze an Lösungen vorhanden ist. Die Menge dieser Lösungen bildet die Startpopulation des Optimierungsverfahrens.

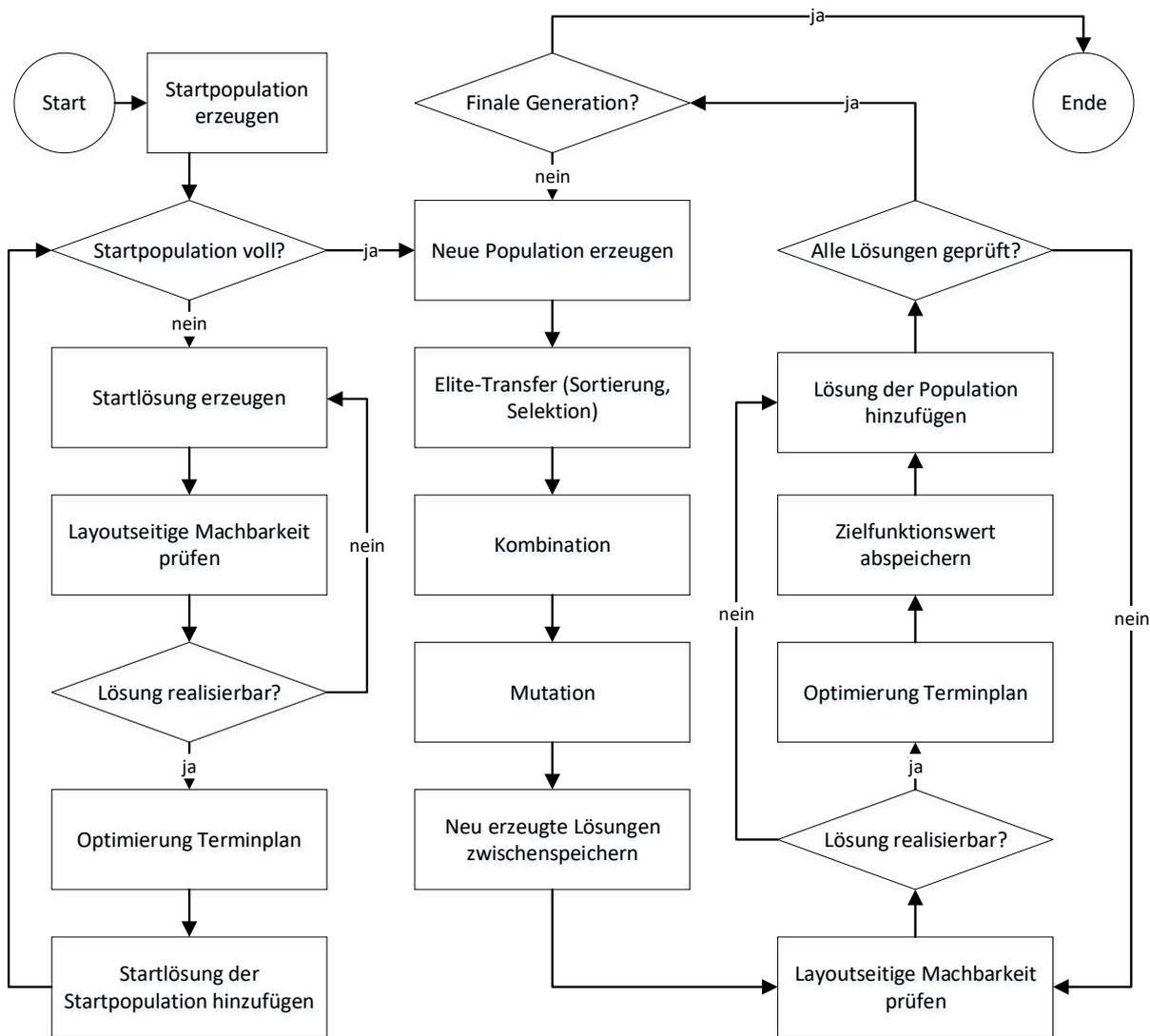


Bild 7: Darstellung des Ablaufs der Planungsmethode [Nit23b]

Im Rahmen des Optimierungsverfahren wurde ein Genetischer Algorithmus entwickelt, welcher die beschriebene Startpopulation, bestehend aus validen Lösungen, sukzessive hinsichtlich des Zielfunktionswerts verbessert. Ausgangspunkt bilden die als Sequenz modellierten Lösungen, bestehend aus Reihenfolge-, Demontage- und Lagerungs-Sequenz. Zunächst werden die Lösungen der Population bzgl. ihres Zielfunktionswerts sortiert. Die besten Lösungen werden in die nächste Generation (neue Population) übernommen. Es folgt eine Kombination („Crossover“), sowie eine Mutation der Lösungen, indem zufällig und nach Gewichtung (z. B. nach Zielfunktionswert) einzelne Lösungen (Eltern) ausgewählt und miteinander kombiniert werden. Dabei werden sowohl einzelne Sequenzen (z. B. Anfang der Demontage-Sequenz Lösung 1 mit Ende der Demontage-Sequenz von Lösung 2) als auch verschiedene Sequenzen (z. B. Demontage-Sequenz von Lösung 1 und Lagerungs-Sequenz von Lösung 2) eines Eltern-Paares miteinander kombiniert. Weiterhin kann anschließend eine Mutation der erzeugten Lösungen erfolgen, indem einzelne Positionen der Sequenzen verändert oder ganze Teilstränge vertauscht werden. Die Mutation erfolgt in der Regel zufallsbasiert. Die neu erzeugten Lösungen (Kinder) werden analog zum Eröffnungsverfahren auf Machbarkeit geprüft und terminlich berechnet. Besteht die Lösung diese Prüfung wird sie inklusive ihres Zielfunktionswerts der Population hinzugefügt, bis die Population der aktuellen Generation eine vorgegebene Größe erreicht hat. Anschließend wird die Population in die nächste Generation überführt, der beschriebene Ablauf beginnt erneut. Die dadurch induzierte Verbesserung der Zielfunktionswerte der Population von Generation zu Generation kann dabei bis zu einer vorgegebenen Obergrenze an Generationen, eines Zeitlimits

oder anderer Grenzen (z. B. keine Verbesserung der letzten 10 Generationen) beschränkt werden.

4.5. Übertragung der Projektergebnisse in einen Software-Demonstrator

Die Projektergebnisse in Form einer Planungsmethode zur Ermittlung optimaler Umzugspläne wurden in einen Software-Demonstrator eingebettet. Ziel war es, dem Nutzer eine aufwandsarme Anwendung der Methode bzw. des Genetischen Algorithmus zu ermöglichen ohne spezifische Kenntnisse im Bereich Operations Research oder Programmiersprachen mitbringen zu müssen. Die Entwicklung des Demonstrators als grafische Nutzeroberfläche erfolge maßgeblich mittels der Python-Bibliothek „PyQt“. Der Nutzer kann zunächst ein neues Umzugs-Projekt starten, indem er die Größe des Layouts (in x- und y-Richtung) angibt und anschließend gesperrte Bereiche im Layout markiert. Anschließend besteht die Möglichkeit, die notwendigen Eingangsdaten über ein Excel-Template einzulesen, welches dem Nutzer ebenfalls zur Verfügung gestellt wird. In dieser Datenbasis sind alle relevanten objektbezogenen Daten (insb. Positionierung in Ist- und Soll-Layout sowie Zeit- und Ressourcendaten der Fabrikobjekte) enthalten. Es besteht außerdem die Möglichkeit, jedes Fabrikobjekt einzeln über eine grafische Nutzeroberfläche anzulegen. Im Hauptbildschirm werden dem Nutzer sowohl das aktuelle Layout (Ist-Layout) als auch das geplante Layout (Soll-Layout) angezeigt. Alle Objekte innerhalb der dargestellten Layouts sind per Drag-and-Drop durch den Nutzer anpassbar. Weitere Einstellungsmöglichkeiten beziehen sich auf das Anlegen einer Lagerfläche, der Anpassung gesperrter Flächen und der Justierung der Optimierungs-Parameter.

Dateneingabe

Erfassung der Maschinendaten

	von	bis
Ist-Layout X-Koordinate	2	5
Ist-Layout Y-Koordinate	8	15
Soll-Layout X-Koordinate	12	1
Soll-Layout Y-Koordinate	2	9
Abhängigkeit zu Maschine	0	
Art der Abhängigkeit	▼	
Lagerplatzbedarf [m²]	5	
Bedarf Transportmittel	1	
	Zeit [h]	Personal [Stck]
Ressourcen Vorbereitung	2	1
Minimale Demontagetiefe:		
Ressourcen Demontage	1	1
Ressourcen Transport	2	2
Ressourcen Remontage	1	1
Maximale Demontagetiefe:		
Ressourcen Demontage	2	2
Ressourcen Transport	1	1
Ressourcen Remontage	2	2
Gemeinsame Vorbereitung	▼	
	kurze Seite	lange Seite
Größe nach Demontage	3	4

Daten übernehmen Schließen

Bild 8: Eingabemaske Fabrikobjekte

Wie bereits eingangs beschrieben, besteht die Möglichkeit einer manuellen Eingabe der Eingangsdaten für jedes Fabrikobjekt in einer dafür vorgesehenen Nutzeroberfläche (s. Bild 8). Dabei werden zunächst die Koordinaten des Objekts sowohl für das Ist- als auch für das Soll-Layout erfasst. Ebenso können notwendige allgemeine Ressourcen zur Lagerung und zum Transport eingegeben werden. Die Abhängigkeit zu anderen Fabrikobjekten kann sich sowohl auf eine gemeinsame Demontage (bspw. bei geteilter Medienversorgung) als auch auf eine gemeinsame Vorbereitung (bspw. Erneuerung Fußboden für großen Bereich) beziehen. Die Erfassung der Zeit- und Ressourcenverbräuche der notwendigen Umzugsvorgänge erfolgt dabei für die minimale Demontagetiefe (Objekt nahezu im Ganzen) und die maximale Demontagetiefe (Objekt in Einzelteile zerlegt). Die Wegfindung für eine minimale Demontagetiefe erfolgt anhand der Dimensionen des Fabrikobjekts in x- und y-Richtung. Für die selbige Prüfung bzgl. einer maximalen Demontagetiefe ist der Nutzer aufgefordert, die Größe des Fabrikobjekts nach der erfolgten Demontage anzugeben. Dabei gelten die Abmaße des größten entstehenden Einzelteils des Fabrikobjekts als maßgeblich. Übernimmt der Nutzer die eingegebenen Daten, werden diese zu den bereits bestehenden Fabrikobjekten (in tabellarischer Form) hinzugefügt. Die gesamte aktualisierte Datenbasis kann ebenfalls als Excel-Datei exportiert werden.

Bild 9: Eingabemaske Parameter

Bevor ein Optimierungsdurchlauf gestartet werden kann, muss der Nutzer die Parameter des zugrunde liegenden Genetischen Algorithmus einstellen (s. Bild 9). Die voreingestellten Werte entsprechen den aus der Literatur entnommenen Eingangswerten für vergleichbare Planungsprobleme. Der Nutzer muss demnach nicht selbständig beurteilen, welches Parameter-Setup für ihn das bestmögliche ist, hat aber zeitgleich die Möglichkeit, vordergründig bei der Größe der Population und der Anzahl der Generationen optimierende Anpassungen vorzunehmen. Die Einstellungen der vier Anteilswerte beziehen sich wie in Abschnitt 4.4 beschrieben auf die einzelnen Bestandteile des Genetischen Algorithmus. Die voreingestellten Werte entsprechen auch hier Erfahrungswerten aus der Literatur. Eine weitere Einstellungsmöglichkeit bezieht sich auf die vorhandenen Ressourcen. Da im Layout kein Abgleich zwischen vorhandener und benötigter Lagerfläche erfolgt, muss auch die Lagerfläche als Ressource neben dem vorhandenen Personal und den vorhandenen Transportmitteln (zur Vereinfachung jeweils nur eine Ausprägung) angegeben werden. Schließlich besteht die Möglichkeit, eine Gewichtung der Zielfunktion anzugeben. Eine Gewichtung der Maschinenstillstände mit 100% ist nicht zu empfehlen, da somit eine sehr hohe Umzugsdauer ausgegeben werden könnte.

