

Schlussbericht vom 31.05.2024

zu IGF-Vorhaben Nr. 21808 BR

Thema

Erweiterte, flexible Fertigungs- und Logistikplanung auf Grundlage von Volumenpixeln und agiler Transportlastermittlung (FeLoVox)

Berichtszeitraum

01.05.2021 - 31.12.2023

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Intralogistik/Fördertechnik und Logistiksysteme e.V.

Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Dresden

Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme

Professur für Technische Logistik

01062 Dresden

Technische Universität Dresden

Institut für Fertigungstechnik

Professur für Formgebende Fertigungsverfahren

01062 Dresden

Gefördert durch:

Hinweis: Bei der projektausführenden Forschungseinrichtung kam es zwischenzeitlich zu Verzögerungen bei der Besetzung zugehöriger Stelle. Eine kostenneutrale Verlängerung des Forschungsvorhabens wurde beantragt und vom Fördermittelgeber stattgegeben. Der neue Bewilligungszeitraum wurde auf 01.05.2021 bis 31.12.2023 festgelegt.

Beschreibung der Problemstellung

Abbildung 1 veranschaulicht den Verlauf eines konventionellen Produktionsplanungsprozesses. Dieser Prozess basiert auf einem mehrstufigen, linearen Verfahren, dessen Grad der Automatisierung sich als maximal teilautomatisiert charakterisieren lässt. So lassen sich hinreichend genaue Planungsergebnisse nur unter großem Ressourcenaufwand produzieren. Zudem versuchen die einzelnen Teildisziplinen jeweils für sich die beste Lösung zu finden. Mit hoher Wahrscheinlichkeit stellt die Summe der einzelnen, mitunter guten Lösungen aber nicht die für das Gesamtsystem beste Lösung dar.

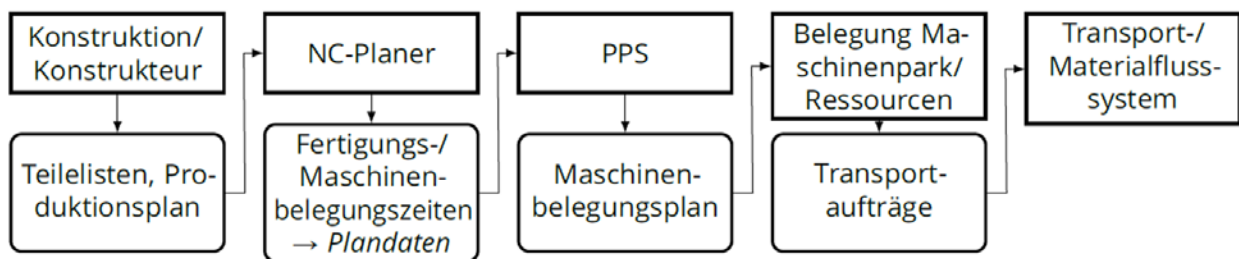


Abbildung 1: Ablauf einer Produktionssystemplanung (in Anlehnung an Dombrowski & Mielke 2015)

Diese Herangehensweise steht im Widerspruch zum Paradigma der wandelbaren Fabrik, in der Flexibilität und Geschwindigkeit als entscheidende Faktoren gelten. Hierbei gewinnt die Bedeutung von Plandaten an Relevanz. In diesem Kontext setzt das Forschungsprojekt FeLoVox an, indem es sich darauf konzentriert, Lösungen zu entwickeln, die den Anforderungen einer wandelbaren Fabrik entsprechen und die gesteigerte Bedeutung von Plandaten in diesem Umfeld adressieren.

Die Kernidee des Projekts ist es, durch eine Automatisierung des Planungsvorgehens schneller zu (besseren) Lösungen für die Problemstellung zu gelangen. Der Ablauf einer herkömmlichen Planung erstreckt sich über mehrere Abteilungen hinweg (siehe Abbildung 1) und benötigt nicht selten mehrere Tage oder Wochen, um valide Lösungen zu finden. Ziel des Projekts war es, Ansätze zu entwickeln, welche ohne menschliches Zutun, in kürzester Zeit, bereits optimierte Lösungen finden. Dabei soll FeLoVox eine erste Umsetzung für einen ganzheitlichen und automatisierten Produktionsplanungsprozess darstellen (vgl. Abbildung 2).

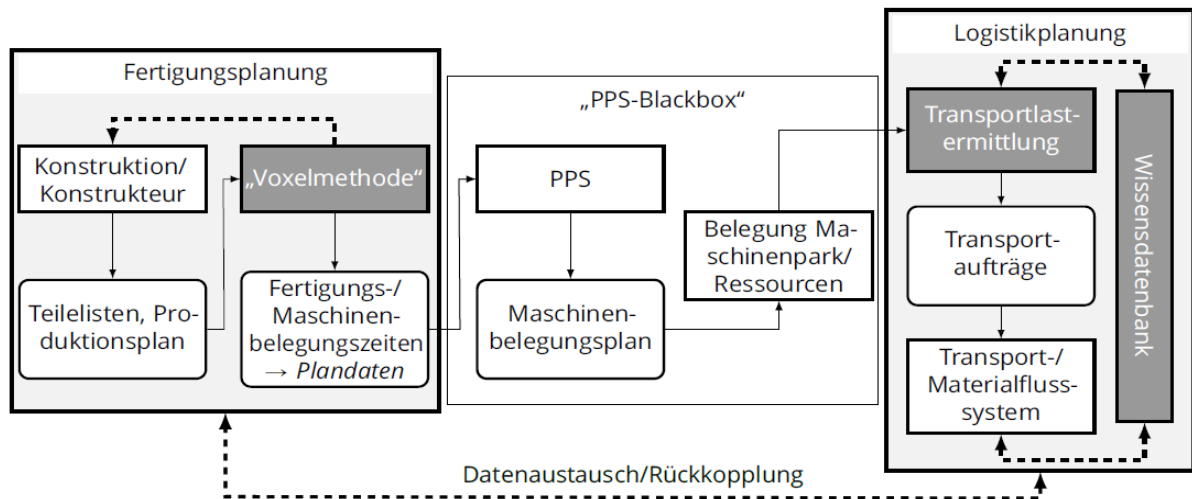


Abbildung 2: Aufbau des angestrebten Planungssystems

Das F&E-Projekt lässt sich in drei Teilmodule strukturieren. Auf der linken Seite der Abbildung 2 ist das Fabrikplanungsmodul dargestellt. Am Anfang des Prozesses steht der Konstrukteur. Dieser ist für die Gestaltung von Fertigungsteilen zuständig. Die Ergebnisse seiner Arbeit umfassen zu produzierende Teile sowie dazugehörige Stücklisten. Traditionell würde nun eine aufwendige manuelle Fertigungsplanung erfolgen, die jedoch durch die Anwendung der Voxelmethode an dieser Stelle automatisiert wird. Die Voxelmethode generiert Fertigungsplandaten automatisch, welche anschließend dem Produktionsplanungs- und Steuerungssystem (PPS) übermittelt werden. Die PPS erstellt einen Maschinenbelegungsplan. In der Logistikplanung erfolgt daraufhin automatisch die Erstellung eines Maschinenlayouts für die Fabrik sowie die Analyse der auftretenden Materialflüsse. Basierend auf diesen Analysen wird ein adäquates Transportsystem ausgelegt. Das Forschungsprojekt verfolgt die Idee, die verschiedenen Teilmodule miteinander zu verknüpfen, also eine Kommunikation und den Austausch relevanter Daten zu ermöglichen. Ziel ist es, eine global optimale Lösung zu erarbeiten, anstatt dass jedes Modul individuell versucht, die bestmögliche Lösung zu finden. Die Funktionsweise und die Umsetzung der einzelnen Module, einschließlich der entstandenen Wissensdatenbank, wird im Folgenden dargelegt.

Kurzfassung der Ergebnisse und Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten und des Ergebnisses mit den Zielen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde aufgezeigt, dass eine holistische, abgestimmte Planung von Fertigung, Produktion und notwendiger (Intra-)Logistik nicht nur theoretisch zu höherer Effizienz führt, sondern unter praktischen Gesichtspunkten auch möglich ist.

Basis der Forschung und Entwicklung bildeten hierbei die Anwendung und Weiterentwicklung der „Voxelmethode“, der Aufbau einer geeigneten Simulationsumgebung zur Abbildung relevanter (Planungs-)Prozesse für Fertigung, Produktion und Logistik sowie der Aufbau einer Wissensdatenbank zur Aus- und Verwertung von Simulationsergebnissen. Im Kern, vereinfacht, wurde eine große Bandbreite verschiedener, realitätsnaher Fertigungsszenarien erstellt, Szenarien-spezifisch optimale Lösungen für das Logistiksystem berechnet und diese in einem geeigneten Datenmodell gespeichert. Mit steigendem Umfang der Experimente bzw. Ergebnisse wurde es möglich, tendenziell „ungünstige“ Lösungen für das Logistiksystem (bspw., weil der Schwellwert zur Notwendigkeit eines weiteren Transportfahrzeuges zur Abwicklung des Materialflusses überschritten wurde) an die Fertigungsplanung rückzukoppeln und Freiheitsgrade bei der Fertigungsplanung (bspw. die Anpassung von Arbeitsgangfolgen) auszunutzen, sodass „bessere“ (bspw. weniger benötigte Transportfahrzeuge oder kürzere Förderstrecken auf Stetigförderern) Lösungen für das Logistiksystem möglich wurden.

Mit der Etablierung der Rückkopplung wurde eine abgestimmte Planung im Sinne eines Regelkreises möglich. Dabei war bei den untersuchten Szenarien regelmäßig zu beobachten, dass bereits kleine, vermeintlich unbedeutende Änderungen zu besseren Lösungen führen. Mit steigender Experimentanzahl war es abschließend möglich, Muster oder Konstellationen in der Fertigungsplanung zu identifizieren, die tendenziell zu unnötig ineffizienten Logistiksystemen führen. Damit ist es im Sinne der Planung möglich,

- das Systemverhalten/die notwendige Systemausgestaltung ohne aufwendige Simulation hinreichend genau vorherzusagen und/oder
- bereits frühzeitig in der Fertigungsplanung die Belange der Logistikplanung zu beachten und im Sinne eines Gesamtoptimums eine Logistik-abgestimmte Ausgestaltung anzustreben.

