

Schlussbericht vom 30.04.2025

zum IGF-Vorhaben 22460 N

Thema

IPPSLaBeM – Intelligente Produktionsplanung und -steuerung für das Laser-Beam-Melting

Berichtszeitraum

01.05.2022 bis 31.10.2024

Forschungsvereinigung

FIR e. V. an der RWTH Aachen
Campus-Boulevard 55
52074 Aachen

Forschungseinrichtung(en)

FIR e. V. an der RWTH Aachen
Campus-Boulevard 55
52074 Aachen

Fraunhofer-Gesellschaft e. V. Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT
Am Schleusengraben 14
21029 Hamburg

Autoren

Antoine Gaillard
Johannes Helmholz
Sebastian Rößler
Nico Wahl
Tobias Schröer
Maximilian Vogt



Open Access: Diese Veröffentlichung wird unter der Creative-Commons-Lizenz „[CC BY-SA – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International \(CC BY-SA 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)“ veröffentlicht

Inhaltsverzeichnis

1	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	3
1.1	Arbeitspaket 1: Anforderungsanalyse	3
1.2	Arbeitspaket 2: Produktions- und Prozesssimulation	9
1.3	Arbeitspaket 3: Training des Simulations- und KI-Algorithmus	13
1.4	Arbeitspaket 4: Integration in die IT-Systemlandschaft von KMU	19
1.5	Arbeitspaket 5: Gestaltungsempfehlungen	25
1.6	Arbeitspaket 6: Validierung.....	31
1.7	Arbeitspaket 7: Ergebnistransfer und Projektmanagement	33
2	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse – insbesondere für KMU – sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten	35
3	Wissenstransfer in die Wirtschaft.....	36
4	Durchgeführte Transfermaßnahmen	37
5	Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit	40
6	Literaturverzeichnis	41
7	Anhang.....	43

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln werden die im Forschungsvorhaben durchgeführten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse beschrieben. Diese sind entlang der im Arbeitsplan verankerten Arbeitspakete strukturiert. Während der Projektlaufzeit mussten keine wesentlichen Veränderungen am Projektplan vorgenommen werden, außer der Verlängerung von Arbeitspaket 2 und Arbeitspaket 3. Inhaltlich wurde die Zielstellung einzelner Arbeitspakete durch Praxisanforderungen der pbA-Mitglieder ergänzt, wodurch die Praxistauglichkeit der einzelnen Projektergebnisse gewährleistet wurde. Die Ergänzungen wurden im Rahmen des regelmäßigen Austauschs mit dem pbA diskutiert und nach Validierung der Partner umgesetzt.

Nachfolgend wird auf die einzelnen Arbeitspaketen eingegangen.

1.1 Arbeitspaket 1: Anforderungsanalyse

Ziel von **Arbeitspaket 1 „Anforderungsanalyse“** war die Definition von Anforderungen, Zielfunktionen und Störgrößen für ein betriebliches Anwendungssystem zur Produktionsplanung von AM-Prozessen. Durch Expertengespräche sowie Prozessaufnahmen und -analysen wurden individuelle Anforderungen und Ziele der AM-Dienstleister aufgenommen. Diese Ziele wurden in eine Zielhierarchie überführt und durch eine intensive Literaturrecherche vervollständigt, um durch Ziel-Mittel-Relationen Zielfunktionen ableiten zu können, die zum Erreichen der verfolgten Ziele beitragen. Zusätzlich wurden auftretende Störungen der Auftragsabwicklung von AM-Dienstleistern erfasst. Zur Charakterisierung der Störgrößen wurden im Rahmen einer systematischen Literaturrecherche geeignete Kategorien identifiziert, die eine strukturierte Kategorisierung der Störungen ermöglichen. Auf Basis dieser Kategorisierung wurden die Störgrößen anschließend in Expertengesprächen verschiedenen Prioritätsstufen zugewiesen. Alle Ergebnisse wurden in Sitzungen mit dem pbA validiert.

Durch Expertengespräche mit den AM-Dienstleistern des projektbegleitenden Ausschusses wurden deren individuelle Anforderungen an ein Produktionsplanungstool für AM-Prozesse sowie die damit in der Produktionsplanung verfolgten Ziele aufgenommen. Um diese Interviews strukturiert zu gestalten, wurde ein Fragebogen entwickelt. Ein Ausschnitt des Fragebogens ist im Anhang unter Abbildung 9-2 dargestellt. Dafür standen die Expert*innen der Firmen APWORKS GmbH, GKN Powder Metallurgy GmbH und LIGHTWAY GmbH zur Verfügung. Es wurden die Auftragsabwicklungsprozesse der Partner aufgenommen. Diese ermöglichten einen praxisnahen Einblick in den derzeitigen Stand der Auftragsabwicklung von AM-Dienstleistern. Die durch den Fragebogen erhobenen Anforderungen wurden zusammengefasst und sind als Auszug dem Anhang in Tabelle zu entnehmen.

In den Gesprächen mit den Expert*innen der AM-Dienstleister wurden die anvisierten Ziele aufgezählt. Zusammengefasst waren es diese:

1. Einhaltung des Liefertermins
2. Maschinenauslastung maximieren
3. Bauraumausnutzung maximieren
4. Durchlaufzeit minimieren (besonders für Prioritätsaufträge)

In den Expertengesprächen wurde insbesondere auf die Minimierung der Kosten durch eine Maximierung der Anlagenauslastung hingewiesen. Übereinstimmend wurde berichtet, dass der Maschinenstundensatz der größte Kostenfaktor ist. Zur Reduzierung wurde daher die Maximierung der Maschinenauslastung und der Bauraumausnutzung verfolgt. Im Vergleich zum Maschinenstundensatz sind die Personalkosten als gering einzuschätzen. Zusätzlich hat die Einhaltung des Liefertermins zur Sicherung der Kundenzufriedenheit absolute Priorität.

Im folgenden Schritt wurden die durch die Expertengespräche aufgenommenen Ziele der AM-Dienstleister in eine Zielhierarchie überführt. Die Zielhierarchie wurde nach dem Ziel-Mittel-Ansatz aufgebaut, in dem die Beziehungen zwischen den unterschiedlichen Zielen hergestellt werden. Dabei werden Einzelziele in unterschiedliche Ebenen eingeteilt, wobei die oberen Ziele durch die Erfüllung der damit zusammenhängenden unteren Ziele erfüllt werden. Durch die Zielhierarchie können so Einflussfaktoren ausfindig gemacht werden, die zur Erfüllung der Oberziele verfolgt werden müssen. Zur Vervollständigung der Zielhierarchie wurde in einem Desk-Research-Ansatz eine breite Literaturrecherche durchgeführt, in der eine Vielzahl von Einflussgrößen gefunden wurde. Die oberen Ebenen der Zielhierarchie werden in Abbildung 1-1 dargestellt. Dabei lassen sich die von den AM-Dienstleistern formulierten Ziele als Zieldreieck von Leistung, im Sinne von Logistikleistung, Qualität sowie Produkt-Preis-Positionierung zusammenfassen. Jene dienen der Erfüllung der Kundenzufriedenheit, was wiederum zur Maximierung des Unternehmenserfolgs beiträgt.

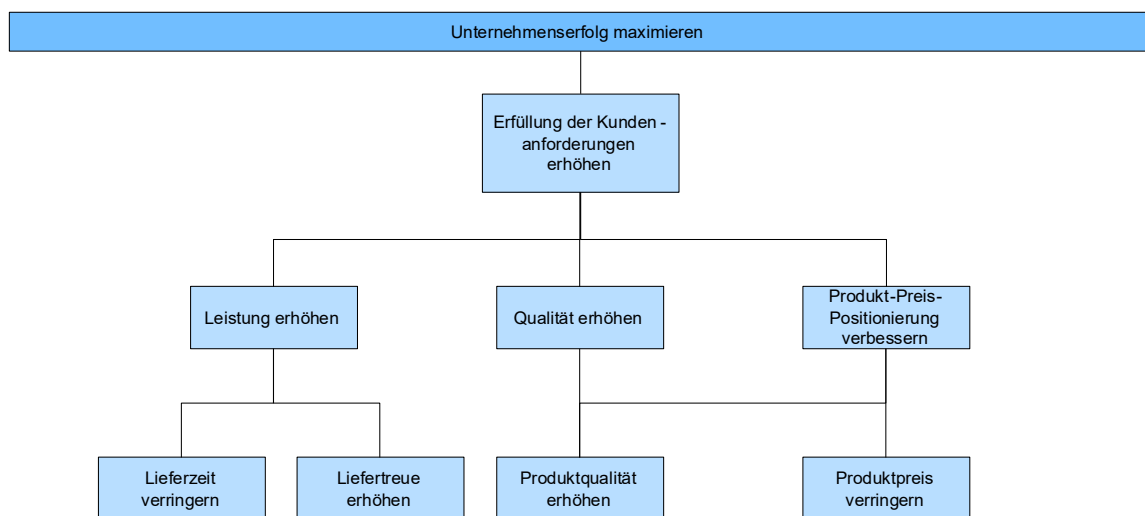


Abbildung 1-1: Obere Ebenen der Zielhierarchie eines AM-Dienstleisters (eigene Darstellung)

Mithilfe der Literaturrecherche konnte die Bewertung der drei Ziele Logistikleistung, Produktqualität und Produkt-Preis-Positionierung weiter differenziert und deren Einflussfaktoren identifiziert werden. Die Fortführung der Zielhierarchie in Bezug auf die Lieferleistung ist ausschnittsweise in Abbildung 1-2 wiedergegeben. Darin wird ersichtlich, dass verschiedene Unterziele, die zur Verringerung der Lieferzeit und Erhöhung der Liefertreue führen, auf eine Erhöhung der Verlässlichkeit der Planung zurückzuführen sind. Dabei führen besonders die Erhöhung der Prognose- und Entscheidungsqualität und eine Verringerung der Datenfluss- und Steuerungsflusszeit sowie eine Reduzierung der Planungsfehler zur Erhöhung der Verlässlichkeit der Planung. Voraussetzung für eine angemessene Planungsqualität ist dabei, eine angemessene Datenqualität einzuhalten.

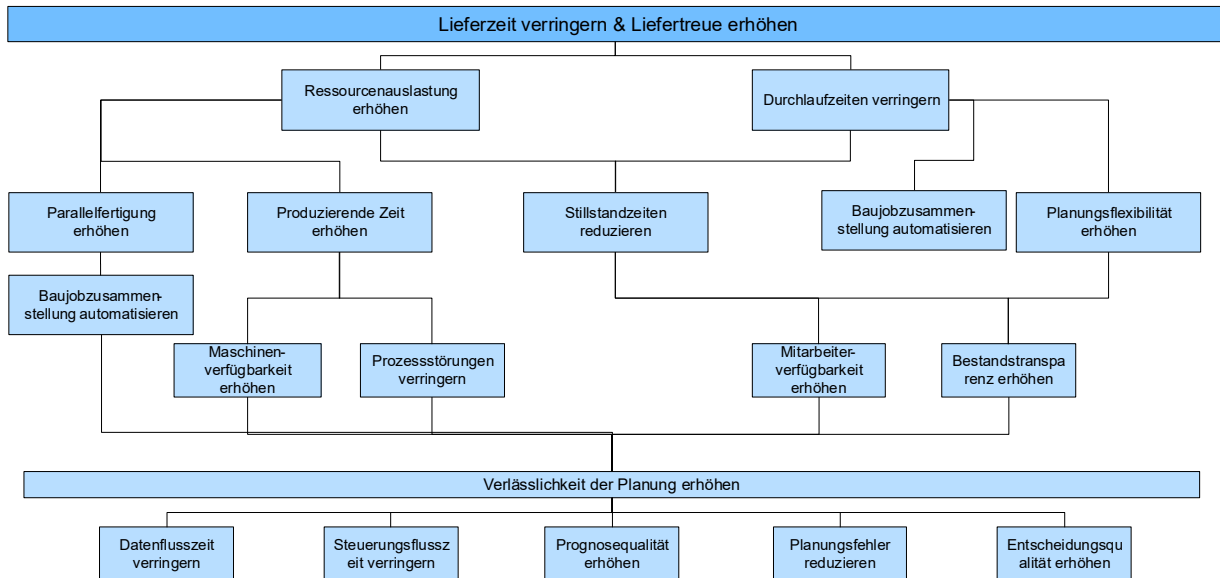


Abbildung 1-2: Zielfunktion in Bezug zur Logistikleistung (eigene Darstellung)

Die Fortführung der Zielhierarchie in Bezug auf den Produktpreis ist in Abbildung 1-3 wiedergegeben. Wie in den Expertengesprächen bestätigt, führen besonders die Maschinenkosten durch geringe Ressourcenauslastung zu einer Erhöhung der Kosten. Insbesondere diese können durch eine optimierte Planung reduziert werden.

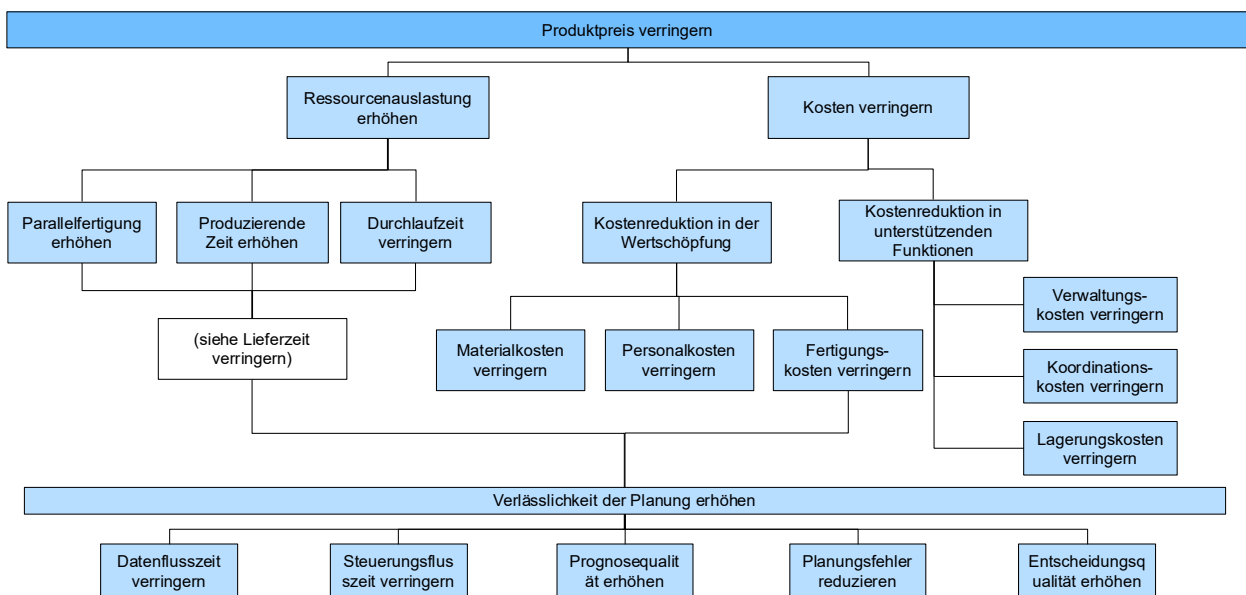


Abbildung 1-3: Zielfunktion in Bezug zum Produktpreis (eigene Darstellung)

Die Fortführung der Zielhierarchie in Bezug auf die Produktqualität ist in Abbildung 1-4 wiedergegeben.

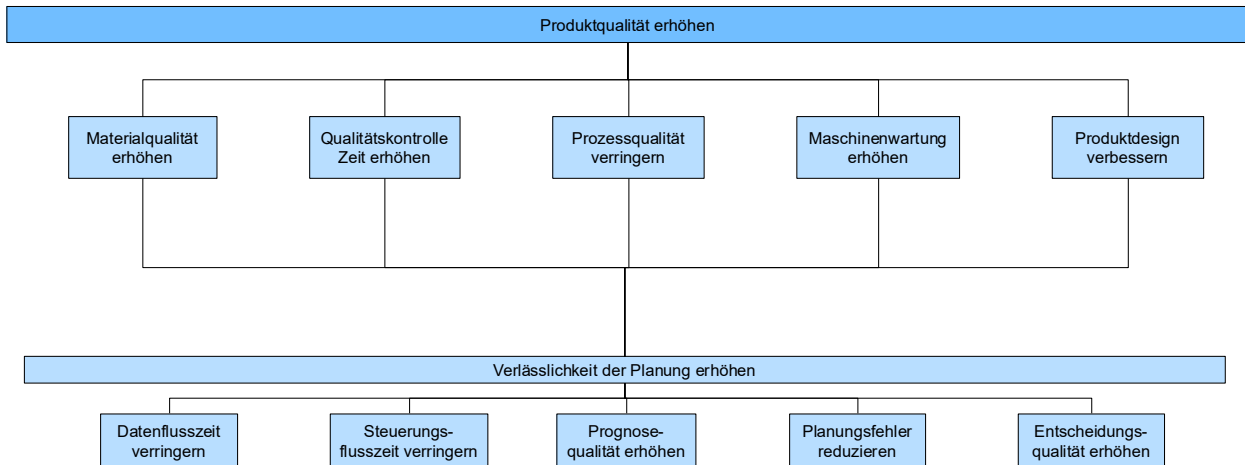


Abbildung 1-4: Zielfunktion in Bezug zur Produktqualität (eigene Darstellung)

Durch die Literaturrecherche mittels Desk-Research wird begründet, dass das Zieldreieck von Logistikleistung, Produktqualität und Produkt-Preis-Positionierung zur Erfüllung der Kundenanforderungen und damit zur Sicherung des Unternehmenserfolgs, gleichzeitig erfüllt sein muss. Dabei ist die Produktqualität eine zu erfüllende Basisanforderung. Kombiniert mit den Aussagen der Expert*innen ist es insbesondere das Einhalten der Liefertermine bei kurzen Lieferzeiten, was als Differenzierungsmerkmal zwischen verschiedenen Unternehmen aus Kundensicht herangezogen werden kann. Sind Qualitäts- und Logistikanforderungen gleichermaßen erfüllt, passt sich die Produkt-Preis-Positionierung in Grenzen daran an. Eine Optimierung der Auftragsabwicklung durch ein geeignetes Anwendungssystem hat dabei auf alle drei Ziele des Zieldreiecks positiven Einfluss, was eine Erfüllung der von den AM-Dienstleistern verfolgten Zielen darstellt. Dabei hat eine optimierte Planung den größten Einfluss auf die von den AM-Dienstleistern verfolgten Ziele. Die Zielhierarchie wurde in Workshops mit den Expert*innen des pbA validiert.

Zusammenfassend wurde durch die Aufstellung der Zielhierarchie die Einflussgrößen auf die von den AM-Dienstleistern verfolgten Ziele definiert und damit ein Ziel des Arbeitspakets erreicht.

Als Grundlage zur Beschreibung der Störgrößen wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Diese Ergebnisse vervollständigten bereits gewonnene Erkenntnisse aus mehreren Interviews mit den AM-Dienstleistern APWORKS GmbH, GKN Powder Metallurgy GmbH und LIGHTWAY GmbH des projektbegleitenden Ausschusses. Das Vorgehen und die Ergebnisse der Literaturrecherche werden im Anhang in Abbildung 9-1 dargestellt.

Zur Beschreibung der Störgrößen wurden zuerst die auf den betrachteten Fertigungsprozess wirkenden Störgrößen identifiziert. Die Erhebung erfolgte in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss sowie auf Basis von Prozessanalysen der AM-Dienstleister des Ausschusses. Tabelle 1-1 gibt die identifizierten Störgrößen und deren Beschreibung wieder.

Tabelle 1-1: Identifizierte Störgrößen im Fertigungsprozess

Störgröße	Beschreibung
A Abweichung der Abkühlzeit	Je nach Bauteilgröße kann die Abkühlphase von einigen Stunden bis zu einem Tag dauern. Diese wird aufgrund Schätzungen eingeplant und kann daher ungeplante Abweichungen enthalten.

B Maschinenausfall	Wegen geringer Prozessstabilität im AM kann es öfter zu Ausfällen kommen. Deren Behebung kann sich von Stunden bis Tagen strecken.
C Stützkonzept	Eine Fehlplanung des Stützkonzepts führt zu unzureichender Bauteilqualität, welche erst nach Druck bemerkbar wird.
D Beschichter	Eine ungleich aufgetragene Pulverschicht beeinträchtigt u. a. die mechanischen Eigenschaften durch Porenbildung und Fehlstellung. Diese können u. U. erst nach Druck bemerkbar werden.
E Eigenspannungen	Die durch den Fertigungsprozess induzierten Eigenspannungen können zur Beeinträchtigung der Bauteilqualität und Verzug führen. Diese können nicht immer vor Druck vorhergesehen werden.
F Abweichung der Nachbearbeitungszeit	Eine fehlerhafte Nachbearbeitung oder eine Abweichung der kalkulierten Nachbearbeitungszeit verzögert den Auftrag erheblich.
G Anisotropie	Durch den schichtweisen Aufbau der Bauteile verfügen diese über richtungsabhängige mechanische Eigenschaften. Diese müssen über eine korrekte Orientierung eingestellt werden.
H Stufenbildung	Durch den schichtweisen Aufbau der Bauteile kommt es insbesondere bei schrägen Flächen zu Stufenbildung auf der Oberfläche. Diese können durch die Bauteilorientierung beeinflusst oder durch die Nachbearbeitung korrigiert werden.
I Fehlerhafte Pulvercharge	Je nach Ursprung des Pulvers können Abweichungen auftreten, die zu unterschiedlichen Fertigungsqualitäten führen.

