OTTO VON GUERICKE UNIVERSITÄT MAGDEBURG
MB IEPS
FAKULTÄT FÜR MASCHINENBAU
INSTITUT FÜR ENGINEERING VON PRODUKTEN UND SYSTEMEN

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

PowerPaste

Mobile Wasserstoffversorgung der nächsten Generation – TP Logistikkonzept für PowerPaste

FKZ: 03EI3026C

Laufzeit: 01.01.2020 – 31.12.2024

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg

Autoren:

Julius Brinken, Malte Kania

Hinweis: Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Anlagen

A – Ausführlicher Ergebnisbericht

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

I Kurzdarstellung

1 Aufgabenstellung

Ziel des Teilvorhabens war die Entwicklung eines logistischen Konzepts zur Versorgung von mobilen Anwendungen mit der neuartigen Wasserstoffspeicherform POWERPASTE. Dabei sollten sowohl die Anwendungsszenarien analysiert, geeignete logistische Prozesse entworfen und modellgestützt evaluiert als auch Aspekte der Verpackung, Abfüllung und Wiederverwertung konzipiert werden.

Die Hauptaufgaben des Teilvorhabens umfassten:

- Definition eines logistischen Systems mit relevanten Prozessen, Operatoren und Operanden,
- Durchführung einer Anwendungsanalyse zur Identifikation geeigneter Einsatzszenarien,
- Vorauswahl und Bewertung von Kartuschen und Transportverpackungen,
- Entwicklung eines Recyclingkonzepts für POWERPASTE-Kartuschen,
- Recherche und Identifikation relevanter Transportlösungen und gesetzlicher Rahmenbedingungen,
- Planung, Modellierung und Simulation eines Distributionssystems für POWERPASTE sowie
- Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsanalyse und der Vergleich mit konventionellen H_2-Logistiklösungen.

2 Voraussetzungen für die Durchführung

Das Vorhaben wurde vom Institut für Engineering von Produkten und Systemen (ehem. Institut für Logistik und Materialflusstechnik) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg durchgeführt. Das Institut verfügt über eine ausgewiesene Expertise in Methoden zur optimalen Gestaltung, Modellierung und Simulation von logistischen Prozessen und Systemen, welche für das Vorhaben zielführend eingebracht wurden. Die enge Zusammenarbeit mit den Partnern AVA und IFAM ermöglichten zudem eine praxisnahe Verankerung.

Die Bearbeitung des Projekts erfolgte im Rahmen des Teilvorhabens „Logistikkonzept für PowerPaste“. Projekttätigkeiten wurden zwischen November 2020 und Dezember 2024 durchgeführt.

Das Teilvorhaben knüpfte an bestehende Forschungsprojekte in den Bereichen Chemie- und Energieträgerlogistik an und baute auf diesen Kompetenzen auf.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Teilvorhaben gliederte sich in insgesamt fünf Arbeitspakete, die jeweils zentrale Aspekte des POWERPASTE-Logistikkonzepts abbilden. Die folgenden Ergebnisse wurden im Projektverlauf erarbeitet:

AP1: Anwendungsanalyse, Konzepte zur Umsetzung

- Holistische Systembeschreibung
- Konzeption wesentlicher Systemparameter

AP2: Synthese und Recycling

- Vorauswahl logistiktauglicher Kartuschen für den POWERPASTE-Transport
- Anforderungen an das Recycling aus logistischer Perspektive

AP3: Abfüllung und Verpackung

- Multikriterielle Auswahl eines geeigneten Gebindes für Transport und Anwendung
- Ableitung von Transport- und Entsorgungsszenarien
- Erarbeitung relevanter Rahmenbedingungen im Gefahrgutrecht

AP8: Logistik

- Modellierung, Simulation und Bewertung verteilter Distributionsprozesse
- Entwicklung eines digitalen Planungsmodells für Transport, Lagerung und Rückführung
- Simulation der Robustheit und Skalierbarkeit des Systems in unterschiedlichen Anwendungsszenarien

AP9: Wirtschaftlichkeitsanalyse, Verwertung

- Ableitung wirtschaftlicher Einsatzfelder mit besonderem Fokus auf Intralogistik, Sharing und KEP
- Entwicklung eines Fahrplans für Folgeprojekte
- Wissenschaftliche Verwertung durch Konferenzbeiträge und geplante Publikation

Das Teilvorhaben "Logistikkonzept für POWERPASTE" wurde im Zeitraum vom 01.11.2020 bis zum 31.12.2024 durchgeführt. Zum Zeitpunkt der Antragstellung war das Projekt auf einen Zeitraum von 36 Monaten ausgelegt, mit einem ursprünglichen Bewilligungszeitraum vom 01.11.2020 bis 31.10.2023. Aufgrund personeller Engpässe und einem daraus resultierenden Verzug in der Projektbearbeitung wurde im Juni 2023 eine kostenneutrale Verlängerung des Teilprojekts um 14 Monate (bis zum 31.12.2024) beantragt und durch den Projektträger bewilligt. Diese ermöglichte, den Verzug bei der Bearbeitung der Projektinhalte aufzuholen und das Teilprojekt zu einem erfolgreichen Abschluss zu führen.

4 Stand von Wissenschaft und Technik

4.1 Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

Vor Projektbeginn wurden für die Lagerung und den Transport von Wasserstoff vorwiegend drei Varianten betrachtet:

- Gasförmiger verdichteter Wasserstoff
- Flüssiger tiefkalter Wasserstoff
- Wasserstoff in chemischen oder physikalischen Verbindungen (z.B. LOHC)

Diese etablierten Verfahren eigneten sich jedoch vorwiegend für Großabnehmer mit hohem Energiebedarf und waren für kleinere, dezentrale Anwendungen logistisch schwer erschließbar. Die

POWERPASTE-Technologie stellte hier einen innovativen Ansatz dar, der neue logistische Möglichkeiten eröffnete.

Für das zu entwickelnde Logistikkonzept selbst waren keine Schutzrechte zu berücksichtigen.

4.2 Fachliteratur und verwendete Informationsdienste

Die wissenschaftliche Grundlage bildeten Arbeiten zu:

- Versorgungsketten für gasförmigen und flüssigen Wasserstoff (
- Modellierung von Wasserstoff-Versorgungsketten
- Pipeline-basierte Wasserstoffdistribution
- Vergleichende Analysen verschiedener Wasserstoff-Transportvarianten

Für die Recherche wurden gängige Datenbanken (Google Scholar, Scopus, Web of Science, JSTOR, etc.) verwendet. Eine Gesamtübersicht der verwendeten Literatur ist den im Rahmen des Teilprojekts entstandenen Veröffentlichungen zu entnehmen.

Für die pastöse Form des Wasserstoffs in POWERPASTE lagen vor Projektbeginn keine spezifischen logistischen Studien vor.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeiten wurden in enger Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern durchgeführt, insbesondere:

- Fraunhofer IFAM (POWERPASTE-Produktion und -Entwicklung
- AVA (Abfüllung und Verpackung)
- Vitesco Technologies (Anwendung und Integration)

Die Zusammenarbeit erfolgte durch regelmäßige Projekttreffen, Telefon- und Webkonferenzen. Zusätzlich wurden Expertengespräche mit Vertretern aus Speditionen und Entsorgungsunternehmen geführt, um praxisnahe Logistiklösungen zu entwickeln.

II Eingehende Darstellung

1 Erzielte Ergebnisse

Die gewährte Zuwendung wurde im Rahmen der Bearbeitung der definierten Arbeitspakete eingesetzt. Dabei wurden folgende Ergebnisse erzielt:

AP1: Anwendungsanalyse & Konzepte zur Umsetzung

- *Ziel:* Definition der Anwendungsszenarien und Entwicklung von Konzepten zur Umsetzung
- *Ergebnis:* Es wurde eine systematische Methodik zur Identifikation und Bewertung von Anwendungsszenarien entwickelt. Mittels einer adaptierten SWOT-Analyse und eines morphologischen Kastens wurden die Anwendungsszenarien Fahrzeugsharing, KEP-Lieferdienste und Flurförderfahrzeuge als besonders vielversprechend identifiziert und detailliert beschrieben.

AP2: Synthese und Recycling

- *Ziel:* Vorauswahl von Kartuschen und Entwicklung eines Recyclingkonzepts
- *Ergebnis:* Es wurde ein umfassender Kriterienkatalog für die Bewertung von Kartuschen und Verpackungen erstellt. Darauf aufbauend wurde ein konkretes Recyclingkonzept für POWERPASTE-Kartuschen entwickelt, das auch die Verwertung von Reststoffen (Magnesiumhydroxid) berücksichtigt.

AP3: Abfüllung und Verpackung

- *Ziel:* Auswahl der geeigneten Verpackung und Identifikation von Transportlösungen
- *Ergebnis:* Durch Expertengespräche wurden konkrete Transportlösungen und -prozesse für POWERPASTE identifiziert. Die rechtlichen Rahmenbedingungen für den Gefahrguttransport (ADR UN-3476) wurden recherchiert und dargestellt. Mittels einer multikriteriellen Bewertung wurde die Metallkartusche als optimale Verpackungslösung ausgewählt.

AP8: Logistik

- *Ziel:* Simulation von Stoffströmen und Entwicklung eines funktionalen Distributionssystems
- *Ergebnis:* Es wurde eine detaillierte Distributionsplanung mit Standortstruktur, Prozessdefinition und Stoffflussrechnung durchgeführt. Mit Hilfe einer Simulation wurden verschiedene Szenarien untersucht und die Machbarkeit des entwickelten Logistikkonzepts nachgewiesen.

AP9: Wirtschaftlichkeitsanalyse und Verwertung

- *Ziel:* Wirtschaftliche Bewertung und Verwertung der Ergebnisse
- *Ergebnis:* Die Wirtschaftlichkeit des entwickelten Logistikkonzepts wurde analysiert und mit konventioneller Wasserstofflogistik verglichen. Die Ergebnisse wurden in mehreren wissenschaftlichen Publikationen und auf internationalen Konferenzen vorgestellt.

Insgesamt wurden alle vorgegebenen Ziele erreicht. Besonders hervorzuheben ist die erfolgreiche Entwicklung eines ganzheitlichen Logistikkonzepts für POWERPASTE, das sowohl die Distribution als auch das Recycling umfasst und als Grundlage für eine spätere Markteinführung dienen kann.

Eine ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten sowie deren Ergebnisse sind umfangreich im beigefügten Ergebnisbericht (Anlage A) dargestellt.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Teilvorhaben „Logistikkonzept für PowerPaste“ war ursprünglich bewilligt für den Zeitraum vom 01.11.2020 bis 31.10.2023. Aufgrund anhaltender personeller Unterbesetzung und damit einhergehender Verzögerungen in der Bearbeitung der Arbeitspakete wurde eine kostenneutrale Verlängerung um 14 Monate (bis zum 31.12.2024) bewilligt.

Der zahlenmäßige Nachweis für das Teilvorhaben Logistik umfasst folgende Hauptpositionen:

- Personalkosten: Wissenschaftliche Mitarbeiter (inkl. anteiliger Jahressonderzahlungen) und studentische Hilfskräfte für die Durchführung von Forschungsarbeiten
- Investitionen: Hardware für Modellierung und Simulation
- Sachkosten: insb. Reisekosten im Rahmen der wissenschaftlichen Verwertung (vgl. Abschnitt 6), zur Durchführung von Experten-Gesprächen sowie zur Teilnahme an Konsortialtreffen; Verbrauchsmaterial; Software für Modellierung und Simulation

Die Kostenplanung wurde eingehalten. Detaillierte Angaben zum zahlenmäßigen Nachweis sind dem separaten Verwendungsnachweis zu entnehmen.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Die im Rahmen des Teilvorhabens geleisteten Arbeiten waren notwendig, um ein funktionsfähiges und wirtschaftliches Logistikkonzept für POWERPASTE zu entwickeln. Die Angemessenheit der Arbeiten zeigt sich in folgenden Aspekten:

- Systematische Herangehensweise: Von der Anwendungsanalyse über die Verpackungsauswahl bis zur Distributionsplanung wurde ein strukturierter, interdisziplinärer Ansatz verfolgt, der alle relevanten Aspekte der POWERPASTE-Logistik abdeckte.
- Methodische Vielfalt: Die Kombination aus qualitativen Methoden (Expertengespräche, morphologischer Kasten) und quantitativen Ansätzen (Simulation, Wirtschaftlichkeitsanalyse) ermöglichte eine fundierte und umfassende Bewertung.
- Praxisbezug: Durch die Einbeziehung von Expertenaus der Logistikbranche und die Berücksichtigung realer Rahmenbedingungen (z.B. Gefahrgutvorschriften) wurde ein praxistaugliches Konzept entwickelt.
- Wissenschaftliche Fundierung: Die Arbeiten bauten auf dem Stand der Wissenschaft auf und erweiterten diesen durch neue Erkenntnisse zur Logistik einer innovativen Wasserstoffspeichertechnologie.

Ohne die Drittmittel des BMWK wäre die Forschung des Teilvorhabens in der vorliegenden thematischen Komplexität nicht möglich gewesen.

4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Teilvorhabens bieten einen klaren Mehrwert für verschiedene Zielgruppen:

- Für die Verbundpartner: Das entwickelte Logistikkonzept schafft eine zentrale Grundlage für die spätere Markteinführung der POWERPASTE-Technologie. Die identifizierten Anwendungsszenarien sowie die empfohlene Kartuschenlösung können unmittelbar in die weitere Produkt- und Systementwicklung überführt werden.
- Für potenzielle Anwender: Die detaillierte Darstellung logistischer Prozesse, Kostenstrukturen und Rahmenbedingungen bietet eine belastbare Entscheidungsgrundlage für den zukünftigen Einsatz von POWERPASTE als Energieträger in betrieblichen Kontexten.
- Für die Wissenschaft: Die im Projekt erarbeiteten Methoden zur Analyse, Modellierung und Simulation verteilter Logistiksysteme erweitern den Stand der Forschung im Bereich nachhaltiger Energiesysteme und lassen sich auf vergleichbare Technologien übertragen.
- Für die Gesellschaft: Das Projekt leistet einen Beitrag zur Energie- und Verkehrswende, indem es die logistischen Voraussetzungen für den Einsatz alternativer Wasserstoffspeicher schafft und so neue Mobilitäts- und Versorgungskonzepte ermöglicht.

Die Verwertbarkeit ist insbesondere in den adressierten Anwendungsszenarien Fahrzeugsharing, KEP-Lieferdienste und Intralogistik hoch einzuschätzen.

Das entwickelte Simulationsmodell erlaubt darüber hinaus eine Anpassung an weitere Einsatzfelder und soll in Anschlussvorhaben weiterverwendet werden.

Die wissenschaftliche Verwertung der Ergebnisse erfolgte u. a. durch Beiträge auf internationalen Konferenzen (vgl. Abschnitt 6). Zudem fanden die Arbeiten Eingang in die Lehre an der OVGU, etwa im Rahmen zahlreicher Abschlussarbeiten.

5 Externer Fortschritt im Themenfeld

Während der Projektlaufzeit wurden folgende relevante Entwicklungen auf dem Gebiet der Wasserstofflogistik und -speicherung beobachtet:

- Ausbau staatlicher Wasserstoffstrategien: Insbesondere im Rahmen nationaler und europäischer Programme (z. B. Nationale Wasserstoffstrategie, IPCEI-Vorhaben) wurde die Infrastruktur für gasförmigen und flüssigen Wasserstoff deutlich vorangetrieben – mit Schwerpunkt auf großvolumige industrielle Anwendungen.
- Forschungszuwachs bei alternativen Speichertechnologien: Technologien wie LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers) oder Metallhydride fanden vermehrte wissenschaftliche und technologische Aufmerksamkeit, insbesondere im Hinblick auf deren Eignung für dezentrale Anwendungen und Transportsicherheit.
- Technologische Konkurrenz durch Schnellladeinfrastruktur: Die fortschreitende Entwicklung leistungsfähiger Schnelllade- und Ladepark-Infrastrukturen für batterieelektrische Fahrzeuge stellt in den identifizierten POWERPASTE-Anwendungsszenarien (z. B. Sharing, KEP) eine relevante Konkurrenz dar.

Diese externen Entwicklungen wurden laufend beobachtet und flossen aktiv in die Ausgestaltung des POWERPASTE-Logistikkonzepts ein, insbesondere in Form von:

- Anpassungen bei der Anwendungsszenarienauswahl,
- Einordnung der Technologie im Wettbewerbskontext sowie
- Konkurrenzanalysen im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbewertung.

Durch diese Einbettung wurde sichergestellt, dass POWERPASTE als Nischentechnologie gezielt dort positioniert wird, wo sie strukturelle oder betriebliche Vorteile gegenüber etablierten Lösungen bietet.

6 Veröffentlichungen

Die Ergebnisse des Teilvorhabens wurden in folgenden Veröffentlichungen präsentiert:

1. Brinken J, Schulz T, Assmann T: "Hydrogen as a paste – Application scenarios in the transport sector." European Transport Conference 2021 (Paper veröffentlicht, abrufbar unter: https://t1p.de/vcjev)
2. Brinken J, Könecke B, Kania M, Assmann T: "New Generation Hydrogen – How to Package Pastous Hydrogen for Mobility Applications." 4th Vehicle and Automotive Engineering Miscolc 2022 (Paper veröffentlicht, https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_37)
3. Mukku V D: "Zero-emission autonomous micro mobility – how to provide energy for autonomous bike sharing." Transport Research Arena Lisbon 2022 (Poster vorgestellt)
4. Mukku V D, Kania M, Brinken J, Haj Salah I, Assmann T: "Evaluation of energy supply technologies for autonomous cargo bike-sharing system." IFAC World Congress 2023 (Paper veröffentlicht, https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1890)
5. Assmann T: "Mobile Wasserstoffversorgung der nächsten Generation - TP Logistikkonzept für PowerPaste." Wasserstoffatlas Mitteldeutschland 2023, 2024 (Steckbrief veröffentlicht, Ausgabe 2024 abrufbar unter: https://t1p.de/lelu8)

Zusätzlich ist eine weitere Veröffentlichung mit dem Titel "Supporting the logistics planning of Powerpaste Supply Chain - a multi-method simulation approach" in Arbeit, deren Veröffentlichung für Q4 2025 geplant ist.

Die Ergebnisse wurden zudem in zahlreichen studentischen Abschlussarbeiten verwertet, die verschiedene Aspekte der POWERPASTE-Logistik untersuchten. Eine Auflistung ist dem erweiterten Ergebnisbericht (Anlage A) zu entnehmen.

