

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 19266 N

## Thema

Logistik für die modulare Produktion - Vorgehensmodell zur logistischen Umsetzung der modularen Produktion in der Chemie- und Pharmaindustrie

## Berichtszeitraum

01.01.2017 - 31.01.2021

## Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung der Logistik (BVL) e. V.

## Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Dortmund  
Fakultät Maschinenbau  
Institut für Transportlogistik

Dortmund, den 12.05.2021

Ort, Datum

Prof. Dr.Ing. Uwe Clausen

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der  
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU..	1
1.2 Aufbau des Forschungsberichts.....	2
<b>2 Detailanalyse bereits entwickelter Produktionsmodule</b> .....	<b>4</b>
2.1 Bestandteile einer verfahrenstechnischen Anlage .....	4
2.2 Modellierungskonzept verfahrenstechnischer Anlagen.....	5
2.3 Modulare Produktionsanlage: „F <sup>3</sup> Factory“ .....	6
2.4 Modulare Produktionsanlage: „EcoTrainer“ .....	8
2.5 Modulare Produktionsanlage „Smart Factory“ .....	10
2.6 Vergleich modularer Produktionseinheiten .....	11
2.7 Anforderungen der Chemieindustrie an die Logistik .....	14
2.8 Unterscheidungsmerkmale der Logistik für wandlungsfähige Systeme.....	26
<b>3 Bestimmung der Kriterien für die Auswahl geeigneter Produktionsstandorte</b> .....	<b>28</b>
3.1 Grundlagen der Standortplanung.....	28
3.2 Vorgehen bei einer Standortplanung .....	29
3.3 Anforderungsprofil für die Standortplanung von Chemieunternehmen .....	30
3.4 Entwicklung eines Kriterienkatalogs zur Standortbewertung in Abhängigkeit der notwendigen Anforderungen .....	32
3.5 Gewichtung der Standortkriterien für wandlungsfähige Systeme .....	34
3.6 Bewertung von Produktionsstandorten anhand des Kriterienkatalogs .....	37
3.7 Einsatzmöglichkeiten der Simulation in der Chemieindustrie .....	39
3.8 Simulationsstudie zur Konzeption von Produktionsnetzwerken für wandlungsfähige Systeme .....	41
<b>4 Positionierung der modularen Produktionsanlagen innerhalb eines Chemieparks unter Berücksichtigung der Produktionsstrukturen und Logistik</b> .....	<b>46</b>
4.1 Prozessabläufe in der Chemieindustrie.....	46
4.2 Notwendige Infrastruktureinrichtungen.....	48
4.3 Evaluierung der Anordnungsplanung anhand einer Simulationsstudie.....	53
<b>5 Entwicklung der Prozesse für die Ver- und Entsorgung und Analyse der erforderlichen Betriebsmittel</b> .....	<b>61</b>
5.1 Identifizierung der Logistikprozesse und Betriebsmittel.....	61

---

5.2	Prozess- und Betriebsmittelplanung .....	64
5.3	Einfluss des Produktionsstandortes auf die Prozess- und Betriebsmittelplanung.....	65
5.4	Outsourcing logistischer Dienstleistungen in der modularen Produktion der Chemieindustrie.....	67
5.5	Wahl des Dienstleisters in Abhängigkeit des Produktionsstandortes.....	72
<b>6</b>	<b>Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Unterstützung bei der Umstellung auf eine kleinformige Produktion .....</b>	<b>79</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>85</b>
<b>8</b>	<b>Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten .....</b>	<b>88</b>
<b>9</b>	<b>Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten .....</b>	<b>89</b>
<b>10</b>	<b>Dissemination der Forschungsergebnisse .....</b>	<b>90</b>
10.1	Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit.....	90
10.2	Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit .....	91
10.3	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts .....	92
<b>11</b>	<b>Personaleinsatz.....</b>	<b>93</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>VIII</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>XIV</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Arbeitspakete des Forschungsvorhabens (eigene Darstellung) .....	3
Abbildung 2-1: Struktur einer modularen Anlage (in Anl. an: VDI-Richtlinie 2776).....	5
Abbildung 2-2: Prozesscontainer des Projekts F <sup>3</sup> Factory (CHEMManager 2020).....	7
Abbildung 2-3: Schematische Darstellung des Einsatzgebietes eines EcoTrainers (Evonik 2020) .....	8
Abbildung 2-4: Schematischer Aufbau des EcoTrainer (Evonik 2020).....	9
Abbildung 2-5: Prozessanlage der Smart Factory (Siemens AG 2018).....	10
Abbildung 2-6: Systematik der Gebindearten (in Anl. an: Kaczmarek et al. (2015)).....	15
Abbildung 2-7: Übergang zwischen Gefahrgut und Gefahrstoff (Arnold et al. 2008) .....	18
Abbildung 2-8: Zusammenlagerungstabelle in Abhängigkeit der Lagerklasse (Bundesministerium des Innern 2021).....	20
Abbildung 2-9: Infrastrukturelle Anforderung für die Lagerung von Gefahrstoffen (VDI 3975) .....	21
Abbildung 2-10: Schematische Darstellung verschiedener Produktionsnetzwerke (Mothes 2015).....	23
Abbildung 2-11: Materialumsetzung (in Anl. an: Loos (1997)) .....	23
Abbildung 3-1: Ablaufplan der Standortplanung (Grundig 2018).....	29
Abbildung 3-2: Gewichtung der Standortkriterien am Beispiel der „Smart Factory“ von Merck (eigene Darstellung) .....	35
Abbildung 3-3: Schematischer Verlauf der Kosten von der Planung bis zur Inbetriebnahme (Gutenschwager et al. 2017) .....	40
Abbildung 3-4: Vereinfachte Supply Chain der Kunststoff-Produktion (eigene Darstellung) .....	42
Abbildung 4-1: Idealtypische diskontinuierliche und kontinuierliche Prozessabläufe (Loos 1997).....	47
Abbildung 4-2: Paarweiser Vergleich der Systemelemente (eigene Darstellung) .....	49
Abbildung 4-3: Materialfluss bei modularen Produktionsanlagen (eigene Darstellung).....	49
Abbildung 4-4: Infrastruktureinrichtung bei Positionierung einer modularen Anlage in einer Halle (eigene Darstellung) .....	51
Abbildung 4-5: Arbeitssystem einer modularen Anlage bei Positionierung im Freien (eigene Darstellung).....	51
Abbildung 4-6: Ablaufdiagramm der Transport für die Rohstoffe vom Logistikzentrum zur modularen Anlage (eigene Darstellung) .....	55
Abbildung 4-7: Teilproduktionsprozess der modularen Anlage mit Behälterabgabe (eigene Darstellung) .....	56
Abbildung 4-8: Darstellung der modularen Anlage und wichtiger logistischer Einrichtungen auf dem Betriebsgeländes des Chemieparks Marl (eigene Darstellung) .....	56
Abbildung 4-9: Anordnungslayouts der Simulationsstudie (eigene Darstellung).....	59
Abbildung 5-1: Prozesse eines modularen Produktionssystem inklusive Peripherie (eigene Darstellung) .....	63
Abbildung 5-2: Transportmittel für den innerbetrieblichen Verkehr (eigene Darstellung) .	64
Abbildung 5-3: Abgrenzung 4PL-Provider, 3PL-Provider und LLP hinsichtlich ihres Leistungsumfangs (in Anl. an: Kille und Reuter (2018)) .....	68

---

Abbildung 5-4: Ausgewählte Service bzw. Logistikprozesse in den Leistungsebenen (in Anl. an: Kille und Reuter (2018)).....	69
Abbildung 5-5: Wertschöpfungskette in der Chemieindustrie (in Anl. an: Kille und Reuter (2018)) .....	70
Abbildung 5-6: Anforderungen an Logistikdienstleister (in Anl. an: Krupp (2013)) .....	72
Abbildung 6-1: Kriteriengewichtung imVorgehensmodell (eigene Darstellung).....	80
Abbildung 6-2: Vorgehensmodell – Standortbewertung (eigene Darstellung).....	81
Abbildung 6-3: Vorgehensmodell - Makroskopische Standortbewertung (eigene Darstellung) .....	82
Abbildung 6-4: Vorgehensmodell - Einsatz der Dienstleister (eigene Darstellung).....	83
Abbildung 6-5: Vorgehensmodell - Prozess- und Betriebsmittelplanung (eigene Darstellung) .....	84

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Kriterienkatalog der „F <sup>3</sup> -Factory“ .....	11
Tabelle 2-2: Kriterienkatalog des „EcoTrainers“ .....	12
Tabelle 2-3: Kriterienkatalog der „Smart Factory“ .....	13
Tabelle 2-4: Übersicht über nationalen und internationalen Gefahrgutvorschriften (in Anl. an: Bank (2007)) .....	18
Tabelle 2-5: Gefahrgutklassen nach ADR (Voth und Hesse 2017) .....	19
Tabelle 3-1: Kriterien zur Bewertung von Standortalternativen .....	32
Tabelle 3-2: Standortkriterien in gewichteter Reihenfolge .....	35
Tabelle 3-3: Konfigurationen der durchgeführten Experimente .....	43
Tabelle 3-4: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse .....	44
Tabelle 4-1: Energie- und Medienversorgungsangebot in Chemieparcs .....	52
Tabelle 4-2: Untersuchungsgegenstände im Simulationsmodell .....	57
Tabelle 4-3: Ergebnisse der Simulationsstudie zur Anordnungsplanung .....	59
Tabelle 5-1: Merkmalsausprägung für Szenario 1 .....	74
Tabelle 5-2: Merkmalsausprägung für Szenario 2 .....	76
Tabelle 5-3: Merkmalsausprägung für Szenario 3 .....	77

# 1 Einleitung

In der Prozessindustrie (Chemie- und Pharmaindustrie) erfolgt die Produktion von Massenwaren und Chargen von Spezialprodukten bislang in großen zentral angeordneten Produktionsanlagen, um durch die Bündelung Skaleneffekte zu realisieren. Allerdings wird die strategische Planung durch das dynamische Marktverhalten zunehmend erschwert. Aufgrund von steigender Produktdifferenzierung, verkürzten Produktlebenszyklen und zunehmenden Volatilitäten der Märkte wird daher zurzeit eine Flexibilisierung der Produktion gefordert. Im aktuellen Forschungsfokus stehen deshalb Konzepte zur Wandlungs-befähigung der Produktion. Vor diesem Hintergrund werden z. Zt. kleinskalige, mobile und modular aufgebaute dezentrale Produktionsanlagen in Rohstoff- und Kundennähe diskutiert, welche beispielsweise in 20-Fuß-Standardcontainern zum Einsatzort transportiert werden können und im Gegensatz zu den gegenwärtig verbreiteten großskaligen zentralen Anlagen stehen.

Im Rahmen kürzlich abgeschlossener Forschungsprojekte zur Modularisierung, wie ‚COPIRIDE‘<sup>1</sup> und ‚F<sup>3</sup> Factory‘<sup>2</sup>, wurden bereits entsprechende Produktionsmodule entwickelt und die Machbarkeit einer modularen Produktion nachgewiesen. Mit dem Wandel von zentralen Großanlagen hin zu Netzwerken aus dezentralen Einheiten sind allerdings auch logistische Herausforderungen verbunden, die sich aufgrund der Neuartigkeit der Produktionsform in der Chemie- und Pharmabranche erstmalig stellen. Sie betreffen Planungsprobleme, wie bspw. die Wahl des Chemieparks als Standort für die Anlage, die Positionierung innerhalb von Chemieparks und die Gestaltung der Prozesse für die Ver- und Entsorgung der Produktionsmodule.

## 1.1 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

Der Einsatz von Fertigungsmodulen sichert produzierenden Unternehmen in der Chemiebranche Wettbewerbsvorteile, da die kundennahe Produktion mit Hilfe der Produktionsmodule kurze Reaktionszeiten und damit eine höhere Servicequalität ermöglicht. Des Weiteren profitieren Logistikdienstleister von der zunehmenden Modularisierung, da diese an Bedeutung für den Transport, den Umschlag und der Lagerung von Anlagen und Modulen gewinnen und das Angebotsportfolio im Bereich der Chemieindustrie erweitern können. Anwendungsschwerpunkt dieser kleinskaligen Produktionsmodule sind Spezialchemikalien, welche zumeist kundenspezifisch und in vergleichsweise geringen Mengen produziert werden. Ein Großteil (ca. 96%) der insgesamt 2.900 in der chemischen Industrie tätigen Unternehmen ist nach Angaben des Verbandes der chemischen Industrie (VCI) den KMU zuzuordnen, deren Produktionsschwerpunkt wiederum bei Spezialchemikalien liegt (VCI 2020). Für Großunternehmen war dieser Markt bislang aufgrund der geringen Produktionsvolumina wenig

---

<sup>1</sup> Combining Process Intensification-driven Manufacture of Microstructured Reactors and Process Design regarding to Industrial Dimensions and Environment (Fraunhofer ICT-IMM 2013)

<sup>2</sup> Fast, Flexible and Future (F<sup>3</sup> Factory Consortium 2014)

attraktiv, was sich allerdings durch die zuvor beschriebene Marktentwicklung zunehmend ändert. So prognostiziert der VCI ein jährliches Marktwachstum von 2% für den Bereich der Spezialchemikalien und vergleichsweise 0,05% im Bereich der Basischemikalien im Jahr 2040 (Geres et al. 2019).

Forschungsseitig haben sich bislang vor allem Großunternehmen wie Bayer und Evonik (bspw. im Projekt F<sup>3</sup> Factory) mit der modularen Produktion befasst (F<sup>3</sup> Factory Consortium 2014). Aufgrund dessen ist es das Ziel dieses Forschungsvorhabens die logistischen Aufgaben, die sich mit der Umstellung auf eine dezentrale, kleinformartige Produktion ergeben, strukturiert zu erfassen und ein Vorgehensmodell zu entwickeln. Dies wird es den Unternehmen zukünftig ermöglichen die logistischen Aufgaben zu identifizieren und die Umsetzbarkeit eines solchen Vorhabens abzuschätzen.

## **1.2 Aufbau des Forschungsberichts**

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, die logistischen Charakteristiken wandlungsfähiger Systeme zu ermitteln und strukturiert zu erfassen (vgl. Abbildung 1-1). Dafür wird in Kapitel 2 eine Detailanalyse bereits entwickelter Produktionsmodule durchgeführt, wobei anhand von Recherchen und Experteninterviews die relevanten Einflussgrößen und Anforderungen auf die logistischen Rahmenbedingungen vorgestellt werden (vgl. Arbeitspaket 1). Das darauffolgende Kapitel 3 befasst sich mit der Thematik des zweiten Arbeitspakets, welches mit den vorab gewonnen Informationen und mit Hilfe zusätzlicher Untersuchungen Kriterien für die Standortplanung modularer Anlagen identifizieren soll. Nach der Ermittlung der einflussreichsten Standortkriterien beschäftigt sich das darauffolgende Kapitel 4 mit der detaillierteren Betrachtung der logistischen Rahmenbedingungen an den Produktionsstandorten. Das Ziel dieses dritten Arbeitspakets widmet sich der Positionierung der modularen Produktionsanlagen innerhalb eines Chemieparks unter Berücksichtigung der Produktionsstrukturen und der Logistikanforderungen. Dafür werden die benötigten logistischen und technischen Infrastruktureinrichtungen ermittelt und anschließend die Anordnung der benötigten logistischen Flächen mit Hilfe einer Simulation evaluiert. Aufbauend darauf werden in Kapitel 5 die Prozesse für die Ver- und Entsorgung der Produktionsanlagen mit den dafür benötigten Betriebsmitteln dargelegt und darüber hinaus die Möglichkeiten des Outsourcings logistischer Dienstleistungen geprüft (vgl. Arbeitspaket 4). Abschließend werden in dem letzten Kapitel 6. die erzielten Informationen und Daten aufbereitet und in ein Vorgehensmodell überführt (vgl. Arbeitspaket 5).



**Abbildung 1-1: Arbeitspakete des Forschungsvorhabens (eigene Darstellung)**

## **2 Detailanalyse bereits entwickelter Produktionsmodule**

Das Ziel dieses Arbeitspakets ist es mit Hilfe von Recherchen die Charakteristiken modularer Anlagen zu ermitteln. Dafür wird zu Beginn der allgemeine Aufbau verfahrenstechnischer Anlagen untersucht und anschließend das Ergebnis der Recherche über den Aufbau modularer Anlagen vorgestellt. Durch Experteninterviews und Informationen über bereits existierende Einrichtungen werden die Erkenntnisse über die Ausgangs- und Fertigungserzeugnisse der unterschiedlichen Anwendungsfälle erläutert, um abschließend aus dem generierten Wissen die Einflussgrößen und Anforderungen auf die logistischen Rahmenbedingungen aufzuzeigen. Abschließend werden die Unterscheidungsmerkmale der Logistik für wandlungsfähige Systeme zu der konventionellen Logistik in der chemischen Industrie vorgestellt. Im Hinblick auf den konventionellen Betrieb chemischen Produktionsanlagen erlangen die KMU, mit Hilfe dieses Kapitels einen Überblick bzgl. der Charakteristiken der modularen Produktionsanlagen sowie der angeschlossenen Logistik.

### **2.1 Bestandteile einer verfahrenstechnischen Anlage**

Mit dem Beginn dieses Forschungsvorhabens finden Recherchen über den allgemeinen Aufbau verfahrenstechnischer Anlagen statt. Diese haben das Ziel, ein einheitliches Verständnis bzgl. der Charakteristiken modularer Anlagen zu schaffen. Anhand wandlungsfähiger Systeme sollen Rohstoffe und Edukte mithilfe chemischer Verfahren in Fertigerzeugnisse veredelt werden. Die dafür zum Einsatz kommenden verfahrenstechnischen Anlagen setzen sich aus den Haupt- und den Neben- bzw. Peripherieanlagen zusammen. Die Hauptanlagen sind dabei für die Durchführung der Verfahren zur Erzeugung des gewünschten Produkts zuständig, während Neben- bzw. Peripherieanlagen verschiedenen Hilfsverfahren, wie die Energieversorgung, übernehmen. Darüber hinaus zählt die für die durchzuführenden logistischen Prozesse benötigte Infrastruktur zu den Neben- bzw. Peripherieanlagen. Diese umfasst neben den Lagerstätten ebenfalls die Verkehrswege für die An- und Abfahrt der für die Produktion benötigten Roh- und Hilfsstoffe. Zusätzlich zu den genannten Neben- bzw. Peripherieanlagen gibt es nach Sattler und Kasper (2000) eine Vielzahl von weiteren Elementen, auf welche jedoch nicht weiter eingegangen wird.

## 2.2 Modellierungskonzept verfahrenstechnischer Anlagen

Aufbauend auf den gesammelten Informationen über den allgemeinen Aufbau von verfahrenstechnischen Anlagen wird nachfolgend das Modellierungskonzept verfahrenstechnischer Anlagen beschrieben. Eine physikalische Modulierung von Prozessanlagen stellt einen Ansatz dar, um einen kontinuierlichen und dezentralisierten Produktionsprozess durchführen zu können. Diese eignen sich besonders für Mehrprodukt- und Mehrzweck-Anlagen, bei denen eine Neukonfiguration zwischen den einzelnen Produktionsprozessen häufig vorkommt. Die Grundstruktur einer modularen Anlage kann dabei nach der VDI-Richtlinie 2776 in vier verschiedene Strukturebenen unterteilt werden (vgl. Abbildung 2-1).

Die oberste und damit erste Ebene ist die modulare Anlage (MP – Modular Plant), welche sich aus mindestens einer modularen Prozesseinheit (PEA – Process Equipment Assembly) zusammensetzt. Diese PEAs (zweite Ebene) bestehen wiederum aus mindestens einer modularen Funktionseinheit (FEA – Functional Equipment Assembly), welche einen prozesstechnischen Schritt, wie beispielsweise die Destillation, auf Teilanlagenebene abdecken. Auf Grund von klar definierten physischen Schnittstellen können die PEAs während des Betriebs der Anlage ausgetauscht werden und ermöglichen damit die flexible Umrüstung von Mehrproduktanlagen. Technische und geometrische Richtlinien gewährleisten zusätzlich die Kompatibilität untereinander und der Austausch einzelner FEAs ermöglicht den Produktionsprozess einer PEA zu konfigurieren. (Temporärer ProcessNet-Arbeitskreis "Modulare Anlagen" 2017; VDI-Richtlinie 2776)

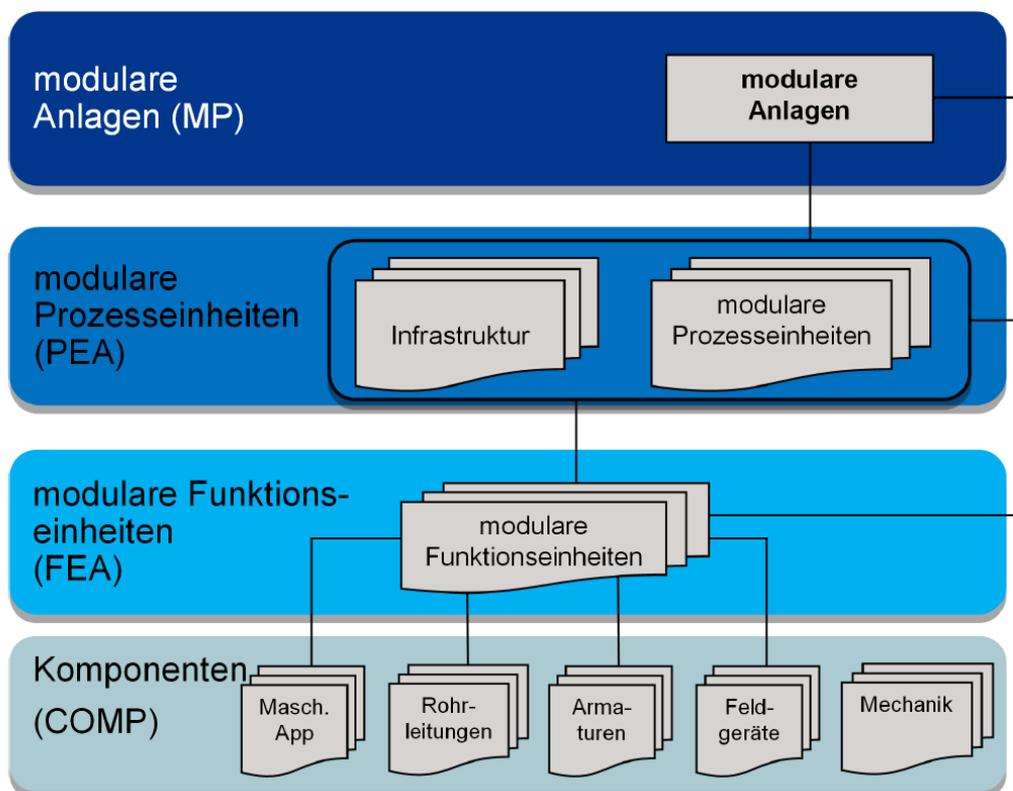


Abbildung 2-1: Struktur einer modularen Anlage (in Anl. an: VDI-Richtlinie 2776)

Die FEAs (dritte Ebene) bestehen im verfahrenstechnischen Kern aus Apparaten und Maschinen, die mittels weiterer Komponenten komplementiert werden. Dadurch können verfahrenstechnische Funktionen wie beispielsweise Fördern, Rühren, Heizen oder Kühlen ausgeführt werden. Als ein Beispiel für diese Hierarchieebene kann eine Pumpenbaugruppe genannt werden. In der Gesamtheit stellt diese Baugruppe ein eigenes PEA dar, während die einzelnen Bestandteile in Form der Pumpe, der Sensorik, der Aktorik und der Nahverrohrung Bestandteile einer FEA sind. (VDI-Richtlinie 2776; Temporärer ProcessNet-Arbeitskreis "Modulare Anlagen" 2017)

Die unterste Stufe des Konzepts der Anlagenstruktur wird durch die Komponenten (COMP – Components) dargestellt. Diese sind aus der Sicht der Aufbaustruktur einer MP die kleinste Einheit. Die Auswahl der einzelnen COMP bestimmt dabei die Funktion, Leistung und Ausführung der betrachteten Anlage. Sind dennoch größere Betriebsbereiche innerhalb dieser Stufe abzudecken, können diese über gezielt eingesetzte Baureihen abgedeckt werden. Beispielsweise kann für die Automatisierungstechnik in diesem Fall ein Schaltschrank genannt werden. (VDI-Richtlinie 2776; Temporärer ProcessNet-Arbeitskreis "Modulare Anlagen" 2017)

Aufbauend auf den in diesem Kapitel gewonnen Erkenntnissen rund um das Modellierungskonzept verfahrenstechnischer Anlagen, kommt es nachfolgend zu einer Untersuchung verschiedener Produktionsanlagen. Damit diese transparent und nachvollziehbar verglichen werden können, wird vorab ein Kriterienkatalog entwickelt. Dieser umfasst fünf Rubriken, wobei die erste Kategorie die „allgemeinen Informationen“ beschreibt. Diese beinhaltet neben den Anwendungsgebieten ebenfalls die Motivation für den Bau und die Produktionsumgebung. In dem zweiten Kriterium, „Genereller Aufbau“ werden Informationen wie Abmessungen, Strukturen, Modularitäten oder der Grad der Standardisierung gesammelt. Die dritte Kategorie „Betrieb“ beschreibt die hierfür notwendigen Daten. Diese umfassen neben der Fertigungsstrategie (Batchbetrieb oder kontinuierlicher Betrieb) ebenfalls die Anwendungsmöglichkeiten, ob Plug & Produce unterstützt wird oder den Automatisierungsgrad. Anhand des vorletzten Kriteriums „Anbindung“ werden die modularen Anlagen hinsichtlich der Möglichkeiten der Einbindung in bestehende Systeme (beispielsweise in die Logistik oder Produktion), der Option des autarken Betriebs oder der Prozessleitsysteme vergleichbar gemacht. In der fünften und letzten Kategorie („Logistik“) werden alle Details rund um die logistischen Rahmenbedingungen der Anlagen aufgelistet. Diese umfassen neben den jeweiligen benötigten Versorgungseinrichtungen ebenfalls die Entsorgung, die Lagerung und die Möglichkeit die Anlage mobil an verschiedenen Orten (Mobilität) betreiben zu können. Die unterschiedlichen Kriterienkataloge zu den modularen Produktionsanlagen sind nach der Einzelvorstellung in Kapitel 2.6 aufgeführt.

### **2.3 Modulare Produktionsanlage: „F<sup>3</sup> Factory“**

Im Jahr 2009 wurde das Forschungsprojekt F<sup>3</sup> Factory Projekt (Flexible, Fast and Future), von 26 Partnern aus 9 europäischen Ländern, durchgeführt. Hierbei wurde das Ziel verfolgt die europäische Chemieindustrie durch effizientere, umweltfreundlichere, flexiblere und kosteneffizientere Produktionsmethoden zu stärken. Vor diesem Hintergrund lag bei dem Projekt der Fokus auf der Entwicklung und Realisierung modularer und kontinuierlich betriebener

verfahrenstechnischer Produktionsanlagen. Dabei sollte eine neuartige Anlage konzipiert werden, welche den Produktionsprozess in einer standardisierten und containerbasierten Fertigungsumgebung durchführt. Der Produktionsprozess kann dabei in Abhängigkeit der Konfiguration der Anlage kontinuierlich oder chargenweise in einem kleinen bis mittleren Maßstab durchgeführt werden. Die in diesem Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse zeigen, dass im Gegensatz zu den traditionellen kontinuierlichen und dem chargenweisen Betrieb, die Produktion anhand der F<sup>3</sup> Factory nicht nur wirtschaftlicher, sondern zusätzlich flexibler, robuster und leichter an die wechselnden Prozessanforderungen anpassbar ist. (F<sup>3</sup> Factory Consortium 2014)



**Abbildung 2-2: Prozesscontainer des Projekts F<sup>3</sup> Factory (CHEMManager 2020)**

Der in diesem Forschungsvorhaben konzipierte Prozesscontainer ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Zum Einsatz kommt dieser beispielsweise für die Produktion von pharmazeutischen Zwischenprodukten, Acrylsäure, Hydroformylierung oder zur Herstellung des Nachgerbstoffs X-Biomer. Die Abmessungen der Anlage belaufen sich auf die Grundmaße eines 20'-Containers. Aufgrund des fehlenden Witterungsschutzes ist allerdings nur ein Betrieb in geschlossenen Räumlichkeiten möglich. Der Prozesscontainer ist während des gesamten Betriebs von allen Seiten zugänglich (s. Abbildung 2-2) und besitzt für den Fall einer Havarie eine Auffangwanne. Die Aufbaustruktur der Einrichtung orientiert sich dabei an der vorab beschriebenen generellen Struktur für modulare Anlagen, entsprechend der VDI-Richtlinie 2776 (vgl. Kapitel 2.1). Somit stellt das Grundgerüst der Anlage ein Container dar, welcher mit einzelnen Modulen (PEAs) und Prozesseinheiten bestückt ist. Die verwendeten Module sind dabei standardisiert und haben ein Grundmaß von  $57\text{ cm} \times 57\text{ cm} \times 57\text{ cm}$  (H  $\times$  B  $\times$  T). Die Recherchen über den Betrieb der entwickelten Anlage ergeben, dass diese sowohl für einen kontinuierlichen als auch für einen Batchbetrieb geeignet ist. Eine Skalierbarkeit ist möglich, allerdings setzt der Betrieb entsprechende Anschlussmöglichkeiten voraus. An einer eigens hierfür entwickelten Docking Station können die modularen Anlagen ver- und entsorgt werden. Ist ein Anschluss an einer Docking Station nicht möglich, kann die Ver- und Entsorgung der Anlage auch mithilfe von IBC-Containern oder ähnlichem erfolgen. Des Weiteren ermöglicht die Containerbauweise der Anlage eine gewisse Mobilität, sodass eine Vielzahl von unterschiedlichen Produktionsstandorten ausgewählt werden können. (F<sup>3</sup> Factory Consortium 2014)

## 2.4 Modulare Produktionsanlage: „EcoTrainer“

Der EcoTrainer der Firma Evonik entstand auf Grundlage des EU-Forschungsprojekts MAPSYN („Microwave, Ultrasonic and Plasma assisted Syntheses). Das Ziel dieses Projekts ist es innovative energieeffiziente chemische Reaktionsprozesse mit Hilfe von Mikrowellen-, Ultraschall und Plasmasystemen zur Markttauglichkeit zu überführen (MAPSYN 2016). In dem speziellen Fall des EcoTrainers wurde untersucht, inwieweit sich mit Hilfe des überschüssigen Stroms von Windkraftanlagen Stickstoff aus der Luft in Düngemittel umwandeln lässt. Die modulare Anlage soll dabei den Stickstoff in Form von  $\text{NO}_2$  aus der Luft gewinnen. Eine schematische Darstellung des Einsatzgebietes des EcoTrainers ist in Abbildung 2-3 zu sehen. (Evonik 2020)

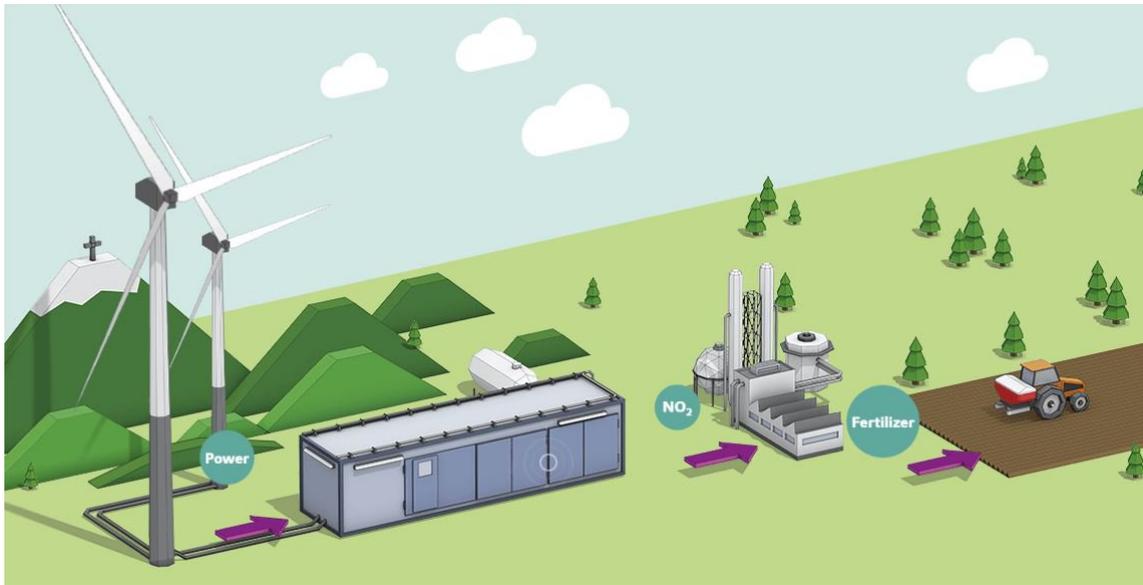
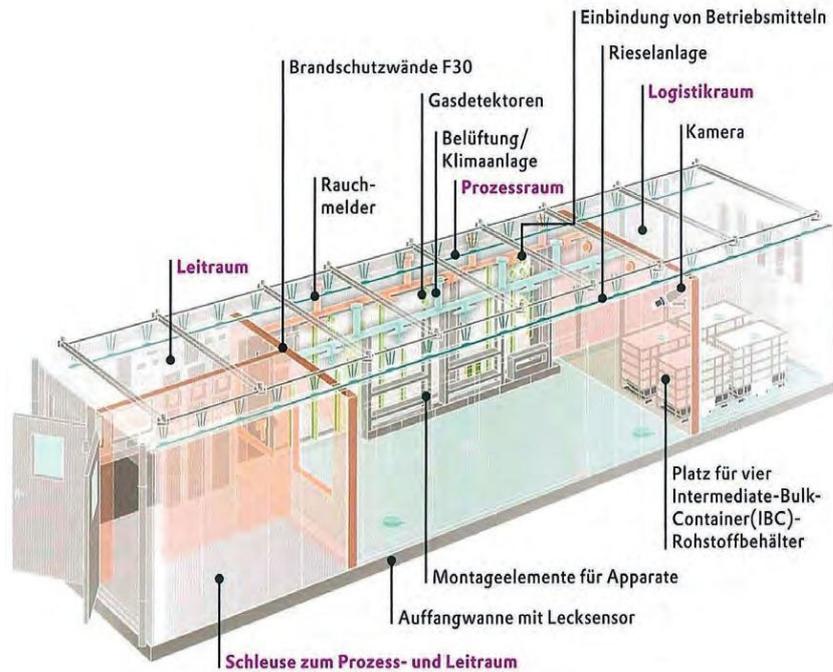


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung des Einsatzgebietes eines EcoTrainers (Evonik 2020)

Neben der bereits erwähnten Anwendung des EcoTrainers zur Herstellung von Stickstoffoxid aus dem Stromüberschuss von Windkraftanlagen, kommt dieser ebenfalls zur Entwicklung von nanopartikulären Katalysatoren auf Polymerbasis zum Einsatz. Anders als die F<sup>3</sup> Factory ist der 40'-Container dieser modularen Anlage geschlossen und hat somit keine Einschränkungen, welche den Aufstellort betreffen. Der Container besitzt lediglich zwei Zugänge an der Frontseite, von denen einer in den Leitraum und einer in den Logistikkaum führt. Im Hinblick auf die Witterungsbeständigkeit beinhaltet der Prozesscontainer Lüftungen und eine Klimaanlage, welche für die optimalen Produktionsbedingungen sorgen. Neben den Räumlichkeiten für die Logistik und den Steuerungseinrichtungen verfügt die Anlage ebenfalls über einen Prozessraum, welcher durch Schleusen und Brandschutzwände von den anderen Zonen getrennt ist. Eine schematische Darstellung dieses Prozesscontainers ist in Abbildung 2-4 zu sehen. (Evonik 2020)



**Abbildung 2-4: Schematischer Aufbau des EcoTrainer (Evonik 2020)**

Gegenüber der standardisierten Grundstruktur des EcoTrainers in Form eines 40'-Containers, sind die Module nur teilweise vereinheitlicht und damit nicht standardisiert. Des Weiteren ist der bevorzugte Betrieb der Anlage ein kontinuierlicher Betrieb, welcher jedoch nicht verpflichtend ist. Die Steigerung der Ausbringungsmenge kann in Form einer Parallelschaltung mehrerer Module realisiert werden, wobei die Container platzsparend aufeinandergestapelt werden können. Entgegen des Betriebs der anderen betrachteten Einrichtungen ist der Betrieb des EcoTrainer nicht vollständig automatisiert. Außerdem besitzt die modulare Anlage neben externen Versorgungsschnittstellen rund um die Prozessstoffe Wasser, Gas und Strom ebenfalls Zertifizierungen im Hinblick auf den Explosions- und Feuerschutz (Feuerwiderstandsklasse F30). Anhand dieser Zertifizierungen wird ein autarker Betrieb an einem variablen Ort ermöglicht. Die Entsorgung von Abfallstoffen erfolgt bei dieser Variante über Rohrleitungen in entsprechende Gebinde, wohingegen die Versorgung der Anlage über die bereits vorgestellten Schnittstellen erfolgt. Beachtet werden muss jedoch, dass die Lagerkapazität von Gebinden auf eine Anzahl von maximal 4 IBC-Containern beschränkt ist. Der für den Betrieb der Anlage benötigte Strom wird durch Generatoren oder Windkraftträder erzeugt, was einen autarken Betrieb ermöglicht. (Evonik 2020)

## 2.5 Modulare Produktionsanlage „Smart Factory“

Dynamische Marktveränderungen, zunehmende Konkurrenz aus Asien und steigende Kundenanforderungen im Hinblick auf die schnelle und kostengünstige Herstellung von geringen Produktionsmengen waren die Treiber für die Entwicklung der „Smart Factory“ der Merck KGaA. Mit Hilfe dieser soll neben der Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit ebenfalls eine kostengünstige und flexible Produktion von organischen und anorganischen Feinprodukten für die Zukunft sichergestellt werden. Der Aufbau der Anlage unterscheidet sich dabei deutlich von den bisher vorgestellten Systemen. Die Grundstruktur wird entgegen der anderen Varianten nicht von den Maßen eines 20'- oder 40'-Containers bestimmt, sondern von der Kombination der für den Produktionsprozess benötigten Module. Die Maße dieser einzelnen Module sind abhängig von den durchzuführenden Prozessen und der hierfür benötigten Apparate, wobei die erforderlichen Komponenten innerhalb eines Metallgerüsts fixiert sind (s. Abbildung 2-5). Aufgrund dieser konstruktiven Rahmenbedingungen verfügt die Anlage selbst über keinen ausreichenden Witterungsschutz, weshalb entsprechende Voraussetzungen separat zu berücksichtigen sind.



**Abbildung 2-5: Prozessanlage der Smart Factory (Siemens AG 2018)**

Des Weiteren liegt bei diesem System ein kontinuierlicher Produktionsprozess vor, welcher einen sehr hohen Automatisierungsgrad hat. Zusätzlich wird der Grundgedanke des Plug & Produce unterstützt, was durch die Entwicklung eines neuen Prozessleitsystems gewährleistet wird. Die Charakteristiken rund um den konzeptionellen Aufbau der Anlagen ermöglichen jedoch keinen autarken Betrieb, was eine Integration in bestehende Strukturen auf einem Betriebsgelände erforderlich macht. Dies bietet gleichzeitig den Vorteil die an dem Standort vorhandenen logistischen Infrastrukturen für die Ver- und Entsorgung der Anlage mit allen benötigten Betriebsmitteln verwenden zu können.