Durch die systematische Literaturrecherche konnten Kategorien abgeleitet werden, die eine strukturierte Einordnung der identifizierten Störgrößen ermöglichen. Eine Übersicht der Kategorien sowie ihrer jeweiligen Ausprägungen ist in Tabelle 1-2 dargestellt.

Tabelle 1-2: Kategorisierung der Störgrößen

Kategorie	Ausprägung		
Art des Auftretens	vorhersehbar	unvorhersehbar	
Ursprung der Störung	intern	extern	
Art der betroffenen Entitäten	Ressource	Vorgänge/ Arbeitsauftrag	Produktion
Art der Auswirkungen	Nichtverfügbarkeit		Verschlechterung
Ursachen der Störung	Versagen von Komponenten	menschlicher Fehler	externe Faktoren

Die Einteilung der identifizierten Störgrößen in die definierten Kategorien kann im Anhang Tabelle 9-1 bis Tabelle 9-3 entnommen werden.

Nachdem die Störgrößen kategorisiert wurden, wurden in Expertengesprächen die Störgrößen priorisiert. Die Priorisierung wird anhand der Planbarkeit und Kritikalität vorgenommen. Dabei entsteht eine Gewichtung, die der Tabelle 1-3 entnommen werden kann.

Tabelle 1-3: Priorisierungskategorien der Störungen

Gewichtung	Beschreibung
Grün	eher planbar und von geringer Kritikalität
Gelb	teilweise unplanbar und einschränkend
Rot	unplanbar und schwerwiegende Folgen

Die Priorisierung der Störgrößen anhand der Gewichtung kann Abbildung 1-5 entnommen werden.

		Kritikalität →			
Planbarkeit ↑	G: Anisotropie I: Pulvercharge				
		H: Stufenbildung	D: Beschichter E: Eigenspannungen		
			C: Stützkonzent		
		A: Abweichung der Abkühlzeit	F: Abweichung der Nachbearbeitungs- zeit		
					B: Maschinenausfall

Abbildung 1-5: Priorisierung der Störungen (eigene Darstellung)

Die Aufnahme der Störgrößen und deren Möglichkeit zur Kategorisierung und Priorisierung bilden die Informationsgrundlagen, um eine Intelligente, dynamische Reaktion des zu entwickelnden Anwendungssystems zu schaffen.

Abgeschlossen wurde Arbeitspaket 1 mit einer überblickenden Marktrecherche. Dabei wurden die Charakteristika bereits bestehender Softwarelösungen für den AM-Markt untersucht. In einem Vergleich von den Ergebnissen der Marktrecherche und den durch das Arbeitspaket 1 aufgenommenen Anforderungen der AM-Dienstleister konnte keine ausreichende Übereinstimmung gefunden werden. Es gibt derzeit keine Softwarelösungen am Markt, die speziell auf den Anwendungsfall zugeschnitten sind. Bestehende Lösungen aus anderen Bereichen sind nur bedingt adaptierbar, wodurch ein hoher Bedarf an maßgeschneiderten Lösungen für den Anwendungsfall besteht. Infolgedessen wurde das Potenzial für die Entwicklung eines spezialisierten Planungstools bestätigt.

Im vierten Schritt von Arbeitspaket 1 wurden die spezifischen Anforderungen an die Schnittstellen des geplanten Anwendungssystems detailliert erfasst und festgelegt. Dabei wurde genau definiert, welche Daten benötigt werden, um eine nahtlose Integration mit den bestehenden Systemen der AM-Dienstleister zu gewährleisten. Es wurden Schnittstellen zu den folgenden Systemen und Datenquellen identifiziert:

- ERP/ME-Systeme: Schnittstellen für Produktions- und Auftragsdaten.

- CAD-Software/Baujob-Software: Durch die Anbindung an CAD-Systeme können Konstruktionsdaten direkt in die Produktionsplanung integriert werden, was eine präzise und effiziente Planung der Fertigungsprozesse unterstützt.
- Sensordaten und IoT-Geräte an den AM-Anlagen: Schnittstellen zu Sensoren und IoT-Geräten in den Produktionsanlagen ermöglichen die Echtzeiterfassung von Produktionsdaten, wie Maschinenzustände und Produktionsfortschritte, die für eine dynamische Anpassung der Planung erforderlich sind.

Als Hauptschnittstellen wurden die Schnittstellen zu MES und den AM-Anlagen identifiziert. Für diese Schnittstellen wurde ein Datenmuster entwickelt, welches entweder über eine API oder direkt durch die AM-Dienstleister integriert werden kann. Dieses Datenmuster wurde für Fortlaufende Arbeitspakete verwendet.

Fazit AP 1	Ziel von AP 1 war es, die Grundlagen für die Ausrichtung des betrieblichen Anwendungssystems zu erheben. Die Expertengespräche mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses und AM-Dienstleistern ermöglichten zu einem frühen Zeitpunkt einen breiten Überblick über die zu fokussierenden Fragestellungen. Durch die Bestimmung der Ziele, Anforderungen und Störgrößen der PPS wurde die Ausrichtung des weiteren Forschungsvorhabens geplant und dessen Zielgerichtetheit sichergestellt. Die Marktanalyse bestätigte die Forschungslücke und die Notwendigkeit des Forschungsvorhabens. Die Ziele von AP 1 wurden damit erfolgreich erreicht.
------------	---

1.2 Arbeitspaket 2: Produktions- und Prozesssimulation

In diesem Arbeitspaket wird eine Produktionssimulation entwickelt, die als Grundlage für die Implementierung eines KI-Modells dient. Zunächst wird eine geeignete Simulationssoftware ausgewählt, die eine API für den Datenaustausch mit dem KI-Modell bietet und verschiedene Fabrikszenarien abbilden kann. Anschließend erfolgt die Modellbildung, in der verschiedene Fabrikstrukturen und Bauteilanforderungen definiert sowie Störgrößen aus AP 1 in stochastische Modelle überführt werden. Danach wird ein geeigneter KI-Algorithmus ausgewählt, indem verschiedene Ansätze (z. B. Reinforcement-Learning, Imitation-Learning) anhand zuvor definierter Anforderungen verglichen werden. Abschließend werden die Simulation und das KI-Modell synchronisiert, sodass eine störungsfreie Informationsübertragung gewährleistet ist und die Simulation als Trainingsdatengenerator für das KI-Modell genutzt werden kann. Ziel des Arbeitspakets war die Entwicklung eines simulationsgestützten KI-Trainingsmodells, das durch die Integration von realistischen Fabrikszenarien, Störgrößen und optimierten KI-Ansätzen eine effiziente Produktionsplanung ermöglicht.

Es wurden verschiedene Simulationsumgebungen erprobt, darunter SymPy, Zoo, PettingZoo und Gymnasium (s. Meurer et al. 2017; Towers et al. 2024). Diese Systeme wurden hinsichtlich ihrer Interoperabilität verglichen, um eine geeignete Grundlage für die weitere Entwicklung zu identifizieren. Aufgrund der spezifischen Anforderungen an die Produktionssimulation wurde eine eigene Simulationslösung auf Basis einer diskreten Simulation entwickelt. Eine zentrale Herausforderung bestand in der Modellierung des State-Space für Reinforcement-Learning (RL), da Produktionsumgebungen dynamisch wachsen können und der State-Space somit nicht endlich ist. Um dieses Problem zu adressieren, wurde ein Graph-Neural-Network (GNN) eingesetzt,

das den State-Space aus der Simulation für den RL-Agenten kodiert und damit eine handhabbare Darstellung ermöglicht. Anschließend wurden Simulationsläufe mit der „GNN-Simulation“ durchgeführt. Darüber hinaus wurden Kosten- und Störfunktionen modelliert, die für das weitere Vorgehen eine zentrale Rolle spielen.

Die Modellierung des Gesamtsystems erfolgt in drei Kernaspekten: Auftragseingang, Grobterminierung und Feinplanung. Der Auftragseingang wird mittels einer Zufallsfunktion modelliert, wobei über einen Zeitraum n Aufträge in einer Anzahl m simuliert werden. Dies sorgt dafür, dass der Prozess der Auftragsvergabe realistisch und dynamisch gestaltet wird.

Die Grobterminierung wird durch den sogenannten „Ähnlichkeitsfaktor“ modelliert, der dazu dient, zu bestimmen, welche Aufträge basierend auf ihrem Volumen und den Materialanforderungen auf gleichen Maschinen bearbeitet werden können. Diese Aufträge werden dann in Gruppen (Jobs) zusammengefasst.

Die Feinplanung erfolgt auf Basis des Job-Shop-Scheduling-Problems (JSSP) und wird durch Störfunktionen ergänzt. Die eigentliche Simulation umfasst die Grobterminierung und die Zusammenstellung von Aufträgen lediglich als statistische Prozesse, wobei die Störfaktoren ausschließlich in der Feinterminierung simuliert werden.

Abbildung 1-6 zeigt schematisch den Aufbau der Simulation. Der orange dargestellte Bereich zeigt die Eingriffe des RL-Agenten.

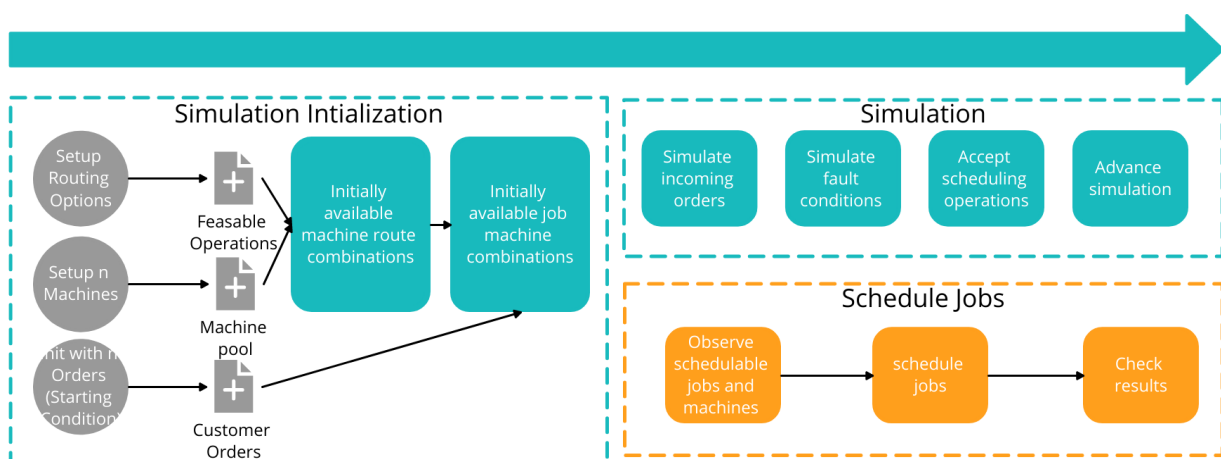


Abbildung 1-6: Simulationsschema (eigene Darstellung)

Für die Simulation der unterschiedlichen Scheduling-Strategien werden mehrere Ansätze berücksichtigt:

- Makespan-Optimization: Optimierung der gesamten Bearbeitungszeit.
- Machine-Utilization: Maximierung der Auslastung der Maschinen.
- Due-Date-Effectiveness: Berücksichtigung der rechtzeitigen Fertigstellung von Aufträgen.
- Priority-Scheduling: Bevorzugte Bearbeitung von hochpriorisierten Aufträgen.
- Least Effort First (LEF) und Most Effort First (MEF): Strategien, die auf der Minimierung oder Maximierung des Aufwands basieren.

Ausgedrückt in einer Gleichung stellt sich die Gewichtung folgendermaßen dar:

Formel 1 Optimierungsgewichtung

$$R_t = \frac{a \cdot M_{\text{span}} + b \cdot M_{\text{util}} + c \cdot M_{\text{due}} + d \cdot M_{\text{prio}} + e \cdot M_{\text{effort}}}{a + b + c + d + e}$$

, wobei die Gesamtzielrichtung (oder Optimierungsvorgabe/Belohnungsfunktion) durch R_t zum Ausdruck gebracht wird.

Die Simulation wird in der Umgebung von SymPy durchgeführt, einer diskreten Simulationsumgebung, die es ermöglicht, die verschiedenen Planungsprozesse unter realistischen Bedingungen zu testen und zu optimieren. Gymnasium dient hierbei mit seinem Wrapper (einer Funktion, die ein Interface zu anderen Umgebungen aufbaut) als Trainingsumgebung des Agenten.

Der State-Space in Job-Shop-Problemen neigt dazu, sehr schnell sehr große Räume anzunehmen, daher muss dieser State-Space-Explosion entgegengewirkt werden (s. Monaci et al. 2024). Ein Weg ist die Modellierung des Systems mittels Graphen. Ein probater Weg ist die Darstellung als gerichtet ungerichteter Graph. Abbildung 1-7 zeigt einen Anfangszustand eines Graphen des Job-Shop-Problems (s. Zhang et al. 2019). Dabei sind die Knoten die Operationsschritte und die gerichteten Verbindungen zeigen den Durchlauf, den die Jobs gehen müssen, und die ungerichteten zeigen die Operation auf gleichen Maschinen an.

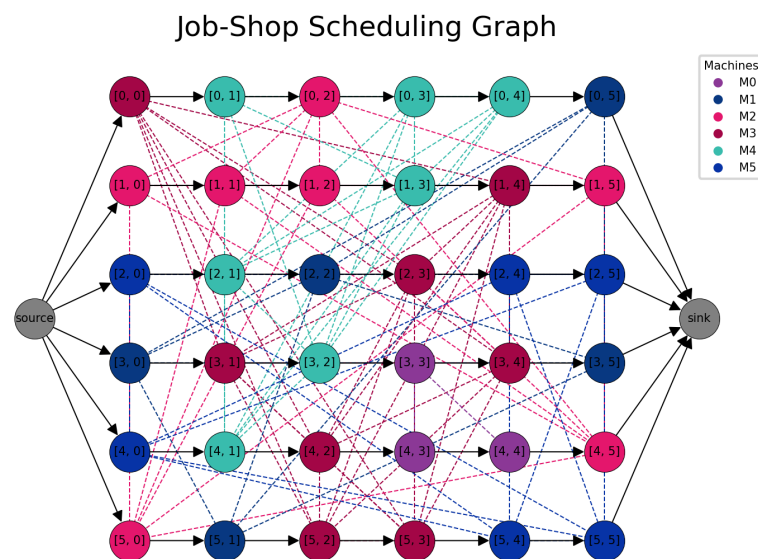


Abbildung 1-7 Gerichtet-ungerichteter Graph mit Knoten als Operationen (eigene Darstellung)

Ein einfacher Simulationsdurchgang mit einem Least-Effort-first-Ansatz (es wird der Job mit der geringsten Durchlaufzeit geplant): Überführt die Struktur in einen gerichteten Graphen für die Ausführung der Operationen.

Ein solcher gerichteter Graph ist in Abbildung 1-8 zu sehen. Verdeutlicht wird die Reihenfolge in Abbildung 1-9.

Job-Shop Scheduling Graph

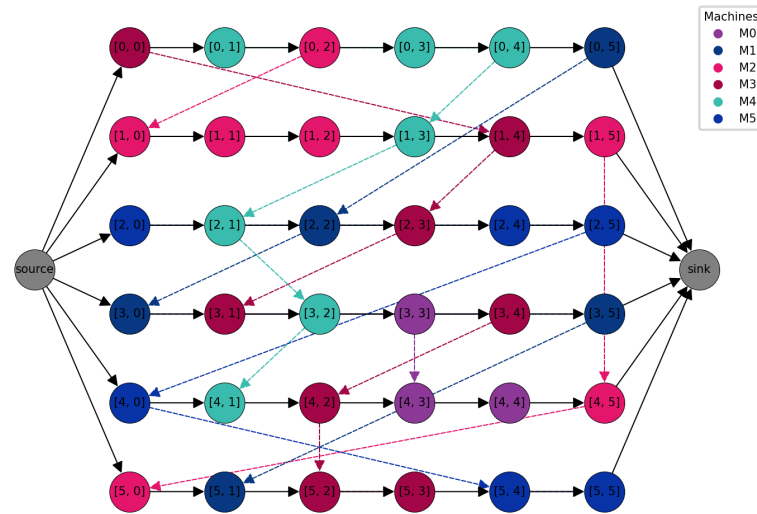


Abbildung 1-8 Gerichteter Graph (eigene Darstellung)

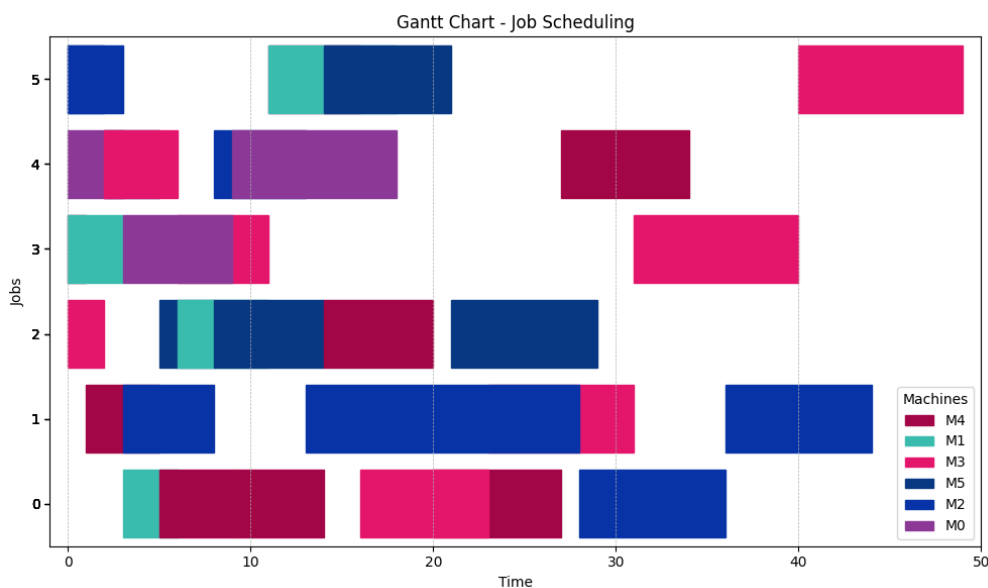


Abbildung 1-9 Zeitplan des Least-Effort-first-Algorithmus (eigene Darstellung)

Der Zustandsraum lässt sich in diskreten Zeitschritten mittels der Anfangsnotation entwickeln. Für jeden Zeitschritt gibt es einen Graphen, der diesen Zeitschritt beschreibt. Aus der Größe des Zustandsraums lässt sich nunmehr ein direkter Zusammenhang mit der Leistungsfähigkeit bestehender Systeme ableiten. Zur grundsätzlichen Validierung wurde mittels der einfach zu bedienenden Google-OR-Tools-Bibliothek ein Scheduling für FT(1:150)-Instanzen (Fisher u. Thompson 1963) entworfen. Dabei zeigt sich, dass die Berechnungsdauer einen nahezu quadratischen Anstieg verzeichnet, wenn Jobs und Operationen gleichermaßen ansteigen. Abbildung 1-10 zeigt die Berechnungsdauer unterschiedlicher Solver, Simulated Annealing, Constraint-Programming und eines einfachen Least-Effort-first-Algorithmus. Diese Effekte galt es durch die Nutzung von RL und GNNs zu vermeiden.

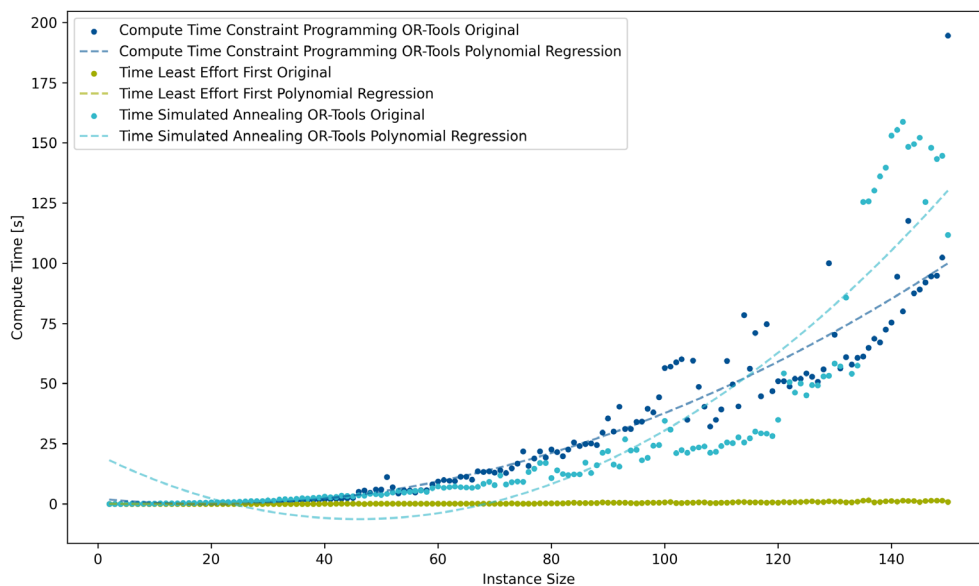


Abbildung 1-10 Berechnungsdauer unterschiedlicher Solver (eigene Darstellung)

Die Simulation wurde erfolgreich in einen State-Space mittels GNN überführt und in einem pbA-Treffen validiert. Zudem wurden spezifische Aktionen für den RL-Agenten festgelegt. Die durchgeführten Simulationsläufe haben gezeigt, dass der Ansatz prinzipiell funktioniert und eine solide Grundlage für die weitere Optimierung des Modells geschaffen wurde. Zusätzlich wurden die Kosten- und Störfunktionen modelliert, um zukünftige Simulationen realitätsnäher zu gestalten.