OTTO VON GUERICKE UNIVERSITÄT MAGDEBURG MB IEPS FAKULTÄT FÜR MASCHINENBAU INSTITUT FÜR ENGINEERING VON PRODUKTEN UND SYSTEMEN

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Anlage A zu Abschnitt II des Schlussberichts zu Nr. 8.2 NBKF 98

Projekt: Powerpaste – Mobile Wasserstoffversorgung der nächsten Generation – TP Logistikkonzept für Powerpaste

FKZ: 03EI3026C

Laufzeit: 01.01.2020 – 31.12.2024

Zuwendungsempfänger: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg

Autoren: Julius Brinken, Malte Kania

Hinweis: Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1. Übersicht Projekt ... 13
1.1. Arbeitspakete ... 13
2. Anwendungsanalyse & Konzepte zur Umsetzung (AP1) ... 16
2.1. Konzept des logistischen Systems ... 16
2.1.1. Situationsanalyse/Problemidentifikation ... 16
2.1.2. Präzisierung der Aufgabenstellung ... 18
2.1.3. Variation wählbarer Prämissen ... 20
2.1.4. Funktionaler Entwurf ... 21
2.2. Anwendungsanalyse ... 22
2.2.1. Vergleichsrahmen ... 24
2.2.2. Konkurrierende Technologien ... 24
2.2.3. SWOT-Analyse zur Generierung von Anwendungseigenschaften ... 26
2.2.4. Anwendungseigenschaften ... 26
2.2.5. Morphologischer Kasten ... 30
2.2.6. Anwendungsszenarien ... 31
2.3. Parameter für Feldtest und Marktanwendungen ... 39
3. Synthese und Recycling (AP2) ... 40
3.1. Vorauswahl von Kartuschen und Transportverpackungen ... 40
3.1.1. Anforderungen aus Prozess und Anwendung an die Behälter ... 40
3.1.2. Sammlung möglicher Behälter ... 41
3.1.3. Sammlung von Bewertungskriterien ... 41
3.1.4. Vorauswahl von Behältern ... 47
3.2. Recyclingkonzept ... 47
3.2.1. Allgemeines Konzept ... 47
3.2.2. Recycling-Objekte ... 49
3.2.3. Recycling-Prozesse ... 49
3.2.4. Recycling-Systeme ... 50
3.2.5. Diskussion ... 51
4. Abfüllung und Verpackung (AP3) ... 53
4.1. Transportlösungen auf Basis von Expert*innengesprächen ... 53
4.1.1. Voraussetzungen für POWERPASTE-Entsorgung und -Transport ... 54
4.1.2. Prozesse bei POWERPASTE-Entsorgung und -Transport ... 55
4.1.3. Kosten für POWERPASTE-Entsorgung und -Transport ... 55
4.2. Rahmenbedingungen Gefahrguttransport ... 56
4.3. Auswahl der POWERPASTE-Kartusche ... 57

5. Logistik (AP8) ... 60
5.1. Planung der POWERPASTE-Distribution ... 60
5.1.1. Grobkonzept zur Struktur der POWERPASTE-Distribution ... 60
5.1.3. Prozessdefinition und -beschreibung ... 64
5.1.4. Stoffflussrechnung ... 65
5.1.5. Instrumentaler Entwurf ... 68
5.2. Modellierung und Simulation POWERPASTE-Distribution ... 68
5.2.1. Konzeptionelles Modell ... 68
5.2.2. Integration des Berechnungsmodells ... 69
5.2.3. Implementierung ... 69
6. Wirtschaftlichkeitsanalyse und Verwertung (AP9) ... 74
6.1. Ergebnisse Simulationsexperimente ... 74
6.1.1. Kostenstruktur des Distributionssystems ... 74
6.1.2. Vergleich mit konventioneller Wasserstofflogistik ... 75
6.1.3. Optimierungspotenziale ... 76
6.2. Wissenschaftliche Verwertung ... 77
7. Literaturverzeichnis ... 80
Anhang ... 81
A Definition Subsystem Produktion ... 81
B Übersicht Fahrzeugparameter ... 83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Arbeitspakete Uni-MD – IEPS 13
Tabelle 2: Problemidentifikation –IST-SOLL-Vergleich 17
Tabelle 3: POWERPASTE-Logistik: Operanden und Eigenschaften 17
Tabelle 4: spezifizierte Operationen bei POWERPASTE Logistik 18
Tabelle 5: Operatoren der POWERPASTE Logistik 19
Tabelle 6: Logistische Teilprobleme und resultierende Transformationen 19
Tabelle 7: Definition von Subsystemen 21
Tabelle 8: Übersicht Vergleichsrahmen 24
Tabelle 9: Vergleichsergebnisse POWERPASTE und konkurrierende Technologien 25
Tabelle 10: Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken von/für POWERPASTE 27
Tabelle 11: adaptierte SWOT-Fragen 28
Tabelle 12: Katalog von Anwendungseigenschaften 28
Tabelle 13: Morphologischer Kasten für Anwendungen von POWERPASTE 32
Tabelle 14: Ausgewählte Anwendungsszenarien durch Kombination von Anwendungseigenschaften 33
Tabelle 15: Prüfung „Ungeeignet"-Kriterien Carsharing 33
Tabelle 16: Prüfung „Ungeeignet"-Kriterien KEP 35
Tabelle 17: Prüfung „Ungeeignet"-Kriterien Flurförderfahrzeuge 37
Tabelle 18: Sammlung möglicher Behälter 43
Tabelle 19: relevante Kriterien für die Behälterauswahl 46
Tabelle 20: Multikriterieller Vergleich der Verpackungsvarianten 58
Tabelle 21: Werte und Aspekte zur Dimensionierung der Kartuschen 59
Tabelle 22: Basisinformation der POWERPASTE, der Ladungsträger und einer LKW-Ladung 60
Tabelle 23: Approximation der POWERPASTE-Grundbedarfe für die ermittelten Anwendungsszenarien 63
Tabelle 24: Übersicht zu angenommener Kundennachfrage 63
Tabelle 25: Kritische Prozesse im POWERPASTE-Distributionssystem (Auswahl) 66
Tabelle 26: Bedarf POWERPASTE für Beispielszenario 74
Tabelle 27: Wissenschaftliche Verwertung 78
Tabelle 28: Studentische Arbeiten 79

1. Übersicht Projekt

Der folgende Abschnitt greift die inhaltlichen Arbeitspläne der Teilvorhabenbeschreibung auf und stellt diese übersichtlich dar.

1.1. Arbeitspakete

Die folgenden Tabellen beschreiben die zu lösenden Teilprobleme der einzelnen Arbeitspakete sowie die erwarteten Ergebnisse des Partners Institut für Engineering von Produkten und Systemen an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (Uni MD – IEPS).

Tabelle 1: Übersicht Arbeitspakete Uni-MD – IEPS

Arbeitspaket	**AP1**
Titel:	Anwendungsanalyse, Konzepte zur Umsetzung
Bearbeitungs-zeitraum:	M1 bis M2 (2PM)
zu lösendes Teilproblem:	• Definition der Anwendungsszenarien und Entwicklung von Konzepten zur Umsetzung
Beitrag des Partners zur Problemlösung	
• Definition des logistischen Systems (Definition von Prozessen, Operatoren, Operanden, Objekten) • Anforderungsanalyse (Produkteigenschaften an Prozesse und das System) in Interaktion von Abfüllung, Logistik und Anwendung • Ermittlung und Beschreibung der logistischen Parameter für die Feldtests und Marktanwendungen	
Ergebnis des Teilarbeitspaketes	
• Holistische Systembeschreibung • Konzeption der wesentlichen Systemparameter	

Arbeitspaket	**AP2**
Titel:	POWERPASTE: Synthese und Recycling
Bearbeitungs-zeitraum:	M2 bis M34 (5PM)
zu lösendes Teilproblem:	• Weiterentwicklung der POWERPASTE von Technologiereife TRL 5 zu TRL 7
Beitrag des Partners zur Problemlösung	
• Vorauswahl von geeigneten Kartuschen und Transportverpackungen in Bezug auf die Eignung für verschiedene Logistiksysteme • Untersuchung und Integration von Recyclingkonzepten in die Anforderungen an das Logistiksystem und die Verpackungsgestaltung	

Ergebnis des Teilarbeitspaketes
• Logistisch geeignete Kartuschen für den POWERPASTE-Transport • Anforderungsdefinition des Recyclings an Logistiksystem und Kartuschen

Arbeitspaket	**AP3**
Titel:	Abfüllung und Verpackung
Bearbeitungs-zeitraum:	M4 bis M30 (5PM)
zu lösendes Teilproblem:	• Auswahl der geeigneten Verpackung, Umrüstung von Abfüllanlagen, Testabfüllungen
Beitrag des Partners zur Problemlösung	
• Recherche und Identifikation von relevanten Transportlösungen über strukturierte Marktstudien und Expert*innengespräche • Recherche der gesetzlichen Rahmenbedingungen für den Gefahrguttransport in Bezug auf die neuartige Verpackung, Mengen und Logistiksysteme • Auswahl der POWERPASTE-Kartusche über eine multikriterielle Bewertung entlang der Verpackungs-, Anwendungs- und Logistikkriterien	
Ergebnis des Teilarbeitspaketes	
• Optimales Gebinde für den Transport von POWERPASTE zum Abfüller • Logistik- und Transportlösungen/ -szenarien für den POWERPASTE-Transport • Gesetzliche Rahmenbedingungen für den Gefahrguttransport	

Arbeitspaket	**AP8**
Titel:	Logistik
Bearbeitungs-zeitraum:	M4 bis M36 (23PM)
zu lösendes Teilproblem:	• Simulation von Stoffströmen, Verpackungs- und Transportlogistik sowie eines Stoffkreislaufkonzepts
Beitrag des Partners zur Problemlösung	
• Untersuchung der Prozess- und Systemanforderungen der POWERPASTE und ihrer Verpackung unter Ableitung von Anpassungsbedarfen • Entwicklung und Validierung von prototypischen, funktionalen Distributionsprozessen, insbesondere Stoffflussrechnungen, Entwicklung eines instrumentellen Prozessentwurfs, modellhafte, simulationsgestützte Untersuchung der Robustheit • Ermittlung der anwendungsspezifisch optimalen Verpackung anhand geeigneter Methoden für Packprobleme • Transfer der prototypischen Distributionsprozesse auf andere Anwendungsszenarien	

• Modellgestütze Evaluation und Vergleich der Wirtschaftlichkeit der logistischen Lösung für POWERPASTE mit bestehender Wasserstofflogistik
Ergebnis des Teilarbeitspaketes
• Vollständig aufbereitete Logistikprozesse • Getestetes Distributions- und Recyclingsystem für den Feldtest • Fundierte Abschätzung des Distributions- und Kartuschen-Rücknahmesystems bezüglich des Aufwandes für weitere Anwendungsfelder und steigende Absatzmengen (Robustheit und Skalierbarkeit)

Arbeitspaket	**AP9**
Titel:	Wirtschaftlichkeitsanalyse, Verwertung
Bearbeitungs-zeitraum:	M1 bis M36 (2PM)
zu lösendes Teilproblem:	
Beitrag des Partners zur Problemlösung	
• Durchführung von Marktrecherchen • Erstellung von Produktions- und Fertigungskostenanalysen • Erstellung einer technischen und wirtschaftlichen Bewertung von POWERPASTE-Energiesystemen für die Elektromobilität • Erarbeitung weiterführender Projektvorhaben Allgemeine Arbeiten zur Verwertung der Projektergebnisse (Patente, Publikationen, Messen, Konferenzen, Workshops, Vorlesungen etc.)	
Ergebnis des Teilarbeitspaketes	
• Einstiegsmarkt für POWERPASTE-Energiesysteme für die Elektromobilität • Fahrplan für Folgeprojekte • Veröffentlichung von Ergebnissen (wiss.-technische Publikationen, Pressemitteilungen, Messen, Konferenzen, Workshops, Vorlesungen etc.)	

2. Anwendungsanalyse & Konzepte zur Umsetzung (AP1)

Ziel des AP 1 war die Definition der Anwendungsszenarien sowie die Entwicklung von Konzepten zu deren Umsetzung.

Dafür wurden folgende Teilaufgaben bearbeitet (Aufgaben aus AP-Beschreibung in kursiv):

- Konzept des logistischen Systems: *Definition des logistischen Systems* (Definition von Prozessen, Operatoren, Operanden, Objekten)
- Anwendungsanalyse*: Anforderungsanalyse* (Produkteigenschaften an Prozesse und das System) *in Interaktion von Abfüllung, Logistik und Anwendung*; *Ermittlung und Beschreibung der logistischen Parameter für die Feldtests und Marktanwendungen*
- Feldtest und Marktanwendungen: *Ermittlung und Beschreibung der logistischen Parameter für die Feldtests und Marktanwendungen*

Die Ergebnisse des AP1 umfassen eine holistische Systembeschreibung sowie die Konzeption wesentlicher Systemparameter. Teilergebnisse wurden im Rahmen European Transport Conference 2021 einem internationalen Fachpublikum vorgestellt[1]

2.1. Konzept des logistischen Systems

Die Planungssystematik zur Konzeption des logistischen Systems umfasst 4 Planungsschritte, welche nachfolgend detailliert dargestellt werden:

1. Situationsanalyse/Problemidentifikation
2. Präzisierung der Aufgabenstellung
3. Variation wählbarer Prämissen
4. Funktionaler Entwurf

2.1.1. Situationsanalyse/Problemidentifikation

Um ein logistisches System zu planen, sind im ersten Schritt eine Situationsanalyse und Problemidentifikation durchzuführen. Dies kann in einem IST-SOLL-Vergleich geschehen (Tabelle 2). Im Verlauf des Planungsprozesses wird diese abstrakte Problembeschreibung weiter detailliert.

Ein logistisches System umfasst den Fluss von physischen und informationellen Elementen. Die Flussobjekte werden als Operanden bezeichnet. Operanden sind Operationen (den Prozessen) unterworfen, die mithilfe von Operatoren durchgeführt werden. Für eine erste Konzeption des logistischen Systems, werden nachfolgend mögliche Elemente tabellarisch aufgezählt (Tabelle 3).

[1] Brinken et al. (2021): Hydrogen as a paste – Application scenarios in transport sector

Tabelle 2: Problemidentifikation –IST-SOLL-Vergleich

IST	SOLL
• Aktuelle Produktion nur für Forschungszwecke. • POWERPASTE-Vertrieb hauptsächlich als Stückgut. • Zentrale Produktion und Abfüllung. • Bei größeren Abnehmern ist dezentrale Abfüllung denkbar. • Freisetzung von entzündlichem Gas bei Kontakt mit Wasser. • Reststoffe fallen nach der Nutzung an.	Neugestaltung einer Supply Chain für POWERPASTE, die • Rücknahme-Prozesse beinhaltet. • mit geringen Kosten verbunden ist. • für unterschiedliche Anwendungsszenarien funktioniert. • Rollen, Wirtschaftlichkeit und Machbarkeit für die jeweiligen Akteure einbezieht. • eine Skalierbarkeit ermöglicht, und so einen Hochlauf bei Markteintritt vorbereitet.

Tabelle 3: POWERPASTE-Logistik: Operanden und Eigenschaften

PHYSISCHE OPERANDEN	POWERPASTE (PP)	Masse, Volumen, Qualität, Ort, Zeit
	Kartusche	Masse, Volumen, Füllstand (voll, leer, teilgefüllt, teilentleert), Zustand (intakt, leichte Schäden, defekt), Ort, Zeit
	Reststoffe	Masse, Volumen, Qualität, Ort, Zeit
	Wechselbehälter für Kartuschen	Masse, Volumen, Anzahl + Füllstand der Kartuschen, Zustand, Ort, Zeit
INFORMATIONELLE OPERANDEN	Bestellungen/Aufträge	Menge, Ort, Zeit, Verpackung, Preis, Kunde
	Rechnungen	Menge, Ort, Zeit, Verpackung, Preis, Kunde
	Zustandsinfo Kartuschen	Füllstand, Zustand
	Identifikationsnummern	Kartuschen, Wechselbehältern, Paletten
	Kundeninformationen	Ort, vergangene Bestellungen, spezifische Informationen

Die Operationen sind allgemein für Logistikprozesse typisch. Daher werden sie in der Tabelle 4 weiter spezifiziert.

Die Operatoren müssen im Planungsprozess genauer definiert und dimensioniert werden. Die grobe Auflistung einzusetzender Operatoren ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 4: spezifizierte Operationen bei POWERPASTE Logistik

PHYSISCHE OPERATIONEN	Lagern	• Was? Rohstoffe für PP, (leere &gefüllte) Kartuschen, pastöse PP (evtl. vor der Abfüllung), (leere, mit leeren/vollen Kartuschen gefüllte) Wechselbehälter • Wo(-bei)? Produktion, Transport/Distribution, Anwendung • Wann/Wie lange? Je nach Prozessgestaltung
	Transport/ Umschlag	• Produktion: Kartuschen und Wechselbehälter • Distribution: Wechselbehälter auf Paletten • Anwendung: Wechselbehälter und Kartuschen
	Verteilen/ Sammeln	• Distribution: Verteilen von Kartuschen und Wechselbehältern • Redistribution: Sammeln von leeren Kartuschen und Reststoffen
	Sortieren	• Rücknahme: Leere, teilentleerte, defekte Kartuschen
	Verpacken/ Umpacken	• Abfüllung von PP in Kartuschen • Kartuschen in Wechselbehälter • Wechselbehälter auf Palette
	Beschriften/ Identifizieren	• Distribution und Rücknahme • Kartuschen • Wechselbehälter • Paletten
INFORMATIONELLE OPERATIONEN	Erfassen	• Eingänge von Operanden (Bestellungen, Materiallieferungen)
	Verarbeiten	• Zustandsinformationen • Bestellungen (Lieferzeitpunkte, nötige Operanden/ Operatoren)
	Speichern/ Verwalten	• Kundeninformationen • Bestellungen • Lieferscheine • Lieferanteninformationen
	Ausgeben/ Nutzen	• Drucken von Etiketten • Drucken von Lieferscheinen

2.1.2. Präzisierung der Aufgabenstellung

Mit den vorangegangenen Tabellen wurde die Sammlung der wesentlichen Elemente für das zu planende Powerpaste Logistiksystem abgeschlossen. Der zweite wesentliche Planungsschritt, die Präzisierung der Aufgabenstellung schließt sich an.

Zuerst werden der Betrachtungsrahmen und die Unternehmenszeile aufgegriffen. Es handelt sich bei der vorliegenden Aufgabe um den Planungsfall einer Neugestaltung, dabei werden Standorte, Infrastruktur und optimale Prozess geplant. Es wird angenommen, dass ein Powerpaste-Produzent auf einen maximalen Gewinn fokussiert ist. Gleichzeitig ist aber klar, dass für einen Markthochlauf und im

Wettstreit mit Konkurrenztechnologien minimale Kosten ebenfalls zentral sind. Weiterhin müssen ökologische Ziele (Vermeidung von Abfällen und Emissionen) eingehalten werden.

Tabelle 5: Operatoren der POWERPASTE Logistik

PHYSISCHE OPERATOREN	*Verkehrstechnik*	• Transporter • Lastkraftwagen • Waggons • Laderampen • Fahrer:innen
	Lagertechnik	• Lager • Regale • Stellflächen • Tanks • Lagerarbeiter:innen
	Fördertechnik	• Gabelstapler • Gabelhubwagen • Rollenförderer • Sortierer • Arbeiter:innen
	Verpackungstechnik	• Abfüllanlagen • System zum Packen von Kartuschen in Wechselbehälter • Packsystem für Paletten
INFORMATIONELLE OPERATOREN	*Identifikationstechnik*	• Scanner o.ä.
	Steuerungstechnik	• Produktionssteuerung • Software
	Kommunikationstechnik	• Telefone • Internet • Computer • Software

In Tabelle 6 wird die grobe IST-SOLL-Transformation (Tabelle 2) in kleinere Teilschritte zerlegt. Daraus ergibt sich eine relativ detaillierte Sammlung von Aufgaben, die durch das zu planende System abbildbar sein müssen.

Tabelle 6: Logistische Teilprobleme und resultierende Transformationen

NR.	PROBLEMSTELLUNG	SOLL-TRANSFORMATION
1	POWERPASTE wird zentral produziert und wird bei dezentralen Anwendern benötigt.	Ortsveränderung – PP muss transportiert werden
2	POWERPASTE wird pastös produziert und aus Kartuschen verbraucht.	Verpackungsveränderung – PP muss abgefüllt werden
		…

3	POWERPASTE-Kartuschen sind kleinteilig, sollen gebündelt transportiert werden.	Mengenveränderung – Kartuschen müssen auf Ladungsträger
4	POWERPASTE-Kartuschen werden gebündelt transportiert, ggf. aber in kleineren/sehr unterschiedlichen Mengen vom Anwender abgenommen.	Mengenveränderung – Kartuschen müssen von den Ladungsträgern
5	Leere Kartuschen fallen bei der Anwendung an und sollen evtl. wiederverwendet werden.	Ortsveränderung – Kartuschen müssen ggf. zurück zur zentralen Produktion
6	Reststoffe fallen bei der Anwendung an und sollen Recycelt werden.	Ortsveränderung/Verpackungsänderung – Reststoffe müssen erfasst und transportiert werden
7	Anwender bestellen diskret, Produktion ist jedoch kontinuierlich.	Zeitüberbrückung – befüllte Kartuschen müssen bei der Produktion gelagert werden
8	Der Verbrauch von POWERPASTE ist relativ kontinuierlich, die Bestellungen diskret.	Zeitüberbrückung – volle Kartuschen müssen beim Anwender gelagert werden

Die Präzisierung der Aufgabenstellung umfasst darüber hinaus die Definition von Eingangsgrößen. Um Verbrauchsmengen und Transportgrößen abschätzen zu können, ist es aufgrund des hohen Innovationsgrads der POWERPASTE erforderlich, mögliche Anwendungsszenarien zu definieren sowie eine geeignete Kartuschenform auszuwählen. Die jeweiligen Arbeitsschritte sind im Detail in Abschnitt 2.2 bzw. Abschnitt 3.1 dargestellt.

