

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 20467 N

## Thema

Entscheidungsunterstützung mittelständiger Unternehmen bei der dynamischen Produktallokation in globalen Wertschöpfungsnetzwerken

## Berichtszeitraum

01.01.2019 bis 30.06.2021

## Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.

## Forschungseinrichtung(en)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - wbk Institut für Produktionstechnik

Gefördert durch:

## Inhaltsverzeichnis

<b>Thema</b>	<b>1</b>
<b>Berichtszeitraum</b>	<b>1</b>
<b>Forschungsvereinigung</b>	<b>1</b>
<b>Forschungseinrichtung(en)</b>	<b>1</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>2</b>
<b>1. Förderhinweis</b>	<b>4</b>
<b>2. Zusammenfassung des Forschungsprojekts ProdAlloPlan.net</b>	<b>5</b>
<b>3. Ausgangssituation und Problemstellung</b>	<b>6</b>
<b>4. Methodisches Vorgehen und Projektergebnisse</b>	<b>7</b>
4.1 Projektziel	7
4.2 Methodische Vorgehensweise	8
4.3 AP 1: Produktionsorientierte Clusterung von Produktvarianten	9
4.4 AP 2: Charakterisierung von Produktionsstrukturen und –kapazitäten	10
4.5 AP 3: Aufbau einer Wertschöpfungsnetzwerk-Optimierung unter Berücksichtigung relevanter Kosten	12
4.6 AP 4: Ableitung der optimalen Produktallokation und Anpassung des Wertschöpfungsnetzwerks	15
4.7 AP 5: Ergebnisumsetzung durch anwenderfreundlichen Softwaredemonstrator	18
4.8 AP 6: Praxisleitfadenerstellung mit Regeln zur dynamischen Produktzuordnung im Wertschöpfungsnetzwerk	23
<b>5. Zuwendung und Angemessenheit der Arbeit</b>	<b>25</b>
5.1 Verwendung der Zuwendung	25
5.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	26
<b>6. Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse</b>	<b>27</b>
6.1 Wissenschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse	27
6.2 Wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse: Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit von KMU	28
<b>7. Ergebnistransfer in die Wirtschaft</b>	<b>29</b>
<b>8. Durchführende Forschungsstelle und Projektbegleitender Ausschuss</b>	<b>32</b>
8.1 Durchführende Forschungsstelle	32
Name und Anschrift der Forschungsstelle	32

Leiterin der Forschungsstelle	32
Projektleitung	32
8.2 Projektbegleitender Ausschuss	33
Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses	33
<b>I. Abbildungsverzeichnis</b>	<b>35</b>
<b>II. Tabellenverzeichnis</b>	<b>36</b>
<b>III. Literaturverzeichnis</b>	<b>37</b>

## 1. Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 20467 N der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V., Schlachte 31, 28195 Bremen, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



**Abbildung 1: Logo des Forschungsprojekts ProdAlloPlan.net**

## 2. Zusammenfassung des Forschungsprojekts

### ProdAlloPlan.net

Die zunehmende Internationalisierung klein- und mittelständischer Unternehmen (KMU) resultiert in der Entstehung komplexer globaler Wertschöpfungsnetzwerke (WSN) (Lanza et al. 2019). Hinzu kommt, dass sich mit der geographischen Verschiebung der Kundennachfrage das nachgefragte Variantenspektrum stark ausgeweitet hat (Koren 2010). Eine Herausforderung für Unternehmen besteht in der dynamischen Zuordnung von Produkten (der sogenannten Produktallokation, vgl. Volling et al. 2013) und von Produktionsressourcen zu Produktionsstufen und -standorten über den Zeitverlauf. Die gleichzeitige, gesamtkostenoptimale Anpassung des WSN zur Erfüllung von Qualitäts- und Lieferzeitprämissen stellt durch die Komplexität der langfristigen Planung eine weitere Herausforderung dar (Zahn 2012, Schmidt 2011).

Ziel des Forschungsprojekts ProdAlloPlan.net war die Entwicklung einer KMU-gerechten Methodik zur effizienten Allokationsplanung von dynamischen Erweiterungen des Produktprogramms sowie deren Wechselwirkungen mit der Anpassung von Strukturen und Kapazitäten globaler WSN. Weiterhin sollten Analysemethoden entwickelt werden, die zu einer Erhöhung der Ergebnistransparenz sowie zur Identifikation von Produktionsengpässen und Maßnahmen zur weiteren Verbesserung beitragen.

Von der Motivation und Zielsetzung ausgehend wurde im Rahmen des Projekts eine Methodik zur integrierten Allokationsplanung und Anpassung der Netzwerkkonfiguration über den Planungshorizont entwickelt. In enger Zusammenarbeit mit dem Projektbegleitenden Ausschuss wurden zunächst Kriterien identifiziert, anhand derer ein produktionsorientiertes Clustering vorgenommen werden kann. Allgemeingültige Kriterien sind dabei u. a. die erforderlichen Prozessschritte, Zulieferprozesse sowie Kapazitätsbedarfe je Produktionstechnologie. Mithilfe dieses Clusterings kann die Komplexität in den folgenden Schritten reduziert werden. Durch die Charakterisierung von existierenden und potenziellen Produktionsstrukturen und -kapazitäten erfolgte im Anschluss der Aufbau eines allgemeingültigen Optimierungsmodells zur integrierten Allokationsplanung und WSN-Anpassung unter Berücksichtigung relevanter Zielkriterien und Restriktionen. Als wesentliche Zielkriterien neben der Minimierung der Gesamtkosten wurden außerdem die Maximierung der Kundennähe sowie die Minimierung von Nacharbeit identifiziert. Im Folgenden wurde eine Methodik zur Ermittlung der Strategie zur optimalen Produktallokation und Anpassung des WSN sowie zur Absicherung der gefundenen Lösung mittels post-optimaler Analyse entwickelt.

Die Methodik wurde beispielhaft auf WSNs im Spezialmaschinenbau (Jenoptik Industrial Metrology Germany GmbH) sowie in der optischen Industrie (Carl Zeiss Vision GmbH) angewendet. Ein mittelständisches Unternehmen (flexis AG) prüft derzeit den Einsatz und die Integration der entwickelten Methodik in das eigene Produktportfolio. Ebenso wurden alle entwickelten Bestandteile der Methodik in Form eines Softwaredemonstrators, welcher detailliert durch einen Anwenderleitfaden beschrieben ist, umgesetzt. Die Ergebnisse ermöglichen es, das strategische Problem der dynamischen Allokationsplanung integriert mit der Anpassung des WSN zu optimieren und mittels Steigerung der Ergebnistransparenz detailliert zu analysieren. Sie weisen sowohl einen hohen wissenschaftlich-technischen Nutzen als auch einen hohen wirtschaftlichen Nutzen für KMU auf. Mit dem Forschungsprojekt ProdAlloPlan.net wurde ein innovativer Beitrag zur Allokationsplanung und Konfigurationsanpassung von WSN geleistet, wie diese allgemein im verarbeitenden Gewerbe vorzufinden sind.

### 3. Ausgangssituation und Problemstellung

Die Produktion in globalen WSN nimmt vor dem Hintergrund eines sich verschärfenden weltweiten Wettbewerbs und einer beschleunigten Globalisierung der Absatz- und Beschaffungsmärkte eine immer größere Rolle ein (Lanza et al. 2019). Mittlerweile sind WSNs für 80 % des globalen Handelsvolumens verantwortlich (United Nations Conference on Trade and Development 2013). Um möglichst kundenindividuelle und lokal angepasste Produkte marktnah zu erzielen, einen Wettbewerbsvorteil durch geringere Produktions- und Beschaffungskosten zu erhalten und Zugang zu lokalen Kenntnissen und Qualifikationen zu erlangen, haben bereits zahlreiche sowohl große als auch kleine und mittlere Unternehmen Produktionsstandorte im Ausland aufgebaut (Möller et al. 2011, Shi & Gregory 1998). Viele dieser Produktionsnetzwerke sind jedoch historisch gewachsen und nur selten das Ergebnis einer strategischen Planung (Jacob 2006). Die daraus entstandene Zusammenstellung von Produktionsstandorten ist in der Folge meistens nicht für zukünftige Herausforderungen aufgestellt (Christodoulou et al. 2007). Von Deutschland aus wurden hauptsächlich Auslandsinvestitionen in den Branchen Kraftwagen und Kraftwagenteile, Maschinenbau, Elektrotechnik, Optik und Medizintechnik getätigt (Bergs et al. 2020). Die strategische Steuerung und Gestaltung WSNs ist ein wichtiger Erfolgsfaktor für Produktionsunternehmen (Friedli, Mundt & Thomas 2014), stellt das Management jedoch vor hochkomplexe und kritische Aufgaben (Abele et al. 2008; Yeung & Coe 2014). Mit der Zunahme von zu bedienenden Kundenmärkten steigt die Zahl regional angepasster und individueller Produkte und Produktvarianten stark an (Seebacher & Winkler 2014). Gleichzeitig werden Produktlebenszyklen immer kürzer (Abele et al. 2008) und mit zunehmendem Wettbewerb verschärft sich der Kostendruck im produzierenden Gewerbe (Friedli, Mundt & Thomas 2014). Die Anforderung, Produktionsnetzwerke stetig an neue Nachfragesituationen und Rahmenbedingungen anzupassen, sowie Standortfaktoren wie geringe Lohnkosten oder Zugang zu gut ausgebildeten Fachkräften optimal zu nutzen, ist ständig gegeben (Lanza et al. 2019). Die entstehenden WSNs sind in der Folge gekennzeichnet durch vielfältige Liefer- und Leistungsverflechtungen zwischen den einzelnen unternehmensinternen Standorten sowie Standorten unternehmensexterner Akteure wie Zulieferer und Kunden. (Thomas 2013, Surbier et al. 2013). Es ergeben sich komplexe Fragestellungen bei der Zuordnung von Produkten zu Werken, der sogenannten Produktallokation (Wittek 2013), und der Gestaltung globaler Produktionsnetzwerke (Fleischmann, Ferber & Henrich 2006). Vor allem KMUs stoßen dabei auf Grund von limitierten Planungskapazitäten und Managementressourcen sowie fehlender Erfahrung bei der Optimierung ihrer Produktionsnetzwerke, an ihre Grenzen (Kinkel 2009, S. 25). Unkoordinierte, nicht umfassende Entscheidungen sind in diesen Unternehmen oftmals die Folge (Friedli, Mundt & Thomas 2014). Entscheidungsmodelle für Gestaltungs- und Allokationsaufgaben können die Planungssicherheit in Unternehmen erhöhen und bei der mittel- und langfristigen Planung unterstützen (Pinedo 2009; Kohler 2009).

## 4. Methodisches Vorgehen und Projektergebnisse

### 4.1 Projektziel

Ziel des Forschungsvorhabens **ProdAlloPlan.net** war es, eine KMU-gerechte Methodik zur effizienten Allokationsplanung von dynamischen Erweiterungen des Produktprogramms sowie deren Wechselwirkung mit der Anpassung von Strukturen und Kapazitäten globaler Wertschöpfungsnetzwerke zu entwickeln. Weiterhin sollten Analysemethoden entwickelt werden, die zu einer Erhöhung der Ergebnistransparenz sowie zur Identifikation von Produktionsengpässen und Maßnahmen zur weiteren Verbesserung beitragen. Es wurde folgender Projektzeitplan beantragt (siehe Abbildung 2):

		2019				2020				2021	
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2
<b>Analyse</b>											
AP 1	Produktionsorientierte Clusterung von Produktvarianten										
AP 2	Charakterisierung von Produktionsstrukturen und –kapazitäten										
<b>Modellierung</b>											
AP 3	Aufbau einer Wertschöpfungsnetzwerk-Optimierung unter Berücksichtigung relevanter Kosten										
<b>Bewertung</b>											
AP 4	Ableitung der optimalen Produktallokation und Anpassung des Wertschöpfungsnetzwerks										
<b>Handlungsempfehlungen</b>											
AP 5	Ergebnisumsetzung durch anwenderfreundlichen Softwaredemonstrator										
AP 6	Praxisleitfadenerstellung mit Regeln zur dynamischen Produktzuordnung im Wertschöpfungsnetzwerk										
<b>Projektmanagement</b>											
AP 7	Begleitendes Projektmanagement sowie Dokumentation und Veröffentlichung inklusive Schlussberichte										
Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA)											
		◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
		Kick-Off	M1	M2	M3	M4	M5				

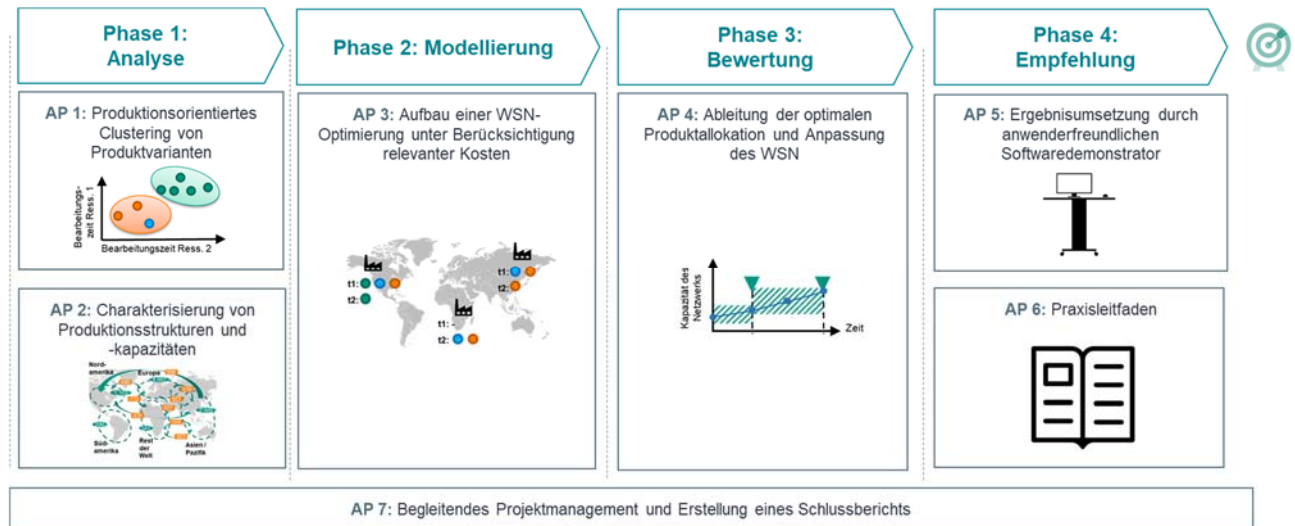
**Abbildung 2: Beantragter Projektplan inklusive kostenneutraler Verlängerung**

Entsprechend dem Projektplan wurden im Berichtszeitraum 2019 die Arbeitspakete AP 1 bis AP 5 und im Berichtszeitraum 2020 die Arbeitspakete AP 3 bis AP 6 bearbeitet. Hinzu kamen organisatorische Maßnahmen im Rahmen des Projektmanagements in AP 7.