Fazit AP 2	In AP 2 ging es vor allem darum, eine Produktionssimulation zu entwickeln, auf Basis derer dann ein KI-Trainingsmodell entstand. Im Zuge dieser Entwicklung wurden einige Simulationsumgebungen getestet und verglichen, darunter SymPy, Zoo, PettingZoo und Gymnasium. Da jedoch sehr spezifische Anforderungen bestanden, wurde letzten Endes eine eigene, diskrete Simulation entwickelt. Aufkommende Herausforderungen bezüglich des nicht-finiten State-Space konnten durch den Einsatz eines Graph-Neural-Networks (GNN) gelöst werden. Dieser GNN ermöglicht die Encodierung des State-Space für den RL-Agenten. Somit konnten dadurch die Simulationsläufe erfolgreich durchgeführt werden. Zusätzlich wurden anschließend auch Kosten und Störfunktionen modelliert und in die Simulation integriert. Abschließend für dieses Arbeitspaket wurde die Simulation bei Treffen mit dem projektbegleitenden Ausschuss validiert. Somit bildet die Simulation eine solide Grundlage für weitere Optimierungen.
------------	--

1.3 Arbeitspaket 3: Training des Simulations- und KI-Algorithmus

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wird der KI-Algorithmus für die Produktionsoptimierung weiterentwickelt und trainiert. Zunächst wird ein Zielsystem erarbeitet, das die notwendigen Voraussetzungen für die Anwendbarkeit der zu entwickelnde Applikation definiert. Dabei dienen die identifizierten Einflussfaktoren und Problemstellungen als Grundlage. Anschließend erfolgt die Anpassung des Algorithmus an die spezifischen

Anforderungen des Problems, insbesondere hinsichtlich seiner Eigenschaften wie Model-free oder Model-based sowie On-Policy oder Off-Policy.

Für die Implementierung des Intelligenten Algorithmus wird auf Literaturbasis ein geeignetes Modell entwickelt, das für den in AP 2 definierten parametrisierbaren Use-Case adaptiert wird. Das Training erfolgt unter Berücksichtigung der festgelegten Randbedingungen der Umgebung, wobei insbesondere Scheduling und Nesting durch praktikable Entscheidungsraum-Methoden eingebunden werden. Das Modell wird anhand einer Vielzahl von Produktionssimulationen optimiert, in denen Fertigungsumgebungen, Bauteilanforderungen und Störgrößen gezielt variiert werden, um eine hohe Robustheit und Flexibilität sicherzustellen. Zudem wird eine geeignete Programmstruktur (Datenbank, Packages) abgeleitet, um eine nachhaltige Implementierung zu gewährleisten. Die Performance des Algorithmus wird kontinuierlich überprüft und in enger Abstimmung mit dem pbA optimiert.

Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung und Optimierung eines KI-Algorithmus zur Produktionsplanung, der durch simulationsgestütztes Training robuste und flexible Entscheidungsstrategien erlernt. Durch die Erarbeitung eines Zielsystems wurden die notwendigen Voraussetzungen für eine anwendbare Applikation geschaffen. Der entwickelte Algorithmus wurde auf einen parametrisierbaren Use-Case angepasst und mit festgelegten Randbedingungen trainiert, wobei Scheduling und Nesting als zentrale Planungsaufgaben integriert wurden. Zusätzlich sollte eine skalierbare Programmstruktur erarbeitet werden, um eine nachhaltige Implementierung zu ermöglichen. Durch gezielte Anpassungen des Algorithmus an spezifische Anforderungen sowie die Variation von Fertigungsparametern und Störgrößen während des Trainings sollte eine leistungsfähige KI-Lösung entstehen. Die kontinuierliche Evaluation und iterative Verbesserung gewährleisten eine hohe Anwendbarkeit in realen Produktionsumgebungen.

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten wurde der RL-Agent erfolgreich in die Simulationsumgebung integriert und eine störungsfreie Kommunikation sichergestellt. Zur Überprüfung der Qualität der Embeddings und der State-Space-Repräsentation wurde das Graph-Neural-Network (GNN) anhand unterschiedlicher Zeitschritte in der Simulation trainiert. Zudem erfolgte eine Evaluierung des RL-Agenten durch Training mit verschiedenen Policys und Hyperparametern, darunter PPO mit unterschiedlichen Lernraten sowie explorativen und defensiven Strategien. Um die Leistungsfähigkeit des Ansatzes zu bewerten, wurden die Optimierungsergebnisse mit etablierten heuristischen Verfahren wie Particle-Swarm-Optimization (PSO) und Tabu-Search (TS) verglichen. Darüber hinaus wurde die Skalierbarkeit des Modells untersucht, insbesondere im Hinblick auf wachsende Produktionsumgebungen und variable Parameter. In den pbA-Treffen wurde der entwickelte Ansatz durch gezielte Demonstrationen und Diskussionen validiert und sein Nutzwert herausgestellt.

Simulation und Training verlaufen mehrschrittig. Zunächst wurden über 10 000 Instanzen von Graphen-Beschreibungen des JSSP generiert. Die Generierung der Zeitschritte erfolgte dabei mittels Heuristiken (First-in-first-out, Least Effort first, Most Effort first etc.), um eine Grundlage der Beschreibung des Problems als Graph abzubilden. Die einfache Simulation beinhaltet dabei Knoten und Verbindungen zwischen den einzelnen Knoten, die je nach Zeitschritt variieren. Aus diesen Zeitschritten lassen sich wiederum die Graphenrepräsentationen ableiten. Abbildung 1-11 zeigt einen schematischen Gesamtdurchlauf des Trainings. Abbildung 1-12 und Abbildung 1-13 zeigen jeweils, wie sich der Graph mit den Operationen zu unterschiedlichen Zeitschritten entwickelt. Ungerichtete Verbindungen werden zunehmend gerichteter. Mittels des Trainings eines GNNs ist es nun möglich, den Systemzustand arbiträrer Graphen in einen Vektor zu überführen.

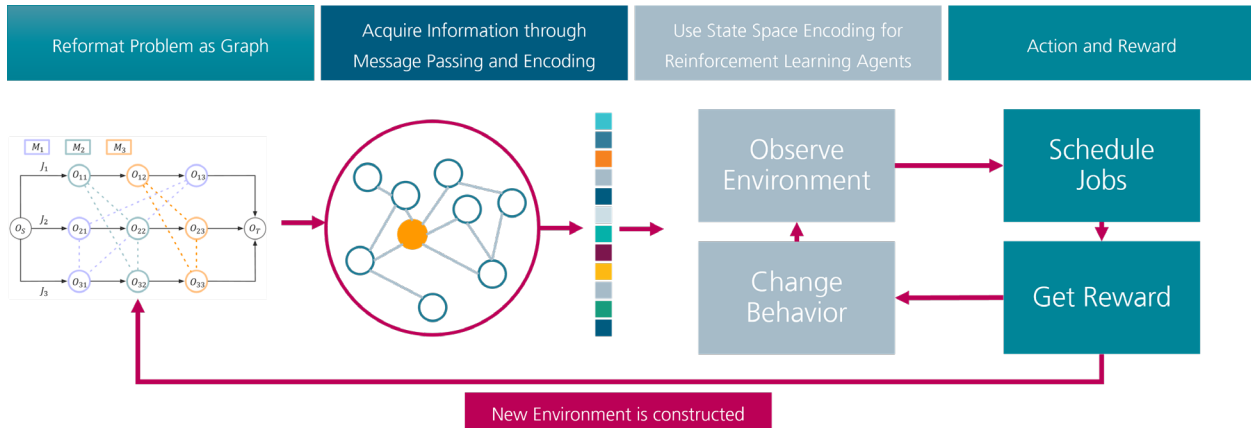


Abbildung 1-11 Gesamtdurchlauf Training (eigene Darstellung)

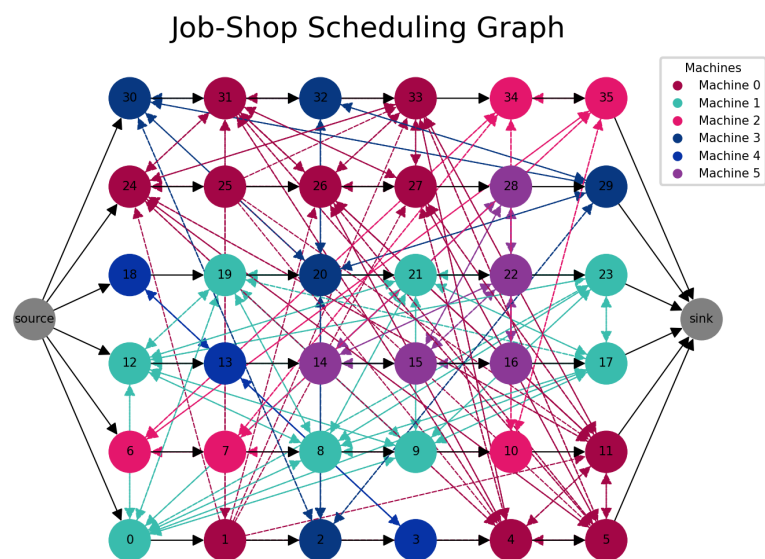


Abbildung 1-12 FT06-Instanz zu Zeitschritt 3 (eigene Darstellung)

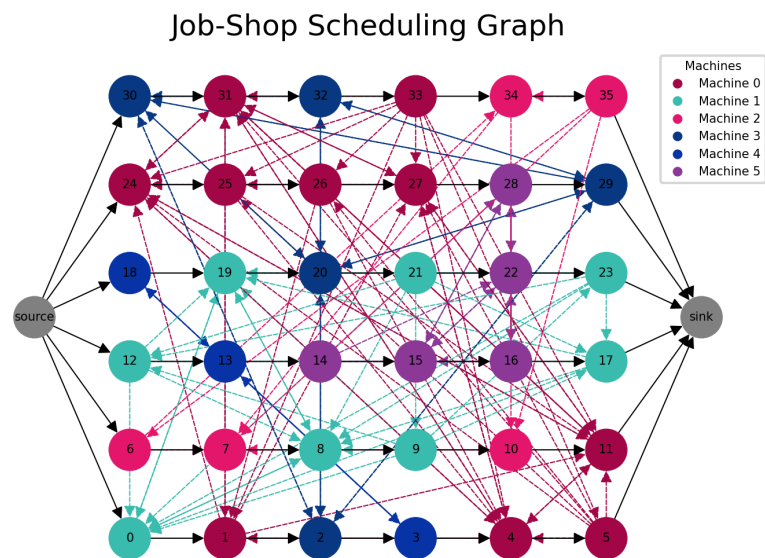


Abbildung 1-13 FT06-Instanz zu Zeitschritt 15 (eigene Darstellung)

Eine der gewählten Zielfunktionen war die Verkürzung der Makespan; diese errechnet sich folgendermaßen:

Formel-2-Makespan-Berechnung JSSP

$$\left(\frac{1}{1 + e^{k \cdot -(x-a)}} - 0.5 \right) \times 2$$

$x = \text{actual makespan}$

$k = \text{smoothing}$

$a = \text{shifting the sigmoid on the } x \text{ axis, thus:}$

$f(\text{makespan_min}) = 0 = \text{makespan_shortest}$

$\times 2 = \text{"stretching the } y \text{ axis"}$

$-0.5 = \text{center around } 0$

Weitere Zielfunktionen wurden modelliert und in d. oben genannten Gleichung aufgestellt. Für das JSSP gibt es bis auf wenige Ausnahmen keine Optimallösungen, sondern lediglich gut hergeleitete Approximationen, die als Benchmark dienen können; daher muss sich auch ein KI-Agent von Iteration zu Iteration irren und so eine Verbesserung erzielen. Hier wurde sich jedoch anderer Annahmen bedient, wie z. B. einer theoretisch kürzesten Makespan.

```
Funktion berechneKurzestMöglichenMakespan(Maschinen, Jobs):
    n = Länge von Maschinen
    gesamtLaufzeit = Summe der Laufzeiten aller Jobs
    kürzesterMöglicherMakespan = gesamtLaufzeit geteilt durch n
    Gib kürzesterMöglicherMakespan zurück
```

Ähnliche Methoden lassen sich auch für andere Funktionen anführen.

```
Funktion berechneMaschinenAuslastung(Maschinen, GesamtVerfügbareZeit):
    initialisiere leere Liste machine_utilization
    für jede Maschine in Maschinen:
        bestimme Endzeit der Maschine (maximale Endzeit aller Jobs der Maschine)
        bestimme Startzeit der Maschine (minimale Startzeit aller Jobs der Maschine)
        berechne die gesamte Bearbeitungszeit der Maschine (Summe der Bearbeitungszeiten aller Jobs)
        berechne die verfügbare Zeit der Maschine (Endzeit - Startzeit)
        berechne die Auslastung der Maschine (Bearbeitungszeit geteilt durch GesamtVerfügbareZeit)
        füge die Auslastung der Maschine zur Liste machine_utilization hinzu
        berechne die durchschnittliche Auslastung (Summe der Auslastungen geteilt durch Anzahl der Maschinen)
    gib die durchschnittliche Auslastung zurück
```

Störgrößen im Modell können flexibel simuliert werden. Maschinenausfälle werden über den Graphen dargestellt, wobei Personalausfälle analog zu Maschinenausfällen behandelt werden. Zudem kann Feedback

durch das Nachtrainieren des Modells mit realen Daten gegeben werden, was eine Abweichungsanalyse ermöglicht.

Das Benchmarking erfolgt gegen Google-OR-Tools und heuristische Verfahren. Dabei zeigte sich ein nichtlinearer Zusammenhang von GNN, der zu guten Scheduling-Ergebnissen führt. Die Inferenzzeit war jedoch länger als erwartet. Jedoch skaliert das Scheduling besser als mit OR-Tools. Möglicherweise könnte die Graph-Struktur angepasst werden, und ein Hyperparameter-Tuning wäre von Vorteil. (Exploration vs. Exploitation, Gammas etc.)

Abbildung 1-15 und Abbildung 1-14 zeigen den Anstieg der Berechnungszeit ggü. einer CP-Solver-Implementierung in *Google OR Tools* sowie die erreichte Makespan. Berechnungszeiten sind durchweg konsistenter, insbesondere wenn der CP-Solver keine sofortige oder optimale Lösung gefunden hat, sind die Berechnungszeiten um ein Vielfaches höher.

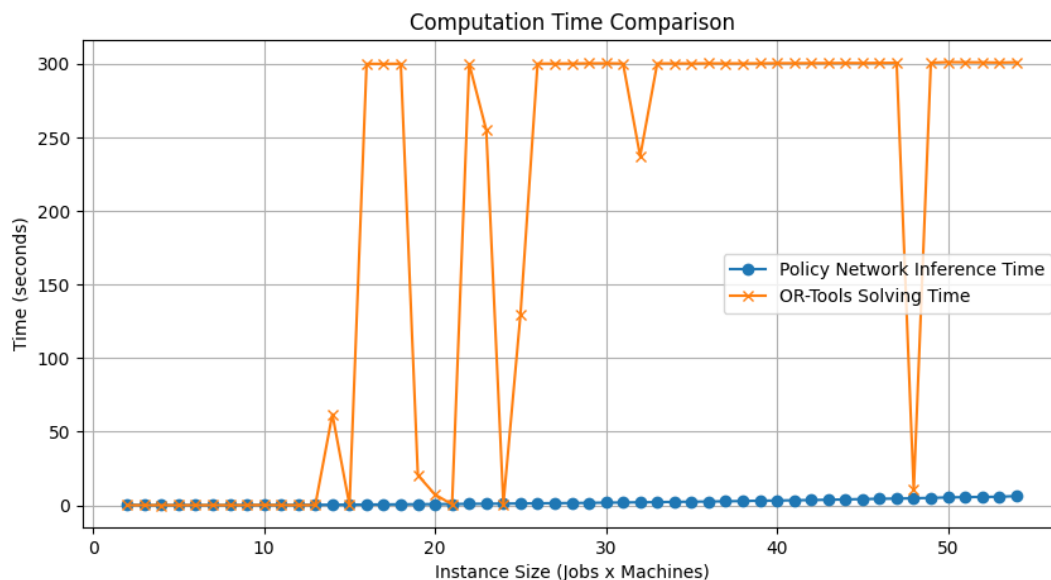


Abbildung 1-14: Berechnungszeiten CP-Solver vs. Policy-Network (eigene Darstellung)

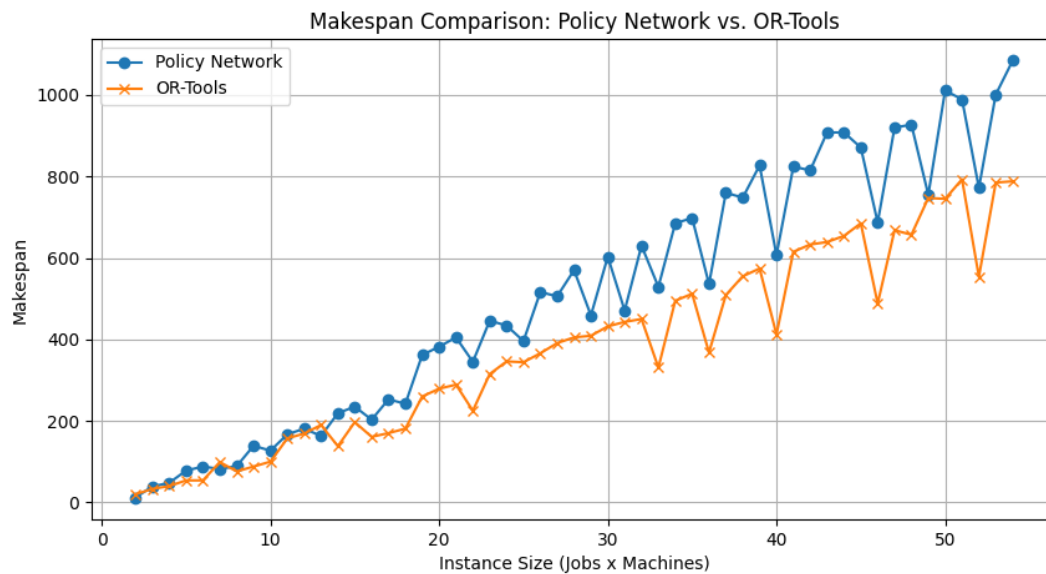


Abbildung 1-15 Durchlaufzeiten CP-Solver vs. Policy-Network (eigene Darstellung)

Die Makespan zeigt, dass eine weitere Anpassung der Parameter die Abweichung zu *OR Tools* deutlich hätte verringern können, hier gilt es in Zukunft, weitere Verbesserungen anzustreben. Dabei sei angemerkt, dass die Berechnungszeit lediglich von der Anzahl der Knoten abhängt. Die Performance der Instanz ist auch bei großen Instanzen hinreichend, obwohl das Training an Instanzen mit der Größe *Anzahl Maschinen* = $3 < i < 15$ und *Aufträgen* = $3 < j < 15$ durchgeführt wurden. Selbst mit derartig kleinen Samples lassen sich gute Generalisierungsfähigkeiten erzielen.

Die erzielten Ergebnisse verdeutlichen, dass der RL-Algorithmus, insbesondere mit PPO, klassische Heuristiken wie *Tabu Search* und *Particle Swarm Optimization* hinsichtlich der Makespan-Reduzierung und weiterer Optimierungsstrategien durchweg übertrifft. Ein wesentlicher Vorteil des Ansatzes ist die deutlich kürzere Inferenzzeit im Vergleich zu den Berechnungszeiten der heuristischen Verfahren, wodurch eine schnellere Entscheidungsfindung ermöglicht wird. Zudem kann der Agent unterschiedliche State-Spaces verarbeiten, wobei das GNN eine effiziente Encodierung des State-Space für den RL-Agenten sicherstellt. Die hohe Flexibilität und Anpassungsfähigkeit an verschiedene Produktionsbedingungen bestätigen den Mehrwert dieses Ansatzes gegenüber klassischen Optimierungsmethoden. In den PA-Treffen wurde der Nutzwert des entwickelten Modells als hoch bewertet und als vielversprechende Lösung für zukünftige Anwendungen eingestuft.

Fazit AP 3	In AP 3 folgten dann die erfolgreiche Entwicklung und Integration eines KI-Algorithmus für die Produktionsoptimierung. Hierfür wurde erneut ein Graph-Neural-Network (GNN) verwendet, um die State-Space-Encodierung effizient durchzuführen. Der ausprobierte Reinforcement-Learning-Ansatz übertraf bei einigen Versuchen etablierte, heuristische Verfahren wie <i>Tabu Search</i> und <i>Particle Swarm Optimization</i> . Dadurch konnte eine signifikant schnellere Inferenzzeit im Vergleich zu den klassischen Heuristiken erzielt werden. Zusätzlich konnten eine hohe Skalierbarkeit und Anpassungsfähigkeit an
------------	---

dynamische Produktionsumgebungen erreicht werden. Auch ermöglicht die Verwendung des Agenten die Verarbeitung unterschiedlicher State-Spaces. Ein weiterer Vorteil des Modells ist die Variabilität von Produktionsfaktoren und Störgrößen, welche im Training sichergestellt wurde. Die erzielten Ergebnisse wurden dann erneut bei Treffen mit dem projektbegleitenden Ausschuss validiert, wobei ein hoher Nutzwert jener im Vergleich zu klassischen Methoden bestätigt wurde.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde dann eine skalierbare Programmstruktur für eine nachhaltige Implementierung entwickelt. Alles in allem bildet das Ergebnis dieses Arbeitspakets einen entscheidenden Beitrag zur KI-gestützten, simulationsbasierten Produktionsplanung.