2.1.3. Variation wählbarer Prämissen

Im dritten Planungsschritt erfolgt im Rahmen einer Vorplanung die Betrachtung grober Varianten für die einzelnen Subsysteme Produktion, Transport, Distribution und Rückführung.

Produktion: Zur Begrenzung des Planungsumfangs wird zunächst nur mit einem zentralen Produktionsstandort geplant. Falls im weiteren Planungsverlauf festgestellt wird, dass dadurch zu hohe Transportkosten anfallen, werden weitere Varianten mit mehreren Produktionsstandorten ergänzt.

Transport: Für die Vorplanung wird erstmal nur Straßentransport mit LKW geplant, dies reduziert die Vielfalt an nötigen Logistikmitteln und Infrastruktur. Später wird geprüft, wie alternative Transportmittel (Bspw. Bahn Einfluss auf Kosten und Ökologie nehmen). Der Transport kann bei der Realisierung durch Dienstleister übernommen werden (Kosteneinsparungen, Konzentration auf Kerngeschäft). Bei der Vorplanung wird der Transport jedoch selber durchgeführt, um eine grobe Abschätzung über Kosten, Emissionen und andere Kennzahlen zu erhalten. Für den Transport und den Umschlag sollten Kartuschen in größeren Behältern zusammengefasst werden. Kartons- oder Wechselbehälter kommen dafür in Frage. Für eine stärkere Berücksichtigung der Sicherheit (Schutz vor Wasser) wird zuerst die Variante Wechselbehälter geplant.

Distribution: Aufgrund der Anwendungsszenarien wird eine direkte Belieferung der einzelnen Anwender geplant.

Rückführung: Neben den Kartuschen sollen perspektivisch auch Reststoffe rückgeführt werden. Die Ausgestaltung ist zum Zeitpunkt der initialen Planung noch vollkommen offen, was eine Einbeziehung in die Vorplanung erschwert. Es wird daher angenommen, dass die Reststoffe über das normale Abfallsystem entsorgt werden und nur die Kartuschen zurückgeführt werden.

2.1.4. Funktionaler Entwurf

Im letzten Planungsschritt erfolgt die Beschreibung der Subsysteme Produktion, Transport, Distribution und Rückführung hinsichtlich relevanter Funktionen, Inputs, Outputs, Struktur sowie der Relation zwischen den jeweiligen Subsystemen.

Die Ergebnisse des Planungsschrittes sind nachfolgend in Tabelle 7 zusammengefasst. Eine ausführliche Darstellung der Subsysteme in grafischer Form ist in Anhang A dargestellt.

Tabelle 7: Definition von Subsystemen

Produktion		
Funktionen	*Inputs*	*Outputs*
Abfüllung (Startpunkt)	Leere Kartuschen, Powerpaste	Volle Kartuschen, ggf. Abfälle
Zusammenfassung in Transportbehältern	Leere Wechselbehälter, volle Kartuschen	Volle Wechselbehälter
Zeitüberbrückung/ Lagerung von vollen Wechselbehältern	Volle Wechselbehälter	Volle Wechselbehälter
Transportvorbereitung – Zusammenfassung/Sicherung von vollen Wechselbehältern auf Paletten	Volle Wechselbehälter, leere Paletten	Volle Paletten
Operanden		
Lager für leere Kartuschen und leere Wechselbehälter, Produktionsanlage PP, Abfüllanlage, Fördermittel für leere und volle Kartuschen, Packstation Kartuschen in Wechselbehälter, Lager für volle Kartuschen/Wechselbehälter, Lager für Paletten, Packstation für Paletten, Fördermittel für Paletten, je nach Automatisierungsgrad Mitarbeiter zur Bedienung der Maschinen		
Transport		
Funktionen	*Inputs*	*Outputs*
Verladung LKW	Leere LKW, volle Paletten	Volle LKW
Ortsveränderung LKW	Volle LKW	Volle LKW
Entladung LKW	Volle/teilw. beladene LKW	Volle Paletten, leere/ teilentladene LKW
		…

Operanden		
Fördermittel für Paletten, LKW, Verladerampe/-fläche, Fahrer für Fördermittel und LKW		
Distribution		
Funktionen	*Inputs*	*Outputs*
Lagerung von vollen Paletten, Entpacken von Paletten	Volle Paletten	Leere Paletten, volle Wechselbehälter, ggf. Abfälle
Lagerung von vollen Wechselbehältern	Volle Wechselbehälter	Volle Wechselbehälter
Übergabe an Anwender/Verbraucher	Volle Wechselbehälter	-
Operanden		
Fördermittel für Paletten, Entpackstation, Lager für Wechselbehälter, Verkaufsstation		
Rückführung		
Funktionen	*Inputs*	*Outputs*
Annahme von leeren Kartuschen und ggf. Zusammenfassung in Wechselbehältern	Leere Kartuschen, leere Wechselbehälter	Leere Kartuschen, Volle Wechselbehälter mit leeren Kartuschen
Lagerung von vollen Wechselbehältern mit leeren Kartuschen	Volle Wechselbehälter mit leeren Kartuschen	Volle Wechselbehälter mit leeren Kartuschen
Zusammenfassung auf Paletten	Volle Wechselbehälter mit leeren Kartuschen, leere Paletten	Volle Paletten
Rücktransport (vgl. Transport in umgekehrter Reihenfolge)		
Operanden		
Lager Leer-Behälter, Lager Paletten, Fördermittel für Paletten, LKW, Verladerampe/-fläche, Fahrer für Fördermittel und LKW		

2.2. Anwendungsanalyse

Im folgenden Abschnitt wird das grundsätzliche Vorgehen zur Erstellung von Nachfrageszenarien und deren Bedarfsquantifizierung erörtert.

Zunächst werden die Adaption der PESTEL-Analyse und des 5-Forces Modell nach Porter dargestellt. Die Eigenschaften von POWERPASTE werden den Perspektiven zugeordnet, welche sich aus der Adaption der beiden Modelle ergeben. Auf Basis eines Vergleichs mit konkurrierenden Technologien ergeben sich komparative Vor- und Nachteile der Technologie POWERPASTE. Somit können inhärente Stärken und Schwächen identifiziert werden, welche zusammen mit extrinsischen Einflüssen die Anwendung einer SWOT-Analyse ermöglichen. Aus der SWOT-Analyse resultieren

Attribute von Szenarien, welche eine Anwendung von POWERPASTE begünstigen oder erschweren.

Im darauffolgenden Abschnitt werden die Anwendungsattribute in verschiedene Kategorien eingeteilt. Ziel der Kategorisierung ist die eindeutige Zuordnung eines Anwendungsattributes zu einer Kategorie. Jede Kategorie repräsentiert einen Charakter eines Szenarios und das jeweilige Attribut ermöglicht die qualitative Beschreibung des Szenarios. Zur Bildung der Szenarien wird mit Hilfe eines morphologischen Kastens jeweils ein Attribut einer jeden Kategorie ausgewählt, sodass eine Basis für eine potentielle Anwendung entsteht.

Abschließend werden die Anwendungsfelder, auf die sich die Anwendungsszenarien beziehen, untersucht. Durch die Übertragung der technischen Parameter von POWERPASTE auf batterieelektrische Referenzanwendungen kann der Bedarf in den untersuchten Anwendungsfeldern, in Abhängigkeit der Marktdurchdringung, approximiert werden. Der Nachfrage-Forecast wird hierbei zeitlich und räumlich differenziert betrachtet.

Die entwickelte Methodik ist in der folgenden Abbildung 1 noch einmal veranschaulicht:

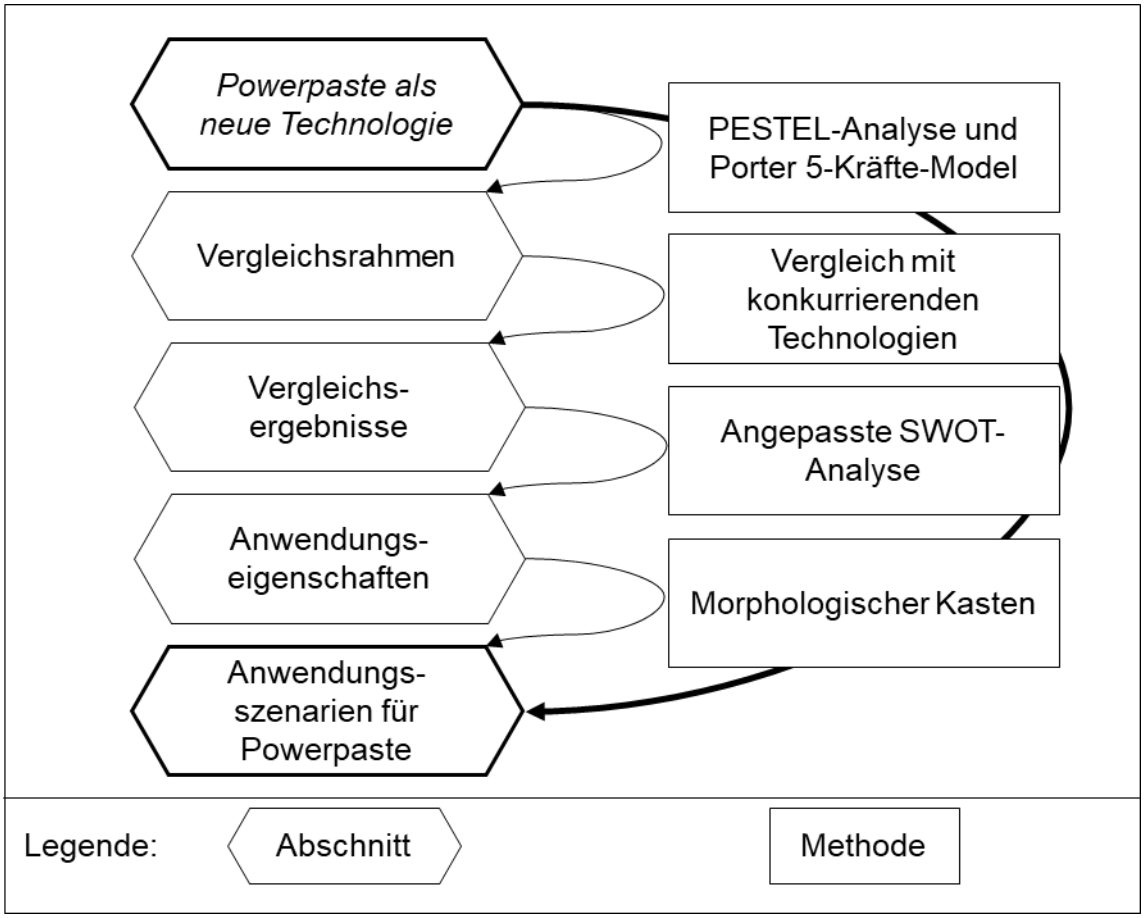


Abbildung 1: Methodik zur Definition von POWERPASTE-Anwendungsszenarien

2.2.1. Vergleichsrahmen

Zunächst wird ein Vergleichsrahmen erarbeitet, dafür werden Analyse/Vergleichskriterien aus bestehenden Analysemethoden (PESTEL & Porter-5-Forces) spezifisch für diesen Vergleichsfall zusammengefasst, wobei externe und interne Einflüsse berücksichtigt werden.

Bei der PESTEL-Analyse gibt es 5 verschiedene Perspektiven, bei denen aufeinander referenzierende Fragen gebildet werden, anhand derer die Position des Produktes ganzheitlich in Bezug auf vergangene, gegenwärtige und zukünftige Entwicklungen des Technologieumfeldes eingeordnet wird.[2]

Das *Porter 5-Forces Modell* wird genutzt, um die Charakteristika eines Marktes zu beschreiben. Hierbei werden Lieferanten, neue Wettbewerber, Kunden und Substitute in die Betrachtung eingeschlossen. Im Fokus dieser Analyse steht insbesondere die Einordnung gegenüber Substitutionsprodukten und neuen Wettbewerben, weshalb andere Analysekriterien nicht aufgenommen werden[3].

Tabelle 8: Übersicht Vergleichsrahmen

KRITERIEN NACH *PESTEL*	KRITERIEN NACH *PORTER*
Politisch	Energetisch
Ökonomisch	Monetär
Soziokulturell	Logistisch
Technologisch	
Ökologisch	
Rechtlich	

2.2.2. Konkurrierende Technologien

POWERPASTE ist wie viele Wasserstoffspeicher eine Technologie, welche einen Beitrag zur Dekarbonisierung bzw. Defossilisierung leisten kann. Fossile Energieträger werden in den Vergleich nicht einbezogen, da Ihre Verbrennung aktuell nicht mit den politischen Emissionseinsparzielen in Einklang zu bringen ist. Weitere diskutierte Energiespeicher für die Mobilität, sind synthetische E-Fuels oder Biokraftstoffe. Während die synthetischen Kraftstoffe aufgrund der hohen Kosten und der Energieeffizienz kritisch gesehen werden, verstärken Biokraftstoffe das Problem der begrenzten landwirtschaftlichen Anbauflächen. Aktuell wird vor allem auf batterieelektrische Fahrzeuge oder Fahrzeuge, die mit komprimiertem, gasförmigem Wasserstoff betrieben werden, gesetzt. Diese beiden Speichertechnologien (Gasförmiger Wasserstoff bei 350 bar, Li-Ion Akkumulatoren) werden daher als Hauptkonkurrenten angenommen und in den Vergleich einbezogen.

Die Ergebnisse des Vergleichs mit den konkurrierenden Technologien sind in *Tabelle 9* dargestellt und dienen in nachfolgenden Arbeitsschritten in Kombination mit einer SWOT-Analyse als Grundlage für die Definition der Anwendungsszenarien.

[2] Grünig, Rudolf; Kühn, Richard (2018): Global Environment Analysis.
[3] Porter, Michael E. (1985): The Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance.

Tabelle 9: Vergleichsergebnisse POWERPASTE und konkurrierende Technologien

Vergleichs-kriterien	**POWERPASTE**	**Gasförmiger H_2 (GH_2)**	**Li Ion Akkus**
Energetische Eigen-schaften	Energiespeicherung dauerhaft bei mittlerer bis hoher Dichte	Energiespeicherung dauerhaft mit hoher Dichte	Entladung über Zeit, geringe Dichte
Leistungs-bereich	Niedriger Leistungsbereich, mittlere Effizienz	Variabler Leistungsbereich, mittlere Effizienz	Variabler Leistungsbereich mit hohen Spitzenlasten, hohe Effizienz
Kosten	Hohe Energiekosten, geringe Infrastrukturkosten	Mittlere Energiekosten, hohe Infrastrukturkosten	Geringe Kosten bei Eigenerzeugung, sonst mittlere Kosten, mittlere Infrastrukturkosten
Handling	Keine besondere Infrastruktur, einfaches Stückgut mögl.	Betankungsinfra-struktur, Drucktanks	Ladeinfrastruktur mit hohen Strömen/Lasten
	Schneller Kartuschenwechsel, aber Reststoffe und Wasser zusätzlich	Schnelle Betankung	Hohe Ladedauer
Politik	Starke Unterstützung zu erwarten	Starke Unterstützung zu erwarten	Starke Unterstützung zu erwarten
Ökonomie	Markt und Einsatz müssen noch definiert werden	Großes Wachstum; Problem: Herkunft großer Mengen grünem H_2 unklar	Großes Wachstum, keine Einschränkungen zu erwarten
Kultur	Sichererer als G H_2	Positiver als Akkus	Vorbehalte wegen Produktion und Eignung
Technologie	Komplexer, gilt selber als Innovation	Etwas komplexer, Innovation werden angestrebt	Simple Technologie, zahlreiche Innovation zu erwarten

…

Ökologie	Betrieb noch weniger effizient, Produktion aufwendiger als GH_2	Betrieb/H_2 weniger effizient, System-Produktion effizienter, keine Emission	Betrieb sehr effizient, Produktion energieintensiv, keine Emission
Recht	brennbares Gas bei Kontakt mit Wasser, aber kein Druck	brennbares Gas unter Druck	Akkus bei Defekt entzündbar (Dämpfe)

2.2.3. SWOT-Analyse zur Generierung von Anwendungseigenschaften

Die SWOT-Analyse wird dazu genutzt einen Überblick über Möglichkeiten der Marktpositionierung eines Unternehmens oder in diesem Fall der POWERPASTE zu geben. Hierbei wird eine interne Analyse zur Identifizierung von Stärken und Schwächen (basierend auf den Porter-Kriterien) und eine externe Analyse zur Identifizierung von Chancen und Risiken (PESTEL-Kriterien) durchgeführt. [4] In mehreren Workshops mit verschiedenen Wissenschaftler:innen aus Logistik und Mobilität wurden Stärken, Schwächen, Chancen und Bedrohungen für die POWERPASTE identifiziert und in Tabelle 10. Manche der Stärken und Schwächen können jedoch vor Marktreife der Technologie noch nicht endgültig eingeschätzt werden, da sie von der Gestaltung des Systems bzw. der Komponenten abhängig sind (Wassertank, Wasserstoffgenerator, Behälterart haben bspw. Einfluss auf Gewicht und Handling der Technologie).

2.2.4. Anwendungseigenschaften

Nach der Sammlung der SWOT-Elemente (Tabelle 10) folgt die eigentliche SWOT-Analyse. Dazu werden die vier Bereiche – Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken – miteinander kombiniert und mithilfe der adaptierten Leitfragen aus Tabelle 11 analysiert. Die klassischen Zielsetzungen einer SWOT-Analyse, wie etwa die Nutzung von Stärken zur Erschließung von Chancen oder die Reduzierung von Schwächen zur Vermeidung von Risiken, werden dabei auf den spezifischen Kontext angepasst.

Die Antwort auf die Fragen aus Tabelle 11 liefern im Anschluss die Eigenschaften der Anwendungsszenarien. Bei den Kombinationen von Stärken & Chancen (SO), Schwächen & Chancen (WO) und Stärken & Risiken (ST) ergeben sich Anwendungseigenschaften, die einen Einsatz von POWERPASTE begünstigen (Einsatz von PP gut möglich, wenn …). Bei der Kombination von Schwächen & Risiken wird etwas vom klassischen Motiv der SWOT abgewichen, da aus dieser Kombination eher Anwendungseigenschaften entstanden sind, die einem Einsatz von POWERPASTE im Wege stehen (Einsatz von PP schwierig, wenn…). Die Tabelle 12 stellt den vollständigen Katalog von generierten Anwendungseigenschaften dar. In der ersten Spalte ist das Kombinationsfeld genannt, welches zur Eigenschaft führt. In der zweiten Spalte sind die Kennungen der Kombinierten Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken aus Tabelle 10 aufgeführt. Die dritte Spalte beschreibt die Eigenschaft, welche für oder gegen eine Anwendung von POWERPASTE spricht.

[4] Schawel, Christian; Billing, Fabian (2011): SWOT-Analyse. In: Top 100 Management Tools.

