

Projektträger für das



Schlussbericht vom 28.02.2026

zum IGF-Vorhaben 01IF2328N

Thema

Modell zur Bewertung von variantengetriebenen Kosten einer Fabrik und Entscheidungsunterstützung zur Einführung von neuen Produktvarianten (VaKoFa)

Berichtszeitraum

01.03.2024 bis 28.02.2026

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik e.V. (BVL)
Schlachte 31
28195 Bremen

Forschungseinrichtung

Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA)
Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2, 30823 Garbsen

Projektbearbeiter: Mehmet Demir

Inhaltsverzeichnis

1	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	3
1.1	Zusammenfassung.....	3
1.2	Arbeitspaket 1: Generisches Beschreibungsmodell.....	4
1.3	Arbeitspaket 2: Definition von Konfigurationsmerkmalen und Bewertung der Wirkbeziehungen	7
1.4	Arbeitspaket 3: Definition von Kapazitätsfunktionen	10
1.5	Arbeitspaket 4: Wenn-Dann-Regelwerk	11
1.6	Arbeitspaket 5: Entscheidungsmodell.....	13
1.7	Arbeitspaket 6: Evaluierung und Kalibrierung	16
1.8	Arbeitspaket 7: Wissenschaftlicher Transfer	17
2	Verwendung der Zuwendung	18
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	18
4	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten	18
5	Wissenstransfer in die Wirtschaft.....	19
6	Durchgeführte Transfermaßnahmen	19
7	Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit.....	20
8	Literaturverzeichnis	20

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

1.1 Zusammenfassung

Ausgangssituation und Problemstellung:

In einem globalisierten Marktumfeld stehen Unternehmen vor der Herausforderung, kundenindividuellen Wünschen durch eine zunehmende Variantenvielfalt gerecht zu werden [1–4]. Während diese Strategie den Absatz steigern soll, führt sie in der Produktion und Logistik zu massiv steigender Komplexität sowie höheren Investitions- und Betriebskosten [1,5–8]. Ein zentrales Problem ist, dass Entscheidungen über neue Varianten meist durch Marketing und Entwicklung getroffen werden, während die Bereiche Produktion und Logistik, die bis zu 80 % der variantenbedingten Kosten tragen, oft unzureichend einbezogen werden [3,6,9]. Besonders kritisch für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) ist das Phänomen der Kostenremanenz: Einmal getätigte Investitionen (z. B. in Personal, Gebäude oder EDV) lassen sich bei einer späteren Reduzierung der Variantenvielfalt nicht im gleichen Maße abbauen [5,6,10]. Die Herausforderung für Unternehmen liegt daher in einer frühzeitigen Unterscheidung zwischen wertschöpfender und wertvernichtender Produktvarianten [11,12].

Zielsetzung des Vorhabens:

Das Ziel von VaKoFa ist es, diese Herausforderung für produzierende Unternehmen systematisch zu adressieren. Das Ziel ist die Entwicklung eines ganzheitlichen Entscheidungsunterstützungsmodells, das Unternehmen und insbesondere Planende befähigt, bereits vor dem Start der Produktion (SOP) eine fundierte Einschätzung über die Wirtschaftlichkeit neuer Produktvarianten zu treffen und Auswirkungen neuer Produktvarianten vorherzusagen. Kern des Modells ist die frühzeitige Differenzierung zwischen:

- Wertschöpfenden Produktvarianten: Diese können mit vorhandenen Ressourcen produziert werden oder erfordern wirtschaftlich tragfähige Anpassungen der Fabrik.
- Wertvernichtenden Produktvarianten: Diese überschreiten Kapazitätsgrenzen der Fabrik und führen zu Anpassungsmaßnahmen, deren Kosten den erwarteten Erlös übersteigen.

Lösungsweg:

Im Rahmen des Projekts wurden folgende Arbeitspakete bearbeitet:

- Arbeitspaket 1: Generisches Beschreibungsmodell
- Arbeitspaket 2: Definition von Konfigurationsmerkmalen und Bewertung der Wirkbeziehungen
- Arbeitspaket 3: Definition von Kapazitätsfunktionen
- Arbeitspaket 4: Wenn-Dann-Regelwerk
- Arbeitspaket 5: Entscheidungsmodell
- Arbeitspaket 6: Evaluierung und Kalibrierung
- Arbeitspaket 7: Wissenschaftlicher Transfer

Die Ziele, durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete werden im Folgenden vorgestellt.

1.2 Arbeitspaket 1: Generisches Beschreibungsmodell

Ziele

Das primäre Ziel dieses Arbeitspakets liegt in der Entwicklung eines generischen Modells zur systematischen Beschreibung von Produktvarianten und deren Merkmalen sowie des Fabriksystems mit seinen inhärenten Objekten. Durch die Zuordnung spezifischer Konfigurations- und Kapazitätsmerkmale zu den Fabrikobjekten wird die Grundlage geschaffen, um Wirkzusammenhänge zu analysieren. Dies ermöglicht eine präzise Beschreibung und Bewertung der Auswirkungen von Einführungen neuer Produktvarianten in bestehende Fabrikssysteme.

Durchgeführte Arbeiten

Die methodische Durchführung sah zunächst vor, das Fabrikssystem zu dekomponieren, da eine ganzheitliche Bewertung ohne eine Unterteilung in handhabbare Gestaltungsobjekte aufgrund der hohen Komplexität nicht zielführend ist [1,13]. Zur Strukturierung wurde das System in zwei Dimensionen unterteilt: Die vertikale Dimension umfasst die Fabrikebenen, die sich vom Produktionsnetzwerk über das Werk und das Gebäude bis hin zum Segment und dem einzelnen Arbeitsplatz erstrecken [14]. Demgegenüber steht die horizontale Dimension, welche die Fabrikfelder Technologie, Organisation, Raum, Mensch und Führung adressiert [13,15]. Aus der Verschneidung dieser beiden Dimensionen resultiert eine zweidimensionale Matrix, deren einzelne Schnittpunkte als Fabrikobjekte definiert werden [13]. In Anlehnung an die Arbeiten von WULF [16] wurden diese Objekte im Rahmen des Projekts reduziert. Dabei lag der Fokus auf jenen Elementen des Fabriksystems, die von Produktvarianten beeinflusst werden (s. Abbildung 1).





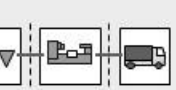
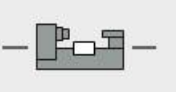
		Horizontale Strukturierung des Fabriksystems			
		Fabrikfelder	Technologie	Organisation	Raum
Vertikale Strukturierung des Fabriksystems	Fabrikebenen				
	level III: Gebäude		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Informations-technologie 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Produktionskonzept ▪ Logistikkonzept ▪ Struktur 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Technische Gebäudeausrüstung ▪ Tragwerk, Hülle ▪ Hülle
	level II: Segment		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lagermittel ▪ Transportmittel 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Arbeitsorganisation und -planung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausbau
level I: Arbeitsplatz		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fertigungstechnologie ▪ Produktionsmittel ▪ Sonstige Mittel 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Qualitätssicherungskonzept 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Arbeitsplatzgestaltung 	

Abbildung 1: Dekomposition des Fabriksystems nach HEGER [13] mit beispielhaften Fabrikobjekten die im Rahmen des Vorhabens Va-KoFa als relevant identifiziert wurden [17].

Dazu wurden vorerst alle Fabrikobjekte einer Bewertung unterzogen. Hierzu wurden sechs Bewertungskriterien definiert:

- **Einfluss:** Beeinflusst das Fabrikobjekt direkt die Herstellung einer neuen Produktvariante?
- **Flexibilität:** Wie leicht kann das Fabrikobjekt an die Anforderungen der neuen Produktvariante angepasst werden?

- **Datenverfügbarkeit:** Gibt es grundsätzlich Daten, um fundierte Entscheidungen über Auswirkungen zu treffen?
- **Produktqualität:** Beeinflusst das Fabrikobjekt die Qualität der neuen Produktvariante?
- **Zeit & Kosten:** Verursacht die Anpassung des Fabrikobjekts signifikanten Zeit- und Kostenaufwand?
- **Abhängigkeiten:** Gibt es kritische Schnittstellen oder Wechselwirkungen mit anderen relevanten Fabrikobjekten?

Unter Einbeziehung von Experteninterviews sowie der Expertise des PA-Ausschusses wurden die für die Einführung neuer Produktvarianten relevanten Fabrikobjekte durch eine Bewertung der jeweiligen Kriterien (Bewertung: 0 = Kein Einfluss / Nicht relevant, 1 = Gering, 2 = Mittel, 3 = Hoch) identifiziert und in das Beschreibungsmodell integriert. Exkludiert wurden dabei die Ebenen des Produktionsnetzwerks sowie des Werks. Diese Entscheidung begründet sich dadurch, dass diese Ebenen primär die langfristig stabilen Grundstrukturen eines Fabriksystems darstellen. Eine neue Produktvariante induziert im Regelfall keine signifikanten Änderungen an der Basisinfrastruktur wie der primären Energieversorgung. Während die Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik gegenüber Variantenänderungen meist unverändert bleibt, wurde die technische Gebäudeausrüstung (TGA) auf der Gebäudeebene dennoch als relevantes Objekt berücksichtigt, sofern direkte Abhängigkeiten bestehen. Als besonders relevant wurden dabei die Fabrikobjekte Produktionsmittel und Produktionstechnologie bewertet, gefolgt vom Produktions- und Logistikkonzept sowie Layout und Lagermittel. Abschließend konnten Fabrikobjekte zweiter Ordnung nach HEGER [13] den identifizierten relevanten Fabrikobjekten erster Ordnung zugeordnet werden (z. B. lassen sich dem Tragwerk als Fabrikobjekt erster Ordnung Stützen, Träger, Wände und Decken als Fabrikobjekte zweiter Ordnung zuordnen). Die identifizierten Fabrikobjekte können unterschiedliche Konfigurationen aufweisen (Konfigurationsmerkmale), die im Zuge der Planung festgelegt werden, wie beispielsweise die Differenzierung zwischen verschiedenen Lagersystemen. Insgesamt konnten 118 verschiedene Konfigurationsmöglichkeiten den relevanten Fabrikobjekten zugeordnet werden. Daraus leiten sich die systemimmanenten Parameter [18] ab, die im weiteren Projektverlauf als Kapazitätsmerkmale bezeichnet werden. Diese Merkmale definieren die Leistungsgrenzen des Systems. Ein Überschreiten dieser Grenzen führt unweigerlich zu Investitionsbedarf sowie strukturellen Änderungen des Fabriksystems und somit zu Kosten. Die Gesamtheit dieser Merkmale bildet das sogenannte Fabrikprofil, welches die Angebotsseite der Produktion repräsentiert.