1.4 Arbeitspaket 4: Integration in die IT-Systemlandschaft von KMU

Das Ziel von Arbeitspaket 4 „Integration in die Systemlandschaft von KMU“ war die Entwicklung eines konzeptionellen Informationsmodells, das das Integrationskonzept für das Simulations- und KI-Modell in die IT-Systemlandschaft von KMU beschreibt. Auf Basis eines Vergleichs der Auftragsauslösungsarten wurde der AM-Dienstleister als Auftragsfertiger klassifiziert. Daraufhin wurde der Referenz-Auftragsabwicklungsprozess eines Auftragsfertigers aus dem Aachener PPS-Modell mittels einer Gap-Analyse in Anlehnung an HICKING U. VÖLKELE hinsichtlich seiner Eignung für AM-Dienstleister überprüft. Dadurch konnten Änderungen abgeleitet werden, mittels derer der Auftragsabwicklungsprozess an die spezifischen Anforderungen der AM-Dienstleister angepasst werden konnte. Im Anschluss erfolgte eine systematische Analyse der Prozessschritte im Hinblick auf ihre Abdeckung durch idealtypische betriebliche Anwendungssysteme. Dadurch konnten relevante Schnittstellen zwischen den IT-Systemen und dem Simulations- und KI-Modell identifiziert und definiert werden.

Als Grundlage für die Entwicklung eines an den AM-Dienstleister angepassten Auftragsabwicklungsprozesses wurde ein Referenzprozess aus dem Aachener PPS-Modell herangezogen. Dieses Modell unterscheidet vier Auftragsabwicklungsprozesse, die jeweils verschiedenen Auftragsauslösungsarten zugeordnet sind. Durch den Abgleich der charakteristischen Merkmale eines AM-Dienstleisters mit den im Aachener PPS-Modell definierten Ausprägungen konnte eine Einordnung als Auftragsfertiger vorgenommen werden. Zur Absicherung dieser Klassifikation erfolgte ein Vergleich mit den drei weiteren Ausprägungen: Rahmenauftragsfertiger, Variantenfertiger und Lagerfertiger. Dabei zeigte sich, dass der AM-Dienstleister mit diesen Auslösungsarten keine Übereinstimmung aufweist. Die Übereinstimmungen zwischen dem AM-Dienstleister und dem Auftragsfertiger nach Schuh et al. (2012) werden im Folgenden in Form einer Liste dargestellt:

1. Ein einzelner Kundenauftrag initiiert den Auftragsabwicklungsprozess und erzeugt damit einen individuellen Primärbedarf.
2. Der Primärbedarf ist in Form von kundenspezifisch zu produzierenden Erzeugnissen spezifiziert.
3. Die Erzeugniskonstruktion wird nahezu vollständig nach den Anforderungen der Kunden erstellt.

4. Jeder Kundenauftrag hat den Charakter einer Neukonstruktion.
5. Die Fertigungsart ist entweder als eine konsequente Einmalfertigung oder als Einzel- und Kleinserienfertigung ausgeprägt.

Zur späteren Adaption der einzelnen Prozessschritte wurde der Referenzprozess des Auftragsfertigers zusätzlich in der Prozessmodellierungssprache Business-Process-Model and -Notation 2.0 (BPMN) nachgebildet. Die Modellierung nach BPMN wurde in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss wegen der hohen Praxistauglichkeit und leichten Verständlichkeit gewählt.

Das Aachener PPS-Modell teilt die verschiedenen in der Auftragsabwicklung vorkommenden Prozesse je nach zu erfüllender Aufgabe ein. Es werden Netzwerkaufgaben, Kernaufgaben und Querschnittsaufgaben unterschieden. Netzwerkaufgaben behandeln überbetriebliche Aspekte auf strategischer Ebene. Kernaufgaben beinhalten alle Aufgaben des Produkterstellungsprozesses, die direkten Fortschritt im Produktionsprozess erzeugen. Querschnittsaufgaben sind Unterstützungsaufgaben zur Integration und Optimierung der Netzwerk- und Kernaufgaben und unterstützen die Auftragsabwicklung. (s. Schuh et al. 2012, S. 18)

In der Anpassung der Auftragsabwicklung an die Bedürfnisse der AM-Dienstleister wurden zuerst die zu fokussierende Aufgabenbereiche ausgewählt. Da nur die Auftragsabwicklung eines einzelnen AM-Dienstleisters betrachtet wird, fallen die Netzwerkaufgaben nicht in den Betrachtungsbereich. Zur Anpassung der Auftragsabwicklung werden im Folgenden die Prozesse der Kernaufgaben und Querschnittsaufgaben betrachtet. Die Wissensbasis zur Adaption an die Bedürfnisse eines AM-Dienstleisters wurde durch eine intensive Literaturrecherche sowie den aus Arbeitspaket 1 aufgebauten Erkenntnissen und weiteren Expertengesprächen gewonnen.

Die Anpassung des Prozessmodells zur Entwicklung eines Referenz-Auftragsabwicklungsprozesses für AM-Dienstleister erfolgte auf Grundlage einer detaillierten Analyse spezifischer Merkmale und Anforderungen, die für eine logisch und zeitlich strukturierte Auftragsabwicklung in der additiven Fertigung charakteristisch sind. Darauf aufbauend wurde eine Gap-Analyse nach HICKING U. VÖLKEL zwischen den Prozessschritten des klassischen Auftragsfertigers und den Anforderungen eines AM-Dienstleisters durchgeführt. Die daraus resultierenden Anpassungsbedarfe der Prozessschritte konnten in drei Kategorien unterteilt werden:

1. Zu übernehmende Prozesse
2. Anzupassende/neuzugestaltende Prozesse
3. Zu eliminierende Prozesse

Die anzupassenden Prozesse beinhalten auch die Integration von neuen Prozessschritten, die aufgrund der spezifischen Anforderungen der additiven Fertigung erforderlich sind.

Die Gap-Analyse ergab, dass die Prozesse vor allem die Querschnittsaufgaben des Aachener PPS-Modells betreffen, da diese unabhängig der Fertigungstechnologie auf den Auftragsfertiger ausgelegt sind. Als Managementfunktionen sind sie nicht unmittelbar an den Fertigungsprozess gebunden. Entsprechend erfordert die Anpassung dieser Prozessbereiche an die Besonderheiten eines AM-Auftragsfertigers nur geringe Modifikationen. Anpassungen betreffen in der Regel lediglich die konkrete Ausgestaltung der Prozessschritte, während deren Zielsetzung und strukturelle Einbindung erhalten bleiben.

Tabelle 1-4 gibt die zur Anpassung der Auftragsabwicklung an einen AM-Dienstleister zu eliminierende Prozesse und die jeweilige Begründung an.

Tabelle 1-4: Zu eliminierende Prozesse der Auftragsabwicklung bei Anpassung an einen AM-Dienstleister

Zu eliminierende Prozesse	Begründung
Fremdbezugsplanung und -steuerung	AM-Dienstleister wickeln primär Aufträge für die hauseigene Produktion ab und benötigen keine Fremdteile.
Produktionsprogrammplanung	Der AM-Fertiger produziert ausschließlich auftragsbezogen und benötigt daher kein auftragsanonymes Produktionsprogramm.
Teile der Produktionsbedarfsplanung	Im AM-Prozess sind alle Stücklisten vollständig definiert und es ist daher keine Planung mit Unsicherheiten erforderlich, wie sie bei konventionellen Auftragsfertigern in der Produktionsbedarfsplanung geschieht.

Die Eliminierung dieser Prozessschritte führt zu einer Vereinfachung der Auftragsabwicklung, was in Übereinstimmung mit Literaturquellen bestätigt wird.

Ein wesentlicher Teil des prozessualen Ablaufs des Auftragsfertigers im Aachener PPS-Modell konnte für den AM-Kontext übernommen werden. Dabei wurden die jeweiligen Prozessschritte an die spezifischen Anforderungen der additiven Fertigung angepasst. Ein zentrales Element dieser Anpassung war die Integration der Möglichkeit zur Parallelfertigung im Rahmen der Eigenfertigungsplanung und -steuerung. Zu diesem Zweck wurde die Baujobplanung als eigenständiger Bestandteil in den Planungsprozess integriert. Ihre Ausgestaltung erfolgte auf Basis einer Literaturrecherche sowie in einem iterativen Entwicklungsprozess mit den Mitgliedern des pbAs. Dadurch konnten sowohl die Praxisnähe als auch die Anwendbarkeit der Schritte sichergestellt und validiert werden. Die Konzeption der Baujobplanung wurde darüber hinaus in der Fachzeitschrift „ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb“ unabhängig und inkl. eines Peer-Review-Verfahrens veröffentlicht (s. Gaillard et al. 2024).

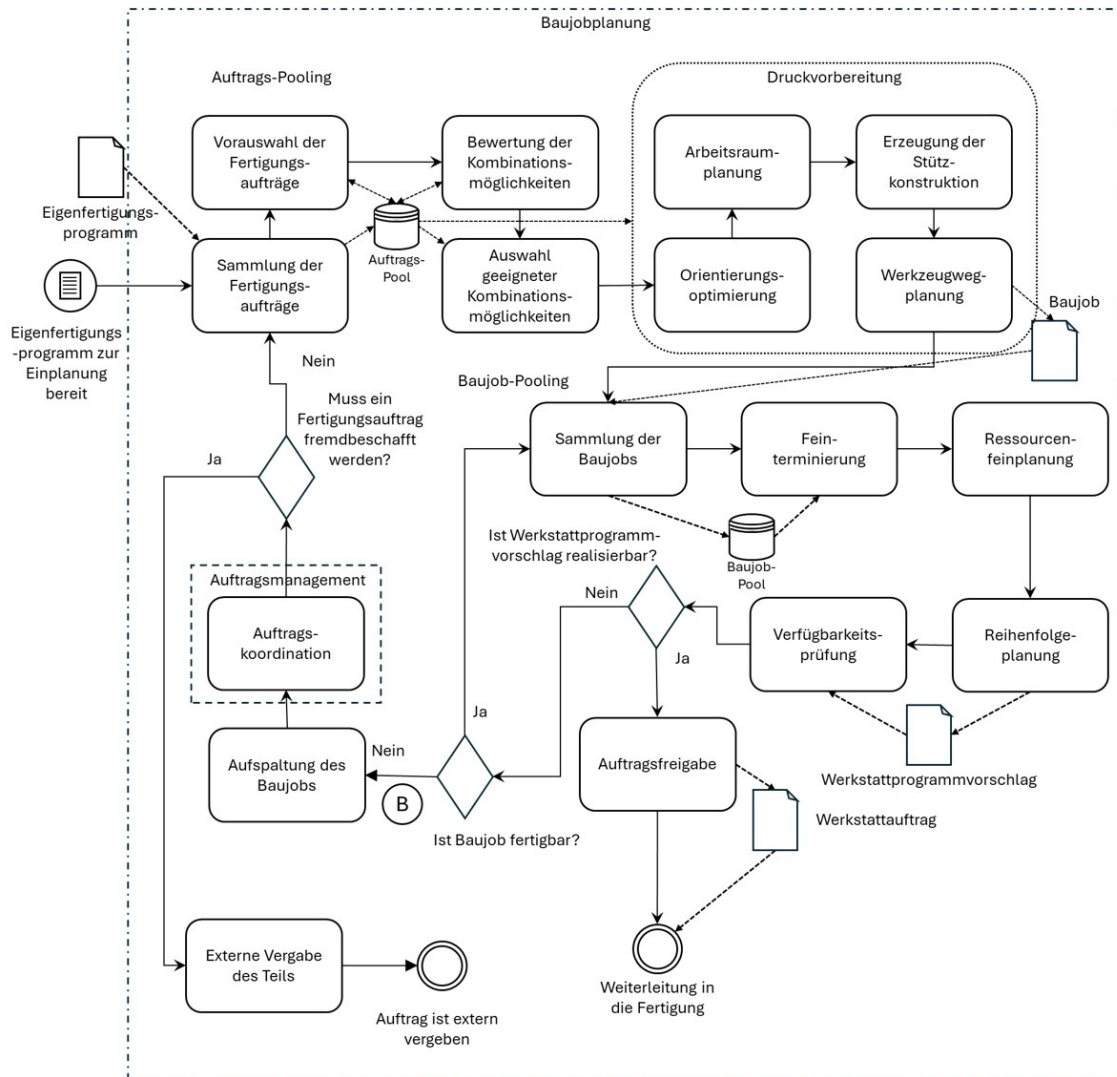


Abbildung 1-16: Baujobplanung in der Eigenfertigungsplanung und -steuerung (eigene Darstellung)

Als bedeutende Ergänzung der Auftragsabwicklung wird die Baujobplanung in Abbildung 1-16 gesondert dargestellt. Der gesamte AM-spezifische Auftragsabwicklungsprozess in BPMN 2.0-Modellierung ist im Anhang visualisiert (s. Abbildung 9-5 bis Abbildung 9-9).

Nachdem eine Referenz-Auftragsabwicklung für AM-Auftragsfertiger erstellt wurde, erfolgte die Zuordnung von gängigen IT-Systemen zu den einzelnen Prozessschritten. Das dient als Grundlage, um zu klären, wie sich das entwickelte Simulations- und KI-Modell in den Auftragsabwicklungsprozess einfügt. Durch eine Literaturrecherche wurde analysiert, welche IT-Systeme typischerweise in KMU vorhanden sind. Die Recherche ergab, dass ERP- und MES-Systeme mit respektiv über 70 % und über 30 % in vielen produzierenden Unternehmen etabliert sind und die grundlegenden Anforderungen an eine digitalisierte Auftragsabwicklung erfüllen (s. Abbildung 1-17). Darüber hinaus wurde festgestellt, dass Betriebs- und Maschinendatenerfassungssysteme (BDE/MDE) essenziell sind, um die Planung durch das KI-Modell durch aktuelle Produktions- und Prozessdaten zu verbessern sowie die Planung echtzeitfähig zu machen. BDE und MDE werden mit ca. 55 % und knapp 40 % in produzierenden Unternehmen genutzt (s. Schuh et al. 2013, S. 18). Weitere IT-Systeme wurden nicht als Voraussetzung für die Umsetzung der Projektergebnisse formuliert. Ziel ist es, die Einstiegshürden für KMU zu minimieren, damit die Forschungsergebnisse möglichst breite Anwendung finden.

Für die aus dem Aachener PPS-Modell übernommenen Prozessschritte konnte auch die Zuordnung der jeweiligen IT-Systeme übernommen werden. Durch die Einführung der Baujobplanung ergaben sich in der Eigenfertigungsplanung und -steuerung jedoch neue Prozessschritte, für die im Aachener PPS-Modell keine direkte Entsprechung existiert. Daher wurde untersucht, in welches IT-System diese Prozesse integriert werden sollten. Die Analyse ergab, dass diese Prozesse vom MES verwaltet werden, wobei insbesondere VDI 5600 Blatt 8 eine geeignete Verknüpfung von MES und KI für diesen Anwendungsfall beschreibt. Ein konzeptionelles Informationsmodell für den entsprechenden AM-Auftragsabwicklungsprozess kann dem Anhang (Abbildung 9-10, Abbildung 9-11 und Abbildung 9-12) entnommen werden.



Abbildung 1-17: Einsatz von IT-Systemen in produzierenden Unternehmen (Schuh et al. 2013)

Zusammenfassend werden die Anwendungssysteme ERP, MES und BDE/MDE den Prozessen der Auftragsabwicklung zugeordnet. Dabei steuert das ERP hauptsächlich die Prozesse des Auftragsmanagements und der Produktionsbedarfsplanung. ERP und MES steuern auf unterschiedlichen Ebenen die Prozesse der Eigenfertigungsplanung und -steuerung, wobei die Baujobplanung Teil des MES ist. Daten des Bestandsmanagements fließen sowohl in das ERP als auch das MES. Das BDE/MDE ist an die Informationen der direkten Fertigung gekoppelt und führt die aktuellen Prozessdaten in das Simulations- und KI-Modell zurück.

Nachdem die IT-Systeme den jeweiligen Prozessschritten zugeordnet wurden, erfolgte die Beschreibung der Schnittstellen zwischen den Anwendungssystemen und dem Simulations- und KI-Modell. Dafür wurden drei zentrale Anknüpfungspunkte für die Modelle identifiziert, die im Folgenden beschrieben werden.

Der erste Anknüpfungspunkt des Simulations- und KI-Modells befindet sich in der Baujobplanung und ist im Anhang in Abbildung 9-11 dargestellt. Dabei hilft das Modell bei der Identifikation geeigneter Kombinationsmöglichkeiten für die Baujobzusammenstellung, indem es vorliegende Aufträge analysiert und mögliche Kombinationen vorschlägt. Zudem ermöglicht das Modell eine Zusammenstellung von Baujobs, die an die aktuelle und prognostizierten Maschinenauslastung angepasst sind. So können Engpässe vermieden und die Produktionskapazitäten optimal genutzt werden. Besonders durch das Füllen von Produktionslücken trägt das KI-Modell wesentlich zur Effizienzsteigerung und Flexibilisierung der Produktionsplanung bei.

Der zweite Anknüpfungspunkt betrifft die Eigenfertigungsplanung, zu erkennen in Abbildung 9-12. Zwischen dem Baujob-Pool und den steuernden Prozessen unterstützt das KI-Modell die bedarfsgerechte und dynamische Planung der Produktionsreihenfolge der Baujobs. Dabei kann das Modell flexibel auf die ständig wechselnden Rahmenbedingungen in der Fertigung reagieren und somit eine anpassungsfähige und ressourcenschonende Produktionssteuerung ermöglichen.

Der dritte Anknüpfungspunkt betrifft die direkte Fertigung, zu erkennen in Abbildung 9-12. Dort werden die aktuellen Fertigungsdaten in das KI-Modell zurückgespielt. Das KI-Modell muss mit den aktuellen Fertigungsdaten verknüpft werden, um eine effektive und kontinuierliche Optimierung zu ermöglichen. Durch den Vergleich prognostizierter und realer Produktionsdaten kann das Modell laufend verbessert und an die tatsächlichen Gegebenheiten angepasst werden. Dies führt zu einer höheren Vorhersagegenauigkeit und ermöglicht es, das Modell gezielt auf unternehmensspezifische Rahmenbedingungen zuzuschneiden. Zudem wird durch die Anbindung an Echtzeitdaten die flexible Einbindung plötzlich auftretender Änderungen in die Planung gewährleistet, was die Reaktionsfähigkeit und Robustheit des Produktionssystems deutlich erhöht.

Im dritten Schritt von AP 4 wurden die entstandenen Systemschnittstellen zwischen Simulations- und KI-Modell und den Anwendungssystemen näher beschrieben. Richtlinien wurden insbesondere Blatt 8 der VDI 5600, die die Verknüpfung von MES und KI beschreibt, entnommen. Die VDI-Richtlinie stellt die Anbindung von MES und KI wie in Abbildung 1-18 beschrieben dar.

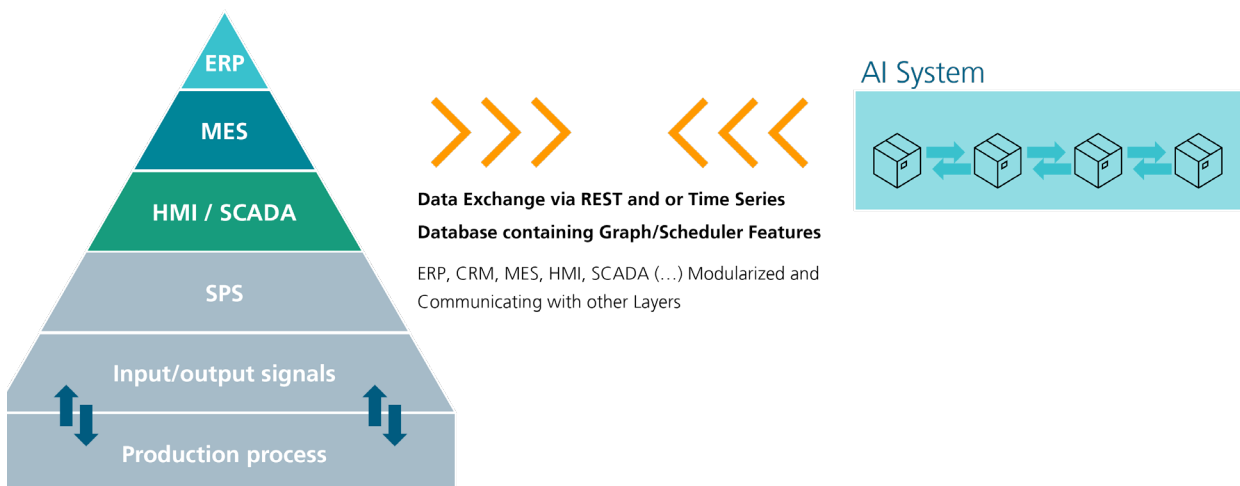


Abbildung 1-18 Datenzugriff (eigene Darstellung i. A. a. VDI 5600)

Auf technischer Ebene ist der Aufbau einer robusten und effizienten Pipeline zwischen MES und KI-Modell essenziell. Das MES sendet hierbei kontinuierlich relevante Produktionsdaten an die KI, welche diese Informationen verarbeitet und optimierte Entscheidungsstrategien zurück an das MES liefert. Diese Rückkopplungsschleife ermöglicht eine adaptive und selbstoptimierende Produktionsplanung, die flexibel auf Veränderungen und Störungen reagieren kann.