Von Bedeutung für das F&E-Vorhaben und zum Nachweis der Vorteilhaftigkeit einer abgestimmten Fertigungs- und Logistikplanung waren vor allem die Wissensdatenbank und damit einhergehend das aufgebaute Datenmodell sowie die Weiterentwicklung der Voxelmethode.

Die Wissensdatenbank hat die strukturierte Auswertung, d. h. insbesondere die erwähnte Mustererkennung ermöglicht. Hierbei hat sich gezeigt, dass sowohl klassische Verfahren der Datenanalyse (bspw. Regressionsmodelle) als auch Verfahren des Maschinellen Lernens gleichermaßen verwertbare Ergebnisse liefern.

Die erweiterte Voxelmethode hat eine Gesamtplanung überhaupt erst ermöglicht. Bis dato ist/war die automatische Berechnung fertigungskonformer, ggf. optimaler Produktionspläne aufwendig und damit rechen- bzw. zeitintensiv. Die Voxelmethode ist Grundlage zur Vereinfachung des Vorgangs, d. h. sie erlaubt die erheblich schnellere Generierung von Plänen (Plandaten), sodass insgesamt eine hohe Anzahl von Experimenten bzw. unterschiedliche

Szenarien betrachtet, die Ergebnisse in der Wissensdatenbank gespeichert sowie auf diese zurückgegriffen werden können.

Mit den Ergebnissen der Forschung und Entwicklung konnten die im Antrag formulierten Ziele erreicht werden:

- Allgemein und übergeordnet wurde ein Nachweis geführt, dass der Ansatz einer automatischen, gesamtheitlichen Planung von Fertigung und Logistik Nutzen stiftet. Für die gewählten Szenarien konnte dieser quantifiziert werden. Rückkopplungen können die Effizienz des Systems (bspw. höhere Maschinenauslastungen und/oder Verringerung notwendiger Transport- und Handhabungstechnik) erhöhen.
- Die Voxelmethode wurde weiterentwickelt und generiert zuverlässig und hinreichend schnell Plandaten zur entsprechenden Fertigung/Produktion der Teile.
- Das entwickelte Datenmodell und die zugehörige Wissensdatenbank ermöglichen insb.
 - die Speicherung der Ergebnisse der Simulationsexperimente,
 - die Anwendung von Analyseverfahren zur Erkennung von Mustern zwischen (Fertigungs-)Plandaten und notwendiger Ausgestaltung des Logistiksystems und
 - (bei hinreichendem Inhalt) das Substituieren aufwendiger Simulationsstudien bei der Betrachtung ähnlicher, bereits untersuchter Konstellationen.

Das Prinzip der Rückkopplung wird damit möglich.

- Als Instrument der Untersuchungen hat sich die Simulation geeignet. Es ist davon auszugehen, dass die Modelle sowie die (große Bandbreite der) gewählten Szenarien ein Übertragen der Ergebnisse und Erkenntnisse auf einen breiten Anwendungskontext zulassen. Gleichmaßen können die Modelle weiterverwendet werden. Sie sind parametrierbar.

Durchgeführte Arbeiten

Im Hauptteil dieses Schlussberichts wird der Inhalt des Forschungsprojekts ausführlich dargestellt. Dabei werden die durchgeführten Arbeiten sowie Ergebnisse und Erkenntnisse anhand der einzelnen Arbeitspakete (AP) des Projekts ausführlich erläutert.

AP1 Konzeptdetaillierung

Ziel

Das Ziel des Arbeitspakets war ein in Zusammenarbeit mit dem PA ausgearbeiteter Projektplan. Es sollte ein detailliertes Konzept für die Forschungs- und Entwicklungsidee erstellt werden, welches

- Schnittstellen,
- ein Datenmodell
- und eine vorläufige Auswahl erforderlicher Entwicklungsumgebungen bzw. Programmiersprachen

umfasst. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Entwicklung und den darauffolgenden Einsatz bzw. Test des Demonstrators.

Vorgehen

Hierzu wurde eine umfassende Literaturanalyse durchgeführt, um sicherzustellen, dass die neuesten Erkenntnisse seit der Antragstellung in das Projekt integriert werden. Dabei wurde in einem ersten Schritt nach vergleichbaren Modellen zur Orientierung in der Fachliteratur und recherchiert und Onlinedatenbanken, Webseiten bzw. Suchmaschinen verwendet. Zusätzlich wurden die Präsenzbestände und das Onlineangebot der Sächsischen Landes- und Universitätsbibliothek (SLUB) genutzt. Des Weiteren wurden Gespräche und Workshops mit den Mitgliedern des PA durchgeführt, um Erwartungen und Anforderungen sowohl auf technischer als auch inhaltlicher Ebene abzugleichen. Ziel war es, ein "Forschen vorbei an der Praxis" auszuschließen.

Im Zuge dieser Aktivitäten erfolgte die Erstellung eines Projektplans, der eine klare Arbeitsaufteilung mit zugehörigen Fristen und der erforderlichen Infrastruktur beinhaltet. Dieser Plan diente als Leitfaden für die erfolgreiche Umsetzung des Arbeitspakets und gewährleistete eine systematische Herangehensweise an die Forschungsziele.

Ergebnis

Die erzielten Ergebnisse des Arbeitspakets stellen sich wie folgt dar. Im Rahmen der Modellentwicklung wurde Java als Programmiersprache für das Gesamtmodell gewählt, während Maven als Build-Management-Tool und Git als Versionsverwaltungstool zum Einsatz kamen. Für die Datenhaltung wurde eine kombinierte Strategie aus CSV-Daten, insbesondere für den Szenario-Input, und einer SQLite-Datenbank für die interne Datenhaltung festgelegt.

Ein spezifisches Ausgabeformat (JSON) für die Fertigungsplanung wurde definiert, auf dem ein Produktionsplanungs- und -steuerungssystem (PPS) aufbauen kann. Im Kontext der Logistikplanung wurden für die zentralen Komponenten – Maschinenauswahl, Fabrikplanung und Materialflussplanung – methodische Ansätze sowie passende Bewertungskriterien

erarbeitet. Die einzelnen Planungsschritte sind hierbei hierarchisch aufgebaut: Mehrere Layouts werden für jede Maschinenauswahl in der Fabrikplanung berechnet und für jedes Layout wiederum mehrere Transportmittel in der Materialflussplanung in Betracht gezogen.

AP2 PPS-Blackbox

Ziel

Ziel dieses Arbeitspakets war es, ein Produktionsplanungs- und Steuerungssystem (PPS) zu erstellen, welches in der Lage ist, aus Plandaten Maschinenbelegungspläne zu erzeugen. Dieses soll als abgegrenztes, gekapseltes Modul bzw. als Blackbox betrachtet und auf zuvor definierte Schnittstellen zurückgegriffen werden. Abgesehen von einer initialen Evaluierung war die PPS im weiteren Projektverlauf kein Gegenstand der Forschung.

Vorgehen

Basierend auf den Eingangsdaten der Fertigungsplanung und den Anforderungen hinsichtlich der Logistiksystemplanung, wurde eine Recherche zu geeigneten Systemen durchgeführt. Hierfür wurden Programmbibliotheken, die eine Eigenentwicklung durch vorgefertigte Funktionen erleichtern, sowie eigenständige Programme betrachtet. Darüber hinaus wurde der PA eingebunden, da einzelne Unternehmen Erfahrung zu diesen Systemen haben.

Zunächst wurde der Ablauf der Datenverarbeitung festgelegt (vgl. Abbildung 3). Hierzu wird basierend auf den Ergebnissen der Fertigungsplanung eine Vorauswahl notwendiger und optionaler Maschinen getroffen sowie die Bestimmung von Losgrößen vorgenommen. Diese Eingangsdaten werden der PPS in einem konventionsgerechten Format zur Verfügung gestellt.

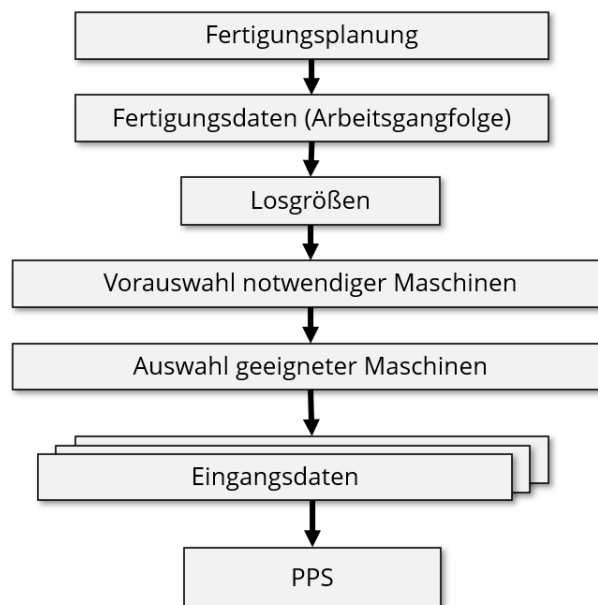


Abbildung 3: Schematischer Ablauf zur Vorverarbeitung der Eingangsdaten der PPS

Zur Erzeugung von Maschinenbelegungsplänen wurden zwei repräsentative verschiedenartige Ansätze ausgewählt, implementiert und evaluiert. Es handelt sich um einen deterministischen und einen nicht-deterministischen Ansatz. Mit beiden Ansätzen ist es grundsätzlich möglich, in kurzer Zeit Maschinenbelegungspläne zu erstellen. Unterschiede bestehen hinsichtlich der

Qualität der erzielbaren Ergebnisse und der Skalierbarkeit bezogen auf die lösbare Problemgröße (bspw. Anzahl der Maschinen oder Prozessschritte). Mit deterministischen Verfahren können bei gleichbleibenden Eingangsdaten ein identisches Ergebnis erzeugt werden. Bei nicht-deterministischen Verfahren kann es aufgrund der Anwendung stochastisch beeinflusster Verfahren (Meta-Heuristiken) zu Abweichungen kommen. Bezogen auf die Evaluierung des Gesamtsystems wurde herausgearbeitet, dass in der Reproduzierbarkeit von Lösungen ein relevantes Kriterium liegt, um gezielt die Einflüsse der Fertigungs- und Logistikplanung herausarbeiten zu können. Daher wird hierin der Schwerpunkt der Evaluierung der PPS gesehen.