## 2.6 Vergleich modularer Produktionseinheiten

Tabelle 2-1: Kriterienkatalog der „F<sup>3</sup>-Factory“

Kriterien	Unternehmen: Bayer
<b>Allgemeine Informationen</b>	
Projektname	F <sup>3</sup> -Factory
Anwendung	Pharmazeutische Zwischenprodukte, Hydroformylierung, Acrylsäure, X-Biomer
Motivation	Forschungsprojekt
Umgebung	Produktion nur mit Witterungsschutz möglich (Halle)
<b>Generelle Form/ Aufbau</b>	
Maße	20' - Container
Aufbau	<b>Von allen Seiten zugänglich, Auffangwanne</b>
Generelle Struktur	MP (Container), PEA (Module), FEA, Serviceeinheiten, Backbone – Struktur nötig (Übernimmt alle prozessübergreifenden Aufgaben z.B. Wetterschutz, Lüftung, Energieversorgung), Halle oder zusätzliche modulare Einheit
Grad der Standardisierung	Standardisierte Module (57x57x57 cm oder Vielfaches)
Modularität	Ja
<b>Betrieb</b>	
Fertigungsstrategie	Kombination von kontinuierlichem Betrieb und Batchbetrieb
Universalität	Produktion verschiedener Produkte möglich
Skalierbarkeit – Numbering-up	Anschluss von zwei Container an einer Docking Station möglich
Plug & Produce	Ja
Wartung	Austausch der PEAs: circa 1h
Automatisierungsgrad	hoch
Zertifizierung	Ex-Schutz
<b>Anbindung</b>	
Einbettung in bestehende Systeme (Logistik, Produktion)	Möglich
Autark/ Schnittstelle nötig	Docking Station (Standardisiertes Kupplungssystem)
Prozessleitsystem	Backbone-Struktur übernimmt
<b>Logistik</b>	
Versorgung	Mittels Backbone Struktur via Docking Station (bis zu 20 Medien)
Entsorgung	Mittels Docking Station oder Behälter (IBC)
Lagerung	-
Mobilität	Ja

Tabelle 2-2: Kriterienkatalog des „EcoTrainers“

Kriterien	Unternehmen: Evonik
<b>Allgemeine Informationen</b>	
Projektname	EcoTrainer
Anwendung	Herstellung von Stickstoffdioxid aus Stromüberschuss (MAPSYN), Entwicklung von nanopartikulären Katalysatoren auf Polymerbasis (Polycat)
Motivation	Forschungsprojekt
Umgebung	Keine Einschränkungen
<b>Generelle Form/ Aufbau</b>	
Maße	40' - Container
Aufbau	2 Zugänge bei der Produktion an der Frontseite Leitraum & Logistikkaum, Deckenkonstruktion beinhaltet Lüftung und Klimaanlage, Auffangwanne
Generelle Struktur	Aufteilung in: Leitraum, Schleuse, Prozessraum, Logistikkaum
Grad der Standardisierung	Apparaturen z. T. standardisiert, Standardisierte Grundinfrastruktur (Container, Aufteilung)
Modularität	z. T., Modularisierung von vorkonfigurierten Prozessleitsystemen
<b>Betrieb</b>	
Fertigungsstrategie	(Vorzugsweise) Kontinuierliche Produktion
Universalität	Produktion verschiedener Produkte möglich
Skalierbarkeit – Numbering-up	Parallelschaltung mehrerer EcoTrainer (Stapelaufbau möglich)
Plug & Produce	/
Wartung	/
Automatisierungsgrad	Nicht voll automatisierbar
Zertifizierung	Feuerwiderstandsklasse F30, Ex-Schutz, Wasserhaushalt
<b>Anbindung</b>	
Einbettung in bestehende Systeme (Logistik, Produktion)	
Autark/ Schnittstelle nötig	Autark, Schnittstelle für Anschluss an externes Versorgungssystem vorhanden
Prozessleitsystem	Im Leitraum vorhanden, Anschluss an externe Leitstelle möglich
<b>Logistik</b>	
Versorgung	Eigene Stromversorgung, ansonsten über Schnittstellen
Entsorgung	Mittels Rohrleitungen
Lagerung	Logistikkaum bietet Kapazität für 4 IBC
Mobilität	Ja

Tabelle 2-3: Kriterienkatalog der „Smart Factory“

Kriterien	Unternehmen: Merck
<b>Allgemeine Informationen</b>	
Projektname	Smart Factory
Anwendung	Organische und anorganische Feinprodukte, Filteranlagen
Motivation	Anpassung an Marktbedingungen
Umgebung	Vorzugsweise Anwendung in Hallen
<b>Generelle Form/ Aufbau</b>	
Maße	Standardisierte einzelne Module (160 x 0,9 x 100cm)
Aufbau	Zugang von allen Seiten möglich
Generelle Struktur	Verbindung versch. modularer Produktionseinheiten (z. B. Dosiermodul, Extraktionsmodul), Anordnung der Module über- und nebeneinander
Grad der Standardisierung	Standardisierte Gestaltung der Produktionsmodule
Modularität	Nur Produktion, Standardprozesse wie Abfüllung nicht modular
<b>Betrieb</b>	
Fertigungsstrategie	Kontinuierliche Produktion
Universalität	Produktion verschiedener Produkte möglich
Skalierbarkeit – Numbering-up (seriell/ parallel)	Erweiterung möglich
Plug & Produce	Ja
Wartung	/
Automatisierungsgrad	Hoch
Zertifizierung	Ex-Schutz
<b>Anbindung</b>	
Einbettung in bestehende Systeme (Logistik, Produktion)	Einbettung in bestehende Systeme zur Produktionsver- und -entsorgung und der Logistik
Autark/ Schnittstelle nötig	Kein autarker Betrieb
Prozessleitsystem	An Prozessleitsystem angeschlossen
<b>Logistik</b>	
Versorgung	Versorgung über Rohrleitungen oder IBC-Container Befüllung der Werkseigenen Tanks über die Schiene
Entsorgung	Mittels Rohrleitung, IBC
Lagerung	Nutzung bestehender, konventioneller Lagerflächen
Mobilität	Ja, allerdings praktisch nicht geplant

## 2.7 Anforderungen der Chemieindustrie an die Logistik

Nachdem vorab der Aufbau und die Charakteristiken modularer Anlagen vorgestellt worden sind, werden im nächsten Schritt Rückschlüsse bzgl. der logistischen Rahmenbedingungen gezogen. Diese bilden die Grundlage, um die allgemeinen Anforderungen an die Logistik für den Betrieb modularer Anlagen zu ermitteln zu können.

Anhand der durchgeführten Untersuchungen der Prototypen zeigt sich, dass das Handling chemischer Güter hohe Anforderungen an die Logistik stellt. Ein wesentliches Merkmal und damit Einflussfaktor auf die Logistik ist die Charakteristik der Chemieindustrie, bei welcher aus einer geringen Anzahl von Rohstoffen eine Vielzahl von unterschiedlichen Produkten hergestellt wird. Dem gegenüber stehen Branchen, wie beispielsweise die Automobilindustrie, welche viele Rohstoffe zu nur einem Produkt verarbeiten. Resultierend aus den Ergebnissen der Evaluierung der Anlagen und Literaturrecherchen können die Anforderungen der Chemieindustrie in produktionslogistische und sicherheitsrelevante Anforderungen unterteilt werden (Krupp 2013). Die produktionslogistischen Anforderungen teilen sich wiederum in stoffliche Eigenschaften und Eigenschaften, die von dem ausgewählten Produktionssystem abhängen, auf. Während die Eigenschaften des Produktionssystems explizit vom Produktionsprozess und den damit verbundenen Produktionsstrategien der modularen Anlage abhängen, haben die stofflichen Eigenschaften noch keinen direkten Bezug zur modularen Produktion. Aus diesen resultieren jedoch grundlegende Anforderungen an die Logistik, da sie unabhängig von der Produktionsart auftreten. Die sicherheitsrelevanten Anforderungen hängen unmittelbar mit den Bestimmungen zum Gefahrgut zusammen. Nachfolgend sind Anforderungen der chemischen Industrie an die Logistik aufgeführt. (Krupp 2013)

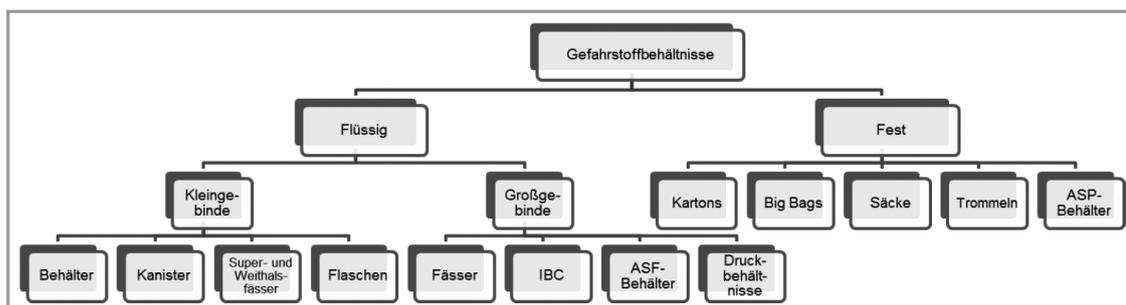
- Produktionslogistische Anforderungen
  - Stoffliche Eigenschaften
    - Form
    - Mengeneinheit
    - Haltbarkeit
    - Qualität
    - Gefährlichkeit
  - Eigenschaften Produktionssystem
    - Strategie für den Betrieb modularer Anlagen
    - Planbarkeit
    - Materialumsetzung
- Sicherheitsrelevante Anforderungen
  - Gesetzliche Regelungen
    - Transport
    - Lagerung
    - Tankreinigung
    - Bahnbetreiber
  - Chemiedistributoren

Die herausgestellten Anforderungen an die Logistik lassen Rückschlüsse auf die logistischen Rahmenbedingungen zu, welche nachfolgend erläutert werden.

**Form:**

Die Form und Ausprägung chemischer Produkte hat einen großen Einfluss auf die angeschlossenen logistischen Prozesse. Chemischen Erzeugnisse können in geformtes und ungeformtes Material unterschieden werden. Während geformtes Material überwiegend in der Nähe des Konsumenten in Form von Endprodukten und Stückgut zu beobachten ist (bspw. Seife oder Plastik), treten Rohstoffe und chemische Zwischenprodukte häufig als Flüssigkeiten, Schüttgüter, Gase oder Mischformen wie Pasten, Suspensionen oder Aerosolen auf. Ungeformtes Material weist wiederum noch speziellere Anforderungen an die logistische Handhabung als geformtes Material auf. Als Beispiel können hierbei gasförmige oder flüssige Güter genannt werden, welche für die TUL-Prozesse (Transport, Umschlag, Lagerung) in speziellen Behältern aufbewahrt werden müssen, um sowohl die Umwelt als auch die Qualität des Gases zu schützen bzw. sicherzustellen.

Die Untersuchung der Anwendungsfälle modularer Anlagen in der Produktion chemischer Güter ergibt, dass bei einem autarken Betrieb der Anlage die Bereitstellung der Rohstoffe fast ausschließlich anhand von verschiedenen Gebinden erfolgt. Die Art der Gebinde hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab, wie beispielsweise der Menge, der Gefahrgutklassen, dem Aggregatzustand oder der Viskosität des Erzeugnisses. In der Abbildung 2-6 ist eine Vielzahl verschiedener Gebindearten dargestellt, welche jeweils unterschiedliche Anforderungen gerecht werden. (Loos 1997; Krupp 2013)



**Abbildung 2-6: Systematik der Gebindearten (in Anl. an: Kaczmarek et al. (2015))**

Die in der Chemieindustrie zum Einsatz kommenden Gefahrstoffbehältnisse werden in verschiedene Typen unterteilt, welche jeweils den vielfältigen Anforderungen der unterschiedlichen Aggregatzustände des Werkstoffes gerecht werden. In dieser Abbildung sind die aufgeführten Behältnisse deshalb in Gebinde unterteilt, welche flüssige bzw. feste Medien aufbewahren können. Gebinde für flüssige Rohstoffe werden wiederum in Behälter bezüglich des Fassungsvermögens klassifiziert. Gebinde für kleiner Mengen umfassen Behälter, Kanister, Weithalsfässer oder Flaschen, welche jeweils in verschiedenen Ausprägungen existieren, wohingegen Großgebinde Fässer, IBC, ASF-Behälter oder Druckbehältnisse umfassen, die ebenfalls unterschiedliche Ausprägungen enthalten. Besonders Fässer und Intermediat Bulk Container (IBC) werden häufig in der Chemieindustrie für den Transport und die Lagerung von Rohstoffen aufgrund des großen Fassungsvermögens und der sehr guten Eigenschaften rund um das Handling verwendet. Im Unterschied zu flüssigen Erzeugnissen werden Behälter für Stoffe in fester Form nicht nach ihrem Fassungsvermögen, sondern nach ihrer Bauart unterschieden.

Diese Kategorie umfasst Gebinde rund um Kartons, Big Bags, Säcken, Trommeln oder ASP-Behältern.

**Mengeneinheiten:**

In der chemischen Industrie stellt die Mengeneinheit ein weiteres wichtiges Kriterium in Bezug auf die Logistik dar. Diese beschäftigt sich mit der Verrechnung von Leistungen und Gütern. Da in diesem Industriezweig eine Vielzahl von verschiedenen Gütern zum Einsatz kommt, ist eine spezielle Definition vorab von besonderer Bedeutung. Während die Menge an Stückgut anhand der Stückzahl definiert wird, kann die Menge an flüssigen Materialien hingegen nach dem Gewicht oder der Volumeneinheit bestimmt werden. In der Chemieindustrie gibt es jedoch auch flüssige bzw. gasförmige Güter, bei denen die Angabe des Gewichts oder des Volumens nicht ausreicht, da das Gewicht wiederum temperaturabhängig ist. Hinzu kommt, dass viele chemische Güter ebenfalls nach ihrer Güte beurteilt werden, wie beispielsweise anhand der Konzentration, des Brennwertes oder des Wirkstoffgehalts. Da die Qualität und Reinheit der Produkte besonders in der Fein- und Spezialchemie von besonderer Bedeutung sind, ist dies im Hinblick auf die modulare Produktion besonders zu berücksichtigen. (Loos 1997)

**Haltbarkeit/Lagerfähigkeit:**

Das Kriterium der Haltbarkeit beziehungsweise der damit verbundenen begrenzten Lagerfähigkeit von Produkten und Rohstoffen ist ein weiteres wichtiges Merkmal. So kann eine kleinste Verunreinigung eines Rohstoffes bereits zu einem mangelhaften Produkt führen und damit eine ganze Charge unbrauchbar machen. Außerdem sind die Endprodukte der Chemieindustrie verderblich, wie zum Beispiel Farben oder Pharmazeutika. Ebenso besitzen zahlreiche Produkte flüchtige Wirkstoffe, welche nur bis zu einem bestimmten Zeitpunkt die von den Herstellern versprochenen spezifischen Eigenschaften besitzen. Des Weiteren können Faktoren wie die Konzentration, der Brennwert oder andere qualitätsbestimmende Faktoren während der Lagerung abnehmen.

Aus den Eigenschaften der Haltbarkeit entstehen somit besondere Anforderungen an die Lagerhaltung und das Handling der chemischen Stoffe, weshalb Produkte mit einem Mindesthaltbarkeitsdatum versehen werden. Zusätzlich kann es notwendig sein, dass je nachdem um welchen Stoff es sich handelt, spezifische Lagerbedingungen eingehalten werden müssen. Diese können über einzuhaltende Raumtemperaturen oder einer bestimmten Luftfeuchtigkeit auch spezielle Lager- und Transportbehälter sein. Die Aufgabe der Logistik ist demnach die Weiterverarbeitung der Stoffe und einen störungsfreien Produktionsablauf zu gewährleisten. (Loos 1997)

### **Qualität der Rohstoffe/Produkte:**

Wie bereits bei dem Kriterium der Haltbarkeit von Rohstoffen und Produkten erwähnt spielt die Qualitätserhaltung dieser eine wichtige Rolle, da es auf Grund unterschiedlichster Ursachen zu Schwankungen der Qualität kommt. In natürlichen Rohstoffen wie Kohle, Salzen oder Erdöl, die besonders in der Grundstoffchemie verarbeitet werden, kommt es naturgemäß zu Schwankungen der Qualität. Jedoch sind nicht ausschließlich Stoffe für die Grundstoffchemie von Qualitätsschwankungen betroffen, sondern ebenfalls die Endprodukte. Sobald bei diesen eine zu großen Abweichung vorliegt, muss geklärt werden, ob durch eine Nachbearbeitung, Homogenisierungsvorgänge oder die Wiederholung einzelner Produktionsschritte die gewünschte Qualität erreicht werden kann. Für die Logistik ergeben sich daraus Anforderungen an die TUL-Prozesse von Rohstoffen und Produkten sowie der Beschaffung der Rohstoffe. Um eine homogene Qualität der Rohstoffe zu gewährleisten, werden die benötigten Rohstoffe i. d. R. von einem oder äußert wenigen Lieferanten bestellt und in großen Mengen bezogen. Dies führt jedoch nicht dazu, dass keine Qualitätsschwankungen auftreten. Aus diesem Grund ist es die Aufgabe der Logistik die Produkte nach Chargen bzw. der Qualität zu lagern. Im Bereich der Pharmazeutika gibt es darüber hinaus gesetzliche Anforderungen in der Chargenverwaltung einzuhalten. (Loos 1997)

### **Gefährlichkeit:**

In der Chemieindustrie sind Gefahrstoffe weit verbreitet, die zum Beispiel leicht entzündlich, ätzend oder explosiv sind. Aus diesem Grund gibt es in diesem Bereich der Logistik viele gesetzliche Regelungen, welche sich in hohen sicherheitsrelevanten Anforderungen widerspiegeln. Aus diesem Grund muss das Personal, welches mit solchen Gütern in Kontakt steht, über eine ausreichende Qualifikation verfügen. Im Folgenden werden rund um das Gefahrenpotential der Güter wichtige Begriffe definiert und auf einige relevante Regelungen eingegangen, um einen Überblick über den Umgang mit gefährlichen Stoffen beziehungsweise Gefahrgut zu geben, welche auch im Bezug zur modularen Produktion eine entscheidende Rolle spielen.

Vorab sind die Begrifflichkeiten Gefahrgut und Gefahrstoff voneinander abzugrenzen. Der Unterschied liegt hierbei nicht in einer erhöhten Gefahr des Stoffs, sondern in der unterschiedlichen Gesetzeslage und der damit verbundenen Bestimmungen. Ein Produkt oder Rohstoff, welcher auf öffentlichen Straßen transportiert wird, ist ein Gefahrgut, wohingegen dieser bei der Lagerung als Gefahrstoff bezeichnet wird. Gefahrgüter sind gemäß § 2 Abs. 1 GGBefG „Stoffe und Gegenstände, von den auf Grund ihrer Natur, ihrer Eigenschaften oder ihres Zustandes im Zusammenhang mit der Beförderung Gefahren für die öffentliche Sicherheit oder Ordnung, insbesondere für die Allgemeinheit, für wichtige Gemeingüter, für Leben und Gesundheit von Menschen und Tieren und andere Sachen ausgehen können“. Von der Beförderung gehen weitaus größere Gefahrenpotentiale für den Menschen und die Umwelt aus als bei der Lagerung an einem Ort. Aus diesem Grund sind die Anforderungen an die Schutzvorkehrungen für Gefahrstoffe und die damit verbundene Lagerung geringer. (VDI 3975)

Besonderer Beachtung gilt der Schnittstelle, an der ein Gefahrgut zu einem Gefahrstoff wird oder umgekehrt. Diese befindet sich zwischen der Beförderung und der Ein-/Auslagerung bzw.

dem Wareneingang und Warenausgang. Eine genauere Definition dieser Schnittstellen wird ebenfalls in dem Gefahrstoffbeförderungsgesetz gegeben. Nach § 2 Abs. 1 GGBefG beinhaltet der Begriff der Beförderung „nicht nur den Vorgang der Ortsveränderung, sondern auch die Übernahme und die Ablieferung des Gutes sowie zeitweilige Aufenthalte im Verlauf der Beförderung, Vorbereitungs- und Abschlusshandlungen (Verpacken und Auspacken der Güter, Be- und Entladen), auch wenn diese Handlungen nicht vom Beförderer ausgeführt werden“. Lagern hingegen ist nach § 3 Abs. 3 GefStoffV das „Aufbewahren zur späteren Verwendung sowie zur Abgabe an andere. Es schließt die Bereitstellung zur Beförderung ein, wenn diese nicht binnen 24 Stunden nach ihrem Beginn oder am darauffolgenden Werktag erfolgt. Ist dieser Werktag ein Sonnabend, so endet die Frist mit Ablauf des nächsten Werktages“. Dies bedeutet, dass die Zwischenlagerung oder ein Umschlag von Gefahrgut für 24 Stunden weiterhin nach den Regeln für Gefahrgut behandelt wird (VDI 3975; Arnold et al. 2008).

Der hier aufgeführte Übergang von Gefahrgut zu einem Gefahrstoff wird dabei von Arnold et al. (2008) in der nachfolgenden Abbildung 2-7 dargestellt.

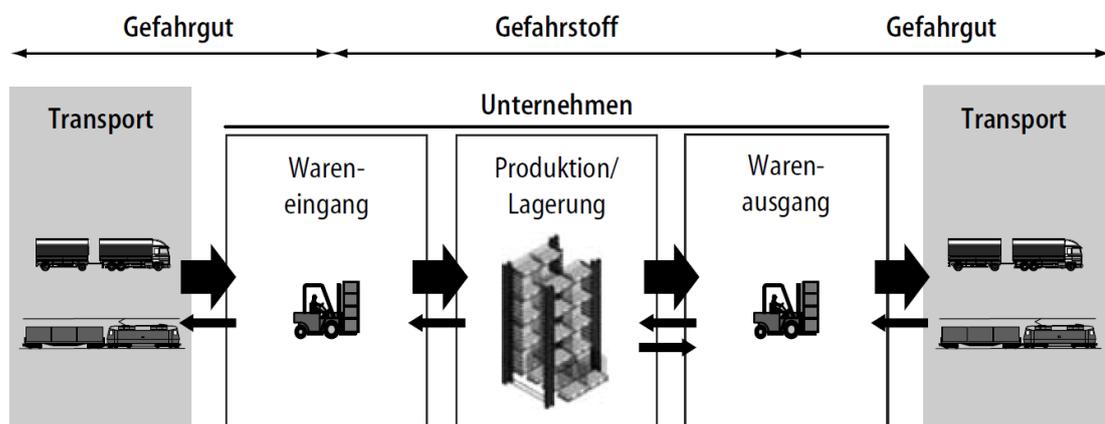


Abbildung 2-7: Übergang zwischen Gefahrgut und Gefahrstoff (Arnold et al. 2008)

Wird ein Gefahrgut transportiert, so gibt es für die Verkehrsträger Straße, Schiene, Binnen- und Seeschiff sowie der Luftfracht internationale Regelungen, welche durch nationale Vorschriften ergänzt werden. Beispielhaft sind in der folgenden Tabelle 2-4 sowohl in Deutschland als auch International geltende Gefahrgutvorschriften aufgelistet.

Tabelle 2-4: Übersicht über nationalen und internationalen Gefahrgutvorschriften (in Anl. an: Bank (2007))

Verkehrsträger	Vorschriften in Deutschland	Internationale Vorschriften
Straße	GGVSEB	ADR
Schiene	GGVSEB	RID
Binnenschiff	GGVSEB	ADN
See	GGVSee	IMDG-Code
Flugzeug	LuftVG/LuftVO	IATA-DGR

Bei der Lagerung von Gefahrstoffen gelten je nach Gefahrstoff andere Anforderungen an die Lagerbedingungen, wobei ebenfalls die Menge an den gelagerten Stoffen die Anforderungen beeinflusst. Auf Grundlage dessen wurde eine Klassifizierung der Gefahrstoffe durchgeführt, welche die unterschiedlichen Anforderungen an die Lager- und Transportbedingungen berücksichtigt (Arnold et al. 2008).

**Tabelle 2-5: Gefahrgutklassen nach ADR (Voth und Hesse 2017)**

<b>Gefahrgutklassen nach ADR</b>		
<b>Klasse</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Beispiel</b>
<b>1</b>	Explosive Stoffe und Gegenstände mit Explosivstoff	Feuerwerkskörper
<b>2</b>	Gase und gasförmige Stoffe	Spraydosen
<b>3</b>	Entzündbare flüssige Stoffe	leichtes Heizöl
<b>4.1</b>	Entzündbare feste Stoffe, selbstzersetzliche Stoffe und desensibilisierte explosive Stoffe	Zündhölzer
<b>4.2</b>	Selbstentzündliche Stoffe	Phosphor
<b>4.3</b>	Stoffe, die in Berührung mit Wasser entzündliche Gase bilden	Calciumcarbid
<b>5.1</b>	Entzündend (oxidierend) wirkende Stoffe	Chlorhaltige Unkrautvernichtungsmittel
<b>5.2</b>	Organische Peroxide	Kunststoffkleber
<b>6.1</b>	Giftige Stoffe	Pestizide
<b>6.2</b>	Ansteckungsgefährliche Stoffe	Krankenhausabfall
<b>7</b>	Radioaktive Stoffe	Teile von Röntgengeräten
<b>8</b>	Ätzende Stoffe	Ätznatron
<b>9</b>	Verschiedene gefährliche Stoffe und Gegenstände	Asbest

Die oben aufgeführte Tabelle 2-5 zeigt die Klassifizierung nach der internationalen Richtlinie ADR (Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road) des Straßengüterverkehrs, wobei die jeweiligen Klassen in Verbindung mit der Menge an gelagerten Stoffen die einzuhaltenden Lagerbedingungen bestimmen. Darüber hinaus gibt es weitere Regelungen, welche das Zusammenlagern von verschiedenen Materialien bestimmen. Beispielsweise können dort Lebensmittel genannt werden, welche nicht in der Nähe von Mitteln für die Schädlingsbekämpfung gelagert werden dürfen. Andere Produkte haben zum Beispiel Restriktionen bezüglich der Lagerungstemperatur, welche ein Zusammenlagern ebenfalls verhindern. Darauf aufbauend hat der Verband der Chemischen Industrie mit dem Verein Deutscher Ingenieure ein Konzept entwickelt, welches neben den verschiedenen Lagerklassen ebenfalls die Möglichkeiten des Zusammenlagerns der verschiedenen Klassen aufschlüsselt. Dabei wurde dieses Konzept mit Erfahrungen und Empfehlungen aus der Praxis erweitert, welche in Abbildung 2-8 dargestellt ist (VDI 3975).

Lagerklasse		10-13	13	12	11	10	8B	8A	7	6.2	6.1D	6.1C	6.1B	6.1A	5.2	5.1C	5.1B	5.1A	4.3	4.2	4.1B	4.1A	3	2B	2A	1	
Explosive Stoffe	1	Red																									
Gase	2A	Yellow	Green	Green	Yellow	Red	Green	Yellow	Red	Yellow	Red	Yellow	Yellow	Yellow													
Aerosole	2B	Green	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Red	Yellow	Red	Green	Green	Green	Green												
Entzündbare flüssige Stoffe	3	Yellow	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	Red	Red	Yellow	Green	Red	Green	Red	Red	Yellow	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Green
Sonstige explosionsgefährliche Stoffe	4.1A	Yellow	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow																			
Entzündbare feste oder desensibilisierte Stoffe	4.1B	Green	Red	Red	Yellow	Green	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green						
Selbstentzündliche Stoffe	4.2	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red	Yellow	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green									
Stoffe, die in Berührung mit Wasser entzündliche Gase bilden	4.3	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red	Yellow	Red	Green	Green	Green	Green	Green										
Stark oxidierend wirkende Stoffe	5.1A	Red	Green	Green	Red																						
Oxidierend wirkende Stoffe	5.1B	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Red	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Yellow	Green										
Ammoniumnitrat und ammoniumnitrat-haltige Stoffe	5.1C	Yellow	Red																								
Organische Peroxide und selbstzersetzliche Stoffe	5.2	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Red																				
Brennbare akut giftige Stoffe	6.1A	Yellow	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	Red	Red	Green																
Nichtbrennbare akut giftige Stoffe	6.1B	Yellow	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	Red	Red	Green																
Brennbare giftige oder chronisch wirkende Stoffe	6.1C	Green	Red	Red	Green																						
Nichtbrennbare giftige oder chronisch wirkende Stoffe	6.1D	Green	Red	Red	Green																						
Ansteckungsgefährliche Stoffe	6.2	Red																									
Radioaktive Stoffe	7	Red	Yellow																								
Brennbare ätzende Stoffe	8A	Green	Red																								
Nichtbrennbare ätzende Stoffe	8B	Green	Red																								
Brennbare Flüssigkeiten, soweit nicht LGK 3	10	Green	Red																								
Brennbare Feststoffe	11	Green	Red																								
Nichtbrennbare Flüssigkeiten	12	Green	Red																								
Nichtbrennbare Feststoffe	13	Green	Red																								
Sonstige brennbare und nichtbrennbare Stoffe	10-13	Green	Red																								

■ Separatlagerung ist erforderlich

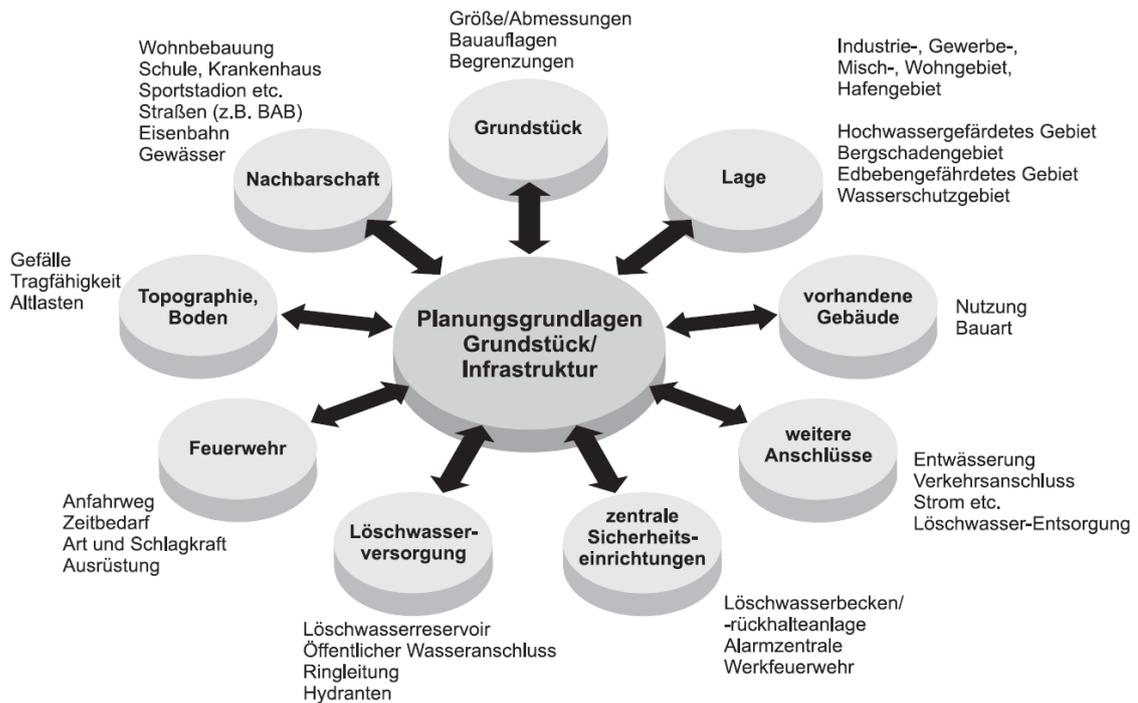
■ Zusammenlagerung ist erlaubt

■ Die Zusammenlagerung ist nur eingeschränkt erlaubt

**Abbildung 2-8: Zusammenlagerungstabelle in Abhängigkeit der Lagerklasse (Bundesministerium des Innern 2021)**

Auf Basis der Lagerklassen kann Abbildung 2-8 entnommen werden, welche Stoffe kombiniert gelagert oder voneinander separiert werden müssen. Eine rote Ausprägung eines Kästchens bedeutet dabei, dass eine separate Lagerung erforderlich ist, wohingegen bei einer grünen Einfärbung die Zusammenlagerung erlaubt ist. Gelbe Einfärbungen, wie beispielsweise die Lagerung von Gasen mit brennbaren Feststoffen, sind nur eingeschränkt möglich und benötigen spezielle Anforderungen (Bundesministerium des Innern 2021; VDI 3975).

Um die Lagerung von Gefahrstoffen bei der modularen Produktion auch bei einem autarken Betrieb durchführen zu können, müssen verschiedene gesetzliche Anforderungen an die Infrastruktureinrichtungen an dem Produktionsort eingehalten werden. Eine Übersicht über die Eignung eines Standortes und der Infrastruktur zur Lagerung von Materialien lässt sich mit Hilfe von Abbildung 2-9 überprüfen. „Neben der Bewertung der Lage, der Größe und der Zugänglichkeit des Grundstücks ist auch die Ermittlung der immissionsschutzrechtlichen Randbedingungen wesentlich (Ausweisung von Schutzzonen; Nachbarschaft, insbesondere der Abstand zu sensiblen Bereichen; Nähe, Art und Schlagkraft der Feuerwehr).“ (VDI 3975).



**Abbildung 2-9: Infrastrukturelle Anforderung für die Lagerung von Gefahrstoffen (VDI 3975)**

Ein letzter wichtiger Aspekt im Rahmen der Gefahrgutregelungen, der für den Einsatz und die Planung von modularen Anlagen ein zu beachtendes Regelwerk darstellt, sind die Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS), insbesondere für die Lagerung in ortsbeweglichen Behältern (TRGS510). Deren Anwendungsbereich bezieht sich auf die Tätigkeiten des Ein- und Auslagerns, des Transportierens innerhalb eines Lagers, sowie des Beseitigens freigesetzter Gefahrstoffe. Als Lager im Sinne der TRGS werden nicht nur Gebäude bezeichnet, sondern auch Container oder Schränke. Ortsbewegliche Behälter sind Verpackungen, Großpackmittel wie IBCs, Tankcontainer, Druckgasbehälter und weitere. Werden in einem Container Behälter mit flüssigen Gefahrstoffen gelagert, so muss dieser über eine Auffangwanne verfügen, deren Volumen mindestens der Menge des größten Gebindes entsprechen muss. Des Weiteren sind Behälter und Verpackungen regelmäßig auf Schäden zu überprüfen, wobei die Beschäftigten eine Schulung über den Umgang mit Gefahrgut erhalten haben müssen. Zusätzlich gelten für spezielle Gefahrstoffe noch strengere Anforderungen, wie zum Beispiel an bauliche Bestimmungen, in Form von Zugangsbeschränkungen oder besonderen Brandschutzmaßnahmen (TRGS510).

#### **Strategien zum Einsatz modularer Anlagen:**

Wie bereits bei den Vorteilen der Produktion chemischer Erzeugnisse mittels der modularen Produktion erläutert, lassen sich mit Hilfe dieser Technologie die Entwicklungszeiten eines Produkts deutlich reduzieren. Des Weiteren bieten modulare Anlagen den Vorteil der kontinuierlichen Fertigung, was eine gleichbleibende Produktqualität sicherstellt. Der größte Nutzen liegt jedoch in der Modularität der Anlage, welche eine größtmögliche Flexibilität in der Fertigung erzeugt. Dies führt dazu, dass viele verschiedene Produkte in kurzer Zeit hergestellt werden können, da sich die Rüstzeiten durch die Austauschbarkeit von Modulen erheblich

reduziert. Zusätzlich ermöglicht das Numbering-up oder -down die Kapazitäten der Nachfrage des Marktes anzupassen und flexibel auf Kundenwünsche zu reagieren (Lier et al. 2015).

Diese Vorteile ermöglichen Chemieunternehmen eine Vielzahl von verschiedenen strategischen Optionen für die Integration einer modularen Produktionsanlage in die vorherrschenden Produktionsstrukturen. Übergeordnet können diese Strategien in langfristige und kurzfristige Strategien unterteilt werden. Aktuell wird der Einsatz modularer Anlagen besonders in der Fein- und Spezialchemie sowie im Bereich von Pharmazeutika als sinnvoll betrachtet (Lier et al. 2015). Die kurzfristigen Strategien bieten bis zu vier verschiedene Einsatzmöglichkeiten. Zum einen kann mit Hilfe einer solchen Anlage auf Nachfrageschwankungen reagiert werden. Dies ermöglicht es auch eine erhöhte Nachfrage zu bedienen, welche durch die Kapazitäten der regulären Anlagen nicht hätten bedient werden können. Mit nachlassender Nachfrage kann die Anlage wieder anderweitig verwendet werden oder falls diese bei einem Dienstleister gemietet wurde, wieder zurückgegeben werden. Ein weiteres Einsatzfeld dieser Anlagentypen kann die Verwendung zur Forschung und Entwicklung neuer Produkte sein. Dabei ist es ebenfalls denkbar, dass eine Kundennachfrage mit einem Produkt bedient wird, welches auf den konventionellen Anlagen nicht hätte hergestellt werden können. Alle diese Einsatzmöglichkeiten beruhen auf dem Grundgedanken, dass die modulare Anlage in die bestehende Infrastruktur eines Werkes bzw. Chemieparks integriert wird. Ein weiterer großer Vorteil dieses Anlagentyps ist jedoch die Mobilität, welche es ermöglicht mit den entsprechenden Sicherheitsvorkehrungen die Produktion an einem beliebigen Ort zu verlegen (Lier et al. 2015).

Aus diesem Grund ist ein Einsatz direkt bei dem Kunden vor Ort möglich. Ein Beispiel bietet dabei die Firma Lanxess, welche einen modularen Produktionscontainer entwickelt hat, der einen Abfallstoff einer Produktion aufbereitet und anschließend wieder der Produktion zuführt. Mit der Aufbereitung bei dem Kunden entfallen in diesem Fall die Entsorgungskosten für das Abfallprodukt und die damit verbundenen Transportkosten. Eine weitere Methode um die Kosten für den Transport so gering wie möglich und die Risiken in Bezug auf diesen Transport zu senken, ist die Platzierung einer Anlage an dem Ort, bei dem die benötigten Rohstoffe gewonnen werden (Lier et al. 2015; Geipel-Kern 2018).

Langfristige Strategien entsprechen dagegen einer Veränderung der konventionellen Produktionsverfahren oder –verbänden von zentralen Netzwerken auf vollständig dezentral organisierte Netzwerke mit modularen Produktionsnetzwerken. Abbildung 2-10 stellt diese Änderung schematisch dar. Eine weitere langfristige Strategie stellt die Errichtung modularer Produktionsanlagen auf Basis der Containerbauweise dar. Dieses Konzept ermöglicht bei einem Produkt mit steigender Nachfrage mehrere Produktionsstränge mit der gleichen Modulanzordnung parallel zu betreiben. Mit einer Veränderung der Nachfrage beispielsweise auf ein anderes Produkt, können die Module ausgetauscht beziehungsweise anders angeordnet werden. Dies ermöglicht dementsprechende eine kurze Reaktionszeit auf Nachfrageschwankungen und die Option der parallelen Produktion von mehreren Produkten (Hachmann et al. 2016).

