

Schlussbericht vom 31.10.2024

zu IGF-Vorhaben Nr. 22126 N

Thema

Vorgehen zur Operationalisierung der Belastungsflexibilität zur Handhabung von Nachfrageschwankungen in verketteten Arbeitssystemen von kmU (GeProVar)

Berichtszeitraum

01.05.2022 – 31.10.2024

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.

Forschungseinrichtung(en)

1; Leibniz Universität Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
1 Zusammenfassung.....	1
2 Stand der Forschung	2
2.1 Grundlagen zur Nachfrage und Nachfrageprognose.....	2
2.2 Grundlagen der Kapazität und Belastung	4
2.3 Problemstellung und Handlungsbedarf	8
3 Darstellung der Projektergebnisse	9
3.1 Arbeitspaket 1 – Identifikation und Beschreibung von Merkmalen mit Auswirkungen auf Belastungsschwankungen	9
3.2 Arbeitspaket 2 – Erstellung eines zielgrößenorientierten Maßnahmenkatalogs zur Belastungsabstimmung.....	11
3.3 Arbeitspaket 3 – Entwicklung eines Bewertungsmodells zur quantitativen Bestimmung der Maßnahmenkosten	13
3.4 Arbeitspaket 4 – Mathematische Modellierung und Simulation von Szenarien der Handlungsmöglichkeiten und Erweiterung der Entscheidungshilfe	16
3.5 Arbeitspaket 5 – Ableiten eines Entscheidungsmodells mit allgemeinen Handlungsempfehlungen für kmU.....	21
3.6 Arbeitspaket 6 – Dokumentation, Anwendung und Verbreitung der Ergebnisse	23
4 Innovativer Beitrag und wirtschaftlicher Nutzen	24
5 Voraussichtlicher Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der kmU	25
6 Verwendung der Zuwendungen	26
7 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	27
8 Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	28

9 Durchführende Forschungsstelle	32
Förderhinweis	33
Literaturverzeichnis	34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kategorisierung und schematische Darstellung von Nachfrageverläufen (i.A.a. Krüger 2004: 19; Wiendahl 2010: 298)	3
Abbildung 2: Produktspezifische Lebenszykluskurve (i.A.a. Reinhart et al. 1999b: 413)	4
Abbildung 3: Elemente der Kapazitätsstruktur eines Produktionssystems (i.A.a. Nebl, 2011)	6
Abbildung 4: Beschreibungsmodell der Kategorisierung der Produktmerkmale (Ausschnitt)	10
Abbildung 5: Systematisches Vorgehensmodell.....	14
Abbildung 6: Ausschnitt des Wirkmodells.....	15
Abbildung 7: Ebenen der bestehenden Maßnahmenkosten.....	16
Abbildung 8: Zeitreihenanalyse mittels exponentieller Glättung nach HOLT UND WINTERS (i.A.a. Holt et al. 1960: 258)	17
Abbildung 9: Ausschnitt des Prognosetools im entwickelten Softwaredemonstrator	21
Abbildung 10: Ausschnitt der generierten Lösung.....	23

1 Zusammenfassung

Moderne Produktionsunternehmen sind zunehmend mit volatilen Märkten konfrontiert, die zu schwankenden Nachfragemengen führen. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (kmU) stehen vor der Herausforderung, dass ihnen häufig die notwendigen Ressourcen und Methoden fehlen, um diese Schwankungen effektiv zu bewältigen. Vor diesem Hintergrund verfolgte das IGF-Vorhaben 22126 N das Ziel, eine Entscheidungsunterstützung zu entwickeln, die kmU bei der Planung ihrer Produktionssysteme unter den Bedingungen variierender Nachfragemengen unterstützt. Diese Entscheidungsunterstützung zielt darauf ab, kmU zu befähigen, trotz der Marktunsicherheiten künftig wirtschaftlich effizient zu agieren und ihre langfristige Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Softwaredemonstrator entwickelt, der die Komplexität der Entscheidungsfindung für kmU reduziert.

Zunächst wurden im Forschungsprojekt Merkmale mit Auswirkungen auf die Belastung von Produktionssystemen identifiziert und beschrieben. Zur Anpassung von Produktionssystemen wurde ein umfangreicher Maßnahmenkatalog mit verschiedenen Handlungsoptionen aufgestellt. Dieser Katalog enthält Handlungsoptionen, die speziell entweder zur Erhöhung oder zur Reduzierung der Kapazität bzw. der Belastung beitragen. Darüber hinaus gibt es Handlungsoptionen, die in beide Richtungen wirken können, wodurch diese sowohl zur Steigerung als auch zur Verringerung der Kapazität oder Belastung eingesetzt werden können. Für eine systematische Verwendung der identifizierten Maßnahmen wurden diese kategorisiert. Darüber hinaus wurde ein mathematisches Modell aufgestellt, welches unter Berücksichtigung der identifizierten Maßnahmen und Restriktionen darauf abzielt, kostenoptimale Handlungsempfehlungen zu ermitteln. Das entwickelte Modell ist in einen Softwaredemonstrator implementiert worden und ermöglicht kmU, Nachfrageschwankungen in adäquater Weise zu beherrschen und somit langfristig wirtschaftlich und wettbewerbsfähig zu agieren.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Entsprechend gilt unser Dank dem Förderer und den Industrieunternehmen, mit denen die Ergebnisse erarbeitet und validiert wurden.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

2 Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Begrifflichkeiten und Grundlagen des Forschungsprojekts erörtert. Dazu wird in Kapitel 2.1 das zugrunde gelegte Verständnis von Nachfrage und den damit einhergehenden Begrifflichkeiten vermittelt. Des Weiteren werden in Abschnitt 2.2 die für dieses Forschungsprojekt relevanten Grundlagen der Kapazität und Belastung von Produktionssystemen aufgezeigt.

2.1 Grundlagen zur Nachfrage und Nachfrageprognose

Produzierende Unternehmen operieren zunehmend in volatilen Märkten. Wesentliche Faktoren dieser Entwicklung sind technologische Fortschritte und steigende Anforderungen an die Unternehmen, wie beispielsweise verkürzte Produktlebenszyklen, erhebliche Nachfrageschwankungen und die verstärkte Internationalisierung des Marktumfelds. Diese Rahmenbedingungen werden als Turbulenzen beschrieben (Westerkämper & Zahn, 2009, S. 9) und zeichnen sich insbesondere durch ihre eingeschränkte Vorhersehbarkeit aus (Schaefer, 1996, S. 1587). Zusätzlich zu diesen externen Faktoren können auch interne organisatorische Faktoren, wie die schwankende Verfügbarkeit oder Leistungsfähigkeit von Ressourcen, als Turbulenzen betrachtet werden (Westerkämper & Zahn, 2009, S. 9). Diese Turbulenzen, die WIENDAHL als Wandlungstreiber bezeichnet, erzeugen Druck auf Produktionssysteme, sich zu verändern und anzupassen (Wiendahl et al., 2005, S. 9f.). Zahlreiche Studien heben hervor, dass unter den unterschiedlichen Arten von Turbulenzen insbesondere die Veränderungen der Nachfrage von erheblicher Bedeutung sind. Diese Nachfrageschwankungen stehen daher im Mittelpunkt des vorliegenden Forschungsprojekts. In der wissenschaftlichen Literatur werden zur Beschreibung dieser Veränderungen verschiedene Begriffe verwendet, darunter „Nachfrage“, „Bedarf“ oder „Absatz“ (Schäfer, 1966, S. 368ff, Reinhart et al., 1999b, S. 413ff, Wiendahl, 2010, S. 301ff.). Im Rahmen dieses Projekts wird keine Unterscheidung zwischen diesen Begriffen vorgenommen, da angenommen wird, dass die vom Unternehmen geforderte Nachfrage vollständig erfüllt wird. Der Bedarf der Kunden, der sich als Nachfrage an das Unternehmen richtet, gleicht (gegebenenfalls) zeitlich verzögert dem Absatzvolumen. In der Produktion manifestiert sich diese Nachfrage in Form von Aufträgen mit unterschiedlichen Produkten und Stückzahlen, wodurch das Produktionssystem entsprechend belastet wird. Nachfrageveränderungen lassen sich in der Regel anhand zweier Hauptmerkmale unterscheiden: Zum einen können sie in Form einer einmaligen Verschiebung auftreten,

zum anderen als zyklische Schwankungen. Eine Verschiebung kann nach SCHÄFER und nach WIENDAHL entweder diskontinuierlich, also plötzlich, oder kontinuierlich, in Form eines stetigen Anstiegs oder Rückgangs, auftreten (Schäfer, 1966, S. 345ff.; Wiendahl 2010: 298). Solche Verschiebungen werden allgemein auch als Trends bezeichnet. Zyklische Schwankungen hingegen können regelmäßige oder unregelmäßige Muster aufweisen und spiegeln eine fortlaufende Veränderung wider (Schäfer, 1966, S. 345 ff., 368f.). In der nachfolgenden Abbildung 1 werden die unterschiedlichen Arten von Nachfrageveränderungen kategorisiert und deren Erscheinungsformen schematisch veranschaulicht.

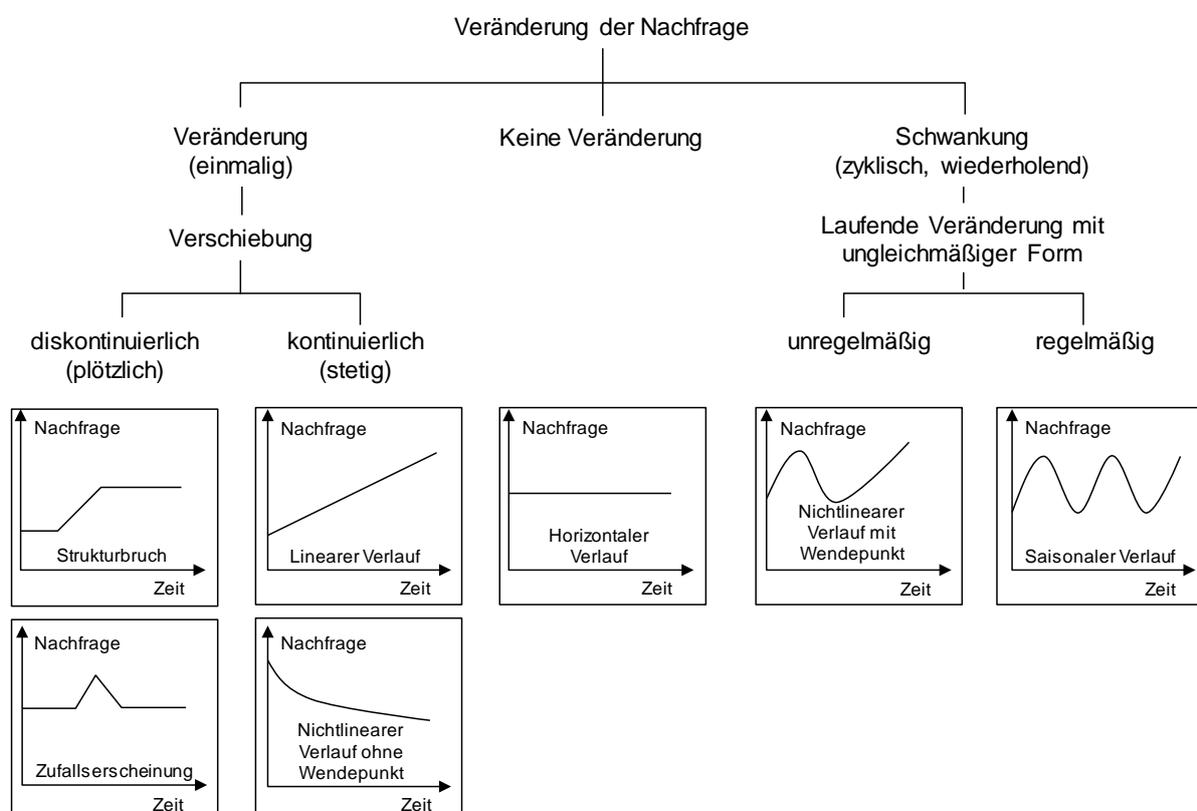


Abbildung 1: Kategorisierung und schematische Darstellung von Nachfrageverläufen
(i.A.a. Krüger 2004: 19; Wiendahl 2010: 298)