Deterministischer Ansatz

Als deterministischen Ansatz wurde eine einfache Zuordnungsvorschrift (Heuristik) umgesetzt. Heuristiken kennzeichnet, dass sie in kurzer Zeit zu einer hinreichend guten Lösung gelangen, ohne eine umfassende Suche nach der optimalen Lösung durchzuführen. Die Heuristik zielt auf eine Reduzierung der Ausführungszeit (engl. Makespan), indem bevorzugt Aufträge mit langen Bearbeitungszeiten eingeplant werden. Dabei wird jeweils die Maschine gewählt, die unter Berücksichtigung von Bearbeitungsgeschwindigkeit, aktueller Belegung, sowie den Transport- und Rüstaufwänden die schnellste Fertigstellung ermöglicht. Der Ansatz eignet sich für größere Problemgrößen und/oder begrenzte Berechnungsressourcen.

Nicht-deterministischer Ansatz

Mit der Software JSSP (<https://job-shop-schedule-problem.readthedocs.io/en/2.1.0/index.html>, aufgerufen am 14.02.2024) wurde eine für das Projekt geeignete und Open-Source-verfügbare PPS verwendet.

Das in Python implementierte Programm erlaubt die Berechnung mittels einer parallelen „Tabu-Search“. Das Verfahren kombiniert eine lokale Suche mit einer Tabu-Liste von verbotenen Schritten, um bessere und vielfältigere Lösungen in großen Suchräumen zu finden. Der Ansatz zeichnet sich durch eine hohe Lösungsgüte für eine begrenzte Problemgröße bei ausreichend Ressourcen für die Berechnung aus.

Evaluierung

Zur Evaluierung wurde ein exemplarisches Testszenario mit 2 Aufträgen und insgesamt 10 Bearbeitungsschritten erstellt. Die Anwendung der deterministischen Heuristik führte zu einer reproduzierbaren Lösung bei kurzer Berechnungszeit. Im Vergleich zur Tabu-Search war die Lösungsgüte gering. Für die Tabu-Search ist bereits für dieses kleine Beispiel eine hohe Zahl von Iterationen notwendig, um zu reproduzierbaren und möglichst guten Lösungen zu gelangen. Hierfür ist eine umfangreiche Berechnungszeit notwendig.

Ergebnis

Für die Durchführung der Experimente in den folgenden Arbeitspaketen wurde nach umfassenden Analysen und in Absprache mit den PA festgelegt, dass aufgrund der benötigten sowie gegebenen Reproduzier- und Skalierbarkeit primär auf den deterministischen Ansatz zurückgegriffen wird.

AP3 Voxelmethode

Ziel

Das Ziel des Arbeitspakets war die Weiterentwicklung der Voxelmethode hin zu einer Methode zur automatisierten Plandatengenerierung aus Konstruktionsdaten.

Vorgehen

Zur Umsetzung wurde der Ansatz aus Erler (2020) um folgende Elemente erweitert (siehe Abbildung 4):

- Erkennung von Fertigungsfeatures für das Schlichten
- Auswahl geeigneter Werkzeugmaschinen
- Aufspannungsplanung

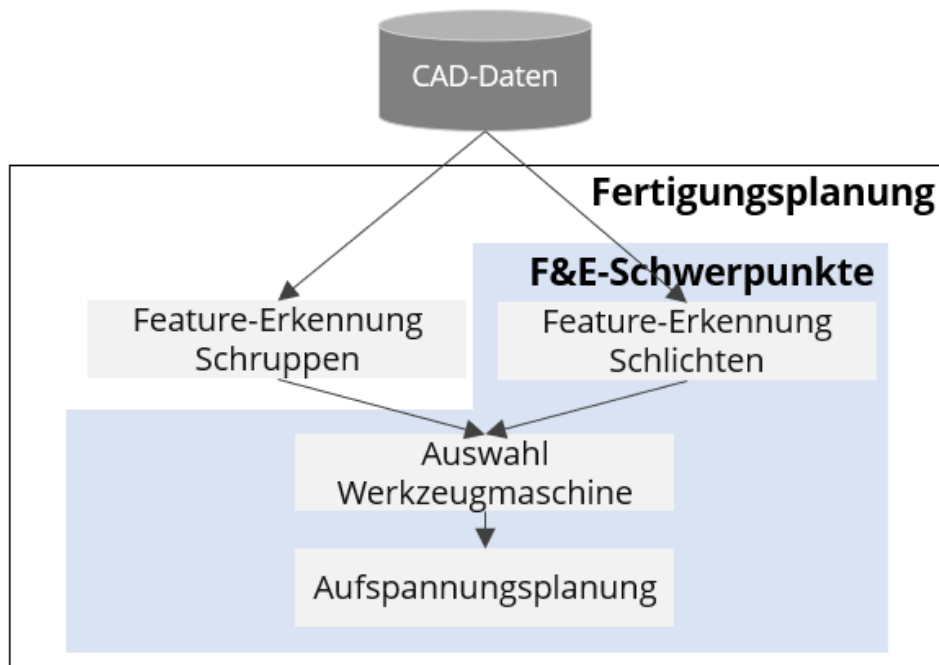


Abbildung 4: Methoden der automatisierten Plandatengenerierung

Das Arbeitspaket startete mit dem Aufbau einer Wissensdatenbank für die Datenhaltung von Stammdaten ausgewählter Fertigungstechnologien und Werkzeugen. Unterstützt wurde das Vorhaben vom PA, insbesondere von der HSi-GmbH mit seiner Technologie-Basis.

Feature-Erkennung und Bahnplanung Schruppen

Die Automatisierung der Kalkulation der Hauptzeiten erfolgte auf Grundlage der CAD-Daten von Roh- und Fertigteilen. Hierzu wurde der von Erler (2020) veröffentlichte Ansatz auf den Problemfall adaptiert. Das zugrunde liegende Verfahren basiert auf einem Oktalgraph, einem hybriden Datenmodell. Dieses vereint eine Oktalbaum- mit einer Graphstruktur. Durch den Oktalgraph wird das Differenzvolumen zwischen Roh- und Fertigteil modelliert (siehe Abbildung 5).



Abbildung 5: Erzeugung des Differenzvolumen

Durch die Überlagerung der für effizientes Suchen geeigneten Oktalbaumstruktur mit einer für Segmentierung geeigneten Graphstruktur gelingt die sich anschließende automatisierte Feature-Erkennung mittels einer kombinierten volumen- und graphmodellbasierten Segmentierungsmethode. Für die auf diese Weise erzeugten Volumensegmente wird ein Werkzeugtypenvertreter bestimmt. Hierbei wird eine neue, ebenfalls auf dem Oktalgraph basierende Heuristik zur Ermittlung des maximalen Durchmessers verwendet (Erler 2022). Abschließend wird eine neuartige Methode zur sequenziellen Berechnung der Vorschub- und Eilgangszeiten verwendet, welche auf eine Pooling-Ansatz basiert.

Feature-Erkennung und Bahnplanung Schichten

Grundlage für die Ermittlung der Schichtaufwände bildet das von Erler (2023) entwickelte Verfahren. Dort werden Flächensegmente, die mit Hilfe klassischer Segmentierungsverfahren ermittelt wurden, nach dem in Abbildung 6 gezeigten Schema ausgewertet und einem Typ zugewiesen.

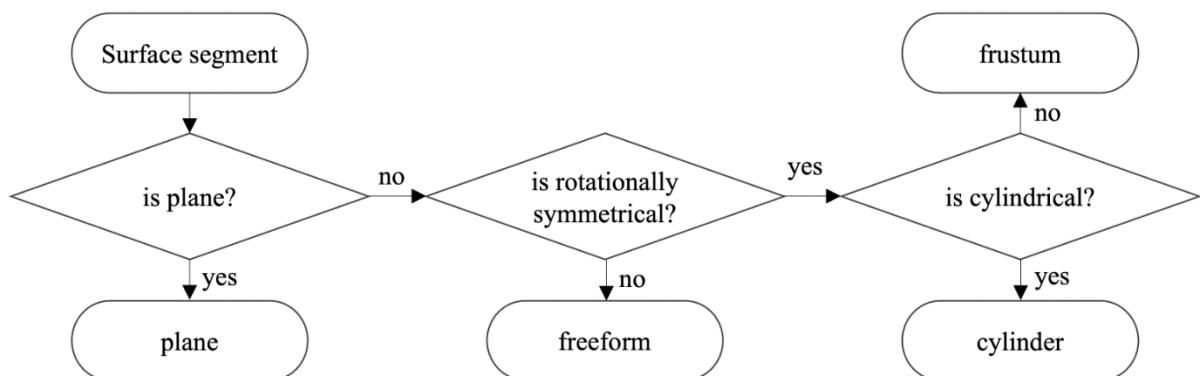


Abbildung 6: Flow-Chart des Segmentierungsverfahren (Erler 2023)

Über die Auswertung der Zugänglichkeit werden den Flächensegmenten Werkzeugtypenvertreter zugeordnet (Abbildung 7 links) und diesen dann Verfahrenstypen (Abbildung 7 rechts).

	plane	cylinder	frustum	freeform		face milling	end milling	peripheral milling	freeform milling
End-Mill					End-Mill	0,9	1,0	1,0	0,1
Bullnose-Mill					Bullnose-Mill	0,5	1,0	0,9	0,8
Ballnose-Mill					Ballnose-Mill	0,1	1,0	0,8	1,0
Face-Mill					Face-Mill	1,0	0,0	0,0	0,0

Abbildung 7: Auswertung der Zugängigkeit (Erler 2023)

Die so generierten Informationen (Abbildung 8 oben) sind geeignet, Pseudopfade zu generieren (Abbildung 8 unten), deren Analyse schließlich die benötigten Plandaten liefert.