Tabelle 10: Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken von/für POWERPASTE

	S-STÄRKEN		W-SCHWÄCHEN		O-CHANCEN		T-RISIKEN
S1	Schneller Kartuschen Tausch (Energienachfüllung) möglich	W1	hohe Kosten pro gelieferter Energieeinheit	O1	Dekarbonisierungstechnologie	T1	starker Wettbewerb der Energiespeicher
S2	einfacher Transport und Umschlag (als Stückgut/Paket)	W2	niedriger Wirkungsgrad im Vergleich zu Akkus	O2	stark wachsende Märkte	T2	etablierte Technologien als Markteintrittsbarriere
S3	keine Infrastruktur vor Ort / Im Betrieb nötig (außer Straßenanbindung, Lager und Entsorgung)	W3	vorerst nur für niedrigen Leistungsbereich einsetzbar	O3	nicht abhängig von nationalen Infrastruktur-projekten	T3	viele Innovationen bei konkurrierenden Technologien
S4	einfaches Handling für den Anwender	W4	Reststoffe fallen an	O4	starke staatliche Förderung	T4	Wasserstoffverfügbarkeit stärker vom EE Ausbau abhängig
S5	ähnlicher Platzbedarf wie G H_2 und geringerer Platzbedarf als Akkus*	W5	leere Kartuschen fallen an	O5	geringere Auflagen bei Einsatz (Sicherheit G H_2, Entsorgung Akkus)	T5	Akteure in die Entsorgungsprozesse einbinden
S6	weniger Gewicht als Akkus*	W6	entzündlich bei Kontakt mit Wasser	O6	hohe Zahlungsbereitschaften bei privater Mobilität		
S7	dauerhafte Speicherung ohne Verluste	W7	bei gleichem Energiebedarf höheres Gewicht als GH_2	O7	weniger abhängig von Rohstoffkosten und Verfügbarkeit als Akkus		
S8	keine hohen Drücke wie beim GH_2	W8	komplexer durch H_2-Generator, Steuerung des Wassertanks	O8	großer Importbedarf für Grünen Wasserstoff/Transportwege noch Offen		
S9	sicherer als GH_2	W9	Wasser muss mitgeführt und nachgetankt werden				
S10	grundsätzlich kreislauffähig	W10	Abwärme entsteht (Betriebstemperatur 60˚-80˚C)				

Tabelle 11: adaptierte SWOT-Fragen

KOMBINATION	KLASSISCHES MOTIV	ADAPTIERTE LEITFRAGE
Stärken & Chancen	Stärken für Chancen nutzen	In welchen Szenarien ist POWERPASTE durch Stärken und Chancen vielversprechend?
Schwächen & Chancen	Schwächen abbauen, um Chancen zu nutzen	In welchen Szenarien lassen sich die Schwächen durch Chancen kompensieren?
Stärken & Risiken	Stärken gegen Risiken einsetzen	In welchen Szenarien müssen oder können Stärken die Risiken überwinden?
Schwächen & Risiken	Schwächen abbauen, um Risiken zu vermeiden	In welchen Szenarien drohen die Schwächen die Risiken zu verstärken?

Tabelle 12: Katalog von Anwendungseigenschaften

KOMBINATIONS-FELDER	KOMBINATION VON …	EIGENSCHAFT DER ANWENDUNG
STÄRKEN UND CHANCEN	S1-O1/S1-O2	Geeignet, wenn keine lange Standzeiten möglich sind oder Vorteile durch kurze Standzeiten entstehen.
	S2-1/S2-5	Geeignet, wenn hohe Flexibilität nötig ist, da Einsatzorte wechseln.
	S3-O3/S7-O3	Geeignet, wenn die Einsatzorte (noch) ohne Infrastruktur sind (bspw. abgeschiedene oder abgeschnittene Orte).
	S4-O5	Geeignet, wenn keine Schulungen oder Wissen der Anwender voraussetzbar sind.
	S5-O1/S6-O1	Geeignet, wenn geringeres Gewicht oder Volumen (z.B. als Akkus) benötigt wird oder sinnvoll ist.
	S7-O1	Geeignet, wenn nur selten Energie benötigt wird.
	S8-O1/S9-O1	Geeignet, wenn höhere Sicherheit als mit GH_2 nötig ist.
	S8-O5/S9-O5	Geeignet, wenn bei anderen Technologien hohen Auflagen drohen.
	S3-O1	Geeignet, wenn nur einzelne oder wenige Fahrzeuge im Einsatz sind und eigene (Lade-/Tank-) Infrastruktur nicht ökonomisch ist.
		…

	S1-O1/S2-O2	Geeignet, wenn eine Entkopplung von Reichweite und Tanken vorteilhaft ist (Skalierbarkeit der Reichweite).
	S10-O7/S10-O8	Geeignet, wenn ein Autarkie-Anspruch besteht oder bei Notfall- und Reserveenergie Anwendungen.
	S1-O1/S1-O2	Geeignet, für den Transport mit Rohrleitungen.
STÄRKEN UND BEDROHUNGEN	S1-T1/S1-T2/S2-T1	Geeignet, wenn Akkus aufgrund zu langer Ladedauer nicht eingesetzt werden.
	S1-T2/S2-T2	Geeignet, wenn besondere Flexibilität nötig ist (wechselnde Einsatzzwecke).
	S2-T1/S3-T1	Geeignet, wenn Aufladung bzw. Tanken an verschiedenen oder wechselnden Orten stattfinden.
	S6-T2/S6-T1/S5-T1/S5-T2	Geeignet, wenn Vorteile bei geringem Gewicht oder Volumen entstehen.
	S7-T2/S2-T2	Geeignet, für den Einsatz im Inselbetrieb.
	S3-T1/S3-T2	Geeignet, wenn keine Fläche für Lade-/ H_2-Tank-Infrastruktur verfügbar sind oder diese teuer sind.
	S2-T2	Geeignet, für Orte oder Regionen ohne EE-/GH_2-Erzeugungspotential (bspw. Schutzgebiete).
	S7-T1/S8-T2	Geeignet, für Einsatzgebiete mit stark schwankenden Temperaturen (Wüsten, Gebirge, Tiefkühllager).
SCHWÄCHEN UND CHANCEN	W1-O1	Geeignet, wenn Energiekosten wenig Einfluss auf die Gesamtkosten haben.
	W1-O4	Geeignet, wenn hohes Gesellschaftliches Interesse vorhanden (z.B.: Förderung) ist.
	W2-O1/W3-O1	Geeignet, wenn nur geringer Leistungsbedarf für Anwendung vorhanden ist.
	W4-O1/W5-O1	Geeignet, wenn Reststoffe und Kartuschen entsorgt, zurückgeführt oder gelagert werden können.
	W6-O1	Geeignet, wenn der Einsatz in Gebäuden stattfindet.
	W7-O1	Geeignet, wenn das Gewicht des Energiespeichers unkritisch ist.
	W7-O4/W7-O1	Geeignet, wenn es um Leuchtturm-Charakter-Anwendungen zur Demonstration geht.
	W8-O4/W8-O1	Geeignet, wenn noch keine Marktreife erreicht (Fahrzeug in der Entwicklung).
	W1-O6	Geeignet, für Zahlungskräftige/-bereite Konsumenten/Nutzer.
		…

	W1-O7	Geeignet, wenn Interesse an Diversifizierung/Risikostreuung bezüglich der Antriebe/Energieversorgung besteht.
	W2-O1	Geeignet, wenn neben dem Strom die Abwärme genutzt werden kann.
	W9-O2	Geeignet, wenn Wasser sowieso vorhanden ist.
	W1-O1	Geeignet, wenn es um teure Sonder-/Spezialfahrzeuge geht.
	W1-O1	Geeignet, für kleine/Leichtfahrzeuge
SCHWÄCHEN UND RISIKEN	W1-T1/W1-T2	Schwieriger, wenn die Energiekosten die Gesamtkosten prägen.
	W1-T2/W7-T2	Schwieriger, wenn alternative Infrastruktur bereits vorhanden.
	W1-T3/W2-T3	Schwieriger, wenn Akkuanwendungen schon/fast etabliert sind
	W3-T1/W3-T2/W3-T3	Ungeeignet, wenn große Dauerleistung nötig
	W4-T1/W5-T1	Schwieriger, wenn Reststoffe/Kartuschen Entsorgung aufwendig
	W7-T1/W7-T3	Schwieriger, wenn Gewicht kritisch und GH_2 möglich
	W8-T1/W9-T1	Schwieriger, wenn einfaches/zuverlässiges System nötig
	W7-T1	Ungeeignet, wenn, Produktion direkt am Verbauort erfolgen muss
	W2-T4	Schwieriger, je weniger EE-Ausbau/Überschuss (national und international unterscheiden)
	W2-T1	Schwieriger, wenn Effizienz wichtig/Energie knapp

2.2.5. Morphologischer Kasten

Um aus den Anwendungseigenschaften umfassende Anwendungsszenarien zu bilden, ist es notwendig eine Systematik zur Herleitung aufzustellen. Der morphologische Kasten ist eine Kreativitätstechnik mit dem Ziel allen definierten Teilbereichen (oder Teilproblemen) eine Lösungsmöglichkeit zuzuordnen und damit eine vollständige Lösung zu generieren[5]. Die Anwendungseigenschaften sind in diesem Fall die Teillösungen, die zu einer Gesamtlösung, dem Anwendungsszenario, kombiniert werden. Die Anwendungseigenschaften aus dem Kombinationsfeld „Schwächen und Risiken“ werden ausgeschlossen, da sie keine geeigneten Anwendungsszenarien beschreiben. Aus den restlichen Anwendungseigenschaften können folgende Kategorien gebildet werden:

[5] Schawel, Christian; Billing, Fabian (2011): Morphologischer Kasten. In: Top 100 Management Tools.

- Fahrzeug und System
- Einsatzort
- Funktion oder Leistung
- Kosten
- Anforderungen der Anwender

Manche der Eigenschaften lassen sich eindeutig zuordnen, manche Eigenschaften können mehreren Kategorien zugeordnet werden. Bei uneindeutigen Zuordnungen wird auf eine möglichste gleichmäßige Verteilung geachtet. Das resultierende Morphologische Kasten ist in Tabelle 13 dargestellt.

2.2.6. Anwendungsszenarien

Mit dem morphologischen Kasten kann theoretisch eine sehr hoher Zahl an Szenarien generiert werden. Mit steigender Anzahl der betrachteten Szenarien erhöht sich der Aufwand für die Logistikplanung. Es ist sinnvoll und notwendig, diesen zu begrenzen und nur ausgewählte Szenarien für die Planung zu berücksichtigen. Dabei ist eine Beschränkung auf Szenarien mit einem potentiell großen Markt und umfangreichen Absatzmöglichkeiten sinnvoll. Zusätzlich sollten die Szenarien untereinander divers sein, um die Entwicklung der Technologie nicht zu sehr auf einen Anwendungsfall zu verengen. Die technische Umsetzbarkeit wird ebenfalls berücksichtigt.

Vorgehen zur Beschreibung der Anwendungsszenarien

1. **Generierung Szenarien:** Kreative Kombination von Anwendungseigenschaften
2. **Auswahl Szenarien:** Marktpotential, Unterschiedlichkeit und Umsetzbarkeit
3. **Prüfung der Kriterien und Beschreibung der Anwendungseigenschaften:**
   - Muss das Szenario muss aufgrund von „Ungeeignet Kriterien“ aussortiert werden? (Siehe Tabelle 12, Kombinationsfeld: Schwächen und Risiken)
   - Definition des Marktes durch die Beschreibung der kombinierten Anwendungseigenschaften. (Siehe Tabelle 12, „Geeignet“- Kriterien)
   - Definition des Use Case (Siehe Tabelle 12, „Schwieriger“-Kriterien)

Die Generierung von Szenarien auf Basis des Morphologischen Kastens (Tabelle 13) ergab eine Reihe von möglichen Anwendungen: Fahrzeugsharing, Yachtschifffahrt, KEP-Dienste, leichte LKW im ländlichen Raum, Entsorgungsfahrzeuge, Gabelstapler, Autonome Routenzüge sind einige davon. Davon wurden drei Anwendungsszenarien ausgewählt (Tabelle 14), die einen großen Markt ermöglichen, technisch umsetzbar sind und gleichzeitig zueinander unterschiedlich sind.

Tabelle 13: Morphologischer Kasten für Anwendungen von POWERPASTE

FAHRZEUG/SYSTEM	EINSATZORT	FUNKTION/LEISTUNG	KOSTEN	ANFORDERUNGEN DER ANWENDER
Geringer Leistungsbedarf	Hohe Flexibilität nötig, da Einsatzorte wechseln	Leuchtturm-Charakter-Anwendungen zur Demonstration	Bei hohen Auflagen	Keine langen Standzeiten möglich, Vorteile durch kurze Standzeiten
Gewicht nicht entscheidend	Orte an denen (noch) keine Infrastruktur ist bzw. abgeschiedene Orte	Nur selten wird Energie benötigt	Einzelne/wenige Fahrzeuge im Einsatz, Infrastruktur lohnt sich nicht	Geringeres Gewicht/Volumen als Akkumulatoren nötig
Keine Marktreife	In Gebäuden	Höhere Sicherheit als mit GH_2 nötig	Sonder-/Spezialfahrzeuge	Reststoffe/Kartuschen können entsorgt/zurückgeführt werden
Nutzung der (Ab-) Wärme	Wenn Wasser vorhanden ist	Entkopplung von Reichweite und Tanken vorteilhaft	Energie-/ Betriebskosten haben wenig Einfluss auf die Gesamtkosten	Interesse an Diversifizierung/Risikostreuung
Klein/-Leichtfahrzeuge	Einsatzgebiete mit stark schwankenden Temperaturen	Bei notwendiger Notfall- und Reserveenergie	Keine/teure Fläche für Lade-/H_2-Tank-Infrastruktur	Aufladung/Tanken an verschiedenen/wechselnden Orten
		Akkus aufgrund von Ladedauer nicht eingesetzt		Keine Schulungen oder Wissen der Anwender voraussetzbar
		Vorteile bei geringem Gewicht/Volumen		Zahlungskräftige Konsumenten/Nutzer

Tabelle 14: Ausgewählte Anwendungsszenarien durch Kombination von Anwendungseigenschaften

KATEGORIE	FAHRZEUGSHARING	KEP-LIEFERDIENSTE	FLURFÖRDER-FAHRZEUGE
Fahrzeug/ System	Klein-/ Leichtfahrzeuge	Nutzung der (Ab)Wärme	Gewicht ist nicht entscheiden (Vergleich gasförmiger Wasserstoff)
Einsatzort	Hohe Flexibilität nötig, da Einsatzorte wechseln	Orte an denen (noch) keine Infrastruktur vorhanden ist	Einsatz in Gebäuden
Funktion/ Leistung	Höhere Sicherheit, als mit gasförmigem Wasserstoff	Gewicht und Volumen sind kritisch	Entkopplung von Reichweite und Tanken ist vorteilhaft
Kosten	Keine oder teure Flächen für Lade- bzw. Wasserstoff-infrastruktur	Einzelne wenige Fahrzeuge sind im Einsatz	Keine oder teure Flächen für Lade- bzw. Wasserstoff-infrastruktur
Anforde-rungen der Anwender	Keine Schulungen oder Wissen der Anwender voraussetzbar	Interesse an Diversifizierung und Risikostreuung	Reststoffe können entsorgt bzw. gelagert werden

2.2.6.1. Beschreibung Anwendungsszenario - Fahrzeugsharing

Der Fahrzeugsharing Markt in Deutschland wächst von Jahr zu Jahr kontinuierlich[6] und bietet aufgrund seiner besonderen Einsatzbedingungen ein praktisches Umfeld für den Einsatz von POWERPASTE. Zu Beginn wird geprüft, ob das Anwendungsszenario aufgrund von „Ungeeignet"-Kriterien ausgeschlossen werden muss (Tabelle 15).

Tabelle 15: Prüfung „Ungeeignet"-Kriterien Carsharing

AUSSCHLUSSKRITERIEN	ERLÄUTERUNG
Ungeeignet, wenn große Dauerleistung notwendig ist	Viele kleine Fahrzeuge im Carsharing, die nur temporär eingesetzt werden. Daher keine hohe Dauerleistung der Fahrzeuge.
Ungeeignet, wenn Produktion von POWERPASTE direkt am Verbrauchsort erfolgen muss	Verbrauchsorte sind meistens sehr gut erschlossenen, eine Produktion vor Ort ist nicht notwendig

Marktdefinition

Fahrzeug/System: Insbesondere kleine Fahrzeuge können kurzfristig mit POWERPASTE betrieben werden, da der geringe Leistungsbedarf technisch darstellbar und die Fahrzeugentwicklung einfacher ist.

[6] Bundesverband CarSharing (2022): CarSharing in Deutschland – Jahresbericht 2021/2022

Einsatzort: Wechselnde Einsatzorte bei Sharingfahrzeugen sind gut darstellbar, da diese nicht an eine öffentliche Ladeinfrastruktur gebunden sind. Durch die POWERPASTE-Technologie kann eine Betankung quasi überall vorgenommen werden.

Funktion/Leistung: Im Vergleich zu gasförmigem Wasserstoff, ermöglicht die Nutzung von POWERPASTE einen sicherheitsrelevanten Vorteil, da der pastöse Wasserstoff ein geringeres Gefahrenpotential besitzt. Die kann Kunden überzeugen, welche von vermeintlichen Risiken der Wasserstofftechnologie abgeschreckt sind.

Kosten: Da nur geringe Kosten für eine Infrastruktur bei POWERPASTE entstehen (Sammelbehälter statt Drucktank oder Ladeinfrastruktur), werden doppelte Infrastrukturkosten, wie diese bei wasserstoffbasierten Anwendungen folgen würden, vermieden[7]. Dieser Vorteil tritt bei einer Volkswirtschaftlichen Betrachtung oder bei sehr großen Flotten auf.

Anforderungen an den Anwender: Da keine Schulungen oder besonderes Wissen für die Anwendung von POWERPASTE notwendig sind, bestehen keine Barrieren in der Nutzung. Gleiches gilt zwar bereits für bestehende Wasserstofftechnologien sowie Batterieelektrischen Fahrzeugen, allerdings wird dadurch die Messlatte gelegt, dass der Kartuschentausch für den Anwender technisch einfach handhabbar sein muss.

Definition des Use Cases Carsharing

Grundsätzlich bietet sich der Einsatz von POWERPASTE in den Ländern an, die über genug erneuerbare Energien verfügen, um den pastösen Wasserstoff herzustellen. Dies bedeutet zu gleich, dass sich POWERPASTE in Ländern, die den Ausbau von erneuerbaren Energien schneller und konsequenter verfolgen möglicherweise flächendeckender verbreiten kann. Daher ist der Einsatz von POWERPASTE unmittelbar mit politischen Entscheidungen verbunden, auch insofern das wasserstoffbasierte Technologien eine geringere Effizienz aufweisen und daher politisch gewollt sein müssen.

Carsharing-Betreiber betonen, dass Treibstoff/Strom nur einen kleinen Bruchteil der Gesamtaufwendungen darstellt. So weist etwa der Anbieter Miles darauf hin, dass zwar Energiekosten ein offensichtlicher Faktor sind, aber Wertminderung, Versicherungen und Wartung weit größere Kostenblöcke darstellen[8]. Diese Branchenaussage macht deutlich, dass POWERPASTE für viele Car Sharing Use Cases nicht aus Kostengründen ausgeschlossen werden muss. Ein Argument für POWERPASTE ist die Unabhängigkeit von Ladeinfrastruktur, deren Verfügbarkeit durch einen starken Markthochlauf der Elektromobilität eingeschränkt wird. Carsharing und Elektromobilität würden sich eigentlich gut ergänzen, da beides Elemente einer Verkehrswende sind, jedoch ergeben sich aus der Ladedauer, der Reichweite sowie der teuren Ladeinfrastruktur Herausforderungen, die zu einer relativ geringen Anzahl von E-Fahrzeugen in Sharing Flotten geführt haben. POWERPASTE kann dabei Stärken (Reichweiten Skalierung, weniger Ladezeit/höhere Auslastung) ausspielen und bereits getätigte Investitionen (bspw. In Ladeinfrastruktur) stehen einer Investition nicht im Weg. Durch die deutlich kleinere Batterie, könnte POWERPASTE als ökologischere Variante positioniert werden, solange Batteriefahrzeuge nicht vollumfänglich etabliert sind bzw. die Batterieproduktion sauber und energiearm wird. Hinsichtlich der

[7] Robinius et al. (2018): Comparative Analysis of Infrastructures – Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles.
[8] Volker Mester (2022): Hoher Benzinpreis: Warum Carsharing noch nicht teurer wird. In: Hamburger Abendblatt.

Entsorgung der leeren Kartuschen müssen entsprechende Entsorgungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Bei Stationsgebundenem Carsharing sind feste Sammelstellen gut integrierbar, während beim Free Floating Modell Sammlungsfahrten nötig wären, welche die Preise tendenziell erhöhen würden. Für das Fahrzeugsharing spielt die mögliche Zuladung nur bei wenigen speziellen Fahrten (bspw. Baumarkt/Umzug) eine Rolle, das höhere Gewicht im Vergleich zu komprimiertem gasförmigem Wasserstoff ist kein Hinderungsgrund für den POWERPASTE-Einsatz. Dies gilt für alle Fahrzeugtypen, lediglich bei Transportern sind bei wenigen Einsatzfällen Einschränkungen zu erwarten. Durch zusätzliche Systemelemente (z.B.: Kartusche, Wasserstoffgenerator) wird das System komplizierter und dadurch in der Tendenz Störungsanfälliger – dies kann zu höherem Aufwand und Kosten führen. Es ist jedoch kein allgemeiner Hinderungsgrund für den Einsatz der Technologie, da die Car-Sharing-Fahrzeuge nicht in kritischen Bereichen (Medizinische Versorgung, etc.) eingesetzt werden.