Darstellung Planungsgrundlage

Ist die Dateneingabe abgeschlossen, werden sowohl das aktuelle Layout (Ist-Layout) als auch das geplante Layout im Hauptfenster des Demonstrators angezeigt (s. Bild 10). Der Nutzer hat aus dem Hauptfenster heraus die Möglichkeit, das Umzugsprojekt zu speichern, ein altes Projekt zu laden, die Datenbasis zu exportieren oder zu importieren. Weiterhin können gesperrte Flächen (im Layout schraffiert dargestellt) angepasst werden. Selbiges gilt für die eingegebenen Maschinendaten, die Positionierung und Größe des Lagerbereichs sowie die Parametereinstellung. Innerhalb des Layouts hat der Anwender die Möglichkeit einer Zoom-Funktion. Weiterhin können alle Objekte per Drag-and-Drop an eine andere Stelle geschoben werden. Die Datenbasis wird dabei automatisch angepasst. Ein Platzieren der Objekte außerhalb des Layouts ist nicht möglich. Der Lagerbereich fungiert als gesperrte Fläche, welche nicht für Transporte genutzt werden kann. Befindet sich der Lagerbereich außerhalb des Layouts, sind die Zellen vor dem Ausgang aus dem Layout als Lagerbereich zu kennzeichnen, damit die Wegfindung für die Ein- und Auslagerung der Fabrikobjekte korrekt ablaufen kann.

Ist der Nutzer der Meinung, alle Daten eingepflegt zu haben, kann er dies über den Button „Layoutdaten überprüfen“ auf Vollständigkeit und Korrektheit prüfen. Im Demonstrator wird angezeigt, ob es noch Inkonsistenzen im Ist- oder Soll-Layout gibt (z. B. überlappende Objekte oder Lagerbereich an verschiedenen Stellen). Wie bereits in Abschnitt 4.4 beschrieben, setzt sich eine Lösung aus drei Sequenzen zusammen. Innerhalb des Hauptfensters hat der Anwender die Möglichkeit, eine „eigene Lösung“ auf Machbarkeit zu prüfen („Reihenfolge überprüfen“). Dabei werden die drei Lösungs-Sequenzen durch den Nutzer eingegeben und es erfolgt anschließend die Meldung, ob die eingegebene Lösung realisierbar ist oder nicht. Schließlich kann ein Optimierungslauf angestoßen werden. Hierzu öffnet sich ein Fenster, welches den Nutzer über den Planungsfortschritt informiert (z. B. aktuelle Generation). Ist ein Optimierungslauf abgeschlossen, kann sich der Anwender die fünf, hinsichtlich der gewichteten Zielfunktion, besten Umzugs-Terminpläne anzeigen lassen.

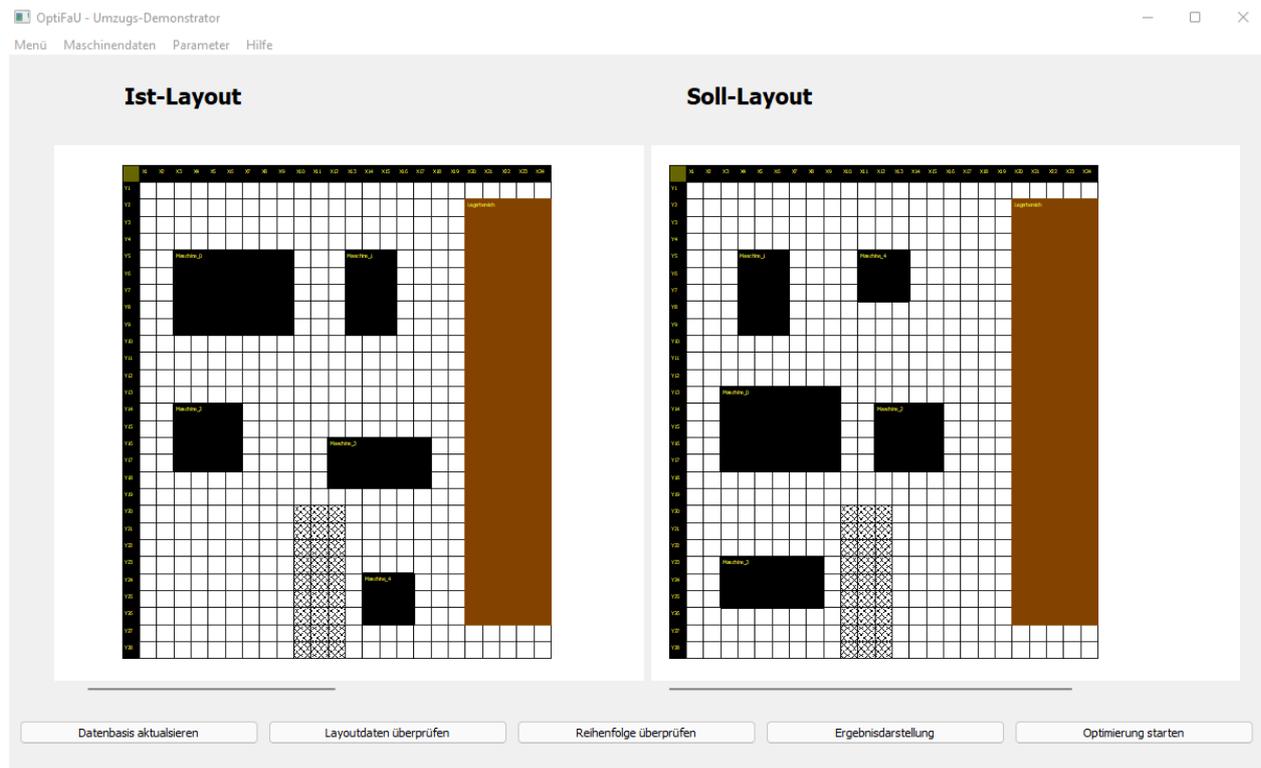


Bild 10: Hauptfenster des Demonstrators

Ergebnisdarstellung

Sobald ein Optimierungslauf abgeschlossen ist, wird wieder der Hauptbildschirm angezeigt. Der Anwender kann sich nun in der „Ergebnisdarstellung“ die fünf, hinsichtlich der gewichteten Zielfunktion, besten Umzugs-Terminpläne anzeigen lassen (s. Bild 11). Die Darstellung entspricht einem Gantt-Diagramm mit einer zeitlichen Perspektive auf der x-Achse und allen Fabrikobjekten auf der y-Achse. So kann für jedes einzelne Fabrikobjekt der zeitliche Ablauf des Umzugs nachvollzogen werden. Die Vorgänge sind gemäß der aufgeführten Legende in unterschiedlichen Farben dargestellt, dass auch hier eine Selektion erfolgen kann, bspw. zur Prüfung der Demontage-Reihenfolge. Die Lösungen der Optimierung können weiterhin in eine Excel-Datei exportiert werden. Innerhalb des Exports können bspw. auch die Zielfunktionswerte detailliert eingesehen werden.

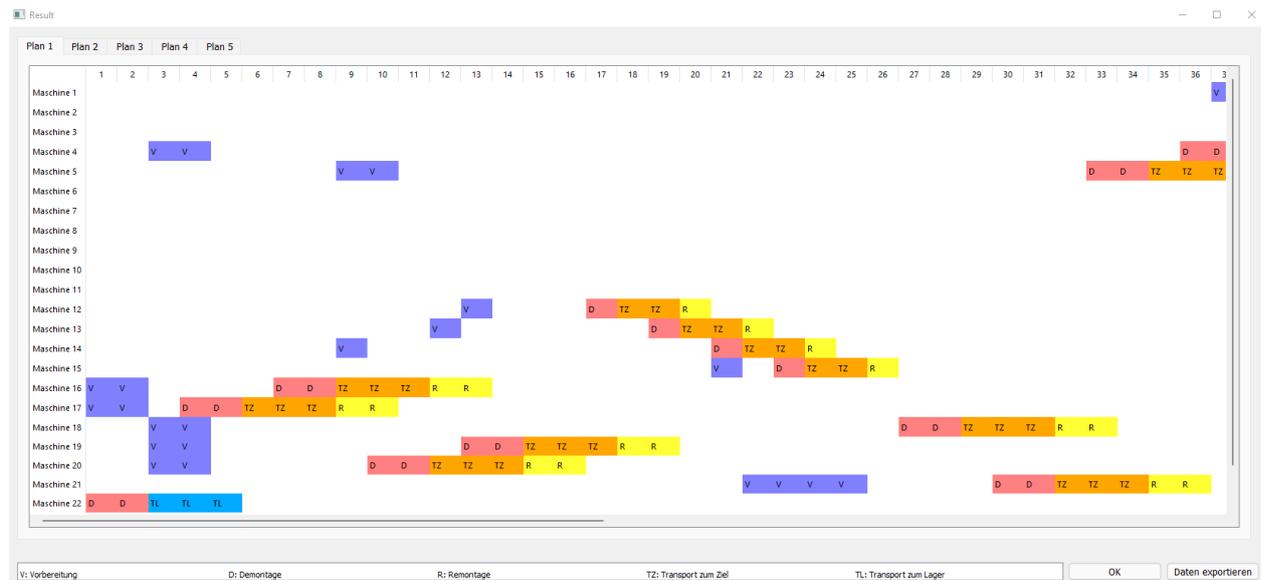


Bild 11: Fenster zur Ergebnisdarstellung

4.6. Validierung der Projektergebnisse mittels Praxisbeispielen in einer Parameterstudie

Die Validierung der Optimierungsmethode und des Software-Demonstrators erfolgte anhand von Praxisbeispielen. Da entsprechende Planungsdaten nicht von Unternehmen des PA zur Verfügung gestellt werden konnten, wurden fiktive Planungsprojekte erzeugt, welche auf realen Anwendungsfällen aus den angesprochenen Unternehmen beruhen. Gemäß der eingangs vorgestellten Einflussanalyse sind layoutseitig sowohl die Anzahl als auch die Größe der Fabrikobjekte relevant. Weiterhin spielt der Flächennutzungsgrad innerhalb des Layouts eine zentrale Rolle. Daher wurden drei Szenarien erstellt. Die Szenarien beinhalten zwei unterschiedliche Maschinentypen, welche sich hinsichtlich ihrer Größe, ihres Ressourcen- und Zeitbedarfs der Umzugsvorgänge unterscheiden. Die Kennwerte der beiden Maschinentypen „klein“ und „groß“ sind in Anhang A9 einzusehen. Das erste Szenario beinhaltet 13 Fabrikobjekte des Typs „klein“. Das zweite Szenario beinhaltet 5 Fabrikobjekte des Typs „groß“. Das dritte Szenario kombiniert 2 Fabrikobjekte des Typs „groß“ und 8 Fabrikobjekte des Typs „klein“. Jedes der drei Szenarien wird einmal in einem Layout der Größe 20x20 Zellen und einmal mit 22x22 Zellen abgebildet. Ist- und Soll-Layout sind in den entstehenden sechs Szenarien gebäudeseitig identisch, es werden somit keine baulichen Anpassungen/Veränderungen am Layout vorgenommen. Die Visualisierung der sechs Szenarien ist Anhang A10 zu entnehmen.