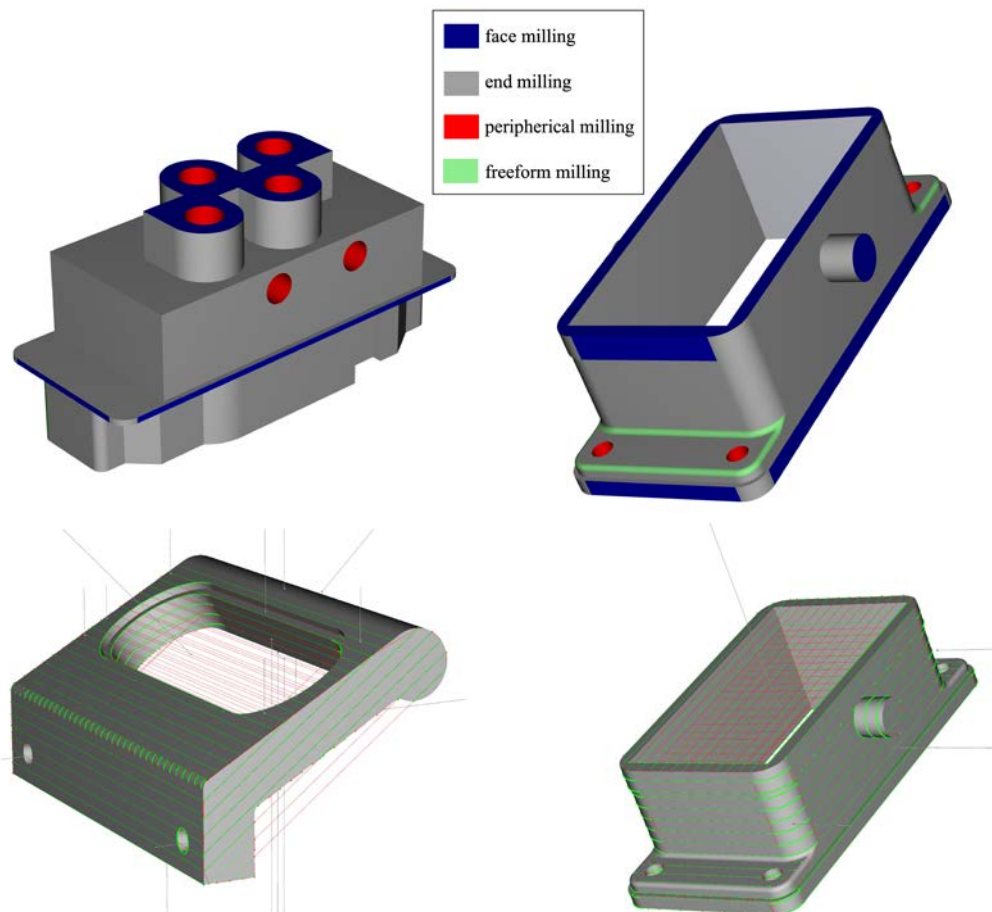


Abbildung 8: Ergebnis der Feature-Erkennung zum Schlichten (Erler 2023)

Auswahl Werkzeugmaschine

Weiterhin erfolgte die Implementierung einer Methode zur Identifikation geeigneter Werkzeugmaschinen. Hierbei wurde die Bauteilgröße als maßgebliches Kriterium betrachtet, wobei bestehende Informationen über das Rohteil genutzt wurden. Darüber hinaus fanden das zu zerspanende Material sowie das Gewicht des Bauteils Berücksichtigung im Suchprozess.

Im Rahmen dieser Arbeiten wurde eine Werkzeugmaschinen-datenbank entwickelt, wofür wesentliche Daten durch ein Mitglied der Hochschule für angewandte Wissenschaften (HSi GmbH) bereitgestellt wurden. Die Datenbank wurde daraufhin umfassend erweitert und an die spezifischen Anforderungen des vorliegenden Projekts angepasst.

Aufspannungsplanung

Der neu entwickelte Ansatz der Aufspannungsplanung operiert ebenfalls auf den Eingangsdaten des Fertig- und Rohteils. Hierbei werden im ersten Schritt bei der Bearbeitung auftretende Zerspankräfte für jedes Fertigungsfeature ermittelt und dieser Basis eine minimal notwendige Fläche zur Spannung des Teils bestimmt. Anschließend ermittelt ein Algorithmus geeignete Oberflächensegmente am Volumenmodell, welche sich als Spannflächen eignen. Die Methode wurde zunächst für rechteckige Spannflächen entwickelt. Eine Liste möglicher Spannflächen für die Bearbeitung eines Fertigungsfeatures mit zugehörigem Spannmittel ist das Ergebnis des Algorithmus.

Ergebnis

Durch die im Verlauf des Abschnitts erläuterten Arbeiten wurde die Voxelmethode um die Teilmethoden Schlichten, automatisierte Werkzeugauswahl, automatisierte Pseudobahnplanung für Schaft- und Planfräsfeatures und Aufspannungsplanung erweitert. Das Ergebnis ist die entsprechende Umsetzung der entwickelten Methoden in einem Demonstrator.

AP4 Prognose Fertigung

Ziel

Das Ziel des Arbeitspakets war die Entwicklung einer Methode zur automatischen Kalkulation von Bearbeitungszeiten für das Fräsen, deren Umsetzung sowie der hierzu gehörigen Datenbanken.

Vorgehen

Inhalt des Arbeitspakets war die Entwicklung eines Verfahrens zur automatisierten Kalkulation von Bearbeitungszeiten. Diese bestehen insbesondere aus Haupt- und Nebenzeiten der Fertigung. Zur gezielten Umsetzung des Arbeitspakets wurde zu Beginn ein Konzept für die Ermittlung der Bearbeitungszeiten entwickelt (siehe Abbildung 9).



Abbildung 9: Funktionsweise der Arbeitsgangfolgeplanung

Die mittels der in Arbeitspaket 3 entwickelten Fertigungsinformationen werden in einem Graphenmodell abgebildet und mit einem Verfahren zur automatisierten Arbeitsgangfolgeplanung in eine möglichst gute und valide Arbeitsgangfolge gebracht. Im

Zentrum stand die Entwicklung eines Moduls zur automatisierten Arbeitsgangfolgeplanung mittels Graphenmodells zur Ermittlung der Rüst- und Nebenzeit (siehe Abbildung 10).

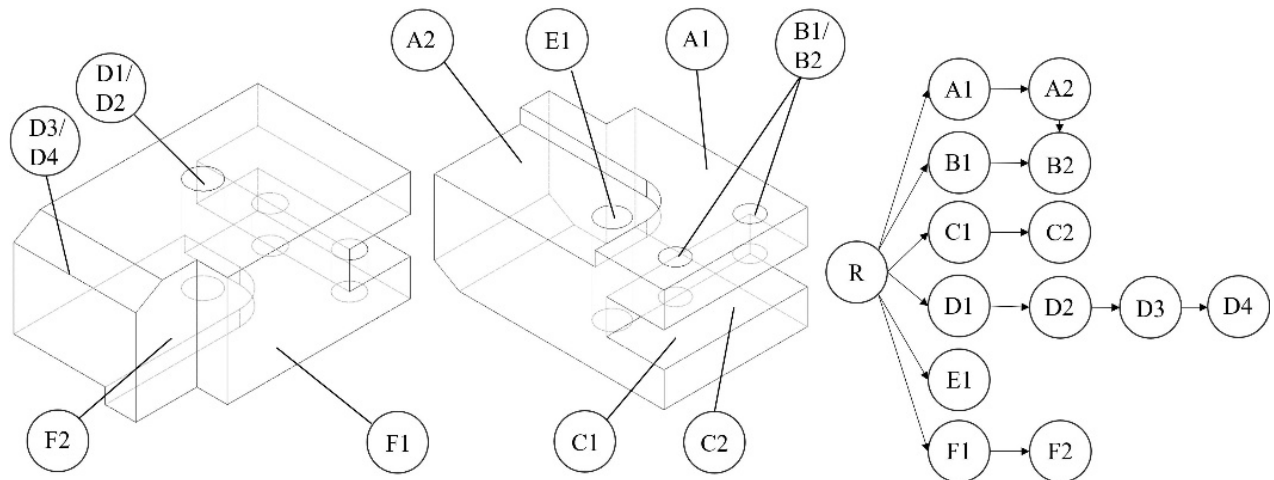


Abbildung 10: Beispielteil und seine Beschränkungen (Langula 2022)

Zur Lösung des im Graphen dargestellten Problems wird ein Cluster-Algorithmus, zur Ermittlung einer Anfangslösung, in Verbindung mit der Meta-Heuristik Simulated Annealing, zur weiteren Optimierung der Anfangslösung, verwendet (Langula 2022).

Das Ergebnis des Algorithmus ist eine optimierte Abfolge von Operationen unter Berücksichtigung von Werkzeug- und Rüstwechseln. Das Laufzeitverhalten der vom Algorithmus ermittelten Kosten über die jeweiligen Iterationen ist in Abbildung 11 veranschaulicht.