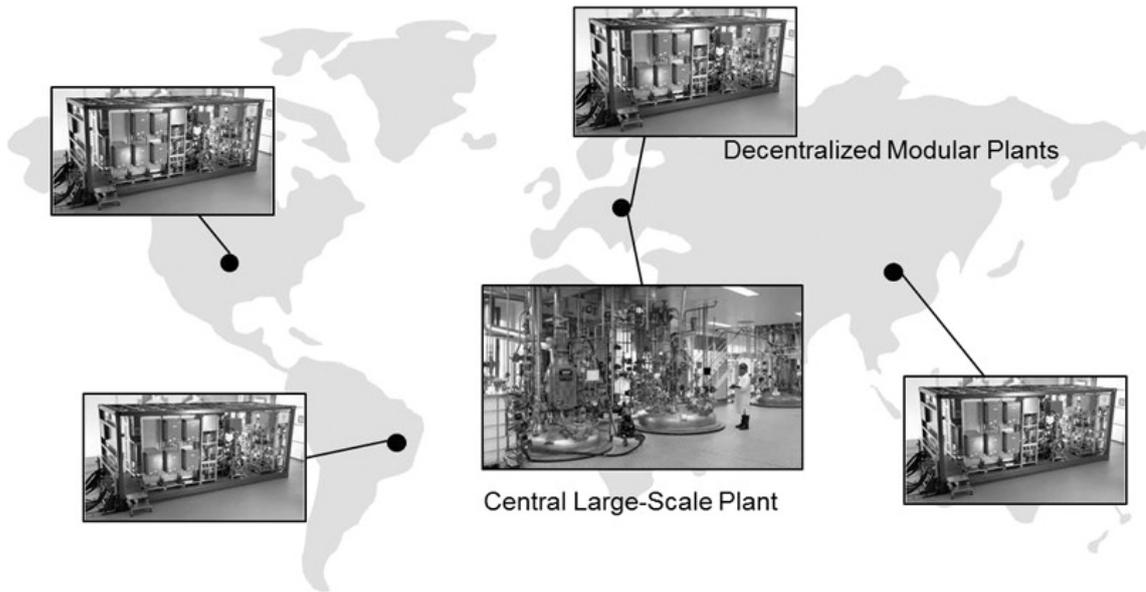


Abbildung 2-10: Schematische Darstellung verschiedener Produktionsnetzwerke (Mothes 2015)

**Planbarkeit von Dienstleistungen und Materialumsetzung:**

Mit Hilfe der Materialumsetzung wird der In- und Output der einzelnen Produktionsprozesse in der Chemieindustrie beschrieben. Dabei wird zwischen zwei grundlegenden Typen unterschieden, welche in der nachfolgenden Abbildung 2-11 aufgeführt sind.

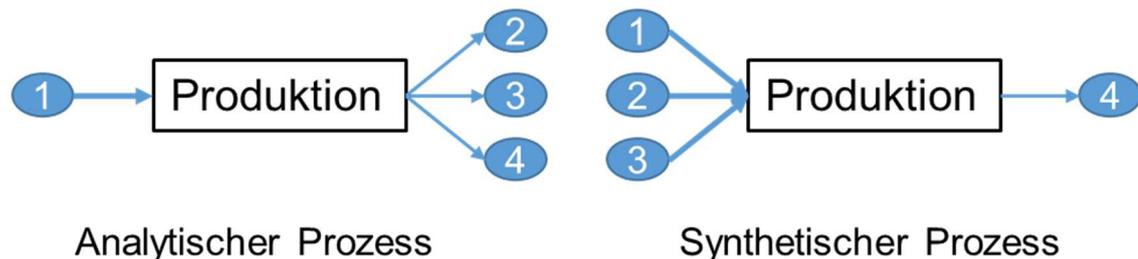


Abbildung 2-11: Materialumsetzung (in Anl. an: Loos (1997))

Ersterer beschreibt die analytische Materialumsetzung, welche auch als Kuppelproduktion bezeichnet wird. Darunter wird ein Prozess verstanden, welcher infolge der natürlichen Reaktion aus einem Edukt mehrere Produkte entstehen lässt. Die dabei anfallenden Nebenprodukte, welche zusätzlich zu dem gewünschten Hauptprodukt entstehen, müssen entweder entsorgt werden oder können im Sinne der Verbundproduktion anderweitig weiterverarbeitet werden. Diese Prozesse sind üblich für Grundchemiestoffe, wie beispielsweise bei dem Cracken von Naphta (Loos 1997).

Zum anderen gibt der zweite Prozess den umgekehrten Ablauf wieder, welcher als synthetische Materialumsetzung bezeichnet wird. Bei diesem wird durch den Einsatz mehrerer Edukte ein Produkt hergestellt. Diese Art des Produktionsprozesses tritt dabei häufig in der Nähe des Konsumenten in der Fein- und Spezialchemie auf. Beispielhaft kann dabei der Mischprozess für die Entwicklung von Farben genannt werden (Loos 1997).

Der Einsatzbereich der modularen Anlagen liegt in den synthetischen Produktionsprozessen und damit in dem Bereich der Fein- und Spezialchemie. Dies führt dazu, dass die Planbarkeit von

logistischen Dienstleistungen hinsichtlich der kleinen Losgrößen und kundenindividuellen Anforderungen an die gewünschten Produkte sehr gering ist. Ein Grund dafür sind die kleinen und sich im zeitlichen Verlauf ständig ändernden Produktionsaufträge, welche ebenfalls veränderte Logistikabläufe benötigen. In der Massenchemie werden dagegen in der Regel die gleichen Prozessabläufe in großer Anzahl bei nicht variierenden Prozesszeiten durchgeführt. Dies führt dazu, dass stets die konstanten Rohstoffmengen zur selben Zeit geliefert werden müssen. Die Planbarkeit von Dienstleistungen in der Massenchemie ist dementsprechend sehr gut, da stets die gleichen Prozesse durchgeführt werden, die Produktionszeiten nicht variieren, die gleichen Rohstoffe verwendet werden und der Zeitplan keinen Veränderungen unterliegt. Deshalb ist es bei einer geringen Planbarkeit und synthetischen Produktionsprozessen wichtig, dass die Bereitstellung der Rohstoffe, deren Qualität, sowie Mischprozesse für die Produktion ohne Störungen ablaufen (Loos 1997).

#### **Sicherheitsrelevante Anforderungen – Zertifizierungen**

Neben den gesetzlichen Anforderungen rund um den Umgang mit Gefahrstoffen beziehungsweise Gefahrgütern gibt es auch Möglichkeiten für Logistikdienstleister, sich durch besonders hohe Qualität und Sicherheitsmaßnahmen von anderen Logistikdienstleistern abzusetzen, indem sie spezielle Normen erfüllen und sich nach diesen zertifizieren lassen. Übliche Zertifizierungen sind beispielsweise ein Qualitäts-, ein Umwelt- oder ein Arbeitssicherheitsmanagementsystem. Diese Zertifizierungen dienen als Nachweis darüber, dass eine Organisation nach festgelegten Standards und Richtlinien arbeitet und versucht die eigenen Prozesse zu optimieren. Die Rechtmäßigkeit der Zertifizierung wird dabei in regelmäßigen Abständen überprüft, wodurch eine gleichbleibend hohe Qualität sichergestellt werden soll. Diese Zertifizierungen dienen nicht nur dem eigenen Unternehmen, sondern vermitteln auch anderen Firmen und besonders Kunden, dass nach hohen Standards gearbeitet wird (TÜV Süd 2018). Eine Norm, welche von der cefic, dem Verband der Europäischen chemischen Industrie, entwickelt wurde ist das Sicherheits- und Qualitätsbewertungssystem SQAS. Diese Zertifizierung ist für Logistikdienstleister und auch Chemiedistributoren entwickelt worden und erfasst die Qualitäts-, die Sicherheits-, die Umwelt- und Nachhaltigkeitsaspekte. Unterschiedliche Bereiche lassen sich nach den SQAS bewerten, wie zum Beispiel Transport-, Eisenbahn-, Tankreinigungs- und Lagerdienstleister, sowie Chemiedistributoren. Je nach Bereich gibt es einen darauf zugeschnittenen Fragenkatalog, der die genannten Erfassungsaspekte detailliert bewertet. Zusätzlich besteht eine öffentliche Datenbank, in der eingesehen werden kann, welche Logistikdienstleister für welche Dienstleistungen zertifiziert wurden (The European Chemical Industry Council 2021).

#### **Rückschlüsse über die Ver- und Entsorgung modularer Anlagen**

Aufbauend auf den herausgestellten Anforderungen an die Logistik lässt sich schließen, dass für den Betrieb modularer Anlagen flexible Logistiklösungen gefunden werden müssen, die einen kontinuierlichen Betrieb gewährleisten. Nicht autark betriebene Anlagen sind dagegen meist für die Verwendung innerhalb eines Chemieparkes konzipiert und können neben verschiedenen Gebindearten zusätzlich mit Hilfe von Rohrleitungen mit Rohstoffen versorgt werden. Die am häufigsten verwendeten Rohstoffe sind dabei zentral in dem Chemiepark in Tanks gelagert und

können anhand von den Rohrleitungen der Anlage zur Verfügung gestellt werden. Das dafür benötigte Netzwerk an Leitungen befindet sich zumeist im Besitz der Betreibergesellschaft und kann bei Bedarf gepachtet werden. Besteht die Notwendigkeit neue Rohrleitungen zu installieren, übernimmt dies die Betreibergesellschaft nach einem Antrag des Chemieunternehmens. Die dabei anfallenden Investitionskosten für den Neubau eines Rohrleitungsnetzwerks werden von den Betreibern übernommen und durch die Pachtzahlungen refinanziert. Auf Grund der zusätzlich hohen Kosten für den Betrieb der Leitungen (Reinigung, Instandhaltung etc.) ist der Einsatz bei kostengünstigen oder nur in geringen Mengen benötigten Rohstoffen nicht geeignet. Neben den bereits beschriebenen Möglichkeiten zur Rohstoffbereitstellung müssen nach Sattler und Kasper (2000) eine Vielzahl von verschiedenen Betriebsmitteln vorhanden sein. Diese umfassen:

- „Die Versorgung mit elektrischer Energie,
- Die Versorgung mit Gas,
- Die Versorgung mit Wasser (u. a. Trinkwasser, Kühlwasser, Prozesswasser),
- Die Versorgung mit Dampf,
- Die Versorgung mit Wärme- und Kälteüberträgermedien,
- Die Versorgung mit Druckluft,
- Die Versorgung mit Prozesshilfsstoffen (z. B. Inerte, Lösungsmittel),
- Entsorgungstechnische Systeme:
  - Abwasseranschluss,
  - Aufnahme von Abfällen und Transport zur Deponie etc.“ (Sattler und Kasper 2000)

Die Versorgung modularer Anlage mit elektrischer Energie kann je nach Anlagentyp, Standort und der vorhandenen Infrastruktur auf drei verschiedene Arten erfolgen. Bei der ersten Variante erfolgt die Versorgung mit Elektrizität über die lokalen Energieversorgungsunternehmen, während bei der zweiten Alternative die Stromversorgung in Eigenregie erfolgt. Dieser kann durch eigene Kraftwerke, Rückstandsverbrennungsanlagen oder Abhitzedampfnutzung aus exothermen Stoffumwandlungen generiert werden. Die dritte Art, um Energie für den Betrieb einer modularen Anlage zu erhalten, ist eine Kombination des Fremdbezugs und der Eigenerzeugung durch die vorab beispielhaft genannten Verfahren. (Sattler und Kasper 2000)

Ein weiteres wichtiges Betriebsmittel sind Industriegase, welche anhand zweier verschiedener Verfahren die Versorgung der modularen Prozessanlage sicherstellen können. Bei der ersten Methode erfolgt die Gasversorgung dezentral, d. h. die Gase werden dem Verbraucher direkt zugeführt und beispielsweise in Einzelflaschen zu der Produktion geliefert. Bei der zweiten Variante wird die Gasversorgung zentral über einen Gasspeicher sichergestellt. Dabei können die Anlagen entweder über ein Rohrleitungsnetz oder ebenfalls anhand von Flaschen, Fässern etc. mit den benötigten Rohstoffen versorgt werden. Die wichtigsten Industriegase sind dabei neben Argon (Ar) ebenfalls Sauerstoff (O<sub>2</sub>), Stickstoff (N<sub>2</sub>), Wasserstoff (H<sub>2</sub>), Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und Kohlenstoffmonoxid (CO). (Linde 2020)

Zusätzlich zu den verschiedenen Konzepten rund um die Versorgung der Anlage mit Betriebsmitteln und Rohstoffen beeinflusst die Entsorgung der unterschiedlichen Prozessmedien die logistischen Aufgaben. Die Aufgabe der Logistik ist es dabei eine Entsorgungsinfrastruktur

zu gewährleisten, welche beispielhaft in Chemieparcs Verbrennungsanlagen, Kläranlagen, Deponien oder Wertstoffsammelzentren umfassen.

Im Chemiepark „CHEMPARK“ in Leverkusen ist die Entsorgung von Abwässern und Prozesschemikalien beispielsweise über Entwässerungsleitungen gewährleistet, welche die Abwässer erfassen und unter Schwerkraft zu den Behandlungsstationen fließen lassen. Die anfallenden Prozesschemikalien werden so weit wie möglich voneinander getrennt erfasst und in Abhängigkeit der Chemikalien entweder extern oder intern einer Wiederaufbereitung zugeführt bzw. entsorgt. (Brückner 2010; Gail et al. 2012)

Die Ver- und Entsorgung der Anlage im Hinblick auf die erläuterten unterschiedlichen Betriebsmittel und Rohstoffe variiert dabei in Abhängigkeit der Erzeugnisse. Eine Installation der Anlage innerhalb eines Chemieparcs kann den Aufwand wesentlich verringern. In diesen können Verträge mit den Betreibern abgeschlossen werden, welche eine Nutzung der vorhandenen Infrastruktur ermöglicht. So können Strom, Erdgas, Wasser, Gase, Druckluft usw. von der Betreiber-gesellschaft selbst bezogen und die Entsorgung von Abwässern und Abfällen ebenfalls von diesem übernommen werden.

Durch die Recherchen über die entwickelten Produktionsmodule und die Ermittlung der Einflussgrößen auf die logistischen Rahmenbedingungen bei modularen Anlagen konnten wichtige Aspekte für die Erstellung des Vorgehensmodells gesammelt werden, welche die Anforderungen an die Logistik sowie die Ver- und Entsorgung der Anlage mit Rohstoffen und Betriebsmitteln betreffen.

## **2.8 Unterscheidungsmerkmale der Logistik für wandlungsfähige Systeme**

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen rund um die betrachteten wandlungsfähigen Systeme konnten Rückschlüsse auf die Anforderungen an die Logistik in der Chemieindustrie gezogen werden. Mit Hilfe dieser wird in diesem Kapitel die konventionelle Logistik von der benötigten Logistik für den Betrieb modularer Anlage unterschieden.

Die konventionelle Logistik in der Chemieindustrie zeichnet sich durch die feste Positionierung der Logistikeinrichtungen aus. Diese befinden sich üblicherweise auf dem Betriebsgelände und dienen beispielsweise dem Zweck der Erfüllung der klassischen Transport-, Umschlag- und Lagerprozesse. Die Logistikprozesse sind dabei auf einen hohen Materialfluss ausgelegt, da der Zuständigkeitsbereich der Logistik sehr häufig über eine einzelne betrachtete Produktion hinausgeht. Aufgrund der hohen Anzahl an auszuführenden logistischen Prozessen und der räumlichen Begrenzung zur Durchführung dieser, ist die Wandlungsfähigkeit sehr begrenzt.

Bei dem Betrieb von modularen Anlagen gilt es jedoch die verschiedenen Einsatzstandorte zu berücksichtigen. Diese unterscheiden sich in der Integration eines wandlungsfähigen Systems in bestehende Strukturen auf einem Betriebsgelände oder dem autarken Betrieb auf der „Grünen Wiese“. Die Integration der Anlage auf einem bereits erschlossenen Gelände, beispielsweise einem Chemiepark (Betriebsgelände), hat zur Folge, dass die dort vorhandene logistische Infrastruktur verwendet wird und somit die Charakteristiken der konventionellen Logistik in der Chemieindustrie großenteils für diese gelten. Ein autarker Betrieb wandlungsfähiger Systeme

benötigt dagegen eine sehr hohe Mobilität von Logistikeinrichtungen und Logistikfahrzeugen. Durch die Möglichkeiten des Numbering-up und Scale-up dieser Anlagen müssen die logistischen Prozesse ebenfalls skalierbar gestaltet werden, um den Anforderungen zu entsprechen. Dies hat zur Folge, dass standardisierte Schnittstellen erforderlich werden, welche einen solchen Betrieb unabhängig vom Produktionsort ermöglichen. Des Weiteren sollte die angestrebte autonome Selbststeuerung der Anlagen ebenfalls auf die logistischen Prozesse übertragen werden. Dies würde einen komplett autarken Betrieb einer Anlage an einem beliebigen Ort ermöglichen und der Knappheit an verfügbarem Know-how an abgelegenen Standorten vorbeugen.

Aus den in Kapitel 2 herausgearbeiteten Informationen wird die Notwendigkeit eines Vorgehensmodells deutlich. Aus diesem Grund werden in den nächsten Arbeitspaketen Informationen und Daten gesammelt und generiert, welche die Umsetzung eines Vorgehensmodells ermöglichen. Anhand dieses sollen den KMU die Anforderungen an die logistischen Konzepte rund um den Betrieb wandlungsfähiger Systeme aufgezeigt werden.

### **3 Bestimmung der Kriterien für die Auswahl geeigneter Produktionsstandorte**

Das Ziel des zweiten Arbeitspaketes ist es auf Grundlage von Recherchen und Experteninterviews Kriterien für die Standortplanung modularer Anlagen zu entwickeln. Dafür wird dem Leser zunächst ein Überblick über die Grundbegriffe der Standortplanung gegeben und das allgemeine Vorgehen bei der Findung von Produktionsstandorten vorgestellt. Aufbauend darauf werden die speziellen Anforderungen der chemischen Industrie an den Produktionsstandort bzw. den Planungsprozess erläutert und ein Anforderungsprofil erstellt. Anhand dieser Erkenntnisse kommt es anschließend zur Entwicklung eines Kriterienkatalogs für die Wahl eines Produktionsstandortes wandlungsfähiger Systeme. Zuletzt wird ein Anwendungsbeispiel für die Konzeption eines Produktionsnetzwerkes modularer Anlagen mit Hilfe der Simulation erläutert, wobei vorab die Simulation und der Nutzen dieser in Bezug auf die Logistik für die chemische Industrie herausgestellt werden. KMU wird es demnach ermöglicht, mit Hilfe der ermittelten Kriterien und dem Anforderungsprofil, eine erste Auswahl aus verschiedenen Produktionsstandorten für die wandlungsfähigen Systeme zu treffen.

#### **3.1 Grundlagen der Standortplanung**

Mit Hilfe des durchzuführenden Planungsvorgangs soll aus einer Vielzahl von Standorten ein bestimmter ermittelt werden, welcher die größtmögliche Übereinstimmung zwischen der Standortbedingung und den –anforderungen hat. Unter den Standortbedingungen werden die Gegebenheiten der jeweiligen Locations verstanden, auf welchen die Arbeitsaufgaben vollzogen werden sollen. Dahingehend stellen die Standortanforderungen die Ansprüche des Suchenden dar, welcher einen industriellen Betrieb an diesem Ort ausführen möchte. (Drexel und Domschke 1996)

Schwerpunkt und Zielsetzung dieser Planung ist es den Standort, unter Beachtung vorteilhafter Markt-, Produktions- und Absatzbedingungen, zu bestimmen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass neben der Einbindung des Standortes in das lokale, regionale und globale Umfeld ebenfalls ein Beziehungsfeld zu kooperierenden Standorten, wie beispielsweise den Produktionsnetzwerken oder Zulieferverbänden, gewährleistet ist. Außerdem ist eine garantierte Verfügbarkeit der erforderlichen Ressourcen an dem betrachteten Standort sicher zu stellen. (Grundig 2018)

Die Gründe für die Notwendigkeit einer Standortplanung sind sehr vielfältig. Neben einer erforderlichen Produktionserweiterung auf Basis des Wachstums eines Unternehmens können ebenfalls wirtschaftliche Veränderungen, wie beispielsweise die Kostenstrukturen rund um das Personal oder die Steuern, als Gründe dienen. Darüber hinaus können neue Auflagen des Umweltschutzes, Ausgliederungen von Abteilungen, Einführung von Neuprodukten und innovativen Neuprozessen, Dezentralisierungen (um die regionale Präsenz zu sichern) oder strategische Entscheidungen, wie z. B. die Kostenentwicklung an dem Altstandort, Faktoren sein (vgl. Faktoren zu dem Einsatz wandlungsfähiger Systeme in Kapitel 1). (Grundig 2018)

## 3.2 Vorgehen bei einer Standortplanung

Die Auswahl eines neuen Standortes hat eine große wirtschaftliche Bedeutung, weshalb eine zielorientierte und systematische Vorgehensweise notwendig ist. Aus diesem Grund wird ein Verfahren verwendet, welches auf der Kompromissbildung der bereits in Kapitel 3.1 vorgestellten Standortanforderungen und Standortbedingungen beruht. Dieses Vorgehensmodells ist in Abbildung 3-1 dargestellt und dient der Erreichung des bestmöglichen Ergebnisses. Das Modell wird dabei in fünf verschiedene Phasen unterteilt, welche nacheinander ausgeführt werden. (Grundig 2018)

Die Standortplanung startet mit der Planungsinitiative (Schritt A), welche durch das Unternehmensmanagement infolge einer Ziel- und/oder Vorplanung ausgelöst wird. Anschließend werden in Schritt B zwei Tätigkeiten parallel durchgeführt. Bei dem Standortanforderungsprofil (B1) wird ein Anforderungsprofil des neuen Standortes geplant, welche aus den Standortkriterien hervorgehen. Die dabei aufgestellten Anforderungen können zusätzlich in Form von Basis-, Fest-, Mindest-, Wunsch-, oder Sonderkriterien gewichtet werden und sind das Fundament für die Findung und anschließende Bewertung der unterschiedlichen Standorte. Kriterien für die Bewertung können beispielsweise der Flächenbedarf, die Unternehmenszielsetzung oder die Diversifikationsmöglichkeiten sein, welche zusammengefasst erste Lagekonzeptpläne als Voraussetzung für die Beurteilung der Grundstücksalternativen ermöglichen. (Grundig 2018)

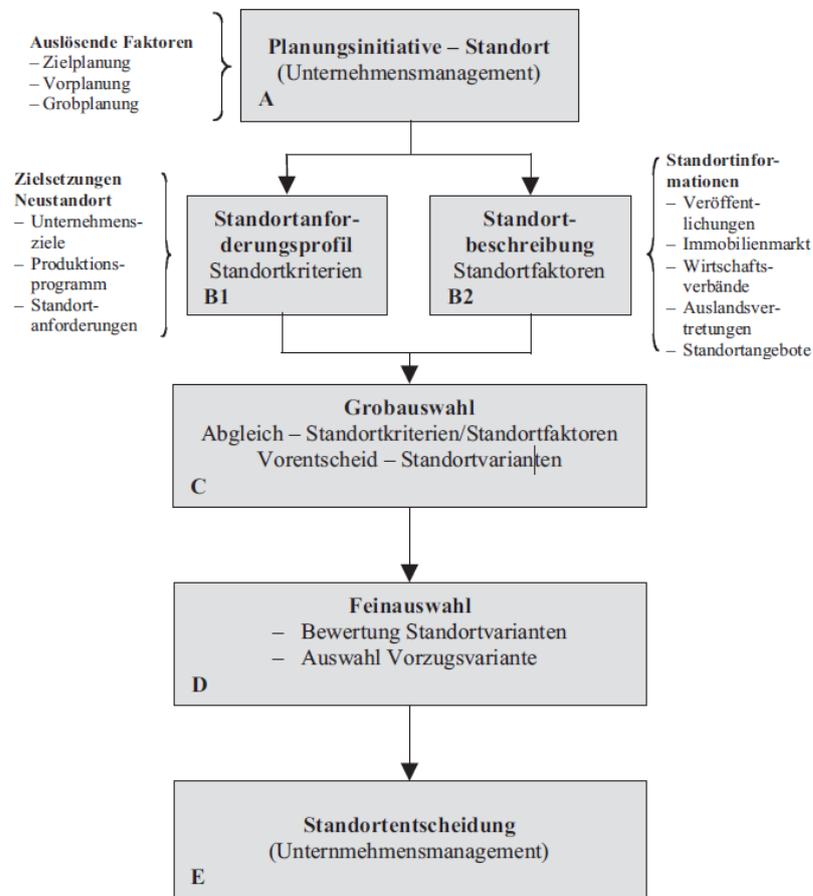


Abbildung 3-1: Ablaufplan der Standortplanung (Grundig 2018)

In dem parallel stattfindenden Zwischenschritt werden die Beschreibungen der unterschiedlichen Standorte herausgestellt (B2). In dieser sind genaue Ausführungen der für den Standort typischen Faktoren festzuhalten. Die dabei ermittelten Standortfaktoren werden unter räumlichen Betrachtungsebenen in globale, regionale und lokale Standortfaktoren unterschieden. Unter globalen Standortfaktoren werden Eigenschaften im Hinblick auf die politischen, wirtschaftlichen und sozialen Verhältnisse eines Landes verstanden, wohingegen die regionalen Faktoren die Eigenschaften des Wirtschaftsraumes eines Staates darstellen. Gegenüber diesen makroskopischen Faktoren geben die lokalen Standortfaktoren mikroskopische Aspekte wieder und beschreiben die Eigenschaften der unmittelbaren Standorte und deren Umgebung. Sollten während der Untersuchungen der Lage grundlegende globale bzw. regionale Ansprüche nicht ausreichend vorausgesetzt sein, werden keine detaillierten Betrachtungen mehr durchgeführt. (Grundig 2018)

Sobald alle Faktoren und Anforderungen gesammelt wurden, kommt es im nächsten Schritt (C) zu einer Grobauswahl der verschiedenen Standorte. Dafür werden die regionalen, globalen und lokalen Faktoren des Anforderungsprofils mit den an dem Gelände vorherrschenden Aspekten verglichen. Anhand den daraus gewonnen Erkenntnisse kommt es anschließend zu einer groben Auswahl der unterschiedlichen Alternativen. Die darauffolgende Feinauswahl (D) beinhaltet eine genauere Betrachtung der Merkmale aufgrund einer detaillierten Analyse und Bewertung der gesammelten Informationen. Zur Bewertung der unterschiedlichen Standorte können verschiedenste Bewertungsmethoden verwendet werden, welche von der Methode der einfachen Punktbewertung über die Methode der Transportkostenminimierung, die Methode der Kapital- und Kostenrechnung bis hin zu der Nutzwertanalyse gehen. Aufbauend auf den daraus gewonnenen Überblick kann in dem letzten Planungsschritt (E) die Standortentscheidung durch das Unternehmensmanagement erfolgen (Grundig 2018).

Das in diesem Kapitel erläuterte Vorgehen zur Standortplanung dient dazu, einen ersten Überblick über den gesamten Planungsprozess zu erlangen. Eine detaillierte Beschreibung des Ablaufs bei der Standortfindung von Produktionsstätten kann Grundig (2018) entnommen werden. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird ein Anforderungsprofil für die Chemieindustrie entwickelt, welches abschließend in einen Kriterienkatalog überführt wird. Diese Ausarbeitungen können anschließend dabei helfen anhand verschiedener Kriterien geeignete Standorte für wandlungsfähige Systeme in der Chemieindustrie zu finden.

### **3.3 Anforderungsprofil für die Standortplanung von Chemieunternehmen**

Chemieunternehmen stehen im Rahmen der Standortplanung vor der Entscheidung, ob eine Ansiedlung in einem Chemiapark einem Aufbau eines Standorts auf der „Grünen Wiese“ vorzuziehen ist. Bei einer Ansiedlung im Chemiapark können die gesamte Produktion oder nur Teile der Produktion umsiedeln. Chemieunternehmen stehen somit vor den Herausforderungen Bereiche für die Verlagerung zu bestimmen und zugleich Chemieparks zu identifizieren, deren Profil die Anforderungen des Unternehmens erfüllt. Bei der Entscheidungsfindung für die richtige Standortwahl spielen dabei eine Vielzahl von Faktoren eine wesentliche Rolle. Diese gehen von der Konzentration auf die Kernkompetenz, über Synergieerschließungen, Kundenanbindungen,

Wertschöpfungsoptimierungen bis hin zu Markt- und Technologieerschließungen. Aus diesen Faktoren lassen sich Methodengebiete ableiten, die die Erfolgswahrscheinlichkeit einer Ansiedlung im Chemiapark steigern und zugleich die Wirtschaftlichkeit des Vorhabens erhöhen. Zu diesen Methodengebieten zählen die Positionsbestimmung, das Standort-Screening, die Bewertung von Alternativen, die Wirtschaftlichkeitsanalyse und das Umsetzungscontrolling. Jedes Methodengebiet umfasst verschiedene Techniken, die die Standortentscheidung unterstützen. (Wildemann 2013)

Die Positionsbestimmung hilft beispielsweise die Ist-Situation einzuschätzen und einen Standortvergleich mit anderen Standorten vorzunehmen, um etwaige Schwächen zu identifizieren. Kernkompetenzanalysen finden Anwendung, um bestimmte Bereiche der Produkt- oder Prozessebene für ein Outsourcing oder eine Umsiedlung auszuwählen. Im Rahmen des Standort-Screenings werden harte und weiche Standortfaktoren ermittelt, mit deren Hilfe alle Standortinformationen für eine Entscheidungsfindung bereitgestellt werden. Des Weiteren können im Bereich des Benchmarking Unternehmen, die in einem Chemiapark angesiedelt sind mit Unternehmen, die ihren Standort außerhalb eines Chemiaparks haben, verglichen werden. Diese Methode ermöglicht außerdem die Auswirkungen einer Standortentscheidung am Markt zu ermitteln. Bei der Bewertung von Alternativen werden qualitative und quantitative Standorteigenschaften verschiedener Standorte gegenübergestellt und bewertet. Aufgrund der Vielzahl an Faktoren kann aus der Bewertung eine fundierte Entscheidung abgeleitet werden. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse zeichnet sich durch die Beurteilung möglicher Markt- und Standortentwicklungen aus, die mithilfe von Investitionsrechnungsmethoden quantifiziert werden. Im Hinblick auf Standortalternativen erfolgt parallel eine Erfassung möglicher Synergieeffekte. Auf Grundlage des Umsetzungscontrollings wird die Umsetzung der Standortwahl und Standortvorteile kontrolliert, wohingegen ein Risikomanagement während des Standortwechsels das Chemieunternehmen bei der Bewältigung von Unsicherheiten und Risiken unterstützt. Anhand der Umsetzung der Methoden und Methodengebiete wird eine strukturierte und fundierte Entscheidung über eine Standortwahl getroffen. (Wildemann 2013)

Neben der Frage nach dem Ansiedlungsort stehen die Chemieunternehmen zugleich vor der Wahl eines für das Unternehmen geeigneten Geschäftsmodells. Diese Modelle unterscheiden sich dabei zwischen dem Major-User und dem Multi-User-Modell. Während sich Major-User-Modelle dadurch charakterisieren, dass der größte Produzent am Standort die Infrastruktur und die Dienstleistungen zur Verfügung stellt, ist bei den Multi-User-Modellen hingegen eine Betreibergesellschaft in Besitz mehrerer Unternehmen, die an dem Standort angesiedelt sind. Eine weitere Möglichkeit für ein Geschäftsmodell stellen Betreibergesellschaften dar, welche keine eigene Produktion aufweisen, sondern lediglich als Branchenexperten auftreten. Zusätzlich besteht die Möglichkeit Grüne-Wiese-Überlegungen bei der Standortentscheidung mit einfließen zu lassen. (Höchst et al. 2010)

Die chemische Produktion stellt im Vergleich zu anderen Industrien gesonderte Anforderungen an Standorte. Je nach Art des Unternehmens und Kernkompetenzen unterscheiden sich die Standortfaktoren für Chemiestandorte. Aufgrund der benötigten Mengen und den damit verbundenen Kosten liegt der Fokus bei Herstellern von Basischemikalien auf einer guten verkehrlichen Anbindung ihrer Produktionsanlagen. Außerdem profitieren sie von Produktionsverbänden, die die Kosten für die Rohstoff- und Vorproduktversorgung senken.

Produzenten von Spezialchemikalien hingegen bevorzugen Produktionen in den Absatzregionen, um die Nähe zum Kunden zu gewährleisten. Neben einer Sicherstellung der Versorgung, sollten die Produktion auf einem nicht frei zugänglichen Gelände erfolgen. Chemieunternehmen profitieren von Standorten, die über eine flexible Inbound- und Outbound-Logistik mit Lagerungsmöglichkeiten und Transportketten verfügen. (ACHEMA magazine 2012; Suntrop 2016)

Bei verfahrenstechnischen Anlagen fließen besondere Kriterien und Einflussgrößen bei der Wahl eines geeigneten Produktionsstandorts mit ein. Angesichts der Umsetzung chemischer Prozesse werden Bedingungen an das Klima bezüglich der Luftfeuchtigkeit, der Temperatur und dem Luftdruck gestellt. Zusätzlich muss das Gelände genau überprüft werden. Dabei spielen Faktoren wie die Bodenbelastbarkeit und die Überschwemmungsgefahr wichtige Rollen. Im Bereich der Ver- und Entsorgung gilt es alle prozessnotwendigen Medien zur Verfügung zu stellen und produktionsergänzende Prozesse, wie die Abfallbeseitigung, umzusetzen.

Im Bereich der Logistik müssen die Produktionsstandorte von verfahrenstechnischen Anlagen über Verkehrsanschlüsse für den Straßen-, Schienen- und ggf. Binnenschiffan-anschluss verfügen und schnelle Transportwege zu den Absatzmärkten bereitstellen. Weitere Einflussfaktoren für die Standortwahl sind die Verfügbarkeit von qualifizierten Arbeitskräften, gesetzliche Auflagen für den Standort sowie Steuern, Vergünstigungen und Kosten für das Grundstück. (Sattler und Kasper 2000)

### 3.4 Entwicklung eines Kriterienkatalogs zur Standortbewertung in Abhängigkeit der notwendigen Anforderungen

Für die Entwicklung eines Kriterienkatalogs zur Bewertung von Produktionsstandorten werden zunächst Kriterien für die Standortfindung von verfahrenstechnischen Anlagen und modularen Anlagen aus verschiedensten Literaturquellen gesammelt, wobei zusätzlich allgemeine Standortkriterien in den Kriterienkatalog einfließen. Mithilfe einer Aggregation der Kriterien nach Häufigkeit der Nennung in der Literatur werden die wichtigsten Kriterien ermittelt und im Anschluss charakterisiert. Die Kriterien berücksichtigen Eigenschaften der Standorte, Kosten für den Betrieb und den Aufbau, das Leistungsspektrum vor Ort sowie bürokratische Hürden (vgl. Tabelle 3-1).

**Tabelle 3-1: Kriterien zur Bewertung von Standortalternativen**

<b>Standortspezifische Kriterien</b>	<b>Kostenkriterien</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gelände/ Standort</li> <li>▪ Expansionsmöglichkeiten am Standort</li> <li>▪ Infrastrukturanbindung</li> <li>▪ Personal</li> <li>▪ Produktparte</li> <li>▪ Absatzmarkt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Versorgungskosten</li> <li>▪ Entsorgungskosten</li> <li>▪ Logistikkosten</li> <li>▪ Kosten für den Aufbau der Anlage</li> </ul>
<b>Leistungskriterien</b>	<b>Bürokratische Kriterien</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Versorgung</li> <li>▪ Dienstleistungsangebot</li> <li>▪ Lagerung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Förderungen, Subventionen</li> <li>▪ Genehmigungsverfahren und -auflagen</li> </ul>

Die anhand der Recherche ermittelten Kriterien Versorgung, Dienstleistungsangebot und Lagerung werden unter dem Oberbegriff Leistungskriterien gegliedert. Das Kriterium Versorgung umfasst dabei die Gewährleistung der sicheren Bereitstellung der benötigten Prozessmedien, wie z. B. elektrische Energie, Wasser, Erdgas, Dampf und der Rohstoffe. Unter der Eigenschaft Dienstleistungsangebot werden die an dem betrachteten Standort verfügbaren Dienstleistungsangebote verstanden. Diese beinhalten beispielsweise die Ver- und Entsorgung der Produktion oder infrastrukturelle Leistungen, wie den Brandschutz. Das Merkmal der Lagerung umfasst die vorhandenen bzw. möglichen Lagerkapazitäten und die Option Gefahrgut an dem Standort lagern zu können.

Die Kriterien Gelände/Standort, Expansionsmöglichkeiten, Infrastrukturanbindung, Personal, Produktparte und Absatzmarkt werden unter der Bezeichnung der standortspezifischen Kriterien geführt. Um einen geeigneten Standort zu finden, müssen die Rahmenbedingungen, wie die topographische Lage, die Größe und die Bodenstruktur, bekannt sein. Außerdem stellt die Expansionsmöglichkeit des Produktionsstandorts ein weiteres Kriterium dar, das im engen Zusammenhang mit dem Gelände und dem Standort steht. Ebenfalls ist die Anbindung an die Infrastruktur ein wichtiges Element bei der Bewertung einer möglichen Niederlassung an einem Ort. Diese gewährleistet eine schnelle und effiziente Beschaffung und Distribution, wobei für das dafür benötigte Straßennetz die Dichte, die Qualität und die Anschlüsse entscheidend sind, während bei einem Schienennetz ein eigener Schienenanschluss Voraussetzung ist. Ebenso essentiell für den Betrieb wandlungsfähiger Systeme ist das verfügbare Personal, welches neben dem Besitz entsprechender Qualifikationen ebenfalls in ausreichender Anzahl zur Verfügung stehen muss. Des Weiteren tragen die Personalkosten und die Nähe zu Hochschulen und Wissenschaft zu einer Standortfindung bei. Darüber hinaus hat die Nähe zu Unternehmen, welche in der gleichen Produktparte tätig sind, einen erheblichen Einfluss auf die Geschäftsprozesse, da der räumliche Zusammenschluss neben dem Hervorrufen von Synergieeffekte ebenfalls das Wissen des Chemieunternehmens erweitern kann. Zusätzlich sollte die Distanz zum Absatzmarkt und die daraus resultierenden Transportwege berücksichtigt werden.

Weitere während der Erhebung identifizierte Kriterien stellen die Kostenkriterien dar, welche sich in die Versorgungs-, Entsorgungs- und Logistikkosten aufgliedern. Zusätzlich dazu beinhaltet dieser Oberbegriff ebenfalls die Kosten in Verbindung mit dem Bau bzw. Aufbau einer modularen Anlage. Zu den Logistikkosten zählen ebenfalls Ausgaben für Tätigkeiten, die durch Dienstleister erbracht werden. Diese können ebenfalls die Ver- und Entsorgung der Produktion mit Prozessmedien, Rohstoffen bzw. den Abfällen übernehmen. In diesem Fall sollten für die bessere Vergleichbarkeit mit den anderen Standorten die Kosten für die einzelnen vereinbarten Tätigkeiten auf die unterschiedlichen Kriterien aufgeteilt werden. Unter den Kosten für den Aufbau der Anlage werden die finanziellen Aufwände verstanden, die im Rahmen des Aufbaus und der Inbetriebnahme sowie bei der Erschließung des Grundstücks anfallen (u. a. Erschließungskosten sowie Grund- und Baulandsteuern).

Unternehmen, die in der chemischen Industrie tätig sind, können ebenfalls von Förderungen und Subventionen seitens des Bundes, des Landes oder des Betreibers profitieren, wodurch die Standortwahl positiv beeinflusst wird. Außerdem sind häufig aufgrund der von den Chemikalien ausgehenden Gefahren Genehmigungsverfahren zu durchlaufen, welche spezielle Anforderungen an das Handling und die Lagerung voraussetzen. Diese Restriktionen stellen eine Grundlage zu

Inbetriebnahme des Standorts dar. Die Komplexität, der Aufwand und die Dauer der durchzuführenden Verfahren und Genehmigungen variieren dabei in Abhängigkeiten der Charakteristiken der Produktionsstandorte. Bei einem Standort innerhalb eines Chemieparks ist mit einer wesentlich schnelleren Genehmigung zu rechnen als bei Standorten auf der grünen Wiese.