Die in Abbildung 1 dargestellten individuellen Verläufe sind jedoch nicht repräsentativ für die Nachfragemengen, die an Unternehmen herangetragen werden. Vielmehr resultiert die tatsächliche Nachfrage aus einer Kombination mehrerer Veränderungsarten. Zur Veranschaulichung dieser Überlagerung kann die produktspezifische Lebenszykluskurve herangezogen werden, die exemplarisch in Abbildung 2 abgebildet ist.

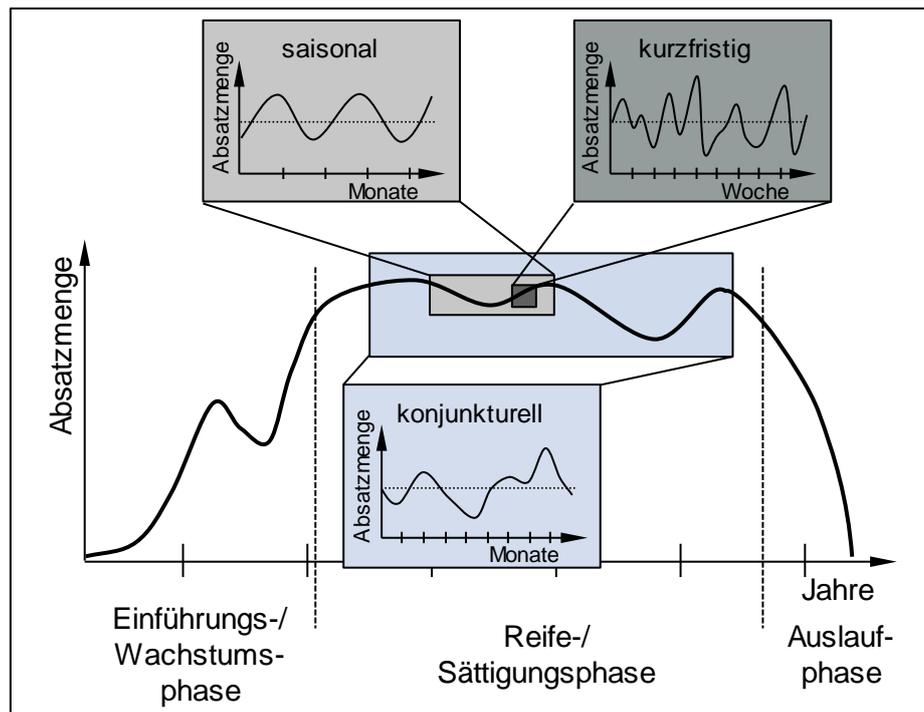


Abbildung 2: Produktspezifische Lebenszykluskurve (i.A.a. Reinhart et al. 1999b: 413)

Der beispielhafte Nachfrageverlauf zeigt sowohl Trends als auch Schwankungen auf. In der Einführungs- und Auslaufphase weist die Kurve sowohl nichtlineare Verhaltensmuster auf, etwa aufgrund der Verbreitung des Produkts auf dem Markt, als auch sprunghafte Veränderungen, die beispielsweise durch Marketingmaßnahmen oder das Ende der Produktion verursacht werden. In der Reife- und Sättigungsphase ist hingegen ein eher linearer Verlauf zu beobachten, der beispielsweise durch Marktsättigung erklärt werden kann. Diese Trendbewegungen werden durch zusätzliche Schwankungen überlagert. Konjunkturelle Schwankungen entziehen sich in der Regel weitgehend dem Einfluss des Unternehmens, während saisonale Schwankungen beispielsweise bei Produktportfolios auftreten können, deren Absatzmengen von bestimmten Jahreszeiten abhängen. Somit resultiert die Belastung der Produktion aus einer Überlagerung der verschiedenen Arten von Nachfrageveränderungen.

2.2 Grundlagen der Kapazität und Belastung

Die Kapazität stellt ein Merkmal des Produktionssystems dar. Diese beschreibt das „Leistungsvermögen einer wirtschaftlichen oder technischen Einheit - beliebiger Art, Größe und Struktur - in einem Zeitabschnitt“ (Kern 1962: 27). Sie zeigt somit das zur Leistungserbringung bestehende Potenzial von Ressourcen, zumeist des Personals

und der Technologie, des Produktionssystems in einem Zeitraum auf (Betge 1996: 852). Innerhalb der Kapazitätsarten wird zwischen den primären Produktionsfaktoren (Potenzialfaktoren) und den sekundären Faktoren (Repetierfaktoren) unterschieden. Als Potenzialfaktoren, welche in diesem Forschungsprojekt als durch Maßnahmen beeinflussbare Kapazitäten betrachtet werden, gelten jene Ressourcen, die für den Transformationsprozess benötigt werden. Diese sind unter anderem personelle Ressourcen, technische Betriebsmittel wie Anlagen und Maschinen sowie Lagerhaltungsressourcen. Sekundäre Faktoren (Repetierfaktoren) stellen die Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie das abstrakte Kapital dar und werden in diesem Forschungsprojekt als hinreichend gegebene Kapazitäten betrachtet (Betge 1996: 853). Die somit insgesamt im Unternehmen vorliegende verfügbare Kapazität wird nach RIEBEL als Marktkapazität bezeichnet (Riebel 1954: 9-12).

Zur operativen Bestimmung und Anpassung der Kapazität eines Produktionssystems ist es notwendig, die einzelnen Elemente dieses Systems zu identifizieren und zu beschreiben. Hierzu wird der Begriff der Kapazitätsstruktur eingeführt, welche laut NEBL als Grundlage für die Ermittlung und Gestaltung der Kapazität dient (Nebel, 2011, S. 212). Die Kapazitätsstruktur eines Produktionssystems illustriert die Verknüpfung der einzelnen Elemente, beispielsweise der Arbeitssysteme, die sich aus Betriebsmittelkapazitäten und Personalkapazitäten zusammensetzen. Diese verknüpften Arbeitssysteme können erst durch ihre zeitliche Nutzung als Leistungsträger für das Unternehmen fungieren. Die potenzielle Einsatzzeit der Ressourcen wird durch das Arbeitszeitmodell beschrieben. Die nachfolgende Abbildung 3 veranschaulicht schematisch die Kapazitätsstruktur eines Produktionssystems.

& Wiendahl, 1999). Die Fähigkeit der Belastungsflexibilität wird somit bereits bei der Gestaltung der Elemente der Kapazitätsstruktur des Produktionssystems gebildet (Abbildung 3) und bestimmt durch die entsprechende, langfristige Gestaltung die kurzfristige Reaktionsfähigkeit in Form von kurzfristig umsetzbaren Maßnahmen der Belastungsabstimmung. Um relevante Ergebnisse für die Praxis zu erhalten, ist zum einen eine analytische Betrachtung der Produktvarianz notwendig. Abstimmungsmaßnahmen der Belastung wirken auf der Ebene der einzelnen Elemente der Kapazitätsstruktur und erfordern somit die spezifische Betrachtung im Mehr-Produkt-Fall für die realistische Abbildung vorliegender Produktionssysteme und deren Restriktionen und Potenziale. Zum anderen sind für die Praxis der Optimierung der Flexibilität ebenfalls die Kosten ein relevanter Faktor, welche durch den Einsatz von Maßnahmen entstehen oder verringert werden (IPH, 2013, S.60f.). WESEBAUM ET AL. erkannten mit Bezug auf das Modell der Fertigungssteuerung nach LÖDDING einen ergänzenden Forschungsbedarf in der Erweiterung von bereits vorhandenen Modellen der Fertigungssteuerung, bspw. der Reihenfolgebildung und Auftragsfreigabe, zur optimalen Ausnutzung der implizierten Belastungsflexibilität (Wesebaum et al., 2013, Lödding, 2008). Der Einfluss von Belastungsflexibilität auf die Bearbeitung der Aufträge und den Einsatz von Abstimmungsmaßnahmen in der Praxis wird von MÜTZE und WESEBAUM ET AL. kurz beschrieben (Mütze, 2024). Der Fokus der Arbeit liegt in der Identifizierung von Methoden, die Potenziale bezüglich der Belastungsflexibilität aufzeigen. Hier zu nennen sind bspw. die belastungsorientierte Auftragsfreigabe, Constant Work-In-Process und die Engpasssteuerung für die Auftragsfreigabe. Ein Beispiel für die Reihenfolgeplanung ist die Extended Work in Next Queue-Regel nach CONWAY ET AL. (Wesebaum et al., 2013, Conway et al., 1967). Die Belastungsflexibilität wird in Belastungsanpassungsmaßnahmen, wie z.B. Auftragsfremdvergabe oder -annahme und Belastungsabgleich unterschieden. Der Belastungsabgleich beinhaltet Maßnahmen, die z.B. einen zeitlichen Ausgleich durch Verschiebung der Aufträge verursachen (Arnold et al., 2008).

Ein Teilziel dieses Forschungsprojekts ist es somit, die Planung eines wirtschaftlichen und wettbewerbsfähigen Produktionssystems mit einer adäquaten Flexibilität zur Beherrschung der Nachfragemengen und -schwankungen zu unterstützen.

2.3 Problemstellung und Handlungsbedarf

Die stetig fortschreitende Globalisierung und die Digitalisierung der Märkte führen zu einem Überangebot an Gütern und Dienstleistungen und erhöhen somit den auf die produzierenden Unternehmen wirkenden Kostendruck. National sowie international agierende Unternehmen sind gezwungen, sich stetig weiterzuentwickeln, um die Kundenwünsche nach individuellen, kurzfristig lieferbaren Produkten zu erfüllen (Kottig, 2014). Das Käuferverhalten wird zunehmend undurchsichtig und erzeugt bei den produzierenden Unternehmen starke Schwankungen sowohl in der Nachfragemenge als auch in den geforderten Produktvarianten.