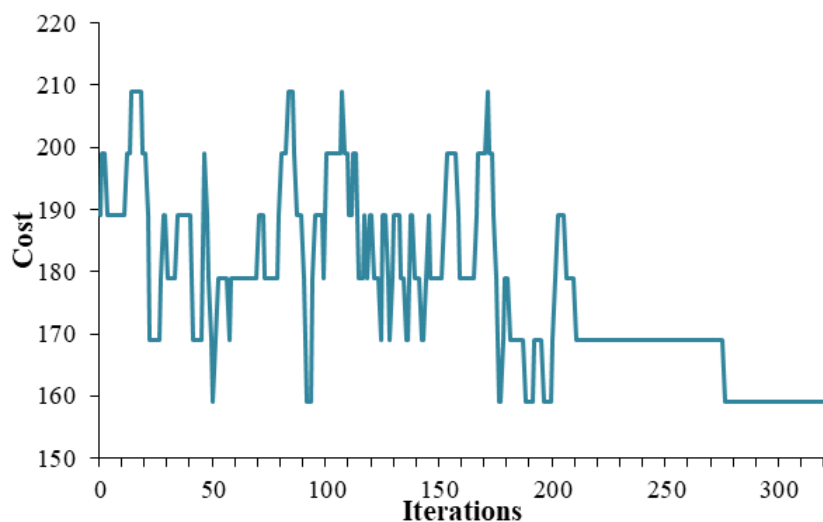


Abbildung 11: Laufzeitverhalten der automatisierten Arbeitsgangfolgeplanung (Langula 2022)

Ergebnis

Mit Abschluss des Arbeitspakets lag ein Verfahren zur automatisierten Kalkulation von Bearbeitungszeiten vor. Automatisiert werden hierbei auf Basis von STL-Daten folgende Informationen für die Fertigung ermittelt:

- Fertigungsfeatures mit für die Bearbeitung benötigten:
 - Werkzeugen
 - Werkzeugmaschinen
 - Aufspannungssituationen
 - Arbeitsgänge, welche die erkannten Fertigungsfeatures in einer möglichst optimalen Bearbeitungsreihenfolge abbilden.
- Auf Grundlage dessen lassen sich folgende Daten berechnen:
 - Fertigungszeit, welche sich aus
 - Haupt- und Nebenzeiten der Fertigung zusammensetzt sowie
 - Fertigungsaufwände (Kosten).

AP5 Logistikmodell

Ziel

Das Ziel lag in der Entwicklung einer Softwarekomponente, welche die automatisierte Planung von Logistiksystemen zur Durchführung umfangreicher Experimente ermöglicht. Als Eingangsdaten werden primär die Ergebnisse der Fertigungsplanung (vgl. AP 4) verarbeitet.

Vorgehen

Zunächst wurden die zu realisierenden Teilkomponenten zur Planung des Logistiksystems abgegrenzt und definiert. Darüber hinaus wurden die notwendigen Komponenten zur Erfassung der Ergebnisse aus den Experimenten in einer Wissensdatenbank und zur Analyse mittels Künstlicher Intelligenz festgelegt. Die Elemente wurden, wie im Folgenden beschrieben implementiert und getestet.

Logistiksystemplanung

Grundlage der Logistiksystemplanung ist zunächst eine Festlegung der Größe der Produktionsfläche, der Zahl maximal einsetzbarer Produktionsmaschinen und die Art der zu untersuchenden Transportsystemtypen. Basierend auf den Ergebnissen der Fertigungsplanung werden die Maschinen ausgewählt und platziert, Transportströme erfasst und verschiedene Transportsystemkonfigurationen anhand analytischer Ansätze evaluiert. Im Ergebnis wird ein konfiguriertes sowie bewertetes Produktions-/Logistiksystem ausgegeben.

1.) Maschinenauswahl

Die Auswahl von Maschinen erfolgt auf Basis einer erweiterbaren Werkzeugmaschinenbank, in der neben den Maßen bspw. die Bearbeitungsgeschwindigkeit für gängige Hersteller erfasst wurden. Basierend auf der Zahl und den Dimensionen der verfügbaren Stellplätze, werden unter Berücksichtigung der durch die Fertigungsplanung als mögliche/notwendige Maschinen gelisteten jene gewählt, welche eine möglichst hohe Leistungsfähigkeit aufweisen.

2.) Fabrikplanung

Basierend auf dem durch die PPS erzeugten Maschinenbelegungsplan können die Transportströme zwischen den Produktionsanlagen bestimmt werden. Die Maschinen werden so platziert, dass in Summe möglichst geringe Transportwege zu realisieren sind. Für die Identifikation einer möglichst guten Zuordnung wird eine Tabu-Search eingesetzt.

3.) Transportsystemplanung

Die Planung der Transportsysteme basiert auf analytischen Ansätzen, die primär auf Basis der zu realisierenden Transportströme und ergänzender Faktoren (bspw. Leerfahrtanteil) eine Konfiguration und Bewertung ermöglichen. Auf Basis parametrierbarer Annahmen (bspw. Geschwindigkeit) können so Fahrzeiten und eine notwendige Fahrzeuganzahl bestimmt werden.

4.) Evaluierung

Um die Evaluierung der Ergebnisse zu ermöglichen, wurden repräsentative Leistungsindikatoren (bspw. Makespan oder Anzahl Fahrzeuge) ausgewählt und ihre Berechnung in das Programm integriert.

Wissensdatenbank

Zur Anreicherung der Wissensdatenbank werden zunächst Logfiles zum Ablauf und Teilergebnisse der angewendeten Programme strukturiert gespeichert. Sie sollen die nachträgliche Detailanalyse ermöglichen. Übergeordnet werden aggregierte Leistungsindikatoren wie bspw. die Makespan in einer Tabelle gespeichert. In dieser Tabelle werden Informationen zu den Fertigungsaufträgen mit den verwendeten Parametern der Planung zusammengeführt. Darauf aufbauend konnten Verfahren der Künstlichen Intelligenz zur Identifizierung möglicher Zusammenhänge angewendet werden.

Künstliche Intelligenz

Die Anwendung von Ansätzen der Künstlichen Intelligenz fokussiert primär die Bildung von Ersatzmodellen. Hierfür wird ein Modell an die in der Wissensdatenbank vorhandenen Daten angepasst („trainiert“), um Abfragen bspw. zu einzelnen Leistungsindikatoren in Abhängigkeit der Fertigungsaufgabe und Planungsparameter durchzuführen zu können. Auf diese Weise werden über bereits bekannte Konstellationen hinaus bspw. Abfragen zu nicht in der Wissensdatenbank enthalten Parameterkombinationen ermöglicht.

Als Verfahren wurden eine lineare Regression, ein Clustering und ein Neuronales Netz ausgewählt. Die Verfahren sind anhand des Paketes *Caret* der Statistik- und Analysesoftware *R* implementiert. Mit dem entwickelten Programm kann direkt auf die Wissensdatenbank zugegriffen werden.

Ergebnis

Im Ergebnis wurde eine Softwarekomponente geschaffen, die basierend auf den Eingangsdaten der Fertigungsplanung, eine automatisierte Konfiguration und Bewertung eines Produktions-/Logistiksystems erlaubt. Zur Durchführung zahlreicher Experimente wurden die notwendigen Komponenten zur Speicherung und Analyse der Ergebnisse geschaffen.

AP6 Gesamtmodell

Ziel

Das Arbeitspaket zielte darauf ab, die bereits beschriebenen Teilsysteme in einem experimentierfähigen Gesamtsystem zusammenzuführen, es zu verifizieren und anhand von Experimenten verallgemeinerbare Aussagen abzuleiten.

Vorgehen

Zusammenführung und Verifikation

Die entwickelten Teilsysteme wurden unter Berücksichtigung der spezifizierten Schnittstellen in einem Repository zusammengeführt. Damit konnte (und kann weiterhin) es zur Durchführung von Experimenten auf verschiedene Systeme ausgerollt werden.

Das Gesamtsystem wurde getestet und anhand gängiger Methoden verifiziert. Zu ihnen zählen, strukturiertes Durchgehen, der Test von Teilmodellen, Trace-Analysen sowie Plausibilitäts- und Grenzwerttests.

Versuchsplanung

In einer Vorstudie konnte herausgearbeitet werden, dass die Zeit für die Berechnung einer Lösung, also einer konkreten Systemkonfiguration, vergleichsweise wenig Zeit (< 30 s) beansprucht. Daher wurde im Rahmen der Experimente und dem Ziel des Aufbaus einer möglichst umfänglichen Wissensdatenbank auf eine automatisierte Steuerung der Fertigungsplanung durch eine Rückkopplung verzichtet. Stattdessen hat sich hier der Ansatz einer vollfaktoriellen Versuchsplanung bewährt, was sich in einer hohen Ergebnisdichte und -qualität widerspiegelte.

Experimente

Zur Durchführung der Experimente wurde eine repräsentative Teilebasis erarbeitet und festgelegt. Eine Einteilung hinsichtlich ihrer Fertigungscomplexität kann den Abbildungen 12 und 13 entnommen werden. Die Testteilbasis besteht aus 30 unterschiedlichen Fräsbauteilen. Die Teile wurden randomisiert kombiniert, sodass eine Einzelteil-, Kleinserien und Serienproduktion hinsichtlich des Produktmix und Produktionsvolumens abgebildet werden konnte.

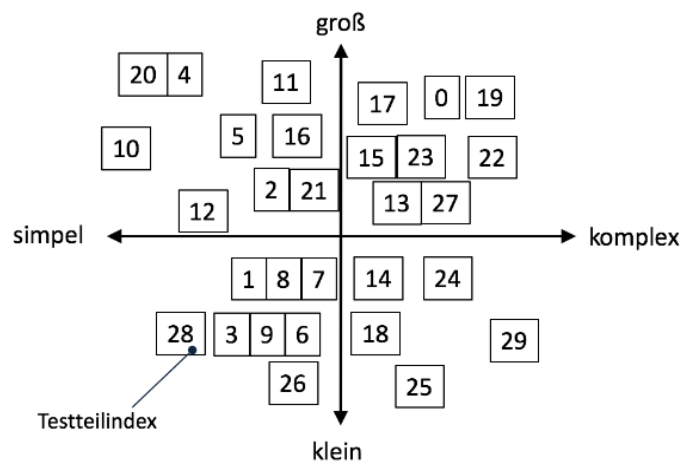


Abbildung 12: Übersicht zu der Teilebasis hinsichtlich Bauteilvolumen und Fertigungskomplexität