Die Projektlaufzeit verlängerte sich aufgrund von Schwierigkeiten bei der kurzfristigen Einstellung von wissenschaftlichem Personal zu Projektbeginn um sechs Monate. Daher wurde ein weiteres Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses für das Ende des erweiterten Projektplans angesetzt (vgl. Abbildung 2). Die Erreichung der gesetzten Ziele änderte sich dadurch nicht.

## 4.2 Methodische Vorgehensweise

Die wissenschaftliche Vorgehensweise zur Erreichung der beschriebenen Projektziele gliedert sich in sieben Arbeitspakete (AP), die im Folgenden detailliert beschrieben werden. Abbildung 3 zeigt dabei den Zusammenhang der Arbeitspakete, die sich neben dem Projektmanagement in vier Phasen gliedern lassen.



**Abbildung 3: Arbeitsprogramm des Forschungsprojekts ProdAlloPlan.net**

In Arbeitspaket 1 (AP 1) sollte eine partitionierende Methode zum Clustering von Produktvarianten für die Allokationsplanung entwickelt werden. In AP 2 sollte eine Methode zur strukturierten Charakterisierung existierender und potenzieller Netzwerkobjekte erarbeitet werden. Dadurch wurde ein umfassendes Verständnis über die bestehenden Produktionsstrukturen und -kapazitäten geschaffen und zulässige, standortspezifische Produktionstechnologien und -kosten berücksichtigt. Die erhaltene Datenstruktur dient als Grundlage für die Optimierung des WSNs in AP 3, in dem auf AP 1 und 2 aufbauend ein Modell zur Optimierung der Produktallokation und Anpassung des WSNs entwickelt wurde. Dabei mussten der gültige Handlungsspielraum bzw. die zu berücksichtigenden Restriktionen identifiziert und modelliert werden. Abschließend waren die für die Optimierung relevanten Zielkriterien zu analysieren und ebenfalls in das Modell zu übertragen.

In AP 4 wurde auf Basis des Optimierungsmodells aus AP 3 eine Methodik zur Ermittlung der Strategie zur optimalen Produktallokation und Anpassung des WSNs entwickelt. Hiermit sollten insbesondere Produktionsengpässe frühzeitig identifiziert sowie Potentiale zur Lösungsverbesserung mittels Schlupf- und Schattenpreisanalysen bestimmt werden. Zudem sollte innerhalb von Arbeitspaket 4 eine Methode zur Absicherung der gefundenen Lösung entwickelt werden.

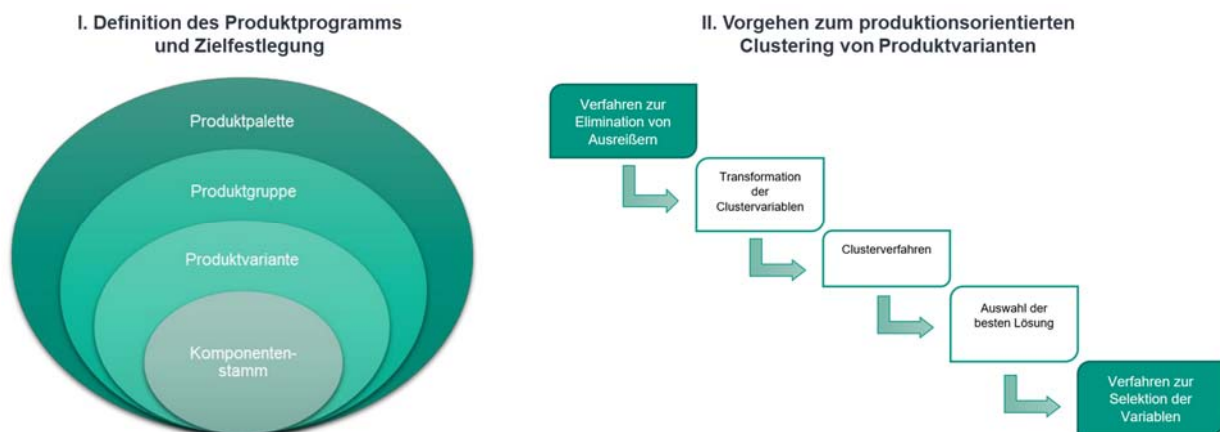
In AP 5 galt es ein Tool zur unternehmensindividuellen Ableitung von Handlungsempfehlungen zu entwickeln, wodurch die praxistaugliche Entscheidungsunterstützung insbesondere für KMU sichergestellt wird. Hierzu sollte ein bedienfreundlicher Software-Demonstrator entwickelt werden, der es auch KMU außerhalb des Projektbegleitenden Ausschusses ermöglicht, die zuvor entwickelten Methoden zu verwenden. In AP 6 sollten die Projektergebnisse anschließend in einem detaillierten Praxisleitfaden zusammengefasst werden, mithilfe dessen die entwickelte



Methodik auch zukünftig durch Unternehmen angewandt werden kann. Das AP 7 beschreibt das begleitende Projektmanagement, welches über die gesamte Projektlaufzeit durchgeführt werden sollte. Die durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete werden im Folgenden detailliert erläutert.

#### 4.3 AP 1: Produktionsorientierte Clustering von Produktvarianten

Ziel von AP 1 war es, eine partitionierende Methode zum Clustering von Produktvarianten für die Allokationsplanung zu entwickeln. Dabei sollten übertragbare Kriterien entstehen, mit deren Hilfe Variantencluster gebildet werden können.



**Abbildung 4: Vorgehen zum produktionsorientierten Clustering von Produktvarianten**

▪ Durchgeführte Arbeiten:

In enger Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses wurde zur Erreichung der Zielsetzung ein Konzept zum produktionsorientierten Clustering von Produktvarianten entwickelt. Das Konzept ist in 4 Schritte gegliedert.

(1) Bevor Produktvarianten hinsichtlich ihrer Anforderungen an die Produktion untersucht werden konnten, wurde das relevante Produktprogramm je Unternehmen identifiziert. Geplante Erweiterungen des Variantenspektrums wurden berücksichtigt, da damit einhergehende Veränderungen eine große Auswirkung auf das Clustering sowie die Optimierung haben können.

(2) Im Rahmen der Auswahl und Transformation von Clustervariablen wurden durch Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses folgende Erkenntnisse gewonnen: In klassischen WSN lassen sich Produktvarianten insbesondere hinsichtlich ihrer Anforderungen an die Produktion charakterisieren, nämlich in Form von erforderlichen Prozessschritten, Zulieferprozessen sowie Kapazitätsbedarfen je Produktionstechnologie. Für einige Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses stellte außerdem die Rückführung und Wiederaufbereitung von Produkten sowie die damit einhergehende Allokationsplanung eine große Herausforderung dar. Für diesen Fall sind weitere Produktmerkmale zu berücksichtigen, die eine Differenzierung und somit ein Clustering der Produktvarianten zulässt. Hierzu zählen beispielsweise die Qualität, das Alter, verwendete Verbindungstechniken sowie enthaltene Gefahrenstoffe. Aufgrund der unterschiedlichen Messniveaus und der unterschiedlichen Skalen war eine Transformation der Variablen notwendig, um die Vergleichbarkeit beim Clustering sicherstellen zu können.

(3) Das implementierte Cluster-Verfahren basiert auf dem sogenannten *K-Means-Verfahren*. Hierbei werden Clusterzentren als Repräsentanten definiert und anschließend Objekte entsprechend ihrer minimalen quadrierten euklidischen Distanz zu einem dieser Clusterzentren zugeordnet. Anschließend wird in einem iterativen Vorgehen die initiale Lösung schrittweise verbessert. Dieses Vorgehen wird für unterschiedlich vorgegebene Anzahlen an Clustern wiederholt, um schließlich mittels *Silhouette-Index* die beste Lösung auszuwählen.

(4) Mittels optionaler Erweiterungsmöglichkeiten ist es den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses außerdem möglich, die entwickelte Clustermethode an unternehmensindividuelle Anforderungen anzupassen. Dabei wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens insbesondere Ausreißer-Tests sowie eine Selektion der relevantesten Variablen untersucht. Ausreißer-Tests wie der untersuchte *Grubbs-Test* unterstützen Clustermethoden dabei, zuverlässigere und bessere Ergebnisse zu erzielen, indem Ausreißer systematisch ausgeschlossen werden. Dieser Schritt wird dem Verfahren optional vorangestellt. Bei der *Selektion von Variablen* ist es außerdem möglich, eine existierende Clusterlösung durch die Reduktion ihrer Variablen zu verbessern. Eine geringe Anzahl an Variablen ist für Clusteralgorithmen in der Regel effektiver, da irrelevante Variablen das Ergebnis nur unnötig verzerren würden. Dieser Schritt findet optional nach dem eigentlichen Clusterverfahren statt.

- **Erzielte Ergebnisse:**

Entsprechend der Zielsetzung wurde im Rahmen von Arbeitspaket 1 eine Methodik zum produktionsorientierten Clustering von Produktvarianten entwickelt. Eine exemplarische Anwendung der Methode erfolgte am Beispiel eines Spezialmaschinenbauers für industrielle Messtechnik. Auf eine KMU-Tauglichkeit der Vorgehensweise wurde besonderen Wert gelegt.

#### 4.4 AP 2: Charakterisierung von Produktionsstrukturen und –kapazitäten

Ziel von AP 2 war es, eine Methode zur strukturierten Charakterisierung existierender und potenzieller Netzwerkobjekte zu erarbeiten. Dadurch wurde ein umfassendes Verständnis über die bestehenden Produktionsstrukturen und -kapazitäten geschaffen und zulässige, standortspezifische Produktionstechnologien und -kosten berücksichtigt. Die erhaltene Datenstruktur dient als Grundlage für die Optimierung des WSNs in AP 3.

- **Durchgeführte Arbeiten:**

Zur Erreichung der Zielsetzung von Arbeitspaket 2 wurden in Zusammenarbeit mit den Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses mehrere Arbeitstreffen durchgeführt.