Die Einhaltung geplanter Liefertermine bei möglichst kurzen Lieferzeiten und geringen Stückkosten ist eine weitere elementare Herausforderung, da die Planung der Absatzmenge bedingt durch zunehmend dynamische Nachfragestrukturen eine sehr hohe Unsicherheit aufweist (Wagner, 2012, Bullinger et al., 2009). Diese Volatilität ist sowohl in der Gesamtnachfragemenge als auch zwischen Produktvarianten als Variantenschwankungen zu beobachten und führt gleichermaßen zu Auslastungsverlusten an den Arbeitsstationen. Zur Einhaltung der geplanten Liefertermine unter den beschriebenen Voraussetzungen sind Unternehmen auf die effiziente Nutzung der Belastungsflexibilität durch entsprechende Belastungsabstimmungsmaßnahmen angewiesen. Die Nachfrage stellt in Form von terminspezifischen Aufträgen die Anforderungen an das Produktionssystem dar und resultiert in der Belastung bspw. in Form von Arbeitsstunden. Maßnahmen der unternehmensinternen Belastungsabstimmung, wie z.B. das zeitliche Vorziehen oder Aufschieben von Aufträgen oder der Auf- und Abbau von Beständen in Zwischenpuffern, wirken unmittelbar auf die Terminziele der Aufträge bzw. Produkte (Schmidt, 2019).

3 Darstellung der Projektergebnisse

In diesem Kapitel werden die erzielten Projektergebnisse dargestellt und beschrieben. Hierfür werden die Teilergebnisse der einzelnen Arbeitspakete in den Kapiteln 3.1 bis 3.6 detaillierter vorgestellt.

Im Projektverlauf wurden insgesamt sechs Arbeitspakete bearbeitet, die zur Erreichung des Ziels dienten. Im ersten Arbeitspaket (AP 1) wurden Merkmale identifiziert und beschrieben, welche Auswirkungen auf Belastungsschwankungen haben. Darauf folgend wurden im AP 2 bestehende Maßnahmen zur Kapazitäts- und Leistungsabstimmung identifiziert, aggregiert sowie kategorisiert und in einem Maßnahmenkatalog zusammengefasst. Im anschließenden AP 3 wurde eine Bewertungssystematik entwickelt, um identifizierte Lösungsvarianten objektiv vergleichen zu können. Das vierte Arbeitspaket beinhaltet die Aufstellung einer Zielfunktion zur Identifikation von optimalen Maßnahmenkombinationen. Im AP 5 wurden die Erkenntnisse und Ergebnisse in einen Softwaredemonstrator überführt und ein Leitfaden zur Anwendung dessen erstellt. Im letzten Arbeitspaket wurden die Ergebnisse in den Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses angewendet, kritisch diskutiert und verbreitet. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete detaillierter vorgestellt.

3.1 Arbeitspaket 1 – Identifikation und Beschreibung von Merkmalen mit Auswirkungen auf Belastungsschwankungen

Das Ziel des ersten Arbeitspakets ist die Identifikation und Beschreibung von allgemeinen Merkmalen der Produkte und ihrer entsprechenden Produktionsprozesse. Damit wird eine Verknüpfung zu den Elementen der Kapazitätsstruktur mit Auswirkung auf Belastungsschwankungen ermöglicht.

Wie in der Vorhabensbeschreibung adressiert, wurden die allgemeinen Merkmale der Produkte und deren entsprechenden Produktionsprozesse im ersten Arbeitspaket mittels einer tiefgreifenden Literaturrecherche und Experteninterviews mit dem projektbegleitenden Ausschuss systematisch identifiziert. Bereits vorhandene Ergebnisse aus dem vorangegangenen Forschungsprojekt GeProMe zur Betrachtung der Ursachen von Nachfrageschwankungen wurden weiter vertieft. Zusätzlich galt es, eine Differenzierung von verschiedenen Varianzen im Produktionssystem vorzunehmen. Die Differenzierung basiert auf der Kategorisierung nach ZENNER, welche Varianzen in äußere

und innere Varianzen aufgliedert. Die Unterscheidung zwischen diesen Varianzen bildet die Grundlage für das allgemeine Beschreibungsmodell. Der Fokus dabei liegt auf der allgemeinen Anwendbarkeit des deskriptiven Beschreibungsmodells für verschiedene Branchen. Das Beschreibungsmodell wird in Form eines Strukturbaums dargestellt. Zunächst wird für die systematische Erfassung sämtlicher relevanter Merkmale, welche Auswirkungen auf die Belastungsschwankungen haben, eine Unterteilung in produkt- und prozessbezogene Merkmale vorgenommen. Es erfolgt eine strukturierte und systematische Kategorisierung anhand des Stands der Wissenschaft. Diese weitere Unterteilung der produkt- und prozessbezogenen Merkmale in einzelnen Kategorien wurde vor dem Hintergrund der Allgemeingültigkeit durch die Auswahl branchenübergreifender Kategorien umgesetzt. Gemäß dem aktuellen Stand der Wissenschaft wird zwischen mittelbaren und unmittelbar festlegbaren Merkmalen unterschieden. In die Kategorie der mittelbar festlegbaren Merkmale fallen die Funktionsmerkmale, welche eine Teilfunktion des Produkts beschreiben sowie Relationsmerkmale, welche bspw. Kosten aufzeigen. Die unmittelbar festlegbaren Merkmale umfassen die Beschaffenheitsmerkmale wie bspw. die Geometrie des Bauteils. Diese sind am Produkt selbst feststellbar und gelten als Schlüsselmerkmale. Ein Auszug der betrachteten Ansätze ist in der Abbildung 4 dargestellt.

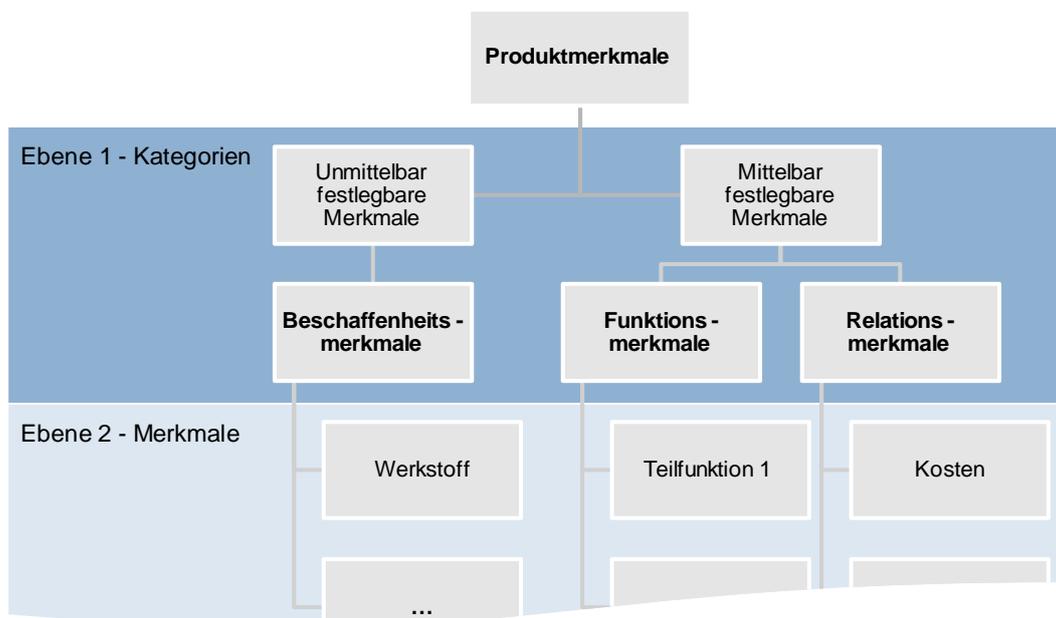


Abbildung 4: Beschreibungsmodell der Kategorisierung der Produktmerkmale (Ausschnitt)

Des Weiteren erfolgt analog die Kategorisierung der Produktionsmerkmale, welche Einfluss auf Belastungsschwankungen haben. Diese sind in organisatorische, technische und informatorische Parameter unterteilt. Die technischen Parameter werden darüber hinaus noch in Prozess- und Anlagen-Parameter differenziert.

3.2 Arbeitspaket 2 – Erstellung eines zielgrößenorientierten Maßnahmenkatalogs zur Belastungsabstimmung

Aufbauend auf den Ergebnissen des AP 1 wird im zweiten Arbeitspaket in Anlehnung an die im vorangegangenen Forschungsprojekt GeProMe identifizierten und beschriebenen Maßnahmen ein zielgrößenorientierter Maßnahmenkatalog der Belastungsabstimmung erstellt.

Für die Erstellung eines zielgrößenorientierten Maßnahmenkatalogs wurden zunächst die Ergebnisse in Form einer Datenbank aus dem vorangehenden Forschungsprojekt GeProMe analysiert und aufgearbeitet. Zur Erweiterung des Maßnahmenkatalogs wurden im Rahmen der Durchführung von Besuchen und Interviews bei den Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses (PbA) sowie umfangreicher Literaturrecherche weitere Maßnahmen ermittelt.

Diese Maßnahmen wurden anhand von Merkmalen charakterisiert und den Gestaltungsfeldern Organisation, Logistik, Personal und Technologie zugeordnet. Als Merkmale dienen hierbei unter anderem Auswirkungen und Anforderungen bezüglich vor- und nachgelagerter Prozesse oder die allgemeinen Voraussetzungen wie bspw. aktuelle Überkapazitäten, die für die entsprechenden Maßnahmen gegeben sein müssen. Die identifizierten Maßnahmen sowie Merkmalsbeschreibungen wurden in einem Katalog systematisiert. Auch hierbei handelt es sich um einen ersten Ansatz, welcher im Verlauf des Projektes weiter detailliert wird. Dies ist dadurch bedingt, dass die Ergebnisse der nachfolgenden Arbeitspakete einen entscheidenden Einfluss auf die tiefergehende Ausgestaltung des Maßnahmenkatalogs haben. Die Tabelle 1 zeigt einen Ausschnitt aus dem zielgrößenorientierten Maßnahmenkatalog.