Die genaue Definition und Implementierung der Schnittstellen zwischen den Systemen sind dabei von zentraler Bedeutung. Die Richtlinien aus Blatt 8 der VDI 5600 dienen als wichtige Referenz, um sicherzustellen, dass die Kommunikation zwischen MES und KI reibungslos verläuft und den erforderlichen Standards entspricht. Technische Herausforderungen bestehen in der Harmonisierung von Datenformaten, der Sicherstellung von Echtzeitfähigkeiten und der Gewährleistung von Datensicherheit und -integrität. Zudem ist es

wichtig, klare Verantwortlichkeiten und Kommunikationswege zu definieren. Projektteams sollten aus Expert*innen unterschiedlicher Fachbereiche bestehen, um technisches Know-how und praktische Erfahrungen aus der Produktion zu vereinen. Regelmäßige Meetings und Feedback-Schleifen unterstützen den Informationsaustausch und ermöglichen eine agile Anpassung des Implementierungsprozesses an neue Erkenntnisse oder veränderte Rahmenbedingungen.

Fazit AP 4	In Zuge von AP 4 wurde ein Referenz-Auftragsabwicklungsprozess für AM-Dienstleister aus dem Aachener PPS-Modell abgeleitet. Dieses wurde an die für die additive Fertigung spezifischen Voraussetzungen angepasst. Eine besondere Ergänzung stellt dabei die Baujobplanung dar, die auf die Parallelfertigung der AM-Fertigung zugeschnitten ist. Neben einer Validierung durch den projektbegleitenden Ausschuss wurde dieser Referenzprozess in einer Peer-Review-Publikation veröffentlicht. Den Prozessschritten der Auftragsabwicklung wurden typische Anwendungssysteme zugeordnet. Auf Grundlage dessen konnten die Schnittstellen der Simulations- und KI-Modelle und der Anwendungssysteme beschrieben werden. Somit entstand ein ganzheitliches konzeptionelles Informationsmodell der entwickelten Simulations- und KI-Modell in die Auftragsabwicklung für AM-Dienstleister. Die Ziele von AP 4 wurden damit erfolgreich erreicht.
------------	--

1.5 Arbeitspaket 5: Gestaltungsempfehlungen

Im Arbeitspaket 5 wurden die Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitspakete zusammengefasst und als Gestaltungsempfehlungen für die PPS von AM-Dienstleistern aufbereitet. Anhand dieser Empfehlungen sollen die Forschungsergebnisse mit möglichst geringem Aufwand in KMU anwendbar gemacht werden. Gleichzeitig wurden besonders Aufwand, Risiken und Kosten seitens einer Integration des entwickelten Modells in die IT-Systemlandschaft berücksichtigt. Die ermittelten Gestaltungsempfehlungen wurden in strukturierter Form in einen Leitfaden überführt, sodass produzierende Unternehmen befähigt werden, die Konzeptergebnisse selbstständig umzusetzen oder in ein anforderungsgerechtes Lastenheft für den spezifischen Anwendungsfall zu überführen. Da die Integration der in Arbeitspaket 2 und 3 entwickelten KI-Modelle in die für AM-Dienstleister aufgestellte Auftragsabwicklung zuerst die Adaption der Auftragsabwicklung des Unternehmens voraussetzt, ist der entwickelte Leitfaden dementsprechend auf den AM-Auftragsabwicklungsprozess aufgebaut. Das KI-Modell kann anhand des Quellcodes nachgebaut werden und ist somit nicht Teil des Leitfadens.

Der Leitfaden behandelt die strukturelle Adaption der Auftragsabwicklungsprozesse des AM-Dienstleisters an den entwickelten Referenzprozess. Eine Literaturrecherche ergab, dass für dieses Vorgehen spezielle Vorgehensmodelle existieren. Dabei sind grundsätzlich die verschiedenen Ansätze des Business-Process-Reengineerings und der kontinuierlichen Verbesserung zu unterscheiden. Aufgrund der besonderen Beachtung und Minimierung von Risiko, Kosten und Aufwand im Anwendungsfall wurden die Verfahren der kontinuierlichen Verbesserung ausgewählt. Diese Vorgehensmodelle sind hauptsächlich aus dem Feld des Business-Process-Managements (BPM) entstanden und verfolgen eine schrittweise Verbesserung von einem Ist- zu einem Soll-Prozess. Um ein geeignetes Vorgehensmodell auszuwählen, wurde auf der systematischen Literaturrecherche von Koutsouras et al. aufgebaut. In dieser wurden die zwischen den Jahren 2000 – 2017 meistzitierten BPM-Modelle zusammengefasst. Um auf dieser Basis ein für den Anwendungsfall passendes

Vorgehensmodell auszuwählen, wurden Kriterien zur Prüfung ausgewählt und die BPM-Modelle entsprechend bewertet. Die Einordnung der Modelle anhand der aufgestellten Kriterien kann Tabelle 1-5 entnommen werden. Der Füllungsgrad der bewertenden Harvey-Balls korreliert mit aufsteigender Erfüllung des jeweiligen Kriteriums. Dabei prüft das Kriterium der „Ausrichtung Prozessänderung“, ob das BPM-Modell zur Änderung von Unternehmensprozessen entwickelt worden ist. Das Kriterium der „Ausrichtung KMU“ prüft, ob das Modell die charakteristischen Eigenschaften eines kleinen oder mittleren Unternehmens berücksichtigt. Das Kriterium der „Phasenanzahl“ prüft die Anzahl der aufeinanderfolgenden Phasen und damit den Detaillierungsgrad des Modells. Das Kriterium „Detailgrad der Modellbeschreibung“ prüft ob die einzelnen Phasen des Modells praxisrelevant erläutert werden.

Tabelle 1-5: Bewertung der untersuchten BPM-Modelle anhand aufgestellter Kriterien

Wissenschaftliche Beiträge	Ausrichtung Prozessänderung	Ausrichtung KMU	Phasenanzahl	Detailgrad der Modellbeschreibung
van der Aalst	○	○	○	○
Netjes et al.	○	○	◐	○
zur Muehlen und Ho	◐	○	●	○
Weske	◐	○	○	●
Hallerbach et al.	○	○	○	○
Houy et al.	◐	○	●	○
Dumas et al.	◐	○	●	●
Macedo de Moraes et al.	◐	○	◐	○
Schulte et al.	○	○	○	○
Bernardo et al.	◐	○	◐	○

Die Prüfung der Modelle anhand der aufgestellten Kriterien ergab, dass das Modell von Dumas et al. das geeignetste Modell zur Adaption auf den Anwendungsfall ist.

Zur Adaption des Modells auf den Anwendungsfall wurden weitere Kriterien aufgestellt, die in Tabelle 1-6 beschrieben werden. Diese Kriterien wurden aufgrund von Expertengesprächen und intensiver Literaturrecherche ausgewählt.

Tabelle 1-6: Zu erfüllende Kriterien bei Adaption des Vorgehensmodells

Kriterium	Beschreibung
Vorprüfung	Das Kriterium der Vorprüfung ist erfüllt, wenn vor dem Einsatz des Vorgehensmodells geprüft wird, ob die organisatorischen Rahmenbedingungen sowie die Ressourcen und Kapazitäten für eine Prozessanpassung gegeben sind. Zusätzlich sollte ein Abgleich zwischen den Anforderungen der Anwender und dem Einsatzzweck des Modells erfolgen. Nur wenn diese Faktoren positiv bewertet werden,

	kann von einer tragfähigen Grundlage für die Anwendung und Zielerreichung des Vorgehensmodells ausgegangen werden.
Holistische Transformationskompatibilität	Das Kriterium der holistischen Transformationskompatibilität ist erfüllt, wenn das Vorgehensmodell die Wechselwirkungen zwischen technischen und sozialen Komponenten im Unternehmen berücksichtigt. Mitarbeitende werden dabei als aktive Mitgestaltende verstanden, deren Einbindung, Qualifikation und Akzeptanz ebenso wie die Unterstützung durch das Management zentrale Erfolgsfaktoren für die Umsetzung darstellen.
Bedürfnisgerichtetheit	Das Kriterium der Bedürfnisgerichtetheit ist erfüllt, wenn das Vorgehensmodell an die spezifischen Eigenschaften und Bedürfnisse von KMU angepasst ist. Dazu zählen insbesondere Pragmatismus, einfache Anwendbarkeit, niedrige Einstiegshürden sowie die Berücksichtigung begrenzter Ressourcen und fehlender Prozess Erfahrung. Kleine, lernorientierte Schritte und konkrete Handlungsempfehlungen fördern die Akzeptanz und Wirksamkeit im KMU-Umfeld.
Zielgerichtetheit	Das Kriterium der Zielgerichtetheit ist erfüllt, wenn das Vorgehensmodell einen klar strukturierten zielbezogenen Ablauf bereitstellt, der einem kleinen oder mittleren Unternehmen im Bereich der AM-Auftragsfertigung die gezielte Anpassung seiner Auftragsabwicklungsprozesse an das vorgegebene Referenzmodell ermöglicht. Der Ablauf ist dabei konsequent auf den angestrebten Soll-Zustand ausgerichtet.

Diese Kriterien bilden die grundlegende Ausrichtung der Adaption des Vorgehensmodells an dem vorliegenden Anwendungsfall.

Der allgemeine Aufbau des Vorgehens wird durch Abbildung 1-19 präsentiert. Im ersten Schritt werden die Vorbereitungen für die Modellanwendung getroffen. Daraufhin wird das Vorgehensmodell zur Prozessangleichung angewendet. Ist dieser Schritt durchlaufen, wird die Modellanwendung reflektiert und entschieden, ob das Modell auf einen weiteren zu adaptierenden Bereich angewendet wird.

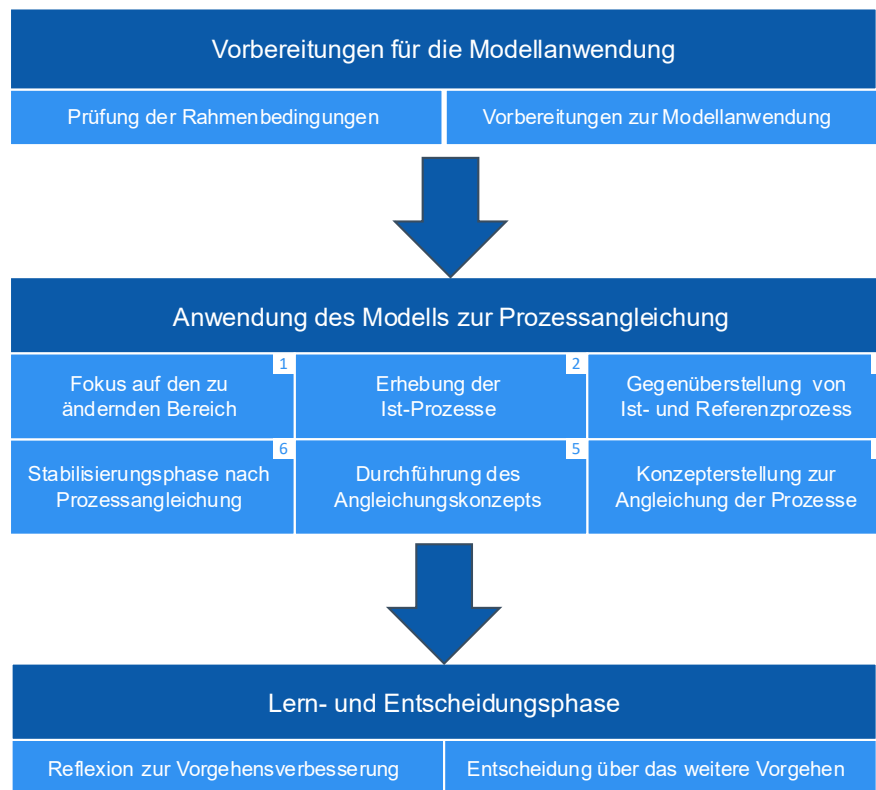


Abbildung 1-19: Aufbau des Leitfadens (eigene Darstellung)

Der Abschnitt *Vorbereitungen für die Modellanwendung* umfasst die Prüfung der Rahmenbedingungen und die Vorbereitungen zur Anwendung des Modells zur Prozessangleichung. Die Prüfung der Rahmenbedingung ist eine Vorprüfung im Sinne des vorher aufgestellten Kriteriums. Dabei werden die organisatorischen Rahmenbedingungen sowie die Ressourcen und Kapazitäten des Unternehmens für eine Prozessanpassung überprüft. Dieser Schritt stellt sicher, dass die zur erfolgreichen Durchführung des Modells nötigen Ressourcen zur Verfügung stehen und die Anforderungen der Anwender an das Modell und der Einsatzzweck des Modells übereinstimmen. In den Vorbereitungen zur Modellanwendung wird der Anwender des Modells schrittweise an ein prozessorientiertes Denken herangeführt. Ziel ist es, ein grundlegendes Verständnis für den Aufbau des Unternehmens, die betriebliche Einbettung der Auftragsabwicklung sowie für deren interne Zusammenhänge zu entwickeln. Zudem soll ein erster Überblick über die von einer möglichen Prozessänderung betroffenen Personen und Bereiche geschaffen werden. Im Zentrum steht hier die Erstellung einer Prozessarchitektur, die als Bezugsrahmen für die Verortung der Auftragsabwicklung innerhalb der Unternehmensstruktur dient. Diese Verortung definiert zugleich den groben Fokusbereich des weiteren Vorgehens. Eine zentrale Aufgabe in dieser Phase ist die Unterscheidung zwischen Kern- und Querschnittsprozessen. Dadurch wird es möglich, wertschöpfende Prozesse von unterstützenden Prozessen klar abzugrenzen – ein wichtiges Element zur strukturierten Einordnung und späteren gezielten Anpassung der Prozessbausteine.

Der Abschnitt *Anwendung des Modells zur Prozessangleichung* stellt den Kern des Vorgehensmodells dar und umfasst sechs aufeinanderfolgende Schritte. Er begleitet die schrittweise strukturelle Anpassung eines fokussierten Teilbereichs der Auftragsabwicklung an das zugrunde liegende Referenzmodell. Dabei werden die aus dem Referenzmodell aufeinanderfolgenden Aufgaben (Angebotsbearbeitung, Auftragsbearbeitung, Produktionsbedarfsplanung, Baujobplanung, Planungs- und Steuerungsschritte der Eigenfertigungsplanung und

-steuerung, Produktion und Versand) als Teilbereiche gesehen, die durch Schnittstellen miteinander verbunden sind. Da sich die Prozessanpassung ausschließlich auf den Bereich zwischen den definierten Schnittstellen bezieht und diese Schnittstellen als Input- und Outputgrenzen unverändert bleiben, ist es möglich, einzelne Teilbereiche isoliert zu adaptieren, ohne unbeabsichtigte Wechselwirkungen auf andere Prozessabschnitte auszulösen. Die empfohlene Reihenfolge der Prozessanpassung orientiert sich an der chronologischen Struktur der Auftragsabwicklung – beginnend mit der Angebotsbearbeitung und endend mit der Auslieferung. Diese Vorgehensweise bietet mehrere Vorteile: Zum einen kann der Anwender sein Verständnis der unternehmensspezifischen Auftragsabwicklungsprozesse schrittweise und systematisch von Beginn an aufbauen. Zum anderen wird der Einstieg über Querschnittsaufgaben ermöglicht, die am Anfang der Auftragsabwicklung stehen. Etwaige Unsicherheiten oder Anpassungsfehler zu Beginn des Projekts wirken sich dort weniger kritisch auf den operativen Fertigungsprozess aus und bieten somit einen risikoarmen Einstieg in den Angleichungsprozess.

Im ersten Schritt wird der konkrete Prozessbereich der Auftragsabwicklung identifiziert, der im weiteren Verlauf angepasst werden soll. Die Auswahl des Prozessbereichs orientiert sich an den im Referenzprozess definierten Schnittstellen, die als strukturelle Abgrenzung zwischen den Teilbereichen der Auftragsabwicklung dienen. Ergänzend erfolgt eine Aktualitätsprüfung der in der Vorprüfung betrachteten Rahmenbedingungen für diesen Teilbereich. Für den ausgewählten Bereich wird eine Stakeholderanalyse durchgeführt. Ziel ist es, relevante Personen zu identifizieren, deren Rollen zu definieren und somit die Verantwortlichkeiten für den weiteren Projektverlauf klar zuzuordnen. Dieser Schritt schafft die organisatorische Grundlage für eine strukturierte und zielgerichtete Zusammenarbeit. Ein weiterer zentraler Bestandteil dieser Phase sind die Aktivierung und Nutzung bereits vorhandenen Wissens. Durch die gezielte Einbindung bestehender Informationen, wie etwa Prozessdokumentationen, frühere Analysen oder bereits erhobene Kennzahlen (KPIs), können Redundanzen vermieden und der Aufwand reduziert werden.

Schritt zwei ist die Erhebung der Ist-Prozesse. Ihr Ziel ist die vollständige und objektive Abbildung des aktuellen Prozessablaufs in Form eines Ist-Prozessmodells. Im Mittelpunkt steht dabei die Modellierung des tatsächlichen Ablaufs der Prozesse zwischen den in der vorherigen Phase definierten Schnittstellen, wobei die Notation in BPMN (*Business Process Model and Notation*) erfolgt. Die Wahl von BPMN begründet sich durch ihre Anwenderfreundlichkeit, die freie Verfügbarkeit und insbesondere durch die Kompatibilität mit dem Referenzmodell, das ebenfalls in BPMN dargestellt ist. Das erleichtert den späteren strukturellen Abgleich erheblich. Das in dieser Phase entstehende Ist-Modell bildet somit die verbindliche Ausgangsbasis für die anschließende Analyse und die daraus resultierenden Prozessanpassungen. Der Detailgrad und die Prozessbenennung des Referenzmodells dienen als Maßstab für die Modellierung. Die Erhebung konzentriert sich bewusst auf die Regelfälle, um die Komplexität zu begrenzen und nach dem Pareto-Prinzip ein möglichst hohes Aufwand-Nutzen-Verhältnis zu erzielen. Dies entspricht auch der Struktur des Referenzmodells, das ebenfalls auf standardisierte, häufig auftretende Prozessverläufe ausgelegt ist. Die Prozesserhebung erfolgt als iterativer Prozess, zwischen den Schritten der Informationsgewinnung, der Modellübertragung und der Validierung des erstellten Modells. Dabei werden die identifizierten Aktivitäten in chronologischer Reihenfolge angeordnet, genutzte Anwendungssysteme dokumentiert und die ausführenden Personen den jeweiligen Prozessschritten zugeordnet.

Schritt drei ist die Gegenüberstellung von Ist- und Referenzprozess. Ziele sind die Identifikation und strukturierte Beschreibung der Unterschiede zwischen dem im vorherigen Schritt erstellten Ist-Prozessmodell und dem Referenzprozess. Die methodische Grundlage bildet eine Gap-Analyse, bei der der durch das

Referenzmodell definierte Soll-Zustand mit dem erhobenen Ist-Zustand systematisch verglichen wird. Zentrales Werkzeug zur Identifikation von Differenzen ist die grafische Gegenüberstellung beider Modelle. Auf dieser Basis erfolgt eine differenzierte Kategorisierung der Prozessabweichungen. Die Gründe für Abweichungen können durch eine qualitative 5-Why-Methode nach Serrat 2016, S. 307–310 erfasst werden. Die Analyse ermöglicht es, die Prozessschritte des Ist-Modells in drei Hauptkategorien einzuordnen:

1. Kategorie 1: Der Prozess ist in beiden Modellen vorhanden.
 - a. Der Prozess befindet sich an der vorgesehenen Stelle.
 - b. Der Prozess ist vorhanden, aber an einer anderen Stelle platziert.
2. Kategorie 2: Der Prozess ist im Referenzmodell, aber nicht im Ist-Modell vorhanden.
3. Kategorie 3: Der Prozess ist nur im Ist-Modell vorhanden, aber nicht im Referenzmodell.

Schritt vier ist die Konzepterstellung zur Angleichung der Prozesse. Ihr Ziel ist die Bewertung von Anpassungsmöglichkeiten einzelner Prozessschritte mit Blick auf ihre Übereinstimmung mit dem Referenzmodell. Die Analyse basiert auf der in der vorangegangenen Phase vorgenommenen kategorischen Einordnung und Begründung der identifizierten Abweichungen. Für jeden abweichenden Prozessschritt werden die notwendigen Voraussetzungen, der zu erwartende Umsetzungsaufwand sowie die potenziellen Auswirkungen auf angrenzende Prozesse systematisch abgeschätzt. Auf dieser Grundlage erfolgt eine fundierte Entscheidung darüber, ob und in welchem Umfang eine Anpassung realistisch, sinnvoll und verhältnismäßig ist. Besondere Aufmerksamkeit gilt dabei der Tatsache, dass jede strukturelle Veränderung innerhalb der Auftragsabwicklung auch eine Anpassung des zugrunde liegenden Workflows im Anwendungssystem – beispielsweise im ERP-System – erfordert. Diese technischen Modifikationen können mit zusätzlichen Aufwänden und Kosten verbunden sein und sind daher in die Abwägung einzubeziehen.

Schritt fünf ist die Durchführung des Angleichungskonzepts. Diese Phase bildet den operativen Übergang von der konzeptionellen Planung zur Umsetzung. Ziel ist es, die in Schritt vier entwickelten konzeptionellen Änderungsvorschläge in der realen Arbeitsumgebung zu implementieren. Dabei wird die neue Prozessanordnung als Zielzustand etabliert und löst die bisherige Prozessausführung ab. Die Angleichung betrifft sowohl den Prozessablauf als auch die IT-Systeme und die beteiligten Personen. Besonders in dieser Phase ist ein zentraler Erfolgsfaktor die Einbindung der betroffenen Mitarbeitenden. Ein besonderer Vorteil ergibt sich, wenn die Personen bereits in den ersten Phasen eingebunden waren und dadurch ein Verständnis des geänderten Prozessablaufs verinnerlicht und mitgetragen haben. Begleitmaßnahmen zur transparenten Kommunikation der Veränderung sind zusätzlich Schulungen, Checklisten oder Benennung von Ansprechpartnern für Rückmeldungen.