Neben allgemeingültigen Informationen wie der Anzahl und geographischen Verteilung der Unternehmensstandorte waren je nach Unternehmen weitere Informationen notwendig. Beispielsweise wurden auch Fähigkeiten und Kapazitäten eines Produktionsstandortes als relevant eingestuft. Zu einer ganzheitlichen Betrachtung globaler WSN waren außerdem Informationen bezüglich der Kostenstruktur eines Standortes notwendig, also beispielsweise hinsichtlich direkter und indirekter Kosten. Außerdem variieren die Arbeitskräfteproduktivität sowie die Qualitätsausbringung je Standort, was berücksichtigt werden musste. Hinzu kommen Investitions- sowie Desinvestitionskosten für die Beschaffung bzw. den Verkauf von

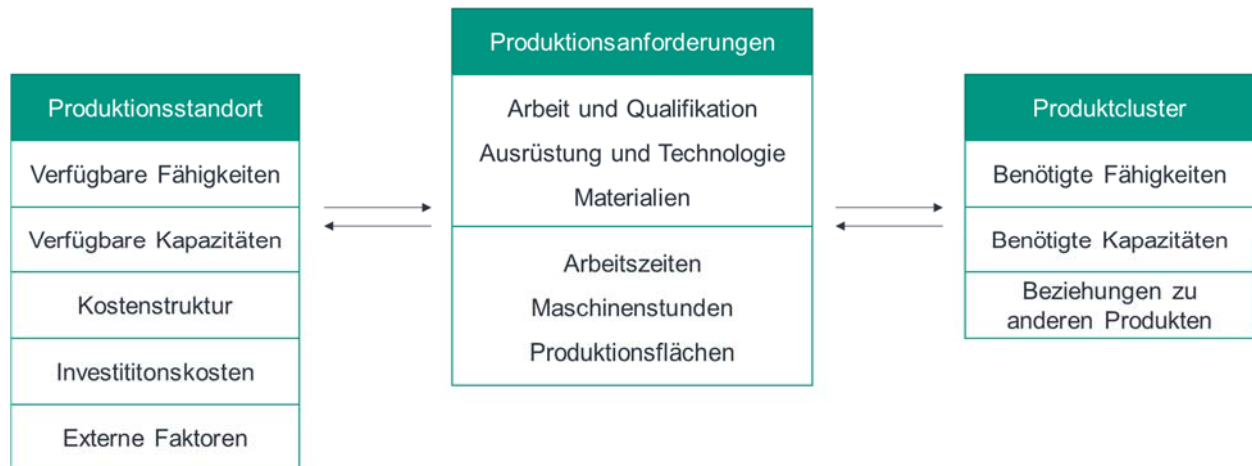
Produktionstechnologien oder gar die Eröffnung oder Schließung von Standorten. In den Diskussionen mit den Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses hat sich außerdem herausgestellt, dass weitere externe Faktoren Berücksichtigung finden mussten, beispielsweise das prognostizierte Marktwachstum, die Inflation oder politische Faktoren.

Bezüglich der zu produzierenden Produkte sowie der zu bedienenden Märkte waren ebenfalls unternehmensindividuelle Anforderungen zu berücksichtigen. Allgemein können die im Rahmen von AP 1 erarbeiteten Produktcluster genutzt werden, um die Planungskomplexität zu reduzieren und Produkte gruppiert hinsichtlich ihrer Anforderungen an die Produktion zu betrachten. In den Diskussionen mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses bestätigte sich, dass die *Bill of Materials* (BoM) ein nützliches Werkzeug darstellt, um die anschließenden Beziehungen und Zusammenhänge zwischen Produktclustern und dem Produktionsprozess über verschiedene Standorte hinweg zu analysieren. Hinsichtlich der zu bedienenden Märkte ergaben sich wiederum allgemeingültige sowie unternehmensindividuelle Anforderungen, die es zu berücksichtigen galt, beispielsweise die Nachfrage je Produktvariante oder der Verkaufspreis.

Die Zuliefererstruktur stellte einen weiteren Aspekt dar, den es zu berücksichtigen galt. Auch hier war zunächst der Ist-Zustand zu analysieren, das heißt der aktuelle Zulieferprozess wurde untersucht. Hierbei war beispielsweise relevant, welche Komponenten und Materialien von welchen Zulieferern bezogen werden, wie die Preis- und Kostenstruktur der jeweiligen Zulieferer aussieht und ob die unternehmenseigenen Standorte selbst für ihre Belieferung zuständig sind oder diese unternehmensweit einheitlich geregelt wird. Außerdem wurden potenzielle Anpassungsmaßnahmen untersucht, wie beispielsweise die *in-house*-Fertigung, potenzielle neue Zulieferer oder die Unterstützung bei der Weiterentwicklung von bestehenden Zulieferern. Insbesondere der letzte Punkt ist häufig bei qualitätskritischen Bauteilen von Relevanz und wurde daher ebenfalls als Option aufgeführt.

Die Verknüpfung aller zuvor identifizierten und analysierten Elemente eines WSNs wurde im letzten Schritt mittels Transportverbindungen vorgenommen. Hierbei waren sowohl die aktuellen und verfügbaren Transportmodi (LKW, Zug, Schiff, Flugzeug) als auch die zugehörigen Kosten je Transportmodus von vorrangiger Bedeutung. Hinzu kommen Steuern und Zölle. In einem Unternehmen aus dem projektbegleitenden Ausschuss waren außerdem die sogenannten *Local Content*-Anforderungen relevant, das heißt, dass ein bestimmter Anteil der Wertschöpfung in einem bestimmten Land allokiert werden muss, da ansonsten die Produkte in diesem Land nicht verkauft werden dürfen. Auch diese Anforderungen wurden analysiert und können je nach Bedürfnissen in der Modellierung berücksichtigt werden.

Für beteiligte Unternehmen wurden die aufgezählten Informationen nach individueller Relevanz gesammelt und in eine einheitliche und konsistente Datenbasis überführt.



**Abbildung 5: Vorgehen zur Charakterisierung der Produktionsstrukturen und -kapazitäten**

- **Erzielte Ergebnisse:**

Im Rahmen von Arbeitspaket 2 wurde entsprechend der Zielsetzung eine Methode zur strukturierten Charakterisierung existierender und potenzieller Netzwerkobjekte erarbeitet. Die Methode wurde exemplarisch am Beispiel eines Spezialmaschinenbauers angewendet. Hierdurch konnten relevante Informationen über das WSN gesammelt und transparent dargestellt werden. Die Vorgehensweise wurde somit insbesondere auf eine KMU-Tauglichkeit hin überprüft.

#### 4.5 AP 3: Aufbau einer Wertschöpfungsnetzwerk-Optimierung unter Berücksichtigung relevanter Kosten

Ziel von AP 3 war es, die Ergebnisse der vorherigen Arbeitspakete zu nutzen, um ein Modell zur Optimierung der Produktallokation und der Anpassung des WSNs zu entwickeln. Dabei musste der gültige Handlungsspielraum in Form zu berücksichtigender Restriktionen identifiziert und modelliert werden. Abschließend waren die für die Optimierung relevanten Zielkriterien zu analysieren und ebenfalls in das Modell zu übertragen.

- **Durchgeführte Arbeiten:**

Zum Aufbau einer WSN-Optimierung wurde ein vierstufiger Prozess durchgeführt, welcher auf die unternehmensindividuellen Anforderungen des Projektbegleitenden Ausschusses angepasst wurde. Der gesamte Prozess baut auf der Analyse und Charakterisierung der Produktionsstrukturen sowie dem Clustering der Produkte aus den vorherigen Arbeitspaketen auf.

(1) Die Formulierung von Annahmen ist relevant, um den Betrachtungshorizont sowie die möglichen Entscheidungen der Optimierung festzulegen. Zunächst wurde der relevante Planungshorizont festgelegt. Für diesen muss gelten, dass die Menge der betrachteten Eingangsdaten und Parameter deterministisch und bekannt sind. Des Weiteren wird

angenommen, dass Allokationsentscheidungen lediglich im variantenspezifischen Bereich der Produktion von Relevanz sind. Je nach Unternehmensanforderungen kann außerdem angenommen werden, dass der Produktionsprozess zyklensfrei und konvergierend ist. Diese Annahme muss jedoch verworfen werden, wenn *Produkt rückflüsse* berücksichtigt werden, da dadurch Zyklen entstehen.

(2) Im Rahmen der Modellierung wurde zunächst ein gedankliches Modell entwickelt, welches anschließend als mathematisches Modell formuliert wurde. Hierzu wurde das WSN sowie die notwendigen Entscheidungsvariablen und Parametern modelliert. Parameter beschreiben exogen vorgegebene Daten, während Entscheidungsvariablen den Freiheitsgraden der Unternehmen für die Optimierung entsprechen. Auf Basis von Diskussionen mit Vertretern des Projektbegleitenden Ausschusses wurden die gesammelten Informationen aus den vorherigen Arbeitspaketen in ein mathematisches Modell überführt. Dabei wurde analog zum Vorgehen in Arbeitspaket 1 folgende Unterscheidung vorgenommen: In klassischen WSN sind insbesondere die Produktions- sowie Distributionsstandorte von Relevanz. In WSN, in welchen zusätzlich die Allokation von Altprodukten zur Wiederaufbereitung auf die verschiedenen Standorte berücksichtigt werden sollte, mussten hingegen Sammel- und Wiederaufbereitungsstandorte besonders detailliert modelliert werden.

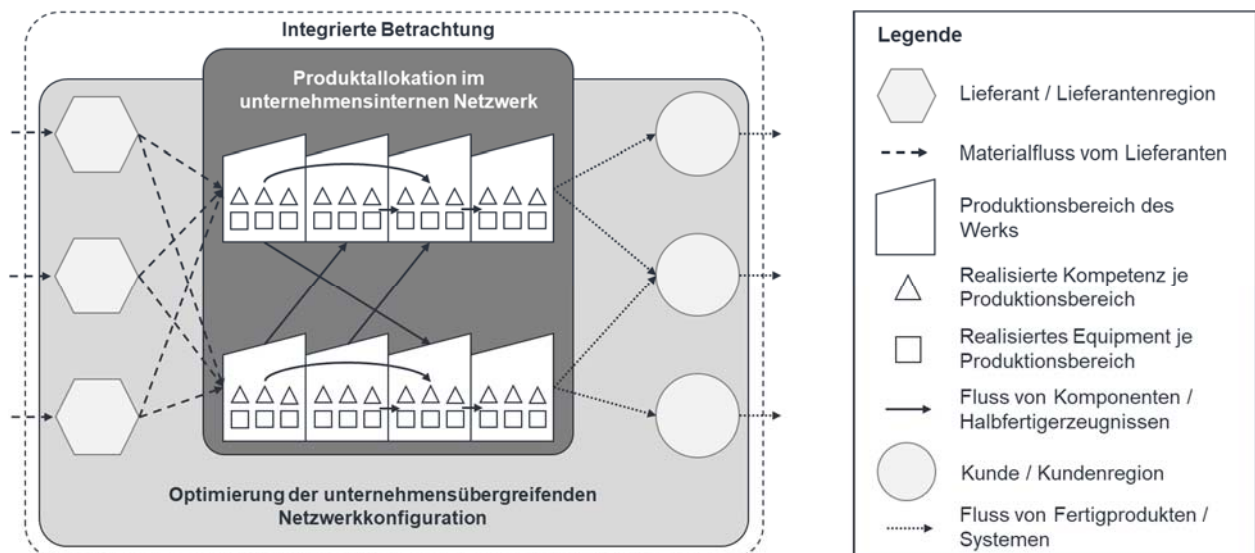
(3) Durch die Modellierung einer Zielfunktion wurde die Optimierungsrichtung festgelegt. Die einfachste Form der Zielfunktion ist hierbei die Minimierung der Gesamtkosten bzw. die Maximierung des Unternehmensgewinns, da hierdurch lediglich ein Kriterium berücksichtigt wird, welches in quantitativer Form vorliegt. Durch Sachverständigenworkshops wurden weitere relevante Zielkriterien identifiziert und hinsichtlich ihrer Relevanz analysiert.

(4) Die anschließend modellierten Nebenbedingungen stellen die relevanten Restriktionen dar, die in einem Netzwerk bestehen. Diese reichen von technisch notwendigen Restriktionen wie beispielsweise der sogenannten „Flusserhaltung“ bis hin zu inhaltlich optionalen Restriktionen wie beispielsweise der Einhaltung eines maximalen Lagerbestands. Dadurch wird der Lösungsraum des Optimierungsproblems mittels mathematischer Funktionen definiert und zentrale Restriktionen und Abhängigkeiten werden wiedergegeben. Durch Workshops mit Vertretern und Vertreterinnen aus dem Projektbegleitenden Ausschuss wurden sowohl allgemeingültige Restriktionen als auch unternehmensindividuelle und situationspezifische Restriktionen identifiziert, die anschließend in die Modellierung aufgenommen wurden.



**Abbildung 6: Vorgehen zum Aufbau einer Wertschöpfungsnetzwerk-Optimierung**

Zum Aufbau der Netzwerk-Optimierung wurde der zuvor beschriebene vierstufige Prozess (Annahmen formulieren als ersten Schritt und anschließend wie in Abbildung 6 gezeigt) anschließend durchgeführt. Der gesamte Prozess baut auf der Analyse und Charakterisierung der Produktionsstrukturen sowie dem Clustering der Produkte aus den vorherigen APs auf. Die Struktur des entwickelten Optimierungsmodells ist in Abbildung 7 veranschaulicht.



**Abbildung 7: Integrierte Betrachtung von Produktallokation & Netzwerkkonfiguration**

Einerseits erfolgt die Betrachtung des unternehmensinternen Netzwerks mit allen relevanten Ressourcen, Werken und Transportverbindungen. Andererseits wurden die Kunden- und Lieferantenseite mit in den Evaluationsprozess einbezogen, um eine ganzheitliche, integrierte Optimierung aller entscheidungsrelevanten Prozesse zu gewährleisten. Das Modell berücksichtigt eine Menge von Planungsperioden, die sich über einen frei wählbaren Zeitraum erstrecken können. Abhängig der zu beantwortenden Fragestellung und des industriellen Umfelds deckt das Modell sowohl Zeiträume von einigen Monaten als auch mehreren Jahren ab. Damit ist, basierend auf Workshops mit Vertretern und Vertreterinnen des Projektbegleitenden Ausschusses, eine flexible Nutzung des Optimierungsmodells gewährleistet.