- Szenario 1: große Fabrikobjekte, niedriger Flächennutzungsgrad → *grM_klFG*
- Szenario 2: große Fabrikobjekte, hoher Flächennutzungsgrad → *grM_hFG*
- Szenario 3: kleine Fabrikobjekte, niedriger Flächennutzungsgrad → *klM_klFG*
- Szenario 4: kleine Fabrikobjekte, hoher Flächennutzungsgrad → *klM_hFG*
- Szenario 5: gemischte Fabrikobjekte, niedriger Flächennutzungsgrad → *MixM_klFG*
- Szenario 6: gemischte Fabrikobjekte, hoher Flächennutzungsgrad → *MixM_hFG*

Für jedes Szenario wurden für unterschiedliche Gewichtungen der Zielfunktion jeweils 10 Experimente durchgeführt. Als Gewichtungen wurden für das Verhältnis aus Projektlaufzeit (bzw. Umzugsdauer) und Stillstandzeit die Kombination 1%/99%, 25%/75%, 50%/50%, 75%/25% und 99%/1% gewählt. Auf eine einseitige Optimierung und demnach eine Vernachlässigung eines Bestandteils der Zielfunktion wurde bewusst verzichtet. Eine einseitige Optimierung in Richtung der Stillstandzeit könnte dazu führen, dass die korrespondierenden Werte der Projektlaufzeit nicht begrenzt sind. Eine Vergleichbarkeit wäre damit nicht gegeben. In der Auswertung der Ergebnisse wurden die Mittelwerte der 10 Durchläufe für jede Kombination aus Gewichtung und Szenario gebildet. Die Validität der Lösungen wurde durch den PA bestätigt. Die Ergebnisse wurde dabei in Relation zur minimal möglichen Projektlaufzeit und Stillstandzeit für jedes Szenario gesetzt. Ohne die vorhandenen Ressourcenbeschränkungen ergibt sich eine minimale Projektlaufzeit in Höhe der Summe aller Transportvorgänge ans Ziel sowie einem initialen Vorbereitungs- und einem abschließenden Remontevorgang. Aus der Datenbasis lässt sich daher eine minimale Projektlaufzeit (bzw. Umzugsdauer) PLZ_{min} für jedes Szenario ableiten. Für die minimale gesamte Stillstandzeit StZ_{min} werden für jedes Szenario die Dauer von Demontage, Transport und Remontage für jedes Fabrikobjekt aufsummiert. Die Ergebnisse für die Umzugsdauer und Stillstandzeit je Szenario entsprechen daher dem Prozentwert in Relation zum jeweiligen Minimalwert. Die Ergebnisse für die Umzugsdauer sind Bild 12 zu entnehmen. Bild 13 stellt die Ergebnisse für die Stillstandzeit dar.

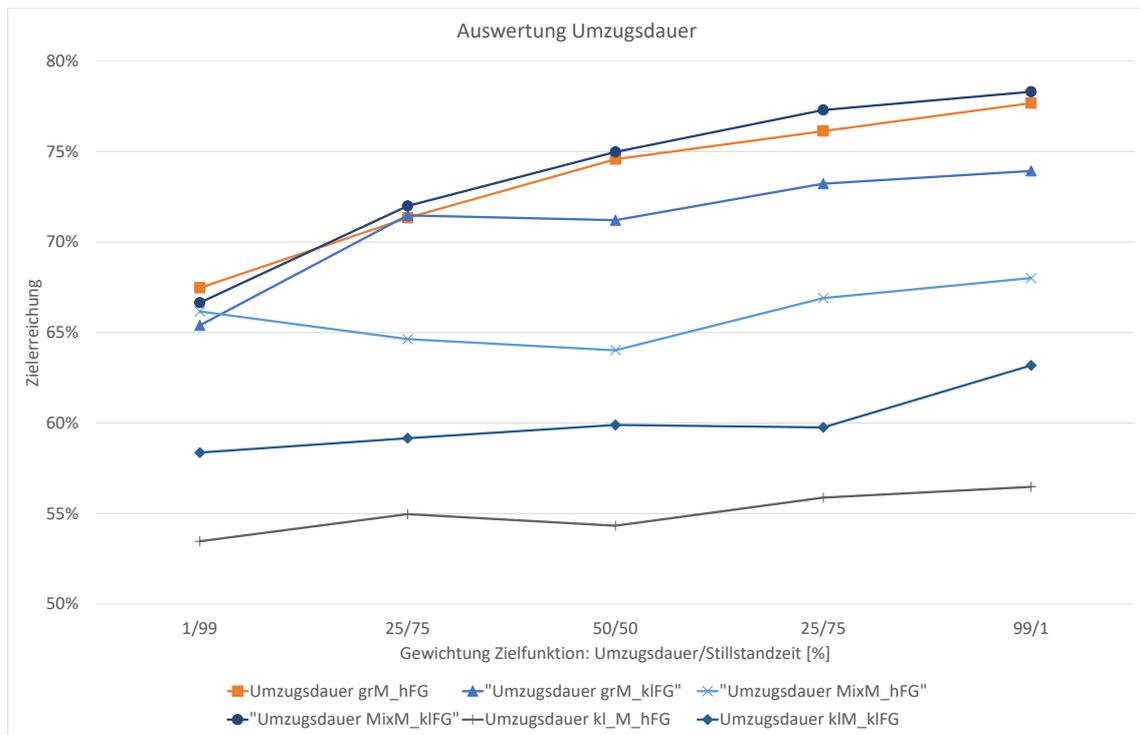


Bild 12: Ergebnisse für die Umzugszeit über alle Szenarien und Gewichtungen

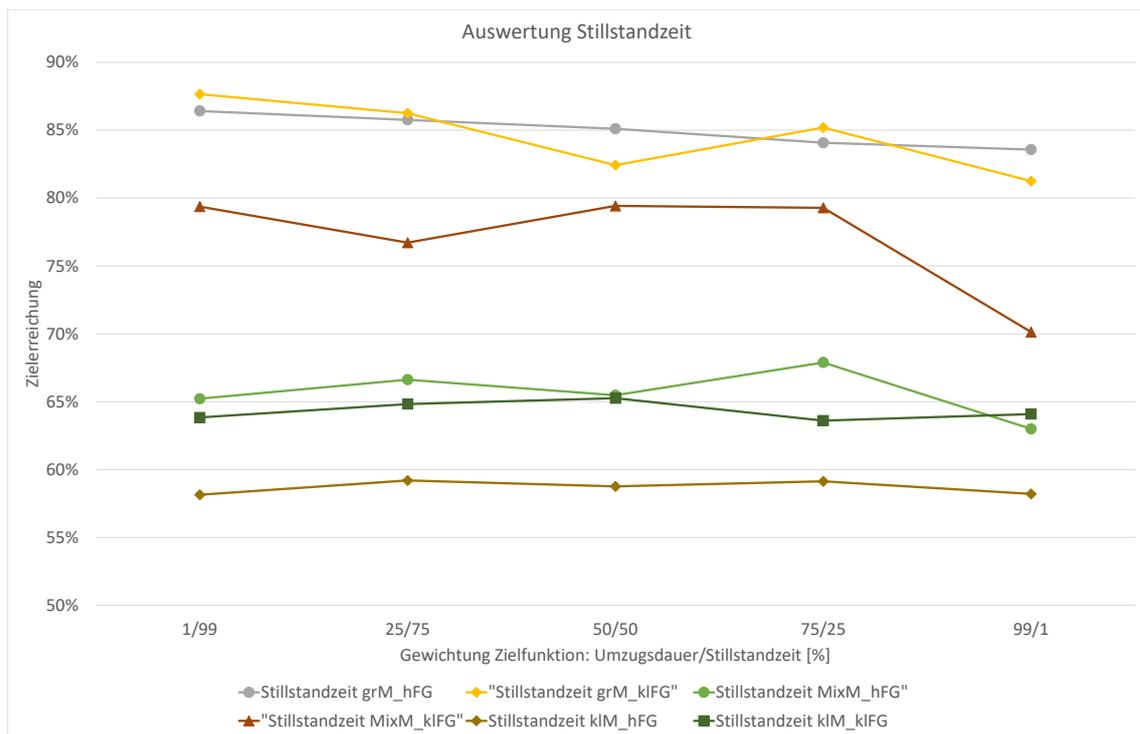


Bild 13: Ergebnisse für die Stillstandzeit über alle Szenarien und Gewichtungen

Aus den Ergebnissen der Experimente in Bezug auf die Umzugsdauer und Stillstandzeit lässt sich festhalten, dass eine Variation der Gewichtung der Zielfunktion einen höheren Einfluss auf die Projektlaufzeit (bzw. Umzugsdauer) ausübt. Dies gilt insbesondere für das Szenario mit großen Fabrikobjekten, da hier die Unterschiede des zeitlichen und ressourcenseitigen Aufwands zwischen den Demontagestufen größer sind, als bei den kleinen Fabrikobjekten. Es kann daher geschlussfolgert werden, dass die Gewichtung tendenziell in Richtung der Projektlaufzeit eingestellt werden sollte. Die Lösungen der Experimente wurden weiterhin dahingehend analysiert, inwiefern die Demontage und Lagerung zwischen den Szenarien variieren. Hierzu wurde für jede

Lösung der finalen Population eines jeden Experiments der entsprechende Demontage- und Lagergrad ermittelt. Der Demontagegrad (Bild 14) setzt die Anzahl maximal demontierter Fabrikobjekte (Demontagetiefe „1“) in Relation zur Gesamtanzahl der Fabrikobjekte. Der Lagergrad (Bild 15) setzt wiederum die Anzahl eingelagerter Fabrikobjekte in Relation zur Anzahl aller Fabrikobjekte.