Auf Grundlage dessen und den vielfältigen Dienstleistungsangeboten rund um die Bereiche der Logistik, der Ver- und Entsorgung sowie dem technischen Support, stellen Chemieparks für wandlungsfähige Systeme einen vorteilhaften Standort dar. Der Betreiber solcher Parks sorgt dabei für die Erfüllung der logistischen Prozesse wie die Lagerung, samt Verpackung und Abfüllen, die Disposition sowie den Wareneingang und -ausgang, den Werksverkehr und weitere Serviceleistungen, wie die Zollabwicklung. Außerdem werden Produkte aller Aggregatzustände bearbeitet.

### **3.5 Gewichtung der Standortkriterien für wandlungsfähige Systeme**

Die in diesem Forschungsprojekt ermittelten Kriterien aus der Tabelle 3-1 stellen somit den Kriterienkatalog dar, welcher es ermöglicht diese im Hinblick auf die Standortentscheidung für wandlungsfähige System als Bewertungsgrundlage anzuwenden. Dafür kommt es zunächst zu einer Gewichtung der Kriterien anhand von Experten aus dem Bereich der modularen Produktion in Form eines paarweisen Vergleichs. Dieser ordnet die Ausprägungen nach der jeweiligen Relevanz für die Standortentscheidung und bildet eine Rangfolge. Dafür werden die Kriterien anhand eines einfachen Bewertungsschemas (1 und 0) gewichtet. Die Bewertung eines Kriteriums mit der Zahl 1 bedeutet dabei, dass dieses als wichtiger angesehen wird als das Vergleichskriterium. Wird das betrachtete Kriterium jedoch mit 0 beurteilt, so ist das Vergleichskriterium von größerer Bedeutung. In Abbildung 3-2 wurde beispielhaft eine solche Bewertung der Kriterien anhand der „Smart Factory“ der Merck KGaA vorgenommen. Die Berechnung der Wichtigkeit eines einzelnen Kriteriums gegenüber den anderen Kriterien ergibt sich dabei aus der Division des erzielten Scores (Addition aller vergebenen Einsen für das Kriterium) durch die Anzahl der während des gesamten Prozesses verteilten Einsen.

Die Betrachtung der Untersuchungsergebnisse zeigt, dass die Kriterien rund um die Sicherstellung der Versorgung der Anlage mit Rohstoffen und Medien einen sehr großen Einfluss auf die Standortentscheidung der Unternehmen haben.

als wichtiger	Versorgung	Kosten Anlagenaufbau	Infrastrukturabhängigkeit	Personal	Dienstleistungsangebot	Gelände/Standort	Expansionsmöglichkeiten am Standort	Förderung, Subventionen	Produktparte	Absatzmarkt	Versorgungskosten	Entsorgungskosten	Logistikkosten	Lagerung	Genehmigungsverfahren	Summe	%
Versorgung	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14	13,33%
Kosten Anlagenaufbau	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	9	8,57%
Infrastrukturabhängigkeit	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	10	9,52%
Personal	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	5	4,76%
Dienstleistungsangebot	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	3	2,86%
Gelände/Standort	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	12	11,43%
Expansionsmöglichkeiten am Standort	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	3	2,86%
Förderung, Subventionen	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
Produktparte	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	5	4,76%
Absatzmarkt	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0,95%
Versorgungskosten	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12	11,43%
Entsorgungskosten	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	10	9,52%
Logistikkosten	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	8	7,62%
Lagerung	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	8	7,62%
Genehmigungsverfahren	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	5	4,76%
<b>Prüfsumme</b>																<b>100,00%</b>	

Abbildung 3-2: Gewichtung der Standortkriterien am Beispiel der „Smart Factory“ von Merck (eigene Darstellung)

In der nachfolgenden Tabelle 3-2 sind die Kriterien in eine Rangfolge gebracht worden, welche die Ergebnisse der durchgeführten Gewichtung darstellt. Zusätzlich dazu werden die Ausprägungen eines jeden Kriteriums aus Kapitel 3.4 kurz aufgeführt.

Tabelle 3-2: Standortkriterien in gewichteter Reihenfolge

Rang	%	Kriterium	Ausprägung
1	13,33 %	Versorgung	Aufwand, welcher betrieben werden muss, damit eine ausreichende Versorgung gewährleistet werden kann.
2	11,43 %	Gelände/Standort	Um einen geeigneten Standort zu finden, müssen die Rahmenbedingungen, wie die topographische Lage, die Größe und die Bodenstruktur bekannt sein und den Anforderungen entsprechen.

2	11,43 %	Versorgungskosten	Kosten, die durch die Versorgung der Produktion mit Prozessmedien oder Rohstoffen entstehen.
4	9,52 %	Entsorgungskosten	Kosten, die bei der Entsorgung und Aufbereitung von Abfallprodukten entstehen.
4	9,52 %	Infrastrukturbindung	Gute Infrastrukturanbindungen stellen eine schnelle und effiziente Beschaffung und Distribution sicher. Bei dem Straßennetz sind die Dichte, die Qualität und die Anschlüsse entscheidend, während bei dem Schienennetz ein eigener Schienenanschluss benötigt wird. Des Weiteren kann es für Sie essentiell sein, dass der Standort einen Anschluss an die Binnengewässer besitzt. Lassen Sie aus diesem Grund diese Faktoren besonders in Ihre Gewichtung mit einfließen.
6	8,57 %	Kosten Anlagenaufbau	Kosten, die beim Aufbau der Anlage und bei der Erschließung des Grundstücks anfallen beinhalten u. a. Erschließungskosten sowie Grund- und Baulandsteuern.
7	7,62 %	Lagerung	Aspekte wie die Lagerkapazität und die Option Gefahrgut lagern zu können, beeinflussen die Bewertung des Lagers.
7	7,62 %	Logistikkosten	Kosten, die durch Dienstleister entstehen, wobei diese auch die Prozesse der Ver- und Entsorgung übernehmen können.
9	4,76 %	Genehmigungsverfahren	Aufgrund der Gefahren, die von chemischen Prozessen ausgehen, sind Genehmigungsverfahren zu durchlaufen und Auflagen umzusetzen. Das gilt als wesentliche Voraussetzung zur Inbetriebnahme des Standorts. Die Komplexität, der Aufwand und die Dauer sind abhängig vom Standort. Bei Standorten in Chemieparks ist mit einer schnelleren Genehmigung zu rechnen als bei Standorten auf der grünen Wiese.
9	4,76 %	Personal	Essentiell für den Betrieb modularer chemischer Anlagen ist das Personal, welches neben dem Besitz entsprechender Qualifikationen ebenfalls in ausreichender

			Anzahl zur Verfügung stehen muss. Des Weiteren tragen die Personalkosten sowie die Nähe zu Hochschulen und zur Wissenschaft zu einer Standortfindung bei.
9	4,76 %	Produktsparte	Durch die Nähe zu Unternehmen, die in der gleichen Produktionssparte tätig sind, können Synergieeffekte entstehen und das Wissen des Chemieunternehmens verbessert werden.
12	2,86 %	Expansionsmöglichkeiten	Überprüfung der Möglichkeit einer Expansion an dem Standort. Biete den Unternehmen zu einem späteren Zeitpunkt die Option die Produktion flächenmäßig zu vergrößern.
12	2,86 %	Dienstleistungsangebot	Insbesondere für modulare Produktionsanlagen beeinflussen Dienstleistungsangebote durch Chemiaparkbetreiber oder Logistikdienstleister die Standortentscheidung. Ver- und Entsorgungsdienstleistungen sowie infrastrukturelle Leistungen wie der Brandschutz, stellen Beispiele für das notwendige Dienstleistungsangebot dar.
14	0,95 %	Absatzmarkt	Länge der Transportwege von Rohstoffen und Produkten spielen in der Beschaffung und Distribution eine große Rolle. So kann die Nähe zum Absatzmarkt oder zu Kunden- und Rohstoffstandorten von besonderer Bedeutung sein.
15	0,00 %	Förderung, Subventionen	Chemieunternehmen können von Förderungen und Subventionen seitens des Bundes, des Landes oder des Betreibers profitieren, wodurch die Standortwahl positiv beeinflusst wird.

### 3.6 Bewertung von Produktionsstandorten anhand des Kriterienkatalogs

Im Hinblick auf das zu entwickelnde Vorgehensmodell wird in dem folgenden Kapitel eine Methode vorgestellt, die mit Hilfe der vorab gewichteten Kriterien mögliche Produktionsstandorte auf deren Eignung hin untersucht. Dazu wird die TOPSIS-Methode (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) verwendet, welche der multikriteriellen Entscheidungsfindung dient. Ein Vorteil dieser Variante besteht darin, dass neben den Kriterien rund um den Nutzen ebenfalls die entstehenden Kosten mit in die Bewertung einfließen. Dies

ermöglicht eine Effizienzanalyse, mit der sich die Vorteilhaftigkeit eines einzelnen Standortes bestimmen lässt. (Kögel 2012)

Das Vorgehen für eine Analyse der Standorte nach der TOPSIS-Methode lässt sich dabei in neun Schritte unterteilen. Der erste Schritt befasst sich mit der Auswahl der betrachteten Alternativen, d. h. der möglichen Produktionsstandorte. In dem nächsten Schritt werden die aus Kapitel 3.4 ermittelten Kriterien herangezogen, welche als Grundlage für die Bewertung der verschiedenen Alternativen dienen. Anschließend kommt es zu der Bildung einer Entscheidungsmatrix. Diese beinhaltet die Ausprägungen aller Varianten für ein bestimmtes Kriterium. Darauffolgend wird eine normalisierte Matrix erstellt, welche mit der vorab definierten Gewichtung der Kriterien (vgl. Tabelle 3-2) multipliziert wird und daraufhin eine gewichtete normalisierte Entscheidungsmatrix darstellt. Mit Hilfe dieser werden anschließend zwei virtuelle Alternativen bestimmt, wobei eine das „positive-ideale“ (besten Kriterienausprägungen) und eine das „negative-ideale“ (schlechtesten Kriterienausprägungen) darstellt. Daraufhin kommt es zu einer Berechnung des Abstandes jedes erzielten Wertes der Standorte zu der Best-Case-Alternative und der Worst-Case-Alternative, indem die unterschiedlichen Ausprägungen der Kriterien von diesen subtrahiert werden. Das abschließende Ranking der Standorte lässt sich durch die Berechnung des TOPSIS-Index bestimmen. Das vorab geschilderte Vorgehen der TOPSIS-Methode wird anschließend mit den zu beachtenden Formeln Stichpunktartig zusammengefasst. (Kögel 2012; Peters und Zelewski 2007)

- Auswahl der betrachteten Alternativen
- Bestimmung der Kriterien
- Festlegen der Ausprägungen aller Kriterien für alle Alternativen in einer Entscheidungsmatrix
- Normalisierung der Entscheidungsmatrix

$$\overline{X_{ij}} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_{ij}^2}} \quad \text{Formel 1}$$

- Festlegung der Kriteriengewichtung für jedes Kriterium
- Bestimmen einer gewichteten normalisierten Entscheidungsmatrix (Ausprägungen werden mit ihren Gewichten multipliziert)

$$V_{ij} = \overline{X_{ij}} \times W_j \quad \text{Formel 2}$$

- Konstruktion zweier virtueller Alternativen:
  1. „positiv-ideale“ stellt die jeweils besten Kriterienausprägungen dar
  2. „negativ-ideale“ setzt sich aus den jeweils schlechtesten Kriterienausprägungen zusammen
- Berechnung des Abstands jeder Alternative zur Best-Case-Alternative und zur Worst-Case-Alternative

$$S_i^+ = \left[ \sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^+)^2 \right]^{0,5} \quad \text{Formel 3}$$

$$S_i^- = \left[ \sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^-)^2 \right]^{0,5} \quad \text{Formel 4}$$

- Berechnung eines TOPSIS Index um ein abschließendes Ranking zu erhalten

$$P_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad \text{Formel 5}$$

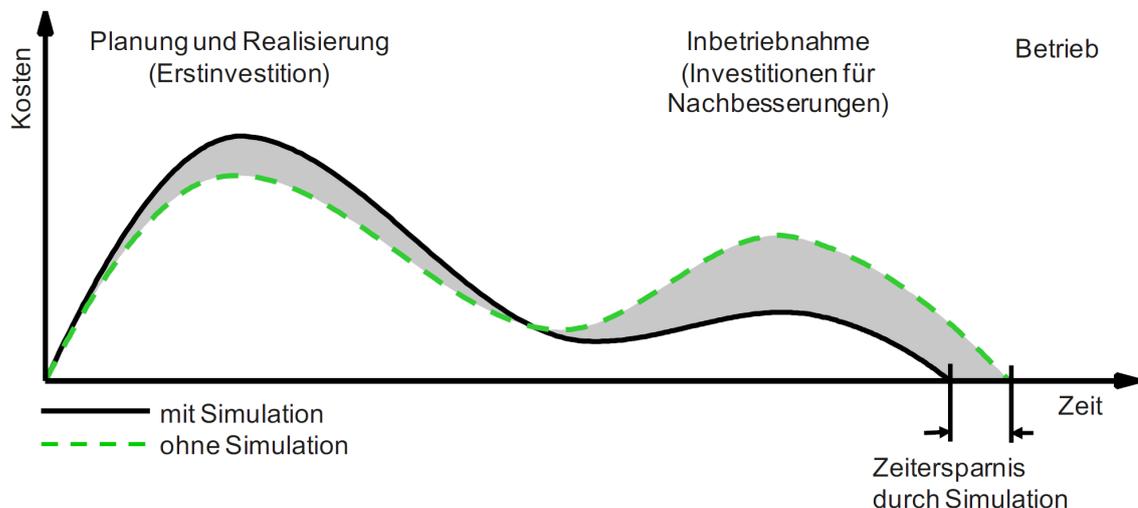
### 3.7 Einsatzmöglichkeiten der Simulation in der Chemieindustrie

Ein weiteres Instrument zur Erörterung des optimalen Produktionsstandortes stellt die Simulation dar. Aus diesem Grund kommt es nachfolgend zu einer Vorstellung des Nutzens der Simulation für Unternehmen in der chemischen Industrie. Aufbauend darauf wird im Anschluss eine beispielhaft durchgeführte Simulationsstudie vorgestellt, welche sich mit der Konzeptionierung von Produktionsnetzwerken wandlungsfähiger Systeme auseinandergesetzt.

Die Anwendungsmöglichkeiten und Nutzen von Simulationsmodellen sind vielseitig. Simulationsstudien ermöglichen die Abbildung von nichtexistierenden logistischen Verknüpfungen, Zukunftsszenarien sowie hohen Komplexitäten der Wirkzusammenhänge. Experimente, die am realen System nicht möglich sind oder mit hohen Kosten und einem außerordentlichen Aufwand verbunden sind, werden in Simulationsmodellen veranschaulicht. In der Planung von neuen Systemen können verschiedene Varianten, z. B. Anordnungen von Flächen in Layouts, getestet und evaluiert werden. In der Logistik reichen die Anwendungsbereiche von innerbetrieblichen Systemen bis hin zur Beschaffungs- und Distributionslogistik. (Tempelmeier 2018)

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde ein Simulationsmodell erstellt, welches die Prozesse, die im Zusammenhang mit einer modularen Produktionsanlage in einem Chemiepark auftreten, repräsentiert. Dafür wurde die Methode der agentenbasierten Simulation angewandt. Diese bietet die Möglichkeit der Interaktion der einzelnen Akteure (Fördermittel, Lager, modulare Anlage) untereinander, welche in dem Modell autonome Objekte darstellen und in Form von Agenten abgebildet werden. Agenten nehmen neben der Umwelt ebenfalls andere Entitäten wahr und kommunizieren untereinander, um auf mögliche Einflussfaktoren zu reagieren (VDI 3633). Die Vernetzung sowie die agenteneigenen Attribute und „wenn-dann“-Regeln determinieren das Verhalten. Die Regeln können sich jedoch im Laufe der Zeit ändern und zu neuen Verhaltensmustern führen. Personen, Fahrzeuge oder Organisationen kommen beispielsweise für die Modellierung von Agenten infrage (Law 2015).

Darüber hinaus sollen anhand dieses Beispiels die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten von Simulationsmodellen und Digitalen Zwillingen dargelegt werden, da sich in der intelligenten Fabrik der Zukunft alles um Flexibilität, Vernetzung und Effizienz dreht. Digitale Zwillinge stellen dabei ein Instrument zur ganzheitlichen Betrachtung von Produktions- und Logistiksystemen dar. Sie sind eine digitale Repräsentanz von Dingen aus der realen Welt, die sowohl physische als auch nicht-physische Objekte beschreibt. Technische Einrichtungen, Prozesse, sowie betriebsrelevante Informations- und Datenflüsse können mit dessen Hilfe schnittstellenübergreifend in einer digitalen Umgebung abgebildet und für einen stetigen Verbesserungsprozess genutzt werden. Auf diese Weise ist eine Analyse bestehender Abläufe möglich, ohne das reale Logistiksystem umstellen und die Produktion behindern zu müssen. Ferner unterstützt ein ‚Digitaler Zwilling‘ bei der Planung und Untersuchung von Zukunftsszenarien und dient der frühzeitigen Erkennung von Planungsfehlern und damit verbundener Kosten. Die erwarteten Einsparungen an Zeit und Kosten wurden bereits im Jahr 2017 durch Gutenschwager et al. untersucht. Diese stellen heraus, dass der Einsatz einer Simulation in der Planungs- und Realisierungsphase einen höheren Aufwand erzeugt, dieser jedoch mit der Inbetriebnahme sinkt. Darüber hinaus führt die Anwendung einer Simulation zu einer Zeitersparnis, woraus ein früherer regulärer Betrieb der untersuchten Anlage resultiert. Die nachfolgende Abbildung zeigt den schematischen Verlauf der Kosten von der Planung bis zur Inbetriebnahme einer Anlage. (Gutenschwager et al. 2017)



**Abbildung 3-3: Schematischer Verlauf der Kosten von der Planung bis zur Inbetriebnahme (Gutenschwager et al. 2017)**

Über die Untersuchung und Bewertung möglicher Szenarien hinaus, können ebenfalls aktuelle Produktionsdaten und Informationen (bspw. aus dem ERP-System), mit Hilfe von Schnittstellen, in den Digitalen Zwilling eingelesen und im Hinblick auf deren Bedeutung auf das logistische Gesamtsystem analysiert werden. Die damit verbundenen Ergebnisse können bspw. für die kurz- bis langfristige Ressourcenplanung verwendet werden. Dies stellt nicht nur einen effizienten, sondern auch nachhaltigen Einsatz der Ressourcen sicher.

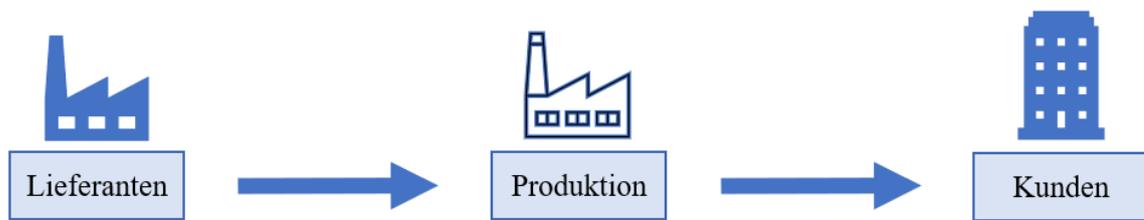
### **3.8 Simulationsstudie zur Konzeption von Produktionsnetzwerken für wandlungsfähige Systeme**

Basierend auf der Grundidee der Flexibilität von Produktionssystemen und dem autarken Betrieb modularer Anlagen kam es in der Zusammenarbeit mit der FH Südwestfalen zu einer Untersuchung von Produktionsnetzwerken wandlungsfähiger Systeme. Dafür sind im Rahmen einer Simulationsstudie verschiedene Netzwerkkonstellationen analysiert worden, welche sich in dem Dezentalisierungsgrad sowie einer dynamischen Nachfrage unterscheiden. Die Analyse der Simulationsergebnisse wurde anschließend in Bezug auf vier Gestaltungsziele (Flexibilität, Wirtschaftlichkeit, Logistikleistung und Nachhaltigkeit) durchgeführt, welche sich aus den klassischen Zielen der Netzwerkgestaltung nach Nagel (2011) ergeben. Anhand dieser Erkenntnisse sind Handlungsempfehlungen entwickelt worden, welche bei der Gestaltung von Produktionsnetzwerken helfen sollen.

#### **Beschreibung des Szenarios**

Das für diese Simulationsstudie zugrundeliegende Fallbeispiel ist ein Teil des Forschungsprojektes TransProMinC (Wandlungsfähige dezentrale Produktion für lokale Wirtschaftskreisläufe mit minimiertem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck), bei dem wandlungsfähige Systeme für die Produktion von Polylactid (PLA) untersucht wurden. PLA wird aus dem Rohstoff Molke gewonnen, wobei die Hilfsmittel Hefeextrakt und Kaliumhydroxid verwendet werden. Die Produktionskapazität eines einzelnen Standortes hängt von den dort eingesetzten modularen Anlagen ab. Als Basis für die einzelnen Anlageeinheiten und die verschiedenen Module für die Ver- und Entsorgung werden in diesem Fallbeispiel Container verwendet.

Die Quelle des betrachteten Systems stellen die Lieferanten dar, welche die einzelnen PLA-Produktionsstandorte beliefern, die wiederum die Kunden (Senke) mit dem fertigen Produkt versorgen. Die Supply-Chain beginnt dabei mit der Bestellung des Kunden bei dem PLA-Lieferanten an dem entsprechenden Produktionsstandort. Diese können die Bestellung mit Hilfe des bereits produzierten Produkts direkt aus dem eigenen Lagerbestands bedienen oder müssen die entsprechende Menge des Produkts zunächst herstellen. Abhängig von dem Gesamtbedarf des Standortes kann die Kapazität durch Numbering-up oder -down erhöht bzw. reduziert werden, wofür bei der Simulationsstudie ein spezielles Verfahren entwickelt wurde. Der fertig produzierte Kunststoff wird anschließend verpackt und mit Hilfe eines Spediteurs per Lastkraftwagen zu dem entsprechenden Kunden geliefert. Die Bestellung der für die Produktion benötigten Roh- und Hilfsstoffe erfolgt dabei in regelmäßigen Abständen bei den entsprechenden Lieferanten, wobei diese ebenfalls mit Hilfe einer Spedition zu den Standorten transportiert wird. Das betrachtete Produktionsnetzwerk spannt sich somit zwischen dem Lieferanten, der Produktion und dem Kunden auf (vgl. Abbildung 3-4).



**Abbildung 3-4: Vereinfachte Supply Chain der Kunststoff-Produktion (eigene Darstellung)**

### **Ziel der Simulationsstudie**

Der in dem untersuchten Netzwerk hergestellte Kunststoff ist ein chemisches Spezialprodukt, welcher sehr hohen Nachfrageschwankungen unterliegt. Aus diesem Grund sollen verschiedene Experimente durchgeführt werden, um ein bestmögliches Produktionsnetzwerk zu ermitteln, welches angemessen auf volatile Nachfrageschwankungen reagiert. Dafür werden verschiedene Szenarien modelliert und simuliert, die sich durch die Anzahl der Produktionsstandorte und die Stärke der Nachfrageschwankungen unterscheiden. Im Anschluss an die Simulation der einzelnen Szenarien ist eine Bewertung der verschiedenen Netzwerkvarianten auf Basis von vier Gestaltungsziele durchzuführen. Nachfolgend werden die vier Gestaltungsziele kurz erläutert.

### **Gestaltungsziele**

Das primäre Ziel bei Produktionsnetzwerken mit wandlungsfähigem System ist eine flexible Reaktion auf unterschiedlichste Einflussfaktoren. Zur Bewertung der während dieser Simulationsstudie untersuchten Konfigurationen werden die Parameter Auslastung, Wartezeit und Lagerbestand herangezogen. Die sich ständig verändernde Auslastung einer Anlage lässt darauf schließen, dass keine ausreichende Flexibilität vorliegt. Ebenso wird durch eine sehr stark variierende Wartezeit deutlich, dass die Reaktionszeit bei einem Anstieg der Bestellmenge sehr lang ist und damit eine große Anzahl an Aufträge nicht bedient werden kann. Im gleichen Maße zeigt sich dies bei dem Lagerbestand und dessen Schwankungen. Eine über dem Durchschnitt sehr große Menge an Produkten im Lager deutet darauf hin, dass nicht schnell genug auf die sinkende Marktnachfrage reagiert worden ist und es aus diesem Grund zu einer Überproduktion kam. Grundlage für reaktionsfähiges Netzwerk sind nicht vollkommen ausgeschöpfte Produktionskapazitäten, da diese Grundvoraussetzung für eine schnelle Reaktion bei einem Nachfrageanstieg sind. In der Simulationsstudie werden die Anlagen jedoch immer zu 100 % ausgelastet und damit jene Eigenschaft der reaktionsfähigen Supply Chains bei der Bewertung vernachlässigt.

Ein weiteres wichtiges Kriterium bei der Netzwerkgestaltung ist die Kostenminimierung. Das für diese Simulationsstudie zugrundeliegende Fallbeispiel weißt jedoch keine expliziten Kosten auf, weshalb auf Daten aus einem sehr ähnlichen Fallbeispiel von Becker et al. (2019) zurückgegriffen wird. Die Bewertung der Kosten erfolgt dabei anhand der Standortanzahl, der Anzahl an Transporten, der Rekonfigurationen und der Lagerbestände.

Für die Bewertung der Logistikleistung wird die durchschnittliche Wartezeit und die dazugehörige Standardabweichung ausgewertet. Die Zeit beschreibt dabei die Dauer von dem Abschicken der Bestellung durch den Kunden bis hin zur finalen Auslieferung des Produkts.

Schwankungen der Wartezeit können anschließend im Hinblick auf die Logistikleistung analysiert werden.

Die Nachhaltigkeit spielt in der Netzwerkgestaltung eine immer größere Rolle, weshalb auf dieses Gestaltungsziel für die Bewertung der durchgeführten Versuche ebenfalls zurückgegriffen wird. Ausschlaggebende Parameter sind dabei die durchgeführten Transportleistungen und der Lagerbestand der Produktionsstandorte.

### Szenarien und Systemvarianten

Die in dieser Simulationsstudie zu untersuchenden Konfigurationen variieren in der Anzahl der Produktionsstandorte und den Marktschwankungen (vgl. Tabelle 3-3). Betrachtet werden die einzelnen Konfigurationen jeweils für drei Jahre. Die dezentralen Systemvarianten unterscheiden sich in der Anzahl der Standorte. Diese variiert zwischen 5, 12 und 20, wobei die genauen Positionen der Container mit Hilfe des Clusterings durch Anwendung des k-means Algorithmus definiert wurden. Eine schematische Darstellung der Produktionsstandorte und der dazugehörigen Lieferanten und Kunden ist dem Anhang A zu entnehmen.

**Tabelle 3-3: Konfigurationen der durchgeführten Experimente**

Szenarien	Geringe Marktschwankungen	Mittlere Marktschwankungen	Starke Marktschwankungen
<b>1 Produktionsstandort</b>	1 Standort, leichte Schwankungen	1 Standort, mittlere Schwankungen	1 Standort, starke Schwankungen
<b>5 Produktionsstandorte</b>	5 Standorte, leichte Schwankungen	5 Standorte, mittlere Schwankungen	5 Standorte, starke Schwankungen
<b>12 Produktionsstandorte</b>	12 Standorte, leichte Schwankungen	12 Standorte, mittlere Schwankungen	12 Standorte, starke Schwankungen
<b>20 Produktionsstandorte</b>	20 Standorte, leichte Schwankungen	20 Standorte, mittlere Schwankungen	20 Standorte, starke Schwankungen

### Ergebnisse der Simulationsstudie

Die Ergebnisse der Bewertung der durchgeführten Simulationsstudien im Hinblick auf die vier Gestaltungsziele sind in Tabelle 3-4 dargestellt. Ein grün hinterlegtes Feld bedeutet dabei, dass das jeweilige Netzwerk in dem Gestaltungsziel gute Ergebnisse in Bezug auf die anderen Konfigurationen erzielt hat. Mit einer orangenen Einfärbung werden mittelmäßige Ergebnisse aufgeführt, während eine rote Einfärbung für schlechte Ergebnisse in Bezug auf die anderen Konfigurationen steht. Anhand der Untersuchungsergebnisse ist ersichtlich, dass in dem hier vorliegenden Fall dezentrale Netzwerkstrukturen mit fünf Standorten zu dem besten Gesamtergebnis geführt haben. Nachfolgend werden die gewonnenen Erkenntnisse aufbereitet, um anschließend eine Handlungsempfehlung für die Netzwerkgestaltung zu ermitteln.

**Tabelle 3-4: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse**

		Network			
		1 Location	5 Locations	12 Locations	20 Locations
Goals	Flexibility	-	+	0	-
	Economic efficiency	+	+	0	0
	Logistics service	-	+	0	0
	Sustainability	0	+	0	0

Good results (+)	Average results (0)	Bad results (-)
------------------	---------------------	-----------------

Im Hinblick auf das Gestaltungsziel Flexibilität zeigt sich, dass ein dezentrales Netzwerk mit flexiblen Kapazitätsanpassungen gegenüber einer zentralen Anlage mit festen Produktionsmengen vorzuziehen ist. Jedoch lassen die Ergebnisse ebenfalls darauf schließen, dass eine zu große Dezentralisierung (in diesem Fall mit 20 Standorten) in Bezug auf die Flexibilität schlechter auf Nachfrageschwankungen reagieren kann und zu einer Bildung eines hohen Lagerbestands neigt. Die Erhöhung des Lagerbestands ist darauf zurückzuführen, dass bereits eine geringfügige Unterauslastung zu der Bildung von Beständen führt. Zusätzlich dazu verursacht eine erhöhte Dezentralisierung, dass die durchschnittliche Anzahl an Kunden pro Standort sinkt und damit auch die Wahrscheinlichkeit, dass sich statistische Unter- bzw. Überschreitungen der Bestellmengen an den Standorten gegenseitig kompensieren.

Bei der Analyse der Wirtschaftlichkeit der unterschiedlichen Varianten zeigt sich eine sprunghafte Verschlechterung mit zunehmender Dezentralisierung von 5 auf 12 Produktionsstandorten. Diese ist besonders auf die erhöhte Anzahl der durchgeführten Transporte durch die Numbering-up und -down Vorgänge zurückzuführen, da dadurch höhere Gesamtkosten verursacht werden. Im Hinblick auf die Netzwerkgestaltung sind demnach die Rekonfigurationskosten ein wesentliches Kriterium.

Die Auswertung der Versuche im Hinblick auf die Logistikleistung ergibt, dass mit der Zunahme des Dezentralisierungsgrads die durchschnittliche Wartezeit verringert wird. Dies ist auf die kürzeren Transportwerte zu den Kunden zurückzuführen. Parallel dazu ist jedoch ebenfalls eine erhöhte Schwankung der Wartezeiten zu erkennen, was eine Folge der schlechten Reaktion des Netzwerks auf Nachfrageschwankungen darstellt. Beispielsweise können dabei die Varianten mit 12 und 20 Standorten genannt werden, wo infolge der Zunahme an Standorten eine stärkere Schwankung der Wartezeiten zusammen mit einer schlechteren Flexibilität zu beobachten ist. Dies führt dazu, dass es zu einer häufigen Über- und Unterauslastung der Produktion kommt und sich, infolge der Verzögerungen, die Zeit bis zum Eintreffen der Produkte bei dem Kunden verlängert. Für die Netzwerkgestaltung lässt sich somit hervorheben, dass einerseits auf geringe Kundenentfernung geachtet werden sollte, um kurze Lieferzeiten zu gewährleisten. Andererseits eine zu hohe Dezentralisierung, aufgrund der damit verbundenen Kosten, zu vermeiden ist und

daher auf eine ausgewogene Gestaltung geachtet werden muss. Anhand der untersuchten Szenarien ist zu erkennen, dass die Transportleistung mit zunehmender Dezentralisierung abnimmt. Entgegen dieser Entwicklung steigen jedoch die durchgeführten Transporte für die Rekonfigurationen der Produktionsanlagen, welche auf die höhere Nachfragevolatilität der einzelnen Standorte zurückzuführen sind.

Die evaluierten Ergebnisse lassen deshalb darauf schließen, dass sich der Einfluss der verringerten Transportentfernung zu den Kunden mit den vermehrten Transporten für die Rekonfigurationsvorgänge aufhebt. Die zentrale Netzwerkvariante fällt dagegen mit einer wesentlich höheren Transportemission auf, was auf die deutlich weiteren Transportwege zurückzuführen ist. Wird nun zusätzlich der Lagerbestand mit in die Bewertung der Simulationsergebnisse einbezogen, zeigt sich, dass mit steigendem Dezentralisierungsgrad ein Zuwachs der Lagerbestände zu verzeichnen ist und somit ebenfalls die dazugehörigen Emissionen steigen. Die Netzwerkgestaltung benötigt demnach beide Faktoren gegeneinander abzuwägen, um das bestmögliche Gesamtergebnis zu erzielen.

Nach der Untersuchung der Simulationsergebnisse lässt sich festhalten, dass die Flexibilität das primäre Ziel bei der Gestaltung der Produktionsnetzwerke wandlungsfähiger Systeme ist, um schnell auf die Volatilitäten der Nachfrage reagieren zu können. Zusätzlich hat die durchgeführte Studie demonstriert, dass eine hohe Flexibilität weitere Ziele der Netzwerkgestaltung, wie beispielsweise die Logistikleistung, positiv beeinflusst. Entgegen der hohen Flexibilität von dezentralen Netzwerken weisen klassische zentrale Netzwerkstrukturen diese nur sehr bedingt auf. Dennoch ist zu beachten, dass eine zu hohe Dezentralisierung wiederum einen negativen Einfluss auf die Flexibilität des Netzwerkes hat. Die aufgrund der hohen Anzahl an Produktionsstandorten vermehrt durchgeführten Transporte der Anlagen zur Kapazitätsanpassungen durch Nachfrageschwankungen gleichen die Einsparungen durch kürzere Transportwege zu den Kunden aus. Häufig sind diese sogar höher und führen zu hohen Transportkosten und -emissionen, welche zu deutlich schlechteren Ergebnissen der Gestaltungsziele Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit führen.

Alles in allem hat diese Versuchsreihe gezeigt, dass ein optimaler Dezentralisierungsgrad für Produktionsnetzwerke von wandlungsfähigen Systemen von großer Bedeutung ist. Demzufolge ist ein Dezentralisierungsgrad zu wählen, welcher eine möglichst kurze Entfernung zu den Kunden gewährleistet, aber auch eine geringe Anzahl an Anpassungen der Produktionskapazitäten an den Standorten erlaubt.

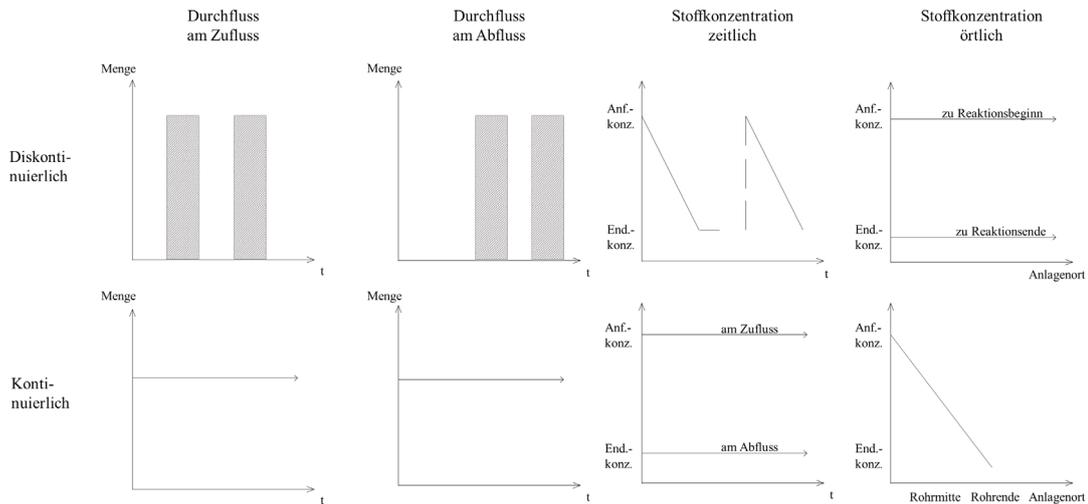
## **4 Positionierung der modularen Produktionsanlagen innerhalb eines Chemieparks unter Berücksichtigung der Produktionsstrukturen und Logistik**

Das Ziel des dritten Arbeitspakets besteht aus der Positionierung der modularen Produktionsanlagen innerhalb eines Chemieparks unter Berücksichtigung der Produktionsstrukturen und Logistik. Dies umfasst die Planung der Anordnung im Hinblick auf die Anforderungen der logistischen und technischen Infrastruktur. Dafür kommt es zu Beginn zu einem Vergleich der kontinuierlichen und diskontinuierlichen Produktionsprozesse, welche die Möglichkeit der Integration von modularen Anlagen in bestehende Fertigungsstrukturen der Batch-Prozesse herausstellt. Anschließend wird eine Anordnungsplanung anhand der logistischen und technischen infrastrukturellen Voraussetzungen für die witterungsgeschützte Positionierung innerhalb eines Chemieparks durchgeführt. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen werden die notwendigen Bedingungen auf Anlagen für die Produktion im Freien erweitert. Zuletzt kommt es anhand einer Simulationsstudie zu einer Evaluierung der Anordnung der ermittelten logistischen Flächen in Verbindung mit der Produktion wandlungsfähiger Systeme. KMU erhalten in diesem Kapitel einen Einblick in die benötigten infrastrukturellen Einrichtungen rund um den Betrieb modularer Anlagen in Abhängigkeit der verschiedenen Produktionsstandorte, welche für den Einsatz notwendig sind.

### **4.1 Prozessabläufe in der Chemieindustrie**

Infolge der Recherchen zu den verschiedenen Prototypanlagen wurden unterschiedliche Fertigungsverfahren in der Chemieindustrie genannt, welche mit Hilfe wandlungsfähiger Systeme durchgeführt werden können. Zur besseren Verständlichkeit der Fertigungsprozesse werden diese in dem folgenden Kapitel vorgestellt und die Unterschiede hervorgehoben.