Tabelle 1: Maßnahmen zur Kapazitäts- und Belastungsabstimmung (i.A.a.¹)

Form	Kapazitätsabstimmung		Belastungsabstimmung	
Art	Kapazitätsabgleich	Kapazitätsanpassung	Belastungsabgleich	Belastungsanpassung
Q	<ul style="list-style-type: none"> • Innerbetrieblicher Austausch von Personal • Kurz- bis langfristige Versetzung von Personal 	<ul style="list-style-type: none"> • Auf- bzw. Abbau festangestellter Personals • Auf- bzw. Abbau befristeten Personals • Einsatz von Leiharbeit • Leasing bzw. Verleih von Betriebsmitteln (BeMi) • Erwerb bzw. Veräußerung von BeMi • Wiederinbetriebnahme bzw. Stilllegung von BeMi • Modularer Aus- bzw. Rückbau skalierbarer BeMi 	<ul style="list-style-type: none"> • Auf- bzw. Abbau von Bestand im Material, Halbfabrikat oder Fertigwarenlager • Verlagerung von Bedarfsmengen auf alternative Arbeitssysteme 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fremdvergabe bzw. -aufnahme von Bedarfsmengen ▪ Outsourcing bzw. Insourcing ▪ Dynamische Angebotssteuerung ▪ Kontingentierung oder Mischbestellung ▪ Ablehnen von Bedarfsmengen
I		<ul style="list-style-type: none"> • Mechanisierung bis Vollautomatisierung von Prozessen 		<ul style="list-style-type: none"> • Verkürzung bzw. Verlängerung von Prozesszeiten
Z	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz transitorischer Schichten • Einsatz transitorischer Überstunden 	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung bzw. Verringerung der Betriebstage • Wechsel des Schichtsystems • Verlängerung bzw. Verkürzung von Schichten • Einsatz bezahlter Überzeiten • Einsatz von Kurzarbeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitliches Vorziehen und Aufschieben von Bedarfsmengen • Aufteilung und Zusammenführung von Bedarfsmengen • Auftragsstreckung bzw. -stauchung • Auftragsüberlappung • Auftragsunterbrechung • Vorziehen bzw. Aufschieben von Wartungsarbeiten 	<p>Legende:</p> <p>Q: Änderung der Quantität an Elementen bzw. Bedarfsmengen</p> <p>I: Änderung der Arbeitsintensität</p> <p>Z: Änderung der Einsatz- bzw. Belastungszeit</p>

Die dargestellte Sammlung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, denn einige Handlungsmöglichkeiten, z.B. die Beeinflussung der Belastung durch preispolitische Maßnahmen, fallen nicht in den Betrachtungsbereich dieses Projekts und sind somit nicht aufgeführt.

¹ i.A.a.: Büchel 1966, 464-465; Büchel 1971, 635; Butz 1976, 35; REFA 1991b, 192; Wiendahl 2010, 323; Windt 2001, 97; Sesterhenn 2003, A13-A14; Krüger 2004, 65; Gottschalk 2005, 44 und 55; Hämmerle 2015, 16; Schmidt und Nyhuis 2017, 294

3.3 Arbeitspaket 3 – Entwicklung eines Bewertungsmodells zur quantitativen Bestimmung der Maßnahmenkosten

Ziel des dritten Arbeitspakets ist die Entwicklung eines Bewertungsmodells zur vereinfachten Ermittlung der Maßnahmenkosten hinsichtlich Maßnahmen der Belastungsabstimmung.

Für eine kostenorientierte Produktionsplanung wurde das Bewertungsmodell basierend auf den Ergebnissen aus dem vorangegangenen Forschungsprojekt GeProMe hinsichtlich Maßnahmen der Belastungsabstimmung erweitert. Als Grundlage wurde innerhalb des Bewertungsmodells eine produktspezifische Bedarfsanalyse und -prognose implementiert.

Zunächst wurde eine Prognosemöglichkeit der Nachfrage nach den produzierten Gütern entwickelt. Das Prognoseprogramm der Nachfrage agiert nach der Holt-Winters-Methode, auch bekannt als exponentielle Glättung 3. Ordnung. Auch die Integration von unternehmensinternen Nachfrageprognosen für einzelne Produkte ist möglich.

Zur Ermittlung des Handlungsbedarfs in der Produktionskoordination werden Informationen über die Ausbringungsmenge benötigt. Zu diesem Zweck wurden die relevanten Produktionsinformationen in einem Produktionsplan gespeichert. Die einzelnen Produktionsschritte wurden so zusammengefasst, dass sie mit den zugehörigen Personal- oder Systemfähigkeiten verknüpft werden können. Die Differenz zwischen dem prognostizierten Bedarf und der Ausbringungsmenge wird aufgezeigt, um die Abweichung zu ermitteln. Das Ausmaß der Abweichung bestimmt den Handlungsbedarf in der Produktionskoordination.

Die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Maßnahmen wurden im Bewertungsmodell über einen Wirkungsbaum verknüpft. Darüber hinaus erfolgte ein Abgleich mit unternehmensspezifischen Restriktionen zur Ermittlung einer optimalen Maßnahmenkombination.

Vom Unternehmen im Einzelfall unerwünschte Maßnahmen wie bspw. der Einsatz von Leiharbeitnehmern oder die Überlassung von Betriebsmitteln können von vornherein von der Bewertung ausgeschlossen werden. Die Maßnahmenbewertung besteht aus der Überprüfung mehrerer Ausschlusskriterien und der anschließenden Priorisierung anhand von Priorisierungskriterien. Restriktionen wie die Aktivierungs- und Mindesteinsatzzeit sowie die Auswirkung der Maßnahme auf die Zielgrößen schränken die

Wirksamkeit von Einzelmaßnahmen ein. Es werden Maßnahmen miteinander kombiniert, um die Abweichungen über den gesamten Betrachtungszeitraum besser zu koordinieren. So können z.B. Maßnahmen mit kürzeren Aktivierungszeiten trägere Maßnahmen ergänzen und zu einem besseren Koordinationsergebnis führen. Hierbei werden die Zielkonflikte der einzelnen Maßnahmen bei der Kombinatorik berücksichtigt. Die Maßnahmen wurden in zwei Kategorien unterteilt. Solche, die die identifizierten Potenziale des Mehrproduktfalls nutzen und daher besonders im Mehrproduktfall geeignet sind bzw. unterstützen und solche, die ergänzend eingesetzt werden können. Es wurde ein Vorgehensmodell erarbeitet, welches die identifizierten Belastungssituationen sowie die resultierenden Handlungsoptionen, die nacheinander überprüft werden sollen, darstellt (Abbildung 5).

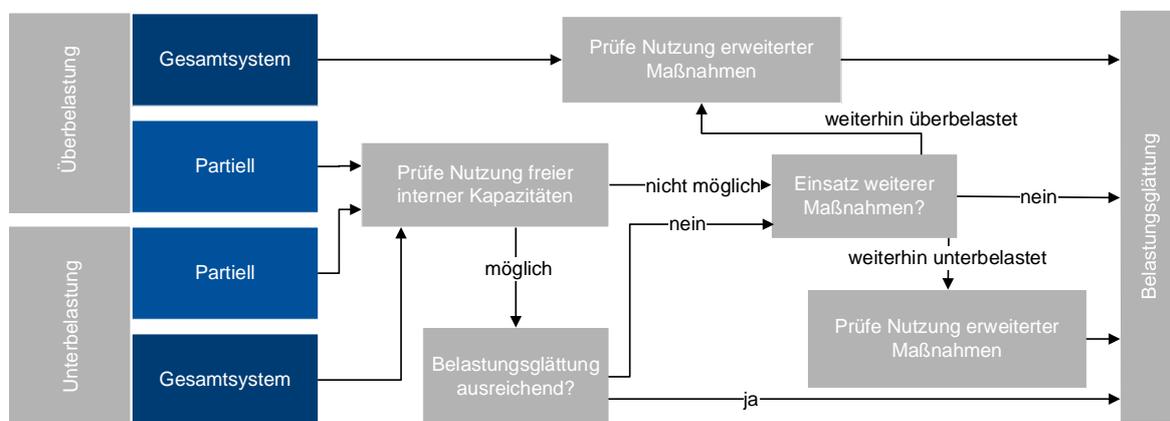


Abbildung 5: Systematisches Vorgehensmodell

Um Maßnahmenkombinationen bilden zu können, wurden die Wirkweise der Einzelmaßnahmen auf Leistung, Bestand, Durchlaufzeit und Termintreue sowie die für die Maßnahmen geltenden Einsatzanforderungen untersucht. Diese Zusammenhänge sind exemplarisch für vier Maßnahmen in Abbildung 6 in einem Wirkmodell dargestellt. Die ermittelten Ergebnisse wurden dem PbA vorgestellt, diskutiert und anhand von Kommentaren ergänzt.

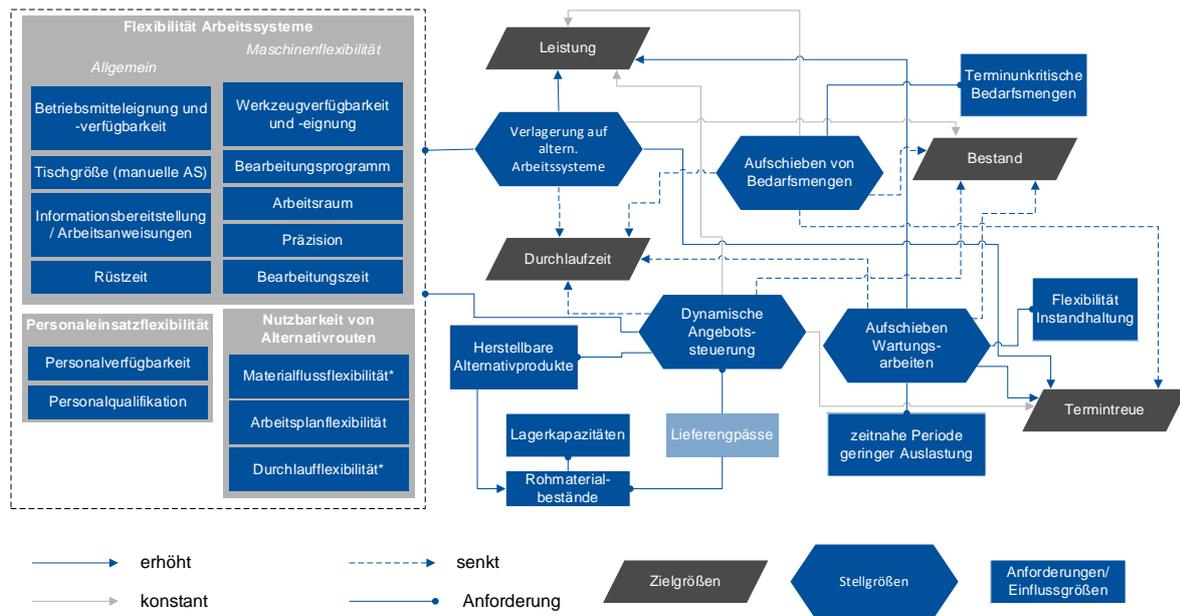


Abbildung 6: Ausschnitt des Wirkmodells

Zur Bewertung der entstehenden Kosten wurde ein Modell entwickelt, welches die Kostenarten in verschiedene Ebenen einteilt. Durch diese verschiedenen Aggregationsniveaus ist es möglich, trotz eventuell nicht vorhandener detaillierter Datenbasis, eine gröbere Ebene zu quantifizieren und somit eine adäquate Auswertung zu generieren. Falls eine detaillierte Datenbasis gegeben ist, wird durch das Modell eine differenzierte Betrachtung sowie eine Berücksichtigung aller potenziell auftretenden Kosten ermöglicht. Die Kosten der Maßnahmen werden, wie in Abbildung 7 dargestellt, in drei Ebenen unterteilt.