Zusammenfassend wird der Use Case im Car Sharing Markt vor allem für Personenfahrzeuge im Stationsgebundenen Modell gesehen, wobei funktionale Eigenschaften (höhere Reichweite, weniger Ladezeit) vorteilhaft eingebracht werden können und ökologische Argumente manche Verbraucher überzeugen können.

2.2.6.2. Beschreibung Anwendungsszenario – KEP-Lieferdienste

Kurier-Express-Paket-(KEP)-Lieferdienste steigern ihr Sendungsvolumen jährlich[9]. Die Branche der KEP-Dienstleister ist angehalten in den nächsten Jahren ihre Flotte auf emissionsarme, klimaneutrale Fahrzeuge umzustellen[10]. Zu Beginn wird geprüft, ob das Anwendungsszenario aufgrund von „Ungeeignet"-Kriterien ausgeschlossen werden muss (Tabelle 16).

Tabelle 16: Prüfung „Ungeeignet"-Kriterien KEP

AUSSCHLUSSKRITERIEN	ERLÄUTERUNG
Ungeeignet, wenn große Dauerleistung notwendig ist.	Größere Transport benötigen eine hohe Dauerleistung. Nutzung von POWERPASTE vorerst für kleinere, urbane Fahrzeuge umsetzbar.
Ungeeignet, wenn Produktion von POWERPASTE direkt am Verbrauchsort erfolgen muss.	Verteil- und Logistikstandorte der Dienstleister sind gut an das Straßenverkehrsnetz angebunden und können versorgt werden. Daher ist eine Produktion von POWERPASTE vor Ort nicht notwendig.

Marktdefinition

Fahrzeug/System: Die Abwärme des Prozesses kann für die Heizung des Fahrers oder auch der Güter zusätzlich genutzt werden, ohne dass die Reichweite des Fahrzeugs darunter leidet.

Einsatzorte: Insbesondere in Gebieten, in denen wenig Ladeinfrastruktur vorhanden ist, kann POWERPASTE vorteilhaft sein. Ländliche Gebiete können ein Beispiel sein, da durch die Weiträumigkeit und dünnere Besiedlung Ladeinfrastruktur weniger rentabel

[9] BIEK (2018): Kompendium - Teil 1. Transportaufkommen und durchschnittliches Gewicht.
[10] European Commission (2011): White paper on transport. Roadmap to a single European transport area — Towards a competitive and resource-efficient transport system.

ist. Im urbanen Raum ist Bereitstellung von Infrastruktur gegeben, jedoch mit Kosten verbunden. Bei (bspw. saisonalen) Schwankungen der Zahl eingesetzter Fahrzeuge kann auch im urbanen Raum eine zeitl. begrenzte Knappheit von Ladeinfrastruktur auftreten und einen Einsatz von POWERPASTE begründen.

Funktion/Leistung: Im KEP-Bereich ist insbesondere das Transportvolumen und gelegentlich die Masse der Fahrzeuge bzw. der Zuladung von Bedeutung. Gegenüber Batteriefahrzeugen hat POWERPASTE einen Gewichtsvorteil und gegenüber gasförmigem Wasserstoff wird weniger Volumen für den Tank benötigt.

Kosten: POWERPASTE kann ohne die Abhängigkeit von privaten Infrastrukturen die emissionslose Distribution von Waren ermöglichen. Insbesondere kleine Dienstleister bzw. Zweigstellen können hiervon profitieren, wenn sich die Kosten der Ladeinfrastruktur nicht schon bei wenigen Fahrzeugen lohnen müssen.

Anforderungen an den Anwender: Auch die Diversifizierung und die Streuung des Risikos durch die Nutzung verschiedener Technologien kann ein Vorteil gegenüber anderen Marktteilnehmern sein, da bspw. Stromausfälle keine negativen Auswirkungen auf den Betrieb haben müssen und durch gelagerte POWERPASTE ausgeglichen werden können.

Definition des Use Cases KEP

Grundsätzlich bietet sich der Einsatz von POWERPASTE in den Ländern an, die über genug erneuerbare Energien verfügen, um den pastösen Wasserstoff herzustellen. Dies bedeutet zu gleich, dass sich POWERPASTE in Ländern, die den Ausbau von erneuerbaren Energien schneller und konsequenter verfolgen möglicherweise flächendeckender verbreiten kann. Daher ist der Einsatz von POWERPASTE unmittelbar mit politischen Entscheidungen verbunden, auch insofern das wasserstoffbasierte Technologien eine geringere Effizienz aufweisen und daher politisch gewollt sein müssen.

Unternehmer, die auf POWERPASTE bei KEP setzten werden nicht vor den relativ hohen Energiekosten abgeschreckt. Aufgrund der durchschnittlichen Tourenlänge von 31 km, sind auch die damit verbundenen Energiekosten z.B. verglichen mit den Personalkosten relativgering[11].Die hohe Zahl an Fahrzeugen im KEP-Markt, ermöglicht theoretisch die Nutzung verschiedener Antriebsalternativen, selbst wenn schon in Ladeinfrastruktur investiert wurde und viele batteriebetriebene Fahrzeuge im Einsatz sind. Der KEP-Sektor bietet ein umfassendes Einsatzgebiet für nachhaltige Antriebssysteme und ein Großteil der Fahrzeuge wird aktuell noch fossil betrieben. Gerade für kleine Transportunternehmer/Subunternehmer kann es ausschlaggebend sein, dass nicht in Ladeinfrastruktur investiert werden muss. Da die Touren immer an Logistikzentren oder Betriebshöfen starten und enden, ist die Entsorgung der leeren Kartuschen unproblematisch. Auch das etwas höhere Gewicht der POWERPASTE-technologie im Vergleich zu gasförmigem Wasserstoff ist unproblematisch, da im KEP-Bereich meistens das Volumen ausschlaggeben ist und POWERPASTE hier vorteilhaft ist. Falls die bereits erhöhte höhere Kompliziertheit des Systems zu einer geringeren Zuverlässigkeit führt, kann POWERPASTE mit höheren ökonomischen Aufwänden Nachteile bringen – dies gilt es in der Technologieentwicklung zu berücksichtigen. Eine Betankung der Fahrzeuge ist schneller möglich, was kurzfristige Reichweitenerhöhung ermöglicht. Jedoch sind Batteriefahrzeuge im KEP-Bereich sehr

[11] BIEK (2018): Kompendium - Teil 2. Fahrzeugbestand und Fahrleistungen.

Wettbewerbsfähig, da die Routen meistens planbar sind und Fahrzeuge längere Zeiträume auf dem Hof stehen und geladen werden können (nachts).

Zusammenfassend wird der Use Case im KEP-Markt vor allem dort gesehen, wo eine Ladeinfrastruktur sich schlecht rechnet. Risikostreuung, kurzfristige Reichweitenskalierung und höhere Zuladungen können einen Einsatz sinnvoll machen. In der Tendenz wird die Technologie vorerst eher im urbanen Raum bei kleineren Fahrzeugen eingesetzt.

2.2.6.3. Beschreibung Anwendungsszenario – Flurförderfahrzeuge

Der Einsatz von Flurförderfahrzeugen findet in der Industrie in großem Umfang statt und die meisten Fahrzeuge werden bereits elektrisch angetrieben. Daher bietet dieser Bereich einen potentiellen Absatzmarkt für POWERPASTE. Zu Beginn wird geprüft, ob das Anwendungsszenario aufgrund von „Ungeeignet"-Kriterien ausgeschlossen werden muss (Tabelle 17).

Tabelle 17: Prüfung „Ungeeignet"-Kriterien Flurförderfahrzeuge

Ausschlusskriterien	Erläuterung
Ungeeignet, wenn große Dauerleistung notwendig ist.	Kleine Fahrzeuge mit relativ kurzen Fahrstrecken und niedrigen Geschwindigkeiten. Dementsprechend ist keine große Dauerleistung in dem Segment notwendig.
Ungeeignet, wenn Produktion von POWERPASTE direkt am Verbrauchsort erfolgen muss.	Industriestandorte sind gut an bestehende Verkehrsinfrastruktur angebunden. Also ist keine Produktion beim Verbraucher notwendig.

Marktdefinition

Fahrzeug/System: Durch das geringere Systemgewicht eines POWERPASTE Fahrzeuges im Vergleich zu batteriebetriebenen Fahrzeugen kann das Eigengewicht des Flurfördergerätes reduziert werden. Dies ermöglicht in gewichtssensiblen Anwendungsfällen Nutzenvorteile, beispielsweise durch höhere Nutzlast.

Einsatzorte: Die Flurförderfahrzeuge fahren nicht im öffentlichen Straßenverkehr, sondern werden in Fabrik- oder Logistikhallen eingesetzt. Die Technologie ermöglicht eine hohe Sicherheit, einerseits gibt es keine schädlichen Emissionen, anderseits kann ein Kontakt mit Wasser (und damit ein unbeabsichtigtes freisetzen von Wasserstoff) durch den Betrieb in Gebäuden ausgeschlossen werden.

Funktion/Leistung: Die Nutzung von durch POWERPASTE angetriebenen Flurförderfahrzeugen ermöglicht eine Reduzierung von Ladezeiten, die Fahrzeuge können längere Routen fahren und besser ausgelastet werden. Dadurch entsteht das Potential zur Reduzierung der Größe des Fahrzeugpools. Ein weiteres Potential ist die Reduzierung des Flächenbedarfs für Ladeinfrastruktur, bzw. die Möglichkeit diese Flächen weiter entfernt von der Produktionslinie zu verlegen.

Kosten: Kostenvorteile können entstehen, da keine/weniger Lade- oder Wasserstofftankinfrastruktur installiert werden muss. Die geringeren Tankzeiten reduzieren den Flächenbedarf, die längeren Reichweiten ermöglichen eine verlegen auf weniger zentrale und teure Flächen.

Anforderungen an den Anwender: Der Einsatz an festen Standorten ermöglicht eine einfache Sammlung und Entsorgung der leeren Kartuschen.

Definition des Use Cases Flurförderfahrzeuge

Grundsätzlich bietet sich der Einsatz von POWERPASTE in den Ländern an, die über genug erneuerbare Energien verfügen, um den pastösen Wasserstoff herzustellen. Dies bedeutet zu gleich, dass sich POWERPASTE in Ländern, die den Ausbau von erneuerbaren Energien schneller und konsequenter verfolgen möglicherweise flächendeckender verbreiten kann. Daher ist der Einsatz von POWERPASTE unmittelbar mit politischen Entscheidungen verbunden, auch insofern das wasserstoffbasierte Technologien eine geringere Effizienz aufweisen und daher politisch gewollt sein müssen.

POWERPASTE betriebene Flurförderfahrzeuge stellen eine Möglichkeit zur Diversifizierung von Antriebsarten dar, wodurch Risiken minimiert werden und Resilienz und Robustheit der Transportprozesse in der Produktion erhöht werden. Aufgrund der relativ kurzen Touren auf dem Firmengelände prägen die Energiekosten nicht die Gesamtkosten. Entsprechende Total Cost of Ownership Analysen zeigen, dass die Betriebs- und Energiekosten bei Elektrogabelstaplern bei rund 13 % liegen, Gabelstapler mit Verbrennungsmotor sin im Unterhalt sogar noch deutlich teurer (27 % Anteil an Gesamtkosten). (HCO Innovations o.D.) Im Anwendungsszenario der Flurförderfahrzeuge gestaltet sich die Etablierung von POWERPASTE als Energiespeicher als schwieriger, da Akkuanwendungen schon flächendeckend etabliert sind und in die entsprechende Ladeinfrastruktur bereits investiert wurde. Neu geplante Fabriken mit einer hohen Zahl an autonomen Flurförderfahrzeugen (AGVs) im Dauerbetrieb sind ein wahrscheinlicher Use Case. Geringeres Gewicht als Batterien und weniger Platzbedarf als bei gasförmigen Druckwasserstoff grenzen zu anderen Antriebsmöglichkeiten ab. Da die Aufladung von Batterien automatisiert stattfinden kann, wäre ein automatisierter Kartuschentausch nützlich, um den Vorteil der schnelleren Betankung (gegenüber dem Ladeprozess) vollständig zu erschließen. Eine weitere technische Herausforderung ist, das kompliziertere POWERPASTE-System (Kartuschen, Wasserstoffgenerator, Wassertank) in häufig sehr kompakte Fahrzeuge zu integrieren. Gasförmiger Wasserstoff wird in der Intralogistik vor allem in sehr spezifischen Anwendungen, bspw. in Tiefkühllagern eingesetzt, da er weniger empfindlich gegenüber Temperaturschwankungen ist als Akkus. Auch POWERPASTE kann in kalten Umgebungen konstante Leistung bereitstellen. Die höhere Masse pro bereitgestellter Energieeinheit im Vergleich zu gasförmigem Wasserstoff ist unproblematisch, da Flurförderfahrzeuge, insbesondere Stapler, ein gewisses Gewicht aus statischen/mechanischen Gründen benötigen. POWERPASTE betriebene Flurförderfahrzeuge stellen eine Möglichkeit zur Diversifizierung von Antriebsarten dar, wodurch Risiken minimiert werden und Resilienz und Robustheit der Transportprozesse erhöht werden.

Zusammenfassend wird der Use Case in der Intralogistik gesehen, wenn viele und sehr stark ausgelastete AGVs zum Einsatz kommen. Bestimmte Einsatzorte mit extremen Temperaturen oder langen Routen ermöglichen es, die Vorteile der Technologie gut zu nutzen. Die Erschließung dieses Marktes ist mit einigen technologischen Herausforderungen verbunden.

2.3. Parameter für Feldtest und Marktanwendungen

Grundsätzlich müssen Fahrzeuge, die mit einem POWERPASTE-Energiespeicher ausgestattet werden, vor ihrer Markteinführung verschiedene Tests durchlaufen. Insbesondere bei Pkw sind dabei Winter- und Sommerfahrten essenziell, bei denen die Fahrzeugeigenschaften unter extremen klimatischen Bedingungen, beispielsweise am Polarkreis bei Temperaturen bis zu –40 ˚C, geprüft werden. Materialien wie Kunststoffe, Gummi, Öle und elektronische Komponenten zeigen unter solchen Temperaturbedingungen erheblich unterschiedliche Verhaltensweisen. Weitere klimabezogene Tests umfassen Regenfahrten und Staubprüfungen. Die Verantwortung für diese fahrzeugspezifischen Tests liegt typischerweise bei den Fahrzeugherstellern.

Das Thema Testung und Erprobung wurde innerhalb des Projektes auf einer grundlegend vorbereitenden Ebene behandelt. Die im Rahmen dieses Forschungsprojekts geplanten Tests konzentrieren sich gezielt auf die grundlegende Funktionalität der integrierten POWERPASTE-Technologiekomponenten, insbesondere der Kartusche, des Wasserstoffgenerators und der Brennstoffzelle.

Dafür wurden im TP Logistik basierend auf den zuvor definierten Anwendungsszenarien (vgl. Abschnitt 2.2.6) grundlegende Anforderungen abgeleitet, welche die Fahrzeuge im Betrieb erfüllen müssen. Anhand dieser Anforderungen wurde eine umfangreiche Übersicht zu relevanten Fahrzeugparametern für unterschiedliche Fahrzeugklassen innerhalb des jeweiligen Fahrzeugspektrums der Use-Cases erstellt (siehe Anhang B). Diese Übersicht bildet die Basis für die Definition, Strukturierung und Priorisierung der projektspezifischen Testszenarien und ermöglicht so eine zielgerichtete Erprobung der POWERPASTE-Technologie unter realistischen Betriebsbedingungen.

3. Synthese und Recycling (AP2)

Das zweite Arbeitspaket hatte die Weiterentwicklung der POWERPASTE von Technologiereife TRL 5 zu TRL 7 zum Ziel.

Dieser Teilabschnitt enthält die Arbeitsberichte und Ergebnisse, welche die Vorauswahl von geeigneten Kartuschen und Transportverpackungen betreffen. Dazu wird auch auf das Recyclingkonzept für Kartuschen eingegangen.

3.1. Vorauswahl von Kartuschen und Transportverpackungen

Die Auswahl von Kartuschen und Transportverpackungen erstreckt sich über zwei Arbeitspakete. Um Doppelungen im Bericht zu vermeiden, werden hier im AP2 die Aspekte aufgenommen, die die Entscheidung für eine Kartusche vorbereiten. Dies umfasst im Wesentlichen eine Sammlung, Beschreibung und Kategorisierung verschiedener Kriterien zur Auswahl einer Kartusche (oder Transportverpackung). Dabei spielen auch Kriterien eine Rolle, die sich aus dem Gefahrgutrecht (AP3) ableiten.

3.1.1. Anforderungen aus Prozess und Anwendung an die Behälter

Die grundlegenden Anforderungen an den Behälter wurden vom Projektpartner IFAM festgelegt. Der Behälter sollte folgende Eigenschaften haben:

- Dichte: der Behälter muss so verschlossen sein, dass kein Wasser zu der POWERPASTE gelangen kann (weder durch Öffnungen noch Diffusion durch Wände o.ä.).
- Volumen: der Behälter sollte ein ausreichendes Fassungsvermögen haben, damit die Anwendungen mit ausreichend Energie versorgt werden können; Ein Behälter mit 2000 bis 5000ml soll ausgewählt werden.
- Handling: der Behälter soll einfach und „Von Hand“ auszuwechseln sein.
- Informationen: das Behälterdesign soll eine technische Füllstandsabfrage ermöglichen.

Weiterhin wurden verschiedene logistische Fragestellungen zum Behälter zwischen den Partnern Uni MD – IEPS und AVA diskutiert:

- Standards: Kartuschen eigentlich nur bis 960ml/1l; Typischer Durchmesser 38mm bis 150mm Höhe oder größer Durchmesser 65mm bei 104-300mm Höhe, Sonderlösungen möglich (Beispiele aus Tabelle 12,Abschnitt 3.1.2)
- Anlieferung von Kartuschen: normalerweise per Palette; Auf der Palette sind mehre Pappe-Trays mit den Dosen, diese sind einmal um-verschweißt; Teilweise sind auch 20-30 Dosen einmal umreift (Variiert je nach Hersteller und Art der Dosen).
- Zuführung Kartuschen zur Abfüllmaschine: Bei Metalldosen findet die Zuführung durch eine Person oder automatisiert durch einen „Vakuumansauger“ statt; Es gibt einen Zuführtisch und ein Förderband, welches die Dosen dann stehend der Abfüllung zuführt; Bei sehr leichten Verpackungen (Kunststoff) werden die Dosen auf einen sogenannten Puck gesetzt, der für die nötige Stabilität/Standsicherheit sorgt.

- Zuführung POWERPASTE zur Abfüllmaschine: per Rohrleitung und Zwischentank.
- Pufferung voller Kartuschen: nur notwendig, wenn mehrere Behältertypen oder verschiedene Aufdrucke; Aufdrucke über Klebeetikettierung-Maschine (etwa 50 bis zu 400 Dosen/Minute), Abtransport per Hand oder Förderband.
- Wiederbefüllung: ist anspruchsvoll aber denkbar. Ventil muss aus Behälter zu lösen sein, da es selber wahrscheinlich nicht zu recyclen ist (externer Druck nötig): Aus anderen Bereichen sind bis zu 50 mögliche Wiederbefüllungen bekannt

3.1.2. Sammlung möglicher Behälter

Eine Sammlung möglicher Behältertypen wurde vom Projektpartner AVA erstellt und wird für diesen Bericht redaktionell angepasst und übernommen (Tabelle 18).

3.1.3. Sammlung von Bewertungskriterien

In diesem Abschnitt sollen Kriterien gesammelt werden, die eine Eignung des Behälters für die POWERPASTE-Supply Chain bewerten können.