In der chemischen Industrie wird zwischen einem kontinuierlichen und einem diskontinuierlichen Produktionsfluss unterschieden. Während beim kontinuierlichen Materialfluss vermeintlich keine Mengenabgrenzung vorhanden ist, erfolgt die Produktion bei einem diskontinuierlichen Materialfluss häufig in Batches. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass der kontinuierliche Materialfluss ein produktionstechnisches Merkmal der Basischemie ist. Die dort verwendeten Monoanlagen produzieren einen konstanten Massenstrom mit fortlaufendem Zu- und Abfluss, während bei den oft mit dem diskontinuierlichen Materialfluss stehenden Mehrzweckanlagen zunächst die Anlage mit einem Reaktionsgemisch gefüllt wird (s. Abbildung 4-1). Nach der Beendigung der erforderlichen Reaktionszeit wird im nächsten Schritt das Reaktionsgemisch entnommen und in anderen Produktionsanlagen weiterverarbeitet. Die Kapazität der Mehrzweckanlage ist dabei ausschlaggebend für die Größe eines Batchs. (Loos 1997)



**Abbildung 4-1: Idealtypische diskontinuierliche und kontinuierliche Prozessabläufe (Loos 1997)**

Die Vorteile der diskontinuierlichen Verfahrensweise liegen bei einer großen Anlagenflexibilität und einer verkürzten Markteintrittszeit neu entwickelter Produkte, während bei einer kontinuierlichen Verfahrensweise die produktionslogistischen Aspekte weniger komplex sind. Die geringe Komplexität der kontinuierlichen Verfahren ergibt sich aus den Anforderungen an die Materialbereitstellung, die sich sowohl aus den Prozesseigenschaften als auch aus dem verwendeten Ordnungsprinzip der Produktionsablauforganisation ableiten lassen. Mengen und Anlieferungszeitpunkte sind in der kontinuierlichen Produktion streng einzuhalten, da eine Abweichung von den Zeiten zu einer Unbrauchbarkeit der gesamten Charge führt. In kontinuierlichen Produktionsprozessen wird i. d. R. das Fließprinzip verwendet, wobei die Anordnung der Anlage durch die produktionspezifischen Prozessansprüche bestimmt wird. Das Fließprinzip sieht daher eine Anordnung in Flussrichtung des Produktionsprozesses mit aufeinander folgenden Prozessschritten vor. Mit dem Fließprinzip lassen sich Durchlaufzeiten reduzieren und Transportwege effizienter gestalten. (Loos 1997)

Bei diskontinuierlichen Produktionen wird hingegen das Funktionsprinzip genutzt. Bei dem Funktionsprinzip werden die Produktionsanlagen nach ihren Verrichtungsarten angeordnet. In der chemischen Produktion werden bspw. Reaktionsanlagen getrennt von den Filteranlagen positioniert. Die Produktionsanlagen der einzelnen Verrichtungsarten werden im Anschluss an die Clusterung nach dem Flussprinzip aufgebaut. (Loos 1997)

Die rund um die Produktion von wandlungsfähigen Systemen benötigte Infrastruktureinrichtung in Verbindung mit den logistischen Prozessen werden dabei explizit durch die ausgewählten Fertigungsprinzipien beeinflusst. Im speziellen Fall der modularen Produktion kommen insbesondere die Fertigungsprinzipien Make-to-Order und Engineer-to-Order infrage, da diese keine Prognosen der Nachfragemengen benötigen. In diesem Anwendungsfall sind Prognosen aufgrund der kurzen Produktlebenszyklen und dem hohen Individualisierungsgrad schwierig zu tätigen. Das Make-to-Order Prinzip setzt einen Auftragseingang für den Start der Produktion voraus. Zwar können mithilfe dieses Fertigungsprinzips die Lagerbestände geringgehalten werden, jedoch entstehen zugleich lange Lieferzeiten. Der Kundenauftragsentkopplungspunkt liegt beim Make-to-Order nach der Entwicklung. Das Fertigungsprinzip Engineer-to-Order kommt bei kundenindividuellen Produkten zum Einsatz, die teilweise zum

ersten Mal produziert werden. Dementsprechend ist im Vergleich zum Fertigungsprinzip Make-to-Order bereits der Entwicklungsprozess kundenspezifisch und der Kundenauftragsentkopplungspunkt somit im Bereich der Entwicklung verortet. (Logistik KNOWHOW 2013)

Obwohl es sich bei modularen Produktionsprozessen um eine kontinuierliche Fertigung handelt, ähneln die logistischen Prozesse denen einer Batch-Produktion. Modulare Anlagen und Batch-Anlagen bieten die Vorteile einer größeren Anlagenflexibilität, geringen Produktionsmengen und einer kürzeren Time-to-Market. Sowohl bei Batch-Anlagen als auch bei modularen Anlagen erfolgt die Produktion nach Aufträgen, wodurch anstatt auf die Strategie der Vorratsbeschaffung vermehrt auf die Strategie einer Einzelbeschaffung zurückgegriffen wird. Modulare Anlagen und Batch-Anlagen stellen Mehrzweckanlagen dar, auf denen nach einer kurzen Umrüstzeit ein anderes Produkt produziert werden kann. Das ist vorteilhaft für kurze Produktlebenszyklen und für die Produktion von Spezialchemikalien. Durch die Anwendung der Fertigungsprinzipien Make-to-Order und Engineer-to-Order erfolgen die Produktion bedarfsgerecht und auf den Kunden zugeschnitten. Zwar gibt es zahlreiche Parallelen zwischen den logistischen Prozessen der beiden Anlagentypen, jedoch muss der Materialzufluss bei modularen Anlagen stetig sein. Deshalb wird an die Logistik die Anforderung gestellt, immer ausreichend Materialien an der Produktionsanlage zwischenzupuffern.

Alles in allem zeigt sich, dass die modularen Anlagen im Hinblick auf die Untersuchung der Prozessabläufe und der Fertigungsstrategien in bestehende Strukturen der Batch-Fertigung integriert werden können. Dennoch muss überprüft werden, ob die bestehenden Strukturen ausreichen, um eine kontinuierliche Materialbereitstellung zu gewährleisten. Auf Basis der Erkenntnisse bietet sich eine Platzierung der Anlage in einem Chemiepark an. Des Weiteren gilt es zu untersuchen, ob die Ressourcen- und Betriebsmittelplanung der Batch-Fertigung den Anforderungen der modularen Produktion genügen (vgl. Kapitel 5).

## 4.2 Notwendige Infrastruktureinrichtungen

Im Rahmen der Evaluierung der notwendigen Infrastruktureinrichtungen werden die Anforderungen an die innerbetriebliche Positionierung wandlungsfähiger Systeme identifiziert und anschließend anhand einer Simulationsstudie bewertet. Zu Beginn dieses Kapitels kommt es jedoch für eine strukturierte Herangehensweise zu einer Betrachtung des Arbeitssystems, in der die modularen Produktionsanlagen integriert werden können.

Nach der REFA-Consulting AG und DIN EN ISO 6385:2016 stellen Arbeitssysteme das Zusammenspiel zwischen Betriebsmittel und Menschen unter Berücksichtigung des Arbeitsablaufs und der Arbeitsaufgabe dar. Zusätzlich werden Wechselwirkungen mit der Umwelt, den Ein- und Ausgabeparametern sowie den Systemelementen, die innerhalb der Systemgrenzen liegen, betrachtet.

Die Übertragung der Systemelemente des Arbeitssystems auf die chemische Industrie dient der Ermittlung der optimalen innerbetrieblichen Positionierung modularer Anlagen. Mithilfe eines paarweisen Vergleichs (2 = wichtiger, 1 = genauso wichtig, 0 weniger wichtig) können Systemelemente, die den größten Einfluss auf die innerbetriebliche Positionierung von modularen Produktionsanlagen haben, identifiziert werden. Diese Systemelemente sind die Eingabe, die die Bereitstellung der benötigten Medien umfasst, die Ausgabe, welche alle Erzeugnisse, die den

Produktionsprozess verlassen, beinhaltet sowie die Betriebsmittel, die bei modularen Anlagen die Anlage selbst umfassen.

wichtiger als	Eingabe	Arbeitsaufgabe	Arbeitsablauf	Betriebsmittel	Mensch	Ausgabe	Umwelteinflüsse	Summe	Gewichtung
<b>Eingabe</b>		2	2	0	2	1	2	9	24 %
<b>Arbeitsaufgabe</b>	0		1	0	1	0	0	2	5 %
<b>Arbeitsablauf</b>	0	1		0	1	0	0	2	5 %
<b>Betriebsmittel</b>	2	2	2		2	2	2	12	27 %
<b>Mensch</b>	0	1	1	0		0	0	2	5 %
<b>Ausgabe</b>	1	2	2	0	2		2	9	21 %
<b>Umwelteinflüsse</b>	0	2	2	0	2	2		6	14 %
								<b>Summe</b>	42 100 %

Abbildung 4-2: Paarweiser Vergleich der Systemelemente (eigene Darstellung)

Das Arbeitssystem mit denen für die innerbetriebliche Positionierung wichtigen Elementen lässt sich in ein Materialflussdiagramm (s. Abbildung 4-3) überführen. Bei der Identifizierung der Infrastruktureinrichtungen sind vor allem die TUL-Prozesse (Transport, Umschlag und Lagerung), die an den Schnittstellen zwischen der Eingabe bzw. Ausgabe und den Betriebsmitteln der modularen Anlage entstehen, entscheidend.

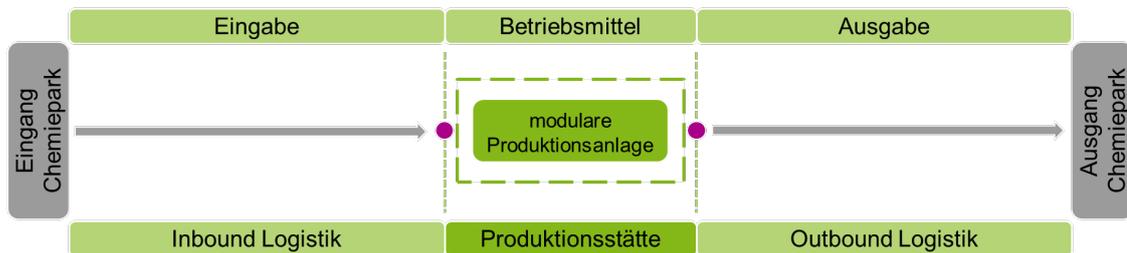
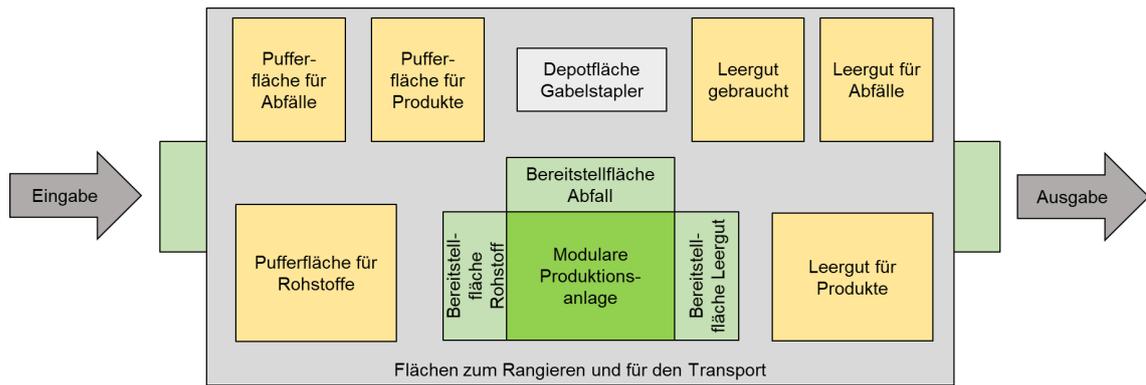


Abbildung 4-3: Materialfluss bei modularen Produktionsanlagen (eigene Darstellung)

Der dargestellte Materialfluss ist bei der Positionierung im Freien oder in einer Halle identisch, setzt jedoch unterschiedliche Anforderungen voraus. Für die Positionierungsoptionen werden im Folgenden jeweils die logistische und die technische Infrastruktur beschrieben. Bei der Untersuchung der benötigten logistischen Infrastruktur werden die Schnittstellen zwischen der Produktionsanlage und den Systemelementen, Eingabe und Ausgabe, untersucht sowie vorhandene Logistikprozesse mit einbezogen. Bei der Definition der benötigten technischen

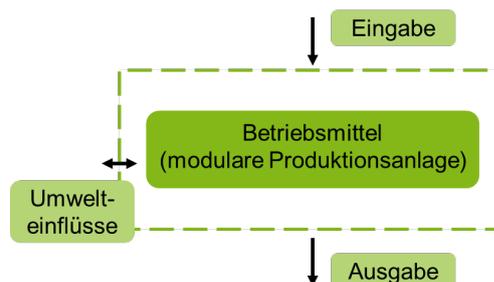
Infrastruktur werden Aspekte der baulichen Erschließung und Voraussetzungen für die Betriebsmittel beachtet. Dabei werden insbesondere die Schnittstellen zu den Prozessmedien hervorgehoben.

Anhand der durchgeführten Untersuchungen rund um die Positionierung einer modularen Anlage innerhalb einer Halle eines Chemieparks können benötigte Bestandteile einer logistischen Infrastruktur ermittelt werden, welche in Abbildung 4-4 in Form einer schematischen Darstellung aufgeführt sind. Ausgehend von einem Transport vom Logistikzentrum zur modularen Anlage werden, nachdem die Rohstoffe vom Transportfahrzeug entladen und bedarfsweise auf **Pufferflächen** zwischengepuffert worden sind, diese für den Betrieb der modularen Produktionsanlage bereitgestellt. Hierfür wird eine **Bereitstellfläche** an der modularen Produktionsanlage benötigt. Über ein Schlauch- bzw. Rohrsystem werden die anorganischen und organischen Rohstoffe anschließend aus den Behältnissen in die modulare Produktionsanlage gepumpt, sodass nach vollständiger Entleerung auch eine **Pufferfläche für das Leergut** benötigt wird. Da die Spezialchemikalie, welche das Ergebnis des stattfindenden chemischen Prozesses ist, ebenfalls für den Transport oder die Einlagerung in leere Behältnisse gepumpt werden muss, wird hierfür gleichermaßen eine **Bereitstellfläche für das Leergut** benötigt. Diese sollte sich an der modularen Produktionsanlage befinden, damit auch hier über ein Schlauch- bzw. Rohrsystem, die Spezialchemikalie in die leeren Behälter gepumpt werden kann. Durch den Umstand, dass sich nach dem Befüllungsvorgang in den leeren Behältnissen der Rohstoffe noch Reste befinden könnten, sind diese für den Abfüllvorgang nicht geeignet. Dementsprechend wird eine zusätzliche bzw. erweiterte Pufferfläche für **gereinigtes Leergut** benötigt. Wenn die Behälter mit der Spezialchemikalie nicht direkt nach dem Abfüllvorgang abtransportiert werden, ist eine Zwischenlagerung und damit eine **Pufferfläche** erforderlich. Neben der gewünschten Spezialchemikalie können bei einem chemischen Prozess auch Abfall- oder Kuppelprodukte anfallen. Bei letzterem handelt es sich um Produkte, die als Ausgangsstoffe für andere Erzeugnisse zum Einsatz kommen. Auch hier wird wiederum für den Abfüllvorgang der **Abfall- sowie Kuppelprodukte eine Bereitstellfläche** an der modularen Produktionsanlage, eine **Pufferfläche für die leeren Behälter** und eine **Fläche zur Zwischenpufferung**, wenn kein direkter Abtransport stattfindet, benötigt. Darüber hinaus sind **Flächen zum Rangieren und für den Transport** innerhalb der Produktionsstätte und eine **Depotfläche für die Flurförderfahrzeuge** essentiell.



**Abbildung 4-4: Infrastruktureinrichtung bei Positionierung einer modularen Anlage in einer Halle (eigene Darstellung)**

Über die logistischen Anforderungen an die Positionierung einer modularen Anlage in geschlossenen Räumen hinaus, sind die Anforderungen für einen Betrieb im Freien zu untersuchen. Hierfür muss zunächst das Grundstück erschlossen und für den Betrieb einer modularen Anlage vorbereitet werden. Bei der Erschließung des Grundstücks ist sowohl der benötigte Flächenbedarf für die Anlage und für die logistische Infrastruktur einzukalkulieren als auch die Belastbarkeit des Bodens hinsichtlich der mechanischen und chemischen Widerstandsfähigkeit zu überprüfen. Um die Anbindung an ein Verkehrsnetz sicherzustellen müssen Zufahrten geplant werden, wobei die Wandlungsfähigkeit des Standorts erhalten bleiben sollte. Abbildung 4-5 zeigt, dass modulare Anlagen nicht nur von den Systemelementen Eingabe und Ausgabe beeinflusst werden, sondern auch Umwelteinflüssen ausgesetzt sind. Durch den Umstand, dass im Vergleich zur Halle keine geschützte Umgebung vorhanden ist, sind sowohl die Infrastruktureinrichtungen als auch die modulare Produktionsanlage den Witterungsverhältnissen ausgesetzt und müssen somit anderweitig geschützt werden, um eine Beeinflussung der Produktionsprozesse durch bspw. Witterungseinflüsse zu verhindern.



**Abbildung 4-5: Arbeitssystem einer modularen Anlage bei Positionierung im Freien (eigene Darstellung)**

Zu den Anforderungen an die technische Infrastruktur zählt der Flächen- und Raumbedarf. Dieser orientiert sich an den Maßen der Produktionsanlage, die i. d. R. die Maße eines ISO-Containers hat. Je nach Anzahl und Anordnung der ISO-Container steigt bzw. sinkt der Raum- und Flächenbedarf, derweil das zulässige Gesamtgewicht eines ISO-Containers bis zu 32,3 t betragen kann. Für die Standsicherheit, die Isolierung und den Schutz vor Schwingungen müssen die Bodenbelastbarkeit und ggf. eine Fundamentierung gegeben sein. Da jedoch der ISO-Container über eine gewisse Eigensteifigkeit verfügt und die Annahme getroffen wird, dass

mögliche Schwingungen aufgrund des geringen Maßstabes der modularen Produktionsanlage keinen entscheidenden Einfluss auf den Betrieb haben, ist in den meisten Fällen ein entsprechendes Fundament nicht erforderlich. Für die Nutzung des Hallenbodens als Aufstellfläche muss die Ebenheit des Bodens sowie die Druck- und Explosionsklasse erfüllt sein.

Die Positionierung innerhalb einer Halle erfordert eine bauliche Umhüllung in Form einer Fassade und einem Dach. Zusätzlich müssen Öffnungselemente für den Austausch mit der Umwelt gegeben sein. Die für die Konzipierung dieser Elemente wichtigsten Faktoren sind die logistischen Prozesse, welche den größten Anteil am Austausch mit der Umwelt darstellen. Die Öffnungselemente sind folglich so zu gestalten, dass eine reibungslose Anlieferung und Abholung gewährleistet und zusätzlich die modulare Anlage in die Halle befördert werden kann. Des Weiteren muss die Halle über Anschlüsse verfügen, welche die für den Betrieb essentiellen Prozessmedien bereitstellen. Die Anschlüsse der Prozessmedien sind dabei bewusst nicht der logistischen Infrastruktur zugeordnet, da diese dauerhaft an dem Aufstellort der modularen Anlagen verfügbar sein sollen. Eine Analyse der untersuchten Anlagen und des Portfolios der drei größten Chemieparks (Chemiepark Marl, Chempark Leverkusen und Industriepark Höchst) ergibt, dass dafür folgende Anschlüsse verfügbar sein sollten: (Infraserv GmbH & Co. Höchst KG 2020; Evonik Technology & Infrastructure GmbH 2019; Currenta GmbH & Co. OHG (o.D.) 2020)

**Tabelle 4-1: Energie- und Medienversorgungsangebot in Chemieparks**

<b>Strom</b>	Niederspannung	Hochspannung
	Mittelspannung	
<b>Brenngase</b>	Erdgas	Reinmethan
	Heizgas	Ethylen
	Rohmethan	Wasserstoff
<b>Dampf</b>	mit verschiedenen Druckstufen	
<b>Druckluft</b>	mit verschiedenen Druckstufen	
<b>Kälte</b>	verschiedene Kältestufen	Kühlsole
	Kaltwasser	Ammoniak-Kälte
<b>Luftgase</b>	Sauerstoff	Stickstoff
	Argon	
<b>Schwefelsäure</b>	in verschiedenen Formen	
<b>Wärme</b>	Niedertemperaturwärme	Warmwasser
<b>Wasser</b>	Kühlwasser	Rohwasser
	enthärtetes Wasser	Flusswasser
	vollentsalztes Wasser	Löschwasser
	Fabrikspisewasser	Reinwasser
	Trinkwasser	Pharma-Reinstwasser

Zum Teil lässt sich die Bereitstellung der Prozessmedien auch ohne feste Anschlüsse ermöglichen. Dies kann beispielsweise die Bereitstellung der Brenn- und Luftgase (mit

Ausnahme von Erdgas und Stickstoff) in Gasflaschen oder die Schwefelsäure in Behältern sein. Diese bleiben nicht dauerhaft an dem Aufstellort und müssen somit bei der Auslegung der logistischen Infrastruktur einkalkuliert werden. Neben der Versorgung mit Medien muss außerdem ein Anschluss zu einem Entsorgungssystem bestehen. Dabei bezieht sich die Entsorgung hinsichtlich der technischen Infrastruktur auf das Abwasser und die Abgase, welche während eines chemischen Produktionsprozesses anfallen und über Rohr bzw. Gasleitungen entsorgt werden können (Suntrop 2016). Die infrastrukturellen Voraussetzungen für Abfälle aus den Produktionsanlagen, die nicht über Rohr- bzw. Gasleitungen entsorgt werden, sind bei der logistischen Infrastruktur bereits berücksichtigt worden.

An die technische Infrastruktur bei der Positionierung einer modularen Anlage im Freien werden ähnliche Anforderungen gestellt, jedoch muss der Aufstellort zusätzlich noch erschlossen werden. Da keine bauliche Umhüllung gegeben ist, müssen Maßnahmen zum Schutz der Anlage vor Witterungseinflüssen getroffen werden. Diese Maßnahmen können ein (Vor-)dach zum Schutz vor Niederschlag und Sonneneinstrahlung sowie feuerfeste Streifenvorhänge umfassen. Neben dem Schutz der Anlage müssen darüber hinaus die Puffer- und Bereitstellflächen vor den klimatischen Einflüssen geschützt werden, um die erforderliche Qualität der Rohstoffe und Produkte zu sichern. Demnach muss sowohl bei der Positionierung in der Halle als auch im Freien, die Verfügbarkeit der Prozessmedien gewährleistet werden.

Als Beispiel für die Positionierung in einer Halle kann ein Chemiepark als Aufstellort dienen, da im Chemiepark alle Anschlüsse und die logistische Infrastruktur bereits vorhanden sind. Die Positionierung im Freien lässt sich mit einer Produktion der Waren bei dem Kunden vor Ort vergleichen. I. d. R. sind an diesen Stätten keine Anschlüsse für Prozessmedien vorhanden, weshalb die logistische Infrastruktur neu geplant werden muss, was wiederum bei der Erschließung des Grundstückes zu berücksichtigen ist.

### **4.3 Evaluierung der Anordnungsplanung anhand einer Simulationsstudie**

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde ein weiteres Simulationsmodell entwickelt, welches neben der Ermittlung des optimalen Layouts der logistischen Flächen, rund um die wandlungsfähigen Systeme, die Untersuchung logistischer Prozesse ermöglichen soll, die in Kombination mit der modularen Produktion in einem Chemiepark auftreten. Als Beispiel wurde dabei der Chemiepark Marl ausgewählt. Im Fokus steht bei diesen Versuchsreihen die Betrachtung der intralogistischen Prozesse, die die Transporte zur Versorgung der modularen Anlage mit Rohstoffen und Leergut beinhalten sowie die Abholung der produzierten Produkte und der während der Produktion anfallenden Abfälle. Zusätzlich bildet das Simulationsmodell extralogistische Transporte, die Anlieferung von Rohstoffen und die Abholung von den fertigen Produkten ab. Zur realitätsgetreuen Nachbildung der logistischen Prozesse, werden bei den Transporten die Warte-, Be- und Entlade- sowie die Fahrzeiten berücksichtigt. Bei den extralogistischen Prozessen werden bspw. das Verwiegen und die Anmeldung beachtet. Neben der modularen Anlage und deren Infrastruktureinrichtungen werden in diesem Modell das Haupt- und das Leergutlager abgebildet. Die Produktionsdaten und weitere relevante Informationen werden über Schnittstellen aus verschiedenen Excel-Dateien importiert. Die hierbei verwendete

Schnittstelle über Excel stellt nur ein Beispiel dar. Ferner ist es wie bereits erwähnt möglich, Informationen direkt über ERP-Systeme in ein Simulationsmodell einfließen zu lassen.

Die Prozesse im Simulationsmodell werden auftragsspezifisch für verschiedene Produktionsvolumina angepasst. Neben dem Produkt selbst fallen unterschiedlichste Abfälle an. Für die fertigen Produkte und die Abfälle wird sauberes Leergut bereitgestellt, um mögliche chemische Reaktionen und Verunreinigungen zu verhindern. Die dabei zum Einsatz kommenden Leergutbehälter werden in drei verschiedene Arten, für Produkte, Rohstoffe und Abfälle, differenziert. In dem hier konzipierten Modell werden alle Produkte, Rohstoffe und Abfälle in einem Intermediate Bulk Containern (IBC) mit einem Fassungsvermögen von 800 Litern gelagert, transportiert und abgefüllt. Die Art des Behälters und das dazugehörige Fassungsvermögen lässt sich jedoch individuell anpassen und kann zwischen den Versuchsreihen verändert werden. Neben den Produktionsprozessen wird ebenfalls der zeitaufwendige Rüstprozess berücksichtigt, welcher die Umstellung der Produktion von dem einen Produkt auf ein anderes Produkt darstellt.

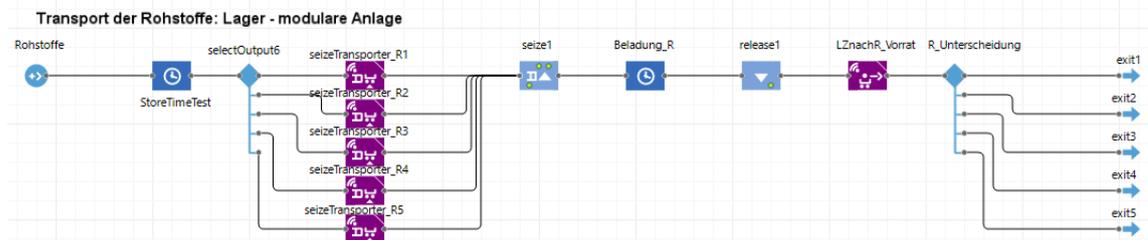
Darüber hinaus kann zwischen zwei verschiedenen Fahrzeugkategorien unterschieden werden. Bei der ersten Kategorie handelt es sich um die extralogistischen Fahrzeuge, welche für die Anlieferung der Rohstoffe zu dem Hauptlager und dem Transport der Produkte zu dem Kunden zuständig sind. Die zweite Kategorie, die innerbetrieblichen Fahrzeuge (meist in Form von Gabelstapler dargestellt), können wiederum in zwei verschiedene Zuständigkeitsbereiche unterteilt werden. In dem ersten Zuständigkeitsbereich transportieren die Mitarbeiter mit Hilfe der Flurfördermittel das Leergut und die Rohstoffe zu den Pufferflächen der Anlage und bringen anfallendes Leergut, Abfälle und Produkte zu den entsprechenden Sammelstellen (bspw. Sammelstelle für die Reinigung der Behälter) zurück. Zusammengefasst hat diese Gruppe der innerbetrieblichen Fahrzeuge die Aufgabe die Behälter zu der Anlage zu befördern oder umgekehrt und bewegt sich damit zumeist auf dem Werksgelände. Die Mitarbeiter des zweiten Zuständigkeitsbereiches sind dagegen für den Transport der Güter in der Nähe der Anlage zuständig und versorgen die Anlage mit ausreichenden Rohstoffen von den Pufferflächen oder transportierten volle Behälter von der Anlage auf die Zwischenlagerflächen. Die dafür benötigte Anzahl an Mitarbeitern lässt sich mit Hilfe des Simulationsmodells bestimmen und in Form der Auslastung der verschiedenen Mitarbeiter evaluieren.

Der Ablauf der Prozesse im Simulationsmodell gestaltet sich wie folgt: Die Anlieferung der Rohstoffe für den gesamten Chemiepark wird durch die extralogistischen Fahrzeuge durchgeführt. Diese erfolgt dabei nach einem festen Fahrplan, welcher unabhängig von dem aktuellen Produktionsplan rund um die Anlage abläuft. Dies ist darauf zurückzuführen, dass zu dem Zeitpunkt der Implementierung des Modells keine Daten vorlagen, die den Bedarf an Rohstoffen für den gesamten Chemiepark beinhalten. Aus diesem Grund wird in diesem Modell davon ausgegangen, dass sich zu jedem Zeitpunkt ausreichend Rohstoffe für die Produktion der modularen Anlage in dem Lager des Standortlogistikers des Chemieparks befinden. Für die visuelle Darstellung und die bessere Verständlichkeit wurden dennoch extralogistische Fahrzeuge implementiert. Wie bereits erwähnt, erfolgt die Anlieferung nach einem festen Fahrplan, wobei die Fahrzeuge in diesem Modell verschiedene Verzögerungsbausteine durchlaufen. Diese stellen dabei Vorgänge wie die Anmeldung an der Pforte und das anschließende Wiegen dar. Jedes extralogistische Fahrzeug enthält nur einen Rohstoff, da es sich um einen Tankauflieger handelt. Die Übergabe der Rohstoffe an das Lager erfolgt in einer zugewiesenen Entladezone.

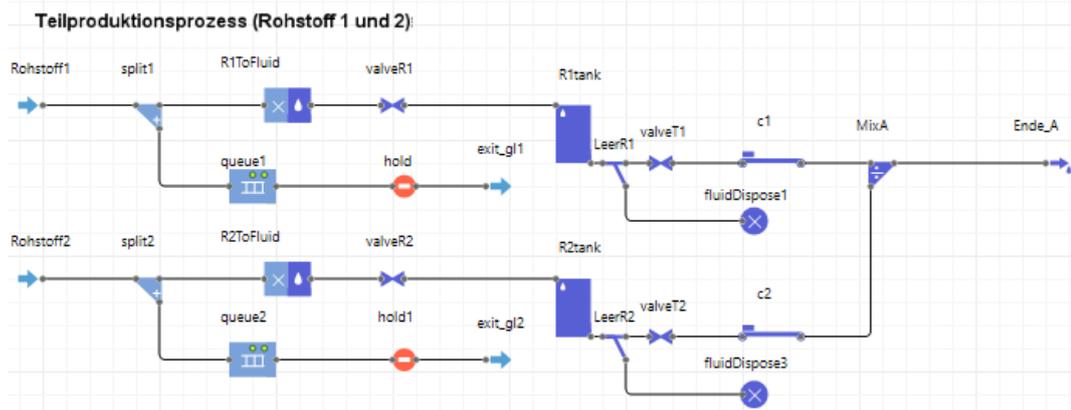
Unabhängig von diesem Prozess führt die modulare Produktionsanlage die Aufträge des Produktionsplans sequenziell aus. Der Produktion wird jedoch ein Rüstvorgang vorgeschaltet, währenddessen nicht produziert werden kann. In diesem Zeitraum werden ebenfalls die Rohstoffe und benötigten Leergutbehälter für die Produktion angefordert. Den Transport dieser übernehmen dabei die innerbetrieblichen Fahrzeuge für den Werksverkehr. Diese transportieren die angeforderte Menge an Rohstoffen und Leergutbehältern von dem zentralen Lager des Chemieparks zu den ausgewiesenen Pufferflächen der modularen Anlage. Die Menge an transportierten Behältern pro Fahrzeug und pro Strecke hängt dabei von dem jeweiligen Transportmittel ab. Von den Pufferflächen werden die Behälter anschließend von den Mitarbeitern rund um die Anlage zu den Bereitstellflächen gebracht.

Während des Produktionsprozesses werden die Rohstoffe von den Leergutbehältern getrennt und mit einem festgelegten Mischungsverhältnis zu einem Produkt zusammengeführt. Das Mischungsverhältnis sowie die benötigten Rohstoffe und Mengen werden von den Produktionsaufträgen festgelegt. Um einen kontinuierlichen Zufluss der Rohstoffe zu gewährleisten, wird der Nachschubbedarf überwacht und rechtzeitig eine Nachschublieferrung im Hauptlager angestoßen. Damit ermöglicht dieses Modell ebenfalls die Untersuchung, ab welchem Füllstand Nachschub geordert werden muss, damit es zu keinem Stillstand der Produktion kommt. Im Laufe des Produktionsprozesses füllen sich die Leergutbehälter für das Produkt und die Abfälle. Sobald diese eine vorab definierte Anzahl erreicht haben, werden sie durch die Mitarbeiter der Anlage für die Abholung auf Pufferflächen bereitgestellt. Das gebrauchte Leergut wird direkt zum Reinigungslager transportiert, während die Produkte und Abfälle mithilfe der Gabelstapler zum Hauptlager befördert werden. Wie auch die Anlieferung erfolgt die Abholung über einen Fahrplan.

Im Simulationsmodell, das mit der Simulationssoftware AnyLogic erstellt wurde, werden die beschriebenen Prozesse in Ablaufdiagrammen mithilfe von Bausteinen dargestellt. Für die einzelnen Prozesse, z. B. die Transportprozesse vom Logistikzentrum zur modularen Anlage (s. Abbildung 4-6) oder den Produktionsprozess (Abbildung 4-7), sind im Simulationsmodell separate Ablaufdiagramme hinterlegt, die in den jeweiligen Bausteinen Logik für den gewünschten Ablauf enthalten. In der Logik werden Orte oder andere Agenten im Simulationsmodell angesprochen und das Verhalten der Agenten beeinflusst.

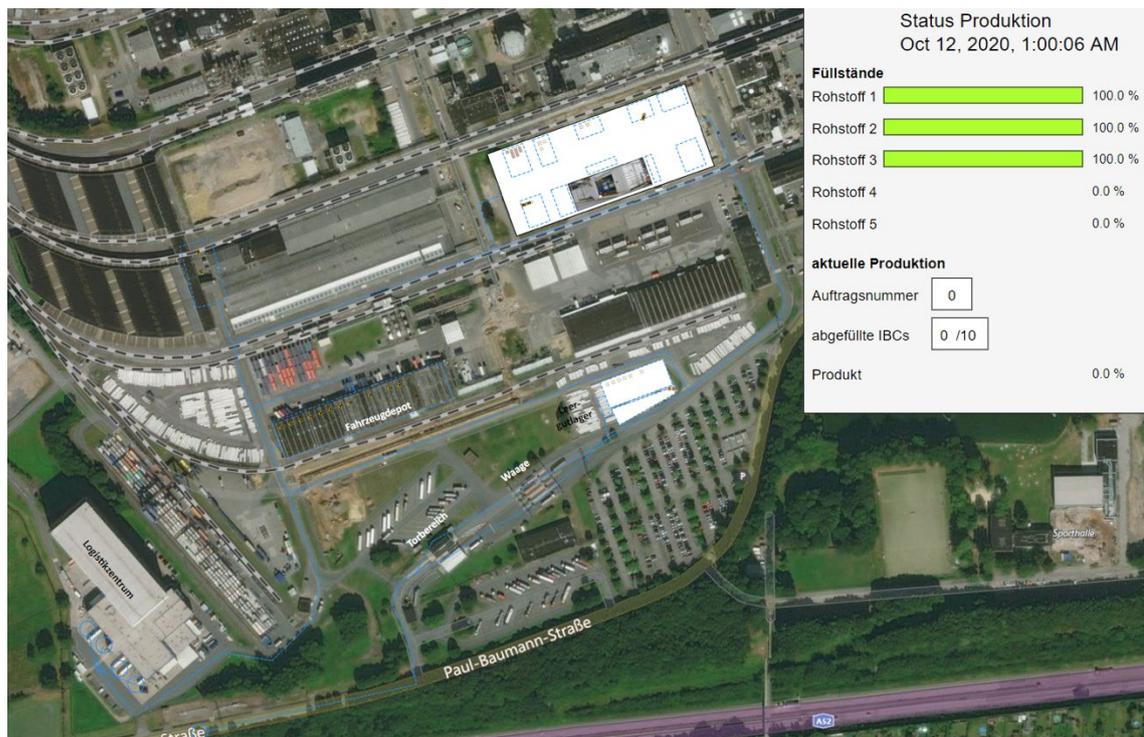


**Abbildung 4-6: Ablaufdiagramm der Transport für die Rohstoffe vom Logistikzentrum zur modularen Anlage (eigene Darstellung)**



**Abbildung 4-7: Teilproduktionsprozess der modularen Anlage mit Behälterabgabe (eigene Darstellung)**

Wie zuvor erläutert, liegt dem Simulationsmodell, für den Betrieb der modularen Anlage, ein Produktionsstandort im Chemieparks Marl zugrunde. Zusätzlich wurden Einrichtungen wie das Logistikzentrum und ein Fahrzeugdepot definiert, die mit Gabelstaplern über Pfade erreichbar sind. Während eines Simulationslaufs kann der Status der Produktion abgefragt werden, der Informationen bezüglich der Füllstände der Rohstoffe, des aktuell produzierten Auftrags und des aktuellen Erfüllungsgrads des Auftrags liefert.



**Abbildung 4-8: Darstellung der modularen Anlage und wichtiger logistischer Einrichtungen auf dem Betriebsgeländes des Chemieparks Marl (eigene Darstellung)**

Das Simulationsmodell bietet zahlreiche Möglichkeiten der individuellen Anpassung an das betrachtete System. Um verschiedene Untersuchungen am Simulationsmodell durchführen zu können, lassen sich fast alle Parameter und Variablen anpassen. Dadurch ist eine Evaluierung des

Einfluss einzelner Faktoren auf Teilbereiche bzw. ebenfalls das gesamte System machbar. Denkbare Untersuchungsgegenstände des Simulationsmodells können dabei sein:

**Tabelle 4-2: Untersuchungsgegenstände im Simulationsmodell**

Untersuchungsgegenstand	Analysemöglichkeiten	Anpassungsbereich
<b>Anzahl an Mitarbeiter (modulare Anlage)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auslastung der Agenten des Depots der modularen Anlage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anzahl der Gabelstapler bei Start der Simulation</li> </ul>
<b>Anzahl an Mitarbeiter (Chemiepark gesamt)</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Auslastung der Agenten für den gesamten Chemiepark</li> <li>2. Agentenauslastung in der Ladezone</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>3. Transporterflotte</li> <li>4. Ressourcenpools</li> </ol>
<b>Anordnungsplanung rund um die Anlage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zurückgelegte Distanz der Agenten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterschiedliche Anordnungen der logistischen Flächen</li> </ul>
<b>Lagerkapazitäten an der Anlage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auswirkungen auf die Produktivität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lagerkapazität der jeweiligen Fläche</li> </ul>
<b>Nachschubprüfung (min. Menge in Tanks an modularer Anlage)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auswirkungen auf die Produktivität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontrollpanel „Nachschubprüfung“</li> </ul>

Beim Start der Simulation können die Dauer der Rüstzeit sowie die Anzahl der Gabelstapler für die innerbetrieblichen Transporte festgelegt werden. Während des Simulationslaufs ermöglicht der Zugriff auf ein Kontrollpanel das Experimentieren mit den Lagerkapazitäten an der modularen Anlage und den Grenzen für die Nachschubprüfung der Rohstoffe. Um das Simulationsmodell möglichst realitätsnah auszuführen, werden die Gabelstapler, die für den gesamten Chemiepark zuständig sind, auch zu anderen Aufträgen gerufen, sodass der Fall einer nicht sofortigen Erfüllung eines Nachschubauftrags simuliert werden kann. Die Häufigkeit dieser fiktiven Ereignisse kann im Simulationsmodell mithilfe einer Wahrscheinlichkeitsverteilung eingestellt werden.

Um verschiedene Szenarien miteinander vergleichen und die beste Entscheidung für die Planung einer modularen Anlage treffen zu können, umfasst das Modell verschiedene Auswertungsoptionen. Je nach Untersuchungsgegenstand geben Diagramme oder Variablen Informationen über das simulierte Szenario aus. Die benötigten logistischen Mitarbeiter der modularen Anlage können über die Anzahl an Gabelstaplern, die zum Fahrzeugdepot gehören, ermittelt werden, indem die Auslastung der Gabelstapler von Simulationsläufen mit variierender Anzahl verglichen wird. Das gleiche Vorgehen ist bei der Ermittlung der Anzahl der Mitarbeiter für den gesamten Chemiepark möglich, jedoch mit dem Unterschied, dass hier der Einfluss der

modularen Anlage auf die benötigten Mitarbeiter im Logistikzentrum sowie für innerbetriebliche Transporte untersucht wird. Mitarbeiter werden durch Agenten in Ressourcen Pools abgebildet, wobei es für jede der vier Ladezonen im Simulationsmodell einen Ressourcen Pool gibt. Dargestellt wird die Auslastung in Balkendiagrammen mit Prozentsätzen. Für die optimale Anordnungsplanung der Flächen innerhalb des Bereichs der modularen Produktionsanlage wird die zurückgelegte Distanz der Gabelstapler aufgezeichnet. Je länger diese Distanz ist, desto unvorteilhafter ist die Anordnung der logistischen Flächen. Für eine übergreifende Anordnungsplanung sollten jedoch weitere Aspekte, wie die Erreichbarkeit der Flächen für Transporte vom Logistikzentrum, berücksichtigt werden.