Ein Initialzustand (z. B. bereits geöffnete Werke) des WSN wird im Modell berücksichtigt. Werke können im Betrachtungshorizont an vorher festgelegten Orten geöffnet oder geschlossen werden. Typischerweise wird ein Produktionsprozess in Modellen mit langfristigem Planungshorizont auf derjenigen Produktionsebene betrachtet, auf der der Verlauf der Wertschöpfung räumlich nicht verlassen werden kann. Im entwickelten Modell erfolgt die Betrachtung der Prozessschritte also auf Segmentebene. Basierend auf Diskussionen mit Vertretern und Vertreterinnen des Projektbegleitenden Ausschusses haben sich insbesondere manuelle Montageprozesse als kritisch herausgestellt, weshalb der Fokus der Modellierung auf diesen liegt. Eine (Teil-) Automatisierung einzelner Prozessschritte im Planungshorizont wird daher ausgeschlossen. Daher werden im Optimierungsmodell auch keine unterschiedlichen Produktionstechnologien für Prozesse untersucht.

Jedem Werk im WSN werden Segmente und Ressourcen in Form von Arbeitskräften zugeordnet. Die Konfiguration von Segmenten und Ressourcen kann für aktuelle und künftige Endprodukte neu eingestellt werden. Nachfrage-Knoten repräsentieren Kundenzentren und benötigen Endprodukte. Dem Modell wurde eine deterministische Nachfrage zugrunde gelegt, um die Komplexität beherrschbar zu halten. Die Werke innerhalb des WSN arbeiten nach einer Make-to-Order oder Engineer-to-Order Auftragserfüllung, sodass Lagerzentren bzw. -bestände von der Betrachtung ausgeschlossen sind. Rohmaterial und Komponenten, die nicht in Eigenfertigung produziert werden, werden von Lieferanten-Knoten geliefert. Die Kapazität der Lieferanten ist beschränkt und das Modell wählt jeweils die beste Ressourcenquelle aus.

Jedem Werk können ein oder mehrere Segmente zugeordnet werden, jedoch ist das Platzangebot beschränkt. Segmente können Montagelinien oder einzelne Montagestationen

darstellen. Die Arbeitsschritte im Montageprozess erfordern i. d. R. spezielles Know-how. Arbeitskräfte sind daher Spezialisten bzw. Spezialistinnen und es kann schwierig sein, diese auf speziellen Arbeitsmärkten zu finden. Daher zählen sie im Unternehmen zu strategischen Ressourcen und deren Einstellung muss umsichtig geplant werden. Alle Arbeitskräfte sind innerhalb ihrer Qualifikation flexibel einsetzbar und daher keinen speziellen Arbeitsplätzen zugeordnet. Sich einander substituierende Ressourcen mit vergleichbarer Qualifikation werden zu Ressourcengruppen zusammengefasst, um die Modellkomplexität zu reduzieren. Ressourcengruppen, die keine Relevanz für den Produktionsprozess aufweisen oder kostengünstig beschafft werden können, wurden vernachlässigt.

Zur Berücksichtigung der relevanten Kosten wurde die Minimierung der Gesamtkosten als primäres Zielkriterium in einem multikriteriellen Bewertungsmodell definiert. Hierzu zählen bspw. variable und fixe Kosten für den operativen Betrieb sowie Rekonfigurationskosten für Netzwerkanpassungen, aber auch Kosten zum Vorhalten von Flexibilität, bspw. in Form externer Kapazitäten. Weitere Zielkriterien wurden in Workshops mit Vertretern und Vertreterinnen des Projektbegleitenden Ausschuss identifiziert und umfassen etwa die Maximierung der Kundennähe oder die Minimierung von Nacharbeit.

- **Erzielte Ergebnisse:**

Im Rahmen von AP 3 wurde gemäß der Zielsetzung ein Modell zur Optimierung der Produktallokation und der Anpassung des WSNs unter Berücksichtigung relevanter Kosten sowie verschiedener Zielkriterien entwickelt und implementiert. Das Modell wurde exemplarisch am Beispiel eines Spezialmaschinenbauers validiert, um die grundsätzliche Anwendbarkeit zu zeigen. Die Vorgehensweise wurde so insbesondere auf eine KMU-Tauglichkeit hin überprüft.

#### 4.6 AP 4: Ableitung der optimalen Produktallokation und Anpassung des Wertschöpfungsnetzwerks

Ziel von Arbeitspaket 4 war es, auf Basis des Optimierungsmodells aus AP 3 eine Methodik zur Ermittlung der Strategie zur optimalen Produktallokation und Anpassung des WSNs zu entwickeln. Hiermit sollten insbesondere Produktionsengpässe frühzeitig identifiziert sowie Potentiale zur Lösungsverbesserung mittels Schlupf- und Schattenpreisanalysen bestimmt werden. Zudem sollte innerhalb von Arbeitspaket 4 eine Methode zur Absicherung der gefundenen Lösung entwickelt werden.

- **Durchgeführte Arbeiten:**

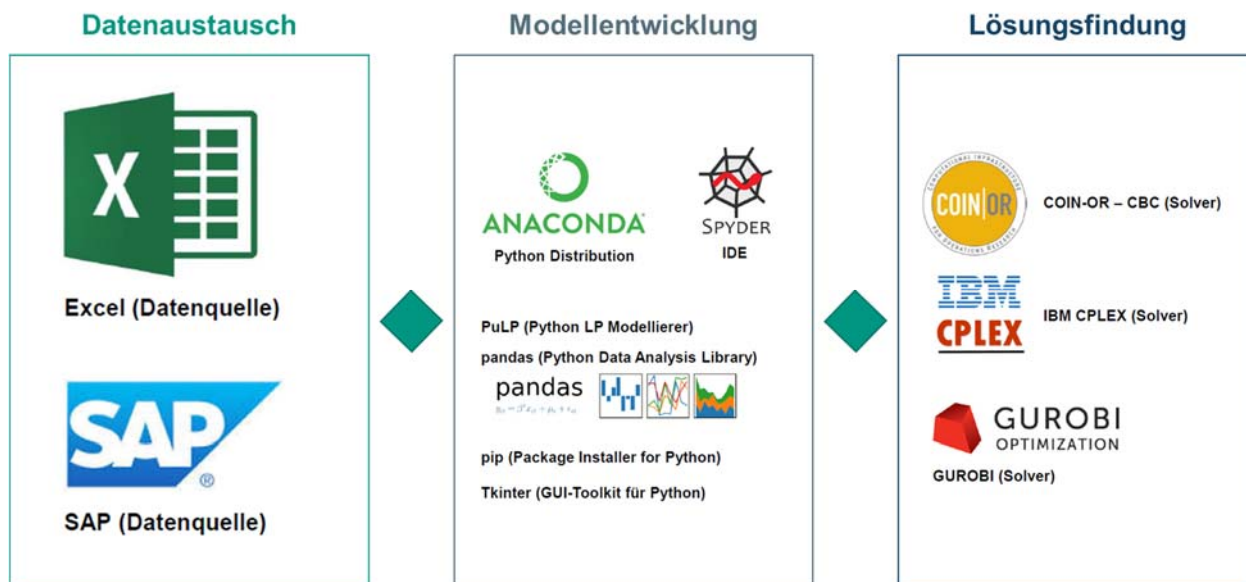
Zunächst wurden verschiedene Software-Lösungen analysiert. Zur Sicherstellung der KMU-tauglichkeit der Methode mussten die Aspekte Datenaustausch, Modellentwicklung und Lösungsfindung aufeinander abgestimmt und mit offenen Schnittstellen versehen werden.

Für den Datenaustausch musste beachtet werden, dass sowohl Daten aus Microsoft Excel, aber auch aus weiteren Datenquellen wie SAP importiert werden können. Ebenso musste ein entsprechender Ergebnis-Export ermöglicht werden.



Für die Modellentwicklung wurde ein modulares und flexibles Modell entwickelt. Außerdem wurde bereits in dieser Phase beachtet, dass die später folgende Entwicklung einer Bedienoberfläche berücksichtigt wird.

Bezüglich der Modellierung und Lösungsfindung wurde zunächst auf die Software IBM ILOG CPLEX zurückgegriffen. Die genutzten Programme zur Umsetzung dieser Anforderungen sind in Abbildung 9 zu sehen.



**Abbildung 8: Anforderungen an die Methode zur Allokations- und Netzwerkoptimierung**

Neben den zuvor identifizierten und analysierten, KMU-tauglichen Software-Lösungen wurde ein effizientes Lösungsverfahren zur Verbesserung der Rechenperformance erarbeitet, das das Optimierungsmodell aus AP 3 ergänzt. Um die Anwendbarkeit des Modells auf große Modellinstanzen in annehmbarer Rechenzeit zu ermöglichen, wurde ein zweistufiges Verfahren angewendet. Hierbei wurde zunächst mittels des sogenannten Dynamic Search-Algorithmus eine Ausgangslösung identifiziert, die einen „Warmstart“ des daran angeschlossenen Branch&Cut-Verfahrens ermöglicht. Sowohl Dynamic Search als auch Branch&Cut basieren auf den gleichen Grundsritten: Anfangs erfolgt eine Relaxation des gemischt-ganzzahligen, linearen Optimierungsmodells (MILP) gefolgt von der Aufteilung des Gesamtproblems in Teilprobleme mit anschließendem Einfügen von Schnittebenen. In Dynamic Search werden verschiedene Heuristiken im Lösungsverlauf eingesetzt, sodass gute, zulässige Lösungen schneller gefunden werden können als mit dem Branch&Cut-Verfahren. Trotz der Tatsache, dass durch eine Anwendung die objektive Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Optimierungsläufen erschwert wird, findet Dynamic Search häufig Anwendung und wurde auch hier verwendet.

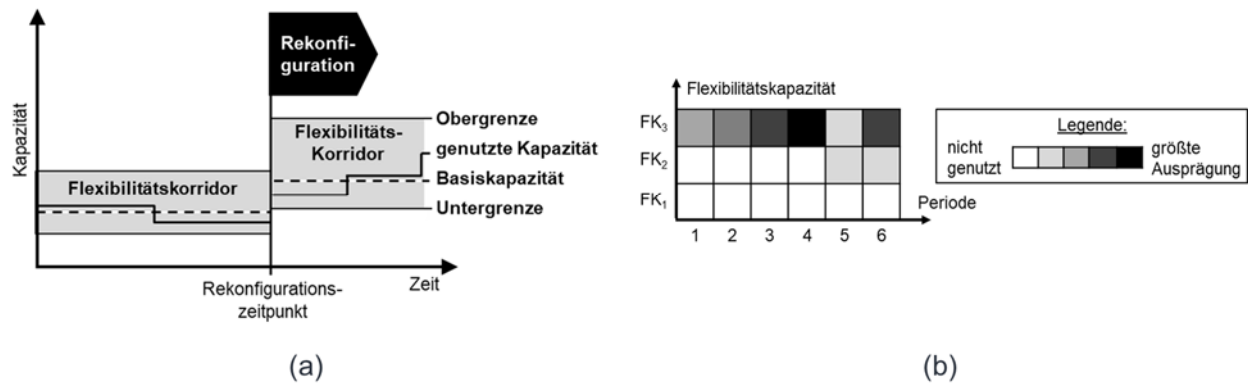
Wie aus der Literatur bekannt, kann zwischen den Zielfunktionswerten des relaxierten Problems und des MILP eine Ganzzahligkeitslücke (GAP) auftreten. Der optimale Zielfunktionswert des relaxierten Problems kann dabei als untere Schranke für den Zielfunktionswert des minimierenden MILP angesehen werden. Wenn die Ganzzahligkeitslücke hinreichend klein ist, gilt die ganzzahlige Lösung als optimal. Im entwickelten Lösungsverfahren wurde nach Festlegung der GAP das Optimierungsmodell initialisiert. Dazu gehörte insbesondere die Erzeugung des implementierten Modells inklusive aller Parameter, Variablen, Nebenbedingungen und der Zielfunktion. Im fertigen Modell findet demnach das Dynamic Search-Verfahren Anwendung, bis eine relative GAP unterhalb eines Schwellwerts erreicht wird. Die



gefundene Lösung wird dann als Aufsattpunkt für einen „Warmstart“ des Branch&Cut-Verfahrens eingesetzt. Die Höhe des Abbruchkriteriums in Form der relativen GAP sollte dabei kleiner als eine mögliche Veränderung des Zielfunktionswertes durch umfassende Strukturanpassungen gewählt werden. Dadurch kann ausgeschlossen werden, dass solche Strukturanpassungen im Verlauf der Optimierung unberücksichtigt bleiben.