Schritt sechs ist die Stabilisierungsphase. Sie dient der Beobachtung und Bewertung der tatsächlichen Ausführung des neu gestalteten Prozesses. Ziel ist es, potenzielle Abweichungen vom angestrebten Soll-Zustand zu erkennen, zu bewerten und im Bedarfsfall gezielt nachzusteuern. Auf diese Weise wird eine stabile Verankerung des veränderten Prozessablaufs im betrieblichen Alltag unterstützt. Die Stabilisierungsphase versteht sich dabei als proaktiver Begleitprozess, der zur Sicher der erreichten Veränderung dient.

Die Lern- und Entscheidungsphase umfasst die Reflexion zur Vorgehensverbesserung und die Entscheidung über das weitere Vorgehen des Projektverlaufs. In der Reflexion zur Vorgehensverbesserung ermöglicht der iterative Charakter des Modells, das Vorgehen der Prozessanpassung kontinuierlich an den

unternehmensspezifischen Gegebenheiten auszurichten. Bewährte Methoden und Strukturen können für den nächsten Zyklus übernommen werden, weniger erfolgreiche Ansätze erkannt und für die Anpassung des nächsten Prozessbereichs gezielt weiterentwickelt werden. Die in dieser Phase gewonnenen Rückmeldungen tragen dazu bei, das Vorgehensmodell laufend zu optimieren und dessen Wirksamkeit für Folgeprojekte im eigenen Unternehmen zu erhöhen. Abschließend wird über das weitere Vorgehen entschieden. Dabei kann zwischen dem Verlassen der Modellverfolgung und der Adaption des nächsten Teilbereichs der Auftragsabwicklung und entschieden werden. Wird sich für die Adaption des nächsten Teilbereichs der Auftragsabwicklung entschieden, folgt eine Rückführung zu Schritt eins der Anwendung des Modells zur Prozessangleichung.

Der Leitfaden wurde unter der DOI [10.60571/3836](https://doi.org/10.60571/3836) veröffentlicht.

Fazit AP 5	Durch die Verknüpfung der Ergebnisse der vorherigen Arbeitspakete konnten Gestaltungsempfehlungen in einem umfassenden Leitfaden für die Anwendung der Forschungsergebnisse für KMU zusammengefasst werden. Das Vorgehensmodell zur Anpassung der Auftragsabwicklungsprozesse wurde dabei aus einem wissenschaftlich anerkannten BPM-Modell zur Prozessänderung abgeleitet und an den Anwendungsfall angepasst. Der Leitfaden dient zur Übertragung der Forschungsergebnisse in die Wirtschaft und wurde dafür Open-Access-publiziert.
------------	--

1.6 Arbeitspaket 6: Validierung

Um die Umsetzbarkeit der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zu gewährleisten, wurden das Simulationsmodell, das konzeptionelle Informationsmodell und der Leitfaden validiert. Die Leistungsfähigkeit des Simulationsmodells und des Intelligenten Algorithmus wurden dazu in mehreren Durchläufen getestet. Das in Arbeitspaket 4 aufgestellte Informationsmodell wurde in Expertengesprächen mit dem pbA hinsichtlich des Systemaufbaus, der Schnittstellenanforderungen und Datenformate validiert. Ebenso wurde der Leitfaden mit dem pbA abgestimmt, sodass die Praxistauglichkeit und die Übertragung der wissenschaftlichen Erkenntnisse in die Industrie sichergestellt sind.

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde die Validierung des Simulations- und KI-Modells durchgeführt. Dabei erfolgte die Leistungsprüfung des Modells innerhalb der Simulationsumgebung in mehreren Durchläufen, wobei die Ergebnisse mit heuristischen Ansätzen wie der First-in-first-out-Strategie verglichen wurden. Die Tests in der Simulationsumgebung verliefen erfolgreich, wie bereits in AP 3 beschrieben. Allerdings wurde keine Validierung anhand von Realdaten durchgeführt, da sich kein Partner aus dem Konsortium bereit erklärt hat, reale Daten zur Verfügung zu stellen, was zum Teil zur Verlängerung des Projekts führte.

Der Leitfaden basiert auf den zuvor mit dem pbA validierten Ergebnissen. In den Gesprächen zur Erstellung wurde von den Expert*innen betont, dass Unternehmen Unterstützung bei der Umstellung ihrer Auftragsabwicklung auf den im Forschungsvorhaben entwickelten Prozess benötigen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit eines praxistauglichen Leitfadens, der eine zielgerichtete Umsetzung der Forschungsergebnisse ermöglicht. Der Leitfaden wurde durch eine methodisch begründete Adaption eines wissenschaftlichen Vorgehensmodells entwickelt und ist damit wissenschaftlich fundiert.

Die erfolgreiche Implementierung einer KI-gestützten Produktionsplanung erfordert, dass KMU die richtigen Daten bereitstellen, um den Algorithmus effizient einzusetzen. Zentrale Daten, die dafür erforderlich sind,

umfassen Produktionsauftragsdaten wie Aufträge, Prioritäten, Fertigungszeiten und Materialverfügbarkeit. Ebenso wichtig sind Maschinen- und Betriebsdaten, die Informationen über Maschinenzustände, Wartungsintervalle und Auslastung enthalten. Personaldaten, wie Schichtmodelle, Qualifikationen und Verfügbarkeiten, spielen eine wesentliche Rolle, um eine realistische Produktionsplanung zu ermöglichen. Zudem sind Lagerbestände und Materialflüsse essenziell, um Engpässe zu vermeiden. Historische Produktionsdaten können dazu beitragen, Vorhersagen zu optimieren, während Störgrößen und Ausfallhistorien genutzt werden können, um die Widerstandsfähigkeit des Systems gegenüber unerwarteten Ereignissen zu verbessern.

Die Wahl einer geeigneten Datenbank ist entscheidend für die effiziente Speicherung und Verarbeitung dieser Daten. InfluxDB eignet sich besonders für die Speicherung von Zeitreihendaten, die in der Produktionsumgebung durch Sensoren und Maschinen erfasst werden. PostgreSQL bietet als relationale Datenbank eine skalierbare Lösung für die Verwaltung komplexer Produktionsdaten. MongoDB ermöglicht als NoSQL-Datenbank eine flexible Handhabung unstrukturierter Daten, was insbesondere für heterogene Produktionslandschaften vorteilhaft sein kann. Redis ist eine leistungsstarke In-Memory-Datenbank, die schnelle Lese- und Schreiboperationen ermöglicht und sich besonders für Echtzeitanwendungen eignet. Elasticsearch bietet leistungsfähige Such- und Analysefunktionen, die es ermöglichen, große Mengen an Produktions- und Maschinendaten effizient auszuwerten.

Zusätzlich kann das entwickelte KI-Modell als ONNX-Modell (Open Neural Network Exchange) portiert werden, wodurch es als modulares Bauteil in bestehende Softwarelösungen integriert werden kann. Dies erleichtert die Anbindung an bestehende Systeme und erlaubt es KMU, das Modell flexibel in ihre Planungssoftware einzubinden, ohne tiefgreifende Änderungen an der bestehenden IT-Infrastruktur vornehmen zu müssen. Die Auswahl der richtigen Datenquellen und Datenbanken ist ein zentraler Erfolgsfaktor für KMU, um KI-gestützte Planungsalgorithmen optimal zu nutzen. Durch eine gezielte Datenstrategie, die Nutzung leistungsfähiger Speichertechnologien und die Möglichkeit, das Modell als ONNX-Modul in bestehende Systeme einzubinden, können Unternehmen ihre Produktionsprozesse effizienter gestalten und sich langfristig Wettbewerbsvorteile sichern.

Die Anforderungsanalyse aus Arbeitspaket 1 bildete die Grundlage für die Ausgestaltung des Simulations- und KI-Modells sowie für die Adaption des Referenz- und Informationsmodells an die Bedarfe von AM-Dienstleistern. Die Anforderungen wurden iterativ durch Einzelinterviews, Workshops und Sitzungen mit dem pbA erhoben. Ergänzt wurde die Analyse durch zielgerichtete Literaturrecherchen, deren Ergebnisse gemeinsam mit dem Ausschuss diskutiert und validiert wurden. Im Zuge der Validierung der darauf aufbauenden Arbeitspakete erfolgte eine nachträgliche Bestätigung der zentralen Bestandteile der Anforderungsanalyse. Dazu zählen der Anforderungskatalog, die Definition der Einflussgrößen für die Zielfunktionen sowie die systematische Beschreibung relevanter Störgrößen.

Das auf dem Aachener PPS-Modell basierende Referenzmodell der Auftragsabwicklung für AM-Dienstleister wurde durch eine Kombination aus Expertengesprächen, der Verknüpfung von Erkenntnissen aus den unterschiedlichen Arbeitspaketen sowie mehreren gezielten Literaturrecherchen entwickelt. Als methodische Grundlage diente insbesondere eine an HICKING u. VÖLKELE angelehnte Gap-Analyse zur systematischen Adaption. Sowohl die angewandten Methoden als auch die erzielten (Zwischen-)Ergebnisse wurden in mehreren Sitzungen mit dem projektbegleitenden Ausschuss sowie in fachspezifischen Workshops validiert. Die in das Referenzmodell integrierte Baujobplanung wurde darüber hinaus im Rahmen eines wissenschaftlichen Peer-Review-Verfahrens durch die Fachzeitschrift „ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb“ gesondert begutachtet und veröffentlicht (s. Gaillard et al. 2024).

Das auf dem Referenzmodell aufbauende Informationsmodell wurde in gemeinsamer Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss konzipiert und im Dialog mit AM-Dienstleister und Anwendungssystem-Hersteller angepasst. So konnte eine ganzheitliche Betrachtung der Anforderungen gewährleistet werden. Abweichend von der ursprünglich geplanten Methodik wurde der Referenzprozess in BPMN 2.0 modelliert. Diese Entscheidung wurde gemeinsam mit dem projektbegleitenden Ausschuss getroffen und aufgrund der erhöhten Verständlichkeit und Praxistauglichkeit ausdrücklich begrüßt. Die Kombination aus der BPMN-basierten Prozessmodellierung, der Zuordnung relevanter Anwendungssysteme zu den Prozessschritten sowie der Integration von KI-Anknüpfungspunkten erfüllt die Zielsetzung des Arbeitspakets in vollem Umfang. Die Validierungsgespräche mit dem projektbegleitenden Ausschuss bestätigten die Relevanz eines solchen Referenz-Auftragsabwicklungsprozesses als zentrale Orientierungshilfe für AM-Dienstleister.

Im Austausch mit dem pbA wurde deutlich, dass für die Implementierung der Referenz-Auftragsabwicklung ein praxisnaher und adressatengerechter Leitfaden erforderlich ist. In Orientierung an den vom AM-Dienstleister aufgenommenen Anforderungen wurde der Leitfaden konzipiert. Die Grundlage hierfür bildete eine methodisch fundierte Bewertung mehrerer Vorgehensmodelle, die das Ergebnis einer systematischen Literaturrecherche sind. Die Adaption an den konkreten Anwendungsfall berücksichtigte nicht nur die Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitspakete, sondern auch eine literaturgestützte Charakterisierung von KMU. Diese diente als Orientierungsrahmen für die zielgruppengerechte Ausgestaltung des Leitfadens. Zur Validierung wurde der Leitfaden mehreren Expert*innen vorgelegt und inhaltlich diskutiert. Der Leitfaden ist gezielt auf die Anforderungen kleiner und mittlerer Unternehmen zugeschnitten und ermöglicht die Übertragung der Forschungsergebnisse mit geringem Aufwand, reduzierten Unsicherheiten, überschaubaren Risiken und moderaten Initialkosten. Die Relevanz und Praxistauglichkeit dieser Ausgestaltung wurden durch die Expertengespräche bestätigt.

Fazit AP 6	Die Ergebnisse der Anforderungsanalyse wurden sowohl bei der Erhebung als auch im Verlauf der nachfolgenden Arbeitspakete validiert. Das Simulationsmodell konnte erfolgreich innerhalb der Modellumgebung getestet werden; eine Validierung mit Realdaten steht jedoch aus. Das KI-Modell ist als ONNX-Modul portierbar und von den Expert*innen als einsatzfähig in der Praxis beschrieben. Sowohl Zwischen- als auch Endergebnisse der Arbeitspakete wurden fortlaufend im Projektfortschritt in Einzelinterviews sowie in Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses validiert. Hervorzuheben sind die Validierung und Veröffentlichung der erstellten Baujobplanung nach einem Peer-Review in der Fachzeitschrift ZWF. Informationsmodell und Leitfaden wurden gemeinsam mit dem projektbegleitenden Ausschuss entwickelt, validiert und als anwendungsnah und KMU-gerecht bestätigt.
------------	---

1.7 Arbeitspaket 7: Ergebnistransfer und Projektmanagement

Ziel von **Arbeitspaket 7 „Ergebnistransfer und Projektmanagement“** war ein kontinuierlicher Transfer der Forschungsergebnisse in die Industrie sowie das Sicherstellen der Verfolgung des planmäßigen Projektverlaufs.

Der **Ergebnistransfer** wurde durch regelmäßige Treffen mit dem projektbegleitenden Ausschuss sichergestellt, bei denen die Forschungsergebnisse systematisch mit den Industriepartnern geteilt, diskutiert und validiert wurden. Die Außendarstellung des Projekts wurde von Anfang an durch eine [Online-Präsenz](#)

sichergestellt. Des Weiteren wurde das Forschungsvorhaben auf der Messe FormNext 2022 vorgestellt, um dort das Forschungsvorhaben mit verschiedenen IT-Anwendern und Anbietern zu kommunizieren und in den fachlichen Austausch zu treten. Im Rahmen des Projekts wurden die Forschungsergebnisse in verschiedenen wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht. In der Ausgabe 03/22 der „UdZ – The Data-driven Enterprise“ erschien der Artikel [„Intelligente Produktionsplanung und -steuerung für das Laser-Beam-Melting“](#) (s. Gaillard u. Esser 2022). Ein Hauptbestandteil der Forschungsergebnisse bezüglich der entworfenen Auftragsabwicklung, die Baujobplanung, wurde in einem wissenschaftlichen Peer-Review-Verfahren durch die „ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb“ bestätigt und daraufhin unter dem Titel [„Optimierung der Produktionsplanung und -steuerung für metallische additive Fertigung“](#) veröffentlicht (s. Gaillard et al. 2024). Im Rahmen des Arbeitspakets 5 wurde [ein Leitfaden](#) für die Implementierung der in dem Projekt entworfenen Auftragsabwicklung für AM-Dienstleister erstellt und veröffentlicht. Besonders der Leitfaden ist an die Anwender der Forschungsergebnisse gerichtet, womit die Übertragung der Erkenntnisse in die industriellen Unternehmen zielgruppenfokussiert gegeben ist. Der [Quellcode des KI-Modells](#) wurde auch veröffentlicht.

Über das parallel zum Projekt laufende **Projektmanagement** wurden die Kontrolle und Steuerung des Projektfortschritts sichergestellt. Zur detaillierten Abstimmung der Arbeitspakete fand ein zweitägiger Workshop am IAPT in Hamburg statt, in dem das weitere Vorgehen strukturiert geplant wurde. Regelmäßige Abstimmungen mit dem projektbegleitenden Ausschuss stellten sicher, dass das Forschungsvorhaben zielgerichtet ausgerichtet ist und der Projekterfolg gewährleistet wurde. Neben gemeinsamen Treffen mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurden zusätzlich einzelne Workshops mit den Expert*innen der AM-Dienstleister von APWORKS GmbH, GKN Powder Metallurgy GmbH und LIGHTWAY GmbH abgehalten, um auf deren individuellen Input gesondert einzugehen und somit die praxisorientierte Ausrichtung des Forschungsprojekts sicherzustellen. Zur Absicherung der in dem Projekt erzielten Zwischenergebnisse wurden zudem einzelne Interviews mit verschiedenen Expert*innen des projektbegleitenden Ausschusses zusätzlich zu den gemeinsamen Treffen des projektbegleitenden Ausschusses abgehalten. Der Fortschritt des Projekts wurde durch regelmäßige Jour-fixe-Webmeetings zwischen FIR und IAPT überwacht. Zudem wurden alle Ergebnisse kontinuierlich zwischen den Forschungseinrichtungen ausgetauscht und systematisch dokumentiert, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Um die Ziele des Projekts erfolgreich zu bearbeiten, war eine Verlängerung der Projektlaufzeit um 6 Monate erforderlich. Gründe der Verlängerung waren unter anderem, dass die hohe Heterogenität der Anwender zu einem deutlich erhöhten Aufwand bei der Erstellung von einheitlichen Ergebnissen führte. Des Weiteren erforderte die Umstellung auf ein Graph-Neural-Network im Reinforcement-Learning eine grundlegende Anpassung der Arbeitspakete, wodurch sich die Umsetzung verzögerte.

Fazit AP 7	Der Ergebnistransfer sowohl an wissenschaftlichen Kolleg*innen als auch an industrielle Partner wurde und wird durch unterschiedliche Veröffentlichungen, die Internetpräsenz und den regelmäßigen Kontakt mit Projektpartnern sichergestellt. Sowohl durch gemeinsame Treffen mit dem projektbegleitenden Ausschuss als auch durch Einzeltreffen und Workshops wurde der Transfer praxisrelevanter Ergebnisse sichergestellt. Das Projektmanagement wurde durch regelmäßig abgestimmte Präsenz- und Online-Treffen der beiden beteiligten Institute im Rahmen eines Jour-fixe sichergestellt. Die Ziele von AP 7 wurden damit erfolgreich erreicht.
------------	--

2 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse – insbesondere für KMU – sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Der wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Nutzen für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) und die beteiligten Forschungseinrichtungen FIR und IAPT ist erheblich. Für KMU ermöglicht die Entwicklung eines KI-gestützten Produktionsplanungsmodells eine effiziente Optimierung ihrer Produktionsprozesse. Dies führt zu verkürzten Durchlaufzeiten und einer erhöhten Maschinenauslastung, wodurch die Effizienz gesteigert wird. Die Integration von Störgrößen und realistischen Fabrikszenarien in das Modell ermöglicht es den Unternehmen, flexibel auf ungeplante Ereignisse zu reagieren und ihre Produktionspläne anzupassen. Durch den Einsatz fortschrittlicher KI-Technologien wie Reinforcement-Learning und Graph Neural Networks stärken KMU ihre Wettbewerbsfähigkeit und können Betriebskosten reduzieren, indem sie Ressourcen effizienter nutzen und Ausfallzeiten minimieren. Dazu können KMU durch den entwickelten AM-spezifischen Auftragsabwicklungsprozess und den Leitfaden eine effizientere Produktionsplanung und -steuerung einrichten. Dies führt unmittelbar zu einer Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit und einer Reduzierung der Produktionskosten.

Für die beteiligten Forschungseinrichtungen bedeuten die Entwicklung neuer Methoden zur Modellierung und Optimierung von Produktionssystemen mittels KI und GNN sowie die Entwicklung eines Referenzauftragsabwicklungsprozesses für AM-Dienstleister einen wichtigen Forschungsvorsprung. Dies stärkt ihre Position in der wissenschaftlichen Gemeinschaft. Die enge Zusammenarbeit mit Industriepartnern ermöglicht es, Forschungsergebnisse direkt in die Praxis umzusetzen, wodurch die Relevanz und der Einfluss der Forschung erhöht werden. Die erzielten Ergebnisse dienen als Grundlage für wissenschaftliche Publikationen und den Ausbau der Expertise der Institute in den Bereichen KI, Produktionssimulation, Produktionsplanung und -steuerung sowie -optimierung. Zudem erweitert die Kooperation mit KMU das Netzwerk der Einrichtungen und vertieft Industriebeziehungen, was zukünftige gemeinsame Projekte und Fördermöglichkeiten fördert.

Zusammenfassend profitieren sowohl KMU als auch die Forschungseinrichtungen von der entwickelten KI-gestützten Produktionssimulation, indem sie technologische Fortschritte nutzen, wirtschaftliche Vorteile erzielen und wertvolle wissenschaftliche Erkenntnisse gewinnen.

3 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Der Wissenstransfer der aus dem Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse in die Wirtschaft wurde sowohl projektbegleitend als auch abschließend durchgeführt.

Durch regelmäßigen Austausch in digitalen Konferenzen mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses wurde der Transfer von wissenschaftlichen Erkenntnissen sichergestellt. Im Rahmen der Treffen wurden verschiedenste Programme zur digitalen Kollaboration angewandt, was den regen Austausch in den Projekttreffen und die Diskussion der Forschungsergebnisse unterstützte. Des Weiteren wurde durch die digitalen Projekttreffen sichergestellt, dass stets eine ausreichende Anzahl von Partnern des projektbegleitenden Ausschusses an der Diskussion beteiligt war. Über den Zeitraum des Projekts fanden insgesamt 6 Treffen des projektbegleitenden Ausschusses statt, in denen die neuesten Fortschritte vorgestellt und diskutiert wurden. Dadurch fand eine ständige Bewertung der gewonnenen Forschungserkenntnisse durch die Expert*innen des projektbegleitenden Ausschusses statt. Somit entstand ein iteratives Vorgehen, in dem die adressatengerechte Beantwortung der sich aus der Wirtschaft ergebenden Fragestellungen durch zielgerichtete Forschung erreicht wurde.

Besonders in der erfolgten Validierungsphase wurde eine Beurteilung der entstandenen Forschungsergebnisse durch den projektbegleitenden Ausschuss vorgenommen. Dabei wurde von den produzierenden Unternehmen abermals auf die Wichtigkeit des Themas hingewiesen und herausgestellt, dass die durch das Projekt erreichten Ergebnisse die Bedürfnisse der Unternehmen adressieren.