Lagerkapazitäten an der modularen Anlage beeinflussen die Produktivität der Anlage, da bei einem zu geringen Puffer Engpässe auftreten, die die Produktionsmenge während des Simulationslaufs reduzieren können. Die Produktivität lässt sich vergleichen und auswerten, indem die Anzahl erfüllter Aufträge sowie der Erfüllungsgrad des aktuellen Auftrags für den gleichen Zeitraum gegenübergestellt werden. Durch die Variation der Lagerkapazitäten an der Anlage kann über mehrere Simulationsläufe die optimale Größe ermittelt werden. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass kein zu großer Bestand an Gefahrstoffen vorliegt, da bei einer Lagerdauer von mehr als 24 Stunden an der Anlage gesetzlichen Rahmenbedingungen zum Lagern von Gefahrstoffen in ortsbeweglichen Behältern nach TRGS 510 eingehalten werden müssen. Ebenfalls Einfluss auf die Produktivität hat die Nachschubprüfung, die Transportaufträge für Rohstoffe vom Logistikzentrum zur modularen Anlage auslöst. Ziel ist es zu große Bestände zu vermeiden und trotzdem eine rechtzeitige Versorgung der Anlage mit neuen Rohstoffen sicherzustellen. Bei der Nachschubprüfung kann für jeden Rohstoff ein Mindestfüllstand der Tanks an der Anlage festgelegt werden, bei dem ein Nachschubauftrag ausgelöst wird. In Bezug auf die Rüst- und Produktionszeiten liegt eine graphische Auswertung der jeweiligen prozentualen Anteile sowie der Zeiträume, in denen gerüstet bzw. produziert wird, vor. Mithilfe eines Zeitdiagramms können die Zeitpunkte, zu denen die Behälter der Produkte bzw. Abfälle voll sind und abtransportiert werden müssen, nachvollzogen werden. Durch die verschiedenen Auswertungsmöglichkeiten lässt sich der Einfluss der modularen Anlage auf das gesamte logistische System des Standortdienstleisters, u. a. auf Transportmittel und auf das Personal, bestimmen.

Das erstellte Simulationsmodell bietet durch die Integration von Datenbanken und Exceltabellen über Schnittstellen die Möglichkeit Produktionspläne und Lieferpläne schnell zu integrieren und bei Bedarf zu ändern oder zu erweitern. Zudem werden die Nachschubversorgung und die Abholung von Produkten, Leergut und Abfällen auf Grundlage der Voreinstellungen automatisch angestoßen. Das Testen von verschiedenen Produktionsplänen, Anordnungen der Logistikflächen sowie produktionsbezogene Einstellungen ist mithilfe des Simulationsmodells einfach umsetzbar und bietet einen hohen Grad an Individualisierbarkeit.

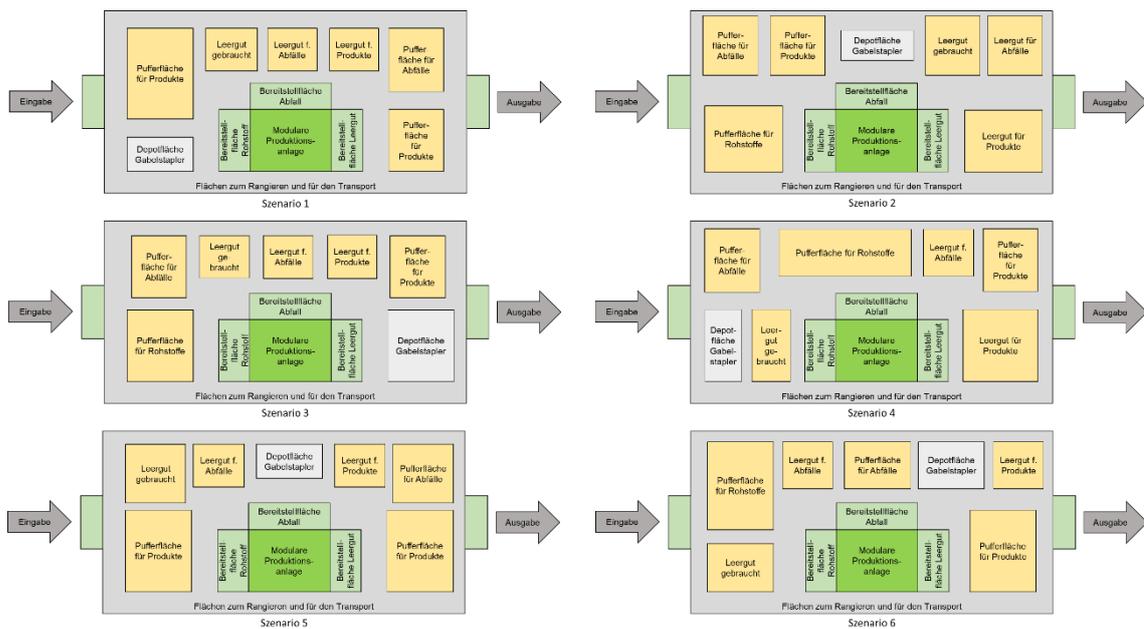
#### **Ergebnisse der Simulationsstudie**

Die Anordnung in Abbildung 4-4 ergibt sich aus den Ergebnissen der Simulationsstudie, die für verschiedene Layouts die zurückgelegten Distanzen der Flurförderfahrzeuge ausgewertet. Bei dieser führen die Flurförderfahrzeuge ausschließlich die Prozesse zwischen den Puffer- und Bereitstellflächen der modularen Anlage aus. Im Rahmen der Versuchsreihe werden sechs

Szenarien über einen einheitlichen Simulationszeitraum und bei gleichbleibenden Randparametern betrachtet, wobei folgende Rahmenbedingungen für die Experimente gelten:

- Rüstzeit 24 h
- Anzahl Gabelstapler/Mitarbeiter gesamter Chemiepark: 14 Stück
- Anzahl Gabelstapler/Mitarbeiter für die modulare Produktion: 2 Stück
- Simulationszeitraum: 12.10.2020, 00:00 Uhr bis 28.10.2020, 00:00 Uhr

Den Untersuchungsgegenstand der sechs Szenarien stellen unterschiedliche Anordnungsvarianten der Flächen der logistischen Infrastruktur dar. Zu den abgebildeten Flächen zählen jene, die zuvor als benötigte Bestandteile einer logistischen Infrastruktur identifiziert wurden (s. Kapitel 4.2). Die Agenten (Gabelstapler) suchen im Simulationsmodell bei der Erfüllung einer Aufgabe die kürzeste mögliche Strecke zwischen der Start- und Zielfläche. Flächen, die nicht durchfahren werden dürfen, wurden vorab mithilfe einer Restriktion von den Fahrwegen ausgeschlossen. Die zurückgelegte Strecke wird kumuliert in einer Variablen festgehalten, die bei der Auswertung genutzt wird. Die Szenarien gründen sich auf Annahmen, die z. B. zur Verbesserung der Erreichbarkeit, zu ablaufoptimalen Prozessen oder zur Vermeidung von häufigen Kollisionen beitragen. Beispielsweise soll die Anordnung in Szenario 4 den Zugriff auf die Rohstoffe erleichtern und somit die Abläufe zeitlich verkürzen. Die Szenarien der Simulationsstudie sind in Abbildung 4-9 dargestellt.



**Abbildung 4-9: Anordnungslayouts der Simulationsstudie (eigene Darstellung)**

Aus der Simulationsstudie ergibt sich für die Szenarien 1 bis 6, dass das Szenario 2 hinsichtlich der zurückgelegten Distanz zu bevorzugen ist, da diese über den Simulationszeitraum den geringsten Wert ergeben hat (s. Tabelle 4-3). Jedoch sollten bei der Anordnungsplanung externe Faktoren, die jedoch standortspezifisch sind, berücksichtigt werden, um das optimale Ergebnis zu erzielen.

**Tabelle 4-3: Ergebnisse der Simulationsstudie zur Anordnungsplanung**

Szenarien	Zurückgelegte Distanz	Rang
-----------	-----------------------	------

Szenario 1	68,93 km	5
<b>Szenario 2</b>	<b>51,48 km</b>	<b>1</b>
Szenario 3	61,63 km	3
Szenario 4	73,73 km	6
Szenario 5	56,45 km	2
Szenario 6	64,29 km	4

## **5 Entwicklung der Prozesse für die Ver- und Entsorgung und Analyse der erforderlichen Betriebsmittel**

Das Ziel des vierten Arbeitspakets besteht darin einen Überblick über alle notwendigen logistischen Prozesse mit den dafür benötigten Betriebsmitteln zu schaffen. Darüber hinaus sollen die Möglichkeiten eines Outsourcings der Logistik für wandlungsfähige Systeme herausgearbeitet werden. Vor diesem Hintergrund sind zu Beginn die Logistikprozesse und Betriebsmittel anhand des vorab erstellten Simulationsmodells zu erfassen, welche in einer Verbindung mit den logistischen Prozessen für den Betrieb modularer Anlagen stehen. Anschließend werden auf Basis dessen verschiedene Ansätze der Prozess- und Betriebsmittelplanung vorgestellt und der Einfluss des Produktionsstandortes auf diese erläutert. Der zweite Teil dieses Kapitels beschäftigt sich mit der Thematik des Outsourcings logistischer Tätigkeiten. Dafür wird zunächst ein kurzer Überblick über die verschiedenen Arten des Outsourcings logistischer Dienstleistungen in Kombination mit wandlungsfähigen Systemen gegeben, um abschließend diese auf verschiedene Anwendungsfälle im Hinblick auf den Produktionsstandort zu überführen. Die Ergebnisse dienen den KMU anschließend als Handlungsempfehlungen für die unterschiedlichen Szenarien.

### **5.1 Identifizierung der Logistikprozesse und Betriebsmittel**

Rund um den Betrieb von Produktionsanlagen muss eine Planung der logistischen Prozesse und der dafür notwendigen Betriebsmittel erfolgen. Zu beachtende logistische Prozesse sind dabei:

- Innerbetriebliche und externe Transportprozesse,
- Umschlagprozesse,
- Kommissioniervorgänge,
- Lagerprozesse,
- Verpackungsprozesse und
- [Informations- und Kommunikationsprozesse].

Zur besseren Verständlichkeit der allgemeinen Prozesse, die für den Betrieb von wandlungsfähigen Systemen erforderlich sind, wurde das aus dem Kapitel 3.8 entwickelte Simulationsmodell herangezogen. Dieses gibt einen Aufschluss über alle durchzuführenden logistischen Prozesse im Hinblick auf den Betrieb modularer Anlagen. Diese Prozesse sind in Abbildung 5-1 aufgelistet und werden nachfolgend genauer betrachtet.

Die für den Betrieb notwendigen intralogistischen Prozesse umfassen neben der Ver- und Entsorgung der Anlage (mit allen notwendigen Rohstoffen) ebenfalls die Bereitstellung von Leergut. Darüber hinaus zählen zu diesen Prozessen die Transporte des verschmutzten Leerguts zu dem Reinigungsstandort und dem Lager und stellen die Distribution der Produkte sicher. Die dabei tangierten Schnittstellen sind das Lager, die Produktionsanlage sowie die dazugehörigen

Pufferzonen und Entsorgungseinrichtungen. Die an der Anlage errichteten Pufferzonen werden in die Bereiche für Edukte, Leergut, Produkte und Abfall differenziert (vgl. Kapitel 4.2).

Die Planung der durchzuführenden Abläufe zielt dabei auf die erfolgreiche Realisierung der Produktionsprozesse hin, weshalb für die in Abbildung 5-1 vorgestellten logistischen Prozesse verschiedenste Betriebsmittel zum Einsatz kommen. Neben dem Hauptbestandteil, der modularen Produktionsanlage, zählen ebenfalls Ressourcen wie Dampf, Wasser oder Gase, Ver- und Entsorgungsanschlüsse oder die eingesetzten Transportmittel zu den Betriebsmitteln. Demzufolge werden die Betriebsmittel zur Herstellung des Produktes benötigt, sind jedoch kein Bestandteil des Produkts. Die einzusetzenden Transportmittel stellen demzufolge einen wichtigen Faktor für die Gewährleistung des reibungslosen Betriebs innerhalb eines Chemieunternehmens dar.

Prozesse - Modulares Produktionssystem inkl. Peripherie					
Nummer Prozess	Bezeichnung Prozess	Ziel	Einordnung	Schnittstellen	Tangierte logistische Einrichtungen
1	Anlieferung Edukte	Anlieferung der Edukte zum Lager	Versorgung, Transport	Interne Prozesse Lager	Lager (extern oder innerbetrieblich), Bei innerbetrieblich: Torbereich, Verwiegung
2	Intralogistische Prozesse Lager	Einlagerung, Lagerung und Auslagerung von E- und Produkten	Versorgung, Lagerung, Distribution	Anlieferung Edukte, Anlieferung Produkte, [Leergutbereitstellung]	Lager (extern oder innerbetrieblich)
3	Transport Lager → Produktionslager	Transport der Edukte [und des Leerguts] zum Produktionslager	Versorgung, Transport	Interne Prozesse Lager, Interne Prozesse Produktionslager	Lager (extern oder innerbetrieblich), Produktionslager
4	Intralogistische Prozesse Produktionslager	Einlagerung Edukte und Produkte, Bereitstellung Edukte [und Leergut] für Produktion	Versorgung, interne Distribution	Anlieferung Edukte, Anlieferung Produkte, [Bereitstellung Leergut, Abholung Leergut, Entsorgung]	Produktionslager und interne Funktionsbereiche
5	Transport Produktionslager → Modulare Produktionsanlage	Transport der Edukte zur modularen Produktionsanlage	Produktionsversorgung	Interne Prozesse Produktionslager, Prozesse modulare Produktionsanlage	Produktionslager, Modulare Produktionsanlage
6	Modulare Produktionsanlage	Produktion des gewünschten Guts	Produktion	Produktionsversorgung Edukte, Interne Distribution Produkte, [Leergutbereitstellung]	
7	Transport modulare Produktionsanlage → Produktionslager	Transport Produkte zum Produktionslager, Leerguttransport zum Produktionslager	Distribution, Entsorgung	Prozesse modulare Produktionsanlage, Interne Prozesse Produktionslager, Transport Entsorgung, Leergutbereitstellung	Produktionslager, [Entsorgungseinrichtung]
8	Transport Produktionslager → Lager	Distribution/Transport der Produkte zum Lager	Distribution	Interne Prozesse Produktionslager, Interne Prozesse Lager	Produktionslager, Lager
9	Transport Entsorgung	Transport Entsorgung zur Entsorgungsstätte	Entsorgung	Prozesse modulare Produktionsanlage, Interne Prozesse Produktionslager, Prozesse Entsorgungsanlage	Produktionslager, Entsorgungseinrichtung
10	Entsorgung	Entsorgung	Entsorgung	Prozesse modulare Produktionsanlage, Interne Prozesse Produktionslager	Entsorgungseinrichtung und interne Funktionsbereiche
11	Leergutlager	Lagerung Leergut	Versorgung	Versorgung Produktionslager mit Leergut, Rückführung Leergut aus Produktionslager	Leergutlager und interne Funktionsbereiche
12	Transport Leergutlager → Produktionslager	Versorgung mit Leergut für Abfüllung, Palettierung, Bildung logistischer Einheiten	Versorgung	Prozesse modulare Produktionsanlage, Interne Prozesse Produktionslager	Leergutlager, Produktionslager

Abbildung 5-1: Prozesse eines modularen Produktionssystems inklusive Peripherie (eigene Darstellung)

Die in Abbildung 5-2 aufgelisteten Transportmittel sind i. d. R. auf den Werkgeländen von Chemieunternehmen zu finden. Einen wesentlichen Unterschied weisen diese im Hinblick auf die technischen Ausführungen und der Menge der transportierbaren Chemikalien auf. So können die Transportmittel unterteilt werden in Stapler, Hubwagen, Schmalgangstapler, Kommissionierer, Schlepper, Plattformwage, Logistikzüge oder werksinterne Pipelines.

<b>Stapler</b>	E-Stapler	V-Stapler
	<b>Niederhubwagen</b>	<b>Hochhubwagen</b>
	Niederhubwagen	Mitgänger-Hochhubwagen
<b>Hubwagen</b>	Handgabelwagen	Doppelstockbelader
	Elektro-Niederhubwagen	Hochhubwagen
	elektrische Niederhubwagen	Doppelstöckige Elektro-Hochhubwagen
	Kombifahrzeug	Schmalgangstapler
<b>Schmalganggeräte</b>	Elektrostapler	Schubmaststapler
	Schubmaststapler	Vier-Wege-Schubmaststapler
<b>Kommissionierer</b>	Vertikal-Kommissionierer	Niederhub-Kommissionierer
<b>Schlepper</b>	Elektroschlepper	Fahrersitzschlepper
<b>Plattformwagen</b>		
<b>Logistikzüge</b>		
<b>Werksinterne Pipelines</b>		

**Abbildung 5-2: Transportmittel für den innerbetrieblichen Verkehr (eigene Darstellung)**

Des Weiteren muss darauf geachtet werden, dass diese Transportmittel für den Umgang mit Gefahrgütern zertifiziert sind. Gerade in Bereichen, in denen gefährliche Stoffe gelagert werden, gibt es besondere Anforderungen. Aus diesem Grund besitzt jedes aufgeführte Transportmittel eine EX-Version (Explosionsschutz), welche die von dem Hilfsmittel für den Transport ausgehenden Gefahr möglichst geringhält. Beispielsweise können Vorkehrungen genannt werden, welche einen Funkenschlag durch die Räder oder die Hubgabeln vermeiden.

## 5.2 Prozess- und Betriebsmittelplanung

Durch die besonderen Eigenschaften der modularen Produktionsanlagen werden die Prozess- und Betriebsmittelplanung direkt durch das modulare Konzept beeinflusst. Im Vergleich zu herkömmlichen Anlagen werden bei der modularen Anlage vorab entwickelte Bausteine verwendet, die die Dauer für die Betriebsmittelplanung verkürzen. Außerdem gestalten sich die Kapazitätsanpassungen durch die Möglichkeiten des Numbering-up oder Scale-up einfacher als bei herkömmlichen Produktionsmethoden. Der modulare Grundgedanke bei diesen Produktionsanlagen erlaubt zusätzlich die Auftrags Erfüllung an unterschiedlichen Standorten,

was neben einer stärkeren Kundenorientierung jedoch eine kurzfristige Planung bei den logistischen Prozessen und eingesetzten Betriebsmitteln erfordert. Dementsprechend sind die Mobilität und die damit einhergehende Flexibilität der Betriebsmittel sicherzustellen. Des Weiteren sind häufige Rüstvorgänge notwendig, um das volle Potential dieses Konzepts auszuschöpfen. Dies hängt damit zusammen, dass modulare Produktionsanlagen kleinskalige Anlagen sind und aufgrund ihrer Modulstruktur zu den rekonfigurierbaren Mehrzweckproduktionsanlagen zählen. (DECHEMA e.V. 2017; Fleischer-Trebes et al. 2017)

Die Planung von Betriebsmitteln und Prozessen richten sich aufgrund der vorab genannten Gründe an der Fertigungsstrategie und der Einsatzstrategie aus. Dabei kommen die Strategien Make-to-Order und Engineer-to-Order (vgl. Kapitel 4.1) zum Einsatz. Hinsichtlich der möglichen Eilaufträge oder Störungen im Betrieb wird von diesen Strategien eine Auskunftsfähigkeit, schnelle Reaktionen und hohe Flexibilität erwartet (Heiserich et al. 2011).

Das Make-to-Order-Prinzip charakterisiert sich durch geringe Lagerbestände und eine bedarfsgerechte Produktion, die jedoch zu langen Lieferzeiten führen (Logistik KNOWHOW 2013). Für die Prozessplanung bedeutet dies, dass die Planung erst bei Auftragseingang beginnen kann und auf freie Slots bei der modularen Anlage gewartet werden muss (Heiserich et al. 2011). Bei hoher Auslastung und der Einhaltung akzeptabler Durchlaufzeiten gestaltet sich die Fertigungsplanung dadurch kompliziert. Zusätzlich verursacht der Beschaffungsvorgang Verzögerungen, da die Daten für den Einkauf erst zu einem späten Zeitpunkt vorliegen. Die Betriebsmittelplanung benötigt, wie auch die Prozessplanung, Vorlaufzeit, um die Verfügbarkeit der Betriebsmittel garantieren zu können. Einen wichtigen Aspekt stellt in diesem Zusammenhang das Personal dar, da nicht nur die Verfügbarkeit entscheidend ist, sondern auch die Qualifikationen der einzelnen Mitarbeiter. Für einen flexiblen Einsatz an allen Prozessschritten ist daher flexibles und geschultes Personal notwendig (Zaerpour et al. 2008).

Bei dem Engineer-to-Order-Prinzip werden kundenindividuelle Produkte hergestellt und eine bedarfsgerechte Produktion gestaltet (Logistik KNOWHOW 2013). Die Prozess- und Betriebsmittelplanung kann bei dieser Strategie parallel zur Produktentwicklung erfolgen (Heiserich et al. 2011).

Neben dem Make-to-Order- und dem Engineer-to-Order-Prinzip sind auch Hybride Strategien, die beispielsweise aus einer Kombination einer der Strategien mit dem Make-to-Stock-Prinzip bestehen, einsetzbar. Dabei werden bestimmte Komponenten vorab produziert, um Lieferzeiten zu verkürzen.

### **5.3 Einfluss des Produktionsstandortes auf die Prozess- und Betriebsmittelplanung**

Die Wahl des Produktionsstandortes einer modularen Anlage hat einen großen Einfluss auf die Planung der Prozesse und Betriebsmittel sowie der Ver- und Entsorgung. Unterschieden wird zwischen einem Standort innerhalb eines Chemiepark (Brownfield) und der Positionierung auf einer „Grünen Wiese“ (Greenfield). Im Gegensatz zum Greenfield stehen im Chemiepark u. a. Transportmittel, Logistikdienstleister und Ressourcen im großen Umfang zur Verfügung und sorgen für mehr Flexibilität. Bei der Positionierung auf der „Grünen Wiese“ liegt mehr Eigenverantwortung bei dem Betreiber der Anlage.

In Chemieparks zählen zum Service- und Dienstleistungsangebot insbesondere die Primärenergieversorgung, die Medienversorgung z. B. mit Dampf, Gasen und Wasser, die Abfallentsorgung, die Abwasserreinigung und der Transport von Kuppelprodukten zu Kunden im Chemiepark (Wildemann et al. 2013). Die Energieversorgung wird vielfach durch chemieparkeigene Gas- und Kohlekraftwerke zur Erzeugung von Strom und Gas sichergestellt. Die Versorgung mit Prozessmedien ist abhängig von dem Angebot des jeweiligen Chemieparks. Der CHEMPARK umfasst bspw. drei Standorte in Leverkusen, Dormagen, und Krefeld-Uerdingen, jedoch bietet nur einer die Versorgung mit Acetylen an. Ein Blick auf die verfügbaren Dampf-Druckstufen macht das unterschiedliche Angebot ebenfalls deutlich, da nicht jedes Dampfverteilnetz an den drei Standorten die gleichen Druckstufen gewährleisten kann (CHEMPARK 2020). Der Chemieparkbetreiber übernimmt neben der Versorgung auch die umweltgerechte Entsorgung, die Verwertung von Abfällen sowie die Aufbereitung von Abwässern und Abgasen aus den Anlagen des Chemieparks. Für die Entsorgung werden Kläranlagen und Müllverbrennungsanlagen benötigt. Häufig fördert der Betreiber das Verbundkonzept im Chemiepark. Hierbei werden Kuppelprodukte, also Erzeugnisse, die bei der Produktion als Nebenprodukt anfallen, für die Produktion anderer Erzeugnisse genutzt. Auf diese Weise können Synergien innerhalb eines einzelnen Betriebs, aber auch zwischen den unterschiedlichen Betrieben eines Standortes, genutzt werden.

Vor dem beschriebenen Hintergrund bieten Chemieparks bei der Ver- und Entsorgung modularer Anlagen den Vorteil der Beschaffung von Energie und Medien, wodurch sich die Aufwände für die Betriebe entsprechend reduzieren (Wildemann et al. 2013). Außerdem profitieren sie wirtschaftlich von den Skaleneffekten, die sich durch die Nutzung einer gemeinsamen Infrastruktur für die Beschaffung und Entsorgung ergeben. In vielen Fällen übernehmen Chemieparks ebenfalls Planung, Bau, Instandhaltung und Betrieb von Rohrleitungen, jedoch trägt das Chemieunternehmen die Kosten für diese (vgl. Kapitel 2.7). Bei modularen Anlagen ist laut Expertenmeinungen der Einsatz von Rohrleitungen jedoch zu kostenintensiv und nicht rentabel, da aufgrund der ständig wechselnden Produkte die Leitungen nach jeder Nutzung aufwendig gereinigt werden müssen. Gegen die Wahl eines Chemieparks als Produktionsstandort spricht, dass das Chemieunternehmen abhängig von der bestehenden Infrastruktur wird und das eigene Know-how in Bezug auf die logistischen Prozesse verliert. Außerdem ist die Preisgestaltung häufig intransparent und schwierig nachvollziehbar (Wildemann et al. 2013).

Bei der Positionierung auf der "Grünen Wiese" entsteht ein hoher Investitionsaufwand, um die Ver- und Entsorgung sicherzustellen und die entsprechenden Einrichtungen zu bauen. Da die modulare Anlage flexibel und mobil einsetzbar ist, sind die Produktionsstandorte teilweise nicht für einen langfristigen Zeitraum geplant. Der Investitionsaufwand sollte im Hinblick auf die Dauer der Nutzung des Standorts gerechtfertigt werden können.

Eine weitere Option bei der Standortwahl ist die Positionierung auf dem Gelände eines Unternehmens. Die Ver- und Entsorgungsleistungen sind dabei stark von dem jeweiligen Produkt abhängig. Erste Hinweise, ob die Ver- und Entsorgung ohne großen Mehraufwand gewährleistet werden können, bietet die Branche, in der das Unternehmen tätig ist. Je nach Kompetenzen des Unternehmens ist ein Outsourcing der Beschaffungs-, Intra- und Entsorgungslogistik möglich.

## 5.4 Outsourcing logistischer Dienstleistungen in der modularen Produktion der Chemieindustrie

Outsourcing zählt in vielen Branchen zur gängigen Praxis. In der Chemieindustrie ist ein ebenfalls Trend hierhin zu verzeichnen. Im Vergleich zu anderen Branchen gilt die Chemieindustrie als Nachzügler. Grund sind die komplexen Prozesse, die hohen sicherheitsspezifischen Anforderungen sowie der Umfang der zu transportierenden Stoffmengen, um eine kontinuierliche Produktion sicherstellen zu können. Besonders interessant für die Erweiterung des Outsourcings sind die Bereiche der Spezial- und Feinchemie, da die Produktion in Form einer Batch-Fertigung oder in modularen Anlagen erfolgt, die deutlich geringere Produktionsmengen erfordern, als die kontinuierlich produzierten Basischemikalien.

Studien der letzten Jahre zeigen, dass in der Chemiebranche noch viel Potential für Outsourcing-Maßnahmen besteht. Während Kurier-, Express-, Paket-Services (KEP) und Stückgutverkehre zu 95 Prozent ausgelagert sind (Krupp 2013), kann im der Bereich der Kontraktlogistik, in dem 32% der Logistiktätigkeiten von Chemieherstellern an Dienstleister vergeben werden, das Outsourcing noch ausgeweitet werden. Lagerei- und Mehrwertdienstleistungen, wie die Reinigung von Assets, stellen weitere Bereiche dar, in denen Outsourcing Potentiale vorliegen (Schwemmer 2018).

Eine Studie aus dem Jahr 2019 zeigt ein ähnliches Bild. Bzgl. ausführender Logistikaufgaben ist ein Outsourcing erst in drei Jahren zu erwarten. Im Bereich der strategischen und taktischen Aufgaben wird in naher Zukunft kaum etwas an Logistikdienstleister fremdvergeben werden. Hier wird der überwiegende Teil der Aufgaben unternehmensintern erbracht. Lediglich ein Teil von knapp 40 Prozent vergibt logistische Prozesse im Rahmen der Kontraktlogistik. (Kille und Reuter 2018)

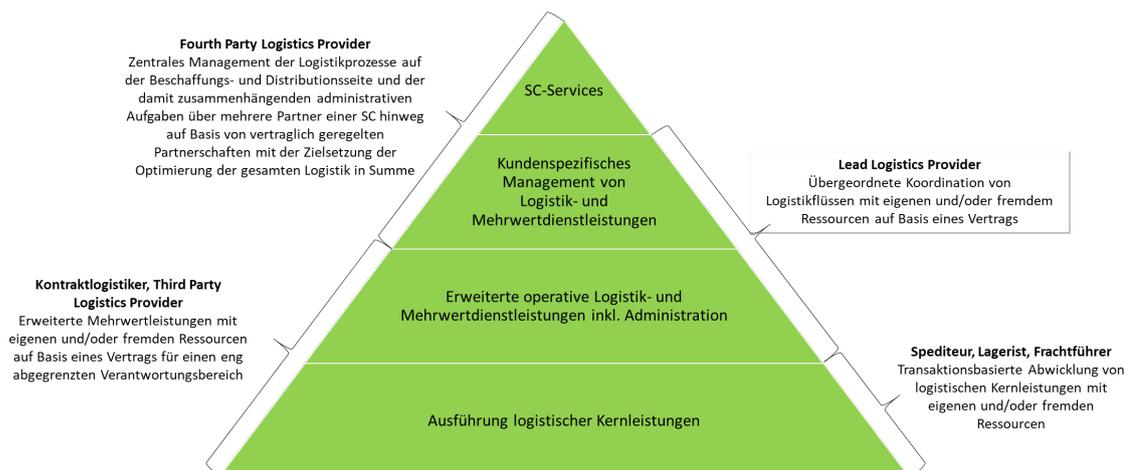
Unternehmen in der Chemieindustrie fürchten mit der Übertragung der logistischen Prozesse an Dienstleister das eigene Know-how diesbezüglich zu verlieren. Darüber hinaus ist der Faktor Qualität für die Chemieindustrie von größter Bedeutung, weshalb die Prozesse, solange die Mittel dafür vorhanden sind, in Eigenregie durchgeführt werden. Des Weiteren sehen viele Chemiebetriebe vor allem im Bereich der taktischen und strategischen Aufgaben einen Teil ihrer Kernkompetenzen (Schwemmer 2018; Krupp 2013; Kille und Reuter 2018).

Wenn sich ein Unternehmen für das Logistik-Outsourcing entscheidet, stehen verschiedene Möglichkeiten und Ausprägungen des Outsourcings zur Wahl. Bei einem sog. Soft-Out werden die Logistikprozesse an einen Dienstleister übergeben, der die Dienstleistung in den Räumlichkeiten des Kunden erbringt. Durch die Entscheidung für ein Total-Out werden nicht nur die Logistikprozesse an den Dienstleister übergeben, sondern auch die Räumlichkeiten zur Erbringung der logistischen Dienstleistung. Um neuen Platz auf dem Gelände des Unternehmens zu gewinnen, kommt die Total-3-Out Outsourcing-Variante infrage. Dabei werden die Logistikdienstleistungen an den Dienstleister übergeben und dieser führt die Tätigkeiten in eigenen Räumlichkeiten aus. Eine weitere Modifikation des Total-Outs ist das Total Invest-Out, bei dem die Räumlichkeiten der Logistikprozesse an einen Investor verkauft werden, der diese wiederum an die Logistikdienstleister vermietet. Alternativ kann der Logistikdienstleister als neues Unternehmen in Form eines Joint Ventures oder einer Tochtergesellschaft auftreten. Das Joint Venture stellt ein Gemeinschaftsunternehmen zwischen einem Dienstleister und einem Chemieunternehmen dar, das rechtlich eigenständig ist. Die Logistikprozesse werden über einen

Dienstleistungsvertrag erbracht. Eine Tochtergesellschaft, auch internes Outsourcing genannt, beschreibt die Ausgliederung einer eigenen Logistikgesellschaft, die zwar eigenständig ist, jedoch im Einfluss der Muttergesellschaft steht. (Müller-Daupert 2009)

Dienstleistungen in der Logistik bzw. Logistikdienstleistungen „dienen der Schaffung von räumlicher und zeitlicher Güterverfügbarkeit“ (Gouthier et al. 2007). Die logistische Leistung erfolgt erst nachdem ein logistisches Objekt von einem Dienstleistungsnehmer in den Leistungserstellungsprozess eingebracht wurde und der Dienstleister dieses einer wertschöpfenden Transformation zuführt. Zu den grundlegenden Dienstleistungen in der Logistik zählen die TUL-Prozesse. (Gouthier et al. 2007; Bichler et al. 2017)

Daraus abgeleitet stellen Logistikdienstleister Unternehmen dar, welche im Auftrag eines Dienstleistungsnehmers logistische Kernleistungen und/oder Mehrwertdienstleistungen übernehmen (Ouyeder und Straube 2011). Diese sind häufig aus Speditionen entstanden, die ihr Tätigkeitsfeld und Leistungsniveau kontinuierlich erweitert haben. Sie führen logistische Prozesse güterwirtschaftlich, informationstechnisch und organisatorisch für den Auftraggeber aus (Voth und Hesse 2017). Logistikdienstleister lassen sich anhand des variierenden Leistungsumfangs in verschiedene Gruppen einteilen (siehe Abbildung 5-3).



**Abbildung 5-3: Abgrenzung 4PL-Provider, 3PL-Provider und LLP hinsichtlich ihres Leistungsumfangs (in Anl. an: Kille und Reuter (2018))**

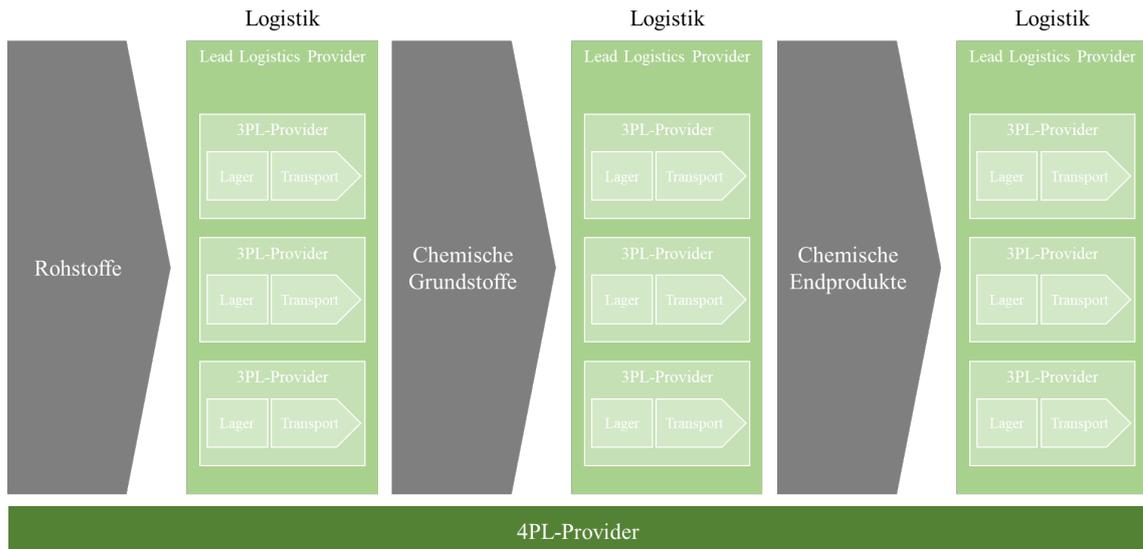
3PL-Provider (Third-Party-Logistics Provider) stellen die Partei dar, die neben dem Akteur für das Versenden und Empfangen der Waren als dritter Dienstleister agiert (Kille und Reuter 2018). Üblicherweise übernimmt der 3PL-Provider Teilabschnitte der Logistikkette beispielsweise die Lagerhaltung, den Umschlag oder einen Mehrwertdienst und verfügt über eigene Ressourcen wie einen Fuhrpark oder ein eigenes Lager (Voth und Hesse 2017). Dienstleister im Bereich der Kontraktlogistik erbringen kundenindividuelle Logistikdienstleistungen, welche aus Kern- und Mehrwertdienstleistungen inklusive deren Management zusammengesetzt sind (Kille und Reuter 2018; Bretzke 2020). Häufig investieren Dienstleister in spezielle Ressourcen, um die Mehrwertdienste erfüllen zu können. Anwendung finden die Dienstleistungen der Kontraktlogistikdienstleister z. B. in Recycling-Kreisläufen der Automobilindustrie oder in der Übernahme der Beschaffungslogistik in Märkten mit speziellen Anforderungen z.B. der Chemieindustrie (Vahrenkamp et al. 2012).

Ein 4PL-Provider (Fourth-Party-Logistics Provider) ist eine übergeordnete Instanz, die den kompletten Ablauf der Logistikprozesse und aller an dem Prozess beteiligten Parteien steuert und verantwortet (Vahrenkamp et al. 2012; Voth und Hesse 2017). Zu den Aufgabenfeldern zählen das Management aller Logistikprozesse inklusive der administrativen Aufgaben eines verladenden Unternehmens (siehe Abbildung 5-4). Lead Logistics Provider (LLP) verknüpfen Aufgaben des 3PL-Providers mit ausgewählten Tätigkeiten des 4PL-Providers. Dabei stellt der LLP den Führungslogistiker dar, der die Logistikdienstleistungen der unteren Ebenen vereint. Der LLP agiert als ein Tochterunternehmen eines 3PL-Providers, welcher vollen Zugriff auf interne und externe Ressourcen hat (Schwemmer 2018; Kille und Reuter 2018).