Zur Identifikation und Bewertung weiteren Verbesserungspotentials sowie zur frühzeitigen Identifikation von Produktionsengpässen wurde in Zusammenarbeit mit den Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses ein post-optimales Analyseverfahren entwickelt. Hierbei fand zunächst eine spezielle LP-Relaxation des ursprünglichen Problems statt, in dem strukturgebende Entscheidungsvariablen zuvor fixiert werden, sodass die optimale Lösung des speziell relaxierten Problems möglichst nahe an der des Ursprungsproblems liegt. Anschließend wurden speziell die mit Struktur- und Kapazitätsentscheidungen verbundenen Nebenbedingungen betrachtet, durch deren Modifikation im Rahmen der Schlupf- und Schattenpreisanalyse weiteres Verbesserungspotential resultieren kann. Eine positive *Schlupfvariable* einer Nebenbedingung impliziert, dass ein Überschuss der zugehörigen Kapazität abgebaut werden kann, ohne dass die bisherige Lösung beeinflusst wird. Für die monetäre Bewertung einer solchen Anpassung über mehrere Perioden gilt es den minimalen Überschuss an Kapazitätseinheiten unter Berücksichtigung der restlichen Nebenbedingungen zu finden. In Abhängigkeit der betrachteten Anpassungsmaßnahme müssen ggfs. zusätzlich anfallende Kosten in die Berechnung einbezogen werden, die für die Reduktion der Kapazitätseinheiten anfallen. Ein *Schattenpreis* hingegen zeigt das Verhalten des Zielfunktionswertes bei einer Erweiterung der zugrundeliegenden Kapazitätsnebenbedingung auf. Hieraus lässt sich die Bewertung potenzieller Kapazitätsanpassungen ableiten. In der Praxis gilt es analog zur Bewertung mittels Schlupfvariablen mögliche zusätzliche Umsetzungskosten für die Kapazitätserweiterung bei der monetären Bewertung der Anpassungsmaßnahme zu berücksichtigen.

Zuletzt stand in AP 4 die Entwicklung einer Methode zur Absicherung der gefundenen Lösung an, um die Intransparenz der Zusammenhänge zwischen entscheidungsrelevanten Parametern sowie falschen oder fehlerhaften, quantitativen Informationen zu reduzieren. Hierfür galt es relevante Informationen transparent für den Entscheider aufzubereiten und in den richtigen Kontext zu setzen. Hierzu werden Flexibilitätskapazitäten in Form sog. Flexibilitätskorridore sowie Rekonfigurationen genutzt, durch die die Lage und Breite der Korridore festgelegt wird (vgl. Abbildung 9a). Flexibilitätskorridore können dabei definiert werden als Bereiche des WSNs, in denen die Anpassung des Produktionsvolumens ohne Profitabilitätsverluste möglich ist.



**Abbildung 9: Visualisierung der Anpassungsaspekte**

Zur besseren Verständlichkeit wird die entwickelte Methode im Folgenden am Beispiel der Volumenflexibilität erläutert, wobei weitere Aspekte analog berücksichtigt werden können. Die periodenspezifisch genutzte Kapazität kann anhand der jeweiligen Entscheidungsvariablen ausgelesen werden. Die vorhandene Basiskapazität in Form der Einsatzzeit regulärer Ressourcen kann nun im Verhältnis zur genutzten Ressourcenkapazität dargestellt werden. Die Differenz zwischen den Kapazitätswerten entspricht der Nutzung von Flexibilitätsaspekten. Die periodenspezifische Unter-/Obergrenze des Korridors kann durch Abzug der maximal möglichen Unterstunden bzw. Addition der maximalen Nutzung von Überstunden oder externen Kapazitäten ermittelt werden.

Rekonfigurationen werden durch die Entscheidungsvariablen zur Anpassung von Netzwerkobjekten bzw. Ressourcen repräsentiert. Bei ganzzahlig definierten Variablen treten Rekonfigurationen im Fall eines Statuswechsels zwischen zwei Perioden auf. Um die Bedeutung einzelner Flexibilitätskapazitäten im Anwendungsfall zu verdeutlichen, kann der Grad ihrer Verwendung zusätzlich in einer Heatmap dargestellt werden (vgl. Abbildung 9b). Dabei wird die größte Ausprägung schwarz und der Wert Null weiß eingefärbt. Analog können die sich aus Schattenpreisen bzw. Schlupfvariablen ergebenden Verbesserungsmaßnahmen visuell dargestellt werden.

- **Erzielte Ergebnisse:**

In AP 4 wurde gemäß der Zielsetzung eine Methodik zur Ermittlung der Strategie zur optimalen Produktallokation und Anpassung des Netzwerks entwickelt. Zudem wurde eine Methode zur Absicherung der Lösung entwickelt. In Workshops mit Vertretern und Vertreterinnen des PA wurde das Vorgehen validiert und auf KMU-Tauglichkeit überprüft.

#### 4.7 AP 5: Ergebnisumsetzung durch anwenderfreundlichen Softwaredemonstrator

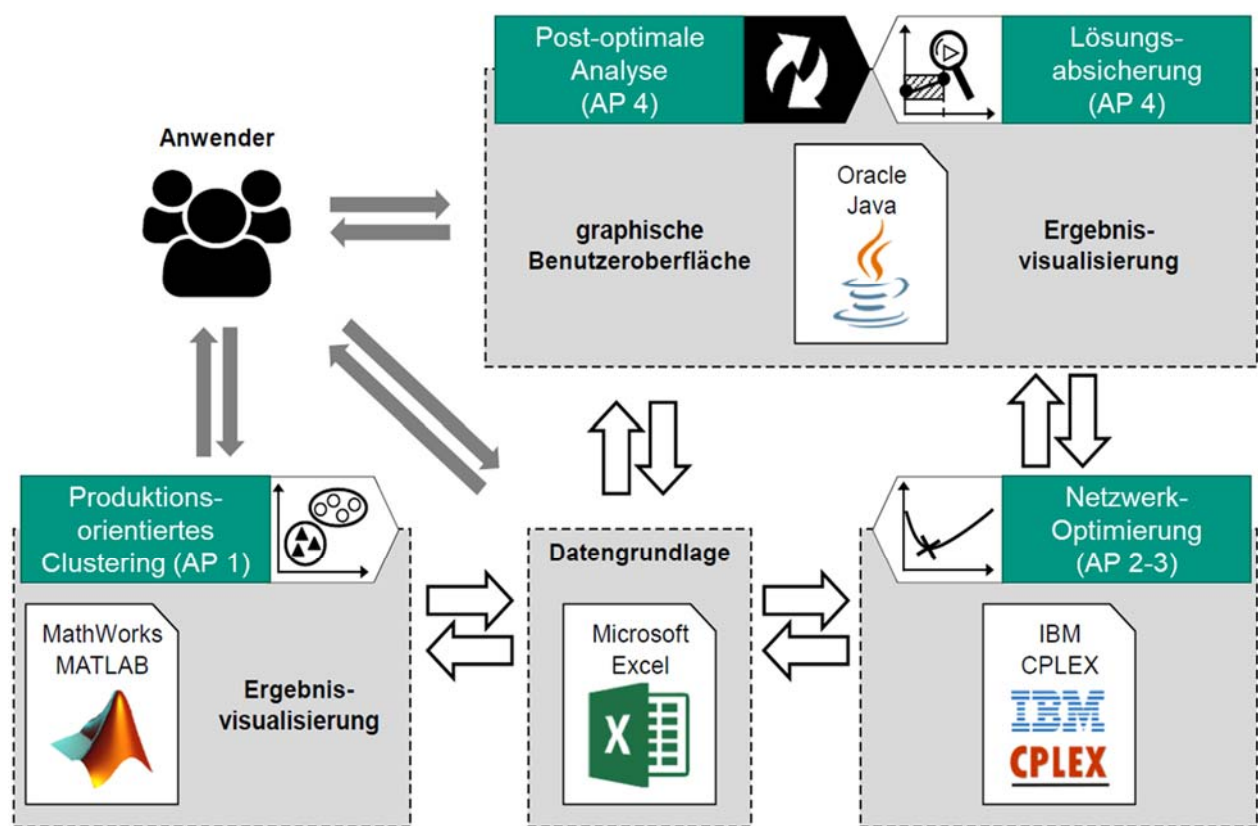
Ziel von Arbeitspaket 5 war es, ein Tool zur unternehmensindividuellen Ableitung von Handlungsempfehlungen zu entwickeln, wodurch die praxistaugliche

Entscheidungsunterstützung insbesondere für KMU sichergestellt wird. Hierzu sollte ein anwenderfreundlicher Softwaredemonstrator entwickelt werden, der es auch KMU außerhalb des projektbegleitenden Ausschusses ermöglicht, die zuvor entwickelten Methoden zu verwenden.

▪ Durchgeführte Arbeiten:

In AP 5 wurde auf Basis der Methodik zur Ermittlung der Strategie zur optimalen Produktallokation und Anpassung des WSN aus AP 4 ein Konzept eines anwenderfreundlichen Softwaredemonstrators entwickelt (s. Abbildung 10). In den vorangegangenen Arbeitspaketen wurde auf eine ausreichende Modularität der entwickelten Methoden sowie die Vorbereitung auf eine Umsetzung mittels grafischer Bedienoberfläche geachtet.

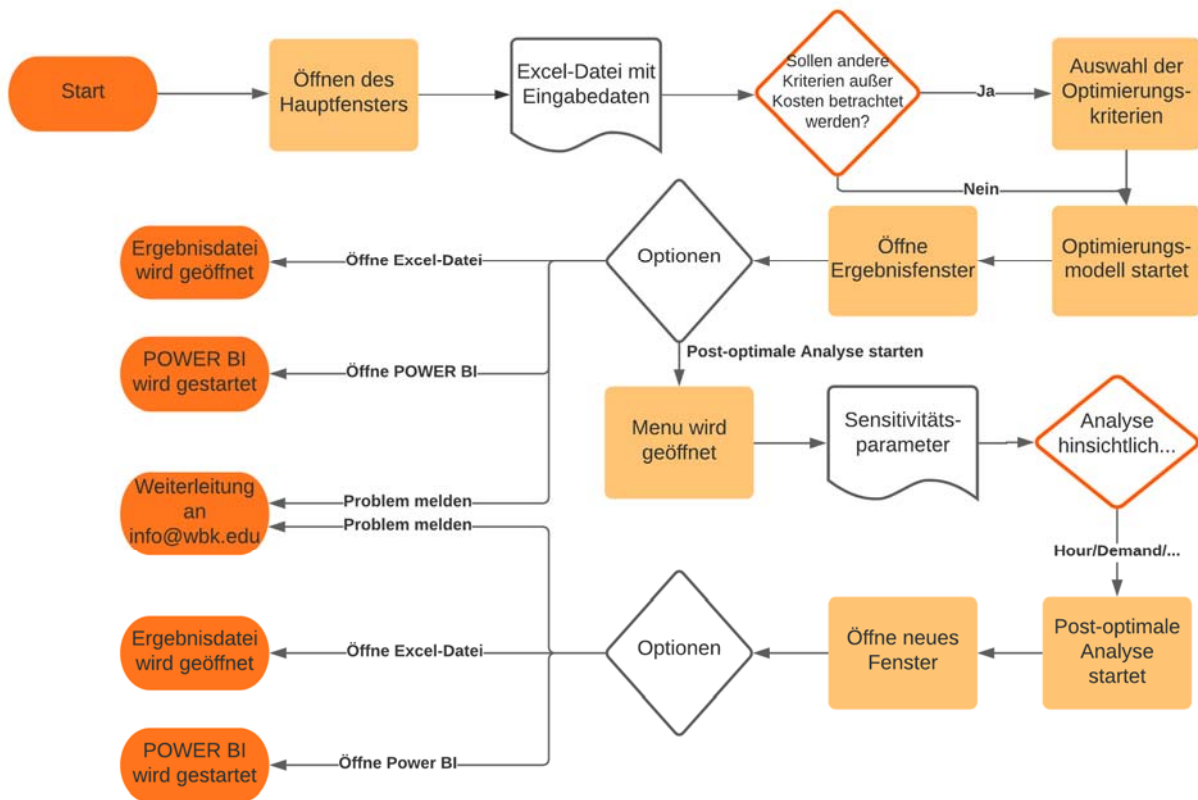
Mit Hilfe des Softwaredemonstrators sollte die Entscheidungsfindung bei der integrierten Allokationsplanung von Produktvarianten und die Konfigurationsanpassung globaler Produktionsnetzwerke unterstützt werden.



**Abbildung 10: Struktureller Aufbau des Softwaredemonstrators**

Der Softwaredemonstrator ist dabei wie folgt aufgebaut: Für den Datenaustausch können sowohl Daten aus Microsoft Excel, aber auch aus weiteren Datenquellen wie SAP importiert werden. Diese werden in MATLAB R2016a® eingelesen und geclustert. Für die Modellentwicklung wurde ein Optimierungsmodul mit Hilfe der Software IBM ILOG CPLEX erarbeitet. Für die Ergebnisvisualisierung und das Optimierungsmodul wurde als nächstes eine grafische Bedienoberfläche (GUI) realisiert. Diese ermöglicht neben Eingabe und Verarbeitung eine Ausgabe der Analyseergebnisse in Form einer Microsoft Excel-Datei, sodass eine Weiterverarbeitung der Ergebnisse einfach möglich ist. Die darüber hinausgehenden Funktionen sind in Abbildung 11 dargestellt, die aber insbesondere auch auf den Ablauf des Programms eingeht.

Der Softwaredemonstrator soll dazu dienen, die Komplexität des Modells und insbesondere der zu nutzenden Programme zu reduzieren und so die Nutzung einer breiteren Anzahl potenzieller Personen zu ermöglichen. Hierzu wurde er schlicht, übersichtlich und rein funktional gehalten.