Zusätzlich wurde im September 2024 durch eine Veröffentlichung in der Fachzeitschrift *ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* das Projekt einem breiten wissenschaftlichen sowie industriellen Publikum bekannt gemacht. Durch den vorgelagerten Review-Prozess des Herausgebers wurde die Präsentation der Ergebnisse bewertet und somit die Qualität des Ergebnistransfers sichergestellt. Außerdem erfolgte auf der Fachmesse für 3D-Druck *Formnext 2022* ein gezielter Austausch mit Softwareanbietern für die AM-Produktionsplanung, welcher das Forschungsvorhaben in den Anwenderkreisen bekannt gemacht hat.

4 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Eine genaue Übersicht der durchgeführten Transfermaßnahmen ist in Tabelle 6-1 dargestellt.

Tabelle 6-1: Durchgeführte und geplante Transfermaßnahmen

Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit			
Maßnahme	Ziel	Beschreibung Maßnahmen zum Ergebnistransfer	Datum/ Zeitraum
Treffen mit dem pbA	Absicherung der Praxis-tauglichkeit der Ergebnisse	Kick-off-Meeting	23.06.2022
		pbA-Treffen	20.03.2023
		pbA-Treffen	28.09.2023
		pbA-Treffen	03.07.2024
		pbA-Treffen	30.08.2024
		Abschlussveranstaltung	14.10.2024
Publikation der Projektergebnisse im Internet	Verbreitung der Zwischenergebnisse an Fachpublikum (branchenübergreifend)	Alle FIR-Veröffentlichungen zum Projekt erschienen in Echtzeit im Netz, teils (möglichst oft) mit Volltextzugriff (open Access), und über unser Publikationsportal langzeitarchiviert/zitierfähig, maschinenlesbar und RSS-Feed-abofähig: https://epub.fir.de/solrsearch/index/search/searchtype/collection/id/16389	seit Mai 2022
Erstellung einer Projekt-Website für den deutschsprachigen Raum	Publikationen von Informationen über den Projektverlauf und öffentlicher Zugang an Projektinformationen	Einbindung in die Internetpräsenzen FIR – Projekt-Homepage mit Projektbeschreibung, -zielen, -nutzen und -konsortium: https://www.fir.rwth-aachen.de/forschung/forschungsprojekte/detail/ippslabem-22460-n/	seit Mai 2022
Verteilung von Informationen über den FIR-Newsletter an interessierte Unternehmen	Publikationen von Informationen über den Projektverlauf und öffentlicher Zugang an Projektinformationen	E-Mail-Newsletter	FIR-Flash 01.05.2022

Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit			
Maßnahme	Ziel	Beschreibung Maßnahmen zum Ergebnistransfer	Datum/ Zeitraum
Präsentation auf Fachtagungen, Messen	Wissenstransfer durch Vorträge auf Fachtagungen, Messen	Formnext Frankfurt: Marktanalyse der Softwareanbieter für die AM-Produktionsplanung. Gezielter Austausch mit Softwareanbietern und Sichtung der jeweiligen Demosoftware mit Analyse der angegebenen Leistungen.	15.11.2022 – 18.11.2022
Wissenschaftliche Publikationen	Verbreitung detaillierter Ergebnisse an die nationale/internationale Fachwelt	UdZ – The Data-driven Enterprise: IPPSLaBeM: Intelligente Produktionsplanung und -steuerung für das Laser-Beam-Melting (https://epub.fir.de/frontdoor/index/index/docId/1785)	24.11.2022
		ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb: Optimierung der Produktionsplanung und -steuerung für metallische additive Fertigung. DOI: 10.1515/zwf-2024-1110 .	07.09.2024
Leitfaden	Aufbereitete Gestaltungsempfehlungen für die PPS in der AM	Veröffentlichter Leitfaden: Auftragsabwicklung in der additiven Fertigung neu gedacht: Leitfaden für die Implementierung eines Auftragsabwicklungsprozesses in KMU der additiven Fertigung DOI: 10.60571/3836	30.04.2025
Transferworkshops	Individuelle Workshops mit den Unternehmen zur Gestaltung der PPS in der AM	Individuell, jeweils 4-stündige Workshops mit Unternehmen	09.01.2023 GKN 02.02.2023 Light-Way
Erstellung von wissenschaftlichen Arbeiten	Nationaler und internationaler Ergebnistransfer	Masterarbeit: Categorizing Disturbances in Production Planning and Control in Additive Manufacturing	November 2024
		Masterarbeit:	April 2025

Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit			
Maßnahme	Ziel	Beschreibung Maßnahmen zum Ergebnistransfer	Datum/ Zeitraum
		Entwicklung eines Leitfadens für die Implementierung einer spezifischen Auftragsabwicklung für Auftragsfertiger der additiven Fertigung	
Konferenzvorstellung	Nationaler und internationaler Ergebnistransfer	Vorstellung im Rahmen DDMC Berlin 2025 ohne FIR-Veröffentlichung (IAPT)	März 2025
Expliziter Transfer an KMU	Einbindung in Mittelstand 4.0- Kompetenzzentrum Chemnitz	Vorstellung der Ergebnisse	geplant Q2 2025

5 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Zusätzlich zu den durchgeführten Transfermaßnahmen sind noch einige Transfermaßnahmen im Anschluss an das Forschungsprojekt geplant.

Tabelle 7-1: Geplante Transfermaßnahmen nach Projektabschluss

Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit		
Ziel	Geplante Maßnahmen	Rahmen
Präsentation der Projektergebnisse	Bekanntmachung der Projektergebnisse	Vorstellung im Rahmen der Congress on Business Applications
Integration der Ergebnisse in Fortbildungsangebote	Verbreitung der Ergebnisse Fachpublikum	Integration der Erkenntnisse in RWTH-Zertifikationskurse des CIBA
Weitergabe Forschungsergebnisse	Verbreitung detaillierter Ergebnisse in die Wirtschaft	Veröffentlichung des Leitfadens und des Codes über Github.fir sowie dauerhafte Übersicht über alle Projektergebnisse und Veröffentlichungen über die Projektsammlung auf der Publikationsplattform des FIR (https://epub.fir.de/solrsearch/index/search/searchtype/collection/id/16389)

6 Literaturverzeichnis

- Bernardo, Ronaldo; Galina, Simone Vasconcelos Ribeiro; Pádua, Silvia Inês Dallavalle de (2017): The BPM lifecycle. In: *BPMJ* 23 (1), S. 155–175. DOI: 10.1108/BPMJ-12-2015-0175.
- Dumas, Marlon; La Rosa, Marcello; Mendling, Jan; Reijers, Hajo A. (2021): Grundlagen des Geschäftsprozessmanagements. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Fisher, H. and Thompson, G.L. (1963): Probabilistic Learning Combinations of Local Job-Shop Scheduling Rules. In: *Industrial Scheduling*, S. 225–251.
- Gaillard, Antoine; Esser, Christoph (2022): IPPSLaBeM. Intelligente Produktionsplanung und -steuerung für das Laser-Beam-Melting. In: *UdZ*.
- Gaillard, Antoine; Rößler, Sebastian; Helmholz, Johannes; Junglas, Sebastian; Boos, Wolfgang (2024): Optimierung der Produktionsplanung und -steuerung für metallische additive Fertigung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 119 (9), S. 608–614. DOI: 10.1515/zwf-2024-1110.
- Hallerbach, Alena; Bauer, Thomas; Reichert, Manfred: Managing Process Variants in the Process Life Cycle. In: [Proceedings] 10th Int'l Conf. on Enterprise Information Systems (ICEIS'08), June 2008, Barcelona, Spain. <https://dbis.eprints.uni-ulm.de/id/eprint/193/> (Link zuletzt geprüft: 17.04.2025)
- Hicking, Jan; Völkel, Anne (2022): Anforderungsmanagement. In: Günther Schuh, Violett Zeller und Volker Stich (Hg.): Digitalisierungs- und Informationsmanagement. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 249–296.
- Houy, Constantin; Fettke, Peter; Loos, Peter (2010): Empirical research in business process management – analysis of an emerging field of research. In: *Business Process Management Journal* 16 (4), S. 619–661. DOI: 10.1108/14637151011065946.
- Koutsouras, G.; Tsakalidis, G.; Vergidis, K.: Towards a comprehensive design of BPM lifecycle: The notion of core cyclesteps (CSS).
- Macedo de Moraes, Rinaldo; Kazan, Samir; Inês Dallavalle de Pádua, Silvia; Lucirton Costa, André (2014): An analysis of BPM lifecycles: from a literature review to a framework proposal. In: *Business Process Management Journal* 20 (3), S. 412–432. DOI: 10.1108/BPMJ-03-2013-0035.
- Meurer, Aaron; Smith, Christopher P.; Paprocki, Mateusz; Čertík, Ondřej; Kirpichev, Sergey B.; Rocklin, Matthew et al. (2017): SymPy: symbolic computing in Python. In: *PeerJ Computer Science* 3, e103. DOI: 10.7717/peerj-cs.103.
- Monaci, Marta; Agasucci, Valerio; Grani, Giorgio (2024): An actor-critic algorithm with policy gradients to solve the job shop scheduling problem using deep double recurrent agents. In: *European Journal of Operational Research* 312 (3), S. 910–926. DOI: 10.1016/j.ejor.2023.07.037.
- Netjes, Mariska; Reijers, Hajo A.; van der Aalst, Wil M.P.: Supporting the BPM life-cycle with File-Net.

Schuh, Günther; Schmidt, Carsten; Helmig, Jan (2012): Prozesse. In: Schuh, Günther; Stich, Volker (Hg.) (2012): Produktionsplanung und -steuerung; Bd. 1: Grundlagen der PPS. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://www.springer.com/de/book/978-3-642-25422-2>.

Schuh, Günther; Stich, Volker; Hering, Niklas; Meißner, Jan; Reschke, Jan; Kropp, Sebastian; Maasem, Christian et al.: Produktion am Standort Deutschland. Ergebnisse der Untersuchung 2013. FIR e. V. an der RWTH Aachen, Aachen 2013. <https://epub.fir.de/frontdoor/index/index/docId/2736> (Link zuletzt geprüft: 17.04.2025)

Schulte, Stefan; Janiesch, Christian; Venugopal, Srikumar; Weber, Ingo; Hoenisch, Philipp (2015): Elastic Business Process Management: State of the art and open challenges for BPM in the cloud. In: *Future Generation Computer Systems* 46, S. 36–50. DOI: 10.1016/j.future.2014.09.005.

Serrat, Olivier (2016): The Five Whys Technique. In: Olivier Serrat (Hg.): Knowledge Solutions. Singapore: Springer Singapore, S. 307–310.

Towers, Mark; Kwiatkowski, Ariel; Terry, Jordan; Balis, John U.; Cola, Gianluca De; Deleu, Tristan et al. (2024): Gymnasium: A Standard Interface for Reinforcement Learning Environments. Online verfügbar unter <http://arxiv.org/pdf/2407.17032v3>.

VDI/VDE 3682 Blatt 1:2015-05, Mai 2015: Formalisierte Prozessbeschreibungen. Online verfügbar unter <https://www.dinmedia.de/en/technical-rule/vdi-vde-3682-blatt-1/230173798>, zuletzt geprüft am 25.04.2025.

Weske, Mathias (2024): Business process management. Concepts, languages, architectures. Fourth edition. Berlin, Heidelberg: Springer.

Wil M.P. van der Aalst: Business Process Management: A Comprehensive Survey.

Zhang, Jianming; Yao, Xifan; Liu, Min; Wang, Yan (2019): A Bayesian Discrete Optimization Algorithm for Permutation Based Combinatorial Problems. In: *2019 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, S. 874–881. DOI: 10.1109/SSCI44817.2019.9002675.

zur Muehlen, Michael; Ho, Danny Ting-Yi (2006): Risk Management in the BPM Lifecycle. In: David Hutchison, Takeo Kanade, Josef Kittler, Jon M. Kleinberg, Friedemann Mattern, John C. Mitchell et al. (Hg.): Business Process Management Workshops, Bd. 3812. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Lecture Notes in Computer Science), S. 454–466. DOI: 10.1007/11678564_42.

7 Anhang

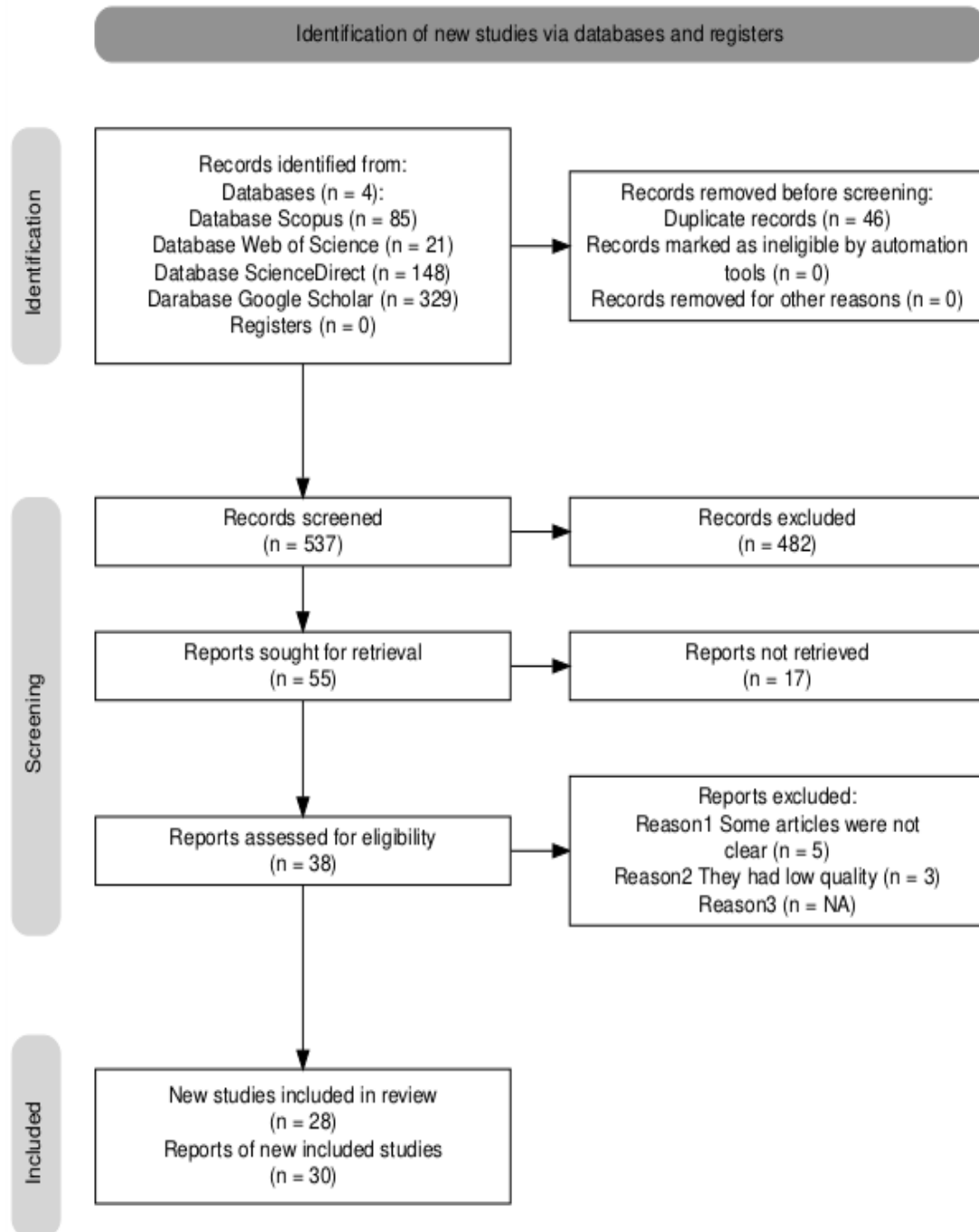


Abbildung 9-1: Ergebnisse der Literaturrecherche zur Beschreibung der Störgrößen des AM-Prozesses (eigene Darstellung)

Tabelle 9-1: Kategorisierung der Störgrößen Teil 1

	Störung	Art des Auftretens		Ursprung der Störung	
		Kategorie	Begründung	Kategorie	Begründung
1	Abweichung der Abkühlzeit	unvorhersehbar	Tritt auf, obwohl die Abkühlzeit anhand einer Schätzung eingeplant und kalkuliert wird	intern	Entsteht im Produktionssystem
2	Maschinenausfall	unvorhersehbar	Tritt unerwartet aufgrund der geringen Prozessstabilität häufig auf.	intern	Entsteht im Produktionssystem
3	Stützkonzept	unvorhersehbar	Es handelt sich um eine nicht korrekte Auslegung des Stützkonzepts, die nicht einplanbar ist.	intern	Entsteht im Produktionssystem
4	Beschichter	unvorhersehbar	Eine fehlerhafte Einstellung des Beschichters kann nicht immer im Voraus erkannt werden.	intern	Entsteht im Produktionssystem
5	Eigenspannungen	unvorhersehbar	Ungleichmäßiges Materialverhalten ist nur beschränkt vorhersehbar, da es von vielen Faktoren abhängt.	intern	Entsteht im Produktionssystem
6	Abweichung der Nachbearbeitungszeit	unvorhersehbar	Es können Fehler oder Probleme auftreten, die trotz der eingeplanten Nachbearbeitungszeit nicht vorhersehbar sind und die Bearbeitungszeit beeinflussen.	intern	Entsteht im Produktionssystem
7	Anisotropie	unvorhersehbar	Es handelt sich um eine nicht korrekte Ausrichtung des Bauteils, die nicht einplanbar ist.	intern	Entsteht im Produktionssystem
8	Stufenbildung	vorhersehbar	Tritt bei schräg zu fertigenden Flächen auf und wird durch Nachbearbeitung korrigiert.	intern	Entsteht im Produktionssystem
9	Fehlerhafte Pulvercharge	unvorhersehbar	Der Fehler liegt beim Lieferanten.	extern	Entsteht aus der Umgebung des Produktionssystems (Abweichungen des Lieferanten)

Tabelle 9-2: Kategorisierung der Störgrößen Teil 2

	Störung	Art der betroffenen Entitäten		Art der Auswirkungen	
		Kategorie	Begründung	Kategorie	Begründung
1	Abweichung der Abkühlzeit	Vorgänge oder Arbeitsauftrag	Abweichung der Bearbeitungszeiten	Nichtverfügbarkeit	Führt zu Stillständen in der Produktion.
2	Maschinenausfall	Ressourcen	Der Ausfall der Maschine beeinflusst direkt die Produktion.	Nichtverfügbarkeit	Führt zu Stillständen in der Produktion.
3	Stützkonzent	Produktion	Es betrifft direkt die Bauteilqualität und beeinflusst somit den Output des Produktionsprozesses	Nichtverfügbarkeit / Verschlechterung	Mindert die Qualität des Bauteils und kann zu einem Stillstand führen.
4	Beschichter	Ressourcen	Es betrifft direkt die Bauteilqualität und beeinflusst somit den Output des Produktionsprozesses	Verschlechterung	Mindert die Qualität des Bauteils.
5	Eigenspannungen	Produktion	Es betrifft direkt die Bauteilqualität und beeinflusst somit den Output des Produktionsprozesses	Nichtverfügbarkeit / Verschlechterung	Mindert die Qualität des Bauteils und kann zu einem Stillstand führen.
6	Abweichung der Nachbearbeitungszeit	Vorgänge oder Arbeitsauftrag	Abweichung der Bearbeitungszeiten	Nichtverfügbarkeit	Führt zu Stillständen in der Produktion.
7	Anisotropie	Produktion	Es betrifft direkt die Bauteilqualität und beeinflusst somit den Output des Produktionsprozesses	Verschlechterung	Mindert die Qualität des Bauteils.
8	Stufenbildung	Produktion	Es betrifft direkt die Bauteilqualität und beeinflusst somit den Output des Produktionsprozesses	Verschlechterung	Mindert die Qualität des Bauteils.
9	Fehlerhafte Pulvercharge	Ressourcen	Die Abweichung der Eigenschaften des Rohstoffs beeinflusst direkt die Produktion.	Verschlechterung	Mindert die Qualität des Bauteils.

Tabelle 9-3: Kategorisierung der Störgrößen Teil 3

	Störung	Ursachen der Störung	
		Kategorie	Begründung
1	Abweichung der Abkühlzeit	Externe Faktoren	Wird durch Umwelteinflüsse (z. B. Temperaturänderungen) verursacht.
2	Maschinenausfall	Versagen von Komponenten	Fehler in einer mechanischen Komponente des Systems, der die Betriebsstabilität beeinträchtigt.
3	Stützkonzept	Menschlicher Fehler	Fehlerhafte Auslegung
4	Beschichter	Menschlicher Fehler	Fehler bei der Einstellung des Beschichters
5	Eigenspannungen	Versagen von Komponenten	Kein reiner Komponentenfehler, sondern eine durch den Fertigungsprozess induzierte Störung.
6	Abweichung der Nachbearbeitungszeit	Menschlicher Fehler / Versagen von Komponenten	Fehlerhafte Nachbearbeitung oder Fehlfunktionen der Maschinen/Werkzeuge während der Nachbearbeitung
7	Anisotropie	Menschlicher Fehler	Fehler in der Ausrichtung des Bauteils
8	Stufenbildung	Versagen von Komponenten	Je nach Laserdurchmesser kann nur eine begrenzte Oberflächengüte erzielt werden
9	Fehlerhafte Pulvercharge	Externe Faktoren	Die gelieferte Charge entspricht nicht den spezifizierten Anforderungen.