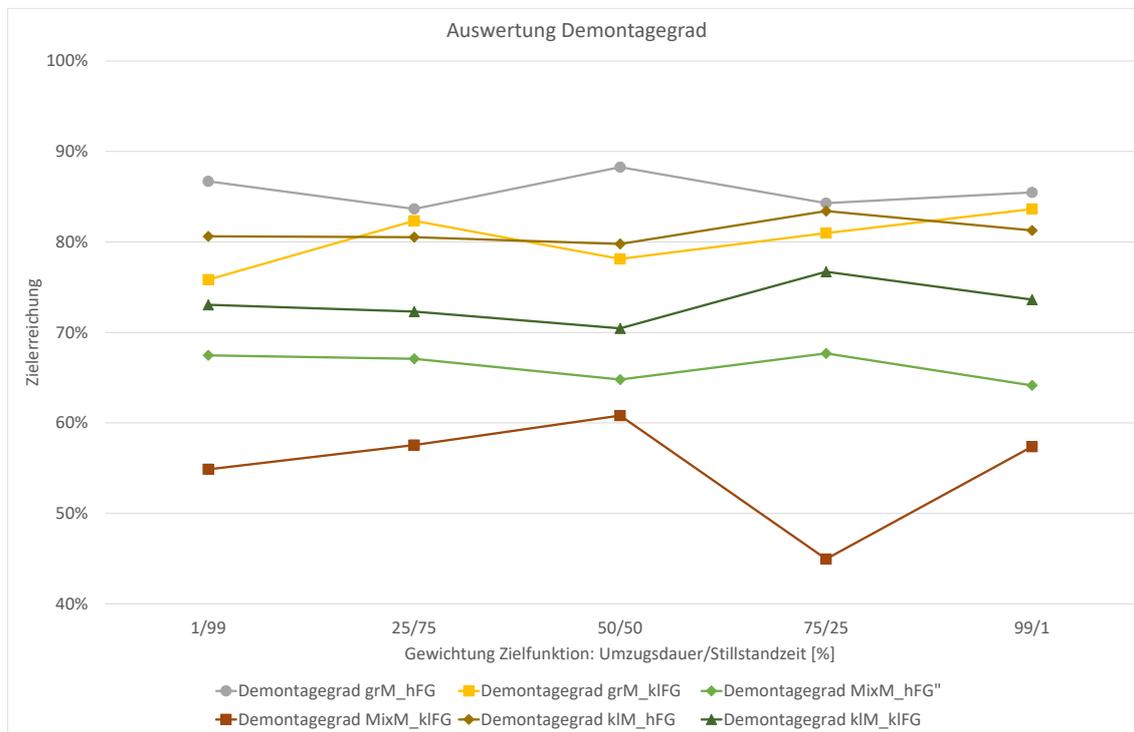


Bild 14: Auswertung Demontagegrad über alle Szenarien und Gewichtungen

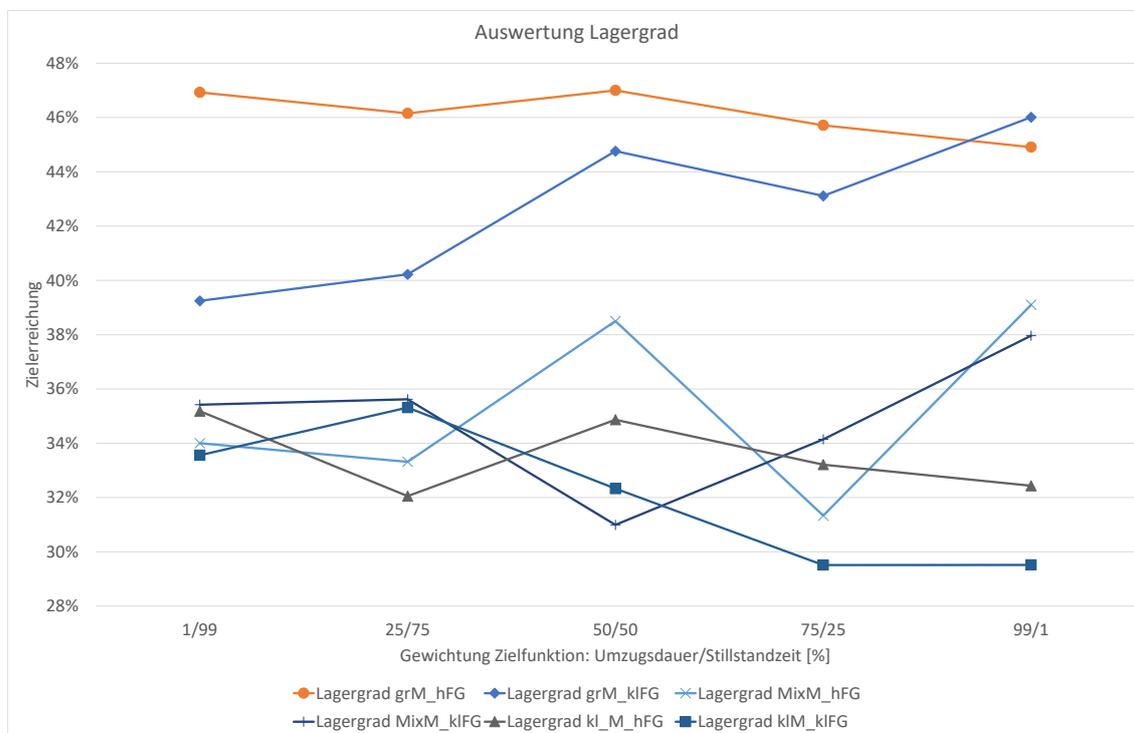


Bild 15: Auswertung Lagergrad über alle Szenarien und Gewichtungen

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass sowohl bei einem hohen Flächennutzungsgrad als auch für große Fabrikobjekte ein hoher Demontagegrad zu besseren Optimierungsergebnissen

führt. Für kleinere Fabrikobjekte und einen niedrigeren Flächennutzungsgrad sinkt der Demontegrad entsprechend. Hier kann es vorteilhafter sein, die Fabrikobjekte vermehrt im Ganzen zu versetzen. Die Auswertung des Lagergrad zeigt ein ähnliches Bild. Auch für einen hohen Flächennutzungsgrad und insbesondere für große Fabrikobjekte führt eine Zwischenlagerung zu besseren Optimierungsergebnissen. Dies ist dahingehend zu erklären, dass der flächenmäßige Zugewinn durch die Einlagerung eines einzelnen Fabrikobjekts von der Größe des Objekts abhängt. Um denselben Effekt für kleinere Fabrikobjekte zu erzielen, müssten hier mehrere Einlagerungen stattfinden, was wiederum einen negativen Effekt auf die Zielfunktion hätte. Final lässt sich festhalten, dass die Planungsmethode zur Erzeugung und Bewertung von Umzugsplänen, eingebettet in einen Software-Demonstrator valide Lösungen liefert und im Rahmen der Grenzen individueller Planungs-Szenarien verallgemeinerbare Interpretationen der Eingangsgrößen zulässt.

5. Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
 - 16,5 PM wissenschaftliches Personal HPA A mit besonderen Kenntnissen im Bereich Fabrikplanung
 - 5,5 PM wissenschaftliches Personal HPA A mit besonderen Kenntnissen im Bereich Operations Research
 - 2 PM wissenschaftliches Personal HPA A mit besonderen Kenntnissen im Bereich Projektplanung
 - wissenschaftliche Hilfskräfte als Unterstützung bei der Projektbearbeitung für 1968,5 Stunden
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
 - Keine Geräte angeschafft
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
 - Keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen
 - 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 Erfahrungen der durchführenden Forschungsstelle wurde deutlich, dass speziell KMU mit einer Umzugsplanung im Rahmen eines Fabrikplanungsprojekts 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 Software-Demonstrator bereitgestellt, welcher produzierende Unternehmen bei der Planung und Bewertung eines Termin- bzw. Projektplans für Fabrikumzüge unterstützt und damit direkt in der Industrie angewendet werden kann. Für die Entwicklung der Methode und die Integration in einem Software-Demonstrators war die gründliche Bearbeitung der Arbeitspakete und das Verwenden von wissenschaftlichen Methoden ein wichtiger grundlegender Faktor. Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete mussten so aufge-

arbeitet werden, dass sie im Rahmen der Implementierung des Software-Demonstrators 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 Fabrikplanungs- und Umzugsdienstleister. Durch die Nutzung der Optimierungsmethode beziehungsweise des Software-Demonstrators als objektive Entscheidungsunterstützung werden KMU in die Lage versetzt, verschiedene Alternativen in der Durchführung eines Fabrikumzuges zu ermitteln und zu bewerten. 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 zeitverzögerten Umzugs 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 Umzugsplans als Vergleich zu manuell erstellten, um etwaige bislang nicht erkannte Reihenfolge-Alternativen zu identifizieren). Darüber hinaus liefert das Forschungsvorhaben eine Entscheidungsgrundlage, welche Fragestellungen proaktiv in der Phase der Planung des Fabrikumzuges beantwortet werden müssen (z. B. Schaffung produktionsfreier Zeiträume) und welche Entscheidung unter welchen Rahmenbedingungen sinnvoll sein kann.

8. Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen

Während der Projektlaufzeit wurden bereits erste Maßnahmen zum Ergebnistransfer durchgeführt. Nach dem Ende der Projektlaufzeit sind weitere Maßnahmen zur Verbreitung der Projektergebnisse sowie für den Transfer der Ergebnisse in die praktische Anwendung geplant. Zentrales Element des Wissenstransfers ist der Austausch zwischen der Forschungsstelle und den Unternehmen des PA sowie weiteren interessierten Unternehmen. Durch diesen Austausch wurde die praktische Umsetzbarkeit der Ergebnisse gewährleistet. Der PA setzte sich aus produzierenden Unternehmen, Dienstleistern mit Schwerpunkt Fabrikumzug sowie Fabrikplanungsexperten zusammen. Die durchgeführten und weiterführend geplanten Transfermaßnahmen werden in den Tabelle 4 und Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 4: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft (spezifisch durchgeführte Transfermaßnahmen)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
Versorgung der interessierten Fachöffentlichkeit, im besonderen KMU, mit Informationen	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Einrichtung einer Projekthomepage: http://optifau.ipf-hannover.de	01/2021
		Pressemitteilung zum Projektbeginn: „Fabrikplanung: So finden Unternehmen die optimale Umzugs-Strategie“	02/2021
		Veröffentlichung: „Nitsche, A.; Aurich, P.; Stonis, M.: Umzugsplanung in der Reorganisation von Fabrikobjekten. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Carl Hanser Verlag, 116. Jg. (2021), H. 7-8“	04/2021

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
		Veröffentlichung: „Nitsche, A.; Stonis, M.; Nyhuis, P.: Planung und Durchführung von Fabrikumzügen. In: VDI-Z, VDI Verlag, 164. Jg., S. 67–69 (2022), H. 1-2“	12/2021
		Veröffentlichung: „Nitsche, A.; Stonis, M.; Nyhuis, P.: Qualitative Wirkzusammenhänge für die Planung und Durchführung von Umzugsprojekten in der Reorganisation von Fabriken. In: Industrie 4.0 Management, GITO Verlag, S. 53-57 (2023), H. 1“	12/2022
		Veröffentlichung: „Nitsche, A.; Stonis, M.; Nyhuis, P.: Fabrikumzüge im Rahmen von Reorganisationsprojekten – Methodische Planung und Bewertung. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Carl Hanser Verlag, 118. Jg. (2023), H. 4“	03/2023
Projektbegleitender Ausschuss	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft, Erfahrungsaustausch	Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses:	03/2021
		Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses:	04/2022
		Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses:	03/2023
		Arbeitstreffen mit Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses: Diskussion der Projektergebnisse, Validierung des Planungsablaufs und Software-Demonstrators	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
Akademische Lehre und berufliche Weiterbildung	Qualifizierung von Studenten	Anstellung von studentischen Hilfskräften	seit 01/2021
		Betreuung der Bachelorarbeit: „Identifikation relevanter Restriktionen für die Planung und Durchführung des Umzugs von Fabrikobjekten“	05/2021 – 08/2021
		Betreuung der Bachelorarbeit: „Systematisierung von Zielgrößen in der Planung von Fabrikumzügen“	04/2021-07/2021
		Betreuung der Masterarbeit: „Entwicklung eines Wirkmodells für die Planung und Realisierung von Fabrikumzügen in Restrukturierungsprojekten“	04/2021-10/2021

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
		Betreuung der Studienarbeit: „Formulierung und Klassifizierung von Unterscheidungskriterien in der Realisierung von Restrukturierungsprojekten in der Fabrikplanung“	05/2021-09/2021
		Betreuung der Masterarbeit: „Entwicklung eines Planungsalgorithmus zur Verbesserung eines Umzugsplans von Fabrikobjekten im Kontext der Fabriklayoutplanung“	05/2021-10/2021
		Betreuung der Masterarbeit: „Entwicklung eines heuristischen Lösungsverfahrens zur Bestimmung eines Umzugsplans von Fabrikobjekten im Zuge der Realisierung eines Fabriklayouts“	04/2021-10/2021
		Betreuung der Bachelorarbeit: „Entwicklung einer Methode zur Ermittlung der objektbezogenen Umzugszeit zur Realisierung eines neuen Fabriklayouts“	04/2022-07/2022
		Betreuung der Masterarbeit: „Simulationsbasierte Untersuchung des Einflusses der Umzugsreihenfolge in der Reorganisation von Fabrikobjekten auf logistische Zielgrößen“	07/2022-01/2023

Tabelle 5: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft (spezifisch geplante Transfermaßnahmen)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft, Erfahrungsaustausch	Durchführung von weiteren Validierungen zur Weiterentwicklung des Software-Demonstrators	04/2023 ff.
Versorgung der interessierten Fachöffentlichkeit, im besonderen KMU, mit Informationen	Ergebnistransfer in die Wirtschaft und Wissenschaft	Veröffentlichung eines Beitrags auf dem Blog eines Umzugsdienstleisters (Mitglied PA)	08/2023
		Vorstellung der Projektziele und erzielter Ergebnisse bei interessierten Unternehmen vor Ort sowie fernmündlich	04/2023 ff.
		Veröffentlichung weiterer Beiträge in Fachzeitschriften - z. B. Parameterstudie	08/2023 ff.
Weiterbildung	Akademische Ausbildung	Integration in den Vorlesungsbetrieb der Universität Hannover, bspw. in die Vorlesungen Fabrikplanung und Anlagenmanagement des Instituts für Fabrikanlagen und Logistik	04/2023 ff.