Es werden Kriterien in vier Bereichen gesammelt. Die wichtigsten Kriterien sind diejenigen, die sich aus dem Gefahrgutrecht ableiten. Die Einhaltung dieser Kriterien ist die Voraussetzung dafür, dass POWERPASTE überhaupt auf der Straße transportiert werden darf. Die weiteren Kriterien lassen sich entlang von Bereichen der Supply Chain kategorisieren. Direkt nach der Abfüllung der POWERPASTE werden die Behälter durch Logistikprozesse distribuiert, je nach Verpackung funktioniert dies unterschiedlich gut und effizient. Anschließend ist die Perspektive des Anwenders relevant für die Beurteilung des Behälters – unterstützt der Behälter einen einfachen und praktikablen Einsatz? Zuletzt werden auch noch Entsorgungs- und Recyclingprozesse berücksichtigt, da Verpackungen sich unterschiedlich gut sammeln oder wiederverwenden lassen.

Alle recherchierten Kriterien werden nachfolgend kurz beschrieben, dabei wird auch eingeschätzt, ob das Kriterium für diesen Anwendungsfall relevant ist.

3.1.3.1. Kriterien aus dem Gefahrgutbereich

- Mechanisch Beständigkeit: Relevant, da mechanische Belastungen durch mobilen Einsatz zu erwarten.
- Stoßfest: Relevant, besonders bei Unfällen sollte keine POWERPASTE austreten.
- Stoßdämpfend: Nicht relevant, da POWERPASTE nicht auf Stöße reagiert.
- Druckfest: Relevant, besonders bei Unfällen sollte keine POWERPASTE austreten.
- Reißfest: Relevant, besonders bei Unfällen sollte keine POWERPASTE austreten.
- Temperaturbeständig: Relevant, da unterschiedliche Einsatzgebiete mit breitem Temperaturspektrum geplant.
- Dicht (Mengen-erhaltend): Relevant, auf Dauer sollte keine POWERPASTE austreten.
- Korrosions-/Feuchtigkeitsbeständig: Relevant, da POWERPASTE mit Wasser reagiert.
- Chemisch/biologisch neutral: Relevant, da eine Reaktion mit POWERPASTE Inhaltsstoffen und der Verpackung vermieden werden soll.

- Verschließbar/verplombbar: Relevant, als Dichtung und gleichzeitig Qualitätssiegel.
- Schwer entflammbar: Relevant, da bei Transport oder Unfällen Brände auftreten können.
- Staubfrei: Nicht relevant, da Staub nicht mit POWERPASTE reagiert.

3.1.3.2. Kriterien aus Logistik und Verpackungssicht

- Positionierfähig: Relevant, da evtl. für Logistikprozesse notwendig.
- Einsatzfähig in automatisierten. Prozessen/Automatisierungsfreundlich: Relevant, da auch automatisierte Prozesse als Variante in Frage kommen.
- Maschinelle Entnahme der Packgüter: nicht relevant, da eine händische Entnahme geplant wird.
- Stapelbar: Relevant, da Behälter bei Lagerung und Transport gestapelt werden.
- Rutschfest: Relevant, bspw. für Ladungssicherung.
- Genormt: Relevant, da dies eine optimale Nutzung von anderen genormten Ladungsträgern oder Technischen Hilfsmittel ermöglicht.
- Handhabbar: Relevant, da Handling Prozesse auftreten.
- Unterfahrbar: Nicht relevant, da einzelne Behälter auf einer unterfahrbaren Palette stehen.
- Einheitenbildend: Relevant, da dies den Transport einfacher und effizienter macht.
- Raumsparend: Nicht relevant, da sonst doppelte Wertung mit „Einheitenbildend“.
- Flächensparend: Nicht relevant, da sonst doppelte Wertung mit „Einheitenbildend“
- Befüll-gerechte Gestaltung: Relevant, da dies die Abfüllprozesse vereinfacht.

3.1.3.3. Kriterien aus der Anwendungsperspektive

- Werbend: Nicht relevant, andere Kriterien erfüllen den Zweck.
- Informativ: Relevant, da verschiedene Informationen auf dem Behälter stehen sollten.
- Identifizierbar: Relevant, für Prozesse, Anwendung und Werbezwecke.
- Unterscheidbar: Nicht relevant, da sonst doppelte Wertung mit „Identifizierbar & Informativ“
- Leicht zu öffnen: Relevant, da einfache Nutzung in der Anwendung ein wesentliches Merkmal der Technologie sein soll.
- Formstabil: Relevant, da sonst schwierig in Fahrzeug zu integrieren.
- Entleerbar: Relevant, da sonst weniger Energiegehalt und damit noch teurer für Anwender.
- Handhabbar: Relevant, da einfache Nutzung in der Anwendung ein wesentliches Merkmal der Technologie sein soll.

Tabelle 18: Sammlung möglicher Behälter

BEHÄLTER-TYP	AUSBRINGUNG UND ANTRIEB	EIGENSCHAFTEN	
Silikon-kartusche	Mittels Kolben, Feder oder elektrisch angetriebene Spindel	+	• Gleichmäßige Ausbringung unabhängig vom Füllstand • Füllstand kann mit Hilfe der Lage des Kolbens erfasst und abgefragt werden • Geringe Kosten
		-	• Die Kartuschen sind nicht hermetisch dicht. Die Luft auf der anderen Seite des Kolbens der Kartusche kann immer auch Feuchtigkeit enthalten • Kartusche ist nicht durchsichtig • Wiederverwertbarkeit ist nicht gegeben
Nordson-EFD-Kartusche	Mittels Kolben, Druckbeaufschlagung	+	• Füllstand kann mit Hilfe der Lage des Kolbens erfasst und abgefragt werden • Geringe Kosten • Kartusche ist durchsichtig
		-	• Ausbringungsrate und -qualität müssen experimentell verifiziert werden • Bruchfestigkeit der Kartusche ggf. nicht gegeben • Wiederverwertbarkeit muss geprüft werden, voraussichtlich Bedarf an spezieller Technik, bspw. in Form von Druckminderer, Vorratsbehälter oder Kompressoren • Füllmenge ist derzeit begrenzt
Metallkartusche	Mittels Kolben; Druckbeaufschlagung oder per Feder oder elektrisch angetriebene Spindel	+	• Füllstand kann mit Hilfe der Lage des Kolbens erfasst und abgefragt werden • Hermetisch dicht • Wiederverwertbar
		-	• Ausbringungsrate und -qualität müssen experimentell verifiziert werden • bei Druckbeaufschlagung: Voraussichtlich zusätzlicher Technikbedarf, bspw. in Form von Druckminderer, Vorratsbehälter oder Kompressoren • Füllmenge ist derzeit begrenzt • Beschädigungen am Metallzylinder der Kartusche können dazu führen, dass der Kolben stehenbleibt und die Kartusche nicht entleert wird • Hohe Kosten des Systems
Kolbendosen (bspw. Fa. ZIMA, Fa. Lindal)	Mittels Kolben; Druckbeaufschlagung	+	• Füllstand kann mit Hilfe der Lage des Kolbens erfasst und abgefragt werden • Hermetisch dicht • Wiederverwertbar (bis zu 40-mal)
		-	• Füllmenge derzeit begrenzt, Fa. ZIMA hat signalisiert, dass die gewünschte Füllmenge nur die Herstellung eines größeren Kolbens erfordert, Behältnis müsste dann speziell für POWERPASTE hergestellt werden • Ausbringungsrate und -qualität müssen experimentell verifiziert werden, voraussichtlich wird zusätzliche Technik benötigt, bspw. in Form von Druckminderer, Vorratsbehälter oder Kompressoren

…

			• Beschädigungen am Metallzylinder der Kartusche können dazu führen, dass der Kolben stehenbleibt und die Kartusche nicht entleert wird • Hohe Kosten des Systems
Flexpack (Fa. Tectro SMT)	Silikonballon; Eigenenergie (der Behälter zieht sich zusammen)	+	• Ausbringung erfolgt ohne zusätzlichen technischen Aufwand • Behälter ist flexibel, eine Beschädigung ist nur durch spitze Gegenstände möglich
		-	• Einwegprodukt (produziert viel Plastikmüll) • Füllstandsabfrage nicht sinnvoll möglich (außer: gravimetrisch) • Ausbringung ist nicht konstant und kann evtl. schlecht reguliert werden • Füllmenge des Systems bislang auf 800 ml begrenzt • Problem der Diffusion von Wasser ist ungelöst
Bag-on-valve (bspw. Fa. Lindal, Fa. Global Precision)	Ausüben von Druck auf das Produkt Druckbeaufschlagung eines Beutels	+	• Die Bags bestehen aus Aluminium, als Treibmittel können Druckluft, CO2, Stickstoff aber auch andere Stoffe eingesetzt werden • Ausbringung erfolgt ohne zusätzlichen, technischen Aufwand • Beschädigungen am Behälter führen nicht zu einer Beeinträchtigung der Performance • Hermetisch dicht
		-	• Ausbringungsrate und -qualität müssen experimentell verifiziert werden • Einwegprodukt • Füllstandsabfrage nicht sinnvoll möglich (außer: gravimetrisch) • Füllmenge des Systems bislang auf 600 ml begrenzt
Can-in-Can; (Fa. Nucan)	Ausüben von Druck auf das Produkt; Druckbeaufschlagung einer dünnwandigen Aludose in einer größeren Aluminium-Umverpackung	+	• Ausbringung erfolgt ohne zusätzlichen technischen Aufwand • Beschädigungen am Behälter führen nicht zu einer Beeinträchtigung der Performance • Hermetisch dicht
		-	• Ausbringungsrate und -qualität müssen experimentell verifiziert werden. • Einwegprodukt • Füllstandsabfrage nicht sinnvoll möglich (außer: gravimetrisch) • Füllmenge des Systems bislang auf <500 ml begrenzt
Dity-Pack (Fa. Soppec)	Ausüben von Druck auf das Produkt; Druckbeaufschlagung eines Beutels[12]	+	• Beschädigungen am Behälter führen nicht zu einer Beeinträchtigung der Performance • Hermetisch dicht (je nach Wahl des Beutels) • Füllmengenadaption
		-	• Ausbringungsrate und -qualität müssen noch verifiziert werden, Voraussichtlich wird zusätzliche Technik benötigt, bspw. in Form von Druckminderer, Vorratsbehälter oder Kompressoren

…

[12] Bei diesem und anderen, ähnlichen Beutelsystemen wird ein Beutel (welcher das Produkt enthält) in eine Umverpackung gelegt. Der Beutel wird fixiert und die Schnittstelle zwischen Beutel und Umverpackung abgedichtet. Anschließend wird der Raum zwischen der Umverpackung und dem Beutel mit Druck beaufschlagt. Die Bags bestehen in der Regel aus Kunststoff, könnten aber auch Aluminiumbasis hergestellt werden.

			• Beutel ist Einwegprodukt • Füllstandsabfrage nicht sinnvoll möglich (außer: gravimetrisch) • Kosten des Systems
Tank mit Pumpe	Erzeugen von Druck auf das Produkt; Elektrische Pumpe	+	• Beschädigungen am Behälter führen nicht zu einer Beeinträchtigung der Performance • Hermetisch dicht (je nach Wahl des Beutels) • Füllmengenadaption • Mehrwegsystem (Tank kann X-mal benutzt werden) • Ausbringung konstant und präzise möglich
		-	• Power Paste würde dem Tank evtl. nicht vorabgefüllt werden können, sondern muss getankt werden • Viskosität der POWERPASTE ggf. problematisch (Restentleerung etc.) • Pumpe benötigt (Ex-Schutz) • Hohe Kosten des Systems
Tank, druckbeaufschlagt	Erzeugen von Druck auf das Produkt; Druckgas	+	• Beschädigungen am Behälter führen nicht zu einer Beeinträchtigung der Performance • Hermetisch dicht (je nach Wahl des Beutels) • Füllmengenadaption • Mehrwegsystem (Tank kann X-mal benutzt werden)
		-	• Ausbringungsrate und -qualität müssen experimentell verifiziert werden • POWERPASTE würde dem Tank evtl. nicht vorabgefüllt werden können, sondern muss getankt werden • Hohe Kosten des Systems

3.1.3.4. Kriterien aus dem Entsorgungs- und Recyclingbereich

- Wiederverwendbar: Relevant, wenn Wiederverwendung von Behältern geplant.
- Ökologisch/Nachwachsend: Relevant, da für Hersteller und mögliche Anwender Ökologie ein wesentlicher Wert ist.
- Entsorgungs-freundlich: Relevant, da in jedem Fall eine Entsorgung zu irgendeinem Zeitpunkt stattfindet und Aufwände erzeugt.
- Recyclebar: Relevant, wenn die Nutzungsdauer aufgebraucht ist und der Behälter stofflich verwertet wird.
- Hygienisch Unbedenklich: Nicht relevant, da keine Erreger o.ä. enthalten.
- Reparaturfähig: Nicht relevant, da sonst mehrfache Bewertung von Wiederverwendbarkeit.
- Reinigungsfähig, Restentleerung: Relevant, da geringere Reste zu geringeren Auflagen und Aufwänden bei den Entsorgungsprozesse führen.
- Verschleißresistenz: Nicht relevant, da sonst mehrfache Bewertung von wiederverwendbar.
- Reduziertes Volumen, wenn leer: Relevant, da ein reduziertes Volumen effizientere Abfalltransporte ermöglicht.
- Wiederverschließbar: Relevant, da ein Verschluss notwendig wird, sobald bestimmte Restmengen enthalten sind.

Die Tabelle 19 enthält eine Übersicht aller relevanten Kriterien, die Bewertung vorausgewählten Behälter hinsichtlich der Kriterien findet im Abschnitt 4 statt.

Tabelle 19: relevante Kriterien für die Behälterauswahl

GEFAHRGUT	LOGISTIK/ VERPACKUNG	ANWENDUNG	ENTSORGUNG
Mechanisch beständig	Positionierfähig	Leicht zu öffnen	Wiederverwendbar
Stoßfest	Automatisierungs-freundlich	Informativ	Ökologisch/Nachwachsend
Druckfest	Befüll-gerechte Gestaltung	Identifizierbar	Entsorgungs-freundlich
Reißfest	Stapelbar	Formstabil	Recyclebar
Temperatur-beständig	Rutschfest	Entleerbar	Reinigungsfähig, Restentleerung
Dicht (Mengen-erhaltend)	Genormt	Handhabbar	Reduziertes Volumen, wenn leer
Korrosions-/ feuchtigkeits-beständig	Handhabbar		Wiederverschließbar
Chemisch/ biologisch neutral	Einheitenbildend		
			…

Verschließbar/ verplombbar	
Schwer entflammbar	

3.1.4. Vorauswahl von Behältern

In mehreren Iterationsrunden wurden die verschiedenen Behältertypen hinsichtlich ihrer Eignung diskutiert. Grundlage dafür waren einerseits die relevanten Kriterien (Tabelle 19), andererseits spezifische Eigenschaften und Informationen zu den Behältern. Diese spezifischen Informationen wurden durch Recherchen und Herstelleranfragen durch den Projektpartner AVA in die Diskussionsrunden getragen. Im Fokus der Diskussionen standen insbesondere zwei Behältertypen: Metallkartuschen (vorher auch Kolbenkartuschen aus Kunststoff) und Bag-In-Box (oder Bag-on-valve, vgl. Tabelle 18). Die Vorteile und Nachteile der jeweiligen Behältertypen werden an dieser Stelle kurz beschrieben um die geführten Diskussionen zusammenzufassen.

Bag-in-Box: Dieser Behältertyp ist sehr günstig und kann in verschiedenen Formen und Größen eingesetzt werden. Ein Vorteil besteht darin, dass die Box als Umverpackung eingesetzt werden kann, womit einerseits Gefahrgutanforderungen erfüllt werden und andererseits eine Formbildung und damit raumeffizienter Transport erreicht werden kann. Nachteilhaft oder herausfordernd sind hier die Austragemöglichkeiten der Paste und eine möglichst vollständige Restentleerung.

Kolbenkartusche/Metallkartusche: Dieser Behältertyp ist etwas teurer und verschiedenen Baumformen und Größen sind schwieriger verfügbar. Dafür ist der Behälter formstabiler, was zu Vorteilen bei der Austragung der Paste und bei der Fahrzeugintegration führt. Durch die Runde Bauform wird beim Transport eine geringere Raumauslastung erreicht. Eine Umverpackung mit Einsatz zur Aufnahme der runden Kartuschen ist nötig und führt zu zusätzlichen Prozessschritten und Kosten.

Eine detaillierte Bewertung der beiden Behältertypen anhand diverser Kriterien findet im Abschnitt 4.3 statt.

3.2. Recyclingkonzept

Im Rahmen des AP2 wurde ein Recyclingkonzept für die POWERPASTE-Kartuschen erarbeitet. Dieses Konzept wird als logistisches System verstanden und entsprechend an dieser Stelle beschrieben. Die Objekte (Operanden), Prozesse (Operationen) Systeme (Operatoren) werden in den folgenden Abschnitten dargestellt, miteinander in Verbindung gebracht und diskutiert.

3.2.1. Allgemeines Konzept

Die allgemeine Strategie beruht auf einem Tauschsystem, bei dem die Belieferung der Kundenstandorte mit der Sammlung von leeren und teil-entleerten Kartuschen und dem angefallenen Reststoff Magnesiumhydroxid verbunden wird. Grundlegend sind drei Varianten sinnvoll und sollten vom zukünftigen Produzenten abgewogen werden:

- Recycling und Sammlung in Eigenregie: Diese Variante beinhaltet die vollständige interne Durchführung des Recycling- und Sammelprozesses. Dies

bedeutet, dass nötige Systeme und Kompetenzen im Unternehmen selber vorhanden sein müssen.

- Recycling in Eigenregie, Sammlung an externe Partner ausgelagert: In dieser Variante erfolgt das Recycling intern, während die Sammlung der leeren Kartuschen und Reststoffe an externe Dienstleister ausgelagert wird. Dies ermöglicht Effizienzgewinne bei der Sammlung, bei gleichzeitiger Kontrolle über Kartuschen und Reststoff-Vermarktung.
- Recycling und Sammlung an externe Partner ausgelagert: Bei dieser Variante wird sowohl die Sammlung als auch das Recycling an externe Partner ausgelagert. Dies kann die Kosten senken und externe Fachkenntnisse nutzen. Das Unternehmen konzentriert sich dann nur auf die Produktion und den Vertrieb der POWERPASTE selbst.

Die grundlegende Idee dieses Ansatzes besteht darin, das bestehende Distributionssystem zu nutzen und die genutzten Kartuschen bei Rücktransporten mitzunehmen, während die Reststoffe von den Kunden abgeholt werden. Dies steigert die Effizienz erheblich, da Leerfahrten vermieden werden. Die Sammlung erfolgt von den regionalen Distributionszentren aus, wobei der Fokus darauf liegt, nur diejenigen Elemente zu transportieren, die noch weiterverwendet werden können. Daher muss möglichst früh bei der Sammlung der Zustand der gebrauchten Kartuschen und der Reststoffe erfasst werden. Eine höhere Dezentralität verringert den Transportbedarf und erhöht gleichzeitig den Investitionsbedarf in Recyclingtechnologie (Schredder Anlagen etc.) bei den dezentralen Distributionszentren.

Im Hinblick auf die Kartuschen wird angestrebt, diese wiederzuverwenden, sofern ihr Zustand es zulässt. Falls die Kartuschen nach der Nutzung sichtbare äußerliche Schäden aufweisen, werden sie geschreddert, damit das Metall zur Weiterverwertung verkauft werden kann. Die Wiederverwendung der Ventile ist eine Herausforderung, da sie Reste enthalten können, die sich negativ auf ihre Funktionalität auswirken. Falls technisch unter vertretbaren Kosten umsetzbar, wird versucht, die Ventile abzutrennen und durch neue Ventile zu ersetzen. Etwaige Restmengen in den Kartuschen werden kontrolliert abreagiert, da sie aufgrund unklarer Qualität nicht wieder als POWERPASTE abgefüllt und verkauft werden sollten. Bei der Abreaktion sollte das Potenzial zur Energiegewinnung geprüft werden. Zudem sollte die Restentleerung möglichst dezentral ablaufen, damit die leeren Kartuschen einfacher und außerhalb der Gefahrgutbestimmungen transportiert werden können.

Es entsteht Magnesiumhydroxid als Reststoffe während der Nutzung durch den Kunden (und bei der Abreaktion). Dieses wird gesammelt, kontrolliert und anschließend weiterverkauft. Abhängig von den Eigenschaften und der erreichten Reinheit, kann es in verschiedenen Anwendungen als Rohstoff eingesetzt werden. Diese reichen von technischen Anwendungen wie Flammschutzmitteln bis hin zur Verwendung in der Umweltaufbereitung, in der Lebensmittelindustrie und in kosmetischen oder medizinischen Produkten.