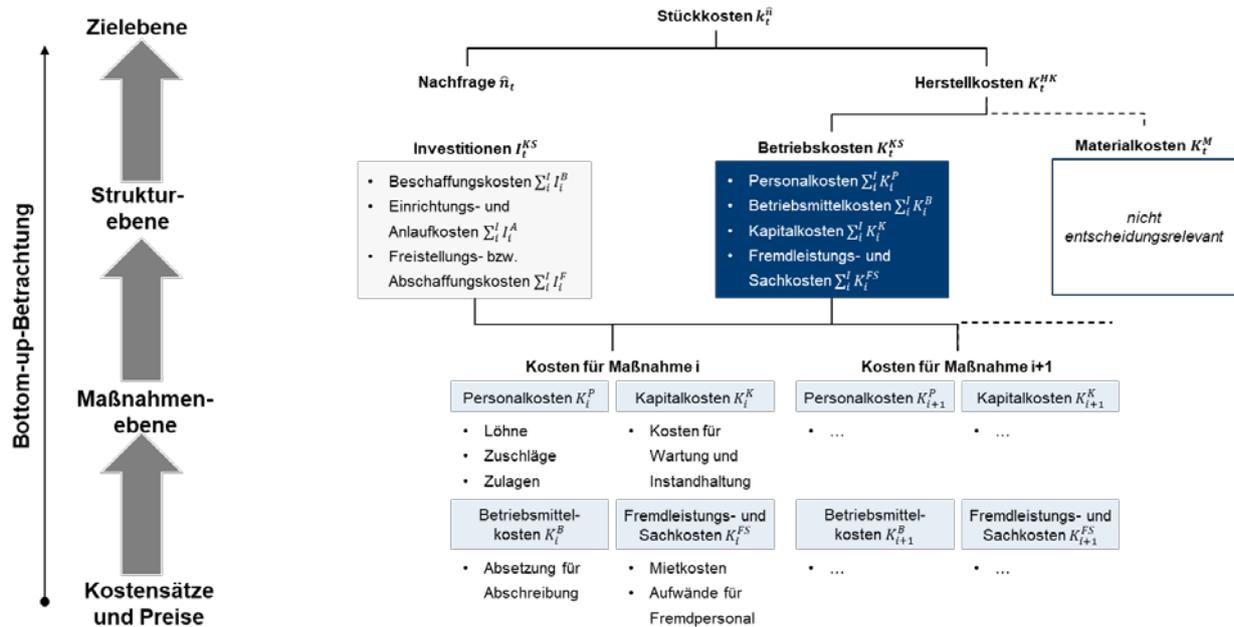


Abbildung 7: Ebenen der bestehenden Maßnahmenkosten

Zur Entscheidungsfindung bedarf es einer Methode zur Berücksichtigung aller Einfluss-, Gestaltungs- und Zielfaktoren. Im folgenden Abschnitt wird ein mathematisches Modell vorgestellt, welches diese Anforderungen erfüllt.

3.4 Arbeitspaket 4 – Mathematische Modellierung und Simulation von Szenarien der Handlungsmöglichkeiten und Erweiterung der Entscheidungshilfe

Innerhalb des festgelegten Berichtszeitraums wurde in diesem Arbeitspaket initial die Kostenoptimierung basierend auf Benutzereingaben für die Maßnahmenkombination im Bewertungsmodell angegangen. Es war notwendig, sämtliche relevanten, vom kmU vorgegebene Restriktionen sowie fördernde und hemmende Faktoren der Leistungsbereitstellung zu berücksichtigen. Zunächst wurden die Indizes, Parameter und Variablen, die für das mathematische Modell erforderlich sind, herausgearbeitet und in einem ersten mathematischen Zusammenhang zusammengeführt. Aufbauend darauf wurde ein Optimierungsalgorithmus mithilfe der Software MATLAB zur Simulation entwickelt.

Für eine präzise Planung des Produktionssystems ist die Definition des zu erreichenden Planungsziels von großer Bedeutung. Bei variierender Nachfrage ist es daher unerlässlich, sowohl die zukünftige Nachfrage abzuschätzen als auch die erforderliche

Flexibilität der Kapazitätsstruktur zu bestimmen. Um dies zu erreichen, wurde ein Beschreibungsmodell zur Absatzanalyse und Prognose nach Holt und Winters (Holt et al., 1960, S. 258) verwendet, das mittels exponentieller Glättung die historischen Nachfragedaten in deren Niveau, Trend und Saisonalität unterteilt. Das Niveau repräsentiert die durchschnittliche Absatzmenge, der Trend beschreibt die Veränderungsrate dieser Menge, und die Saisonalität stellt die Schwankung dar. Auf Basis dieser detaillierten Analyse des Absatzes kann eine fundierte Prognose erstellt werden (siehe Abbildung 8).

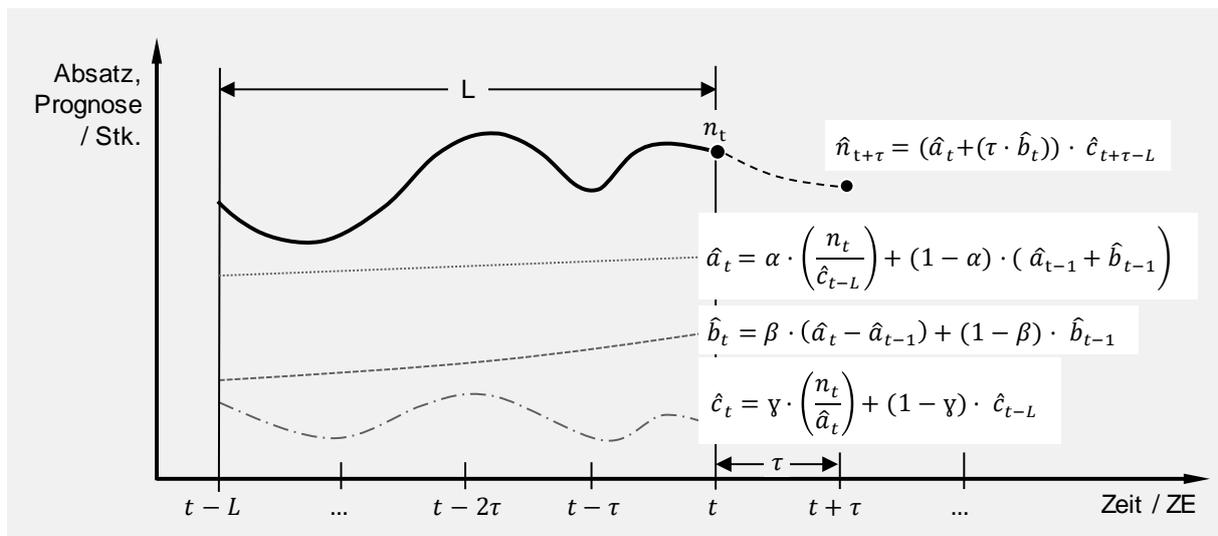


Abbildung 8: Zeitreihenanalyse mittels exponentieller Glättung nach HOLT UND WINTERS (i.A.a. Holt et al. 1960: 258)

Die Glättungsfaktoren α , β und γ nehmen Werte zwischen 0 und 1 an und gewichten die historischen Nachfragedaten. Beispielsweise wird bei einem Wert von $\alpha=0$ nur der letzte Niveauwert des Absatzes für die Prognoseberechnung berücksichtigt, während bei $\alpha=1$ die gesamte bestehende Datengrundlage der Niveauwerte einfließt. Durch die Anpassung und Feinjustierung dieser Glättungsparameter kann die Prognose an die unternehmens- oder produktspezifischen Gegebenheiten angepasst werden. Hierzu ist es erforderlich, eine Übersicht für den bereits vergangenen Zeitraum mit aufgezzeichneten Nachfragemengen zu erstellen, um einen Abgleich und eine Optimierung durchzuführen. Unter der Annahme einer kontinuierlichen Nachfrage kann mittels der beschriebenen Analyse ein angemessenes Planungsziel für die Produktion formuliert werden.

Zum kostenminimalen Einsatz von kapazitäts- und belastungsflexibilitätsförderlichen Maßnahmen wurde ein mathematisches Modell aufgestellt, welches die Berücksichtigung aller relevanten Restriktionen sowie fördernde und hemmende Faktoren der Leistungsbereitstellung gewährleistet. Die für dieses Modell benötigten Indizes, Parameter und Variablen sind in der folgenden Tabelle 2 dargestellt und kurz erläutert.

Tabelle 2: Indizes, Parameter und Variablen des mathematischen Optimierungsmodells

Indizes	Bedeutung
$m = 1, \dots, M$	Maßnahmen m
$n = 1, \dots, N$	Alias n der Maßnahme m
Parameter	Bedeutung
I_m	Investitionskosten der Maßnahmen m .
I^{max}	maximales Investitionsvolumen
t_m^f	Vorlaufzeit für Maßnahme m
t_m^a	Startzeitpunkt der Maßnahme m (nach Vorlaufzeit)
x_m	Menge oder Ausmaß der Maßnahme m
C_m	Kosten pro Einheit der Maßnahme m
t_m	Dauer der Maßnahme m
$k_{m,t}$	Kapazitätsbeitrag der Maßnahme m pro Zeit
D	Erforderliche Kapazitätsdifferenz
T	Gesamte verfügbare Zeit
t_m^{min}	Mindestlaufzeit für Maßnahme m
Z	Gesamtkosten
Variablen	Bedeutung
y_m	Entscheidungsvariable zur Durchführung
z_m	Entscheidungsvariable zur Neueinführung
x_m^{max}	Maximale Menge von Maßnahme m
t_m^{max}	Maximale Laufzeit für Maßnahme m

Ziel einer wirtschaftlichen Produktion ist es, die zur Optimierung der Belastungsflexibilität erforderlichen einmalig und oder fortlaufend anfallenden Kosten durch die Durchführung von Maßnahmen zu minimieren. Folglich wurde für das Modell folgende Zielfunktion aufgestellt:

$$\min Z = \sum_{m=1}^M (C_m * y_m + I_m * z_m) * x_m \quad (3-1)$$

Die anfallenden Kosten berechnen sich nach Gleichung (3-1) aus dem Produkt der Kosten je Maßnahme und der Entscheidungsvariable, die angibt, ob eine Maßnahme aktiv ist. Zusätzlich werden die Investitionskosten berücksichtigt, falls eine Maßnahme neu eingeführt wird. Diese Kosten werden weiter multipliziert mit dem Umfang der Maßnahme, in dem die Maßnahme umgesetzt wird.