Die komplementäre Entsprechung zum Fabrikprofil bildet das Produktvariantenprofil, welches die Anforderungen der Nachfrageseite bündelt. Dieses Profil setzt sich aus strategischen Basiskennzahlen, wie etwa dem angestrebten Verkaufspreis oder den geplanten Absatzmengen, sowie spezifischen Änderungsdimensionen zusammen. Zur Identifikation dieser Dimensionen wurde auf die von WULF [16] definierten Cluster und deren 18 Einflussfaktoren zurückgegriffen, die ursprünglich für die Bewertung gänzlich neuer Produkte entwickelt wurden. Durch eine kritische Analyse und Reduktion dieser Merkmale auf die Spezifika von Produktvarianten wurden sechs zentrale Veränderungsdimensionen und fünf Basiskennzahlen extrahiert (s. Abbildung 2). Merkmale, die bei der Variantenbildung typischerweise konstant bleiben (z. B. der Aggregatzustand der Materie), wurden im Sinne der Modellanwendbarkeit vernachlässigt.



Produktvariantenprofil	
Änderungsdimensionen	Basiskennzahlen
	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dimensionen ▪ Gewicht ▪ Material ▪ Farbe ▪ Qualitätsanforderungen ▪ Produktkomplexität 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Menge ▪ Verkaufspreis ▪ Direkte Kosten ▪ Produktionszeit ▪ Montage und Fertigungstiefe

Abbildung 2: Produktvariantenprofil, bestehend aus den Änderungsdimensionen und Basiskennzahlen [17].

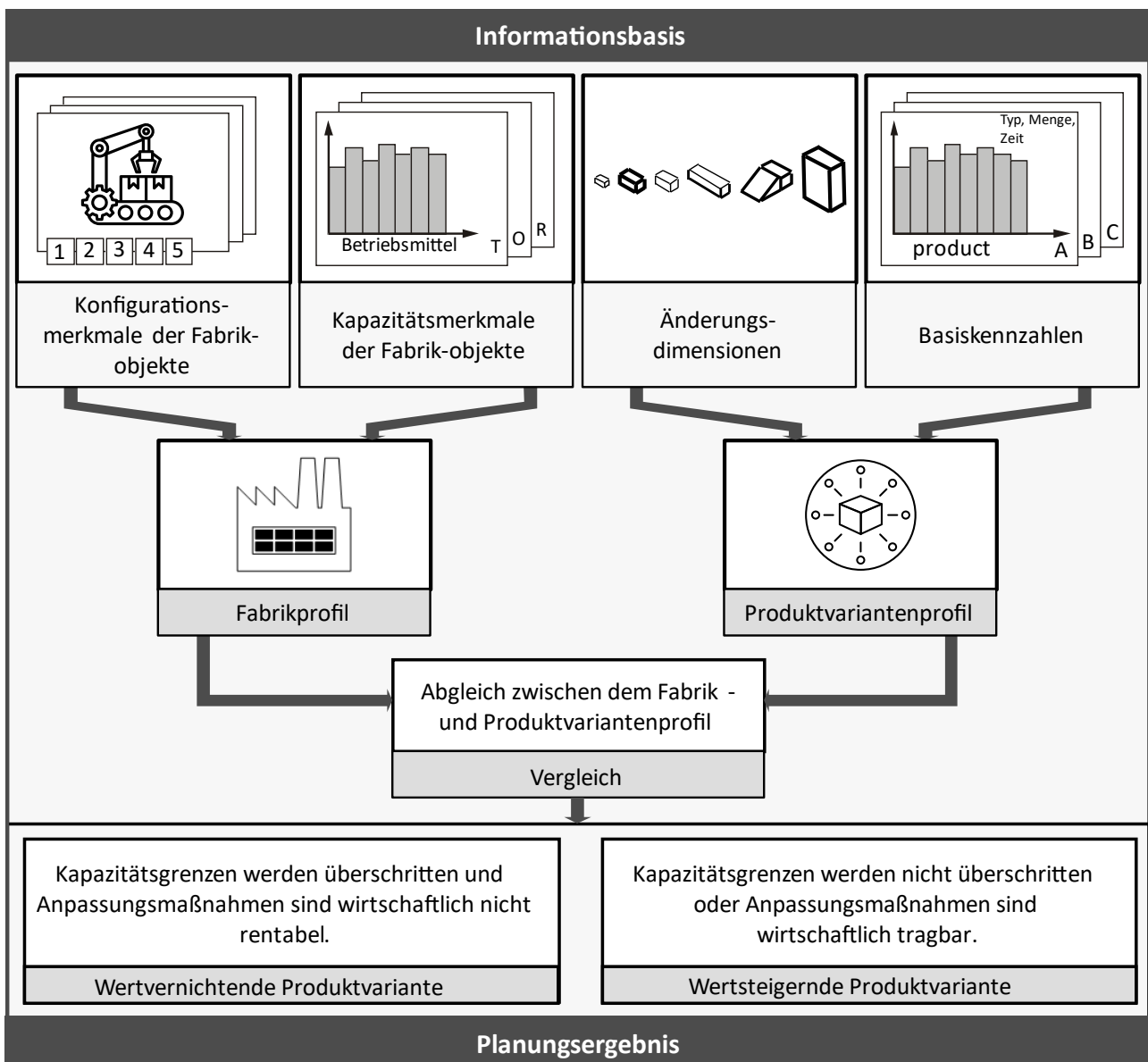


Abbildung 3: Übergeordnete Systematik zur Unterscheidung zwischen wertvernichtenden und wertsteigernden Produktvarianten [17].

Ein wesentlicher Bestandteil des Modells ist die ökonomische Abwägung zwischen wertsteigernden und wertvernichtenden Varianten. Vor einer abschließenden Bewertung müssen mögliche Anpassungsmaßnahmen zur Harmonisierung von Fabrik- und Produktvariantenprofil geprüft werden. Eine Produktvariante wird als wertvernichtend eingestuft, wenn sie die vorhandenen Kapazitätsgrenzen der Fabrik überschreitet und

die zur Kompensation notwendigen Investitionsmaßnahmen nicht wirtschaftlich darstellbar sind. Im Gegensatz dazu zeichnet sich eine wertsteigernde Variante dadurch aus, dass sie entweder innerhalb der vorhandenen Ressourcenkapazitäten realisiert werden kann oder die erforderlichen Anpassungen eine positive ökonomische Bilanz aufweisen (s. Abbildung 3).

Zusammenfassend bildet das erste Arbeitspaket den theoretischen und strukturellen Rahmen für die nachfolgende Forschungsarbeit. Aus der Problemstellung wurden für die weitere Bearbeitung sechs zentrale Anforderungen abgeleitet, die als Leitplanken für die weitere Ausdetaillierung dienen [12]: Das Modell muss erstens eine ganzheitliche Betrachtung des Fabriksystems gewährleisten und zweitens sämtliche Interdependenzen zwischen Änderungsdimensionen und Fabrikobjekten abbilden. Drittens ist die explizite Berücksichtigung von Kapazitätsgrenzen zwingend erforderlich, woraus viertens die Notwendigkeit zur Ableitung konkreter Handlungsempfehlungen bei Grenzüberschreitungen resultiert. Schließlich muss das Modell fünftens eine universelle Anwendbarkeit auf unterschiedliche Fabrikssysteme bieten und sechstens eine hohe Praktikabilität aufweisen, um eine einfache Implementierung in industriellen Kontexten zu ermöglichen.

Ergebnisse

Die Ergebnisse des ersten Arbeitspakets umfassen die Entwicklung eines ganzheitlichen Beschreibungsmodells, das auf der systematischen Gegenüberstellung von dem definierten Fabrikprofil (bestehend aus den Konfigurations- und Kapazitätsmerkmalen) und Produktvariantenprofil (bestehend aus den Änderungsdimensionen und den Basiskennzahlen) basiert. Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit wurde ein Bewertungsrahmen etabliert, der Varianten anhand der wirtschaftlichen Darstellbarkeit notwendiger Anpassungsmaßnahmen in wertsteigernd oder wertvernichtend klassifiziert. Abschließend resultieren aus dem Arbeitspaket sechs zentrale Anforderungen, die als methodische Leitplanken für die weitere Projektausgestaltung dienen.

1.3 Arbeitspaket 2: Definition von Konfigurationsmerkmalen und Bewertung der Wirkbeziehungen

Ziele

Das zentrale Ziel dieses Arbeitspakets besteht darin, die direkten Wirkbeziehungen zwischen den im ersten Arbeitspaket definierten Profilen (den Änderungsdimensionen und Basiskennzahlen einer Produktvariante sowie den Konfigurationsmerkmalen der Fabrikobjekte) im Detail zu untersuchen. Hierzu wird die Erstellung eines umfassenden Maximalkatalogs angestrebt, der sämtliche potenzielle Konfigurationsmerkmale der relevanten Fabrikobjekte abbildet. Durch einen anschließenden, systematischen Bewertungsprozess soll dieser Katalog auf die für die Produktvarianteneinführung tatsächlich relevanten Merkmale reduziert werden.