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
		Verwendung der Projekteinhalte zur Erstellung einer Dissertation	04/2023 ff.
		Aufnahme von Projekteinhalten in das Seminarprogramm des IPH	04/2023 ff.
	Qualifizierung von KMU	Test des Software-Demonstrators durch weitere Unternehmen	04/2023 ff.
weitere Transfermaßnahmen	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Beratungsangebote des IPH an interessierte KMU	04/2023 ff.
	Nutzung der erzielten Projektergebnisse für Transferprojekte	Präsentation der Projektergebnisse auf Fachmessen (z.B. Hannover Messe)	04/2023 ff.

9. Einschätzung der Realisierbarkeit der geplanten Maßnahmen

Die Planungsmethode zur Erzeugung von Umzugsplänen ermöglicht KMU die aufwandsarme Prüfung oder Erstellung von Terminplänen zur Realisierung eines geplanten Layout-Konzepts, insbesondere für Reorganisationsprojekte. Die Einbettung innerhalb eines Demonstrators stellt die aufwandsarme Anwendbarkeit sicher, gibt dem Anwender eine Entscheidungsunterstützung an die Hand und trägt somit zur Absicherung der terminlichen Planung bei, welche mit für KMU nicht unerheblichen Kosten verbunden ist. Zur Nutzung des Demonstrators ist lediglich dessen Download und optional der Datenimport via Standardsoftware (MS 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 im Bereich der Realisierung von Layout-Konzepten an. Das IPH wird auf Anfrage sowohl den Software-Demonstrator als auch die projektbezogene Unterstützung bei der Fabriklayout- und -umzugsplanung anbieten. Der Software-Demonstrator 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 Mutterinstitute des IPH hauptsächlich den Bereich der Grundlagenforschung abdecken, widmet sich das IPH hauptsächlich der anwendungsorientierten Forschung 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.: 0511/27976-111

Projektleiter

M. Sc. Andreas Nitsche

Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Logistik des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH

11. Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 21514 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 Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung sei an dieser Stelle gedankt.

12. Anhang

A1 – Einflussfaktoren auf die Planung und Durchführung von Fabrikumzügen

Kategorie	Einflussgröße	Ausprägungen
Logistische Einflussfaktoren	Transportmittel	Art, maximale Traglast, Flurbindung
	Transportstrecke	Distanz, Engstellen, Untergrund
	Transportsicherung	Sicherungsmaterial, Verpackung, Notwendige Transportlage Objekte
Technische Einflussfaktoren	Objekteigenschaften	Gewicht, Abmessungen, Aufnahmepunkte Transport, geometrischer Aufbau, Medienanschlüsse
	Demontagetiefe	Zerlegbarkeit der Objekte, Komplexitätsgrad De- und Remontage, Risiko von Beschädigungen
	Platzbedarf Objekt	Räumliche Restriktionen, Zugänglichkeit von unterschiedlichen Seiten, zusätzlicher Flächebedarf
	Gebäudedaten	Gebäudestatik, Gebäudeform, Anzahl Stockwerke, TGA
	Inbetriebnahme	Einrichtung, Hochlaufbetreuung, Abnahme
Rechtliche Einflussfaktoren	Interessengruppen	Geschäftsführung, Betriebsrat, operative Mitarbeiter Maschinenhersteller, Dienstleister
	Genehmigungen und Auflagen	Betriebsvereinbarungen, Gutachten, Gewährleistung Hersteller, Letzt- und Erstteilabnahmen
	Vertragsart	Frachtvertrag, Werkvertrag
Organisatorische Einflussfaktoren	Terminplanung	Ressourcenbedarf, Zeitaufwand Demontage, Transport, Meilensteine
	Personal	Anzahl, externe un interne Qualifikation
	Produktionsplanung	Auslastung Objekte, Vorproduktion
	Verfügbare Zeiträume	Schichtmodell, Betriebsferien
	Fertigungsstruktur	Verrichtungsprinzipien, Verkettung Objekte, Wertschöpfungsprozess
	Branchenabhängigkeit	Produktionsbereich
Wirtschaftliche Einflussfaktoren	Projektbudget	Kosten als limitierender Faktor
	Sicherheiten	Versicherung, externe Beauftragung, Vertragsbestandteile
	Produktionsausfall	Direkte und indirekte Ausfallkosten, Zeitfenster Maschinenstillstand

A2 – Entscheidungsmatrix Umzugs-Strategie - Demontageoption

Einflussfaktoren	Ausprägung Einflussfaktor	Bewertung Einflussfaktor	Demontageoption	
			Maschinen möglichst im Ganzen	Maschinen möglichst auseinander bauen
Layoutspezifische Fragen:				
Art der Maschinen	kleine große kleine und große		x x	 x x
Variation des Maschinengewichts	niedrig mittel hoch			x
Variation der Maschinengröße	niedrig mittel hoch			x
Anzahl verschiedener Fertigungsprozesse	1-2 Prozesse 3-5 Prozesse mehr als 5 Prozesse			
Bauliche Veränderungen am Gebäude	nicht notwendig notwendig			
Anpassungen an der TGA	nicht notwendig notwendig			
Erneuerung des Fußbodens	nicht notwendig an weniger Stellen notwendig an vielen Stellen notwendig			
Veränderung der bestehenden Gebäudestruktur	keine Veränderungen Anbau am Gebäude			
Verfügbarkeit Deckenkran	verfügbar nicht verfügbar		x	
Traglast des Deckenkran	niedrig mittel hoch		x x	x x
Flächennutzungsgrad	niedrig mittel hoch		x x	x x
Verfügbarkeit Beistellflächen	keine Flächen innerhalb Halle außerhalb Halle		x x	x
Sind Beschränkungen entlang möglicher Transportwege vorhanden? (z. B. Höhenunterschiede)	vorhanden nicht vorhanden			
Vorherrschendes Fertigungsprinzip	Baustellenfertigung Werkstattfertigung Fließfertigung Mix			
Grad der Verkettung des Fertigungsprozesses	keine Verkettung lose Verkettung starre Verkettung			
Heterogenität des Produktportfolios	gleichartige Produkte verschiedene Produkte stark verschiedene Produkte			

Vorherrschende Fertigungsstrategie	Lagerfertigung Auftragsfertigung		
In welchem Schichtmodell wird vorrangig produziert?	Einschicht Doppelschicht Dreischicht		
Ist eine Durchführung an Wochenenden möglich?	möglich nicht möglich		
Gibt es Meilensteine, ist das Projekt in Teilabschnitten durchführbar?			
Breite des schmalsten Transportwegs im aktuellen Layout	schmal breit		x x
Kann internes Personal für den Umzug zur Verfügung gestellt werden?	ja nein		
Maschinenspezifische Fragen:			
Gewicht der Maschine	leicht schwer		x x
Grundfläche der Maschine	klein groß		x x
Wie hoch ist die Maschine durchschnittlich ausgelastet?	kleiner als 70% kleiner als 85% 85% und höher		
Besteht die Möglichkeit der Vorproduktion/Bestandsaufbau mit dieser Maschine?	Vorproduktion möglich Vorproduktion nicht möglich		
Existiert eine alternative Fertigungsmöglichkeit?	vorhanden nicht vorhanden		
Ist die Maschine Teil einer Maschinengruppe?	ja nein		
Besteht eine Verkettung mit anderen Maschinen?	ja nein		
Wie hoch ist die Maschinengruppe durchschnittlich ausgelastet?	kleiner als 70% kleiner als 85% 85% und höher		
Müssen Betriebs-/Gefahrstoffe abgelassen werden?	ja nein		
Bestehen Gewährleistungsansprüche gegenüber dem Hersteller der Maschine?	ja nein		x x
Muss die Maschine während des Transports gegen Erschütterungen gesichert werden?	ja nein		
Besteht die Möglichkeit, die Maschine zu demontieren?	ja nein		K.O.

Komplexität der De- und Remontage	einfach kompliziert		x	x
Ist ein spezieller Stromanschluss notwendig (z. B. US-Strom, Starkstrom)?	ja nein			
Muss die Maschine an die zentrale Druckluftversorgung angebunden werden?	ja nein			
Muss die Maschine an die zentrale Hydraulikversorgung angebunden werden?	ja nein			
Ist ein Wasser-/Abwasseranschluss notwendig?	ja nein			

A3 – Entscheidungsmatrix Umzugs-Strategie – Vorproduktion

Einflussfaktoren	Ausprägung Einflussfaktor	Bewertung Einflussfaktor	Vorproduktion	
			Bestandsaufbau betreiben	Keinen Bestandsaufbau betreiben
Layoutspezifische Fragen:				
Art der Maschinen	kleine große kleine und große			
Variation des Maschinengewichts	niedrig mittel hoch			
Variation der Maschinengröße	niedrig mittel hoch			
Anzahl verschiedener Fertigungsprozesse	1-2 Prozesse 3-5 Prozesse mehr als 5 Prozesse			
Bauliche Veränderungen am Gebäude	nicht notwendig notwendig			
Anpassungen an der TGA	nicht notwendig notwendig			
Erneuerung des Fußbodens	nicht notwendig an weniger Stellen notwendig an vielen Stellen notwendig			
Veränderung der bestehenden Gebäudestruktur	keine Veränderungen Anbau am Gebäude			
Verfügbarkeit Deckenkran	verfügbar nicht verfügbar			
Traglast des Deckenkran	niedrig mittel hoch			
Flächennutzungsgrad	niedrig mittel hoch		x x	x x
Verfügbarkeit Beistellflächen	keine Flächen innerhalb Halle außerhalb Halle		x x	x
Sind Beschränkungen entlang möglicher Transportwege vorhanden? (z. B. Höhenunterschiede)	vorhanden nicht vorhanden			x
Vorherrschendes Fertigungsprinzip	Baustellenfertigung Werkstattfertigung Fließfertigung Mix		x x	x
Grad der Verkettung des Fertigungsprozesses	keine Verkettung lose Verkettung starre Verkettung		x x	
Heterogenität des Produktportfolios	gleichartige Produkte verschiedene Produkte stark verschiedene Produkte		x	x

Vorherrschende Fertigungsstrategie	Lagerfertigung Auftragsfertigung		x	x
In welchem Schichtmodell wird vorrangig produziert?	Einschicht Doppelschicht Dreischicht		x x	x
Ist eine Durchführung an Wochenenden möglich?	möglich nicht möglich			
Gibt es Meilensteine, ist das Projekt in Teilabschnitten durchführbar?				
Breite des schmalsten Transportwegs im aktuellen Layout	schmal breit			
Kann internes Personal für den Umzug zur Verfügung gestellt werden?	ja nein			
Maschinenspezifische Fragen:				
Gewicht der Maschine	leicht schwer			
Grundfläche der Maschine	klein groß			
Wie hoch ist die Maschine durchschnittlich ausgelastet?	kleiner als 70% kleiner als 85% 85% und höher		x	x
Besteht die Möglichkeit der Vorproduktion/Bestandsaufbau mit dieser Maschine?	Vorproduktion möglich Vorproduktion nicht möglich			K.O.
Existiert eine alternative Fertigungsmöglichkeit?	vorhanden nicht vorhanden		x	x
Ist die Maschine Teil einer Maschinengruppe?	ja nein		x	x
Besteht eine Verkettung mit anderen Maschinen?	ja nein		x	x
Wie hoch ist die Maschinengruppe durchschnittlich ausgelastet?	kleiner als 70% kleiner als 85% 85% und höher		x	x
Müssen Betriebs-/Gefahrstoffe abgelassen werden?	ja nein		x	x
Bestehen Gewährleistungsansprüche gegenüber dem Hersteller der Maschine?	ja nein			
Muss die Maschine während des Transports gegen Erschütterungen gesichert werden?	ja nein			
Besteht die Möglichkeit, die Maschine zu demontieren?	ja nein			