**Abbildung 11: Ablauf und Funktionen des Softwaredemonstrators**

Auf der ersten Menüseite ist eine kurze Vorstellung des Projekts zu finden, anschließend erfolgen das Einlesen einer zuvor ausgefüllten Excel-Vorlage und die Auswahl der Zielkriterien. Wie vom Optimierungsmodell vorgesehen, wird immer hinsichtlich der Kosten optimiert. Ob zusätzlich bezüglich Kundennähe oder Nacharbeit optimiert werden soll, liegt in der Hand der Nutzenden. Die GUI berechnet allerdings nicht selbst, die Auswahl der Datei durch die Nutzenden dient nur dazu, den Dateipfad der lokal gespeicherten, ausgefüllten Excel-Vorlage einzulesen. Diese wird anschließend zusammen mit der Vorauswahl der Zielfunktionen dem, theoretisch auch unabhängig von der GUI nutzbaren, Optimierungsmodell übergeben. Es hat somit alle benötigten Informationen und kann die Optimierung starten. Nach erfolgter Optimierung gibt das Optimierungsmodell der GUI wiederum als Ergebnis den Dateipfad der Datei an, welche das Ergebnis enthält. GUI und Optimierungsmodell arbeiten somit recht unabhängig voneinander, wodurch insbesondere bei der Entwicklung eine einfachere Problemlösung ermöglicht wurde.



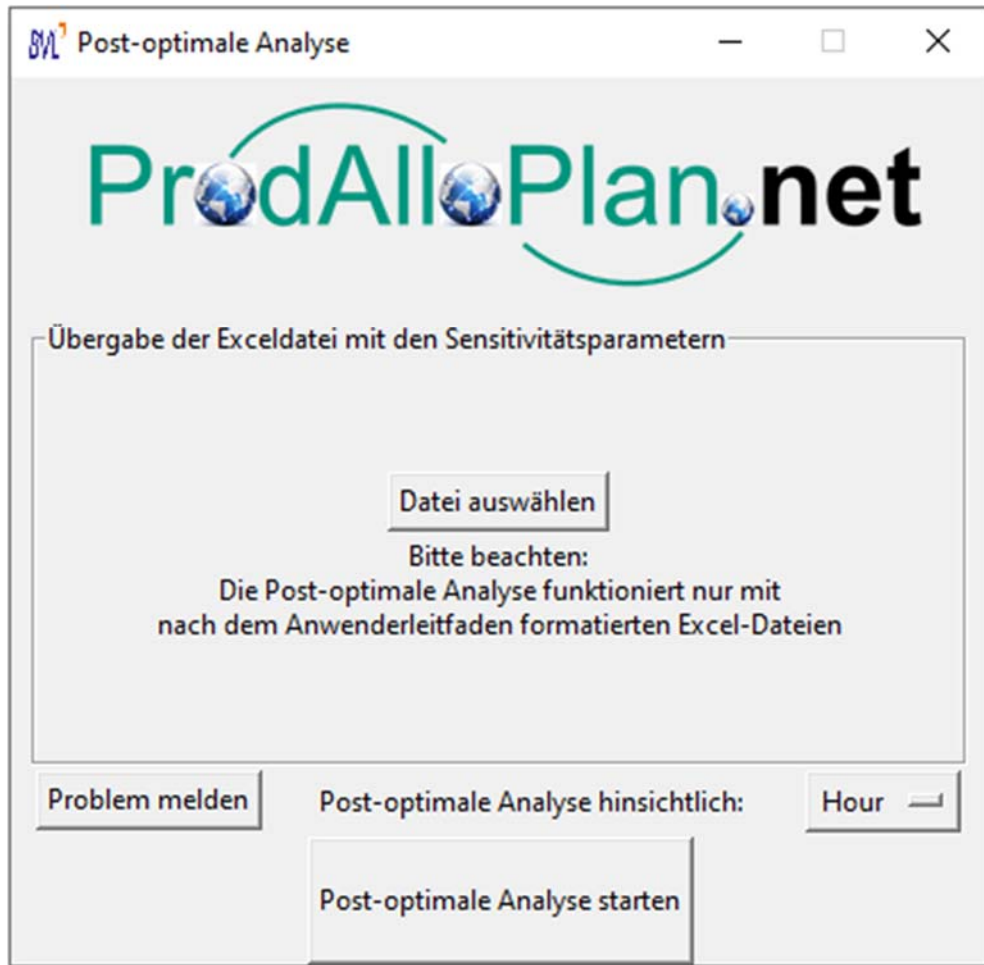
**Abbildung 12: Erstes Fenster der Graphischen Oberfläche**

Im Anschluss an die erfolgte Berechnung öffnet sich ein weiteres Fenster, das ermöglicht, entweder die berechneten Ergebnisse anzeigen zu lassen oder anhand der berechneten Ergebnisse die post-optimale Analyse zu berechnen.

Hierbei ist hervorzuheben, dass die Ergebnisse in Form von Microsoft Excel-Dateien jeder Berechnung lokal auf dem Computer des Nutzens inklusive Benennung nach Tag und Uhrzeit hinterlegt werden, sodass diese auch zu einem späteren Zeitpunkt jederzeit abrufbar sind.

Vor dem Start der post-optimale Analyse müssen die Nutzenden dem Programm mithilfe einer weiteren Excel-Tabelle zusätzliche Informationen zur Verfügung stellen. Die post-optimale Analyse kann hierbei hinsichtlich Änderungen in Stundensätzen, Nachfrage, Lieferanten und Transport erfolgen. Je nach Auswahl müssen in der Excel für einen dem Nutzenden freistehenden Bereich verschiedene Werte angegeben werden, für die das Modell jeweils einzeln eine komplette Berechnung durchführt. So kann durch die Nutzenden z.B. überprüft werden, ab welchem Stundensatz sich die Produktion in einem anderen Land lohnt.

Da für jeden weiteren zu berechnenden Wert eine Iteration des Programms durchläuft, die Berechnungsdauer mit zunehmender Anzahl an Durchläufen also nur linear steigen kann (Komplexitätsklasse  $O(n)$ ), ist dieses Problem theoretisch auch für sehr feine Schrittgrößen und somit viele Durchläufe uneingeschränkt nutzbar.



**Abbildung 13: Start der Post-optimalen Analyse**

Im Anschluss an die erfolgte Berechnung öffnet sich ein weiteres Fenster, in dem das Öffnen der Ergebnisdatei erfolgen kann. Auch diese Dateien werden lokal auf dem Computer des jeweiligen Nutzers gespeichert.

- **Erzielte Ergebnisse:**

In AP 5 wurden zunächst der strukturelle Aufbau des Softwaredemonstrators und die Vorbereitung der Einzelmodule in den jeweiligen APs für eine gute Implementierbarkeit realisiert. Der anschließend entwickelte Softwaredemonstrator erfüllt die vorgesehenen Anforderungen und wurde in Kooperation mit KMUs getestet.



## 4.8 AP 6: Praxisleitfadenerstellung mit Regeln zur dynamischen Produktzuordnung im Wertschöpfungsnetzwerk

Ziel von AP 6 war die Zusammenfassung der Projektergebnisse in einem detaillierten Praxisleitfaden, mithilfe dessen die entwickelte Methodik durch Unternehmen angewandt werden kann.

- Durchgeführte Arbeiten:

Parallel zur Konzeptentwicklung des Softwaredemonstrators wurde dieser in Form eines einfach verständlichen und knappen Bedienerhandbuchs beschrieben. Dadurch soll der Leitfaden den Anwender schrittweise durch die Methodik sowie die Softwareumsetzung führen und darstellen, welche Eingangsgrößen erforderlich sind bzw. wie die Ausgabe erfolgt.

Konkret gliedert sich der Anwenderleitfaden in 4 Abschnitte:

1. Installation der benötigten Software
2. Weitere Vorbereitungen
3. Benutzung des Optimierungsmodells
4. Ergebnisinterpretation

Im ersten Abschnitt wird zunächst der grundlegende Ablauf der Installation durchlaufen. Zu beachten ist hierbei, dass die Installation Administratorrechte erfordert, die Mitarbeitende von KMUs meist nicht haben.

Der zweite Abschnitt befasst sich anschließend mit der Einrichtung des Programms und dem Download der Vorlagen, welche die Eingabe unternehmensspezifischer Daten erheblich vereinfacht.

Abschnitt 3 führt zunächst durch das Ausfüllen der Vorlage. Diese umfasst insgesamt 11 Tabellenblätter, die insbesondere namentlich konsistent ausgefüllt werden müssen. So muss im Beispiel (vgl. Abbildung 14) Lieferant03 auch in allen anderen Tabellenblättern als Lieferant03 benannt sein, damit das Optimierungsmodell diesen Zusammenhang erkennen kann.

Eingabe der Lieferanten				
<i>[Individuelle Bezeichnung des Lieferanten]</i>	<i>[Produkt]</i>	<i>[Kapazität des Lieferanten]</i>	<i>[Materialkosten]</i>	<i>[Faktor: Materialkostentwicklung]</i>
ID_Lieferant	ID_Produktzustand capL		cost_Material	factor_cost
Lieferant01	MP	9000	2500	1,01
Lieferant02	KS	9000	300	1,01
Lieferant03	FB	9000	60	1
Lieferant04	UH	9000	1950	0,99
Lieferant05	UH	9000	2000	0,97

**Abbildung 14: Beispielhafte Eingabe der Lieferantenbeziehungen des Unternehmens**

Optional auszufüllen ist das Tabellenblatt „Kundennähe“, welches das Optimierungsmodell nur dann braucht, wenn die Nutzenden hinsichtlich der Kundennähe optimieren wollen.

Anhand von Abbildung 15 ist auch der Nutzen und zentrale Vorteil der Vorlage gut zu erkennen. Über jeder Spalte stehen jeweils Bezeichnungen. In eckigen Klammern wird darauf aufmerksam gemacht, in welcher Form die Daten eingegeben werden müssen. Ist bei der Eingabe der Daten noch etwas zu beachten, wird dies ganz oben in Rot vermerkt, sodass die Nutzenden die Hinweise nicht übersehen können.

## Eingabe der Kundennähe

*(Hinweis: Die erste Zeile (8 general) darf nicht gelöscht werden! Wenn keine Angaben zur Kundennähe gemacht werden, übernimmt das Modell den Wert dieser Zeile als Standardwert. Änderung der Standard-Kundennähe natürlich möglich)*

*[Werk]*                      *[Kundenregion]*                      *[Angabe der Kundennähe: Skala wird vom Anwender definiert (Beispielsweise 1-10), je höher der Wert auf dieser Skala, desto besser ist die Werk-Kundenregion Beziehung]*

ID_Werk	ID_Kundenregion	Kundennähe
general	general	5
Werk01	Asien	10
Werk01	Europa	8
Werk01	Amerika	6
Werk02	Asien	7
Werk02	Europa	8
Werk02	Amerika	6
Werk04	Asien	3
Werk04	Europa	5
Werk04	Amerika	10
Werk05	Asien	8
Werk05	Europa	2
Werk05	Amerika	1

**Abbildung 15: Beispielhafte Eingabe der Kundennähe des Unternehmens**

Abschnitt 3 befasst sich in der Folge mit der konkreten Anwendung des Modells, also der Eingabe der Inputdatei und dem Durchlaufen des kompletten Prozesses bis zum Erhalt des Ergebnisses.

Abschnitt 4 enthält alle benötigten Informationen zum Abrufen und Interpretieren der Ergebnisse. Anschließend werden noch die einzelnen Tabellenblätter der Ergebnisdatei erläutert. Da die Ergebnisse in Excel ausgegeben werden, können diese sehr leicht visualisiert werden (vgl. Abbildung 16). Hier wurden für ein beispielhaftes Problem eine optimale Öffnung und Schließung der Werke 2, 4 und 5 inklusive ihrer jeweiligen Segmente ermittelt.

Anhand der übersichtlichen Visualisierung lässt sich gut erkennen, in welchen Perioden die jeweiligen Werke geöffnet sind, welche Segmente aktiv sind und welches Produkt jeweils hergestellt wurde. So öffnet beispielsweise Segment 1 des Werks 4 in Periode 3 und schließt nach Periode 9, produziert jedoch nur in den Perioden 3, 4 und 6- 9.





**Abbildung 16: Mögliche Visualisierung der Ergebnisse**

▪ Erzielte Ergebnisse:

Zunächst erfolgte die Dokumentation des strukturellen Aufbaus des Softwaredemonstrators. Der im Anschluss an die Projektverlängerung und die Diskussionen mit Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses angefertigte Anwenderleitfaden soll Anwendbarkeit und Praxistauglichkeit auch in Zukunft gewährleisten.

## 5. Zuwendung und Angemessenheit der Arbeit

### 5.1 Verwendung der Zuwendung

Mit der Bearbeitung des Projektes wurde im Abrechnungszeitraum 2019 ein wissenschaftlicher Mitarbeiter des wbk Instituts für Produktionstechnik betraut. In Summe arbeitete der wissenschaftliche Mitarbeiter 6 Personenmonate an dem Projekt. Zusätzlich wurden wissenschaftliche Hilfskräfte im Umfang von 120 Stunden eingesetzt. Die Zuwendung des Förderbetrags belief sich im Berichtszeitraum 2019 auf 22.000,00 €.