Durchgeführte Arbeiten

Die methodische Umsetzung erfolgte in einem zweistufigen Prozess, beginnend mit der Erstellung eines umfassenden Basiskatalogs. Hierbei wurden die im vorangegangenen Arbeitspaket als relevant identifizierten Fabrikobjekte als Grundlage herangezogen. Mittels einer Kombination aus einer Literaturrecherche und gezielten Experteninterviews konnten insgesamt 232 spezifische Konfigurationsmerkmale identifiziert, beschrieben und den jeweiligen Fabrikobjekten zugeordnet werden. Die Struktur des Katalogs umfasst dabei das übergeordnete Fabrikobjekt, eine detaillierte Beschreibung, mögliche Ausprägungen sowie, sofern anwendbar, die zugehörigen Einheiten (z. B. kg/m², m, m², %, h, kW etc.). Ein exemplarisches Beispiel bildet das Fabrikobjekt „Lagermittel“: Hier wurde unter anderem das Konfigurationsmerkmal „Lagertyp“ definiert,

welches zwischen verschiedenen Systemen wie Regallagern (z. B. Paletten- oder Flachregale) und Bodenlagern differenziert. Ergänzend dazu wurde die „Traglast“ als quantitatives Merkmal aufgenommen.

Da ein Maximalkatalog dieser Größenordnung zu komplex ist und nicht alle definierten Konfigurationsmerkmale im Kontext der Einführung neuer Produktvarianten relevant sind, wurde in einem zweiten Schritt ein systematischer Bewertungsprozess zur Priorisierung der Merkmale durchgeführt. Ein interdisziplinäres Expertenteam, bestehend aus Fachvertretern der Fabrikplanung und Produktionslogistik, bewertete die Merkmale im Rahmen strukturierter Workshops. Als methodisches Werkzeug diente eine Bewertungsmatrix (s. Abbildung 4), die jedes Merkmal anhand dreier zentraler Kriterien auf einer Skala von null bis drei untersuchte:



Bewertungskriterium	Erklärung	Skala
		
1. Direkter Einfluss	Grad, in dem eine neue Produktvariante die Eigenschaft direkt beeinflusst	0 (kein) – 3 (kritisch)
2. Systematische Abhängigkeit	Kritikalität von Interaktionen mit anderen Fabrikobjekten	0 (isoliert) – 3 (stark zusammenhängend)
3. Anpassungsaufwand	Kosten und Zeitaufwand für erforderliche Anpassungen	0 (gering) – 3 (hoch)

Abbildung 4: Systematik zur Bewertung der 232 Konfigurationsmerkmale [19].

Durch die Anwendung der drei Kriterien wird sichergestellt, dass die Konfigurationsmerkmale nicht rein subjektiv, sondern auf Basis einer belastbaren Logik priorisiert werden. In den durchgeführten Workshops zeigte sich, dass insbesondere die Verknüpfung der Kriterien 1 und 2 eine Identifikation von „Schlüsselmerkmalen“ ermöglicht. Ziel ist es gewesen, die kritischen Hebel für die Planung zu identifizieren und Konfigurationsmerkmale, die nicht wesentlich relevant sind von der weiteren Betrachtung auszuschließen.

Um die praktische Anwendung der Bewertungssystematik zu verdeutlichen, zeigt Abbildung 5 einen Auszug der Ergebnisse für das Fabrikobjekt „Lagermittel“ innerhalb des Fabrikfelds „Technologie“. In diesem Prozess wurden verschiedene Konfigurationsmerkmale anhand der drei definierten Kriterien (Direkter Einfluss, Systematische Abhängigkeit, Anpassungsaufwand) bewertet, um deren Relevanz für das weitere Vorhaben zu bestimmen. Hierbei zeigt sich, dass Merkmale wie die Tragfähigkeit oder die Ladekapazität mit einer Gesamtbewertung von jeweils 7 als besonders kritisch eingestuft werden. So wird die Tragfähigkeit durch neue Produktvarianten, etwa durch ein signifikant höheres Gewicht, direkt beeinflusst, während der damit verbundene Anpassungsaufwand als hoch bewertet wird.

Um die Effizienz des Planungsprozesses zu steigern, wurde ein Schwellenwert für den Ausschluss von Merkmalen festgelegt. Merkmale, die in der Gesamtbewertung einen Wert von drei oder weniger erreichen, werden für die weitere Betrachtung als nicht relevant eingestuft. Ein Beispiel hierfür ist der Wartungsaufwand des Lagermittels, der mit einer Gesamtbewertung von 2 unter den Schwellenwert fällt. Da neue Produktvarianten in der Regel keinen direkten Einfluss auf diesen Faktor haben (Bewertung 0), ist eine detaillierte Berücksichtigung im Rahmen der Variantenplanung nicht erforderlich. Durch diese methodische Filterung wird

sichergestellt, dass sich die Planung auf die wesentlichen Hebel konzentriert, die eine tatsächliche Auswirkung auf die Fabrikstruktur haben.

Bewertungskriterien		Fabrikobjekt: Lagermittel			
		Direkter Einfluss	Systematische Abhängigkeit	Anpassungsaufwand	Gesamtbewertung
Fabrikfeld: Technologie	Konfigurationsmerkmale				
	Tragfähigkeit	3	1	3	7
	Ladekapazität	2	2	3	7
	Art der Lagerung	1	2	3	6
	Stapelhöhe	2	1	3	6
	Durchsatz	1	2	2	5
	Füllmenge des Ladungsträgers	1	1	1	3
	Energieeffizienz	0	1	2	3
Wartungsaufwand	0	1	1	2	

Abbildung 5: Auszug aus der Bewertung für das Fabrikfeld Technologie und das Fabrikobjekt Lagermittel [19].

Darüber hinaus wurden die Konfigurationsmerkmale des Fabrikfelds Organisation einer kritischen Prüfung unterzogen. Im Ergebnis wurden diese für die weitere Primärbetrachtung als vernachlässigbar eingestuft, da sie in der Regel keinem direkten Einfluss durch neue Produktvarianten unterliegen. Die Notwendigkeit organisatorischer Anpassungen ergibt sich stattdessen meist indirekt aus der spezifischen Ausgestaltung der Merkmale in den Feldern Technologie und Raum. Veränderungen in diesem Bereich fungieren somit primär als reaktive Anpassungsmaßnahmen, die erst dann ausgelöst werden, wenn unzureichende Ressourcen oder Kapazitätsengpässe in den technologischen oder räumlichen Strukturen vorliegen und eine organisatorische Neuausrichtung erzwingen. Die Auswertung ergab auch, dass die Einführung einer neuen Produktvariante die größten Auswirkungen auf die Fabrikobjekte Lagermittel, Transportmittel, Produktionstechnik, technische Gebäudeausrüstung und das Layout hat. Von den 232 identifizierten Konfigurationsmerkmalen wurden nach der Auswertung 67 als relevant eingestuft (21 aus dem Fabrikfeld Raum und 46 aus dem Fabrikfeld Technologie). Hingegen konnten 159 Merkmale ausgeschlossen werden.

Erzielte Ergebnisse

Die Ergebnisse des zweiten Arbeitspakets umfassen die Erstellung eines umfassenden Basiskatalogs, der insgesamt 232 spezifische Konfigurationsmerkmale der als zuvor relevant identifizierten Fabrikobjekte abbildet. Diese Merkmale wurden den im vorangegangenen Arbeitsschritt als relevant identifizierten Fabrikobjekten präzise zugeordnet. Als wesentliches methodisches Ergebnis wurde zudem eine standardisierte Bewertungsmatrix etabliert, die eine belastbare Priorisierung der Merkmale anhand der Kriterien „Direkter Einfluss“, „Systematische Abhängigkeit“ und „Anpassungsaufwand“ ermöglicht. Durch die Verknüpfung dieser Kriterien konnten die für die Planung kritischen Schlüsselmerkmale (Hebel) von weniger relevanten unterschieden werden. Abschließend wurden 67 Konfigurationsmerkmale als relevant identifiziert. Diese bilden die Basis für die nachfolgend zu identifizierenden Kapazitätsmerkmale im Arbeitspaket 3.

1.4 Arbeitspaket 3: Definition von Kapazitätsfunktionen

Ziele

Das primäre Ziel dieses Arbeitspakets bestand darin, für die im vorangegangenen Schritt identifizierten relevanten Fabrikobjekte spezifische Kapazitätsmerkmale aus den Konfigurationsmerkmalen abzuleiten, um daraus belastbare Kapazitätsfunktionen abzuleiten. Diese Funktionen bilden die methodische Grundlage, um einen systemischen Abgleich zwischen dem Fabrikprofil (Angebotsseite) und dem Produktvariantenprofil (Nachfrageseite) durchzuführen. Dadurch soll die Fabrikplanung in die Lage versetzt werden, die technische und kapazitative Machbarkeit neuer Produktvarianten objektiv zu bewerten.

Durchgeführte Arbeiten

Die methodische Herleitung der Kapazitätsmerkmale basierte auf den 67 als relevant eingestuften Konfigurationsmerkmalen. Im Rahmen einer detaillierten Analyse wurde untersucht, wie diese technischen Merkmale die Leistungsgrenzen des Fabriksystems determinieren. Dabei zeigte sich, dass Kapazitätsmerkmale primär aus systemimmanenten Parametern resultieren. Während aus einem einzelnen inhärenten Merkmal oft mehrere Kapazitätsmerkmale abgeleitet werden können, fungieren systemkonfigurierende Merkmale, wie beispielsweise der Lagertyp, als qualitative Restriktionen. In diesen Fällen wird im Modell geprüft, ob die erforderliche Konfiguration grundsätzlich vorhanden ist, bevor eine quantitative Kapazitätsprüfung erfolgt.