In dem Modell werden folgende Nebenbedingungen getroffen. Die Gesamtkapazität muss die Kapazitätsdifferenz D abdecken (3-2).

$$\sum_{m=1}^M k_{m,t} * t_m * x_m * y_m \geq D \quad (3-2)$$

Eine Maßnahme m kann erst nach Ablauf ihrer Vorlaufzeit t_m^f beginnen. Die Startzeit t_m^a muss daher mindestens die Vorlaufzeit t_m^f betragen. Eine Maßnahme kann also beginnen, wenn ihre Vorlaufzeit abgelaufen ist (3-3).

$$t_m^a \geq t_m^f \quad (3-3)$$

Jede Maßnahme m muss mindestens t_m^{min} Zeit laufen (3-4).

$$t_m \geq t_m^{min} \quad (3-4)$$

Jede Maßnahme m kann maximal t_m^{max} Zeit laufen (3-5).

$$t_m \leq t_m^{max} \quad (3-5)$$

Jede Maßnahme m kann maximal x_m^{max} Einheiten haben (3-6).

$$x_m \leq x_m^{max} \quad (3-6)$$

Jede Maßnahme m kann parallel zu anderen durchgeführt werden, solange die Zeitspanne ihrer Ausführung t_m innerhalb des Gesamtzeitraums T liegt (3-7).

$$t_m^a + t_m \leq T \quad (3-7)$$

Falls eine Maßnahme m erst beginnen kann, nachdem eine andere Maßnahme n abgeschlossen ist, muss sichergestellt werden, dass die Vorlaufzeiten und Laufzeiten korrekt koordiniert sind. Die Startzeit einer Maßnahme m muss mindestens nach der Endzeit einer anderen Maßnahme n liegen, falls m nach n kommt (3-8).

$$t_m^a \geq t_n^a + t_n \quad (3-8)$$

Alle Entscheidungsvariablen müssen nicht-negativ sein (3-9).

$$x_m \geq 0 \text{ für alle } m \quad (3-9)$$

Die Summe aller Investitionen darf das maximale Investitionsvolumen nicht überschreiten (3-10).

$$\sum_{m=1}^M I_m * z_m * x_m \leq I^{max} \quad (3-10)$$

Durch die Komplexität des Entscheidungsmodells wurden die Ergebnisse im folgenden Schritt in einen Softwaredemonstrator implementiert.

3.5 Arbeitspaket 5 – Ableiten eines Entscheidungsmodells mit allgemeinen Handlungsempfehlungen für kmU

Für die Anwendung der Ergebnisse wurden diese in einen Demonstrator implementiert, welcher auf MICROSOFT EXCEL basiert. Die mathematische Optimierung erfolgt unter automatischer Daten Aus- und Rückgabe mit MATLAB. Die Eingabe der unternehmensspezifischen Daten erfolgt auf verschiedenen Arbeitsblättern in der Excel Arbeitsmappe. Dies umfasst Unternehmenskennwerte und Planungsdaten wie zum Beispiel die geplanten Arbeitstage mit ihrem jeweiligen Schichtsystem, den Mitarbeiterbestand und Betriebsmittelkennzahlen. Außerdem werden in einem Katalog für das Unternehmen relevante Maßnahmen (vgl. Kapitel 3.2) aufgezählt und in weiteren Arbeitsblättern nach ihren Kosten, Leistungen und Abhängigkeiten beschrieben. Zusätzlich ist die Handhabung des Demonstrators sowie die Eingabemöglichkeit der einzelnen Parameter in einem kurzen Leitfaden beschrieben.

Die Eingabe der Nachfragewerte erfolgt manuell in das Prognosearbeitsblatt. Nach dem vorgestellten Verfahren nach HOLT und WINTERS werden diese realisierten Nachfragemengen analysiert und eine Prognose aufgestellt. Dabei besitzt der Anwender die Möglichkeit, manuell die Datengrundlage zu manipulieren, um eine verbesserte Prognose zu erhalten. Dies ist notwendig, da in der Prognose Sonderereignisse, wie zum Beispiel Sonderaktionen der Preisbildung der betrachteten Produktgruppe oder derer Substitute, ausgeschlossen werden müssen. In der folgenden Abbildung 9 ist exemplarisch ein Ausschnitt des Prognosetools aufgezeigt.

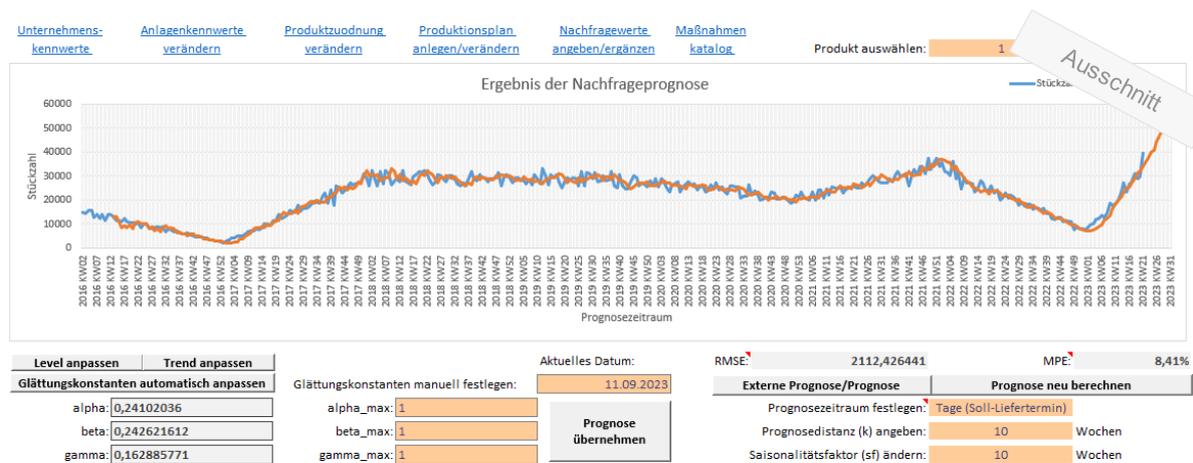


Abbildung 9: Ausschnitt des Prognosetools im entwickelten Softwaredemonstrator

Das Ergebnis der Prognose wird anhand einer Grafik dargestellt. In der folgenden Abbildung 9 ist sowohl die realisierte Nachfragemenge als auch die aufgestellte Prognose dargestellt. Außerdem wird durch das Tool ein oberes und unteres Konfidenzintervall ausgegeben, in dem sich, mit der entsprechend vom Nutzenden eingegebenen Wahrscheinlichkeit, die zukünftige Nachfrage abbilden wird. Dies ermöglicht dem Nutzer erneut, verschiedene strategische Positionierungen zu erzeugen und anschließend zu realisieren.

Die Nachfrageprognose sowie die Eingabeparameter werden im Anschluss an das externe Programm MATLAB, in dem das beschriebene mathematische Modell implementiert ist, übergeben und eine Lösung des Problems erzeugt.

Nach der Lösungsfindung werden die Ergebnisse an den Excel basierten Demonstrator zurückgegeben und in Tabellenform dargestellt. Bei der Maßnahmenauswertung wurde für jede Maßnahme die neue Abweichung von der optimierten Stückzahl zur prognostizierten Nachfrage berechnet. Darüber hinaus hat der Anwender die Möglichkeit, die vorausgewählten Maßnahmen mit einem Punktesystem (0-10 Punkte) auf Basis einer Nutzwertanalyse zu bewerten. Das Bewertungsmodell analysiert die Veränderung der Abweichung und vergibt automatisch die oben genannten Punkte für Maßnahmen, die einen negativen, keinen oder übermäßigen Einfluss auf den Grad der Abweichung haben. Als Ergebnis werden die Maßnahmenkürzel, die Maßnahmenbezeichnungen, die fixen und variablen Kosten bzw. Erlöse und das erzielte Ergebnis der Punkteverteilung angezeigt. Der aufgezeigte Ansatz zur Bewertung von Maßnahmen der Kapazitäts- und Belastungsplanung ermöglicht eine detailliertere Abschätzung ihrer Wirkung und erleichtert damit die Auswahl geeigneter Maßnahmen-Kombinationen. Die ausgegebenen Kennwerte sind jeweils als Durchschnitt über den zuvor vom Nutzenden festgelegten Planungshorizont angegeben. Als die wichtigsten Kennzahlen werden die laufenden Betriebskosten der angewandten Maßnahmen unterteilt in fixe und variable Kosten, aufgezeigt. Für die Umsetzungsplanung werden die jeweiligen Nutzungszeiten der Maßnahmen angegeben, wodurch auch die Einführungszeitpunkte dieser dargestellt werden. Somit wird dem Anwender dargestellt, wann Veränderungen des Produktionssystems durchgeführt werden müssen (vgl. Abbildung 10).

Ausschnitt

Maßnahmenkombination aktivieren? Ja, bis vierfach		Automatischer Maßnahmenvorschlag	Maßnahmeneffekt einsehen	
Kürzel	Maßnahmen	Kosten/Erlöse Fix	Kosten/Erlöse Variabel	
P03T06O24L23	Auf- bzw. Abbau befristeten Personals & Erwerb oder Veräußerung manueller Anlagen & Ablehnen von Bedarfsmengen & Fremdvergabe von Bedarfsmengen	366731,4286	-12830497,24	
P03T05O24L23	Auf- bzw. Abbau befristeten Personals & Leasing manueller Anlagen & Ablehnen von Bedarfsmengen & Fremdvergabe von Bedarfsmengen	96731,42857	-12820097,24	
P03O24	Auf- bzw. Abbau befristeten Personals & Ablehnen von Bedarfsmengen	16731,42857	-14208367,24	

Abbildung 10: Ausschnitt der generierten Lösung

3.6 Arbeitspaket 6 – Dokumentation, Anwendung und Verbreitung der Ergebnisse

Zur Dokumentation der Ergebnisse wurde in dem Projekt ein Softwaredemonstrator entwickelt, der die Zusammenhänge abbildet und von den Anwendern zur Lösungsfindung speziell vorliegender Probleme genutzt werden kann. Zur Unterstützung wurde ein Leitfaden erstellt, der die Handhabung beschreibt sowie die geforderten Eingaben erläutert und somit eine strategische Planung des Produktionssystems ermöglicht. Für den projektbegleitenden Ausschuss stand dabei im Vordergrund, dass der Leitfaden kurz und präzise verfasst wird, da ein ausführliches Handbuch weniger zweckmäßig und eher abschreckend wirkt.

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde in den vAWs der Demonstrator angewandt und Handlungsoptionen für die jeweiligen Unternehmen erstellt und kritisch diskutiert. Dort eingebrachte Impulse wurden respektive in den Demonstrator eingepflegt.

Der entwickelte Demonstrator wird auf der Projekthomepage (<https://www.ifa.uni-hannover.de/geprovar>) kostenlos zur Verfügung gestellt.

Die im Rahmen des Projektes erzielten Ergebnistransferleistungen sind in Kapitel 8 aufgezeigt.