Im Abrechnungszeitraum 2020 wurden drei wissenschaftliche Mitarbeitende des wbk Institut für Produktionstechnik mit der Bearbeitung des Projekts betraut. In Summe arbeiteten die wissenschaftlichen Mitarbeitenden 26 Personenmonate an dem Projekt. Zusätzlich wurden wissenschaftliche Hilfskräfte im Umfang von 944 Stunden eingesetzt. Die Zuwendung des Förderbetrags belief sich im Berichtszeitraum 2020 auf 213.200,00 €.

Mit der Bearbeitung des Projektes wurden im Abrechnungszeitraum 2021 wissenschaftliche Hilfskräfte im Umfang von 115 Stunden eingesetzt. Die Zuwendung des Förderbetrags belief sich im Berichtszeitraum 2021 auf 0 €.

In Summe beläuft sich die Zuwendung des Förderbeitrags somit auf 247.580,00 €. Dies entspricht den beantragten Zuwendungen. Die 5 % Restzahlung steht noch aus.

## 5.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die dargestellten inhaltlichen Arbeiten und Ergebnisse der Haushaltsjahre 2019, 2020 und 2021 entsprechen den Vorgaben des Projektplans und sind als fortschrittlich einzustufen. Die angestrebten Projektergebnisse konnten erzielt werden. Die Zuwendung des Förderträgers innerhalb der Projektlaufzeit in Höhe von 247.580,00 € wurde für den Einsatz von wissenschaftlichen Mitarbeitenden und studentischen Hilfskräften in dem in Kapitel 5.1 beschriebenen Umfang verwendet. Es wurden regelmäßige Arbeitstreffen mit den Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt. Die Abstimmungsgespräche waren notwendig, um den Ist-Stand der Unternehmen bezüglich der Aufgabenstellung einheitlich aufzunehmen, praxisnahe Hinweise für die Umsetzung der theoretischen Vorgehensweise zu erhalten sowie die erarbeiteten Modelle intensiv zu diskutieren und zu erproben. Aufgrund der beschriebenen Aktivitäten und Ergebnisse war die geleistete Arbeit notwendig und die Verwendung der Zuwendung erscheint angemessen.

## 6. Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse

Die Bearbeitung der Problemstellung des Forschungsvorhabens ProdAlloPlan.net erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses. Der Projektbegleitende Ausschuss setzte sich aus Unternehmen unterschiedlicher Größen und Branchen zusammen. Die enge Kooperation bei der Erarbeitung der Vorgehensweise und Methode sowie die exemplarische Erprobung der Projektergebnisse stellt die Praxisrelevanz und -tauglichkeit der Vorgehensweise sicher. Der Projektbegleitende Ausschuss war in Form regelmäßig stattfindender Konsortialtreffen, Arbeitstreffen und durch die Erprobung der Vorgehensweise maßgeblich in die Entwicklung der Projektergebnisse eingebunden.

### 6.1 Wissenschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens ProdAlloPlan.net leisten einen großen Beitrag zur Verbesserung der Effizienz bei integrierten Produktallokations- und Netzwerkkonfigurationsentscheidungen in globalen WSN.

Ergebnis des Forschungsprojekts ist eine Methode zur integrierten Allokationsplanung und Anpassung der Netzwerkkonfiguration über den Planungshorizont. Die Ergebnisse adressieren das vorhandene Defizit und erweitern den Stand der Forschung in geeigneter Weise. Erstmals wird, ausgehend von einer systematischen und strukturierten Charakterisierung der relevanten bzw. potenziellen Netzwerkelemente sowie einem produktionsorientierten Clustering von Produktvarianten zur Reduktion der Entscheidungskomplexität ein anwenderfreundliches, multikriterielles Optimierungsmodell zur integrierten Allokations- und Konfigurationsplanung aufgestellt. Die Anwenderfreundlichkeit wird dabei mittels dem entwickelten Softwaredemonstrator und Praxisleitfaden sichergestellt. Darüber hinaus werden Elemente der post-optimalen Analyse bzw. Optimierung zur Erhöhung der Transparenz und Nachvollziehbarkeit der ermittelten Lösung genutzt. Hierbei kommen Sensitivitäts- sowie Schlupf- und Schattenpreisanalysen zum Einsatz, um dem Entscheider detailliertere Einblicke in die Lösungsfindung zu geben.

Weitere Forschung kann insbesondere den Mehrwert eines durch die Digitalisierung und Industrie 4.0 verstärkten Informationsaustauschs im WSN bei der Allokations- und Konfigurationsplanung betrachten. Hierbei kann untersucht werden, welche Informationen in welcher Qualität vorliegen müssen, um eine effiziente Optimierung zu ermöglichen. Darüber hinaus kann die Allokations- und Konfigurationsplanung bei rückwärtsgerichteten Wertschöpfungs- bzw. Sammelnetzwerken erforscht werden. Diese spielen insbesondere für kreislaufwirtschaftliche Methoden (z. B. Refurbishing, Remanufacturing, Recycling) eine entscheidende Rolle und tragen damit wesentlich zu aktuellen Nachhaltigkeitsbestrebungen in Forschung, Industrie und Gesellschaft bei. Durch die Komplexität und Unsicherheit der rückfließenden Gebrauchsgüter spielt außerdem das (produktionsorientierte) Clustering eine entscheidende Rolle und sollte hinsichtlich der Anforderungen zirkulärer Wertschöpfungsmöglichkeiten ausgebaut werden. Im Gegensatz zur geläufigeren, sogenannten Brownfield-Planung von WSN, wie sie auch im vorliegenden Forschungsvorhaben angewendet wurde, könnte hierbei insbesondere die Greenfield-Planung relevant werden, um Wissenschaft und Wirtschaft bei der Einführung zirkulärer Wertschöpfungsmöglichkeiten zu unterstützen.

## 6.2 Wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse: Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit von KMU

Eine globale Produktion mit vielfältigen Liefer- und Leistungsverflechtungen verlangt eine effiziente Allokations- und Netzwerkkonfigurationsplanung. Eine hinreichend gute Beherrschung der Produktionsprozesse am Heimatstandort ist nicht ausreichend. Vielmehr ist zur Sicherstellung der Kosteneffizienz und Lieferfähigkeit eine Betrachtung und Gestaltung des gesamten Prozesses im WSN erforderlich. Dies gilt insbesondere für die Automobilzuliefererindustrie und den Maschinenbau mit ihrer typischerweise durch KMU geprägten Zuliefererstruktur aufwärts der Tier-2-Ebene. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts ProdAlloPlan.net tragen auf verschiedene Weise zur Verbesserung der Allokations- und Konfigurationsplanung in globalen WSN bei und leisten einen Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbs- und Leistungsfähigkeit von KMU.

Mit der in AP 1 entwickelten Methode zum produktionsorientierten Clustering von Produktvarianten können sowohl KMU als auch große Unternehmen die Komplexität ihres Produktprogramms unter Berücksichtigung produktionsrelevanter Faktoren reduzieren. Auch die wiederholte Anwendung des Verfahrens bei Erweiterungen des Produktprogramms ist gewährleistet. Mittels flexibler Erweiterung der Methode, z. B. hinsichtlich der Identifikation von Ausreißern oder der Selektion der relevantesten produktionsorientierten Faktoren, kann das Verfahren anwendungsfallspezifisch angepasst und ausgebaut werden.

Mit Hilfe der Charakterisierung von existierenden und potentiellen Produktionsstrukturen und -kapazitäten können Unternehmen transparent relevante Informationen über das globale WSN darstellen. Insbesondere die Differenzierung nach Fähigkeiten und Kapazitäten der Produktionsstandorte auf der einen Seite sowie der Anforderungen an die Produktion (z. B. hinsichtlich Qualifikation, Technologie, Materialien) auf der anderen Seite zusammen mit dem ständigen Abgleich zu den erstellten Produktclustern bietet den Unternehmen dabei einen entscheidenden Mehrwert.

Aufbauend darauf können Unternehmen mit Hilfe der entwickelten Allokations- und Netzwerkoptimierung ihre optimale Allokations- und Konfigurationsstrategie ermitteln und Effizienzpotentiale realisieren. Die Realisierbarkeit möglicher Allokationsentscheidungen wird bereits vor der Lösung des Optimierungsmodells anhand der Charakterisierung (vgl. AP 2) sichergestellt. Dieses Vorgehen vermeidet Fehlinvestitionen und wirkt sich somit positiv auf die standortübergreifenden produktions-, logistik- und qualitätsbezogenen Kosten aus. Das Vorgehen gleicht spezifische Schwächen von KMU aus, die aufgrund ihrer nicht ausreichenden Personal- und Ressourcenausstattung üblicherweise auf den Einsatz von Optimierungsmodellen zur Allokations- und Konfigurationsplanung verzichten. Das Optimierungsmodell ist individuell parametrierbar und somit für unterschiedliche Anwendungsfälle nutzbar. Die zusätzliche post-optimale Analyse und Optimierung dient der besseren Nachvollziehbarkeit und Transparenz der ermittelten Ergebnisse für Entscheidungsträger sowie der Identifikation von weiterem Optimierungspotential.

Die Arbeiten im Projekt ProdAlloPlan.net wurden an den Bedürfnissen des verarbeitenden Gewerbes ausgerichtet und sind in ihrer Anwendung und Übertragbarkeit nicht auf bestimmte Industriezweige beschränkt. Dadurch können die Ergebnisse von einer Vielzahl produzierender Unternehmen unterschiedlicher Branchen, Strukturen und Größen angewendet werden.

## 7. Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Für den Ergebnistransfer wurden über die gesamte Projektlaufzeit hinweg mehr als 20 bilaterale Arbeitstreffen mit den Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt. Neben den bilateralen Arbeitstreffen fanden 6 Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses (15.03.2019, 19.09.2019, 03.03.2020, 29.09.2020, 22.03.2021, 30.06.2021) statt. Die Sitzungen wurden bei der durchführenden Forschungsstelle, dem wbk Institut für Produktionstechnik am Karlsruher Institut für Technologie, sowie der Jenoptik Industrial Metrology Germany GmbH in Villingen-Schwenningen abgehalten.

Die (Zwischen-) Ergebnisse des Forschungsprojekts ProdAlloPlan.net wurden im Rahmen einer Vielzahl von Veranstaltungen einer interessierten Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Neben der Veröffentlichung der erarbeiteten Methode und von Ergebnissen in nationalen und internationalen Zeitschriften (ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Industrie 4.0 Management, Production Engineering - Research and Development) und auf internationalen Konferenzen (CIRP Life Cycle Engineering Conference 2020) erfolgte die Verbreitung über die Medien des wbk (z. B. wbk Jahresbericht, wbk Newsletter topics) an eine breite Öffentlichkeit von Industrie- und Wissenschaftsvertretern und -vertreterinnen. Auf diversen Veranstaltungen des wbk konnten die Projektergebnisse in Form eines Posterstandes vorgestellt und diskutiert werden (z. B. wbk Herbsttagung 2019 und 2020).

Im Rahmen des Transfers zwischen Wirtschaft, Forschung und Lehre wurden diverse, teilweise externe, studentische Abschlussarbeiten verfasst (vgl. Tabelle 1). Sie waren während der Bearbeitung in das Forschungsvorhaben und in die Arbeitstreffen bei den Partnern des Projektbegleitenden Ausschusses eingebunden.

Die geschaffene Projekthomepage diente als Anlaufstelle für Interessierte sowie als Austausch- und Kommunikationsplattform für die Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses. Der Softwaredemonstrator des Optimierungsmodells sowie ein Anwenderleitfaden zur schrittweisen Nutzung der Methode wurden ebenfalls erarbeitet. Sie werden zeitnah an die BVL übersandt und der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Das Optimierungsmodell zur integrierten Allokations- und Konfigurationsplanung in globalen WSN konnte bei der Jenoptik Industrial Metrology Germany GmbH als Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses erfolgreich angewendet werden. Ein zeitnaher Einsatz der Methode bei der Pilz AG sowie der Balluff GmbH ist derzeit in Planung. Die flexis AG sowie die C-ECO GmbH planen, die entstandenen (Teil-) Ergebnisse in Zukunft für Projekte im Bereich der Gestaltung und des Betriebs globaler WSN einzusetzen. Aufgrund der mittelbaren und unmittelbaren Anwendung der erzielten Ergebnisse wird der wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Nutzen der erzielten Ergebnisse als hoch eingeschätzt.

Nachfolgend werden die Transfermaßnahmen noch einmal übersichtlich zusammengefasst.