Insgesamt wurden 33 Kapazitätsmerkmale definiert und in Experteninterviews verifiziert. Ein exemplarisches Ergebnis stellt die Analyse des Fabrikobjekts „Lagermittel“ dar: Aus dem Konfigurationsmerkmal der Stapelhöhe wurden die Kapazitätsmerkmale „maximale Stapelhöhe pro Lagerplatz“ sowie die „maximale Anzahl an Stapelebenen“ abgeleitet. Zur Dokumentation wurde eine tabellarische Systematik erstellt, welche die Kapazitätsmerkmale inklusive ihrer Definitionen und physikalischen Einheiten den jeweiligen Fabrikobjekten und Konfigurationsmerkmalen zuordnet (s. Abbildung 6).

		Fabrikobjekt: Lagermittel	
Konfigurationsmerkmale		Kapazitätsmerkmal	Beschreibung
Fabrikfeld: Technik	Tragfähigkeit	Max. Tragfähigkeit pro Lagerplatz	Gibt an, welches Gewicht ein einzelner Lagerplatz
	Ladekapazität	Max. Stellplatzanzahl	Gibt an, wie viele Stellplätze in dem Lager zur Ver
		Max. Belegungsgrad	Gibt den maximal zulässigen Auslastungsgrad der
	Art der Lagerung	-	-
	Stapelhöhe	Max. Anzahl der Stapelebenen	Gibt an, wie viele Ebenen übereinandergestapelt w
		Max. Höhe pro Lagerraum	Maximale vertikale Höhe, die für die Lagerung ver
Umschlagshäufigkeit	Max. Durchflussrate	Höchste Anzahl von Lagerbewegungen pro Zeitein	

Abbildung 6: Auszug aus den definierten Konfigurationsmerkmalen für das Fabrikobjekt Lagermittel im Fabrikfeld Technik [19].

Um die Auswirkungen von Produktänderungen (z. B. Erhöhung des Gewichts oder der Dimensionen) auf diese Kapazitätsgrenzen abzubilden, wurde eine Domain Mapping Matrix (DMM) eingesetzt. Diese Matrix ermöglicht eine Zuordnung von Änderungsdimensionen des Produkts zu den betroffenen Fabrikobjekten. Dies soll im späteren Projektverlauf eine gezieltere zweistufige Prüfung erlauben:

- Konfigurationsprüfung: Es wird ermittelt, ob die betroffenen Fabrikobjekte für die neuen Anforderungen (z. B. ein spezifischer Fertigungsprozess) grundsätzlich geeignet konfiguriert sind.
- Kapazitätsprüfung: Es wird quantitativ abgeglichen, ob die neuen Anforderungen innerhalb der definierten Leistungsgrenzen (z. B. maximale Ladekapazität oder verfügbare Lagerplätze) liegen.

Besondere Bedeutung kommt diesem Vorgehen bei Fabrikssystemen zu, die bereits nahe an ihrer Belastungsgrenze operieren. Hier soll das Modell dazu dienen, frühzeitig zu erkennen, wann die Einführung einer neuen Variante die Kapazitätsgrenzen überschreitet und somit Anpassungsmaßnahmen der Fabrikplanung erzwingt.

Erzielte Ergebnisse

Die Ergebnisse des dritten Arbeitspakets umfassen die Definition von 33 spezifischen Kapazitätsmerkmalen, die auf Basis der 67 als relevant identifizierten Konfigurationsmerkmale hergeleitet wurden. Diese Merkmale wurden in einer tabellarischen Systematik dokumentiert, welche neben den Definitionen und physikalischen Einheiten die präzise Zuordnung zu den Fabrikobjekten sicherstellt. Als wesentliches methodisches Ergebnis wurde eine Domain Mapping Matrix (DMM) erstellt, welche die Wirkzusammenhänge zwischen den Änderungsdimensionen des Produkts und den betroffenen Fabrikobjekten abbildet. Darauf aufbauend wurde ein zweistufiges Prüfverfahren etabliert, das zunächst die qualitative Eignung der Konfiguration prüft und anschließend einen quantitativen Abgleich mit den Leistungsgrenzen (Kapazitätsprüfung) durchführt. Damit wurde die methodische Grundlage geschaffen, um die technische und kapazitative Machbarkeit neuer Varianten objektiv zu bewerten und notwendige Anpassungsmaßnahmen frühzeitig zu identifizieren.

1.5 Arbeitspaket 4: Wenn-Dann-Regelwerk

Ziele

Das primäre Ziel dieses Arbeitspakets lag in der Definition eines systematischen Wenn-Dann-Regelwerks, das technische Kapazitätsüberschreitungen direkt mit spezifischen Handlungsempfehlungen verknüpft. Hierzu soll ein umfassender Maßnahmenkatalog entwickelt werden, der Unternehmen nicht nur Lösungen aufzeigt, sondern diese auch hinsichtlich ihrer zeitlichen, finanziellen und strategischen Auswirkungen bewertbar macht.

Durchgeführte Arbeiten

Die methodische Grundlage bildete die Erweiterung der in Arbeitspaket 1 definierten Systematik zum Abgleich von Fabrik- und Produktvariantenprofilen. Zur Operationalisierung wurde eine Wirkkette implementiert: Ausgehend von den Änderungsdimensionen des Produkts (z. B. Abmessungen oder Gewicht) werden über die DMM die betroffenen Fabrikfelder und -objekte identifiziert. Führt die Überprüfung der Kapazitätsgrenzen zu einem negativen Ergebnis, etwa wenn das Gewicht einer neuen Variante die maximale Tragfähigkeit der Lagerstruktur überschreiten würde, wird das Wenn-Dann-Regelwerk aktiviert (s. Abbildung 7).

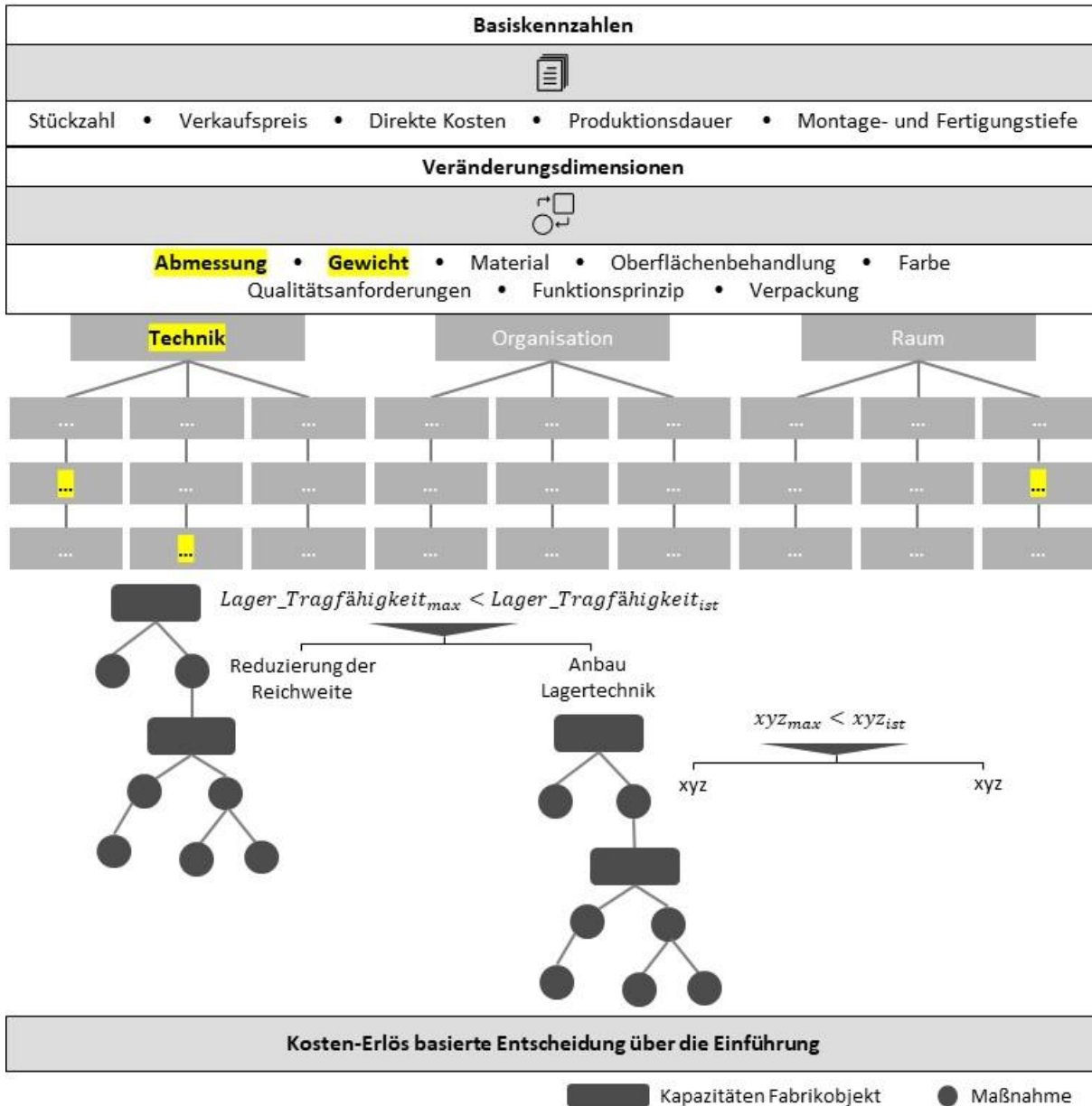


Abbildung 7: Auszug aus den definierten Konfigurationsmerkmalen für das Fabrikobjekt Lagermittel im Fabrikfeld Technik [17].