4 Innovativer Beitrag und wirtschaftlicher Nutzen

Der innovative Beitrag des Forschungsvorhabens besteht vor allem in der ganzheitlichen Betrachtung der Kapazitäts- und Belastungsabstimmung in der Produktionssystemgestaltung. Durch das entwickelte Vorgehen werden, resultierend aus der Länge des Planungshorizonts und der verbleibenden Reaktionszeit bis zur eintretenden Veränderung, verschiedene Prozesse der Transformation, Adaption und Regulierung dargestellt und ihre einzelnen, durchzuführenden Schritte aufgezeigt. Durch die kombinatorische Betrachtung der identifizierten Maßnahmen der Kapazitäts- und Belastungsabstimmung wird eine Vielzahl an Handlungsmöglichkeiten aufgezeigt, die eine Verfestigung der Unternehmensstrukturen verhindern und somit eine nachhaltige Handlungsfähigkeit des Produktionssystems unterstützen. Besonders die Möglichkeit der Anpassung der Eingabeparameter des mathematischen Modells auf das unternehmensspezifische Umfeld sowie die Berücksichtigung von intuitiven Einschätzungen stellen eine Anwendungsorientierung für kmU dar.

Durch die Anwendung des entwickelten Demonstrators wird eine Optimierung des Produktionssystems hinsichtlich der Belastung und individuellen Nachfragesituation ermöglicht. Darüber hinaus wird mithilfe der intelligenten Maßnahmenkombinatorik sichergestellt, dass die für das kmU individuell ermittelte Lösung mit minimalen Kosten verbunden ist und sämtliche Restriktionen des kmU berücksichtigt. Somit wird eine Reduzierung der anfallenden Kosten zur Deckung der Nachfragemenge ermöglicht. Eine Quantifizierung ist daher aufgrund der verschiedenen Unternehmensumfelder nicht generell möglich. Der wirtschaftliche Nutzen durch die Ermöglichung der strategischen Planung des Produktionssystems kann nicht direkt quantifiziert werden.

5 Voraussichtlicher Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der kmU

Durch die Anwendung des entwickelten Demonstrators sowie die generelle Berücksichtigung der im Projekt erzielten Ergebnisse wird kmU ein Werkzeug bereitgestellt, welches eine fundierte Entscheidung der zukünftigen Ausrichtung des Produktionssystems ermöglicht. Besonders aufgrund von schwankenden Nachfragemengen wurde in den kmU zumeist nur unter Verwendung eines kleinen Spektrums an Maßnahmen eine Änderung durchgeführt. Dies resultiert in ihrer Konsequenz zu einer Handlungsunfähigkeit, einer geringeren logistischen Leistungsfähigkeit und ggf. den Verlust von Aufträgen. Durch die Handlungsempfehlungen für eine strategische Ausrichtung des Produktionssystems wird den Unternehmen die Möglichkeit geboten, auch langfristig handlungsfähig zu sein und die Kundennachfrage zu bedienen.

Während der Projektbearbeitung hat sich herausgestellt, dass eine strategische Positionierung des Produktionssystems oftmals noch nicht durchgeführt wurde. Vielmehr wurden die Herausforderungen des Tagesgeschäfts in den Vordergrund gestellt und so eine Bedienung der aktuellen Kunden angestrebt. Im Laufe des Projekts wurde das Verständnis der kmU über die Dringlichkeit und Wichtigkeit der strategischen Positionierung gefördert. Hierzu wird den kmU mit den Projektergebnissen ein Verständnis sowie ein Werkzeug zur Entscheidungsunterstützung bereitgestellt.

6 Verwendung der Zuwendungen

Die Bearbeitung des Forschungsprojekts erfolgte über den Zeitraum vom 01.05.2022 bis zum 31.10.2024 nacheinander durch eine am Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA) der Leibniz Universität Hannover beschäftigte wissenschaftliche Mitarbeiterin (TV-L 13) aus der Fachgruppe Produktions- und Arbeitsgestaltung. Die Mitarbeiterin war in Vollzeit mit der Bearbeitung des Forschungsprojekts beschäftigt. Der angefallene Aufwand zur Bearbeitung des Projektes entspricht somit den beantragten und bewilligten 30 Personenmonaten für wissenschaftlich-technisches Personal.

Während der Projektlaufzeit wurde die wissenschaftliche Mitarbeiterin bei den Literaturrecherchen, bei der Validierung der Systematik in den Unternehmen, bei der Vor- und Nachbereitung der Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses sowie den vorhabensbezogenen Aufwendungen in der Wirtschaft und bei der Dokumentation der Ergebnisse durch studentische Hilfskräfte unterstützt. Des Weiteren wurden durch Studierende der Leibniz Universität Hannover folgende Anzahl an studentische Arbeiten zu diesem Thema bearbeitet und durch das IFA betreut:

- 6 Masterarbeiten
- 1 Bachelorarbeit
- 3 Studienarbeiten

7 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Es kamen besonders zu Beginn bei der Projektdurchführung die erschwerten Umstände der noch anhaltenden Corona-Pandemie hinzu, weshalb vor-Ort-Termine zunächst gar nicht und später nur mit restriktiven Einschränkungen möglich waren. Diesen Umständen zu trotz konnte das Arbeitsprogramm umgesetzt und alle Teilziele erreicht werden. Während des Projektverlaufs und auch nach Projektende bestätigte sich, dass die geleistete Arbeit in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag entsprach. Der im Antrag kalkulierte Aufwand war somit für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

8 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Erste Schritte zum Ergebnistransfer sind bereits während der Projektlaufzeit entsprechend der geplanten Maßnahmen durchgeführt worden. Weitere Maßnahmen zur Verwertung und Verbreitung der Projektergebnisse befinden sich aktuell in der Umsetzung und sind im Anschluss an das Projekt vorgesehen. Alle noch ausstehenden Maßnahmen sind bereits angestoßen worden. Die Ziele für den Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft werden im Folgenden tabellarisch dargestellt und ihre Erreichung aufgezeigt:

Tabelle 3: Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Umsetzung einer Projekthomepage	Informationen über das Projekt öffentlich und kostenfrei zugänglich machen	Internet	Zu Projektbeginn (Q2 2022) und während der Projektlaufzeit (Q2 2022 – Q4 2024)
Zielerreichung	Eine Projekthomepage wurde umgesetzt und Informationen bezüglich des Forschungsvorhabens öffentlich und kostenfrei zur Verfügung gestellt. (https://www.ifa.uni-hannover.de/geprovar)		
Zusammenarbeit mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA)	Einbezug des PA in Ergebniserzeugung zur Sicherstellung des Praxisbezugs, der Berücksichtigung von Anforderungen unterschiedlicher Branchen sowie der Anwendbarkeit	Arbeitstreffen im IFA oder bei den Unternehmen, Gespräche	Während der gesamten Projektlaufzeit (Q2 2022 – Q4 2024)

Zielerreichung	<p>Während der Projektbearbeitung fanden sowohl Projektausschusstreffen also auch Arbeitstreffen mit den einzelnen Unternehmen statt.</p> <p>Projektausschusstreffen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 28.06.2022; Gastgeber: Institut für Fabrikanlagen und Logistik; Garbsen • 21.03.2023; Gastgeber: Fa. Pfeiffer Vacuum GmbH & Co. KG; Göttingen • 18.04.2024; Gastgeber: Fa. Sollingglas GmbH & Co. KG; Derental • 28.10.2024; Gastgeber: Institut für Fabrikanlagen und Logistik 		
Anfertigung und Veröffentlichung von Zwischenberichten	Verbreitung der Zwischenergebnisse an eine breite Öffentlichkeit	Internet, Projekt-homepage	Während der gesamten Projektlaufzeit (Q2 2022 – Q4 2024)
Zielerreichung	Zwei Zwischenberichte zu den erreichten Zielen wurden am 15.03.2022 und 15.03.2023 fristgerecht eingereicht.		
Publikationen von Teilergebnissen in Fachzeitschriften	Vermittlung von Teilergebnisse an die interessierte Fachwelt aus Industrie und Wissenschaft	Fachzeitschriften, Manuskripte,	Während der gesamten Projektlaufzeit (Q2 2022 – Q4 2024)
Zielerreichung	<p>Folgende Veröffentlichungsleistungen wurden erarbeitet:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rochow, N., Wiefermann, V., Bleckmann, B., Nyhuis, P. (2022): Beherrschung von Nachfrageschwankungen durch Belastungsflexibilität, ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, (117), S. 677 - 681 • Wiefermann, V. (2022): Belastungsflexibilität hilft KMU, mit Nachfrageschwankungen umzugehen, phi Produktionstechnik Hannover informiert 		
Präsentation und Diskussion der Teilergebnisse auf Konferenzen und Fachtagungen	Vermittlung von Teilergebnisse an die interessierte, breite Öffentlichkeit und Austausch	Nationale und internationale Konferenzen, Messen, Tagungen, etc.	Während der gesamten Projektlaufzeit (Q2 2022 – Q4 2024)
Zielerreichung	<p>Folgende Beiträge wurden auf Konferenzen oder Fachtagungen vorgestellt und diskutiert:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wiefermann, V.; Nyhuis, P. (2023): Deskriptives Beschreibungsmodell zur Gestaltung der Belastungsflexibilität, In: GfA, Sankt Augustin (Hrsg.): Frühjahrskongress 2023, Hannover 		

Beispielhafte Anwendung der Ergebnisse in der Industrie	Prüfung der praktischen Anwendbarkeit und ggf. Verbesserung der Ergebnisse	Unternehmen des PA und weitere Interessenten	Während der Projektlaufzeit (Q2 2022 – Q4 2024)
Zielerreichung	In den dritten vAWs wurden in den Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschuss Ergebnisse Handlungsempfehlungen mittels des Demonstrators entwickelt und kritisch diskutiert. Die Impulse der Unternehmen wurden anschließend implementiert und so eine hohe Anwenderorientierung geschaffen.		