Komplexität der De- und Remontage	einfach kompliziert		
Ist ein spezieller Stromanschluss notwendig (z. B. US-Strom, Starkstrom)?	ja nein		x x
Muss die Maschine an die zentrale Druckluftversorgung angebunden werden?	ja nein		x x
Muss die Maschine an die zentrale Hydraulikversorgung angebunden werden?	ja nein		x x
Ist ein Wasser-/Abwasseranschluss notwendig?	ja nein		x x

A4 – Entscheidungsmatrix Umzugs-Strategie – Umzugsabschnitte

Einflussfaktoren	Ausprägung Einflussfaktor	Bewertung Einflussfaktor	Umzugsabschnitte	
			Umzug am Stück durchführen	Umzug in mehrere Abschnitte teilen
Layoutspezifische Fragen:				
Art der Maschinen	kleine große kleine und große		x x	x x
Variation des Maschinengewichts	niedrig mittel hoch		x x	x x
Variation der Maschinengröße	niedrig mittel hoch		x x	x x
Anzahl verschiedener Fertigungsprozesse	1-2 Prozesse 3-5 Prozesse mehr als 5 Prozesse		x	x
Bauliche Veränderungen am Gebäude	nicht notwendig notwendig		x	x
Anpassungen an der TGA	nicht notwendig notwendig		x	x
Erneuerung des Fußbodens	nicht notwendig an weniger Stellen notwendig an vielen Stellen notwendig		x	x x
Veränderung der bestehenden Gebäudestruktur	keine Veränderungen Anbau am Gebäude			
Verfügbarkeit Deckenkran	verfügbar nicht verfügbar			
Traglast des Deckenkran	niedrig mittel hoch			
Flächennutzungsgrad	niedrig mittel hoch		x	x
Verfügbarkeit Beistellflächen	keine Flächen innerhalb Halle außerhalb Halle		x	x x
Sind Beschränkungen entlang möglicher Transportwege vorhanden? (z. B. Höhenunterschiede)	vorhanden nicht vorhanden		x	x
Vorherrschendes Fertigungsprinzip	Baustellenfertigung Werkstattfertigung Fließfertigung Mix		x	x
Grad der Verkettung des Fertigungsprozesses	keine Verkettung lose Verkettung starre Verkettung		x x	x x
Heterogenität des Produktportfolios	gleichartige Produkte verschiedene Produkte stark verschiedene Produkte			

Vorherrschende Fertigungsstrategie	Lagerfertigung Auftragsfertigung		x	x
In welchem Schichtmodell wird vorrangig produziert?	Einschicht Doppelschicht Dreischicht		x	x
Ist eine Durchführung an Wochenenden möglich?	möglich nicht möglich		x	
Gibt es Meilensteine, ist das Projekt in Teilabschnitten durchführbar?				
Breite des schmalsten Transportwegs im aktuellen Layout	schmal breit			
Kann internes Personal für den Umzug zur Verfügung gestellt werden?	ja nein			
Maschinenspezifische Fragen:				
Gewicht der Maschine	leicht schwer			
Grundfläche der Maschine	klein groß			
Wie hoch ist die Maschine durchschnittlich ausgelastet?	kleiner als 70% kleiner als 85% 85% und höher			
Besteht die Möglichkeit der Vorproduktion/Bestandsaufbau mit dieser Maschine?	Vorproduktion möglich Vorproduktion nicht möglich			
Existiert eine alternative Fertigungsmöglichkeit?	vorhanden nicht vorhanden			
Ist die Maschine Teil einer Maschinengruppe?	ja nein			
Besteht eine Verkettung mit anderen Maschinen?	ja nein			
Wie hoch ist die Maschinengruppe durchschnittlich ausgelastet?	kleiner als 70% kleiner als 85% 85% und höher			
Müssen Betriebs-/Gefahrstoffe abgelassen werden?	ja nein			
Bestehen Gewährleistungsansprüche gegenüber dem Hersteller der Maschine?	ja nein			
Muss die Maschine während des Transports gegen Erschütterungen gesichert werden?	ja nein			
Besteht die Möglichkeit, die Maschine zu demontieren?	ja nein			

Komplexität der De- und Remontage	einfach kompliziert		
Ist ein spezieller Stromanschluss notwendig (z. B. US-Strom, Starkstrom)?	ja nein		
Muss die Maschine an die zentrale Druckluftversorgung angebunden werden?	ja nein		
Muss die Maschine an die zentrale Hydraulikversorgung angebunden werden?	ja nein		
Ist ein Wasser-/Abwasseranschluss notwendig?	ja nein		

A5 – Entscheidungsmatrix Umzugs-Strategie – Lageroption

Einflussfaktoren	Ausprägung Einflussfaktor	Bewertung Einflussfaktor	Zwischenlageroption	
			Zwischenlageroption nutzen/schaffen	Zwischenlageroption nicht nutzen
Layoutspezifische Fragen:				
Art der Maschinen	kleine große kleine und große		x x	x
Variation des Maschinengewichts	niedrig mittel hoch		x x	x x
Variation der Maschinengröße	niedrig mittel hoch		x x	x x
Anzahl verschiedener Fertigungsprozesse	1-2 Prozesse 3-5 Prozesse mehr als 5 Prozesse			
Bauliche Veränderungen am Gebäude	nicht notwendig notwendig		x	x
Anpassungen an der TGA	nicht notwendig notwendig		x	x
Erneuerung des Fußbodens	nicht notwendig an weniger Stellen notwendig an vielen Stellen notwendig		x x	x
Veränderung der bestehenden Gebäudestruktur	keine Veränderungen Anbau am Gebäude		x	x
Verfügbarkeit Deckenkran	verfügbar nicht verfügbar		x	x
Traglast des Deckenkran	niedrig mittel hoch			
Flächennutzungsgrad	niedrig mittel hoch		x x	x x
Verfügbarkeit Beistellflächen	keine Flächen innerhalb Halle außerhalb Halle			
Sind Beschränkungen entlang möglicher Transportwege vorhanden? (z. B. Höhenunterschiede)	vorhanden nicht vorhanden		x	x
Vorherrschendes Fertigungsprinzip	Baustellenfertigung Werkstattfertigung Fließfertigung Mix		x	x x
Grad der Verkettung des Fertigungsprozesses	keine Verkettung lose Verkettung starre Verkettung		x x	x
Heterogenität des Produktportfolios	gleichartige Produkte verschiedene Produkte stark verschiedene Produkte			

Vorherrschende Fertigungsstrategie	Lagerfertigung Auftragsfertigung			
In welchem Schichtmodell wird vorrangig produziert?	Einschicht Doppelschicht Dreischicht		x	x x
Ist eine Durchführung an Wochenenden möglich?	möglich nicht möglich		x	x
Gibt es Meilensteine, ist das Projekt in Teilabschnitten durchführbar?				
Breite des schmalsten Transportwegs im aktuellen Layout	schmal breit		x	x
Kann internes Personal für den Umzug zur Verfügung gestellt werden?	ja nein			
Maschinenspezifische Fragen:				
Gewicht der Maschine	leicht schwer			
Grundfläche der Maschine	klein groß		x	
Wie hoch ist die Maschine durchschnittlich ausgelastet?	kleiner als 70% kleiner als 85% 85% und höher		x x	x x
Besteht die Möglichkeit der Vorproduktion/Bestandsaufbau mit dieser Maschine?	Vorproduktion möglich Vorproduktion nicht möglich		x	x
Existiert eine alternative Fertigungsmöglichkeit?	vorhanden nicht vorhanden		x	x
Ist die Maschine Teil einer Maschinengruppe?	ja nein			
Besteht eine Verkettung mit anderen Maschinen?	ja nein		x	x
Wie hoch ist die Maschinengruppe durchschnittlich ausgelastet?	kleiner als 70% kleiner als 85% 85% und höher		x x	x x
Müssen Betriebs-/Gefahrstoffe abgelassen werden?	ja nein			
Bestehen Gewährleistungsansprüche gegenüber dem Hersteller der Maschine?	ja nein			
Muss die Maschine während des Transports gegen Erschütterungen gesichert werden?	ja nein		x	x
Besteht die Möglichkeit, die Maschine zu demontieren?	ja nein			

Komplexität der De- und Remontage	einfach kompliziert		
Ist ein spezieller Stromanschluss notwendig (z. B. US-Strom, Starkstrom)?	ja nein		
Muss die Maschine an die zentrale Druckluftversorgung angebunden werden?	ja nein		
Muss die Maschine an die zentrale Hydraulikversorgung angebunden werden?	ja nein		
Ist ein Wasser-/Abwasseranschluss notwendig?	ja nein		

A6 – Entscheidungsmatrix Umzugs-Strategie – Umzugszeitpunkt

Einflussfaktoren	Ausprägung Einflussfaktor	Bewertung Einflussfaktor	Umzugszeitpunkt	
			produktions- freier Zeitraum	während der laufenden Produktion
Layoutspezifische Fragen:				
Art der Maschinen	kleine große kleine und große			
Variation des Maschinengewichts	niedrig mittel hoch			
Variation der Maschinengröße	niedrig mittel hoch			
Anzahl verschiedener Fertigungsprozesse	1-2 Prozesse 3-5 Prozesse mehr als 5 Prozesse		x x	x x
Bauliche Veränderungen am Gebäude	nicht notwendig notwendig		x	x
Anpassungen an der TGA	nicht notwendig notwendig		x	x
Erneuerung des Fußbodens	nicht notwendig an weniger Stellen notwendig an vielen Stellen notwendig		x x	x
Veränderung der bestehenden Gebäudestruktur	keine Veränderungen Anbau am Gebäude		x	x
Verfügbarkeit Deckenkran	verfügbar nicht verfügbar			
Traglast des Deckenkran	niedrig mittel hoch			
Flächennutzungsgrad	niedrig mittel hoch		x x	x x
Verfügbarkeit Beistellflächen	keine Flächen innerhalb Halle außerhalb Halle			
Sind Beschränkungen entlang möglicher Transportwege vorhanden? (z. B. Höhenunterschiede)	vorhanden nicht vorhanden		x	x
Vorherrschendes Fertigungsprinzip	Baustellenfertigung Werkstattfertigung Fließfertigung Mix		x	x x
Grad der Verkettung des Fertigungsprozesses	keine Verkettung lose Verkettung starre Verkettung		x x	x
Heterogenität des Produktportfolios	gleichartige Produkte verschiedene Produkte stark verschiedene Produkte			