Zur Bereitstellung geeigneter Lösungen wurde ein Katalog aus insgesamt 424 Maßnahmen erarbeitet. Diese wurden literaturbasiert, aus abgeschlossenen Industrieprojekten des IFA sowie durch Experteninterviews erstellt und den jeweiligen Kapazitätsmerkmalen zugeordnet. Zur Strukturierung erfolgte eine Kategorisierung nach der zeitlichen und strategischen Reichweite:

- Operative Maßnahmen: Adressieren kurzfristige Engpässe (Tage bis Wochen) durch temporäre Mechanismen wie Schichtanpassungen oder kurzfristige Fremdvergabe. Sie sind meist reversibel und erfordern geringe Investitionen.
- Taktische Maßnahmen: Zielen auf mittelfristige Optimierungen (Wochen bis Monate) ab, etwa durch Layout-Änderungen oder Prozessoptimierungen. Sie bieten eine höhere Effizienz bei moderaten Investitionen.
- Strategische Maßnahmen: Bewirken langfristige strukturelle Anpassungen (Monate bis Jahre) durch substantielle Investitionen in neue Anlagen oder Technologien.

Für die proaktive Planung der Variantenvielfalt wurden insbesondere taktische und strategische Maßnahmen als relevant eingestuft, während operative Maßnahmen primär als Übergangslösungen fungieren. Um eine Auswahl aus den oft zahlreichen Alternativen (z. B. 11 verschiedene Maßnahmen bei Überschreitung der Traglast) zu ermöglichen, wurde ein Bewertungsmodell implementiert. Jede Maßnahme wird anhand von fünf Kriterien auf einer Skala von 1 bis 5 bewertet: Umsetzungszeit, Kosten, Wirksamkeit, Risiko und Reversibilität. Abschließend wurde eine ökonomische Logik integriert: Die ermittelten Anpassungskosten (CapEx und OpEx) werden dem erwarteten Gewinn der Produktvariante gegenübergestellt. Eine Maßnahme gilt als wirtschaftlich tragfähig, wenn der kumulierte Nutzen der Variante über den Planungshorizont die direkten Anpassungskosten übersteigt.

Erzielte Ergebnisse

Das wesentliche Ergebnis ist ein strukturiertes Wenn-Dann-Regelwerk, das 424 verifizierte Maßnahmen umfasst. Durch die Verknüpfung mit einem gewichteten Prioritätsscore und einer Wirtschaftlichkeitsrechnung wurde das Fundament für ein Instrument geschaffen, das den Anwender befähigen soll, nicht nur technisch machbare, sondern ökonomisch rationale Entscheidungen über die Einführung neuer Produktvarianten zu treffen. Damit ist die methodische Voraussetzung für die Überführung in das ganzheitliche Entscheidungsmodell im nächsten Arbeitspaket geschaffen.

1.6 Arbeitspaket 5: Entscheidungsmodell

Ziele

Das primäre Ziel bestand in der Entwicklung eines computergestützten Entscheidungsmodells, das die Erkenntnisse der vorangegangenen Arbeitspakete in ein quantitatives operationalisiertes Bewertungssystem überführt. Dabei sollte ein Instrument geschaffen werden, welches durch die Operationalisierung der Kapazitätsmerkmale einen Abgleich zwischen den Anforderungen einer neuen Produktvariante und dem Leistungsvermögen der Fabrikobjekte ermöglicht.

Durchgeführte Arbeiten

Die methodische Umsetzung basierte auf der mathematischen Abbildung fabrikspezifischer Restriktionen aus den Kapazitätsmerkmalen. Hierzu wurde zwischen zwei Kategorien von Merkmalen differenziert:

- Nicht-summierbare Abgleiche: Diese betreffen vorrangig geometrische oder technische Restriktionen (z. B. Toleranzen). Ein Konflikt wird hierbei durch den Vergleich von Grenzwerten detektiert, wie etwa der maximalen Bearbeitungsgenauigkeit G_{max} einer Maschine gegenüber der geforderten Toleranz T_{var} der Produktvariante. Ein Konflikt tritt ein, wenn $G_{max} > T_{var}$, was zu Qualitätseinbußen oder Ausschuss führen würde.
- Summierbare Abgleiche: Kapazitäten wie Durchlaufzeiten oder Lagermengen werden über räumliche Bereiche aggregiert (z. B. Produktionslinien, Hallenabschnitte oder Segmente). Zur Berechnung der maximalen Produktionsmenge Q_{cap} wurde beispielsweise eine Funktion implementiert, welche die Anzahl der Einheiten n , die Betriebszeit t_{op} und die Zykluszeit t_{cycle} berücksichtigt:

$$Q_{cap} = \frac{n \cdot t_{op}}{t_{cycle}}$$

Zur systematischen Bewertung wird für jeden summierbaren Abgleich ein Auslastungsgrad definiert. Dieser berechnet sich im Standardfall als Quotient aus Bedarf und Kapazität:

$$\eta = \frac{D_{demand}}{C_{supply}}$$

Ein Kapazitätsengpass liegt vor, wenn der Bedarf der neuen Variante die berechnete Kapazitätsgrenze überschreitet. Ein Wert von $\eta > 1$ indiziert hierbei einen kritischen Kapazitätsengpass (**ROT**), während Werte zwischen $0,85 \leq \eta \leq 1$ als Warnbereich (**GELB**) klassifiziert werden, um proaktiv auf drohende Kapazitätsüberschreitungen hinzuweisen.

Die praktische Anwendung erfolgte durch die Entwicklung eines Python-basierten Software-Tools, welches in drei Phasen operiert:

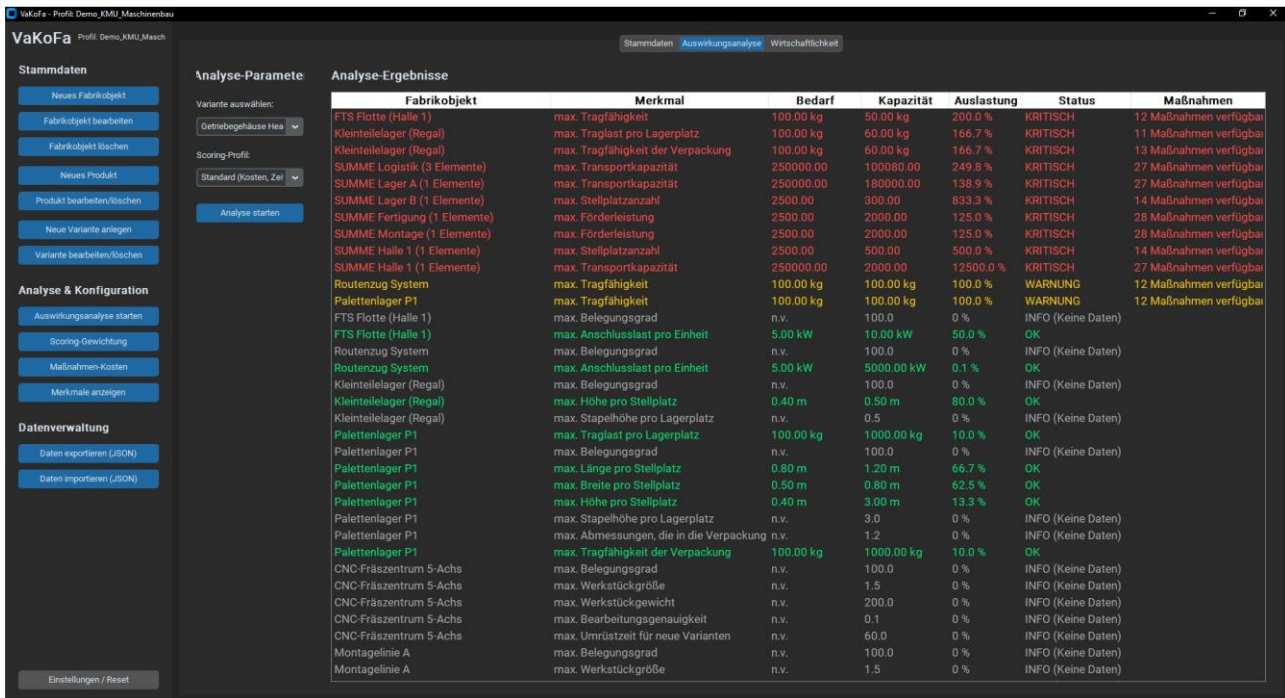
Phase 1: Profilbildung und Parametrierung: Die physische Fabrikstruktur wird digital abgebildet. Hierbei werden Fabrikobjekte (z. B. Betriebs- und Lagermittelmittel wie CNC-Bearbeitungszentren, FTS-Flotten, Regalsysteme) instanziiert und mit ihren spezifischen Konfigurations- und Kapazitätsmerkmalen hinterlegt (siehe Abbildung 8). Außerdem wird ein Produkt mit den Basiskennzahlen angelegt. Ergänzt wird das Produktvariantenprofil um eine neue Produktvariante mit den Änderungsdimensionen.

Name	Kategorie	Ort
FTS Flotte (Halle 1)	Transportmittel	Logistik
Routenzug System	Transportmittel	Logistik
Kleinteillelager (Regal)	Lagermittel	Lager A
Palettenlager P1	Lagermittel	Lager B
CNC Fräszentrum 5-Achs	Produktionsmittel	Fertigung
Montagelinie A	Produktionsmittel	Montage
Stromversorgung Bereich C	Technische Gebäudeausstattung	Halle 2
Montagefläche Boden	Layout	Halle 1
FTS Flotte (Halle 2)	Transportmittel	Logistik
Stromversorgung Halle 1	Technische Gebäudeausstattung	Halle 1

Name	Menge	Verkaufspreis
Getriebegehäuse Standard	1000	450,00 €
Getriebegehäuse Form B	10000	100,00 €
Getriebegehäuse Form C	100	50,00 €

Abbildung 8: Konfiguration des Fabrikprofils im Software-Tool.