Tabelle 4: Transfermaßnahmen nach Abschluss des Forschungsprojekts

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Projekthomepage	Informationen und Ergebnisse (Leitfaden und Software-demonstrator) öffentlich und kostenfrei zugänglich machen	Internet, Download	Nach der Projektlaufzeit (ab Q4 2024)
Zielerreichung	Der erstellte Softwaredemonstrator wurde auf der Projekthomepage öffentlich zugänglich gemacht.		
Anfertigung und Veröffentlichung des Abschlussberichts	Verbreitung der Ergebnisse des Forschungsprojekts in der Öffentlichkeit	Internet, Projekthomepage	Nach der Projektlaufzeit (ab Q4 2024)
Zielerreichung	Der Abschlussbericht wird nach Beendigung des Forschungsprojekts auf der Projekthomepage kostenfrei zum Download bereitgestellt.		
Publikation der Ergebnisse in Fachzeitschriften	Dokumentation / Ergebnispräsentation für interessierte Fachwelt aus Industrie und Wissenschaft	Fachzeitschriften, Tagungen	Nach der Projektlaufzeit (ab Q4 2024)

Zielerreichung	Die folgenden Beiträge sind erstellt und zur Veröffentlichung geplant: <ul style="list-style-type: none"> • Wiefermann, V.; Otto, S., Nyhuis, P. (geplant in Production Engineering): Model for load and capacity adjustment measures in the context of demand fluctuations • Wiefermann, V.; Steffens, C., Nyhuis, P. (geplant in Publish-Ing.): Qualitative Approach for the selection of combinations of measures for load coordination in interlinked workstations in the multi-product 		
Integration in die universitäre Lehre	Wissen an Studierende vermitteln	Vorlesungen, Tutorien, praktische Übungen	Nach der Projektlaufzeit (ab Q4 2024)
Zielerreichung	Die generellen Erkenntnisse zur Abstimmung von Maßnahmen der Produktionssystemgestaltung des Forschungsvorhabens werden in die Lehrveranstaltung Produktions- und Arbeitsgestaltung der Arbeitsgruppe Produktions- und Arbeitsgestaltung eingebunden.		
Anwendung der Ergebnisse in Industrieberatungsprojekten des Instituts	Nutzung der Ergebnisse in der Wirtschaft bei der Durchführung von Industrieberatungsprojekten des Instituts	Nationale und internationale Konferenzen, Messen, Tagungen, etc.	Nach der Projektlaufzeit (ab Q4 2024)

Das vorgeschlagene und aktualisierte Transferkonzept der Ergebnisse in die Wirtschaft ist insgesamt als realistisch einzuschätzen. Aufgrund der Allgemeingültigkeit der Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt sowie den bisherigen Erfahrungen aus der Anwendung und Verbreitung dieser ist davon auszugehen, dass der Transfer in die Wirtschaft über solche Industrieprojekte in Zukunft erfolgreich sein wird.

Das generelle Themenfeld der Belastungsflexibilität des Forschungsprojekts wird langfristig ein Fokus der weiteren Forschung in der Forschungsstelle sein. Die Publikation der generierten Ergebnisse, sowie dieser als Grundlage für weitere Forschungen, in Fachzeitschriften und auf Tagungen wird somit über die im Transferkonzept beschriebenen Maßnahmen hinaus erfolgen. Auch die Implementierung der Ergebnisse in die Lehre sowie das Seminarangebot der Forschungsstelle ist teilweise erfolgt und damit auch als realistisch einzustufen.

9 Durchführende Forschungsstelle

Das Forschungsprojekt „GeProVar – Vorgehen zur Operationalisierung der Belastungsflexibilität zur Handhabung von Nachfrageschwankungen in verketteten Arbeitssystemen von kmU“ wurde über die gesamte Laufzeit von der Forschungsstelle Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA) der Leibniz Universität Hannover bearbeitet. Verantwortlich für die Projektbearbeitung bei der Forschungsstelle war die Fachgruppe Produktions- und Arbeitsgestaltung. Das Fachwissen der IFA-Fachgruppe garantierte die Expertise zur strategischen und ganzheitlichen Produktionssystemgestaltung auf der Shopfloor-Ebene.

Forschungsstelle:

Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA) der Leibniz Universität Hannover

Produktionstechnisches Zentrum Hannover (PZH)

An der Universität 2

D-30823 Garbsen

Tel.: +49 (0)511-762-2440

Fax: +49 (0)511-762-3814

E-Mail: office@ifa.uni-hannover.de

<http://www.ifa.uni-hannover.de>

Leiter der Forschungsstelle:

Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis

Geschäftsführender Leiter des Instituts für Fabrikanlagen und Logistik

E-Mail: nyhuis@ifa.uni-hannover.de

Projektbearbeiter:

Vera Wiefermann, M. Eng.

Wissenschaftliche Mitarbeiterin der IFA-Fachgruppe Produktions- & Arbeitsgestaltung

Tel.: +49 (0)511-762-18198

E-Mail: wiefermann@ifa.uni-hannover.de

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 22126 N der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e.V. (BVL), 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.

Für die Förderung sei an dieser Stelle gedankt.

Literaturverzeichnis

- Arnold, Dieter; Isermann, Heinz; Kuhn, Axel; Tempelmeier, Horst; Furmans, Kai (Hg.) (2008): Handbuch Logistik. 3., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-72929-7>.
- Berkholz, D. A. (2012): Grundmodell zur Kapazitäts- und Belastungsabstimmung eines Arbeitssystems in der Regeneration. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Garbsen. Institut für Fabrikanlagen und Logistik
- Betge, P. (1996): Kapazität und Beschäftigung. S. 852 – 862, In: Kern et al. (1996): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft
- Büchel, A. (1966): Terminplanung und Terminüberwachung. In: Industrielle Organisation: Zeitschrift für Betriebswissenschaft, Management, Produktionstechnik und Organisation 35 (10), S. 460-469
- Büchel, A. (1971): Anwendung der Datenverarbeitung in der Produktionssteuerung. In: Swiss Journal of Economics and Statistics 107 (3), S. 629-640
- Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H.-J.; Westkämper, E. (2009): Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung. 3., neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. ISBN 978-3-540-72136-9.
- Butz, H.-W. (1976): Geplante Flexibilität in Unternehmungen der Einzelfertigung. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen. Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre
- Conway, Richard W.; Maxwell, William L.; Miller, Louis W. (1967): Theory of scheduling. Reading, Mass.: Addison-Wesley.
- Eversheim, W. (1989): Organisation in der Produktionstechnik Band 4. Fertigung und Montage. 2. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf, DOI: 10.1007/978-3-642-61344-9
- Eversheim, W.; Schaefer, F.-W. (1980): Planung des Flexibilitätsbedarfs von Industrieunternehmen. In: Die Betriebswirtschaft 40 (2), S. 229-248

- Gottschalk, L. L. (2005): Flexibilitätsprofile. Analyse und Konfiguration von Strategien zur Kapazitätsanpassung in der industriellen Produktion. Dissertation. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich. Zentrum für Unternehmenswissenschaften
- Hämmerle, M. (2015): Methode zur strategischen Dimensionierung der Personalflexibilität in der Produktion. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement
- Holt, C. C.; Modigliani, F.; Muth, J. F.; Simon, H. A.; Bonini, C. P.; Winters, P. R. (1960): Planning Production, Inventories, and Work Force. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall Inc
- IPH (2013): (Belastungs-)Flexibel in die Zukunft. Wie Unternehmen schwankende Nachfrage klug aus-gleichen können. In: Produktion erforschen und entwickeln, S. 60–61.
- Kern, W. (1962): Die Messung industrieller Fertigungskapazitäten und ihrer Ausnutzung. Grundlagen und Verfahren. Habilitation, Technische Hochschule Darmstadt, Westdeutscher Verlag, Köln, Opladen
- Kottig, U. (2014): Variantenreiche Fertigung für eine Produktion auf Kundenwunsch. In: VDMA Fertigungsnah Informationstechnik.
- Krüger, A. (2004): Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme. München: Utz
- Lödding, H. (2008): Verfahren der Fertigungssteuerung
- Mütze, A. (2024): Die Auftragsfreigabe als Aufgabe der Produktionsplanung und -steuerung. Dissertation. Universität Hannover, Hannover. Institut für Fabrikanlagen und Logistik
- Nebi, T. (2011): Produktionswirtschaft. 7., überarb. und erw. Aufl. München: Oldenbourg Verlag
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (1999): Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- REFA (1991a): Methodenlehre der Betriebsorganisation: Planung und Steuerung Teil 1. Carl Hanser Verlag, München, Wien

- REFA (1991b): Methodenlehre der Betriebsorganisation: Planung und Steuerung Teil 2. Carl Hanser Verlag, München, Wien
- Reinhart, G.; Dürrschmidt, S.; Hirschberg, A.; Selke, C. (1999a): Reaktionsfähigkeit für Unternehmen. Eine Antwort auf turbulente Märkte. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 94 (1999) 1-2, Carl Hanser Verlag, München, S. 21 – 24
- Reinhart, G.; Dürrschmidt, S.; Krüger, A. (1999b): Stückzahlflexible Montage- und Logistiksysteme. Integrierte Planung kapazitätsflexibler Systeme. In: wt Werkstatttechnik, Band 89 (1999) 9, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 413-418, ISSN: 0941-2360
- Riebel, P. (1954): Die Elastizität des Betriebes. Eine produktions- und marktwirtschaftliche Untersuchung. In: Beiträge zur betriebswirtschaftlichen Forschung. Gutenberg, E.; Hasenack, W.; Hax, K.; Schäfer, E. (Hrsg.), Band 1, Westdeutscher Verlag, Köln, Opladen
- Schäfer, E. (1966): Grundlagen der Marktforschung. Marktuntersuchung und Marktbeobachtung. 4. Auflage, Westdeutscher Verlag, Köln, Opladen, DOI: 10.1007/978-3-663-02527-6
- Schmidt, M.; Nyhuis, P. (2017): Wirtschaftliche Beherrschung von Nachfragemengenschwankungen in der Produktion. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112 (2017) 5, Carl Hanser Verlag, S. 293 – 296, DOI: 10.3139/104.111720
- Schmidt, M. (2019): Modellgestützte Bewertung der Kapazitätsabstimmung im Umfeld veränderlicher Nachfrage. Dissertation, Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA), der Leibniz Universität Hannover. Nyhuis, P. (Hrsg.): Berichte aus dem IFA, Band 02/2019. Garbsen: PZH Verlag. ISBN 978-3-95900-267-7.
- Schneeweiß, C. (1996): Flexibilität, Elastizität und Reagibilität. S. 489 - 501 In: Kern et al. (1996): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft
- Sesterhenn, M. (2003): Bewertungssystematik zur Gestaltungsstruktur- und betriebsvariabler Produktionssysteme. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen. Werkzeugmaschinenlabor

- Wagner, C. (2012): Kontinuierliche Gestaltung skalierbarer Produktionsstufen. Dissertation, Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA), der Leibniz Universität Hannover. Nyhuis, P. (Hrsg.): Berichte aus dem IFA, Band 03/2012. Garbsen: PZH Verlag. ISBN 978-3-943104-64-6.
- Wesebaum, Sören; Prüssing, Patrick; Nyhuis, Peter (2013): Verbesserung logistischer Ziele durch Belastungsflexibilität. In: ZWF 180 (5), S. 305–309.
- Westerkämper, E.; Zahn, E. (2009): Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-540-68890-7
- Wiendahl, H.-P., Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Breitenbach, F. (2005): Planung modularer Fabriken. Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. Carl Hanser Verlag, München; DOI: 10.3139/9783446436022
- Wiendahl, H.-P. (2010): Betriebsorganisation für Ingenieure. 7. akt. Aufl., Carl Hanser Verlag, München, DOI: 10.3139/9783446422889
- Windt, K. (2001): Engpassorientierte Fremdvergabe in Produktionsnetzen. Dissertation. Universität Hannover, Hannover. Institut für Fabrikanlagen und Logistik