In puncto Sicherheit und Umweltschutz werden nicht reagierte POWERPASTE-Kartuschen gemäß der ADR-Richtlinie als Gefahrstoffe eingestuft und müssen entsprechend behandelt werden. Details zu diesen Aspekten finden sich im Abschnitt 4 des Berichts. Bei der Zerkleinerung der Kartuschen sowie bei der Entleerung und Kontrolle muss auf eine Absaugung des potentiell entstehenden Wasserstoffs geachtet werden. Hingegen gilt für Magnesiumhydroxid, dass es nicht als Gefahrstoff eingestuft ist und somit ohne besondere Vorkehrungen transportiert und gelagert werden kann.

3.2.2. Recycling-Objekte

Gebrauchte POWERPASTE-Kartuschen: Die gesammelten POWERPASTE-Kartuschen variieren in ihrem Zustand. Sie können leer sein oder noch teilweise befüllt sein, und ihre Nutzungsspuren (oder sogar Beschädigungen) können unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Sofern die Kartuschen nicht restentleert sind, müssen sie in den Umverpackungen, in denen sie ursprünglich ausgeliefert wurden, zurücktransportiert werden. Es ist sinnvoll, diese Container auf Paletten zu Ladungseinheiten zusammenzufassen. Unter der Annahme einer maximalen Ladehöhe von 2,2 Metern kann eine Palette insgesamt 52 dieser Container aufnehmen. Vollständig entleerte Kartuschen können hingegen in größeren Sammelbehältnissen transportiert werden, wie beispielsweise in Gitterboxen.

Leere Umverpackungen: können ebenfalls anfallen. Weil sie relativ teuer sind, sollten sie häufig wiederverwendet werden. Sie müssen dafür zu den Abfüllstandorten transportiert werden, um sie erneut zu nutzen.

Magnesiumhydroxid: Im Rahmen des aktuellen Forschungsprojekts steht das Auffangen der Reststoffe eher im Hintergrund, jedoch sollte in künftigen Projekten ein spezielles Wechselbehältersystem für diesen Zweck entwickelt werden. Es wird angenommen, dass das Magnesiumhydroxid an den Kundenstandorten in 1000-Liter-IBC-Behältern gesammelt werden kann. Die Reststoffe enthalten aufgrund verschiedener Additive auch andere Inhaltsstoffe als nur Magnesiumhydroxid, weshalb Versuche erforderlich sind, um die resultierenden Reinheitsgrade zu ermitteln und sicherzustellen. Zwar ist eine Aufbereitung von Magnesiumhydroxid zu Magnesiumhydrid technisch möglich, im Rahmen der Projekttreffen wurde jedoch entschieden, eher den Weg der Vermarktung des Reststoffes als Rohstoff für andere Anwendungsbereiche zu gehen. Dieses Vorgehen ist auch eine Art von Reycling und ermöglicht das Schließen von Stoffkreisläufen.

3.2.3. Recycling-Prozesse

Sammlung und Transport der Recycling-Objekte: Die Erfassung/Sammlung von gebrauchten POWERPASTE-Kartuschen, leeren Umverpackungen und Magnesiumhydroxid an den Kundenstandorten. Diese Objekte werden dann zur weiteren Bearbeitung mit LKW zu den jeweilig zugeordneten Distributionszentren/ Regionallagern transportiert und von dort ggf. zu dem zentralen Produktionsstandort weitertransportiert.

Restentleerung: Die Restentleerung bezieht sich auf den Prozess, bei dem verbleibende POWERPASTE in den Kartuschen entfernt wird. Dies sollte idealerweise dezentral erfolgen, insbesondere bei großen Kunden, um den Transport von nicht restentleerten Kartuschen zu minimieren und Gefahrguttransport zu vermeiden.

Kontrolle von Kartuschen, Umverpackungen und Magnesiumhydroxid: Während des gesamten Recyclingprozesses werden Kartuschen, Behälter und das gesammelte Magnesiumhydroxid auf Qualität und Zustand überprüft, um sicherzustellen, dass sie den Anforderungen für die Wiederverwendung oder Weiterverwertung entsprechen.

Sortierung der Recycling-Objekte: Je nachdem, ob die POWERPASTE-Kartuschen wiederverwendet werden können oder nicht, erfolgt eine Sortierung der Objekte. Wiederverwendbare Kartuschen werden gereinigt und zur Abfüllung zurückgeführt, während nicht wiederverwendbare zur stofflichen Verwertung (Schreddern) weitergeleitet. Bei den Umverpackungen findet die Sortierung genauso statt, wobei je

nach konkreter Ausgestaltung der Verpackung eine thermische Verwertung nötig ist oder ggf. eine stoffliche Weiternutzung möglich ist. Bei dem Magnesiumhydroxid können eventuell verschiedene Stoffqualitäten und Reinheitsgrade sortiert werden.

Reinigung und Aufbereitung der Kartuschen zur Wiederverwendung: Kartuschen, die für die Wiederverwendung geeignet sind, werden gereinigt und aufbereitet. Dies beinhaltet das Säubern/Ausspülen von verbliebenen Resten und das Austauschen von Ventilen.

Schreddern der anderen Kartuschen und Verkauf der Altmetalle: Kartuschen, die nicht für die Wiederverwendung geeignet sind, werden geschreddert, um das wertvolle Metall weiterzuverkaufen und die Kosten für das Recyclings teilweise zu kompensieren.

Reinigung der Container und Rückführung zur Abfüllung am zentralen Produktionsstandort: Die Gefahrgutcontainer werden nach Gebrauch gereinigt und zur Wiederverwendung zum zentralen Produktionsstandort zurückgeführt, um erneut befüllt zu werden.

Thermische Verwertung von kaputten Containern: Beschädigte oder nicht wiederverwendbare Gefahrgutcontainer werden einer thermischen Verwertung zugeführt, um ihre Materialien sicher zu entsorgen und die dabei freigesetzte Energie zu nutzen.

Prozesskontrolle, Evaluation, kontinuierliche Verbesserung und Dokumentation: Die Prozesskontrolle, Evaluation und kontinuierliche Verbesserung sind entscheidend, um die Effizienz und Nachhaltigkeit des Recyclingprozesses zu gewährleisten. Alle Schritte werden dokumentiert und auf Veränderungen oder Verbesserungspotenziale überprüft.

3.2.4. Recycling-Systeme

Transportsysteme LKW und Stapler: Diese Systeme werden für den Transport und die Bewegung von Recycling-Materialien verwendet, sowohl bei der externen Sammlung als auch auf den Standorten.

Restentleerungs-Maschine: Die Idee besteht darin, eine spezialisierte Maschine zu entwickeln, die eine vollständige Entleerung der Reste aus POWERPASTE-Kartuschen ermöglicht. Diese potenzielle Innovation könnte in späteren Projekten und Entwicklungen integriert werden, um den Recyclingprozess weiter zu optimieren und effizienter und günstiger zu gestalten.

Sortierungs-Waschstraße: Die Sortierungsanlage umfasst nicht nur die Trennung von den verschiedenen Arten der Recycling-Objekte, sondern auch Reinigungs- und Spüleinrichtungen, die der Vorbereitung von Kartuschen und Verpackungen auf die erneute Verwendung dienen.

Kartuschenschredder: Ein Schredder, der verwendet wird, um nicht wiederverwendbare POWERPASTE-Kartuschen zu zerkleinern, um wertvolles Metall zurückzugewinnen.

Kommunale Müllverbrennungsanlage: Diese kommunale Einrichtung wird genutzt, um beschädigte oder nicht wiederverwendbare Gefahrgutcontainer thermisch zu verwerten.

Mitarbeitende: Das Personal beim Recycling umfasst verschiedene Rollen, darunter LKW- und Staplerfahrer, Maschinenbediener und Recycling-Fachkräfte, die für den reibungslosen Ablauf des Recyclingprozesses verantwortlich sind.

3.2.5. Diskussion

Das vorgestellte Recycling-Konzept (siehe Abbildung 2) bietet einige Vorteilen, birgt jedoch auch Herausforderungen und Risiken, die bei der Umsetzung berücksichtigt werden müssen.

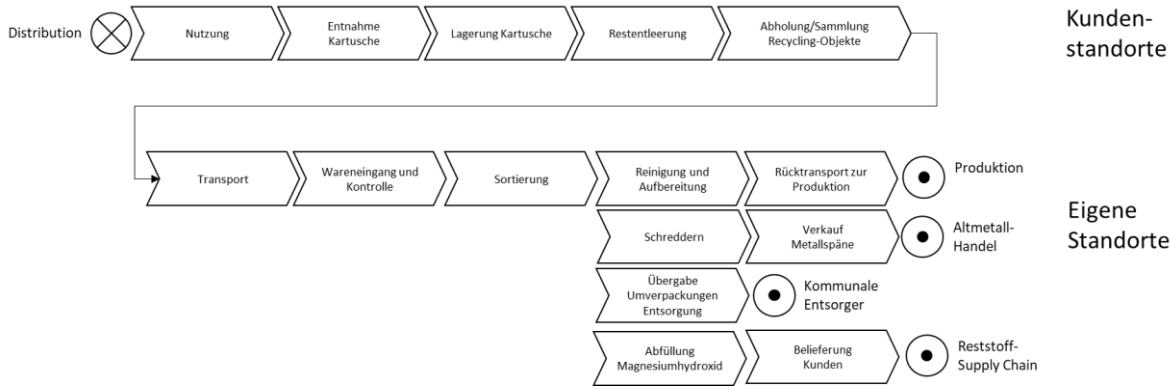


Abbildung 2: Übersicht Recyclingkonzept

Die Strategie beruht auf einem Tauschsystem, das die Belieferung der Kundenstandorte mit der Sammlung von leeren Kartuschen und Reststoffen verknüpft. Dies führt zu erheblichen Effizienzgewinnen (auch bei der Distribution), da Leerfahrten vermieden und vorhandene Systeme und Mitarbeitende eingesetzt werden. Dies trägt nicht nur zur Reduzierung der Gesamtkosten bei, sondern auch zur Verringerung des ökologischen Fußabdrucks.

Eine der Schlüsselentscheidungen, betrifft die Wahl zwischen verschiedenen Varianten, nämlich der internen Durchführung des Recycling- und Sammelprozesses, der Auslagerung der Sammlung an externe Dienstleister oder der vollständigen Auslagerung von Sammlung und Recycling. Ein selbstdurchgeführter Recycling-Prozesses ermöglicht eine direkte Kontrolle über jeden Aspekt des Prozesses auszuüben und eine umfassende Transparenz in Bezug auf Qualität und Einhaltung von Standards sicherzustellen. Das Unternehmen kann internes Fachwissen und Know-how im Bereich Recycling aufbauen, was langfristig wertvoll sein kann. Jedoch geht das Eigen-Recycling auch mit Herausforderungen einher, wie höheren anfänglichen Investitionen, Zeitaufwand für den Aufbau interner Kapazitäten und das Risiko des Know-how-Verlusts, wenn Mitarbeiter das Unternehmen verlassen. Die Entscheidung für das Outsourcing der Sammlung und Verarbeitung an externe Dienstleister kann die Gesamtkosten reduzieren und externe Fachkenntnisse nutzen, um den Recycling-Prozess zu optimieren. Dies bietet Flexibilität und die Möglichkeit, auf externe Partner für spezialisierte Dienstleistungen zurückzugreifen. Allerdings führt das Outsourcing zur Aufgabe der direkten Kontrolle über den gesamten Recycling-Prozess, was zu Qualitäts- und Transparenzproblemen führen kann. Es besteht auch das Risiko, von den Leistungen und der Zuverlässigkeit der externen Dienstleister abhängig zu werden, was bei unvorhergesehenen Problemen oder Verzögerungen zu Schwierigkeiten führen kann.

Die Wiederverwendung von POWERPASTE-Kartuschen, sofern möglich, trägt zur Ressourceneinsparung bei und verringert den Bedarf an neuen Rohstoffen. Dies ist

ein klarer Vorteil in Bezug auf Nachhaltigkeit und Kostenreduzierung und reduziert die Abhängigkeit von Rohstoffmärkten, und damit das Risiko von Verfügbarkeiten und Preisschwankungen. Ein weiterer Pluspunkt des Konzepts ist die Vermarktung von Magnesiumhydroxid als Rohstoff. Dies kann zusätzliche Einnahmen generieren und die technischen und energetischen Aufwände zur Wiederaufbereitung zu Magnesiumhydrid vermeiden.

Dennoch gibt es auch einige Herausforderungen und Risiken im Zusammenhang mit diesem Konzept. Die Dezentralität des Ansatzes erfordert Investitionen in Recycling-Technologie an den regionalen Distributionszentren.

Besondere Aufmerksamkeit erfordert die Wiederverwendung von Ventilen in POWERPASTE-Kartuschen, da sie technisch anspruchsvoll ist und höhere Kosten als die Neubeschaffung von unbenutzten Kartuschen verursachen könnte. Eine genaue Kontrolle des Zustands der gesammelten Kartuschen und Reststoffe ist entscheidend, um sicherzustellen, dass sie den Qualitätsanforderungen entsprechen. Dies erfordert zusätzliche Ressourcen und Schulungen.

Die Einhaltung von Vorschriften und Richtlinien, insbesondere im Umgang mit Gefahrstoffen, erfordert sorgfältige Planung und Dokumentation. Der ordnungsgemäße Transport von Kartuschen mit nicht-reagierter-POWERPASTE gemäß ADR-Richtlinien in einer Umverpackung ist gesetzlich vorgeschrieben. Dies erhöht den Aufwand für das Recycling, da die Kartuschen nach dem Gebrauch wieder zuerst in Umverpackungen gepackt müssen und dann auf Paletten gestapelt werden. Die Abreaktion von Restmengen in den Kartuschen sollte daher möglichst beim Kunden stattfinden. Dafür müssen eine geeignete Methode und Technologie entwickelt werden. Ebenfalls wäre es von Vorteil, wenn die Kartuschen eine Füllstandsanzeige hätten, wodurch bei der Entsorgung schnell kontrolliert werden kann, ob Restmengen enthalten sind oder der Kolben in der Kartusche sich in der obersten Position befindet und die Kartusche dementsprechend vollständig geleert ist.

Insgesamt bietet das vorgeschlagene Recycling-Konzept die Möglichkeit, die Nachhaltigkeit zu steigern, Ressourceneffizienz zu fördern und zusätzliche Einnahmen zu generieren. Es ist jedoch wichtig, die genannten Herausforderungen und Risiken zu berücksichtigen und geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um sie zu minimieren.

4. Abfüllung und Verpackung (AP3)

Das dritte Arbeitspaket zielte auf die Auswahl der geeigneten Verpackung, die Umrüstung von Abfüllanlagen sowie die Durchführung erster Testabfüllungen ab.

Im Bereich der Logistik umfasst das AP die Recherche und Identifikation von relevanten Transportlösungen über strukturierte Marktstudien und Expert*innengespräche, die Methodik und Inhalte werden in Abschnitt 4.1 beschrieben. Die Gespräche und Studien führen zu verschiedenen Szenarien für den Transport und die Logistik von POWERPASTE,

Im Abschnitt 4.2 werden die Anzuwendenden gesetzlichen Rahmenbedingungen für den Transport von POWERPASTE gemäß dem Gefahrgutrecht zusammengefasst.

Abschnitt 4.3 beschreibt die Auswahl einer geeigneten POWERPASTE-Kartusche Kartusche über eine multi-kriterielle Bewertung entlang der Verpackungs-, Anwendungs- und Logistikkriterien.

Teilergebnisse des AP 3 wurden im Rahmen der internationalen Konferenz Vehicle and Automotive Engineering 2022 vorgestellt[13]

4.1. Transportlösungen auf Basis von Expert*innengesprächen

Für die Definition von geeigneten Transport- und Logistiklösungen ist die Einbeziehung von Experten aus der Praxis hilfreich. Dafür kommen leitende/verantwortliche Mitarbeiter aus einerseits spezialisierten Gefahrgutspeditionen und andererseits von Entsorgungsunternehmen in Frage. Zur Identifikation geeigneter Gesprächspartner wurde eine Online-Recherche durchgeführt und alle identifizierten Unternehmen per Mail kontaktiert. Nur eine geringe Zahl an Unternehmen signalisierte Gesprächsbereitschaft (2 Speditionen und 1 Entsorger), so dass eine erneute Umfrage im späteren Verlauf des Projektes avisiert wird.

Als Methodik für die Gespräche wird ein Leitfadengeführtes Experteninterview eingesetzt. Der Leitfaden untergliedert sich wie folgt:

1. Vorstellung Person und Institut
2. Vorstellung POWERPASTE und Projektziele
3. Vorstellung Teilprojekt POWERPASTE-Logistik
4. Kurzer Einblick in Ergebnisse aus Gefahrgutrichtlinien und Behälterauswahl, Mengen und Transportaufkommen. Erster Diskussionspunkt: Recycling oder Wiederverwendung der Behälter
5. Welche Voraussetzungen (Prozess, Sammlung, Verpackung, o.ä.) müssen erfüllt werden, damit volle oder leere Kartuschen transportiert oder abgeholt und entsorgt werden können?
6. Wie kann der Prozess aussehen? Welche anderen Akteure müssten einbezogen werden?

[13] Brinken et al. (2023): New generation hydrogen – how to package pastous hydrogen for mobility applications. In: Vehicle and Automotive Engineering 4, Select Proceedings of the 4th VAE2022, Miskolc, Hungary.

7. Welchen Kosten fallen an? Und wie hängen die mit anderen Entscheidungen (bspw. Behälterauswahl) zusammen?

Die Gespräche wurden mit Protokollen dokumentiert und im Anschluss ausgewertet. Die Ergebnisse der Auswertung werden nachfolgend gegliedert nach Voraussetzungen, Prozess und Kosten dargestellt.

4.1.1. Voraussetzungen für POWERPASTE-Entsorgung und -Transport

In diesem Abschnitt spielen vor allem die eingesetzten Behälter und das Leistungsportfolio der jeweiligen Unternehmen eine Rolle. In den Gesprächen wurde klar herausgestellt, dass die Prozesse Distribution (Verteilung von vollen Kartuschen), die Sammlung (Einsammeln von (teil-)entleerten Kartuschen), sowie die Entsorgung (Behandlung der leeren Kartusche/Vorbereitung des Recyclings) unterschieden werden sollten. Die Speditionen haben die Distribution und die Sammlung in ihrem Leistungsportfolio haben, müssen jedoch für die Entsorgung mit anderen Unternehmen zusammenarbeiten. Das Entsorgungsunternehmen kann Sammlung und Entsorgung übernehmen, die Distribution voller Kartuschen wäre jedoch nicht im Leistungsportfolio enthalten. Daraus leiten sich folgende Kombinationsvarianten ab:

- Distribution über Spedition, Sammlung und Entsorgung über Entsorger
- Distribution und Sammlung über Spedition, Entsorgung durch Entsorger
- Distribution über verschiedene Speditionen, Sammlung und Entsorgung durch Entsorger
- Distribution über verschiedene Speditionen, Sammlung über Speditionen und Entsorgung durch (verschiedene) Entsorger

Weiter Varianten können aus der Nutzung von Teil- oder Komplettladungsverkehr entstehen, sowie durch die Einbeziehung von Zwischenlagern und verschiedenen Standorten. Für Spraydosen hat der Entsorger spezielle Entsorgungsverfahren im Portfolio (Zusammengefasst: Schreddern und Materialverwerten), die jedoch nur an manchen Standorten durchgeführt werden. Die Eignung dieses Verfahrens muss jedoch für POWERPASTE-Kartuschen erst erprobt und getestet werden – dies ist im Rahmen des aktuellen Forschungsvorhaben nicht möglich.

Ein weiterer Aspekt sind die einzusetzenden Behälter. Alle interviewten Unternehmen sind in der Lage selber oder über Partner die notwendigen Behälter bereitzustellen. Folgende Behälter und Ladehilfsmittel wurden ins Gespräch gebracht:

- Kleinstmengen-Verpackungen (Kartons) auf Paletten (bspw. mit Stretchfolie verbunden)
- Fässer mit Spanndeckel (30l/60l/120l, evtl. entlüftet)
- Paloxen (auch faltbar)
- IBC-Behälter
- ASP-Container

Die verschiedenen Behältervarianten und ihre jeweilige Eignung müssen im weiteren Verlauf des Projektes untersucht werden. Dabei besteht die Möglichkeit zwischen einer Variante mit eigenen Behältern oder einer Variante mit durch Partnerunternehmen bereitgestellte Behälter zu wählen.