Phase 2: Automatisierte Engpassanalyse: Im Kernschritt erfolgt der algorithmische Abgleich zwischen dem Anforderungsprofil einer neuen Produktvariante und den bestehenden Kapazitätsgrenzen des Fabriksystems. Im Validierungsszenario wurde eine „Heavy-Duty“-Variante (64 kg, erhöhte Präzisionsanforderung) gegen die Basis-Variante geprüft. Das Tool identifizierte durch die Anwendung der Kapazitätsfunktionen kritische Verletzungen der Restriktionen ($\eta > 1,0$). Konkret wurde eine Überschreitung der zulässigen Traglast der Lagertechnik sowie der notwendigen Bearbeitungsgenauigkeit der Fertigungsmittel detektiert (s. Abbildung 9).



Fabrikobjekt	Merkmal	Bedarf	Kapazität	Auslastung	Status	Maßnahmen
FTS Flotte (Halle 1)	max. Tragfähigkeit	100,00 kg	50,00 kg	200,0 %	KRITISCH	12 Maßnahmen verfügbar
Kleinteilelager (Regal)	max. Traglast pro Lagerplatz	100,00 kg	60,00 kg	166,7 %	KRITISCH	11 Maßnahmen verfügbar
Kleinteilelager (Regal)	max. Tragfähigkeit der Verpackung	100,00 kg	60,00 kg	166,7 %	KRITISCH	13 Maßnahmen verfügbar
SUMME Logistik (3 Elemente)	max. Transportkapazität	250000,00	100080,00	249,8 %	KRITISCH	27 Maßnahmen verfügbar
SUMME Lager A (1 Elemente)	max. Transportkapazität	250000,00	180000,00	138,9 %	KRITISCH	27 Maßnahmen verfügbar
SUMME Lager B (1 Elemente)	max. Stellplatzanzahl	2500,00	300,00	833,3 %	KRITISCH	14 Maßnahmen verfügbar
SUMME Fertigung (1 Elemente)	max. Förderleistung	2500,00	2000,00	125,0 %	KRITISCH	28 Maßnahmen verfügbar
SUMME Montage (1 Elemente)	max. Förderleistung	2500,00	2000,00	125,0 %	KRITISCH	28 Maßnahmen verfügbar
SUMME Halle 1 (1 Elemente)	max. Stellplatzanzahl	2500,00	500,00	500,0 %	KRITISCH	14 Maßnahmen verfügbar
SUMME Halle 1 (1 Elemente)	max. Transportkapazität	250000,00	2000,00	12500,0 %	KRITISCH	27 Maßnahmen verfügbar
Routenzug System	max. Tragfähigkeit	100,00 kg	100,00 kg	100,0 %	WARNUNG	12 Maßnahmen verfügbar
Palettenlager P1	max. Tragfähigkeit	100,00 kg	100,00 kg	100,0 %	WARNUNG	12 Maßnahmen verfügbar
FTS Flotte (Halle 1)	max. Belegungsgrad	n.v.	100,0	0 %	INFO (Keine Daten)	
FTS Flotte (Halle 1)	max. Anschlusslast pro Einheit	5,00 kW	10,00 kW	50,0 %	OK	
Routenzug System	max. Belegungsgrad	n.v.	100,0	0 %	INFO (Keine Daten)	
Routenzug System	max. Anschlusslast pro Einheit	5,00 kW	5000,00 kW	0,1 %	OK	
Kleinteilelager (Regal)	max. Belegungsgrad	n.v.	100,0	0 %	INFO (Keine Daten)	
Kleinteilelager (Regal)	max. Höhe pro Stellplatz	0,40 m	0,50 m	80,0 %	OK	
Kleinteilelager (Regal)	max. Stapelhöhe pro Lagerplatz	n.v.	0,5	0 %	INFO (Keine Daten)	
Palettenlager P1	max. Traglast pro Lagerplatz	100,00 kg	1000,00 kg	10,0 %	OK	
Palettenlager P1	max. Belegungsgrad	n.v.	100,0	0 %	INFO (Keine Daten)	
Palettenlager P1	max. Länge pro Stellplatz	0,80 m	1,20 m	66,7 %	OK	
Palettenlager P1	max. Breite pro Stellplatz	0,50 m	0,80 m	62,5 %	OK	
Palettenlager P1	max. Höhe pro Stellplatz	0,40 m	3,00 m	13,3 %	OK	
Palettenlager P1	max. Stapelhöhe pro Lagerplatz	n.v.	3,0	0 %	INFO (Keine Daten)	
Palettenlager P1	max. Abmessungen, die in die Verpackung	n.v.	1,2	0 %	INFO (Keine Daten)	
Palettenlager P1	max. Tragfähigkeit der Verpackung	100,00 kg	1000,00 kg	10,0 %	OK	
CNC-Fräszentrum 5-Achs	max. Belegungsgrad	n.v.	100,0	0 %	INFO (Keine Daten)	
CNC-Fräszentrum 5-Achs	max. Werkstückgröße	n.v.	1,5	0 %	INFO (Keine Daten)	
CNC-Fräszentrum 5-Achs	n.v.	n.v.	200,0	0 %	INFO (Keine Daten)	
CNC-Fräszentrum 5-Achs	max. Bearbeitungsgenauigkeit	n.v.	0,1	0 %	INFO (Keine Daten)	
CNC-Fräszentrum 5-Achs	max. Umrüstzeit für neue Varianten	n.v.	60,0	0 %	INFO (Keine Daten)	
Montagelinie A	max. Belegungsgrad	n.v.	100,0	0 %	INFO (Keine Daten)	
Montagelinie A	max. Werkstückgröße	n.v.	1,5	0 %	INFO (Keine Daten)	

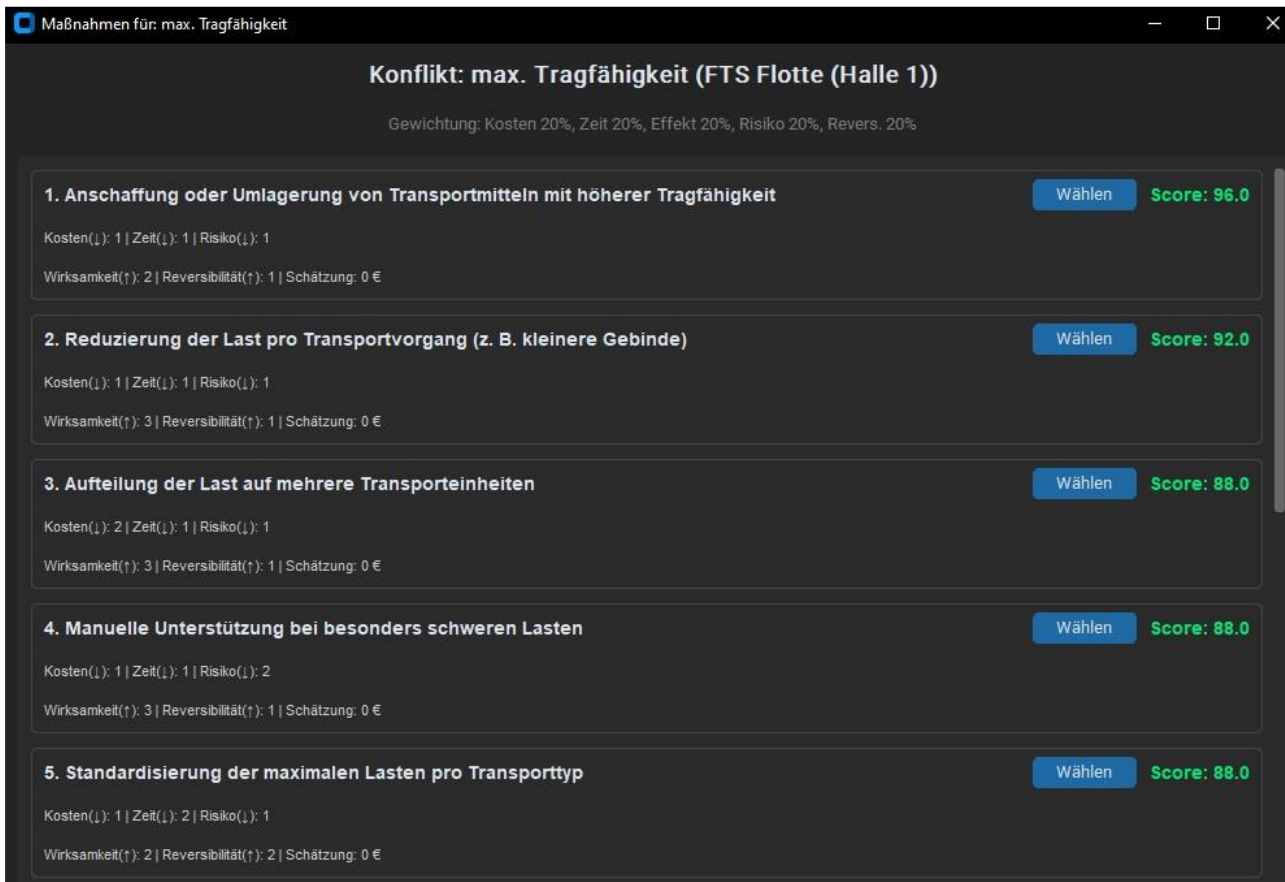
Abbildung 9: Abgleich zwischen Produktvarianten- und Fabrikprofil im Software-Tool.