**Tabelle 1: Übersicht der Transfermaßnahmen**

Typ	Autor und Titel bzw. Beschreibung	Datum
<b>Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) und bilaterale Treffen</b>		
1. Sitzung	Sitzung des PA am wbk Institut für Produktionstechnik, KIT, Karlsruhe	15.03.2019
2. Sitzung	Sitzung des PA am wbk Institut für Produktionstechnik, KIT, Karlsruhe	19.09.2019

3. Sitzung	Sitzung des PA am wbk Institut für Produktionstechnik, KIT, Karlsruhe	03.03.2020
4. Sitzung	Sitzung des PA bei der Jenoptik Industrial Metrology Germany GmbH, Villingen-Schwenningen	29.09.2020
5. Sitzung	Sitzung des PA, Online	22.03.2021
6. Sitzung	Sitzung des PA, Online	30.06.2021
Mehr als 20 bilaterale Treffen	Treffen mit den Projektpartnern zum gezielten Wissensaustausch, zur Spezifizierung der Problemstellung und Diskussion konkreter Arbeitsinhalte	Regelmäßig über die gesamte Projektlaufzeit
<b>Weiterbildung</b>		
Externe stud. Arbeit	Felix Decker: Development of an Analytical Method for the Characterization of Value-Adding Networks of Special Machine Manufacturers	2019
Studentische Arbeit	Kevin Gleich: Optimierung von Produktionsstrukturen und -kapazitäten im Wertschöpfungsnetzwerk mit Materialrückflüssen und Remanufacturing	2019
Studentische Arbeit	Victoria Zambo: Entwicklung eines Konzepts zum produktionsorientierten Clustering von Produktvarianten in Remanufacturing-Prozessen	2019
Externe stud. Arbeit	Felix Kerndl: Entwicklung eines Optimierungsmodells zur integrierten Produktallokation und Netzwerkkonfiguration in globalen Wertschöpfungsnetzwerken	2020
Studentische Arbeit	Maren Lindemann: Simulation von globalen Produktionsnetzwerken mit Einbezug des Remanufacturings	2020
Externe stud. Arbeit	Felix Heidinger: Entwicklung einer Methodik zur praxisnahen Anwendung einer Optimierungsmethode zur Produktallokation in globalen Produktionsnetzwerken	2020
Studentische Arbeit	Sarah Eisen: Entwicklung eines Konzepts für die Anwendung einer simulationsbasierten Optimierung in Remanufacturing-Netzwerken	2021
Integration in Lernfabrik Globale Produktion	Erkenntnisse des Forschungsprojekts ProdAlloPlan.net flossen während der Projektlaufzeit in die Entwicklung des neuen Schulungsmoduls „Agile Produktionsnetzwerke“ der Lernfabrik Globale Produktion ein	Während der Projektlaufzeit
Transfer an das GAMI	Erkenntnisse des Forschungsprojekts wurden bei der Weiterentwicklung von Schulungskonzepten und bei der Durchführung von Lieferantenentwicklungen am Global Advanced Manufacturing Institute (GAMI) in Suzhou, China, berücksichtigt	Während der Projektlaufzeit
Anwenderleitfaden und Schulungskonzept	Ausarbeitung eines Anwenderleitfadens zum Vermitteln der erarbeiteten wissenschaftlichen Methoden in die Praxis und zur Anwendung des Softwaredemonstrators	Während der Projektlaufzeit
<b>Veröffentlichungen</b>		
Projekt-Homepage	Projekthomepage als Kontaktforum für Industrie und Forschung: <a href="https://www.wbk.kit.edu/wbkintern/Forschung/Projekte/ProdAlloPlannet/">https://www.wbk.kit.edu/wbkintern/Forschung/Projekte/ProdAlloPlannet/</a>	Eingerichtet seit 03/2019

wbk Newsletter Topics	Ankündigung des Forschungsprojekts inkl. Vorstellung der Ziele sowie Arbeitsinhalte und Aufruf zur Mitarbeit im PA für Industrieunternehmen	Während der Projektlaufzeit
Wissenschaftliches Kolloquium	Präsentation und Diskussion der Zwischenergebnisse im Rahmen des wissenschaftlichen Kolloquiums von Hr. Klenk „Informationsaustausch in Remanufacturing-Netzwerken zur Optimierung der Bedarfsplanung für den Wiederaufbereitungsprozess“ am wbk (Dauer: 90 Minuten)	04.12.2020
Zwischenberichte	Zusammenfassung der Zwischenergebnisse des Forschungsvorhabens in jährlichen Berichten	Frühjahr 2019 Frühjahr 2020
Präsentation des Projekts auf wbk Veranstaltungen	Vorstellung und Diskussion der Projektinhalte und aktueller Zwischenergebnisse anhand eines Posterstands auf diversen Veranstaltungen (u. a. wbk Herbsttagung 2019, wbk Herbsttagung 2020)	Während der Projektlaufzeit
Nationale Veröffentlichung	Klenk, F.; Potarca, M.; Häfner, B.; Lanza, G. (2020) „Kreislaufwirtschaft in Produktionsnetzwerken“, ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Nr. 10, S. 668-672.	ZWF Heft 10/2020
Internationale Veröffentlichung	Klenk, F., Gleich, K., Meister, F., Häfner, B., Lanza, G., 2020, „Approach for developing implementation strategies for circular economy in global production networks“, 27th CIRP Life Cycle Engineering Conference (LCE 2020), 13-15 May 2020, Online, pp. 127–132.	CIRP Life Cycle Engineering Conference (LCE 2020), Online
Internationale Veröffentlichung	In Ausarbeitung	Einreichung Herbst 2021
Verbreitung Software-Demonstrator	Veröffentlichung des Softwaredemonstrators sowie des Praxisleitfadens zur Anwendung durch die BVL	Herbst 2021

## 8. Durchführende Forschungsstelle und Projektbegleitender Ausschuss

### 8.1 Durchführende Forschungsstelle

Name und Anschrift der Forschungsstelle

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

wbk Institut für Produktionstechnik

Campus Süd

Kaiserstraße 12

76131 Karlsruhe

Leiterin der Forschungsstelle

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Institutsleitung, Bereich Produktionssysteme

Telefon: +49 721 608 44017

Telefax: +49 721 608 45005

E-Mail: [gisela.lanza@kit.edu](mailto:gisela.lanza@kit.edu)

Projektleitung

Felix Klenk

Akademischer Mitarbeiter, Bereich Produktionssysteme

Telefon: +49 1523 9502589

Telefax: +49 721 608 45005

E-Mail: [felix.klenk@kit.edu](mailto:felix.klenk@kit.edu)



## 8.2 Projektbegleitender Ausschuss

### Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses

**4flow AG** (Herr Wendelin Groß)

Hallerstraße 1  
10587 Berlin

**4flow AG** (Herr Johannes Gast)

Hallerstraße 1  
10587 Berlin

**Balluff GmbH** (Herr Thomas Kreuzer)

Schurwaldstraße 9  
73765 Neuhausen auf den Fildern

**Balluff GmbH** (Herr Andreas Schönle)

Schurwaldstraße 9  
73765 Neuhausen auf den Fildern

**Carl Zeiss Vision GmbH** (Herr Robin Kopf)

Turnstraße 27  
73430 Aalen

**Circular Economy Solutions GmbH** (Herr Markus Wagner)

Wilhelm-Lambrecht-Straße 6  
37079 Göttingen

**flexis AG** (Herr Hansjörg Tutsch)

Schockenriedstraße 46  
70565 Stuttgart

**FormiKA GmbH** (Herr Markus Herm)

Klara-Siebert-Straße 2  
76137 Karlsruhe

**Jenoptik Industrial Metrology Germany GmbH** (Herr Richard Hummel)

Drachenloch 5

78052 Villingen-Schwenningen

**Jenoptik Industrial Metrology Germany GmbH** (Herr Sebastian Werner)

Drachenloch 5

78052 Villingen-Schwenningen

**Knorr-Bremse AG** (Herr Thomas Meyer)

Hanauer Straße 85

80993 München

**Pilz GmbH & Co. KG** (Herr Dirk Sonder)

Felix-Wankel-Straße 2

73760 Ostfildern

## I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Logo des Forschungsprojekts ProdAlloPlan.net	4
Abbildung 2: Beantragter Projektplan inklusive kostenneutraler Verlängerung	7
Abbildung 3: Arbeitsprogramm des Forschungsprojekts ProdAlloPlan.net	8
Abbildung 4: Vorgehen zum produktionsorientierten Clustering von Produktvarianten	9
Abbildung 5: Vorgehen zur Charakterisierung der Produktionsstrukturen und –kapazitäten	12
Abbildung 6: Vorgehen zum Aufbau einer Wertschöpfungsnetzwerk-Optimierung	13
Abbildung 7: Integrierte Betrachtung von Produktallokation & Netzwerkkonfiguration	14
Abbildung 8: Anforderungen an die Methode zur Allokations- und Netzwerkoptimierung	16
Abbildung 9: Visualisierung der Anpassungsaspekte	18
Abbildung 10: Struktureller Aufbau des Softwaredemonstrators	19
Abbildung 11: Ablauf und Funktionen des Softwaredemonstrators	20
Abbildung 12: Erstes Fenster der Graphischen Oberfläche	21
Abbildung 13: Start der Post-optimalen Analyse	22
Abbildung 14: Beispielhafte Eingabe der Lieferantenbeziehungen des Unternehmens	23
Abbildung 15: Beispielhafte Eingabe der Kundennähe des Unternehmens	24
Abbildung 16: Mögliche Visualisierung der Ergebnisse	25

## II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2: Übersicht der Transfermaßnahmen

29

### III. Literaturverzeichnis

Abele, E., Meyer, T., Näher, U., Strube, G. & Sykes, R. (2008): *Global Production*, Springer Berlin Heidelberg.

Bergs, T., Apelt, S., Beckers, A., Barth, S. (2020): Agile ramp-up production as an advantage of highly iterative product development, *Manufacturing Letters*.

Christodoulou, P., Fleet, D., Hanson, P., Phaal, R., Probert, D. & Shi, Y. (2007): Making the right things in the right places: A structured approach to developing and exploiting 'manufacturing footprint' strategy, University of Cambridge Institute for Manufacturing, Cambridge.

Fleischmann, Bernhard; Ferber, Sonja; Henrich, Peter (2006): Strategic Planning of BMW's Global Production Network. In: *Interfaces* 36 (3), S. 194–208. DOI: 10.1287/inte.1050.0187.

Friedli, T., Mundt, A. & Thomas, S. (2014): *Strategic Management of Global Manufacturing Networks*, Springer Berlin Heidelberg.

Jacob, F. (2006): *Quantitative Optimierung dynamischer Produktionsnetzwerke*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung, Shaker, Aachen.

Kinkel, S. (2009): *Erfolgsfaktor Standortplanung*, Springer, Berlin, Heidelberg. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-88471-2>.

Kohler, Klaus (2009): *Global Supply Chain Design – Konzeption eines Optimierungsmodells für die Gestaltung globaler Wertschöpfungs-systeme*. In: Ronald Bogaschewsky, Michael Eßig, Rainer Lasch und Wolfgang Stölzle (Hg.): *Supply Management Research. Aktuelle Forschungsergebnisse 2008*. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, S. 153–193.

Koren, Yoram (2010): *The Global Manufacturing Revolution. Product-process-business integration and reconfigurable systems*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc (Wiley series in systems engineering and management).

Lanza, Gisela; Ferdows, Kasra; Kara, Sami; Mourtzis, Dimitris; Schuh, Günther; Váncza, József et al. (2019): Global production networks: Design and operation. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 68 (2), S. 823–841. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.05.008.

Möller, K., Klatt, T., Dress, A. (2011): *Heutige und zukünftige Paradigmen des Produktionsstandorts Deutschland*. Hrsg. Gausemeier, J., Wiendahl, H.-P.: *Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland*. Acatech Workshop, S. 19-33.

Pinedo, M. L. (2009): *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*, Springer New York.

Schmidt, B. C. (2011): *Gestaltung globaler Produktionsstrategien*. In: Jürgen Gausemeier und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): *Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 71–84.

Seebacher, Gottfried; Winkler, Herwig (2014): Evaluating flexibility in discrete manufacturing based on performance and efficiency. In: *International Journal of Production Economics* 153, S. 340–351. DOI: 10.1016/j.ijpe.2014.03.018.

Shi, Y.; Gregory, Mike (1998): International manufacturing networks. To develop global competitive capabilities. In: *Journal of Operations Management* 16 (Nr. 2-3), S. 195–214. DOI: 10.1016/S0272-6963(97)00038-7.

Surbier, L., Alpan, G., Blanco, E. (2013): A comparative study on production ramp-up. State-of-the-art and new challenges. In: *Production Planning & Control* 25 (15), S. 1264-1286.

Thomas, S. (2013): Produktionsnetzwerkssysteme. Ein Weg zu effizienten Produktionsnetzwerken. Dissertation. Universität St. Gallen, St. Gallen.

United Nations Conference on Trade and Development (2013): *World Investment Report: Global Value Chains: Investment and Trade for Development*. In: United Nations Conference on Trade and Development. United Nations Publications.

Volling, Thomas; Matzke, Andreas; Grunewald, Martin; Spengler, Thomas S. (2013): Planning of capacities and orders in build-to-order automobile production. A review. In: *European Journal of Operational Research* 224 (2), S. 240–260. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.07.034.

Wittek, K. (2013): *Standortübergreifende Programmplanung in flexiblen Produktionsnetzwerken der Automobilindustrie*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-01838-2>

Yeung, H. W. & Coe, N. M. (2014): Toward a Dynamic Theory of Global Production Networks. In: *Economic Geography*, Bd. 91, Nr. 1, S. 29–58.

Zahn, E. (2012): *Strategisches Management globaler Produktionsnetzwerke*. In: Hans-Georg Kemper, Burkhard Pedell und Henry Schäfer (Hg.): *Management vernetzter Produktionssysteme. Innovation, Nachhaltigkeit und Risikomanagement*. München: Vahlen, S. 9–23.