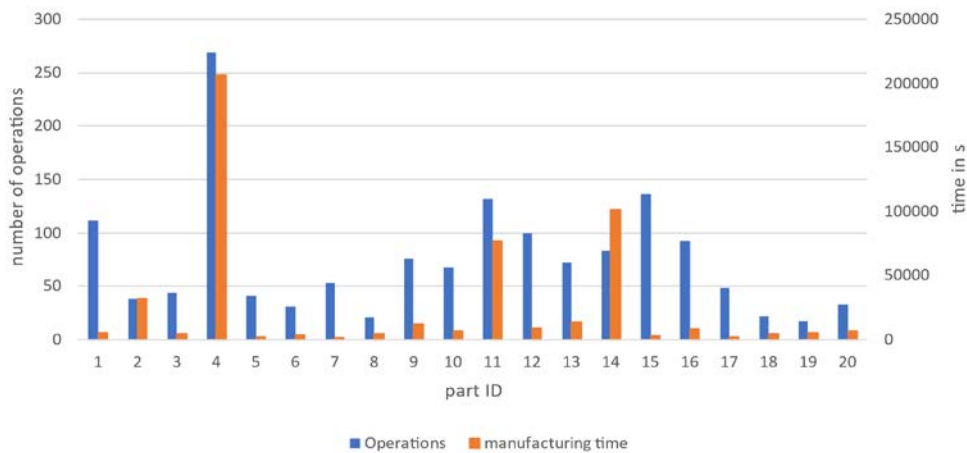


Abbildung 13: Übersicht zu der Teilebasis hinsichtlich Anzahl von Bearbeitungsschritten und Bearbeitungszeit

Die Experimente fokussierten neben dem Einfluss der Parametrierung des Produktionsprogramms und der für die Konfiguration des Produktionssystems notwendigen Teilkomponenten, die Arbeitsgangfolgeplanung. Hierzu stand insbesondere die Parametrierung der maximalen Anzahl von Operationen, die in einem Arbeitsgang zusammengefasst werden dürfen, im Fokus. Dieser Parameter wird im Folgenden als *Task Length* bezeichnet.

Ergebnis

Im Ergebnis erlaubt das Gesamtsystem die automatisierte Konfiguration und Bewertung von Produktionssystemen auf Basis von Fertigungsaufträgen. Das Verhalten der Fertigungskosten, welche das Ergebnis der Fertigungsplanung darstellen ist in Abbildung 14 gezeigt. Es zeigt sich, dass die Beschränkung des Parameters *Task Length* im Experiment bis zu einem bestimmten Grad Einfluss zeigt.

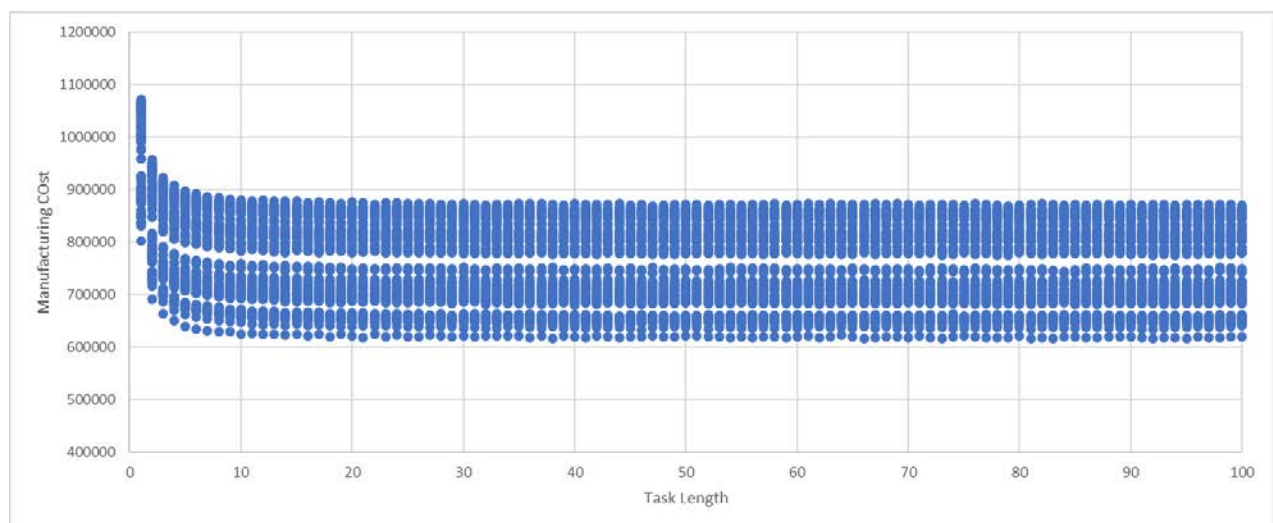


Abbildung 14: Verhalten der Fertigungskosten in Abhängigkeit der Task Length

Ein Beispiel für ein erstelltes Layout ist in Abbildung 15 dargestellt. Die Abbildung zeigt neun Produktionsmaschinen (blau), ein spezifiziertes Streckennetz (grün) und die Anbindung der Maschinen an das Streckennetz (rot). In dem Beispiel sind drei Maschinenstellplätze nicht belegt, da die Anzahl einsetzbarer Maschinen auf 9 begrenzt war.

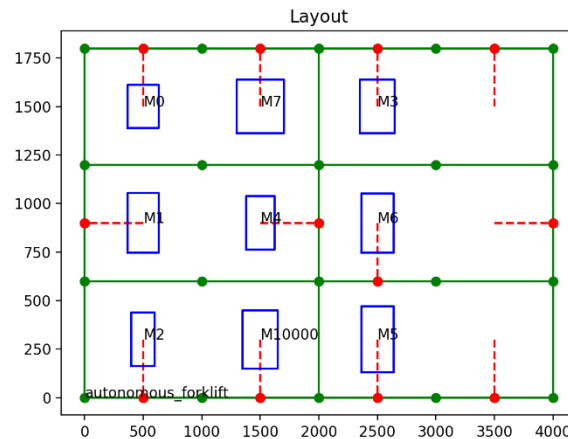


Abbildung 15: Beispiellayout

Abbildung 16 zeigt das Ergebnis einer aggregierten Zielfunktion (*Best Score*), welche neben der Ausführungszeit notwendige Investitionen und Betriebskosten einbezieht. Eine Reduzierung des Best Score wird in den ausgewerteten Experimenten insbesondere durch eine Verkürzung der Ausführungszeit erreicht. Es wird deutlich, dass sich für die untersuchten Teile ein positiver Effekt einstellt. Die Fertigungsplanung hat somit einen Einfluss auf Parameter/die Ausgestaltung des Logistiksystems – und daher auch umkehrt.

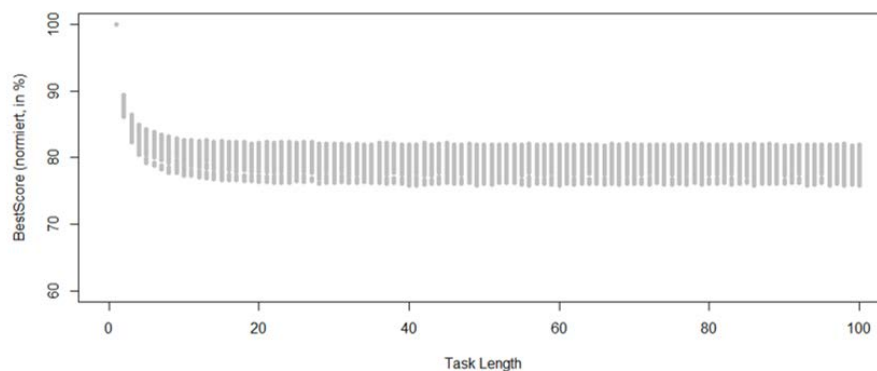


Abbildung 16: Verhalten der Zielfunktion in Abhängigkeit der Task Length

Der Effekt ist in Abhängigkeit der Eigenschaften der ausgewählten, zu fertigenden Teile ebenfalls in Abbildung 17 dargestellt. Es wird zwischen Teilen mit hohen und geringen Bearbeitungszeiten bzw. Operationszahlen unterschieden. Es wird deutlich, dass der untersuchte Parameter, insb. auf Teile mit niedrigen Bearbeitungszeiten wirkt. Können hier Rüstaufwände durch das Zusammenlegen von Operationen reduziert werden, wirkt sich dies anteilig besonders stark aus.

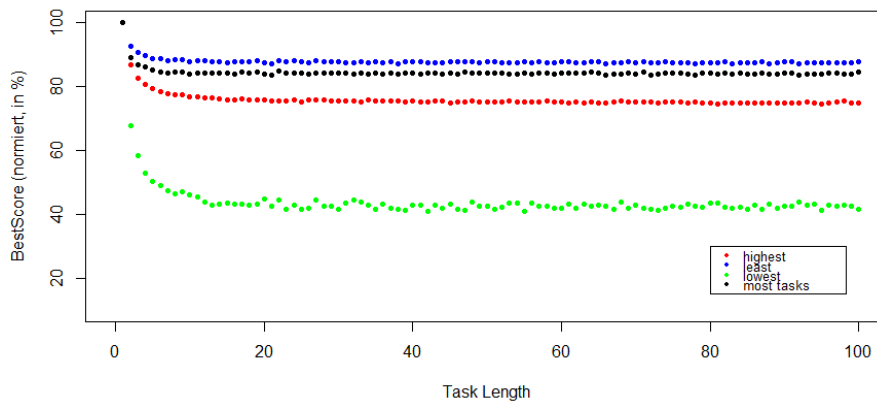


Abbildung 17: Verhalten der Zielfunktion für unterschiedliche Szenarien in Abhängigkeit der Task Length

Ergänzend zeigt Abbildung 18 die Konfiguration der Transportsysteme für ein Experiment zur Fertigung einer repräsentativen Kleinserie. Es ist erkennbar, dass unterschiedliche Transportsystemarten in verschiedener Konfiguration hinsichtlich Fahrzeuganzahl und Streckennetz festgelegt werden. Gleichwohl wird deutlich, dass ein Fahrerloses Transportsystem (autonomes Gabelstapler) mit einer geringen Fahrzeuganzahl und reduziertem Streckennetz (Roadmap: 1, vgl. Abbildung 17) die favorisierte Konfiguration darstellt und unter Gesichtspunkten der Effizienz bspw. Stetigfördertechnik nicht zum Einsatz kommen sollte.