Vorherrschende Fertigungsstrategie	Lagerfertigung Auftragsfertigung			
In welchem Schichtmodell wird vorrangig produziert?	Einschicht Doppelschicht Dreischicht		x	x x
Ist eine Durchführung an Wochenenden möglich?	möglich nicht möglich		x	x
Gibt es Meilensteine, ist das Projekt in Teilabschnitten durchführbar?				
Breite des schmalsten Transportwegs im aktuellen Layout	schmal breit		x	x
Kann internes Personal für den Umzug zur Verfügung gestellt werden?	ja nein			
Maschinenspezifische Fragen:				
Gewicht der Maschine	leicht schwer			
Grundfläche der Maschine	klein groß			
Wie hoch ist die Maschine durchschnittlich ausgelastet?	kleiner als 70% kleiner als 85% 85% und höher		x x	x x
Besteht die Möglichkeit der Vorproduktion/Bestandsaufbau mit dieser Maschine?	Vorproduktion möglich Vorproduktion nicht möglich		x	x
Existiert eine alternative Fertigungsmöglichkeit?	vorhanden nicht vorhanden		x	x
Ist die Maschine Teil einer Maschinengruppe?	ja nein		x	x
Besteht eine Verkettung mit anderen Maschinen?	ja nein		x	x
Wie hoch ist die Maschinengruppe durchschnittlich ausgelastet?	kleiner als 70% kleiner als 85% 85% und höher		x x	x x
Müssen Betriebs-/Gefahrstoffe abgelassen werden?	ja nein		x	x
Bestehen Gewährleistungsansprüche gegenüber dem Hersteller der Maschine?	ja nein			
Muss die Maschine während des Transports gegen Erschütterungen gesichert werden?	ja nein			
Besteht die Möglichkeit, die Maschine zu demontieren?	ja nein			

Komplexität der De- und Remontage	einfach kompliziert		
Ist ein spezieller Stromanschluss notwendig (z. B. US-Strom, Starkstrom)?	ja nein		
Muss die Maschine an die zentrale Druckluftversorgung angebunden werden?	ja nein		
Muss die Maschine an die zentrale Hydraulikversorgung angebunden werden?	ja nein		
Ist ein Wasser-/Abwasseranschluss notwendig?	ja nein		

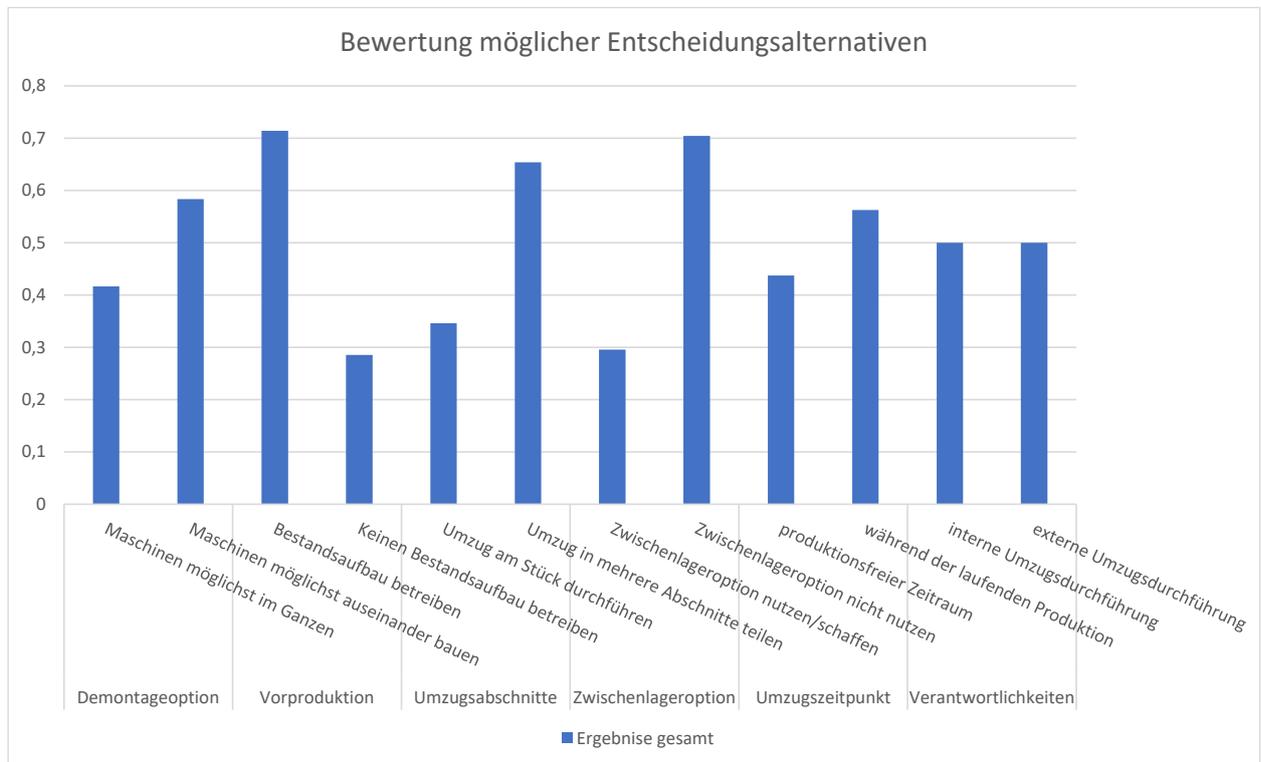
A7 – Entscheidungsmatrix Umzugs-Strategie – Verantwortlichkeiten

Einflussfaktoren	Ausprägung Einflussfaktor	Bewertung Einflussfaktor	Verantwortlichkeiten	
			interne Umzugs- durchführung	externe Umzugs- durchführung
Layoutspezifische Fragen:				
Art der Maschinen	kleine große kleine und große		x x	 x x
Variation des Maschinengewichts	niedrig mittel hoch			 x
Variation der Maschinengröße	niedrig mittel hoch			 x
Anzahl verschiedener Fertigungsprozesse	1-2 Prozesse 3-5 Prozesse mehr als 5 Prozesse			 x
Bauliche Veränderungen am Gebäude	nicht notwendig notwendig			
Anpassungen an der TGA	nicht notwendig notwendig			
Erneuerung des Fußbodens	nicht notwendig an weniger Stellen notwendig an vielen Stellen notwendig			
Veränderung der bestehenden Gebäudestruktur	keine Veränderungen Anbau am Gebäude			
Verfügbarkeit Deckenkran	verfügbar nicht verfügbar		x	 x
Traglast des Deckenkran	niedrig mittel hoch			
Flächennutzungsgrad	niedrig mittel hoch			
Verfügbarkeit Beistellflächen	keine Flächen innerhalb Halle außerhalb Halle			
Sind Beschränkungen entlang möglicher Transportwege vorhanden? (z. B. Höhenunterschiede)	vorhanden nicht vorhanden		x	 x
Vorherrschendes Fertigungsprinzip	Baustellenfertigung Werkstattfertigung Fließfertigung Mix			
Grad der Verkettung des Fertigungsprozesses	keine Verkettung lose Verkettung starre Verkettung			
Heterogenität des Produktportfolios	gleichartige Produkte verschiedene Produkte stark verschiedene Produkte			

Vorherrschende Fertigungsstrategie	Lagerfertigung Auftragsfertigung			
In welchem Schichtmodell wird vorrangig produziert?	Einschicht Doppelschicht Dreischicht		x	x x
Ist eine Durchführung an Wochenenden möglich?	möglich nicht möglich			
Gibt es Meilensteine, ist das Projekt in Teilabschnitten durchführbar?				
Breite des schmalsten Transportwegs im aktuellen Layout	schmal breit		x	x
Kann internes Personal für den Umzug zur Verfügung gestellt werden?	ja nein		x	K.O.
Maschinenspezifische Fragen:				
Gewicht der Maschine	leicht schwer		x	x
Grundfläche der Maschine	klein groß		x	x
Wie hoch ist die Maschine durchschnittlich ausgelastet?	kleiner als 70% kleiner als 85% 85% und höher			
Besteht die Möglichkeit der Vorproduktion/Bestandsaufbau mit dieser Maschine?	Vorproduktion möglich Vorproduktion nicht möglich			
Existiert eine alternative Fertigungsmöglichkeit?	vorhanden nicht vorhanden			
Ist die Maschine Teil einer Maschinengruppe?	ja nein			
Besteht eine Verkettung mit anderen Maschinen?	ja nein			
Wie hoch ist die Maschinengruppe durchschnittlich ausgelastet?	kleiner als 70% kleiner als 85% 85% und höher			
Müssen Betriebs-/Gefahrstoffe abgelassen werden?	ja nein		x	x
Bestehen Gewährleistungsansprüche gegenüber dem Hersteller der Maschine?	ja nein		x	x
Muss die Maschine während des Transports gegen Erschütterungen gesichert werden?	ja nein		x	x
Besteht die Möglichkeit, die Maschine zu demontieren?	ja nein			

Komplexität der De- und Remontage	einfach kompliziert		x x	x
Ist ein spezieller Stromanschluss notwendig (z. B. US-Strom, Starkstrom)?	ja nein		x	x
Muss die Maschine an die zentrale Druckluftversorgung angebunden werden?	ja nein		x	x
Muss die Maschine an die zentrale Hydraulikversorgung angebunden werden?	ja nein		x	x
Ist ein Wasser-/Abwasseranschluss notwendig?	ja nein		x	x

A8 – Ergebnis der Strategiebewertung (Praxisbeispiel)



A9 – Maschinentypen der Parameterstudie

Erfassung neue Maschine

Erfassung der Maschinendaten

von bis

Ist-Layout X-Koordinate 0 0

Ist-Layout Y-Koordinate 0 0

Soll-Layout X-Koordinate 0 0

Soll-Layout Y-Koordinate 0 0

Abhängigkeit zu Maschine 0

Art der Abhängigkeit

Lagerplatzbedarf [m²] 30

Bedarf Transportmittel 0

Zeit [h] Personal [Stck]

Ressourcen Vorbereitung 2 1

Minimale Demontagetiefe:

Ressourcen Demontage 2 2

Ressourcen Transport 4 4

Ressourcen Remontage 4 3

Maximale Demontagetiefe:

Ressourcen Demontage 3 3

Ressourcen Transport 3 3

Ressourcen Remontage 5 4

Gemeinsame Vorbereitung

kurze Seite lange Seite

Größe nach Demontage 3 4

Daten übernehmen Schließen

Bild 16: Daten Maschine Typ „groß“

Erfassung neue Maschine

Erfassung der Maschinendaten

von bis

Ist-Layout X-Koordinate 0 0

Ist-Layout Y-Koordinate 0 0

Soll-Layout X-Koordinate 0 0

Soll-Layout Y-Koordinate 0 0

Abhängigkeit zu Maschine 0

Art der Abhängigkeit

Lagerplatzbedarf [m²] 30

Bedarf Transportmittel 0

Zeit [h] Personal [Stck]

Ressourcen Vorbereitung 3 1

Minimale Demontagetiefe:

Ressourcen Demontage 1 2

Ressourcen Transport 2 2

Ressourcen Remontage 3 2

Maximale Demontagetiefe:

Ressourcen Demontage 2 3

Ressourcen Transport 2 2

Ressourcen Remontage 4 3

Gemeinsame Vorbereitung

kurze Seite lange Seite

Größe nach Demontage 2 3

Daten übernehmen Schließen

Bild 17: Daten Maschine Typ „klein“

A10 – Szenarien der Parameterstudie

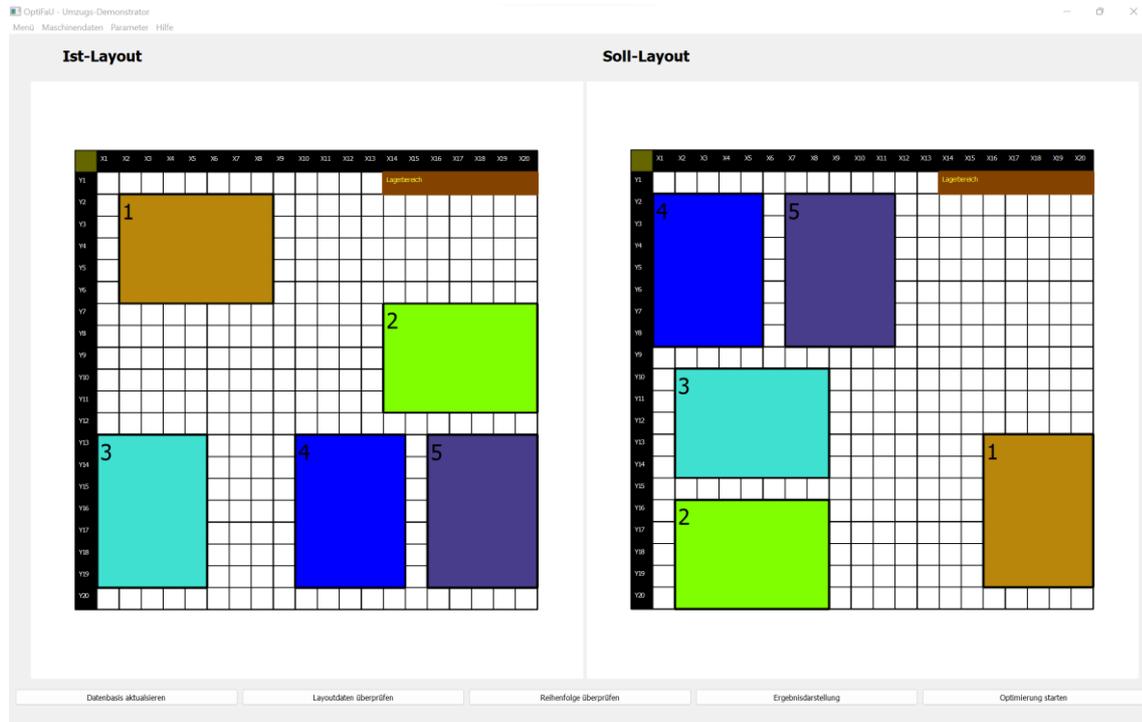


Bild 18: Szenario grM_hFG

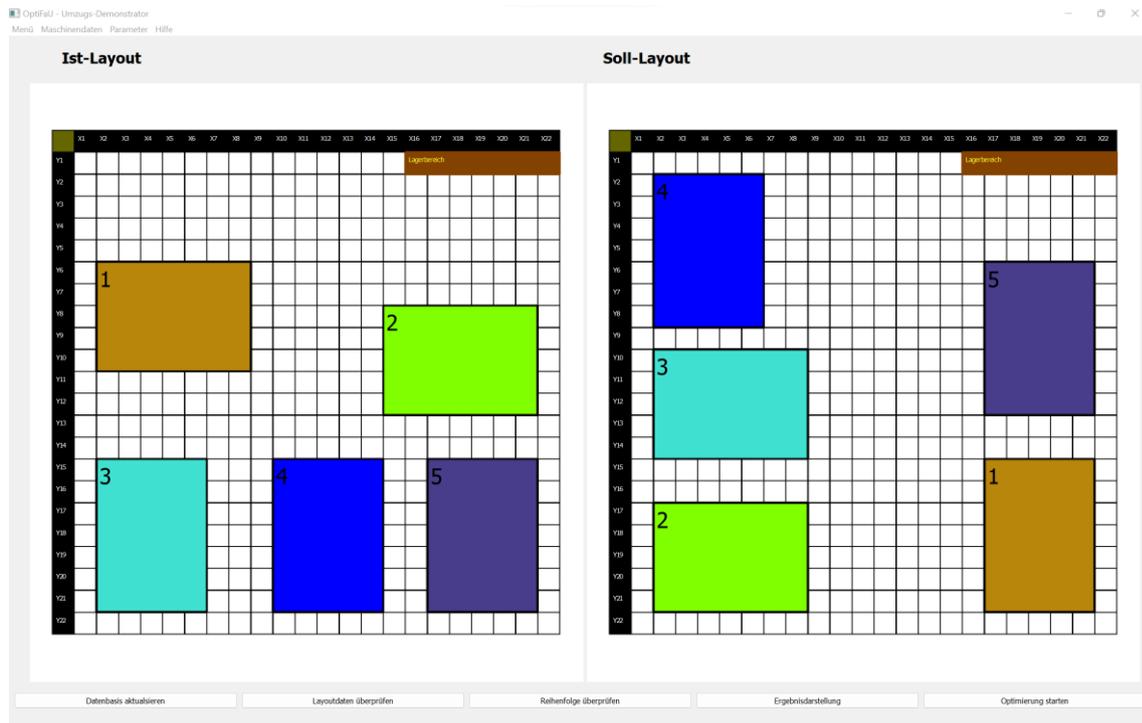


Bild 19: Szenario grM_kIFG



Bild 20: Szenario KIM_hFG



Bild 21: Szenario KIM_kIFG

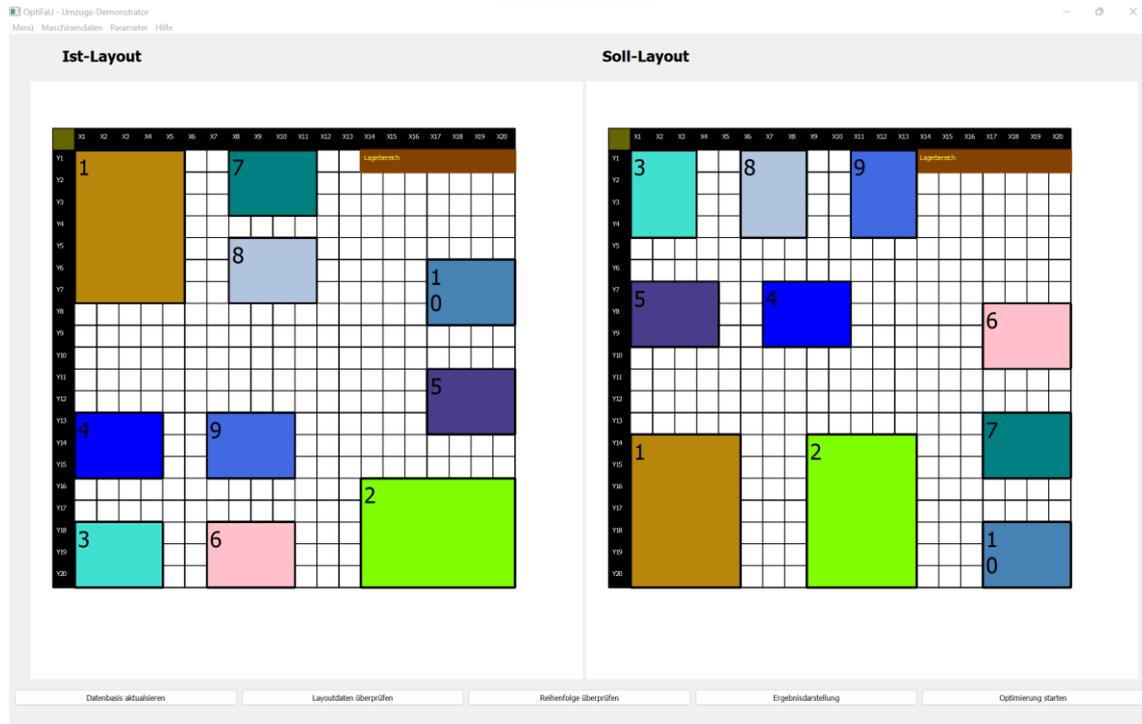


Bild 22: Szenario MixM_hFG

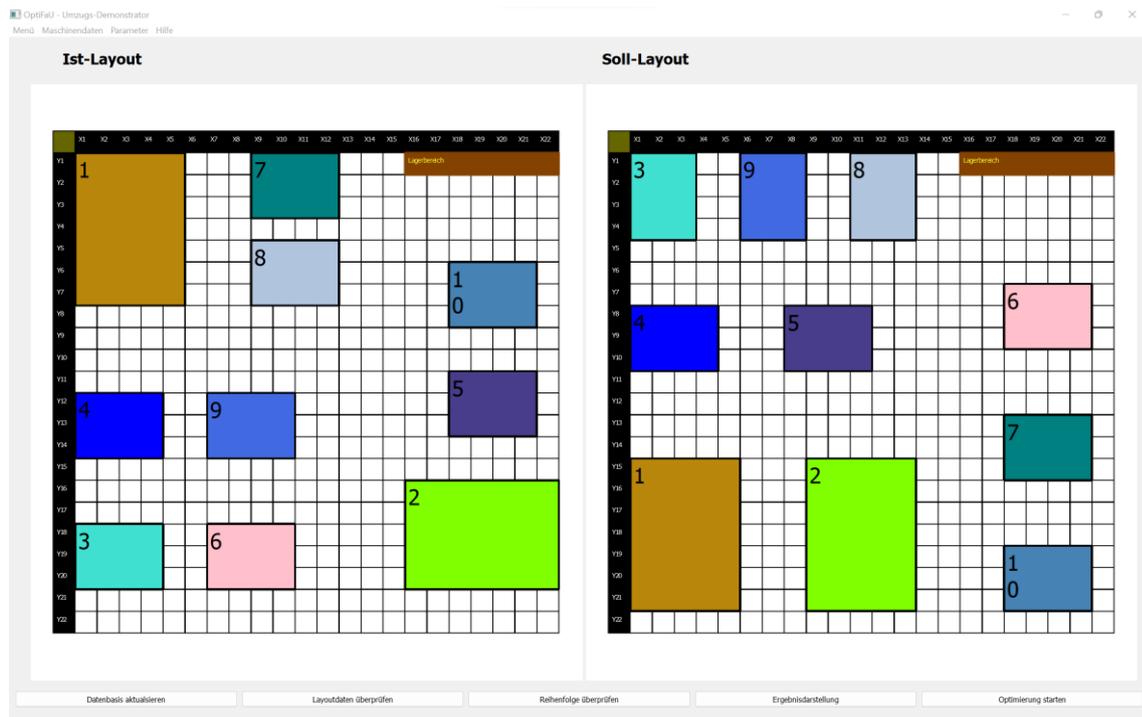


Bild 23: Szenario MixM_kIFG

13. Literaturverzeichnis

- [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.
- [Gru15] Grundig, C.-G.: Fabrikplanung. 5. Aufl., Hanser, München, 2015.
- [Hab18] Habibi, F; Barzinpour, F; Sadjadi, S.: Resource-constrained project scheduling problem: review of past and recent developments. Journal of project management 3 (2018) 2, S. 55–88.
- [Her13] Hering, N. 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
- [Nit21] Nitsche, A.; Aurich, P.; Stonis, M.: Umzugsplanung in der Reorganisation von Fabrikobjekten. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Walter de Gruyter GmbH, 116. Jg. (2021), H. 7-8, S. 483-486. DOI: 10.1515/zwf-2021-0061.
- [Nit22] Nitsche, A.; Stonis, M.; Nyhuis, P.: Planung und Durchführung von Fabrikumzügen. In: VDI-Z, VDI Verlag, 164. Jg., S. 67–69 (2022), H. 1-2, ISSN 0042-1766.
- [Nit23a] Nitsche, A.; Stonis, M.; Nyhuis, P.: Qualitative Wirkzusammenhänge für die Planung und Durchführung von Umzugsprojekten in der Reorganisation von Fabriken. In: Industrie 4.0 Management, GITO Verlag, S. 53-57 (2023), H. 1, ISSN 2364-9208.
- [Nit23b] Nitsche, A.; Stonis, M.; Nyhuis, P.: Fabrikumzüge im Rahmen von Reorganisationsprojekten – Methodische Planung und Bewertung. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Carl Hanser Verlag, 118. Jg. (2023), H. 4, S. 204-208, ISSN 0947-0085.
- [Paw14] Pawellek, G.: Ganzheitliche Fabrikplanung. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [Sch14] Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [Sch15b] Schwindt, C.; Zimmermann, J.: Handbook on project management and scheduling, Vol. 2. Springer, Cham, 2015.
- [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. et al.: Mit Mobilität zu mehr Strukturvariabilität. In: wt Werkstattstechnik, Jg. 93 (2003), S. 327-331.
- [Zim08] Zimmermann, H.-J.: Operations Research. 2., aktualisierte Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2008.