Spediteur, Frachtführer, Lagerist		Lead Logistics Provider	
Kontraktlogistik/ 3PL-Provider		4PL-Provider	
Executional Level	Operational Level	Tactical Level	Strategical Level
<ul style="list-style-type: none"> <li>Lagerabwicklung                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Lagermanagement</li> <li>Zusatzleistung</li> <li>Verpackung, Befüllung</li> <li>Beschriftung</li> <li>Pick &amp; pack – Ladung &amp; Entladung</li> <li>Transport &amp; Zoll Dokumente</li> </ul> </li> <li>Transportabwicklung (am Werk)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Eingang/Ausgang Fahrzeuge</li> <li>Torabwicklung</li> <li>Betriebshof-management</li> <li>Transportdokumente</li> <li>Zollpapiere</li> <li>Ladestellenleitsystem</li> <li>Fahrzeugkontrolle (Sicherheit)</li> </ul> </li> <li>Transport                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Transportausführung</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kundendienst/ -service                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Kundenauftragsmanagement</li> <li>Angebots-/ Nachfrageplanung</li> <li>Kundenrechnung/Zahlungsmanagement</li> </ul> </li> <li>Beschaffung/ Einkauf                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Auftragsmanagement</li> <li>Angebots-/ Nachfrageplanung</li> <li>Lieferantenkommunikation</li> </ul> </li> <li>Frachtenprüfung                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Fracht-Auditierung/ Selbstzahlung</li> </ul> </li> <li>Kennzahlen-Reporting</li> <li>Zollabwicklung                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Einordnung der Güter</li> <li>Import-/ Export-Abwicklung</li> <li>Zollpapiere</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vertragsmanagement Transport                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Ausschreibungsmanagement</li> <li>Einwicklungen in der Logistik</li> <li>Entwicklung des Transportkonzepts</li> <li>Taktische Transportoptimierung</li> <li>....</li> </ul> </li> <li>Vertragsmanagement Lager                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Ausschreibungsmanagement</li> <li>Lagerbewertung und Audit</li> <li>Dienstleistermanagement/ Key Account Management</li> <li>Leistungs- und Qualitätsmanagement</li> </ul> </li> <li>Zoll                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Regelkonformität im globalen Handel</li> <li>AEO Management</li> <li>Zolloptimierung</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Netzwerk-Management                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Organisationsplanung</li> <li>Gestaltung der Geschäftsprozesse</li> <li>Lager- und Transportnetzwerkdesign</li> <li>Lager- und Transportnetzwerkentwicklung</li> <li>Auswahl und Management/Betrieb IT-Systeme</li> <li>Sicherheit und Nachhaltigkeit</li> </ul> </li> <li>Projektmanagement                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Projektmanagement und Implementierung der Strategie</li> </ul> </li> </ul>

**Abbildung 5-4: Ausgewählte Service bzw. Logistikprozesse in den Leistungsebenen (in Anl. an: Kille und Reuter (2018))**

Im Bereich der Chemieindustrie lassen sich die notwendigen Leistungen entlang der Wertschöpfungskette wie folgt darstellen:



**Abbildung 5-5: Wertschöpfungskette in der Chemieindustrie (in Anl. an: Kille und Reuter (2018))**

Dargestellt sind die Wertschöpfungsstufen von der Verarbeitung von Rohstoffen zu chemischen Grundstoffen bis hin zu chemischen Endprodukten. Zwischen den Stufen werden verschiedene logistische Dienstleistungen benötigt, welche durch Outsourcing ausgegliedert werden können. Zu diesen Dienstleistungen zählen Transport-, Lager- und Mehrwertleistungen. Die Anforderungen an die Logistikdienstleister schwanken in der Chemieindustrie in Abhängigkeit von den zu transportierenden Produkten und deren Anforderungen (z. B. Gefahrgut, Temperaturführung, etc.). Daraus lässt sich eine Klassifizierung der Chemiedienstleister auf Grundlage ihres jeweiligen Spezialisierungsgrades ableiten (Kille und Reuter 2018). Standortdienstleister stellen eine spezielle Form der Logistikdienstleister dar. Sie sind an einem Ort ansässig und übernehmen nur an diesem Standort Tätigkeiten, beispielsweise in einem Chemiepark. Standortdienstleister übernehmen die Produktionsver- und -entsorgung, den Umschlag, die Lagerung und Transporte innerhalb des Chemieparks (Krupp 2013). Außerhalb der Chemieparks finden sich Chemielogistikdienstleister, welche sich häufig auf bestimmte Bereiche der Chemieindustrie mithilfe eigener Fuhrparks und besonderem Equipment spezialisiert haben. In diesem Sinne gibt es sog. „Full Service Provider“, welche ganzheitliche Logistiklösungen anbieten und damit alle Anforderungen von potenziellen Kunden abdecken. Dazu zählen Leistungen wie die Silolagerung, das Verpacken, die Qualitätsprüfung oder der Betrieb von Umschlagterminals. Das breite Dienstleistungsportfolio dieser Dienstleister führt zu einer stärkeren Einbindung in die operativen Prozesse der Chemiehersteller, aber auch zu einer stärkeren Abhängigkeit, was jedoch vor allem zu Effizienzsteigerungen führt. Insgesamt bietet sich für diese Anbieter noch viel Outsourcing-Potential in der Zukunft (Krupp 2013).

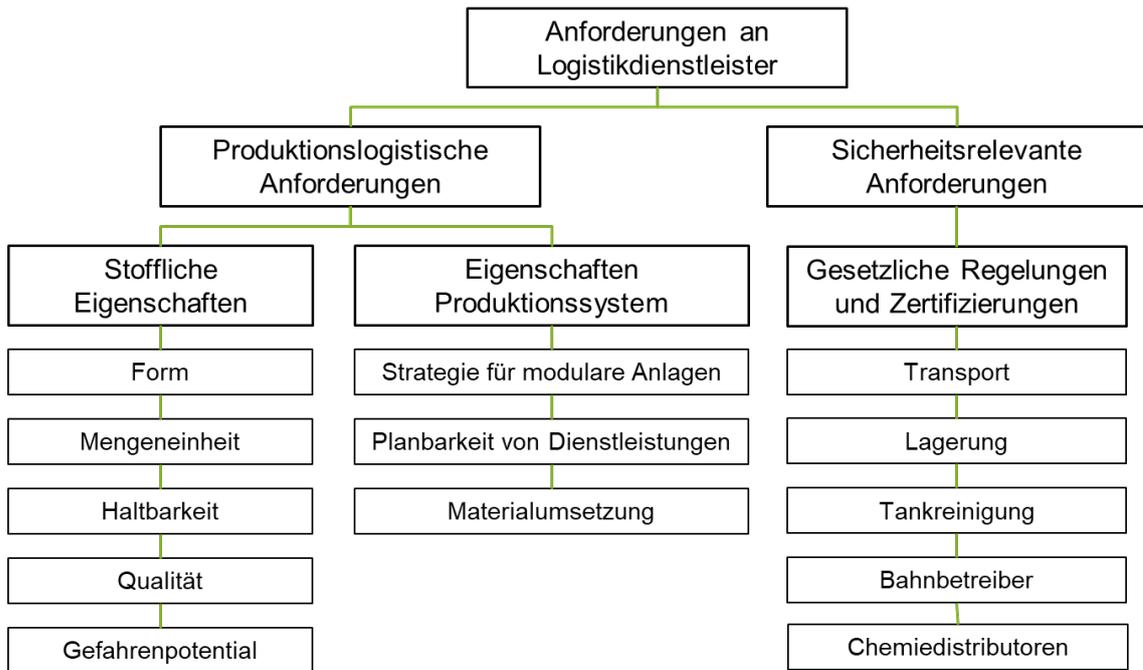
Eine weitere Klasse in der Chemieindustrie sind Dienstleister, die sich auf die Transportlogistik in Nischenmärkten spezialisiert haben. Ein Vorteil dieser Nischenmärkte ist das spezifische Know-how und Equipment, welches benötigt wird. Da der Markt der Transportlogistik im Allgemeinen jedoch sehr standardisiert ist, ist der Preisdruck in diesem Segment hoch. Eine weitere Gruppe von Logistikdienstleistern in der Chemielogistik sind die „Generalisten“. Sie haben einen großen Anteil am Transport, der Lagerung und am Umschlag von Chemikalien, obwohl sie nicht auf diese Branche spezialisiert sind. Ihr Vorteil besteht in der

Unternehmensgröße, einem ausgeprägten Kontraktlogistikbereich und vor allem in ihren globalen Transportnetzwerken. Zusammenladungsverbote erschweren zwar den Transport von Gefahrgut über Stückgutnetzwerke, doch bietet der operative Mehraufwand der Gefahrgutlogistik enge Kundenbindung in Verbindung mit konstanten Transportvolumina.

Zahlreiche Gründe sprechen für ein Outsourcing der Logistikleistungen. Das Outsourcing hat einen positiven Effekt auf das Kostenmanagement, indem Logistikkosten eingespart werden können, da Dienstleister tariflich geringere Löhne zahlen. Außerdem profitieren die Dienstleistungsnehmer von den Skaleneffekten der Dienstleister, da diese für mehrere Kunden tätig sind, von dem Know-how und von einer gleichmäßigen Auslastung der Dienstleister. Investitionen im Bereich der Logistik entfallen und Fixkosten lassen sich durch das Outsourcing variabilisieren. (ISO 37500:2014; Vahrenkamp et al. 2012; Müller-Dauppert 2009)

Durch das Outsourcing setzen sich Unternehmen einem potentiellen Risiko aus, dass die Abhängigkeit vom Dienstleister zu groß wird und ein Verlust des Know-hows eintritt. Das ist insbesondere bei speziellen logistischen Aufgaben der Fall. Um dem entgegenzuwirken muss der Dienstleistungsnehmer aktives Wissensmanagement über die fremdvergebenen Prozesse betreiben. Das Outsourcing sollte nicht allein aufgrund der Reduktion der Kosten erfolgen, sondern weitere Aspekte, wie die realistische Einschätzung der benötigten Ressourcen, berücksichtigen. Die Unternehmenskulturen des Dienstleisters und des Unternehmens sollten zusammenpassen, um das Risiko von Unstimmigkeiten zu reduzieren. Da das Outsourcing interne Prozesse beeinflussen kann, sollten diese vorab identifiziert und klar kommuniziert werden. Das größte Risiko für das Unternehmen ist die ungenügende Leistung des Dienstleiters. Durch die Übergabe der Prozesse an den Dienstleister verliert das Unternehmen die Möglichkeit der Einflussnahme und Kontrolle. Des Weiteren stellen IT-Schnittstellen eine Herausforderung für beide Parteien dar. Diese können vor allem anfänglich zu Problemen und Verzögerungen führen. (ISO 37500:2014; Vahrenkamp et al. 2012; Müller-Dauppert 2009)

Wie bereits in Kapitel 2.7 erläutert, werden an die Durchführung logistischer Prozesse besondere Anforderungen gestellt, welche sich in produktionslogistische und sicherheitsrelevante Anforderungen unterteilen lassen (Krupp 2013). Die spezifischen Anforderungen können aus diesem Grund ebenfalls auf die Eignung eines Dienstleisters zu der Erbringung der Leistung herangezogen werden und sind in Abbildung 5-6 erneut dargestellt.



**Abbildung 5-6: Anforderungen an Logistikdienstleister (in Anl. an: Krupp (2013))**

Modulare Produktionssysteme stechen vor allem durch das Merkmal der wesentlich kleineren Produktionsmengen im Vergleich zu kontinuierlichen chemischen Anlagen hervor. Die Prozesse der modularen Anlagen müssen z. T. auf diese Produktionsstrategie angepasst werden. Für die Produktion werden Edukte benötigt, die im ersten Schritt zum Produktionsstandort transportiert und für die Produktion bereitgestellt werden. Alternativ kann die Rohstoffbereitstellung über die am Produktionsstandort vorhandene Rohrleitungen erfolgen. Dem Produktionsprozess schließen sich die distributionslogistischen Prozesse an. Dazu zählen die Bereitstellung von Leerbehältern, die Abfüllung des hergestellten Produkts, die Verpackung und der Transport des Produkts zur Verladung oder ins Lager. Zusätzlich fallen während des gesamten Prozesses Mehrwertdienste an, u. a. im Bereich der Wartung und Instandhaltung, im Bereich des Qualitätsmanagements sowohl für die Produkte als auch die Rohstoffe, im Bereich des Modulaustauschs und weitere produktionsabhängige Mehrwertdienste. Bei den Prozessschritten der Beschaffung, Distribution und den Mehrwertdiensten können Dienstleister Aufgaben übernehmen.

## 5.5 Wahl des Dienstleisters in Abhängigkeit des Produktionsstandortes

Je nach Art des Produktionsstandortes werden unterschiedliche Anforderungen an Logistikdienstleister gestellt. Die Eignung des Leistungsportfolios eines Logistikdienstleisters lässt sich anhand eines Kriterienkatalogs bestimmen. Vor diesem Hintergrund werden folgende Kriterien betrachtet:

- Einsatzort
- Strategische Ausrichtung
- Verfügbares Know-how
- Infrastrukturanbindung
- Genehmigungslage

- Nutzungsart und -frequenz
- Dauer der Nutzung
- Anzahl möglicher Kunden
- Investitionskosten

Die modularen Produktionsanlagen eröffnen den Chemieherstellern völlig neue Möglichkeiten im Hinblick auf den Einsatzort und die damit verfolgte Strategie. Als mögliche Einsatzorte für modulare Anlagen kommen zum einen Chemieparks respektive das Werksgelände eines Chemieherstellers in Frage. Zum anderen und aufgrund ihrer guten Transportfähigkeit, kommen aber auch Einsatzorte direkt bei dem Kunden vor Ort sowie in der Nähe von Rohstoffquellen in Frage. Die Strategie, für welche sich ein Chemiehersteller entscheidet, beschreibt, wofür er das Konzept der modularen Produktionsanlagen umsetzen möchte.

Der geplante Einsatzort sowie die verfolgte Strategie haben einen Einfluss auf das vorhandene und erforderliche Know-how. In Chemieparks steht bereits viel Know-how durch qualifizierte Mitarbeiter und Erfahrungen im Bereich der Chemielogistik zur Verfügung. Im Gegensatz dazu ist sowohl das logistische als auch das Produktions-Know-how in geografischer Nähe zu den Rohstoffquellen oder bei dem Endkunden weniger ausgeprägt und stellt Logistikdienstleister vor Herausforderungen.

Von besonderer Bedeutung ist einerseits die Infrastrukturanbindung am geplanten Einsatzort sowie andererseits die Genehmigungslage. Die Infrastrukturanbindung ist wichtig für die Versorgung mit Rohstoffen, die Anbindung an Verkehrsträger und Umschlagsterminals, die Möglichkeiten der Verbundproduktion oder die Entsorgung von Abfallstoffen. In einem Chemiapark oder auf einem Werksgelände stellt die Infrastruktur keine Restriktion dar. Sobald der Einsatzort aber in Richtung der Rohstoffe oder des Endkunden verschoben wird, kann die dort bestehende Infrastruktur die Produktion u. U. erheblich erschweren. Besondere Anforderungen von chemischen Prozessen stehen im direkten Zusammenhang mit erforderlichen Genehmigungen, welche benötigt werden, um mit gefährlichen Stoffen am ausgewählten Standort arbeiten zu können. Auch hier ist die Ausgangslage innerhalb eines Chemieparks besser als außerhalb, da diese Gelände spezielle Schutzvorrichtungen aufweisen, die auf der grünen Wiese nicht gegeben sind.

Die Nutzungsfrequenz, also die Häufigkeit, mit der eine modulare Anlage eingesetzt wird, sowie die Dauer der Nutzung spielen eine wichtige Rolle bei der Wahl eines Logistikdienstleisters und des benötigten Leistungsumfangs. Eine kurzfristige Dauer entspricht im Folgenden einem Zeitraum von mehreren Wochen, mehrere Monate sind als mittelfristig anzunehmen und als langfristig wird eine Einsatzdauer ab einem Jahr angesehen. Darüber hinaus ist festzulegen, wie ein Logistikdienstleister eingesetzt werden kann, falls die modulare Produktionsanlage phasenweise nicht im Einsatz ist. Letztlich gilt es auch die Anzahl der möglichen Kunden und die Investitionskosten zu betrachten, welche von besonderer Bedeutung für einen Logistikdienstleister sind. Je nach Dienstleistertyp werden eigene Ressourcen zur Erbringung der Logistik-Services benötigt. Aus diesem Grund wird die Investitionsbereitschaft eines Logistikdienstleisters immer auch von der zu erwartenden Auslastung abhängen, außer ihm wird vertraglich eine Mindestauslastung zugesagt. Investitionskosten werden im Folgenden anhand der für das Szenario benötigten Anzahl von modularen Produktions- beziehungsweise Logistikcontainern bemessen.

Untersucht werden drei Szenarien, die für unterschiedliche Standortmöglichkeiten für modulare Produktionsanlagen stehen. Die Prozessabläufe seitens der Beschaffungs- und Distributionslogistik bleiben bei allen Szenarien identisch.

### Szenario 1: Integration einzelner Produktionsmodule innerhalb eines Chemieparks

Im ersten Szenario geht es um die kurzfristige Implementierung eines einzelnen Produktionsmoduls eines Chemiebetriebs, welcher in einem Chemiepark in Deutschland angesiedelt ist. In diesem Fall kann die modulare Produktionsanlage sowohl für die Anpassung der Kapazitäten bei hoher Auslastung benutzt werden als auch für die Produktentwicklung oder für die Produktion spezieller beziehungsweise kundenindividueller Produkte in geringen Mengen von 100 bis 1.000 kg. Die Nutzung ist dementsprechend von geringer Dauer.

**Tabelle 5-1: Merkmalsausprägung für Szenario 1**

Merkmale	Ausprägungen		
Einsatzort	Chemiepark	Werk	Außerhalb
Strategische Ausrichtung	Produktion Peak	Produktion Entwicklung	Modulare Gesamtanlage
Know-how vor Ort	Sehr gut	Gut	Gering
Infrastruktur-anbindung	Vorhanden		Nicht vorhanden
Genehmigungslage	Gut		Problematisch
Nutzungsart	Stationär		Flexibel/mobil
Nutzungsfrequenz	Hoch	Mittel	Gering
Dauer der Nutzung	Langfristig	Mittelfristig	Kurzfristig
Anzahl möglicher Kunden	Viele		Wenige
Investitionskosten	Hoch	Mittel	Gering

Durch die Ansiedlung zahlreicher Unternehmen aus der Chemieindustrie in einem Chemiepark liegt ein hohes Maß an Know-how im Umgang mit Gefahrgut und logistischen Prozessen im Chemiesektor vor, von dem profitiert werden kann. Chemieparke bieten zusätzlich sehr gute Infrastrukturanbindungen an den Landverkehr. Zahlreiche Chemieparke verfügen darüber hinaus an Anbindungen an den Schienen- und Schiffsverkehr. Die Genehmigungslage in dem ersten Szenario lässt sich als gut beschreiben, da Genehmigungen bereits für viele andere Produktionsstätten und -prozesse im Chemiepark erteilt und viele relevante Sicherheitsaspekte bereits erfüllt wurden. Genutzt werden die Produktionsmodule flexibel und mobil mit einer hohen

Nutzungsfrequenz. Da in diesem Szenario die Module vor allem für den Ausgleich von Schwankungen in der Produktionsnachfrage oder für spezielle Kundenwünsche dienen, ist von einer kurzfristigen Nutzungsdauer auszugehen. In Bezug auf die Anzahl der möglichen Kunden, bietet der Chemiepark viele Möglichkeiten und einen großen Kundenpool. Die Investitionskosten fallen bei dieser Form der Integration gering aus, da die Produktionsmodule in bestehende Strukturen integriert werden.

Aufbauend darauf, dass die Chemieparks in vielen Fällen von Betreibergesellschaften bewirtschaftet werden, die ein sehr breites Spektrum an Logistikdienstleistungen anbieten, ist der Chemieparkbetreiber bzw. der Standortlogistik als Outsourcing-Provider zu empfehlen. Die Leistungen umfassen dabei, neben den Infrastrukturanbindungen, wie beispielsweise Kai- und Hafenanbindungen, Umschlagterminals sowie Tank- und Gefahrgutlagern, auch die Versorgung mit Rohstoffen, die Entsorgung von Abfällen als auch viele andere Logistikdienstleistungen, welche von einem Standortlogistiker durchgeführt werden. Darüber hinaus können alle, innerhalb eines Chemieparks, durchzuführenden logistischen Transporte von diesem ausgeführt werden. Standortlogistiker eignet sich besonders um für modulare Produktionsanlagen das Leistungsportfolio zu übernehmen, da dieser für die gesamte Infrastruktur innerhalb des Chemieparks verantwortlich und mit allen Betrieben vernetzt ist. Zusätzlich stellen Standortlogistiker alle wichtigen logistischen Anlagen, wie Lagerflächen, Umschlaganlagen und Ver- und Entsorgungseinrichtungen, bereit und führen die Transporte innerhalb des Chemieparks durch. Aufgrund der vielen Erfahrungen unterstützen Standortlogistiker bei Integration der Anlage als Berater. Zusätzlich werden Mehrwertleistungen, wie Wartung und Instandhaltung der Infrastruktur sowie Hilfe bei Genehmigungen durch Behörden, angeboten. Die Investitionskosten des Standortdienstleisters sind sehr gering, da dieser anhand der an dem Ort ansässigen Kunden sehr gut abschätzen kann, wie sich dieser zusätzliche Betrieb auf deren tägliches Geschäft auswirkt. Der Standortlogistiker im Chemiepark ist ein Full-Service-Provider, der ein umfassendes Leistungsportfolio anbietet.

### **Szenario 2: Integration einzelner Module auf dem Werksgelände eines Chemiebetriebs (außerhalb eines Chemieparks)**

Dem zweiten Szenario liegt der Einsatz einer modularen Produktionsanlage auf dem Werksgelände eines Chemiebetriebes, allerdings außerhalb eines Chemieparks, zugrunde. Die Nutzung ist von langfristiger Dauer und ergänzt die bestehende Batchproduktion, um Auslastungsspitzen ausgleichen zu können. Neben dem Kapazitätsausgleich wird die Anlage für die Entwicklung kundenspezifischer Produkte verwendet. Die Anlage ist an unterschiedlichen Standorten im Werk einsetzbar und es ist von einer Nutzungsfrequenz im mittleren bis hohen Bereich auszugehen.

**Tabelle 5-2: Merkmalsausprägung für Szenario 2**

<b>Merkmale</b>	<b>Ausprägungen</b>		
Einsatzort	Chemiepark	Werk	Außerhalb
Strategische Ausrichtung	Produktion Peak	Produktion Entwicklung	Modulare Gesamtanlage
Know-how vor Ort	Sehr gut	Gut	Gering
Infrastruktur- anbindung	Vorhanden		Nicht vorhanden
Genehmigungs- lage	Gut		Problematisch
Nutzungsart	Stationär		Flexibel/mobil
Nutzungsfre- quenz	Hoch	Mittel	Gering
Dauer der Nut- zung	Langfristig	Mittelfristig	Kurzfristig
Anzahl mögli- cher Kunden	Viele		Wenige
Investitionskos- ten	Hoch	Mittel	Gering

Über den Ausgleich von Produktionsengpässen hinaus, dient der Einsatz der modularen Produktionsanlagen der Entwicklung neuer kundenspezifischer Produkte. Durch die Integration auf dem Betriebsgelände stehen ein sehr hohes Know-how sowie Kenntnisse und Experten für Genehmigungsverfahren zur Verfügung. Solche Standorte verfügen i. d. R. über eine gute Infrastrukturanbindung, die jedoch nicht ganz dem Standard eines Chemieparks entspricht. Die modulare Anlage ist flexibel innerhalb des Werks über einen langfristigen Nutzungszeitraum einsetzbar. Da die modulare Anlage die Batch-Fertigung zum Auffangen von Auslastungsspitzen unterstützen soll, verbleibt diese auch bei Nichtbedarf auf dem Werksgelände des Betriebs. Es liegt bei diesem zweiten Szenario eine mittlere Nutzungsfrequenz vor. Bezüglich der Anzahl der möglichen Kunden kann keine genaue Aussage getroffen werden, da dies sehr anwendungsspezifisch ist. Die Investitionskosten können in diesem Szenario sehr geringgehalten werden, da der Chemiebetrieb das benötigte Produktionsmodul selbst herstellt und keine modularen Logistikmodule benötigt werden.

Bei einem langfristigen Einsatz bietet sich besonders der Einsatz eines Kontraktlogistikdienstleisters an. Wichtig für beide Parteien ist, dass die durchgeführten Dienstleistungen des Logistikdienstleisters sowohl zu den Bedürfnissen und Gegebenheiten im Werk abgestimmt und dauerhaft verbessert werden und zum anderen, dass die benötigten Anforderungen, Dienstleistungen und Ressourcen je nach Einsatzstrategie an den Logistikdienstleister anders ausfallen können und dementsprechend festgehalten werden müssen.

Da die Chemiebetriebe häufig bereits mit Kontraktlogistikdienstleister zusammenarbeiten, sollte vorab überprüft werden, ob der bestehende Dienstleister in der Lage ist, mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen, die benötigten zusätzlichen Dienstleistungen zu erbringen. In manchen Fällen ist es möglich, dass diese mit Hilfe der bereits in den bestehenden Verträgen vereinbarten Dienstleistungen erbracht werden können. Dies ist besonders in Phasen von Vorteil, wenn die modulare Anlage nicht benötigt wird, da der Logistikdienstleister dann nicht für eine Minderauslastung bezahlt werden muss.

### **Szenario 3: Modulare Produktionsanlage außerhalb eines Chemieparks, beispielsweise bei einem Kunden vor Ort oder an der Rohstoffquelle**

Im letzten und dritten Szenario wird eine modulare Gesamtanlage betrachtet, die außerhalb eines Chemieparks oder Chemiebetriebs liegt. Alle Prozessschritte, die für die Herstellung eines Produktes benötigt werden und alle Prozesse der Beschaffungs- und Distributionslogistik, abgesehen vom Transport beruhen auf modularer Containerbasis. Werden zusätzlich noch Mehrwertdienstleistungen in Betracht gezogen, so gilt es auch diese auf modularer Containerbasis umzusetzen. Die Nutzungsdauer wird als kurzfristig bis mittelfristig angenommen, da die Anlage mobil eingesetzt werden soll.

**Tabelle 5-3: Merkmalsausprägung für Szenario 3**

<b>Merkmale</b>	<b>Ausprägungen</b>		
Einsatzort	Chemiepark	Werk	Außerhalb
Strategische Ausrichtung	Produktion Peak	Produktion Entwicklung	Modulare Gesamtanlage
Know-how vor Ort	Sehr gut	Gut	Gering
Infrastruktur- anbindung	Vorhanden		Nicht vorhanden
Genehmigungs- lage	Gut		Problematisch
Nutzungsart	Stationär		Flexibel/mobil
Nutzungsfre- quenz	Hoch	Mittel	Gering
Dauer der Nut- zung	Langfristig	Mittelfristig	Kurzfristig
Anzahl mögli- cher Kunden	Viele		Wenige
Investitionskosten	Hoch	Mittel	Gering

Aus strategischer Sicht wird bei diesem Szenario eine Produktion mit einem kompletten modularen Ansatz umgesetzt. Dabei kommt es durch das geringe Know-how vor Ort, durch die fehlenden Infrastrukturanbindungen sowie aufwendige und langwierige Genehmigungsprozesse,

die sich bei Neuplanung aus hohen Sicherheitsanforderungen ergeben, zu Herausforderungen. Es wird eine mittelfristige bis kurzfristige Nutzungsdauer angestrebt, allerdings ist durch den aufwändigen Genehmigungsprozess ein kurzfristiger rentabler Einsatz fast unmöglich. Des Weiteren wird von einer geringen Nutzungsfrequenz ausgegangen, bei der die Anlage flexible und mobil eingesetzt wird. Die Anzahl der möglichen Kunden ist eher gering, da die Anlage bspw. bei einem einzelnen Kunden vor Ort oder an einer Rohstoffquelle zum Einsatz kommt. Die Investitionskosten sind bei diesem Szenario sehr hoch, da eigene Logistikmodule entwickelt werden müssen.

Aufgrund des benötigten Know-hows, alle Prozessschritte auf modularer Basis auszuführen, eignen sich bei dieser Variante besonders spezialisierte Chemielogistikdienstleister. Diese verfügen über ein hohes Maß an Know-how und besitzen zusätzlich spezifische Ressourcen. Außerdem ist ein Mitwirken bei der Entwicklung der Logistikmodule denkbar. Die Entwicklung des Produktionsmoduls erfolgt hingegen durch einen Chemiebetrieb. TUL-Prozesse und Mehrwertdienste werden durch Logistikdienstleister erbracht, die die benötigten Kompetenzen besitzen. Zusätzlich wird ein 3PL- und 4PL-Provider beauftragt, der je nach Auftrag die Chemielogistiker organisiert und einsetzt sowie das Auftragsmanagement steuert und Aufträge koordiniert. Je größer und komplexer die Leistungen eines Unternehmens sind, desto unabdingbarer ist der Einsatz eines solchen Dienstleisters, dessen Kernkompetenzen in der Steuerung, Koordination und Überwachung der Logistik liegen. Auf Basis aller Hindernisse und der eingeschränkten Bereitschaft der Chemiehersteller, Aufgaben, die die operative Ebene übersteigen, fremd zu vergeben, ist der Einsatz eines 4PL Providers mit dem heutigen Entwicklungsstand und der gesetzlichen Lage von modularen Anlagen noch nicht vereinbar. Bei einem solchen Ansatz besteht allerdings noch sehr viel Entwicklungsbedarf, u. a. im Bereich der Logistik. So wurden bisher lediglich Konzepte für ein Palettenlager, ein Palettendurchlaufregal sowie ein Behälterlager auf Standard-ISO-Containerbasis entwickelt, welche in Kaczmarek et al. (2015) und Hachmann et al. (2016) vorgestellt werden.

## **6 Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Unterstützung bei der Umstellung auf eine kleinformative Produktion**

Um klein- und mittelständigen Unternehmen die logistische Planung, die im Rahmen der Umstellung auf dezentrale kleinformative Produktionen auftritt, zu erleichtern wurde im Rahmen des Projekts aufbauend auf den Ergebnissen der vorherigen Kapitel ein Vorgehensmodell entwickelt. Das Vorgehensmodell erfasst die logistischen Aufgaben strukturiert und stellt dadurch eine interaktive Planungsunterstützung dar. Der Aufbau gliedert sich in sechs Schritte, die mit Hilfe von „Weiter“ und „Zurück“ Button durchlaufen werden können.

Eine einleitende Begrüßung und Ablaufferklärung unterstützen die Bedienung des Vorgehensmodells und erleichtern damit das Handling des vorliegenden Tools. Im ersten Schritt folgt die makroskopische Standortplanung, die in Abschnitt 3 genauer beschrieben ist. Die makroskopische Standortteilung setzt sich aus einer Kriterienbewertung in Form eines paarweisen Vergleichs und der TOPSIS Methode zur multikriteriellen Entscheidungsfindung zusammen. Bei der Kriterienbewertung (vgl. Abbildung 6-1) kann der Nutzer seine Präferenzen zwischen den Kriterien, die sich bei den Recherchen als bedeutungsvoll herausgestellt haben, ermitteln oder auf eine von Experten wandlungsfähiger Systeme ermittelten Gewichtung zurückgreifen.

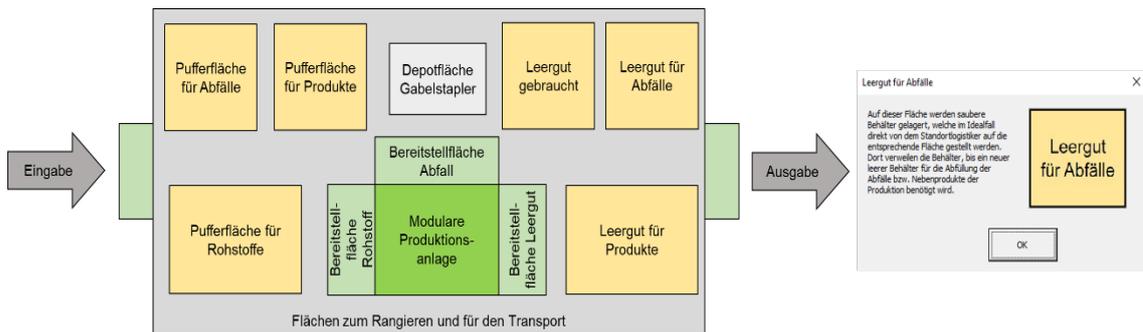
als wichtiger	Versorgung	Kosten Anlagenaufbau	Infrastrukturabhängigkeit	Personal	Dienstleistungsangebot	Gelände/Standort	Expansionsmöglichkeiten am Standort	Förderung, Subventionen	Produktparte	Absatzmarkt	Versorgungskosten	Entsorgungskosten	Logistikkosten	Lagerung	Genehmigungsverfahren	Summe	%
Versorgung	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14	13,33%
Kosten Anlagenaufbau	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	9	8,57%
Infrastrukturabhängigkeit	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	10	9,52%
Personal	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	5	4,76%
Dienstleistungsangebot	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	3	2,86%
Gelände/Standort	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	12	11,43%
Expansionsmöglichkeiten am Standort	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	3	2,86%
Förderung, Subventionen	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
Produktparte	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	5	4,76%
Absatzmarkt	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0,95%
Versorgungskosten	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12	11,43%
Entsorgungskosten	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	10	9,52%
Logistikkosten	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	8	7,62%
Lagerung	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	8	7,62%
Genehmigungsverfahren	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	5	4,76%
																<b>Prüfsumme</b>	<b>100,00%</b>

Abbildung 6-1: Kriteriengewichtung im Vorgehensmodell (eigene Darstellung)

Im nächsten Schritt hat der Nutzer die Möglichkeit die Art des Standorts für bis zu fünf Optionen festzulegen. Zur Wahl stehen die Optionen: Chemiapark, Chemieunternehmen oder Grüne Wiese. Diese Information wird für einen späteren Schritt des Vorgehensmodells benötigt, um mögliche Logistikdienstleister einzugrenzen. Die TOPSIS Methode wird als letzte Komponente der makroskopischen Standortplanung, wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, durchgeführt. Dafür wird die für die Durchführung benötigte Kriterienbewertung automatisch von dem vorherigen Schritt übernommen. Dieses Tool ermöglicht dem Benutzer einen Vergleich von bis zu fünf verschiedenen Standorten, wofür dieser lediglich eine grobe Bewertung der Erfüllung der Kriterien an den entsprechenden Standorten abgeben muss. Anschließend erhält dieser als Ergebnis der TOPSIS Methode ein Ranking der Standorte (vgl. Abbildung 6-2).



Die im dritten Abschnitt des Vorgehensmodells dargelegten Informationen liefern Hinweise zur Anordnungsplanung als Teil der mikroskopischen Standortplanung. Die exemplarisch dargestellte Anordnungsplanung ergibt sich aus den Ergebnissen der Simulationsstudie (siehe Abschnitt 3.7). Betrachtet werden logistische Infrastrukturflächen zur Pufferung und Bereitstellung der Rohstoffe, der Produkte, der Abfälle und des Leerguts sowie Depot- und Rangierflächen für die Fördermittel. Durch Anklicken der verschiedenen Felder kann der Nutzer mehr über den Zweck der Infrastrukturflächen erfahren und erhält Hinweise für die mikroskopische Standortplanung. Mittels dieses Schrittes erhält der Nutzer einen visuellen und inhaltlichen Überblick über die benötigte logistische Infrastruktur in Zusammenhang mit modularen Produktionsanlagen (vgl. Abbildung 6-3).

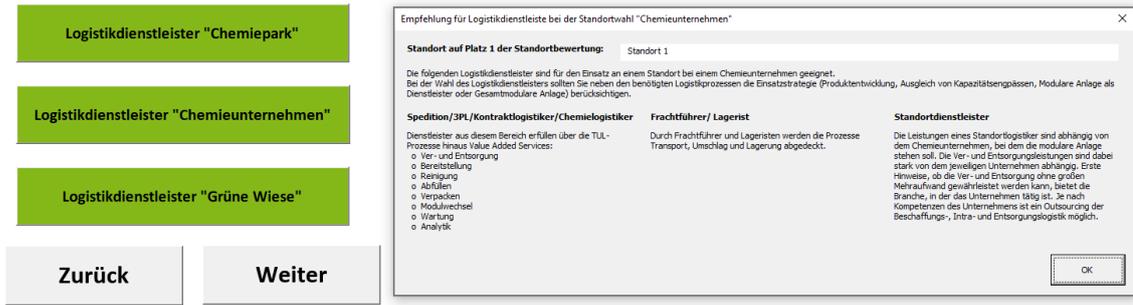


**Abbildung 6-3: Vorgehensmodell - Makroskopische Standortbewertung (eigene Darstellung)**

Mithilfe der Angabe der in Betracht kommenden Standorte werden in dem Abschnitt „Einsatz der Dienstleister“ Vorschläge zu möglichen Dienstleistungsformen gemacht, welche für den in der TOPSIS Methode am besten abgeschnitten Standort geeignet sind. Neben allgemeinen Hinweisen, die bei der Auswahl von Logistikdienstleistern für die Art des Standorts zu beachten sind, werden konkrete Vorschläge für Dienstleistungsformen gemacht und deren Leistungen beschrieben. Die Beschreibung der Dienstleister ist auf die Art des Standortes zugeschnitten. Folgende Dienstleister werden betrachtet:

- ➔ Standortlogistiker,
- ➔ Frachtführer/ Lagerist,
- ➔ Spedition/ 3PL / Kontraktlogistiker / Chemielogistiker.

Da es eine Vielzahl verschiedener Dienstleister im Logistiksektor gibt, grenzt diese Vorauswahl die Möglichkeiten auf relevante Dienstleister ein. Nutzer mit geringer oder keiner Erfahrung in der Logistik können mithilfe dieser Informationen das Konzept hinsichtlich der modularen Anlage konkretisieren (vgl. Abbildung 6-4).



**Abbildung 6-4: Vorgehensmodell - Einsatz der Dienstleister (eigene Darstellung)**

Die Betriebsmittel- und Prozessplanung spielt für eine optimale und reibungslose Produktion eine wichtige Rolle. Insbesondere bei modularen Anlagen müssen die Konzepte für die Betriebsmittel und Prozesse an die neuartigen Anforderungen angepasst werden. Im Vorgehensmodell werden die Komponenten, die bei der Planung zu berücksichtigen sind, aufgelistet und der Nutzer kann für jeden Aspekt genauere Informationen abfragen. Die Informationen umfassen Hinweise für die Planung und Beispiele zu möglichen Ausführungen. Der Bereich Betriebsmittelplanung sorgt für eine bedarfsgerechte Verfügbarkeit der Betriebsmittel. Zu berücksichtigen sind die Fertigungsstrategie (z. B. Make-to-order) sowie die Charakteristiken des Produktionsstandorts. Zu den zu berücksichtigen Betriebsmitteln zählen dabei die modulare Anlage, die Komponenten der modularen Anlage, die Fördermittel, die Ressourcen, die Anschlüsse sowie das notwendige Personal. Die im Rahmen der Prozessplanung betrachteten logistischen Prozesse sind:

- Innerbetriebliche Transportprozesse,
- Externe Transportprozesse,
- Umschlag,
- Kommissionierung, Lagerprozesse und Verpackung.

Das Vorgehensmodell beschreibt die für die Prozessplanung zu berücksichtigenden einzelnen Prozesse. Ebenfalls wird die Relevanz einer angemessenen Planung anhand von möglichen Konsequenzen aufgezeigt. Zusätzlich werden die zu berücksichtigenden Aspekte und die betroffenen Betriebsmittel genannt, um ein ganzheitliches Bild bei dem Nutzer zu erzeugen.