FRAGENKATALOG

Allgemeines:	Wie groß ist der AM-Bereich?
	Wie viele Mitarbeitenden sind im AM-Prozess eingebunden?
	Welche Fertigungstyp und -art strebt das Unternehmen an?
	Wie hoch ist das Auftragsvolumen?
	Welche Ziele werden derzeit verfolgt (Minimierung Durchlaufzeit, Maximierung Anlagenauslastung, Kapazitätsabdeckung, etc.)?
	Welche Anlagen werden mit welcher Auslastung und für welche Art von Aufträgen eingesetzt? (Anlagenbereitstellung für AM-Fertigung und -Nachbearbeitung)
	Was sind die am häufigsten auftretenden Probleme (Abbrüche Baujob, Ausfall Anlage, Kapazität)?
	Nutzen Sie bereits eine Software zur Produktionsplanung?
	Werden derzeit Daten erhoben?
Prozessablauf:	Welche Systeme werden zur Verwaltung von Kundenanfragen und -aufträgen verwendet?
	Wie und mit welcher Software werden Aufträge geplant – gibt es Restriktionen?
	Wie werden Aufträge an die Anlagen übergeben?
	Wie sieht der Auftragsfreigabeprozess aus?
	Wie werden die Baujobs (unterschiedliche Bauteile) zusammengestellt?
	Wie haben Baujobs Einfluss auf die Produktionsplanung?
	Wie werden Nachbearbeitungsaktivitäten geplant und umgesetzt?
	Wie wird mit Prozessabbrüchen umgegangen?
Datenfluss:	Welche Daten werden in der Produktion erhoben (Bewegungsdaten: Auftragsdaten, Auftragsfortschritt, Durchlaufzeiten, Prozesszeiten) und wie werden diese in Systemen überführt?
	Gibt es eine Verknüpfung von Stammdaten mit Bewegungsdaten in ein System (in einer Art MES)?
	Wann werden die Daten erfasst (nach jedem Prozessschritt oder nur Fertigmeldung)?

Abbildung 9-2: Ausschnitt des verwendeten Fragebogens

Tabelle 9-4: Auszug der genannten Anforderungen an ein betriebliches Anwendungssystem aus Expertengesprächen

Bereich	Anforderungen
Produktions- und Kapazitätsplanung	• Dynamische Umplanung bei Störungen • Zusammenfügung und nachträgliches Splitten von Aufträgen für Baujobs • Einplanung von Nachbearbeitungsschritten • Chargenverfolgung • Automatisierte Planung • Priorisierung individueller Baujobs • Berücksichtigung unterschiedlicher Anlagentypen und Materialien • Abstimmung von Maschinenkapazitäten und Personal
Prozessoptimierung und Vorhersage	• Einplanung von Wartungsarbeiten • Einplanung von Materialrüstzeiten • Vorhersage der nötigen Betriebsmittel • Genauere Vorhersage von Prozesszeiten • Automatisiertes Nesting
Informationsmanagement	• Visualisierung des aktuellen Produktionsstatus • Möglichkeiten einer Vor- und Nachkalkulation • Kommunikationsmöglichkeit für interne Absprachen • Automatische Informationsmeldung bei auftretenden Störungen
Anwendungsfreundlichkeit	• Intuitive Bedienung • Schnelle Anlernzeit • Integrationsmöglichkeit in bestehende IT-Landschaft

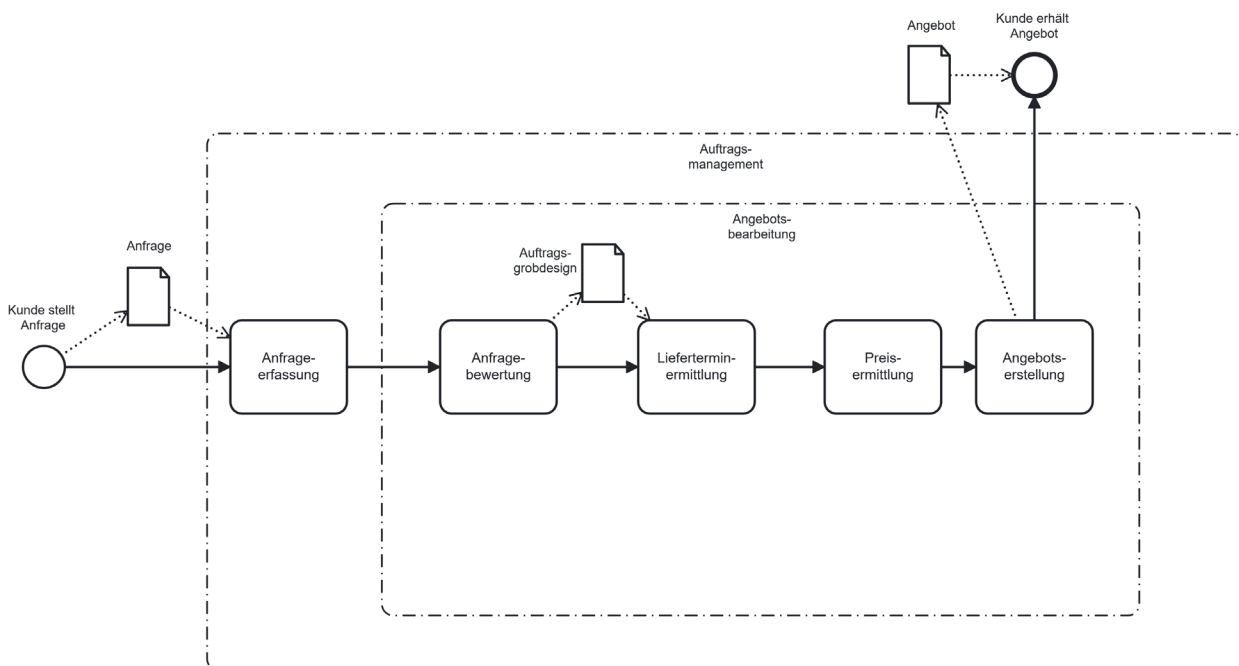


Abbildung 9-3: Angebotsbearbeitung des Referenzprozesses für AM-Auftragsfertiger

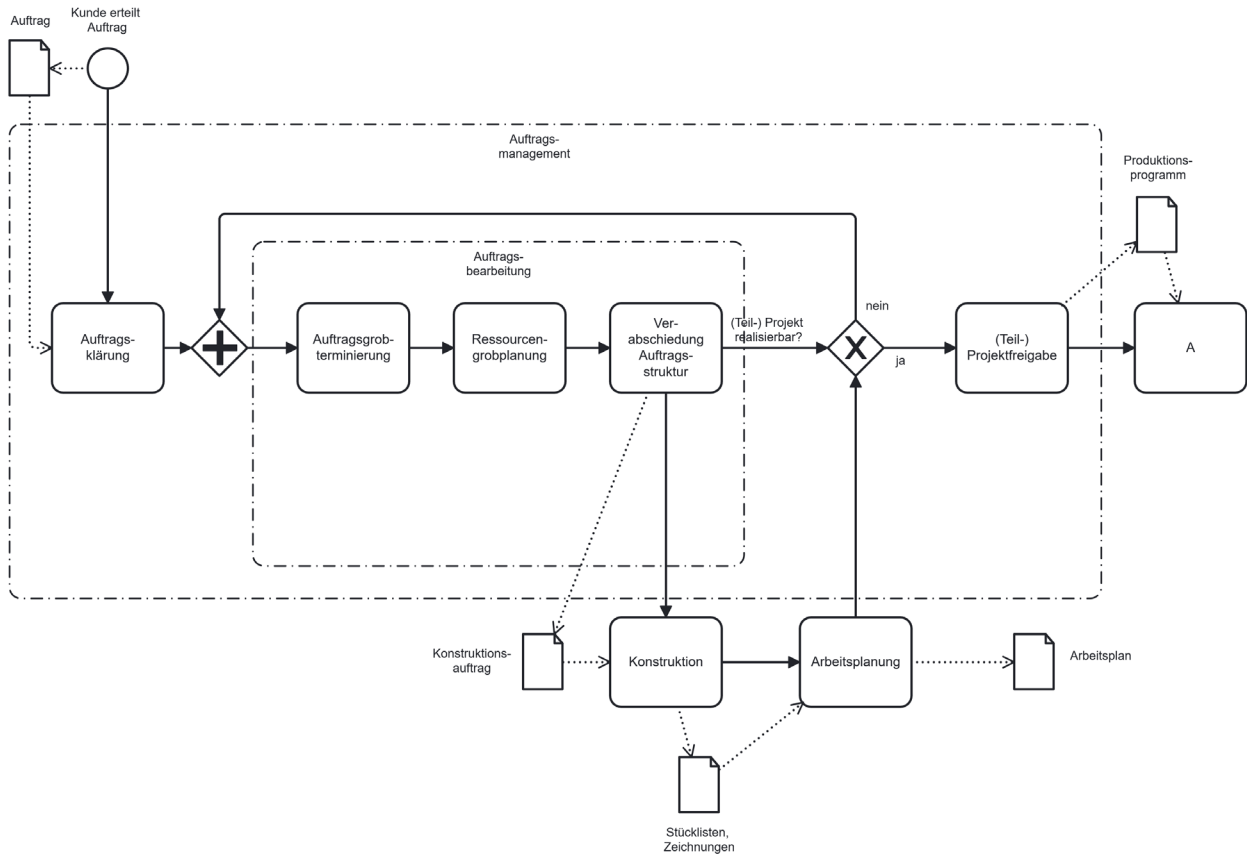


Abbildung 9-4: Auftragsbearbeitung des Referenzprozesses für AM-Auftragsfertiger

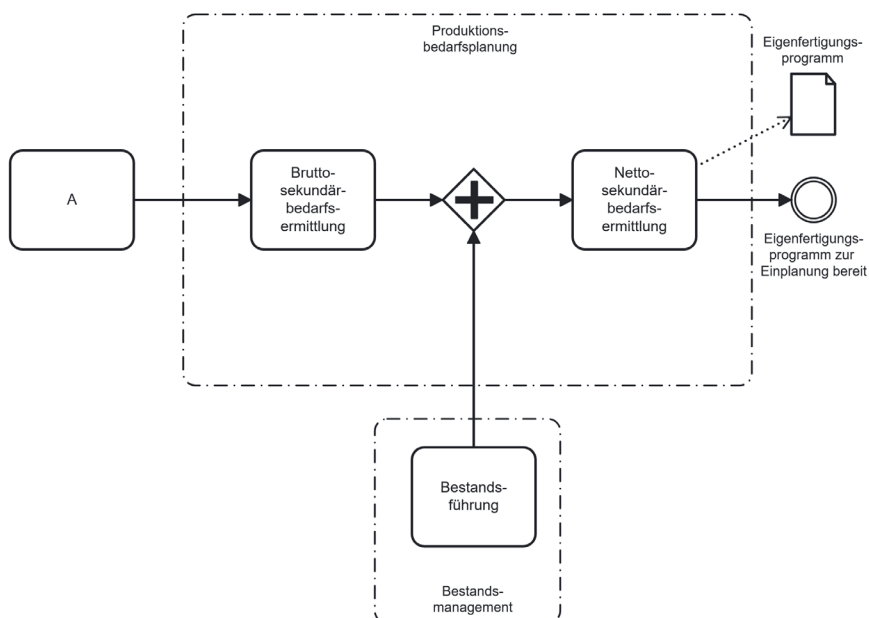


Abbildung 9-5: Produktionsbedarfsplanung des Referenzprozesses für AM-Auftragsfertiger

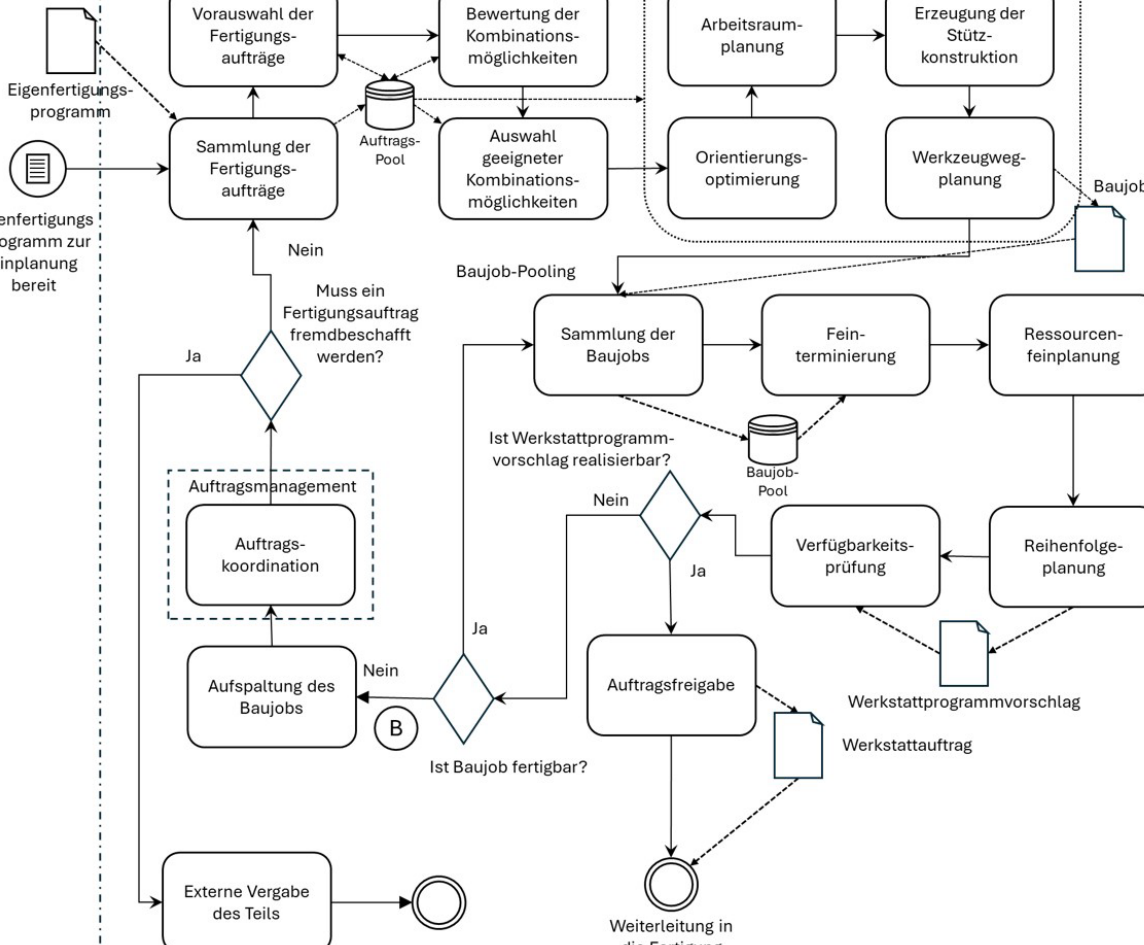


Abbildung 9-6: Eigenfertigungsplanung und -steuerung des Referenzprozesses für AM-Auftragsfertiger

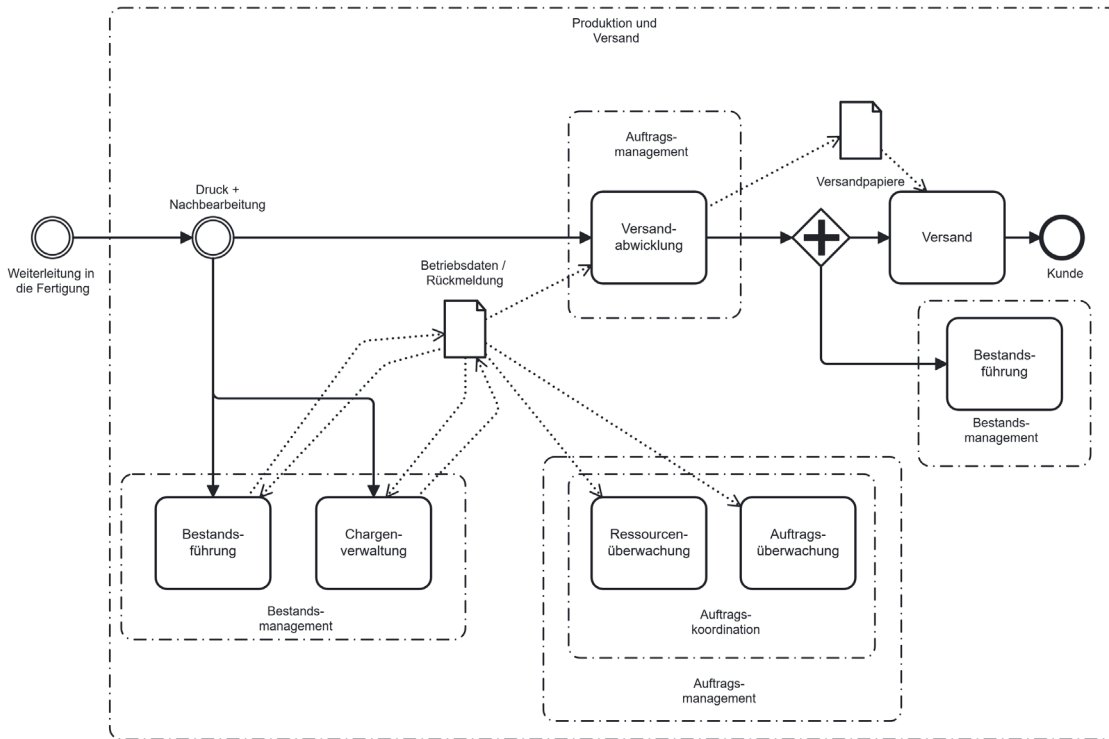


Abbildung 9-7: Produktion und Versand des Referenzprozesses für AM-Auftragsfertiger

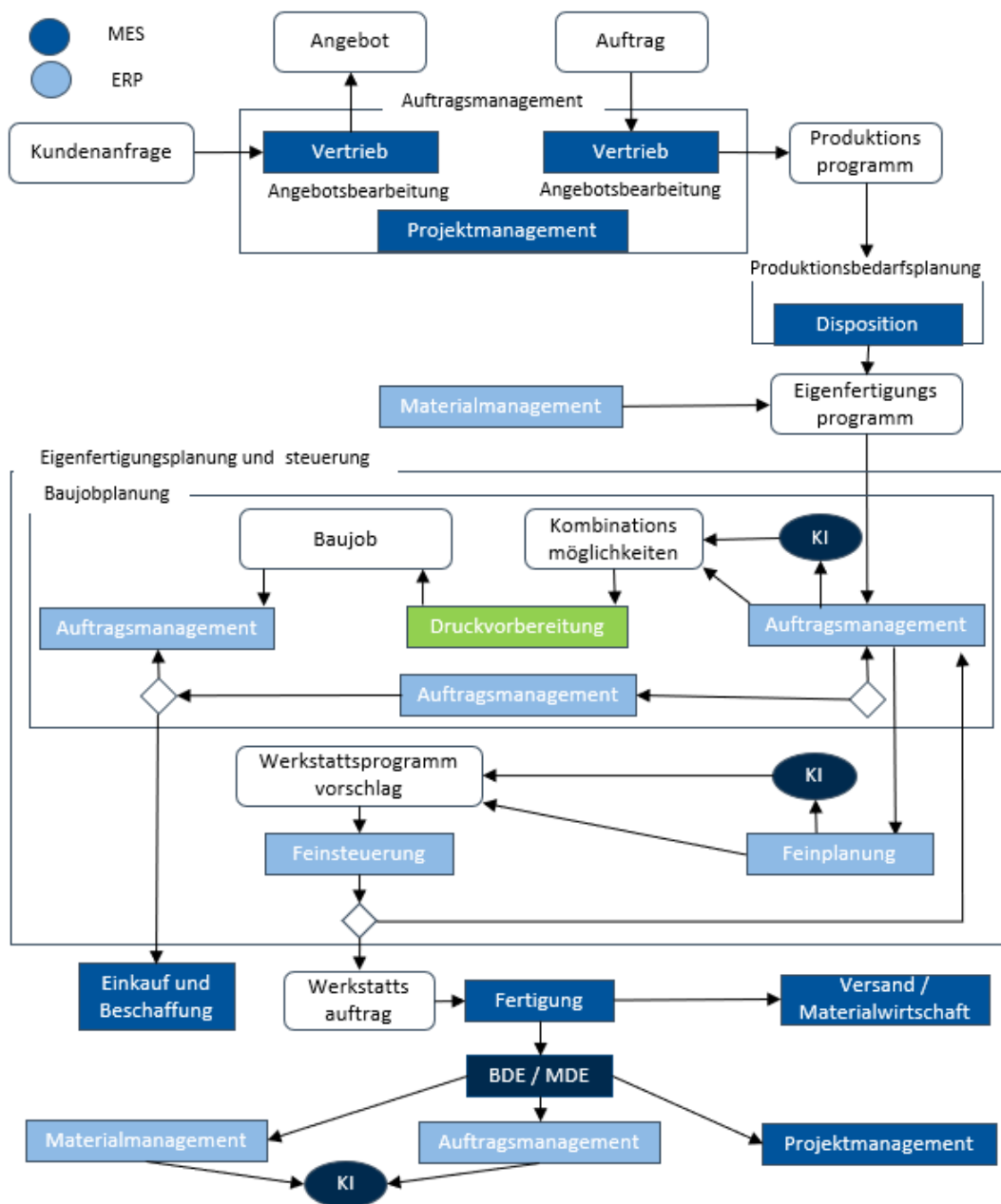


Abbildung 9-8: Konzeptionelles Informationsmodell basierend auf die Zuordnung von IT-Systemen zur Auftragsabwicklung