Phase 3: Entscheidungsunterstützung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung: Basierend auf den identifizierten Konflikten schlägt das System geeignete Maßnahmen aus der Maßnahmen-Datenbank vor (siehe Abbildung 10). Neben der rein monetären Bewertung sieht das Modell eine multikriterielle Bewertung der vorgeschlagenen Maßnahmen vor. Da operative Engpässe häufig durch verschiedene Handlungsalternativen (z. B. Überstunden oder Neuinvestitionen) gelöst werden können, erfolgt eine Gewichtung der Maßnahmen nach den Kriterien *Umsetzungszeit*, *Kosten*, *Wirksamkeit*, *Risiko* und *Reversibilität*. Dies erlaubt es Unternehmen, nicht nur die kostengünstigste, sondern die strategisch geeignetste Lösung zu wählen. Besondere Bedeutung kommt hierbei der Kostenremanenz zu. Werden Kapazitäten für eine Variante aufgebaut, die später aufgrund sinkender Nachfrage nicht mehr ausgelastet sind, verbleiben oft die Investitionskosten im System. Das Kostenmodell berücksichtigt diese langfristigen Effekte, indem es die Flexibilität und Reversibilität der gewählten Maßnahmen in die Gesamtbewertung einbezieht. Somit transformiert das Modell die technische Engpassanalyse in eine ganzheitliche Entscheidungshilfe.

Die hinterlegten Kostensätze für Investitionen (CapEx) und laufende Mehrkosten (OpEx) werden automatisch in eine individuelle Wirtschaftlichkeitsrechnung überführt. Eine Maßnahme bzw. die Einführung der Variante gilt als wirtschaftlich sinnvoll, wenn der kumulierte Nutzen über den Planungshorizont n die Summe der Anpassungskosten übersteigt

$$\sum_{t=1}^n \text{Gewinn}_{var,t} \geq \text{CapEx}_{var} + \sum_{t=1}^n \Delta \text{OpEx}_t$$

Die mathematische Abbildung dieser Funktionen erlaubt es, das Fabriksystem nicht mehr nur als starre Anordnung von Objekten, sondern als dynamisches Geflecht von Kapazitätsgrenzen zu begreifen. Durch diese können die Auswirkungen von Änderungen in den verschiedenen Dimensionen unmittelbar auf die betroffenen Fabrikobjekte projiziert werden. Dies schafft die notwendige Transparenz, um bereits in der frühen Phase der Produktentwicklung fundierte Aussagen über die technische Machbarkeit und den daraus resultierenden Anpassungsbedarf zu treffen.



Maßnahmen für max. Tragfähigkeit

Konflikt: max. Tragfähigkeit (FTS Flotte (Halle 1))

Gewichtung: Kosten 20%, Zeit 20%, Effekt 20%, Risiko 20%, Revers. 20%

Maßnahme	Wählen	Score
1. Anschaffung oder Umlagerung von Transportmitteln mit höherer Tragfähigkeit Kosten(↓): 1 Zeit(↓): 1 Risiko(↓): 1 Wirksamkeit(↑): 2 Reversibilität(↑): 1 Schätzung: 0 €	Wählen	Score: 96.0
2. Reduzierung der Last pro Transportvorgang (z. B. kleinere Gebinde) Kosten(↓): 1 Zeit(↓): 1 Risiko(↓): 1 Wirksamkeit(↑): 3 Reversibilität(↑): 1 Schätzung: 0 €	Wählen	Score: 92.0
3. Aufteilung der Last auf mehrere Transporteinheiten Kosten(↓): 2 Zeit(↓): 1 Risiko(↓): 1 Wirksamkeit(↑): 3 Reversibilität(↑): 1 Schätzung: 0 €	Wählen	Score: 88.0
4. Manuelle Unterstützung bei besonders schweren Lasten Kosten(↓): 1 Zeit(↓): 1 Risiko(↓): 2 Wirksamkeit(↑): 3 Reversibilität(↑): 1 Schätzung: 0 €	Wählen	Score: 88.0
5. Standardisierung der maximalen Lasten pro Transporttyp Kosten(↓): 1 Zeit(↓): 2 Risiko(↓): 1 Wirksamkeit(↑): 2 Reversibilität(↑): 2 Schätzung: 0 €	Wählen	Score: 88.0

Abbildung 10: Entscheidungsunterstützung mit gewichteten Maßnahmen.

Erzielte Ergebnisse

Das Ergebnis dieses Arbeitspakets ist ein funktionsfähiges Software-Tool zur objektiven Bewertung der technischen und ökonomischen Machbarkeit von Produktvarianten. Durch die mathematische Verknüpfung von Kapazitätsgrenzen, Maßnahmenbewertung und Kostenmodell wurde eine ganzheitliche Entscheidungshilfe für das strategische Variantenmanagement geschaffen, die über eine rein technische Engpassbetrachtung hinausgeht.

1.7 Arbeitspaket 6: Evaluierung und Kalibrierung

Ziele

Das zentrale Ziel des sechsten Arbeitspakets lag in der Validierung der entwickelten Methodik sowie der softwaretechnischen Kalibrierung des Entscheidungsmodells unter realitätsnahen Bedingungen. Dabei sollte insbesondere die Praxistauglichkeit und Robustheit des Modells für KMU überprüft werden.

Durchgeführte Arbeiten

Die methodische Evaluierung wurde anhand des Szenarios „Demo_KMU_Maschinenbau“ durchgeführt, welches die Einführung einer schweren „Heavy-Duty“-Antriebswelle in ein bestehendes Produktionssystem simulierte. In enger Abstimmung mit dem PA wurden dabei verschiedene Szenarien simuliert, um die Zuordnung der Maßnahmen bei Kapazitätsüberschreitungen kritisch zu prüfen. Im Rahmen dieser Testläufe

identifizierte Unstimmigkeiten, wie etwa unrealistisch hohe Auslastungsgrade im vierstelligen Prozentbereich, wurden durch iterative Anpassungen der Berechnungslogik korrigiert. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten widmete sich der Untersuchung der Datenverfügbarkeit: Um die Einstiegsbarrieren für Unternehmen zu senken, wurde das Tool auf seine Robustheit gegenüber lückenhaften Datensätzen geprüft. Hierbei wurde nachgewiesen, dass durch den Rückgriff auf hinterlegte Standardwerte („Default Values“) auch dann plausible Engpassanalysen generiert werden können, wenn spezifische Maschinendaten oder exakte Kosten zum Planungszeitpunkt noch nicht detailliert erfasst sind.

Erzielte Ergebnisse

Die Ergebnisse der Evaluierung bestätigten einen erheblichen Effizienzgewinn für die industrielle Praxis: Während die manuelle Erfassung und Berechnung komplexer Wirkbeziehungen oft umfangreiche Workshops beansprucht, ermöglichte das Modell im Testszenario eine erste belastbare Bewertung in weniger als einer Stunde. Das Tool konnte die untersuchte „Heavy-Duty“-Variante korrekt als wertvernichtend klassifizieren, da die notwendigen Investitionen in die Lager- und Fördertechnik durch den prognostizierten Deckungsbeitrag nicht amortisiert werden konnten. Damit wurde nachgewiesen, dass das System als effektives Entscheidungsunterstützungssystem fungiert.

1.8 Arbeitspaket 7: Wissenschaftlicher Transfer

Ziele

Das übergeordnete Ziel des siebten Arbeitspakets bestand darin, einen kontinuierlichen und nachhaltigen wissenschaftlichen Transfer der im Projektverlauf gewonnenen Erkenntnisse sicherzustellen. Dabei sollte die im Vorhaben entwickelte Methodik sowohl in der Fachwelt als auch in der industriellen Praxis bekannt gemacht werden.

Durchgeführte Arbeiten

Basierend auf den Ergebnissen der Arbeitspakete 1 bis 6 wurden die Projekterkenntnisse projektbegleitend aufbereitet und über verschiedene Kanäle disseminiert:

- **Publikationen und Konferenzen:** Die methodischen Grundlagen sowie die Ergebnisse der Praxiserprobung wurden in Fachorganen veröffentlicht. Darüber hinaus wurden die Zwischenergebnisse im Rahmen internationaler Fachkonferenzen einem breiten wissenschaftlichen Publikum präsentiert und im Hinblick auf die methodische Belastbarkeit diskutiert.
- **Externe Abschlussarbeiten:** Über zahlreiche externe Abschlussarbeiten wurde ein direkter bidirektionaler Austausch realisiert: Hierbei flossen einerseits wertvolle Erkenntnisse aus produzierenden Unternehmen in das Vorhaben ein, während gleichzeitig die Projektergebnisse unmittelbar in die betriebliche Praxis der beteiligten Unternehmen transferiert wurden.
- **Dokumentation:** Alle Zwischen- und Endergebnisse wurden systematisch aufgearbeitet, um eine langfristige Verwertbarkeit der Projektergebnisse über die Projektlaufzeit hinaus zu ermöglichen.

Erzielte Ergebnisse

Der wissenschaftliche Transfer wurde erfolgreich realisiert, was sich in einer breiten Sichtbarkeit der Projektergebnisse widerspiegelt.

2 Verwendung der Zuwendung

Wissenschaftlich-technisches Personal:

PM			
2024	2025	2026	Gesamt
10	12	2	24

Geräte und Leistungen Dritter: -

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Berichtszeitraum realisierten Tätigkeiten orientierten sich konsequent an den im Forschungsantrag definierten Arbeitsschritten und waren für die Erreichung der angestrebten Forschungsziele zwingend erforderlich. Sämtliche erbrachten Leistungen stellten eine notwendige Voraussetzung für die erfolgreiche Bearbeitung der einzelnen Arbeitspakete dar. In diesem Zusammenhang erwiesen sich auch die getätigten Ausgaben als sachlich notwendig sowie angemessen, um die Forschungsarbeiten zielgerichtet und qualitätsgerecht durchzuführen.