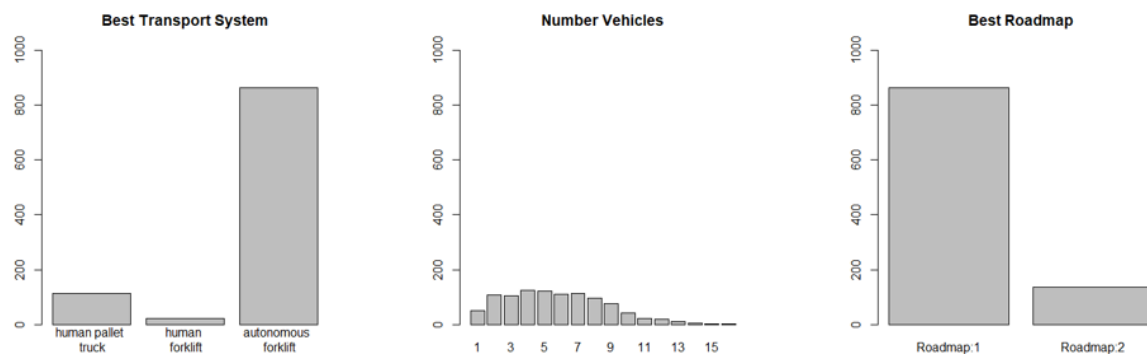


Abbildung 18: Konfiguration der Transportsysteme

Mit dem Modell wurden zahlreiche Experimente durchgeführt, um die Wissensdatenbank anzureichern. Anhand der Daten wurden durch Anwendung der beschriebenen Ansätze aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz Ersatzmodelle gefunden. Die Ansätze erzeugen eine hinreichend hohe Güte in der Prognose, um verwertbare Aussagen zu treffen – eine aufwändige, ggf. ereignisdiskrete Simulation wie zur initialen Befüllung der Wissensdatenbank wird damit überflüssig. Im Detail konnte mit Hilfe des trainierten Neuronalen Netzes die höchste Güte erreicht werden. Ein Beispiel, ebenfalls mit Fokus auf die Prognose/Bewertung des Parameters Task Length, ist in Abbildung 19 dargestellt.

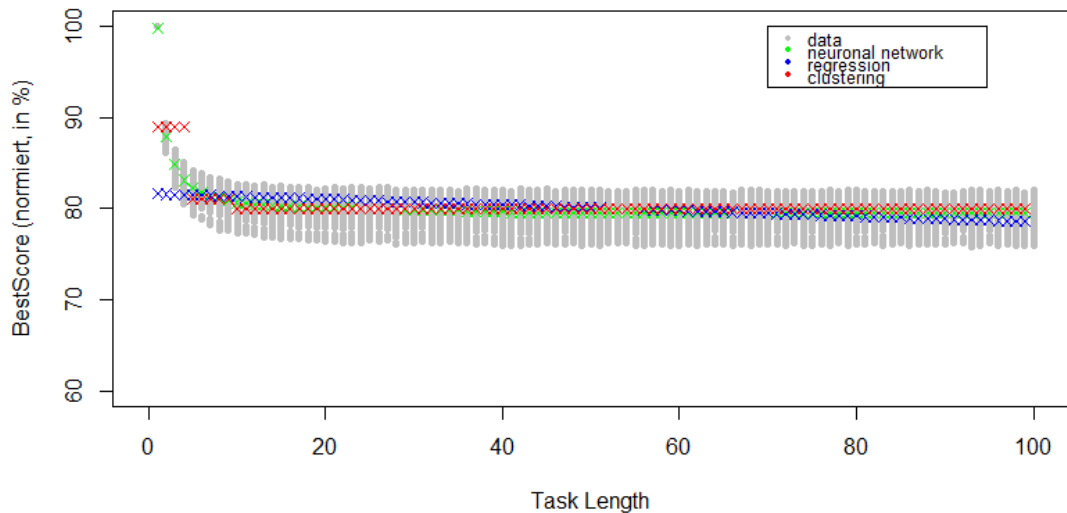


Abbildung 19: Prognose des Best Score für das in Abbildung 15 beschriebene Experiment für verschiedene Ersatzmodelle (Neuronales Netz, Clustering, Lineare Regression)

AP7 Analyse, Dokumentation und Dissemination

Ziel

Dieses Arbeitspaket hatte als Ziel die Aufbereitung und Verbreitung der F&E-Ergebnisse. Die geplanten Aktivitäten richten sich an Praktiker in den Unternehmen, an den Fördermittelgeber (Verfassen von Berichten) und an die allgemeine Fachöffentlichkeit (Publikation der Ergebnisse). Priorität hat das Erreichen einer breiten Nutzer- und Anwenderbasis, insb. in kmU.

Vorgehen

Die Dokumentation des Projektverlaufs und der Projektergebnisse im Rahmen von AP 7 fand parallel und fortwährend zur Projektbearbeitung statt. Zuvorderst wurden zwei Zwischenberichte (2022, 2023) und der vorliegende Abschlussbericht angefertigt.

Ergebnis

Eine ausführliche Auflistung aller Transfermaßnahmen (Dissemination) erfolgt in den Tabellen 2 und 3. Insbesondere wurden Veröffentlichungen (sowohl in wissenschaftlichen Journalen als auch Zeitschriften mit Breitenwirkung in der Wirtschaft) zum Projektlauf und zu den zentralen Projektergebnissen erstellt und publiziert sowie Vorträge auf Fachkonferenzen gehalten. Im Rahmen des Projektes und seiner Themen wurden zahlreiche wissenschaftliche, studentische Arbeiten erstellt. Zusätzlich gingen die Ergebnisse in Vorlesungen ein. Zentrale Implementierungen wurden/werden auf Repositorien zur Verwertung bzw. (Weiter-)Entwicklung bereitgestellt. Außerdem fanden im Projektzeitraum zahlreiche bilaterale Firmenkontakte und insgesamt drei Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses statt

3. Verwendung der Zuwendung

Die Verwendung der Zuwendung entfiel ausschließlich auf Personalkosten. Eine Beschaffung von Ausrüstung sowie Technik war nicht vorgesehen und auch nicht nötig. Eine Aufschlüsselung der Personalkosten auf die beiden Forschungsstellen (Professur für Technische Logistik – TL bzw. Professur für Formgebende Fertigungsverfahren – FF) sowie nach den sieben Arbeitspaketen des Projekts findet sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Angefallene Personenmonate (PM) nach Forschungsstelle und Arbeitspaket

Arbeitspaket (AP)	Beschreibung	Verwendung der Zuwendung (in PM)	
		FST1: TUD-TL	FST2: TUD-FF
1	Konzeptdetaillierung	2	2
2	PPS-Blackbox	2	2
3	Voxelmethode	2	6
4	Prognose Fertigung	2	6
5	Logistikmodell	4	4
6	Gesamtmodell	5,26	4
7	Analyse; Dissemination	2	3
Summe		19,26 PM	27 PM

4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten leisten einen angemessenen Beitrag zum Forschungsvorhaben der erweiterten, flexiblen Fertigungs- und Logistikplanung auf Grundlage von Volumenpixeln und agiler Transportlastermittlung. Die waren in Inhalt und Umfang ein notwendiger Teilschritt zur Erreichung des geplanten Forschungsziels.

Die Ergebnisse des Projektes entsprechen den Erwartungen und Zielen des Arbeitsplans.

Zum Erreichen der Zielstellung wurden Mitarbeiter laut Plan beschäftigt. Darüber hinaus mussten keine zusätzlichen Ressourcen zur Durchführung des Vorhabens herangezogen werden.

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

Die Ergebnisse dienen der operativen und strategischen Planung von Produktionsstätten. Auf kurzer Frist, d. h. bei gegebenen, nur bedingt anpassbaren Ressourcen, helfen sie, eine insgesamt hohe Effizienz zu erreichen. Konkret können Produktionspläne entworfen werden, die ausgehend von der Fertigungsplanung eine optimale Ausnutzung des Logistiksystems avisieren. Umgekehrt können bei erwarteten Engpässen des Logistiksystems etwaige Anpassungen in der Fertigungsplanung initiiert werden, um ggf. den Produktionsplan überhaupt ausführen zu können.

Bei der strategischen Planung, d. h. bspw. bei Neu- und/oder Umbauvorhaben erlauben die Ergebnisse eine Auslegung des Produktions- und Logistiksystems in Art (bspw. Stetig- oder Unstetigförderer) und Dimension (bspw. Anzahl benötigter Stapler), sodass sie den geplanten Umfang der Teilefertigung optimal gerecht werden, d. h. es weder unter- noch überdimensioniert wird. Erreicht wird dies durch die erstellte Wissensdatenbank, um in der konkreten Anwendung auf die erläuterte Möglichkeit der Rückkopplung und der damit möglichen (automatischen) Regelmechanismen zurückzugreifen.

Der industrielle wirtschaftliche Nutzen besteht zunächst im Nachweis und der Erkenntnis, dass das Prinzip der Rückkopplung bzw. ganzheitlichen Produktionsplanung vorteilig ist. Die Ergebnisse sind weitestgehend auf spezifische Anwendungsfälle übertragbar, prinzipbedingt und, weil im Projekt eine große Bandbreite möglicher Szenarien untersucht wurde. Unternehmen „sparen“ sich also eigene Anstrengungen/Ressourcen zum Thema und können auf die F&E-Ergebnisse zurückgreifen.

Konkret stehen den Unternehmen sämtliche entwickelte Software sowie gesammelte Roh-/Ergebnisdaten zur Verwertung und Weiterentwicklung über Repositorien zur Verfügung. Dies beinhaltet insb. methodische Ansätze, Algorithmen, Datenmodelle, Simulationsmodelle, Optimierungsmodelle, Auswertungsroutinen und einen Prototyp eines Softwareframeworks zur Simulation spezifisch konfigurierter Szenarien. Soweit sinnvoll, ist der Quellcode kommentiert und existieren Dokumentationen zur Anleitung der Nutzung. Die Anwendung ist auch ohne größeres Expertenwissen möglich. Die Verwertung im Sinne der Weiterentwicklung wird u. a. durch die Modularität der einzelnen Komponenten sowie die Einhaltung gängiger (Software-) Programmierkonventionen sowie Standards ermöglicht. Die Software, (Roh-) Daten und Demonstratoren können sowohl eigenständig als Softwarehersteller als auch im Rahmen beratender Dienstleistung herangezogen werden. Damit wird bei den Anwendern insofern Nutzen generiert, als die (initialen) Aufwände nicht anfallen (oder zumindest reduziert werden), weil auf vorhandene Entwicklungen und Kompetenzen zurückgegriffen werden kann. Dies ist insb. für KMU von Bedeutung, weil fehlende Ressourcen durch den generell kleineren Personalstamm nicht leicht ausgeglichen werden können – der Fachkräftemangel wirkt an dieser Stelle als Katalysator.