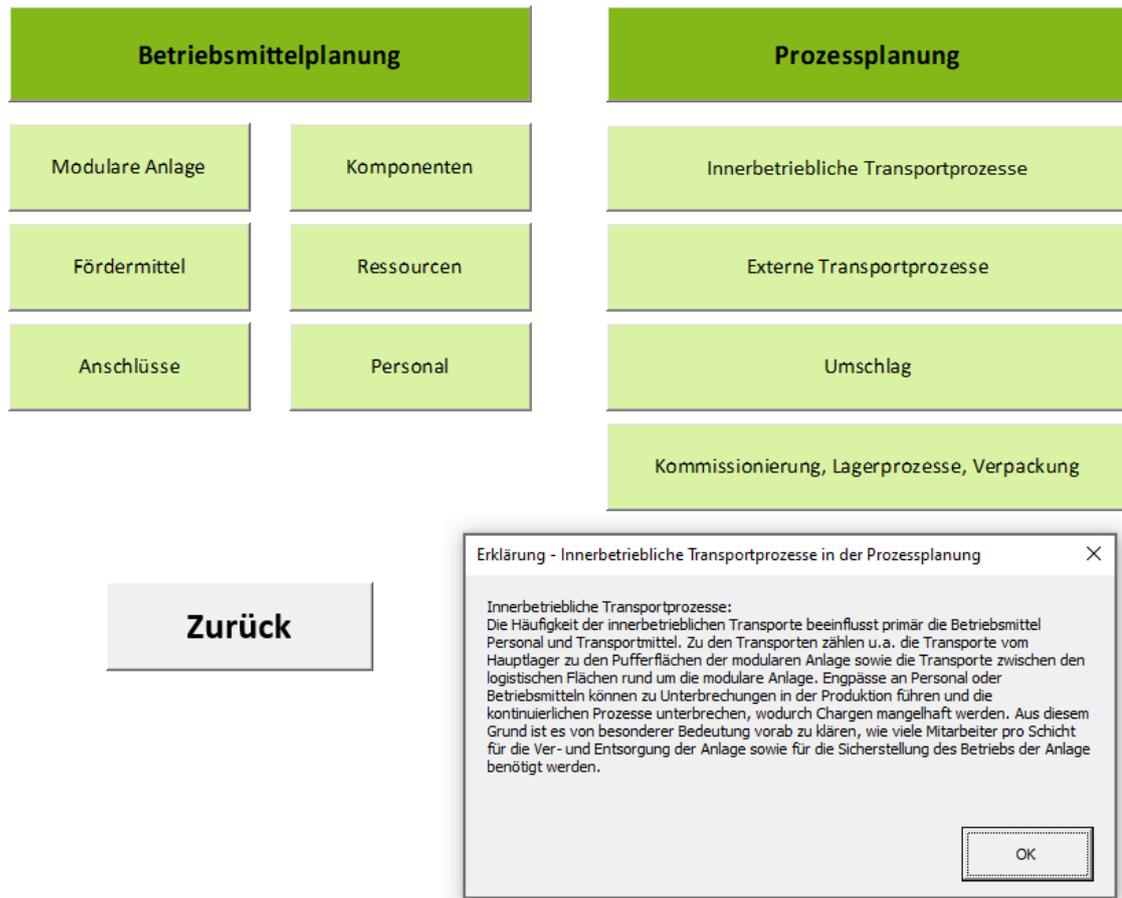


Abbildung 6-5: Vorgehensmodell - Prozess- und Betriebsmittelplanung (eigene Darstellung)

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In der Prozessindustrie (Chemie- und Pharmabranche) liegt der Forschungsfokus aktuell auf dem Konzept der Modularisierung und Wandlungsbefähigung der Produktion. Im Gegensatz zu den gegenwärtig verbreiteten zentralen Anlagen werden kleinskalige, mobile, dezentrale Produktionsanlagen in Rohstoff- und Kundennähe diskutiert, welche als modulare Einheit – beispielsweise in 20-Fuß-Standardcontainern – zum Einsatzort transportiert werden können. Abgeschlossene Forschungsprojekte zur Modularisierung, wie ‚COPIRIDE‘ und ‚F<sup>3</sup> Factory‘, haben die Machbarkeit einer modularen Produktion erfolgreich nachgewiesen. Mit dem Wandel von zentralen Großanlagen hin zu Netzwerken aus dezentralen Einheiten sind allerdings auch logistische Fragestellungen verbunden, die sich aufgrund der Neuartigkeit der Produktionsform in der Chemie- und Pharmabranche erstmalig stellen.

Aufgrund dessen wurde in diesem Forschungsvorhaben ein Vorgehensmodell entwickelt, welches KMU die notwendigen logistischen Anforderungen in Verbindung mit dem Betrieb wandlungsfähiger Systeme aufzeigt und darüber hinaus eine Hilfestellung bei der Standortwahl für die kleinformatische Produktion bietet. Somit erleichtert dieses Tool die Planung bisher branchenuntypischer logistischer Prozesse, die sich mit einer Umstellung auf eine kleinformatische Produktion ergeben, durch ein strukturiertes Vorgehensmodell umzusetzen. Die Zielgruppe des Vorgehensmodells sind Unternehmen, die einen Einsatz modularer Anlagen an unterschiedlichen Produktionsstandorten in Erwägung ziehen.

Zur Umsetzung dieses Vorhabens wurde in dem ersten Arbeitspaket (vgl. Kapitel 2) eine Detailanalyse bereits entwickelter wandlungsfähiger Anlagen durchgeführt. Die Recherchen und Experteninterviews haben gezeigt, dass infolge des Handlings mit chemischen Gütern hohe Anforderungen an die Logistik gestellt werden, die sich in produktionslogistische und sicherheitsrelevante Anforderungen aufteilen lassen (Krupp 2013). Darauf aufbauend wurden die Unterscheidungsmerkmale der Logistik für wandlungsfähige Systeme zu der konventionellen Logistik vorgestellt. Die Integration der Anlagen in erschlossene Produktionsstätte, bspw. einem Chemiepark, ermöglicht es die bereits vorhandenen infrastrukturellen Einrichtungen zu verwenden. Dies setzt jedoch eine hohe Mobilität, Flexibilität und Skalierbarkeit der an den Prozessen beteiligten logistischen Betriebsmittel voraus. Es gelten somit zum großen Teil die Charakteristiken der „konventionellen“ Logistik in der Chemieindustrie. Eine Produktion anhand der modularen Anlagen auf einer „Grünen Wiese“ erfordert dagegen eine komplette Neuplanung der logistischen Prozesse und Betriebsmittel. Zusätzlich zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass eine autonome Selbststeuerung der logistischen Prozesse anzustreben ist, um der Knappheit des verfügbaren Knowhows und den Mangel an Facharbeitskräften an den meist abgelegenen Standorten handhabbar zu machen.

Im zweiten Arbeitspaket (vgl. Kapitel 3) wurden Kriterien für die Auswahl geeigneter Produktionsstandorte wandlungsfähiger Systeme ermittelt. Darauf aufbauend wurde mit Hilfe der Expertise des ITL in dem Bereich der Simulation eine Simulationsstudie durchgeführt, welche einen Aufschluss über die konzeptionelle Gestaltung von Produktionsnetzwerken modularer Anlagen gibt. Im Hinblick auf das Design eines Produktionsnetzwerkes von Chemieunternehmen

zeigen die Untersuchungen, dass ein optimaler Dezentalisierungsgrad für Produktionsnetzwerke von wandlungsfähigen Systemen besonders wichtig ist. Infolgedessen ist ein Dezentalisierungsgrad zu wählen, welcher eine möglichst kurze Entfernung zu den Kunden gewährleistet, jedoch ebenfalls eine geringe Anzahl an Konfigurationsvorgängen zur Anpassung der Produktionskapazitäten an den Standorten erlaubt.

Das dritte Arbeitspaket (vgl. Kapitel 4) beschäftigt sich mit der detaillierten Betrachtung der logistischen Rahmenbedingungen an den Produktionsstandorten, wobei speziell auf die Positionierung wandlungsfähiger Systeme innerhalb eines Chemieparks eingegangen wird. Dabei sind die notwendigen logistischen und technischen Infrastruktureinrichtungen ermittelt worden, welche den KMU bei der Positionierung der modularen Anlagen unter Berücksichtigung der Produktionsstrukturen als Hilfestellung dienen. Des Weiteren haben zusätzlich durchgeführte Untersuchungen eine optimale Anordnung der benötigten logistischen Infrastruktur identifiziert.

In dem vierte Arbeitspaket (vgl. Kapitel 5) sind die verschiedenen Prozesse für die Ver- und Entsorgung der Anlage zu bestimmen und die dafür erforderlichen Betriebsmittel zu ermitteln. Als Hilfestellung dient dabei das in dem vorherigen Arbeitspaket entwickelte Simulationsmodell. Anhand der daraus gewonnen Erkenntnisse wurden im Anschluss die Alternativen der Prozess- und Betriebsmittelplanung für die verschiedenen Produktionsstandorte erläutert. Außerdem sind in diesem Arbeitspaket die Möglichkeit des Outsourcings logistischer Dienstleistungen untersucht worden, wobei es die Tauglichkeit der einzelnen Typen des Outsourcings im Hinblick auf die unterschiedlichen Produktionsstandorte zu analysieren galt. Für den Betrieb einer modularen Anlage innerhalb eines Chemieparks bietet sich beispielsweise der Standortlogistiker bzw. der Chemieparkbetreiber an, da diese bereits über ein umfassendes Know-how verfügen und eine Vielzahl von logistischen Dienstleistungen anbieten. Anhand der in diesem Arbeitspaket erzielten Ergebnisse können KMU eine Übersicht über die verschiedenen Möglichkeiten des Outsourcings in Abhängigkeit des Produktionsstandortes erlangen. Zusätzlich dazu werden ihnen die durchzuführenden Prozesse und benötigten Betriebsmittel für den reibungsfreien Produktionsprozess strukturiert aufgezeigt.

Das fünfte und letzte Arbeitspaket (vgl. Kapitel 6) beschäftigt sich mit der Entwicklung des Vorgehensmodells. Dafür wurde ein Excel-basiertes Tool zur Entscheidungsunterstützung entwickelt, welches die Ergebnisse aller Arbeitspakete komprimiert enthält. Es hilft den KMU die logistischen Anforderungen strukturiert zu erfassen und dient darüber hinaus als interaktive Planungsunterstützung.

Die zur Vorstellung der Projektergebnisse einberufenen Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses machten dabei die Notwendigkeit eines Vorgehensmodells deutlich. Die Sitzungen zeigten zudem offene Fragestellungen auf, welche in das Planungstool integriert werden konnten.

Ergänzend zu dem bereits vorgestellten Nutzen schafft das Vorgehensmodell ein einheitliches Verständnis der Standortkriterien bei allen während der Standortplanung beteiligten Akteuren, unabhängig von deren Tätigkeitsbereich. Dies führt zu einer erhöhten Akzeptanz der erzielten Ergebnisse in allen Unternehmensbereichen. Ergänzend wird durch die Anwendung des Vorgehensmodells der Aufwand für die Planung logistischer Aktivitäten rund um den Betrieb modulare Anlagen reduziert und das Risiko einer Fehlplanung verringert. Aufgrund der Anpassbarkeit und Skalierbarkeit des Vorgehensmodells auf das zu betrachtende Projekt, erhalten die Nutzer individuelle Empfehlungen.

Das Planungstool darf jedoch nicht als alleinige Grundlage für die Standortentscheidung von Produktionsanlagen dienen. Ferner soll es einen ersten Eindruck vermitteln und die verschiedenen Akteure für den Entscheidungsprozess zusammenbringen und ein einheitliches Verständnis über die verschiedenen Entscheidungskriterien schaffen. Die Standorte müssen nach der ersten Analyse mit diesem Tool genauer auf deren Eignung untersucht werden. Über die Standortbetrachtung hinaus, ist ebenfalls das Produktionsnetzwerk zu berücksichtigen, um das Potential modularer Produktionsanlagen voll ausschöpfen zu können. Dieses muss, wie die Produktionsstandorte, dynamisch auf Marktveränderungen reagieren können, was allerdings noch weitere Untersuchungen erfordert. (Becker et al. 2019; Clausen 2015) Mit dem entwickelten Tool liegt erstmalig ein Leitfaden für KMU vor, der es diesen ermöglicht, die wesentlichen Punkte für die Inbetriebnahme und Anpassung solcher Anlagen, bereits in der Planungsphase zu berücksichtigen.

## 8 Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

### Wissenschaftlich-technisches Personal

Entsprechend dem Finanzierungsplan wurden die Forschungsarbeiten durch qualifiziertes wissenschaftliches Personal durchgeführt. Die im Projekt eingesetzten Mitarbeiter hatten einen Masterabschluss in den Studienfächern Logistik bzw. Wirtschaftsingenieurwesen. Zudem verfügten sie über die zur Projektbearbeitung erforderlichen Kenntnisse im Bereich des Prozessmanagements und der Simulation. Für die Durchführung der Forschungsarbeiten wurden seitens der Forschungsstelle insgesamt 17,65 PM aufgebracht.

Ferner wurden im Projekt studentische Hilfskräfte zur Unterstützung der wissenschaftlichen Mitarbeiter im Umfang von 37 PM eingesetzt. Diese leisteten in den Bereichen Ergebnisdokumentationen, Datenaufbereitung und Öffentlichkeitsarbeit wertvolle Unterstützungsleistungen.

	2018	2019	2020	2021	Summe
<b>wissenschaftliche Beschäftigte</b>	0,95	6,70	9,00	1,00	<b>17,65</b>
<b>Studentische Hilfskräfte</b>	0,00	19,00	14,00	4,00	<b>37,00</b>

### Geräte

Gemäß dem Finanzierungsplan wurden innerhalb der beschriebenen Arbeiten keine Geräte angeschafft.

### Leistungen Dritter

Gemäß dem Finanzierungsplan wurden innerhalb der beschriebenen Arbeiten keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen.

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

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnte ein KMU-gerechtes Vorgehensmodell zur logistischen Umsetzung der modularen Produktion in der Chemie- und Pharmaindustrie entwickelt werden. Dafür wurde ein Excel-basiertes Tool entwickelt, welches die Arbeitsergebnisse aller Arbeitspakete komprimiert enthält. Dieses Tool ermöglicht es den KMU erstmals die notwendigen logistischen Anforderungen, die für den Betrieb modularer Anlagen zu berücksichtigen sind, zu erfassen und bieten darüber hinaus eine Hilfestellung bei der Standortwahl für die kleinformatische Produktion. Somit erleichtert dieses Modell, in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht, die Planung bisher branchenuntypischer logistischer Prozesse, die sich mit einer Umstellung auf eine wandlungsfähige Produktion ergeben.

Das Forschungsvorhaben ermöglichte bereits die Fortentwicklung der Logistikmethoden im Hinblick auf die logistische Anbindung der modularen verfahrenstechnischen Anlagen. Daher können die Forschungsergebnisse die Wettbewerbs- und Innovationsfähigkeit von KMU in besonderen Maße positiv beeinflussen. Darüber hinaus ist es den KMU durch Anwendung des Vorgehensmodells möglich, kritische Prozesse zu identifizieren und weiteres Verbesserungs- und Innovationspotenzial zu erschließen.

## 10 Dissemination der Forschungsergebnisse

Die Dissemination der im Rahmen des Forschungsprojektes erzielten Ergebnisse wurde und wird seitens der Forschungsstelle auf unterschiedlichen Wegen vorangetrieben. So wurden bereits während der Projektlaufzeit mehrere Artikel und Anzeigen in Konferenzbeiträgen und Fachveranstaltungen platziert, um so einerseits grundsätzlich auf das Forschungsvorhaben und die darin angestrebten Ziele aufmerksam zu machen und andererseits um weitere Mitglieder für den projektbegleitenden Ausschuss zu gewinnen.

Ein weiterer Schritt zur Verbreitung der erzielten Forschungsergebnisse ist der vorliegende Endbericht, welcher allen interessierten Unternehmen zur Verfügung gestellt wird. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens fließen zudem in die akademische Ausbildung der Masterstudenten an der TU Dortmund ein. Eine Übersicht der durchgeführten Maßnahmen bietet die nachfolgende Tabelle:

### 10.1 Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Bekanntgabe von Inhalt und Start des Forschungsvorhabens durch Poster auf dem Forum Transportlogistik 2018	Gewinnung weiterer Unternehmen und Multiplikatoren für den PA	Mit Projektbeginn	07. März 2018
Bekanntgabe von Inhalt und Start des Forschungsvorhabens durch Präsentation auf der Achema 2018	Gewinnung weiterer Unternehmen und Multiplikatoren für den PA	Mit Projektbeginn	12. Juni 2018
Abstimmung des Vorgehens innerhalb des Forschungsvorhabens mit dem PA	Gemeinsames Verständnis zum Gang der Forschung; Detaillierung der Einbindung des PA	1. Sitzung des PA (Kick-Off)	26. September 2018
Einzelgespräche mit Partnerunternehmen	Detailanalyse der existierenden Anlagenkonzepte	Arbeitspaket 1	Mai bis Oktober 2018
Veröffentlichung der Ergebnisse des Arbeitspaket 1 und 2 auf dem Jahrestreffen der Process-Net-Fachgemeinschaft Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik	Publikation der Forschungsergebnisse	Arbeitspaket 1 und 2	12.-13. November 2018
Einzelgespräche mit Partnerunternehmen	Detailanalyse der Kriteriengewichtung	Arbeitspaket 2	Januar bis April 2019
Diskussion über die Gestaltung der Prozesse und der hierfür notwendigen Ressourcen in Form	Konsens über die Rahmenbedingungen der Prozessgestaltung	2. Sitzung des PA	25. September 2019

von Betriebsmitteln und Personal	und dem Ressourcenbedarf		
Einzelgespräche mit Partnerunternehmen	Evaluierung der Positionierung und erforderlichen Prozesse	Arbeitspaket 3 und 4	Januar bis März 2020
Einzelgespräche mit Partnerunternehmen	Evaluierung des Vorgehensmodell	Arbeitspaket 5	Juni bis Dezember 2020

## 10.2 Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

<b>Maßnahme</b>	<b>Ziel</b>	<b>Rahmen</b>	<b>Datum / Zeitraum</b>
Einbindung der Ergebnisse in Lehrveranstaltungen	Vermittlung von fachlichen Erkenntnissen und methodischen Wissen	Akademische Lehre zur Ausbildung zukünftiger Fach- und Führungskräfte	Seit Januar 2021
Vorstellung der Forschungsergebnisse im Rahmen des projektbegleitenden Ausschuss	Auftakt zur Diversifikation der Forschungsergebnisse in die Wirtschaft.	3. Sitzung des PA	24. Februar 2021
Veröffentlichung der Entwicklungsergebnisse auf der 5th Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic (ICPLT)	Publikation der Forschungsergebnisse	Arbeitspaket 3, 4 und 5	17.-18. März 2021
Veröffentlichung des Ergebnisberichts	Allgemeine Publikation	Arbeitspaket 6	Mai 2021
Bereitstellung des Vorgehensmodells im Internet	Allgemeine Publikation	Arbeitspaket 6	AiF Mai 2021
Einbindung der Ergebnisse in weitere Forschungs- und Industrieprojekte des Instituts	Ergebnisnutzung	Forschung und Transferprojekte	Ab Mai 2021

### **10.3 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts**

Das entwickelte Excel-Tool ist für Unternehmen anwendbar und wurde zum Download auf der Homepage des Instituts für Transportlogistik bereitgestellt. Die direkte Nutzung des zentralen Forschungsergebnisses ist somit gewährleistet. Zur besseren Nutzung wurde den interessierten Anwendern ein Leitfaden in dem Tool zur Verfügung gestellt, welcher die Vorgehensweise erläutert. Somit sind die Forschungsergebnisse unmittelbar nach Abschluss des Forschungsvorhabens nutzbar.

Bereits jetzt ist, infolge der erzielten Ergebnisse, eine weitere Zusammenarbeit mit einem Projektpartner (Mitglied des PA) geplant, bei dem ein praxisnahes Vorhaben realisiert werden soll. Hierbei ist die vorhandene logistische Infrastruktur zu untersuchen und anschließend auf die Tauglichkeit der Integration eines wandlungsfähigen Systems zu prüfen. Das in diesem Forschungsvorhaben entwickelte Excel-Tool dient dabei als Grundlage. Durch diese und weitere Anwendungen des entwickelten Vorgehensmodells ist zu erwarten, dass sich Anforderungen an eine Weiterentwicklung ergeben. Hierbei steht das ausführende Institut gerne als Ansprechpartner zur Verfügung.



## Literaturverzeichnis

- ACHEMA magazine 2012. In: *Process*, zuletzt geprüft am 11.08.2020.
- Arnold, Dieter; Isermann, Heinz; Kuhn, Axel; Tempelmeier, Horst; Furmans, Kai (2008): Handbuch Logistik. 3., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer (VDI-Buch).
- Bank, Matthias (2007): Basiswissen Umwelttechnik. Wasser, Luft, Abfall, Lärm und Umweltrecht. 5., komplett neu bearbeitete Auflage. Würzburg: Vogel Buchverlag. Online verfügbar unter [http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2894923&prov=M&dok\\_var=1&dok\\_ext=htm](http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2894923&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm).
- Becker, Tristan; Lier, Stefan; Werners, Brigitte (2019): Value of modular production concepts in future chemical industry production networks. In: *European Journal of Operational Research* 276 (3), S. 957–970. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.01.066.
- Bretzke, Wolf-Rüdiger (2020): Logistische Netzwerke. 4th ed. 2020.
- Brückner, J. (2010): Infrastruktur und Logistik in Chemieparks am Beispiel CHEMPARK. In: *Chemie Ingenieur Technik* 82 (7), S. 1001–1003. DOI: 10.1002/cite.201000042.
- Bundesministerium des Innern (2021): Gemeinsames Ministerialblatt. GMBL: Carl Heymanns Verlag, 16.02.2021, S. 187–216.
- CHEMManager (2020): Prozesscontainer des Projektes F<sup>3</sup> Factory. Online verfügbar unter <https://www.chemanager-online.com/themen/anlagenbau-komponenten/f-factory-eine-flexible-modulare-produktionsplattform>, zuletzt geprüft am 03.07.2020.
- CHEMPARK (2020): Versorgung. Online verfügbar unter <https://www.chempark.de/de/versorgung.html>, zuletzt geprüft am 04.11.2020.
- Clausen, Uwe (2015): Schlusssachbericht: ModuLOG. Masterplan – Logistik & Supply Chain Strategien für modulare Chemie- und Pharmaproduktionen. Dortmund.
- Currenta GmbH & Co. OHG (o.D.) (2020): Einblick - Versorgung, Entsorgung, Rohstoffe. Online verfügbar unter <http://investoren.chempark.de/rohstoffe.html>, zuletzt geprüft am 25.08.2020.

- DECHEMA e.V. (2017): Modulare Anlagen. Flexible chemische Produktion durch Modularisierung und Standardisierung – Status quo und zukünftige Trends, zuletzt geprüft am 23.09.2020.
- Drexl, Andreas; Domschke, Wolfgang (1996): Logistik: Standorte. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Oldenbourg (Oldenbourgs Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- u. Sozialwissenschaften).
- Evonik (2020): EcoTrainer. Hg. v. Evonik. Online verfügbar unter <https://ecotrainer.evonik.de/stage.html>.
- Evonik Technology & Infrastructure GmbH (2019): Produktkatalog - Energy & Utilities. Online verfügbar unter <https://www.chemiepark-marl.de/cms/cpm/de/kunden/energyandutilities/pages/default.aspx>, zuletzt aktualisiert am 25.08.2020.
- F<sup>3</sup> Factory Consortium (2014): F<sup>3</sup> Factory: flexible, fast, future. Online verfügbar unter [www.f3factory.com](http://www.f3factory.com), zuletzt geprüft am 10.06.2018.
- Fleischer-Trebes, Christoph; Krasberg, Nicolai; Bramsiepe, Christian; Kockmann, Norbert (2017): Planungsansatz für modulare Anlagen in der chemischen Industrie. In: *Chemie Ingenieur Technik* 89 (6), S. 785–799. DOI: 10.1002/cite.201600083.
- Fraunhofer ICT-IMM (2013): COPIRIDE: Combining Process Intensification-driven Manufacture of Microstructured Reactors and Process Design regarding to Industrial Dimensions and Environment. Online verfügbar unter [www.copiride.eu](http://www.copiride.eu).
- Gail, Lothar; Gommel, Udo; Hortig, Hans-Peter (2012): Reinraumtechnik. 3., aktualisierte und erw. Aufl. s.l.: Springer-Verlag (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=528919>.
- Geipel-Kern, Anke (2018): Dezentral und modular: Wie eine Gerberei ihre eigenen Chemikalien herstellt. Würzburg. Online verfügbar unter <https://www.process.vogel.de/dezentral-und-modular-wie-eine-gerberei-ihre-eigenen-chemikalien-herstellt-a-770906/>, zuletzt aktualisiert am 30.10.2018, zuletzt geprüft am 04.03.2021.
- Geres, Roland; Kohn, Andreas; Lenz, Sebastian Cornelius; Ausfelder, Florian; Bazzanella, Alexis; Möller, Alexander (2019): Roadmap Chemie 2050. Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland : eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
- Gouthier, Matthias H. J.; Coenen, Christian; Schulze, Henning S.; Wegmann, Christoph (2007): Service Excellence als Impulsgeber. Strategien - Management -

- Innovationen - Branchen. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=3567803>.
- Grundig, Claus-Gerold (2018): Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. 6., neu bearbeitete Auflage. München: Hanser. Online verfügbar unter <http://www.hanser-fachbuch.de/9783446454002>.
- DIN EN ISO 6385:2016: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen. Online verfügbar unter [https://dechema.de/dechema\\_media/modulareanlagen.pdf](https://dechema.de/dechema_media/modulareanlagen.pdf).
- Gutenschwager, Kai; Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2017): Simulation in Produktion und Logistik. Grundlagen und Anwendungen. Berlin: Springer.
- Hachmann, Andreas; Keßler, Stephan; La Torre, Gustavo de (2016): Modulare Logistiksysteme in der Prozessindustrie unter Einbeziehung von Industrie 4.0.
- Heiserich, Otto-Ernst; Helbig, Klaus; Ullmann, Werner (2011): Logistik. Eine praxisorientierte Einführung. 4., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden.
- Höchst, T.; Klingenberg, R.; Grieger, F.; Gersemann, M.; Linden, B. von der (2010): Chemieparks und ihre Regionen. In: *Chemie Ingenieur Technik* 82 (7), S. 973–979. DOI: 10.1002/cite.201000045.
- Infraserv GmbH & Co. Höchst KG (2020): Energie | Industriepark Höchst. Online verfügbar unter <https://www.industriepark-hoechst.com/de/stp/menue/powered-by-infraserv/leistungen/energie/>, zuletzt geprüft am 25.08.2020.
- Kaczmarek, Sascha; Mosblech, Christian; Lier, Stefan; Hompel, Michael ten (2015): Modularisierung und automatische Anordnungsplanung der Intralogistik für modulare Containeranlagen in der Prozessindustrie. In: *Chemie Ingenieur Technik* 87 (9), S. 1246–1257. DOI: 10.1002/cite.201400160.
- Kille, Christian; Reuter, Constantin (2018): Erfolgsfaktoren von 4PL, LLP und 3PL in der Chemielogistik. Ein Leitfaden für Unternehmen der chemischen Industrie für eine zielgerichtete Outsourcing-Strategie durch Prüfung der Passigkeit zwischen Angebot und Nachfrage. Hg. v. Institut für Angewandte Logistik und CAMELOT Management. Würzburg. Online verfügbar unter [https://www.bvl.de/files/1951/2142/2330/Studie\\_-\\_Erfolgsfaktoren\\_von\\_4PL,\\_LLP\\_und\\_3PL\\_in\\_der\\_Chemielogistik.pdf](https://www.bvl.de/files/1951/2142/2330/Studie_-_Erfolgsfaktoren_von_4PL,_LLP_und_3PL_in_der_Chemielogistik.pdf), zuletzt geprüft am 31.08.2020.

- Kögel, Julian (2012): Entscheidungssystem für die relative Feststellung des Produktnutzens. AHP und TOPSIS zur Feststellung des Produktnutzens bei Konfigurationen von Verlagsprodukten am Beispiel der Warengruppe Ratgeber. Stuttgart: Hochschule der Medien. Online verfügbar unter [http://www.hdm-stuttgart.de/mp/stuttgarter\\_beitraege/194/volltext.pdf](http://www.hdm-stuttgart.de/mp/stuttgarter_beitraege/194/volltext.pdf), zuletzt geprüft am 24.03.2021.
- Krupp, Thomas (2013): Chemielogistik. Bedeutung, Strukturen, Dynamik ; [Studie. Hamburg: DVV Media Group (Schriftenreihe Wirtschaft & Logistik).
- VDI 3975, 03.2002: Lagerung von Gefahrstoffen.
- Law, Averill M. (2015): Simulation modeling and analysis. 5. Aufl. New York, NY: McGraw Hill Education.
- ISO 37500:2014, 2015: Leitfaden Outsourcing.
- Lier, Stefan; Wörsdörfer, Dominik; Grünewald, Marcus (2015): Wandlungsfähige Produktionskonzepte: Flexibel, Mobil, Dezentral, Modular, Beschleunigt. In: *Chemie Ingenieur Technik* 87 (9), S. 1147–1158. DOI: 10.1002/cite.201400191.
- Linde (2020): Armaturen & Versorgungssysteme. Hg. v. Linde. Online verfügbar unter [https://www.linde-gas.de/de/products\\_and\\_supply/equipment/index.html](https://www.linde-gas.de/de/products_and_supply/equipment/index.html), zuletzt aktualisiert am 14.07.2020.
- Logistik KNOWHOW (2013): Fertigungsprinzipien. Online verfügbar unter <https://logistikknowhow.com/materialfluss-und-transport/fertigungsprinzipien/>, zuletzt aktualisiert am 14.11.2013, zuletzt geprüft am 20.08.2020.
- Loos, Peter (1997): Produktionslogistik in der chemischen Industrie. Betriebstypologische Merkmale und Informationsstrukturen. Zugl.: Saarbrücken, Univ., Habil.-Schr., 1997. Wiesbaden: Gabler (Schriften zur EDV-orientierten Betriebswirtschaft).
- MAPSYN. Summary Report - MAPSYN “Microwave, Ultrasonic and Plasma assisted Syntheses” (2016). Online verfügbar unter <https://cordis.europa.eu/project/id/309376/reporting/de>, zuletzt geprüft am 15.04.2021.
- Mothes, Helmut (2015): No-Regret-Lösungen - Modulare Produktionskonzepte für komplexe, unsichere Zeiten. In: *Chemie Ingenieur Technik* 87 (9), S. 1159–1172. DOI: 10.1002/cite.201400133.
- Müller-Dauppert, Bernd (Hg.) (2009): Logistik-Outsourcing. Ausschreibung, Vergabe, Controlling. 2. Aufl., Stand Februar 2009. München: Vogel (Praxisbuch Logistik inside).

- Nagel, Arnfried (2011): Logistik im Kontext der Nachhaltigkeit. Ökologische Nachhaltigkeit als Zielgröße bei der Gestaltung logistischer Netzwerke. @Berlin, Techn. Univ., Diss., 2011. Berlin: Univ.-Verl. der Techn. Univ. Berlin (Schriftenreihe Logistik der Technischen Universität Berlin, 18).
- Ouyeder, Ouelid; Straube, Frank (2011): ModuLoSys - Modularisierung logistischer Systeme. Entwicklung eines Leitfadens zur Modularisierung logistischer Systeme und Konzeption von Betreibermodellen für kleine und mittelständische Unternehmen. Berlin: Universitätsverl. der TU.
- Peters, Malte L.; Zelewski, Stephan (2007): TOPSIS als Technik zur Effizienzanalyse. In: *WiSt - Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 36 (1), S. 9–15. DOI: 10.15358/0340-1650-2007-1-9.
- REFA-Consulting AG: Arbeitssystem Definition - Was ist das? Online verfügbar unter <https://refa-consulting.de/refa-lexikon/a/arbeitssystem>, zuletzt geprüft am 22.09.2020.
- Sattler, Klaus; Kasper, Werner (2000): Verfahrenstechnische Anlagen. Planung, Bau und Betrieb. Weinheim: Wiley-VCH.
- Schwemmer, Martin (2018): Top 100 der Logistik. Marktgrößen, Marktsegmente und Marktführer : eine Studie der Fraunhofer Arbeitsgruppe für Supply Chain Services SCS. [Ausgabe] 2018/2019. Hamburg: DVV Media Group GmbH.
- Siemens AG (2018): Flexibel durch modulare Produktion. Unter Mitarbeit von Moritz Gathmann. Online verfügbar unter <https://new.siemens.com/de/de/unternehmen/stories/industrie/flexibel-durch-modulare-produktion.html>, zuletzt aktualisiert am 04.06.2018, zuletzt geprüft am 12.04.2021.
- Suntrop, Carsten (Hg.) (2016): Chemiestandorte. Markt, Herausforderungen und Geschäftsmodelle. Weinheim: Wiley-VCH. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=11175445>.
- TRGS510, 2015: Technische Regeln für Gefahrstoffe.
- Tempelmeier, Horst (Hg.) (2018): Modellierung logistischer Systeme. Unter Mitarbeit von Sigrid Wenzel, Dirk Briskorn und Otto Ferstl. Berlin: Springer (Fachwissen Logistik).
- Temporärer ProcessNet-Arbeitskreis "Modulare Anlagen" (2017): Modulare Anlagen. Flexible chemische Produktion durch Modularisierung und Standardisierung - Status quo und zukünftige Trends. Hg. v. DECHEMA e. V. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter [dechema.de](http://dechema.de).

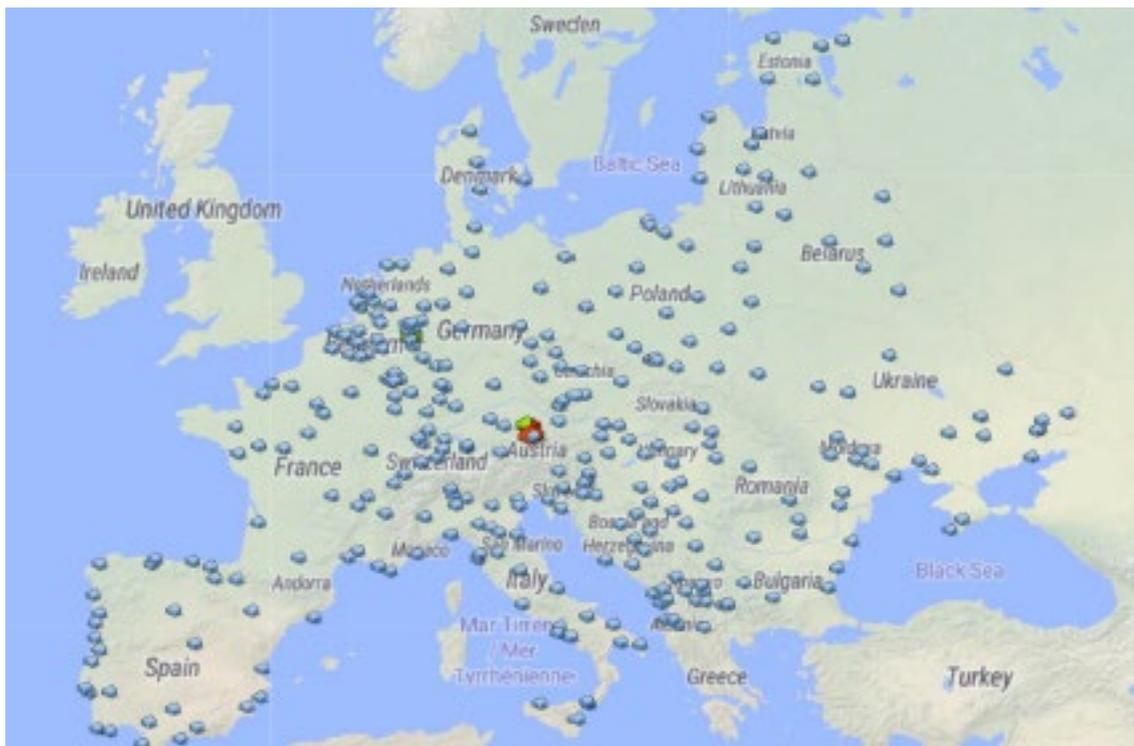
- The European Chemical Industry Council (2021): SQAS. Hg. v. cefic. Brüssel. Online verfügbar unter <https://www.sqas.org/>, zuletzt aktualisiert am 05.03.2021.
- TÜV Süd (2018): ISO 9001 - Qualitätsmanagementsystem. Hg. v. TÜV Süd. Online verfügbar unter <https://www.tuev-sued.de/management-systeme/iso-9001>, zuletzt geprüft am 16.04.2019.
- Vahrenkamp, Richard; Kotzab, Herbert; Siepermann, Christoph (2012): Logistik. Management und Strategien. 7., überarb. und erw. Aufl. München: Oldenbourg (Management 10-2012). Online verfügbar unter [http://www.degruyter.com/search?f\\_0=isbnissn&q\\_0=9783486718560&searchTitles=true](http://www.degruyter.com/search?f_0=isbnissn&q_0=9783486718560&searchTitles=true).
- VCI (2020): Chemiewirtschaft in Zahlen 2020. Hg. v. Verband der Chemischen Industrie. Online verfügbar unter <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/chemiewirtschaft-in-zahlen-print.pdf>, zuletzt geprüft am 15.04.2021.
- VDI 3633, 2014: VDI 3633 Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen.
- VDI-Richtlinie 2776, 06.2019: Verfahrenstechnische Anlagen.
- Voth, Martin; Hesse, Gernot (2017): Leistungsprozesse Spedition und Logistik. [Lernfelder 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14. 12. Auflage. Köln: Bildungsv Verlag EINS.
- Wildemann, Horst (2013): Chemieparcs. Organisationsstrukturen, Geschäftsmodelle und Erfolgsfaktoren. 1. Aufl. München: TCW Transfer-Zentrum.
- Wildemann, Horst; Gumprecht, Jesco; Lützel, Thorsten; Wolff, Thomas (2013): Chemieparcs als Service- und Kompetenzzentrum.
- Zaerpour, N.; Rabbani, M.; Gharehgozli, A. H.; Tavakkoli-Moghaddam, R. (2008): Make-to-order or make-to-stock decision by a novel hybrid approach. In: *Advanced Engineering Informatics* 22 (2), S. 186–201. DOI: 10.1016/j.aei.2007.10.002.

## Anhang

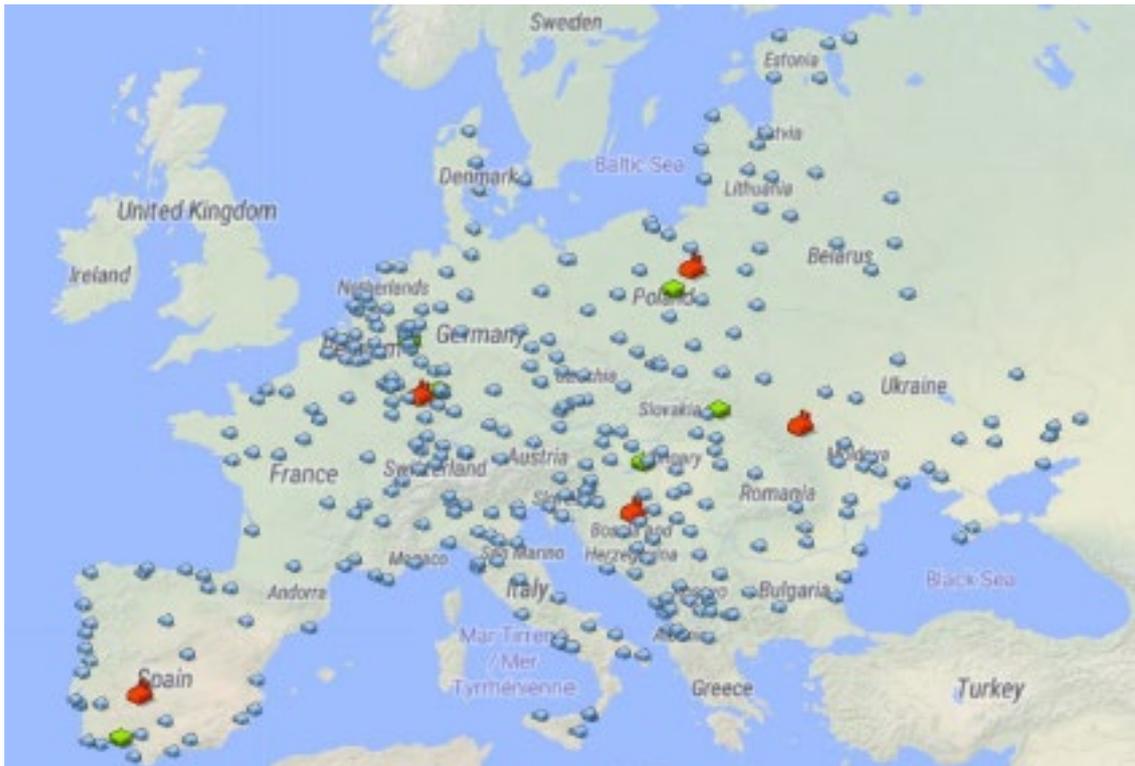
### Anhang A: Standorte der vier Netzwerkvariationen

Symbol	Bedeutung
	Hilfsstofflieferanten
	Produktionsstandorte
	Kunden

- **Zentrales Netzwerk mit einem Standort**



- **Dezentrales Netzwerk mit 5 Standorten**



- **Dezentrales Netzwerk mit 12 Standorten**



- **Dezentrales Netzwerk mit 20 Standorten**