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

Das Vorhaben VaKoFa liefert einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung und Beschleunigung der Entscheidungen über die Einführung neuer Produktvarianten in produzierenden Unternehmen. Durch die Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungsmodells wurde eine methodische Grundlage geschaffen, um die Auswirkungen neuer Produktvarianten auf bestehende Fabrikssysteme bereits vor dem Start der Produktion zu bewerten. Diese Methodik wurde in ein Software-Tool überführt, um es für KMU anwendbar zu machen.

Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Der Wissenschaftlich-technische Nutzen des Vorhabens manifestiert sich primär in der Schaffung einer methodischen Brücke zwischen dem Produktmanagement und der Fabrikplanung. Durch die Entwicklung des ganzheitlichen Entscheidungsunterstützungsmodells wurde eine theoretisch fundierte Basis geschaffen, um die Auswirkungen neuer Produktvarianten auf ein Fabrikssystem bereits weit vor dem Start der Produktion quantitativ bewertbar zu machen. Wissenschaftlich innovativ ist hierbei insbesondere die systematische Gegenüberstellung von Fabrikprofil und Produktvariantenprofil sowie die mathematische Operationalisierung der Kapazitätsmerkmale. Das Modell ermöglicht es, das Fabrikssystem nicht mehr als statische Struktur, sondern als dynamisches Geflecht von Kapazitätsgrenzen zu begreifen und die Wirkzusammenhänge zwischen Produktänderungen und Fabrikressourcen konsistent abzubilden.

Wirtschaftlicher Nutzen für KMU

Der wirtschaftliche Nutzen für KMU liegt vor allem darin, dass die Forschungsergebnisse Unternehmen, insbesondere KMU, erhebliche Potenziale zur Kosteneinsparung bieten. Durch das gewonnene Verständnis für

variantengetriebene Kosten lassen sich Fehlentscheidungen bereits in der frühen Phase vermeiden. Besonders in den entscheidungsrelevanten Unternehmensbereichen wie dem Marketing und dem Vertrieb schafft die Methodik die notwendige Transparenz, um das komplexe Wirkgefüge zwischen der Einführung neuer Produktvarianten und den daraus resultierenden Belastungen für die Produktion und Logistik objektiv zu bewerten, ohne umfassende Fachkenntnisse vorauszusetzen. Damit wird eine faktenbasierte Abstimmung zwischen Marktanforderungen und fabrikplanerischer Umsetzbarkeit ermöglicht, was die langfristige Wettbewerbsfähigkeit von KMU nachhaltig sichert. In der Konsequenz entfallen kostspielige und organisatorisch aufwendige Maßnahmen zur nachträglichen Variantenreduzierung. Ein entscheidender ökonomischer Vorteil ist die frühzeitige Identifikation „wertvernichtender“ Varianten, deren Anpassungskosten den erwarteten Gewinn übersteigen würden. Zudem adressiert das Modell gezielt das Risiko der Kostenremanenz, indem es die Reversibilität von Maßnahmen in die Wirtschaftlichkeitsrechnung einbezieht.

Innovationshöhe und industrielle Anwendungsmöglichkeiten:

Die Innovationshöhe und die industriellen Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich aus der konsequenten Überführung der wissenschaftlichen Logik in ein praxistaugliches Software-Tool. Die Innovation besteht in der Kopplung eines 424 Maßnahmen umfassenden Wenn-Dann-Regelwerks mit einer multikriteriellen Bewertungslogik, die neben Kosten auch Faktoren wie Umsetzungszeit und Risiko gewichtet. Durch die Integration von Standardwerten („Default Values“) ist das Tool auch bei lückenhafter Datenbasis einsetzbar, was die Einstiegsbarriere für die industrielle Anwendung senkt. Die universelle Anwendbarkeit auf unterschiedliche Fabrikssysteme sowie die Möglichkeit, strategische Variantenentscheidungen auf Basis valider Daten statt Erfahrungswerten zu treffen, unterstreichen das Verwertungspotenzial für die produzierende Industrie.

5 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Durch die Einbindung des projektbegleitenden Ausschusses (PA) wurde bereits während der Entwicklung des Modells sichergestellt, dass die wissenschaftlichen Modelle den Anforderungen der industriellen Praxis, insbesondere im Hinblick auf die Ressourcenknappheit in KMU, entsprechen. Die Bereitstellung der Ergebnisse erfolgte dabei auf zwei Ebenen: Zum einen durch die methodische Aufbereitung der Entscheidungsprozesse (Maßnahmenkataloge) und zum anderen durch das Python-basierte Software-Tool.

6 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Während der Projektlaufzeit wurde ein breites Portfolio an Maßnahmen realisiert, um eine flächendeckende Dissemination der Ergebnisse sicherzustellen. Im Rahmen regelmäßiger Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses fand ein intensiver Austausch statt, der eine direkte Rückkopplung der industriellen Bedarfe in die Forschung ermöglichte. Die wissenschaftliche Fundierung wurde durch Publikationen [12,17,19] in Fachorganen sowie durch Vorträge auf internationalen Fachkonferenzen (z. B. der APMS oder CPSL) untermauert. Ein besonderer Fokus lag zudem auf dem persönlichen Transfer: In zahlreichen studentischen Abschlussarbeiten wurden Teilaspekte des Modells direkt in Kooperation mit produzierenden Unternehmen erprobt und validiert. Darüber hinaus wurden die Kerninhalte des Projekts in die universitäre Lehre integriert, um künftige Entscheidungsträger frühzeitig mit der VaKoFa-Methodik vertraut zu machen.

7 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Um eine nachhaltige Verwertung über das Projektende hinaus zu gewährleisten, sind spezifische Maßnahmen zur Verstetigung des Transfers geplant. Das entwickelte Entscheidungsunterstützungstool wird interessierten Unternehmen dauerhaft zur Verfügung gestellt, um auch Unternehmen außerhalb des ursprünglichen Konsortiums zu erreichen. Des Weiteren ist geplant, die im Tool hinterlegte Wissensbasis um aktuelle Technologiedaten zu erweitern, um die Langzeitrelevanz des Werkzeugs in einem sich wandelnden Marktumfeld sicherzustellen.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Wiendahl, H.-H., Reichardt, J., Nyhuis, P., 2024. Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten, 3., vollständig überarbeitete Auflage ed. Hanser, München.
- [2] Schönsleben, P., 2024. Handbuch Integrales Logistikmanagement. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [3] Maune, G., 2002. Möglichkeiten des Komplexitätsmanagements für Automobilhersteller auf Basis durchgehender IT-gestützter Systeme.
- [4] Wiendahl, H.-P., Gerst, D., Keunecke, L. (Eds.), 2004. Variantenbeherrschung in der Montage. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [5] Schuh, G., Riesener, M., 2018. Produktkomplexität managen: Strategien - Methoden - Tools, 3., vollständig überarbeitete Auflage ed. Hanser, München.
- [6] Jan O. Fischer, 2008. Kostenbewusstes Konstruieren. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [7] Olbrich, R., Battenfeld, D., 2005. Variantenvielfalt und Komplexität — kostenorientierte vs. marktorientierte Sicht. Journal für Marketing 44 (3-4).
- [8] Schulze, C.P., Reinema, C., Nyhuis, P., 2010. Merkmalssystematik zur Entwicklung von Fabrikstrukturvarianten. ZWF 105 (9).
- [9] Lindemann, U., Reichwald, R., Zäh, M.F. (Eds.), 2006. Individualisierte Produkte — Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- [10] Hichert, R., 1985. Probleme der Vielfalt, Teil 1: Soll man auf Exoten verzichten. Wt-Z Industrielle Fertigung 75.
- [11] Keuper, F., Schomann, M., 2008. Strategisches IT-Management: Management von IT und IT-gestütztes Management, 1. Aufl. ed. Gabler Verlag, s.l.
- [12] Demir, M., Hingst, L., Schmidt, M., Nyhuis, P., 2024. Frühzeitige Bewertung von Auswirkungen bei der Einführung neuer Produktvarianten. ZWF 119 (12).
- [13] Heger, C.L., 2007. Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. PZH, Produktionstechn. Zentrum, Garbsen.
- [14] Verein Deutscher Ingenieure e. V., 2011. Fabrikplanung – Planungsvorgehen. Beuth-Verlag, Düsseldorf, Berlin.
- [15] Wirth, S., Enderlein, H., Förster, A., Petermann, J., 1999. Zukunftsweisende Unternehmens- und Fabrikkonzepte für KMU. Vortragsband zur Fachtagung „Zukunftsweisende Unternehmens- und Fabrikkonzepte für KMU“, TBI 99.
- [16] Wulf, S., 2011. Bewertung des Einflusses von Produkt- und Technologieveränderungen auf die Fabrik, 1. Aufl. ed. PZH, Produktionstechn. Zentrum, Garbsen.
- [17] Mehmet Demir, Lennart Hingst, Peter Nyhuis, Matthias Schmidt, 2025. Approach For The Systematic Assessment Of The Impact Of New Product Variants On Factory Systems. Conference on Production Systems and Logistics (7).
- [18] Weig, S., 2008. Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2008. Utz, München.
- [19] Demir, M., Kleinewächter, T., Schmidt, M., 2026. Capacity-Driven Decision Model for Impact Assessment of Product Variants in Factory Systems, in: Mizuyama, H., Morinaga, E., Nonaka, T., Kaihara, T., Cieminski, G. von, Romero, D. (Eds.), Advances in Production Management Systems. Cyber-Physical-Human Production Systems: Human-AI Collaboration and Beyond. 44th IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2025, Kamakura, Japan, August 31-September 4, 2025, Proceedings, Part IV, vol. 767, 1st ed. 2026 ed. Springer Nature Switzerland; Imprint Springer, Cham.