In der konkreten Anwendung leistet die entwickelte Software einen Beitrag, die Effizienz des Betriebs zu steigern. Dies wird erreicht durch die Möglichkeit der Ableitung/Planung effizienter Systeme und/oder Prozesse. Die angestrebte Produktion wird also mit möglichst geringem

Aufwand erreicht bzw. durch optimale Auslastung der Ressourcen ein möglichst großer Output generiert – die Produktionskosten werden gesenkt.

Ein Ergebnistransfer ist möglich, weil die Entwicklungen und Untersuchungsschwerpunkte eng mit den Projektpartnern abgestimmt wurden. Weiter ist bereits von einer Nutzung (oder sogar Verwertung) auszugehen bei Partnern, die in die Verifizierung und Validierung involviert waren (siehe Belegliste der vAW).

Die im Antrag propagierten Anwendungs- und Verwertungsmöglichkeit haben sich weitestgehend als realistisch dargestellt. In Workshops und Gesprächen mit Mitgliedern des PA wurde deutlich, dass der entwickelte Ansatz gut geeignet ist und großen Nutzen stiftet, wenn die Aufgabe der häufigen und kurzfristigen Generierung von (Fertigungs-)Plandaten besteht – vor allem bei Klein-/Kleinstserien bzw. Einzelfertigung. Die hinzugewonnene Planungssicherheit hilft, die als Wettbewerbsvorteil angepriesene Flexibilität/Agilität von kmU gegenüber Großunternehmen zu behaupten bzw. auszubauen. Im Laufe der Bearbeitung des Projektes wurde zudem erkannt, dass die Bedeutung der Erkenntnisse und Entwicklung auch in der Sicherstellung von Lieferversprechungen liegt. Vor dem Hintergrund angespannter Lieferketten und drohender Unterbrechung der eigenen Versorgung mit Ausgang-/Rohstoffen wird die Kompetenz zum (Um-) Planen immer wichtiger, um Konkurrenzdruck zu widerstehen. KmU sind hier besonders betroffen, weil sie in der Regel Ausfälle nicht mit weiteren Unternehmenssparten ausgleichen können. Der Nutzen liegt dann in der Aufrechterhaltung von Kunden-/Geschäftsbeziehungen bzw. der Abwendung etwaig drohender Regresse.

6. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Tabelle 2: Erfüllte Ergebnistransfers des Projekts

Maßnahme	ursprüngliche Ziele	Ort / Rahmen	Zielerreichung/-erfüllung Datum / Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss	gemeinsame Sitzung mit dem gesamten projektbegleitenden Ausschuss zu Projektbeginn, nach Abschluss von AP und zu Projektende ausführliche und fortlaufende Diskussion der Forschungsergebnisse und Abstimmung der Arbeitsschritte mit einzelnen Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses	PA-Unternehmen	- Virtuelle Sitzung des PA am 05.07.2021 - Virtuelle Sitzung des PA am 09.09.2022 - Sitzung des PA am 23.11.2023 - Telefonate mit Experten aus einzelnen Unternehmen
Ansprache weiterer Unternehmen	Im projektbegleitenden Ausschuss sind zwar mehrere Systembetreiber vertreten, sobald erste Projektergebnisse vorzuweisen sind, sollen aber vor dem Hintergrund der Wissensdatenbankpopulierung insb. über Logistikplaner verstärkt weitere Betreiber in das Vorhaben eingebunden werden.		Nach Rücksprache mit Mitgliedern des PA kommunizieren diese aktiv die Ergebnisse an ihre Kunden mit Hinweisen auf das Projekt und die beteiligten Forschungsstellen.
Publikationen	primär in Fachzeitschriften mit Breitenwirkung in der Wirtschaft (z. B. Hebezeuge und Fördermittel, Fördern und Heben, Logistik Heute) sowie ggf. auch in wissenschaftlichen Zeitschriften (z. B. Logistics Journal, Logistics Research)	Veröffentlichung	- 15.12.2021 im WGP-Newsletter zum Thema „Verkürzung von Produktionsketten“ Mit dem Titel „Fertigungsaufwände deutlich effizienter kalkulieren“ - Langula, S. (2022): „An efficient method for automated machining sequence planning using an approximation algorithm“.
Vorträge	auf nationalen Tagungen, z. B. dem WGTL-Fachkolloquium der ASIM-Fachtagung „Simulation in Produktion und Logistik“ bzw. dem ASIM-Symposium „Simulationstechnik“ oder dem Zukunftskongress Logistik auf Veranstaltungen des Antragstellers, z. B. dem Forum Technische Logistik oder dem Symposium Flurförderzeuge	Vortragen der Projektergebnisse auf Fachtagungen	- Langula, S. (2022): „An efficient method for automated machining sequence planning using an approximation algorithm“ auf der dazugehörigen Konferenz vom

			11.10.2022 – 14.10.2022 in Stuttgart
Lehre	die Steuerung von Materialflusssystemen gehört zum Kerngebiet der Lehrveranstaltungen der Professur des Antragstellers, die Projektbearbeitung fließt insb. über Studien- und Abschlussarbeiten in die Lehre ein		- Einarbeitung der Inhalte/Ergebnisse in die Vorlesungsreihen der Materialflussrechnung - thematische Bearbeitung in Abschluss-/Studienarbeiten
Messeteilnahme	durch Vorträge und Poster im Rahmen der Messeauftritte der WGTL, der BVL oder des VDMA auf der LogiMAT oder der CeMAT/HannoverMesse; ggf. auch mit einem eigenen Exponat durch direkte Ansprache von Unternehmen als Messeteilnehmer		- Aufgrund der (Nachwirkung der) Pandemie konnte das Projekt nur eingeschränkt auf Messen präsentiert werden - Messeteilnahmen auf der LogiMAT 2023, CeMAT 2023
Internet	allgemeine Information zum Forschungsvorhaben auf den Internetseiten des Antragstellers freier Download der entwickelten Softwaremodule von öffentlich zugänglichen Repositories (z. B. GitHub) dauerhafte Bereitstellung der Publikationen und des Abschlussberichts in öffentlich zugänglichen Repositories (z. B. Qucosa) sowie auf den Internetseiten des Antragstellers und der Forschungsvereinigung		- Bereitstellung aller Tools, Ergebnisse und Daten über frei zugängliche Repositorien - Veröffentlichung/ Bereitstellung von (Zwischen-)Berichten
Information und Wissensvermittlung	die Forschungsergebnisse fließen in Gemeinschaftsprojekte des Antragstellers mit Partnern aus der Industrie ein und leisten dort einen Beitrag zur Erhöhung der Ergebnisqualität		- Erste Workshops zur Sammlung vertiefter bzw. sich neu ergebender Fragestellungen, möglicher Konsortien und passender Forschungsinstrumente

Tabelle 3: Geplante Ergebnistransfers nach Projektende

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
Publikationen	in Fachzeitschriften mit Breitenwirkung in der Wirtschaft (z. B. Hebezeuge und Fördermittel, Fördern und Heben, Logistik Heute) sowie in wissenschaftlichen Zeitschriften (z. B. Logistics Journal, Logistics Research)		- Publikation in Journal mit dem Thema „An operation-based approach for automated, integrated manufacturing system planning“ - Weitere Veröffentlichung über den Ansatz der automatisierten, ganzheitlichen Fabrikplanung
Vorträge	auf nationalen Tagungen (z. B. den ASIM-Veranstaltungen), auf internationalen Tagungen (z. B. der Winter Simulation Conference) sowie auf Veranstaltungen des Antragstellers (z. B. dem Forum Technische Logistik oder dem Symposium Flurförderzeuge)		- Vortrag auf dem Anwender-Forum „Forum Technische Logistik“
Lehre	die Steuerung von Materialflusssystemen gehört zum Kerngebiet der Lehrveranstaltungen der Professur des Antragstellers, die Projektergebnisse ergänzen insb. die Lehrveranstaltungen „Materialflusssimulation“ und „Systemgestaltung“		- Einarbeitung der Inhalte/Ergebnisse in die Vorlesungsreihen der Systeme der Intralogistik - thematische Bearbeitung in Abschluss-/Studienarbeiten
Internet	dauerhafte Bereitstellung der Publikationen, des Abschlussberichts und der entwickelten Softwaremodule über öffentlich zugängliche Repositories sowie auf den Internetseiten des Antragstellers und der Forschungsvereinigung		- dauerhafte Bereitstellung und ggf. Einarbeitung von Aktualisierungen

Quellen

Dombrowski, U., & Mielke, T. (2015). *Ganzheitliche Produktionssysteme: Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen*. Springer-Verlag.

Erlar, M. (2020): „Automatisierte Hauptzeitkalkulation Für Das Schrappen in Der Mehrachsigen Fräsebearbeitung Mittels Oktaledgenbasierter Featureerkennung“. Dissertation. Dresden: Technische Universität Dresden.

Langula, S. (2022): „An efficient method for automated machining sequence planning using an approximation algorithm“. In: *WGP 2022: Production at the Leading Edge of Technology*, S. 727–736

Erlar, M. (2022): „Determination of Largest Possible Cutter Diameter of End Mills for Arbitrarily Shaped 3-Axis Milling Features“. In: *WGP 2022: Production at the Leading Edge of Technology*, S. 697–706

Erlar, M. (2023): „Automated Determination of Suitable Finishing Operation Types for Milling of Surfaces“. In: *WGP 2023: Production at the Leading Edge of Technology*, S