Für die Realisierung der Prozesse Distribution, Sammlung und Entsorgung sollten detaillierte Informationen über das Leistungsportfolio einzubeziehender Unternehmen und ihr jeweiliges Netzwerk an Standorten vorliegen.

4.1.2. Prozesse bei POWERPASTE-Entsorgung und -Transport

Im zweiten Teil der Gesprächsauswertung werden die Aspekte Materialflusstechnik, Logistiksystem, Behälter/Ladungssicherung (Gefahrgut) und Dokumentation beschrieben.

Materialflusstechnik: Die Beladungsstellen und die Entladungsstellen benötigen Stapler (oder Hubwagen mit min. 1m Hub) oder eine Rampe. Wenn dies nicht gegeben ist, kann die Technik auch auf dem Fahrzeug mitgeführt werden, wodurch jedoch die Transportkosten steigen.

Logistiksystem: Grundlegendend werden Stückgutsystem (LKW holt Paletten ab, diese werden umgeschlagen und dann je nach Ort einzelne Paletten zu einzelnen Kunden gebracht) und Direkttransport (LKW holt Palette und liefert diese direkt an ein oder mehrere Kunden. Für eine effiziente Auslastung der Transporte ist auch der Einsatz von Zwischenlagern (betrieben von den Speditionen) sinnvoll, diese müssen jedoch als Gefahrgutlager ausgelegt sein. Für die Entsorgung kommen nur zertifizierte Entsorger in Frage, die im Vorfeld festgelegt werden müssen. Eine Kooperation mit Systementsorgern wird empfohlen, da diese ein deutschlandweites Netz an Standorten betreiben und kürzere Strecken zurücklegen müssen. Es muss geprüft werden, ob eine Abreaktion der Reststoffe in den Kartuschen nötig ist.

Beladung u. Ladungssicherung: Durch die Gefahrgutanforderungen ist die Ladungssicherung sehr wichtig. Beim Einsatz von Paletten muss das Transportgut fest mit Palette verbunden werden (9-fach mit Folie umwickelt oder Bänderung zweimal längs, einmal quer). Weiterhin muss die Beschilderung geplant, umgesetzt und durch den Fahrer kontrolliert werden.

Dokumentation: Gefahrgutabfälle müssen angemeldet werden. Entsorgungsnachweise müssen ausgestellt werden. Ab 20t Abfallvolumen/Standort und pro Jahr greift Großkundenregelung und macht elektronische Erfassung/Dokumentation nötig

4.1.3. Kosten für POWERPASTE-Entsorgung und -Transport

Die genauen Kosten sind aus den Expertengesprächen nicht abzuleiten. Jedoch wurden Größenordnungen genannt, welche für eine Kalkulation genutzt werden können. Die Kosten gelten für den Zeitpunkt des Gesprächs und müssen zum Zeitpunkt der Kalkulation angepasst werden.

Transport: Bei den Speditionen wird ein voll ausgelasteter Zug 700-100 € Kosten (Direktverkehr, bspw. Braunschweig → Darmstadt/München). Der Transport einzelner Paletten kann mit 60-70 € veranschlagt werden (Stückgutsystem). Der Entsorger gibt die Transportkosten mit 100 €/Std an. Wenn zusätzliche Technik nötig ist (Ladebordwand oder Stapler am Fahrzeug) müssen etwa 50 € extra kalkuliert werden (zum Direktverkehrspreis).

Entsorgung: Da der Entsorgungsaufwand ohne Versuche nicht zu beziffern ist, wird eine relativ breite Spanne von 500 €/t bis 3000 €/t angegeben.

4.2. Rahmenbedingungen Gefahrguttransport

Im Rahmen des Forschungsprojektes müssen für den Transport von *POWERPASTE* die gefahrgutrechtlichen Rahmenbedingungen ausgearbeitet werden. Hierzu liefert das „Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR)“ die entsprechenden Vorschriften für den Straßenverkehr hinsichtlich Kennzeichnung, Ladungssicherung und Verpackung von Gefahrgut. Das Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße ordnet den Ausgangsstoff Magnesiumhydrid in die Klasse 4.3 ein. Hierbei handelt es sich um einen Stoff, bei dem eine Berührung mit Wasser zur Entwicklung eines entzündbaren Gases führt. Eine entsprechende Gefahrgutkennzeichnung ist in Abbildung 3 dargestellt.

Abbildung 3: Gefahrgutkennzeichnung für die Gefahrgutklasse 4.3

Für den Transport von *POWERPASTE* in Kartuschen ist die ADR-Richtlinie UN-3476 als verpflichtend zu betrachten:

ADR-Richtlinie UN-3476: Brennstoffzellenkartuschen, Brennstoffzellenkartuschen in Ausrüstung oder Brennstoffzellen mit Ausrüstung verpackt, die einen mit Wasser reagierenden Stoff enthalten

Eine Brennstoffzellen-Kartusche ist ein Gegenstand, in dem Brennstoff gespeichert wird, der über ein oder mehrere Ventile in die Brennstoffzelle abgegeben wird, welche die Abgabe von Brennstoff in die Brennstoffzelle steuern. Brennstoffzellen-Kartuschen, einschließlich solche, die in Ausrüstungen einhalten sind, müssen so ausgelegt und gebaut sein, dass unter normalen Beförderungsbedingungen ein Freiwerden des Brennstoffs verhindert wird. Für jede Bauart von Brennstoffzellen-Kartuschen muss nachgewiesen werden, dass sie einer Fallprüfung aus 1,2 Metern Höhe auf eine unnachgiebige Oberfläche in der Ausrüstung, die mit größter Wahrscheinlichkeit zu einem Versagen des Umschließungssystems führt, standhalten, ohne dass es zu einem Freiwerden des Inhalts kommt. Sofern Brennstoffzellen-Kartuschen mit Ausrüstungen verpackt werden, müssen sie in Innenverpackungen verpackt werden oder so mit Polstermaterial oder einer Trennwand (Trennwände) in die Außenverpackung eingesetzt werden, dass die Kartuschen gegen Beschädigungen geschützt sind, die durch eine Bewegung des Inhalts in der Außenverpackung oder das Einsetzen des Inhalts in die Außenverpackung verursacht werden können. Die Außenverpackungen müssen gegen Bewegungen in der Außenverpackung gesichert werden.

Die entsprechende Außenverpackung der Kartusche muss den Prüfanforderungen der Verpackungsgruppe II entsprechen. Verpackungsgruppen dienen dazu gewisse Stoffe hinsichtlich ihres Gefahrengrades einzuteilen. Bei der Verpackungsgruppe II handelt

es sich um Stoffe mit mittlerer Gefahr. Zulässige Verpackungen müssen ein „X“ oder „Y“ in der kennzeichnenden Codenummer (3. Stelle) enthalten, um für den Transport von Gefahrgütern mit mittlerer Gefahr geeignet zu sein.

Das ADR kategorisiert den Transport von Brennstoffzellenkartuschen, die einen mit Wasser reagierenden Stoff enthalten, in der Beförderungskategorie 3. Dies bedeutet, dass bei einem Transport von weniger als 1000 kg POWERPASTE bestimmte Verpflichtungen, die normalerweise mit dem Gefahrguttransport einhergehen, entfallen. Bei der Handhabung der Versandstücke sind besondere Maßnahmen zu treffen, damit sie nicht mit Wasser in Berührung kommen. Außerdem dürfen die Versandstücke nur in gedeckten oder bedeckten Fahrzeugen oder in geschlossenen oder bedeckten Containern verladen werden. Der spezifische Tunnelbeschränkungscode ist bei der Tourenplanung unbedingt zu berücksichtigen. Für die betreffende ADR-Richtline gilt ein Durchfahrtsverbot für Tunnel der Kategorie E. In Deutschland unterliegen 22 Tunnel der Tunnelkategorie E.

4.3. Auswahl der POWERPASTE-Kartusche

Um die Auswahl der POWERPASTE-Kartusche innerhalb des Projektkonsortiums zu unterstützen, wurde eine multikriterielle Bewertung der beiden Behältertypen vorgenommen, welche am ehesten für den Einsatz in Frage kommen (vgl. Abschnitt 3.1.4). Das ist einerseits das Bag-in-Box-System (BiB) und andererseits eine Metallkartusche (MK).

Bei dem Vergleich wurde jedes relevante Kriterium untersucht und für beide Behältertypen verglichen (Tabelle 20: Multikriterieller Vergleich der Verpackungsvarianten**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Dabei wurde bewertet, ob die Behältertypen bei dem Kriterium besser (=2 Punkte), schlechter (= 0 Punkte) oder ähnlich (beide = 1 Punkt) abschneiden. Die Punkte werden je Kategorie aufsummiert und je Kategorie kurz diskutiert. Eine Übersicht in ist Tabelle 20 dargestellt.

Gefahrgut: Die MK schneidet in sechs von zehn Kriterien besser ab als die BiB, da sie aus Metall gefertigt ist und somit als beständiger und stabiler eingeschätzt wird. Vier Kriterien kann die BiB etwa genauso gut erfüllen wie die MK.

Logistik/Verpackung: In der Kategorie Logistik/Verpackung wurden 8 Kriterien bewertet, zweimal schneiden MK und BiB gleich ab, einmal liegt die MK vorne und fünfmal ist die BiB im Vorteil. Der Vorteil der BiB entsteht insbesondere durch die eckige Form, was Positionierung, Stapelbarkeit und die Bildung von Einheiten verbessert.

Anwendung: Dieser Kategorie sind 6 Kriterien zugeordnet, bei der Hälfte sind beide Behältertypen gleichauf. Die MK ist jedoch hier deutlich im Vorteil, da sie bei den anderen drei Kriterien vorne liegt. Sie ist formstabiler und handhabbarer, was insbesondere beim Austausch der leeren und vollen Kartuschen im Fahrzeug wichtig ist. Auch eine höhere Entleerbarkeit kommt den Anwendern zu Gute, da diese einen größeren Anteil der POWERPASTE je Kartusche Nutzen können.

Recycling: In dieser Kategorie werden 7 Kriterien verglichen und beide Behältertypen erreichen sehr ähnliche Punktwerte. Wenn eine Wiederverwendung geplant wird, ist die Nutzung von Metallkartuschen vorteilhaft aufgrund des Materials und der guten Entleerbarkeit. Falls die Behälter entsorgt werden müssen, hat die BiB Vorteile, da sie

aus nachwachsenden Materialien hergestellt werden kann und nach der Entleerung zusammengefaltet werden kann und somit weniger Volumen einnimmt.

Zusammengefasst liegt die MK in den Kategorien Gefahrgut, Anwendung und Recycling vorn. Diese Vorteile überwiegen den logistischen Vorteilen des BIB-Konzepts. Daher wird die Nutzung der MK für das Projektvorhaben empfohlen.

Tabelle 20: Multikriterieller Vergleich der Verpackungsvarianten

	Bag-in-Box	**Metallkartusche**
Gefahrgut		
Mechanisch Beständigkeit	0	2
Stoßfest	0	2
Druckfest	0	2
Reißfest	0	2
Temperaturbeständig	0	2
Dicht (Mengen-erhaltend)	1	1
Korrosions-/Feuchtigkeitsbeständig	1	1
Chemisch/bio-logisch neutral	1	1
Verschließbar/verplombbar	1	1
Schwer entflammbar	0	2
Zwischensumme	*4*	*16*
Logistik		
Positionierfähig	2	0
Automatisierungsfreundlich	1	1
Befüllgerechte Gestaltung	0	2
Stapelbar	2	0
Rutschfest	2	0
Genormt	1	1
Handhabbar	2	0
Einheitenbildend	2	0
Zwischensumme	*12*	*4*
Anwendung		
Leicht zu öffnen	1	1
Informativ	1	1
Identifizierbar	1	1
Formstabil	0	2
Entleerbar	0	2
Handhabbar	0	2
Zwischensumme	*3*	*9*
Entsorgung		
Wiederverwendbar	0	2
		…

Ökologisch/ Nachwachsend	2	0
Entsorgungs-freundlich	1	1
Recyclebar	0	2
Reinigungsfähig, Restentleerung	0	2
Reduziertes Volumen, wenn leer	2	0
Wiederverschließbar	1	1
Zwischensumme	*8*	*8*
Gesamtsummer	**27**	**37**

Legende: 2 Punkte = deutlicher Vorteil, 1 Punkt = ausgeglichen, 0 Punkte = deutlicher Nachteil

Neben der Entscheidung für einen Behältertyp muss eine Dimensionierung der Behälter stattfinden. Dafür wurde Tabelle 21: Werte und Aspekte zur Dimensionierung der Kartuschen als Entscheidungshilfe erstellt, welche eine Übersicht über die in den Anwendungsszenarien eingesetzten Fahrzeuge, deren Verbrauchswerte und Gedanken zur Umsetzung des Kartuschenwechsels beinhaltet.

Anhand der Verbrauchswerte ergibt sich ein optimales Kartuschenvolumen von 3-4 Litern. Da einige der Anwendungsfällen einen noch höheren Energiebedarf haben, ist die Nutzung eines Systems mit zwei Kartuschen zukünftigen Projekten zu diskutieren.

Tabelle 21: Werte und Aspekte zur Dimensionierung der Kartuschen

	KEP	**Sharing**	**Intralogistik**
Fahrzeugtyp	Leichte Fahrzeuge, z.B. Lastenrad, Streetscooter	Eher Motorroller, eher nicht PKW	FTS bis Gabelstapler
Verbrauchsspanne	3-18 kWh/100km	2-6kWh/100km (Roller), 17,9 kWh/100km (Pkw)	1-6,7 kWh/h
Einsatzdauer	8-9 Std am Tag	Max. 1 Tag, meistens kürzer	1/3 Schicht (häufig: 3*2,5h)
Routenlänge	31,3 km/Tag (Mittelwert Deutschland)	PKW im Mittel 84km/Tag	
Sinnvolle Kapazität	10 kWh/100km Verbrauch, min für 30km, besser für 60km → min 3kWh, besser 6 kWh Kapazität	Verbrauch 6-12kWH/100 km	FTS: 2,5kWh Stapler: 16 kWh bei voller oder 8 kWh bei 50% Auslastung
Kartuschengröße bei 1,8 kWh/l	Min 1,7l, besser 3,3l	Bei Roller: 3,3l Bei Klein-PKW: 6,7l	FTS: 1,4l Stapler: 4,4l – 8,9l
Nachtankprozess (nur auf PP, Wasser und Reststoffe sind dabei außen vor)	Nachtanken am Paketzentrum, Alternativ Kartuschen mitnehmen oder in Micro-Hubs lagern	Etwa 1-2/Tag, Nachtanken durch Sharing-Anbieter zwischen den Vermietungen zu organisieren	Nachtanken in den Pausen oder bei geringer Auslastung; Fester Nachladepunkt auf Gelände

5. Logistik (AP8)

Das Arbeitspaket 8 beschäftigt sich mit der Entwicklung und Validierung von Distributionsprozessen für die POWERPASTE-Kartuschen und ihrer optimalen Verpackung. Dafür wurden die Prozess- und Systemanforderungen der POWERPASTE analysiert und prototypische, funktionale Distributionsprozesse entworfen. Diese wurden anschließend modelliert und simuliert, um sie zu validieren und ihre Robustheit und Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu bereits genutzten Wasserstoffspeichern zu prüfen.

Das Kapitel besteht aus vier Abschnitten. Die Distributionsplanung wird in Abschnitt 5.1 beschrieben, diese Umfasst ein Grobkonzept zur Struktur, die Generierung von Planungsdaten zur Nachfrage, eine Definition und Beschreibung der Prozesse sowie die Stoffflussrechnung. Darauf folgt die Modellierung und Simulation in Abschnitt 5.2.

Ergebnisse des AP8 wurden auf den internationalen Konferenzen Transport Research Arena 2022[14] und 22nd IFAC World Congress 2023[15] vorgestellt.

5.1. Planung der POWERPASTE-Distribution

Die Entwicklung des POWERPASTE-Distributionskonzepts erfolgte in einem mehrstufigen, iterativen Prozess, der durch die zu Projektbeginn (sowie in weiten Teilen des Projektverlaufs) nur grob definierten Rahmenbedingungen merklich beeinflusst wurde. Die nachfolgenden Unterabschnitte skizzieren die zentralen Planungsschritte – sie geben jedoch aufgrund des iterativen Vorgehens nur annähernd die tatsächliche Abfolge der Arbeiten wieder.

5.1.1. Grobkonzept zur Struktur der POWERPASTE-Distribution

Um die optimale Distribution der POWERPASTE zu planen, wurden zunächst die Basisinformationen der Kartusche und der Umverpackung wie Abmaße, Gewicht und Energiegehalt zusammengestellt. Diese wurden dann umgerechnet auf die Daten einer Ladungseinheit (Europalette) sowie gesamter Fahrzeugladungen (Nutzung 40t und 18t LKW). Die errechneten Zahlenwerte sind in Tabelle 22 aufgeführt.

Tabelle 22: Basisinformation der POWERPASTE, der Ladungsträger und einer LKW-Ladung

Informationen zur POWERPASTE und Kartusche		
POWERPASTE		
Gewicht	1,35	kg/l
Energiedichte	1,9	kWh/l
Kosten	3	€/l
		…

[14] Mukku (2022): Zero-emission autonomous micro mobility – how to provide energy for autonomous bike sharing (Poster).
[15] Mukku et al. (2023): Evaluation of energy supply technologies for autonomous cargo bike-sharing system. In: *IFAC-PapersOnLine*, *56*(2), 1784–1790.

Kartusche, Umverpackung und Palette		
Kartusche		
Kartuschenabmaße	505x107	h x D
Kartuschenhöhe	505	mm
Kartuschen Durchmesser	107	mm
Kartuschenvolumen	3,42	l
Kartuschenigewicht Inhalt	4,617	kg/l
Kartuschengewicht Gesamt	5,049	kg
Energiegehalt Kartusche	6,498	kWh
Umverpackung (Ladungsträger)		
Standardisierung	VDA 6414	
Länge	600	mm
Breite	400	mm
Höhe	147	mm
Volumen	35,280	l
Kapazität	2	Kartuschen
Gewicht leer	2,8	kg
Gewicht	12,898	kg
Energiegehalt LT	13	kWh
Palette		
Palettenkapazität (Ladungsträger pro Lage)	4	LT/Lage
Anzahl der Lagen pro Palette (max.)	14	Lagen
Palettenkapazität - Ladungsträger pro Palette	56	LT/Palette
Palettenkapazität - Kartuschen pro Palette	112	Kartuschen/Palette
Energiegehalt Palette	728	kWh
Gewicht Palette	722,288	kg
POWERPASTE/Palette	517	kg
Transportmittel		
Fahrzeug	40t-LKW	18t-LKW
Kapazität Paletten (theoretisch)	34	17
Kapazität Gewicht [kg]	25000	10000
Kapazität Paletten (real)	34	13
Verbrauch Diesel [l/100km]	33	25
Verbrauch Diesel [kWh/100km]	323,4	245
Energiegehalt einer POWERPASTE-Lieferung [kWh]	24744	9461

Auf Basis dieser Daten wurden für die verschiedenen Lkw-Typen die maximal mögliche Fahrstrecke und die dabei anfallenden Energieverluste ermittelt. Um eine Energieeffizienz von mindestens 80 % sicherzustellen, wurde festgelegt, dass eine Transportroute nicht mehr als 20 % der Lkw-Ladung verbrauchen darf. Daraus ergibt sich eine maximale Distanz von 440 km für den POWERPASTE-Transport.

Folglich sind langfristig mindestens vier Distributionsstandorte – entweder als Produktions- oder als Distributionszentren – erforderlich. Mit dem Open-Source-Excel-Tool „FLP Spreadsheet Solver“ wurden geeignete Standorte identifiziert, die jeweils Kunden in Nord-, Süd-, West- und Ostdeutschland versorgen (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Für jeden dieser vier V ersorgungsbereiche wurde eine entsprechend große Gewerbeimmobilie recherchiert und als Ausgangsstation definiert.

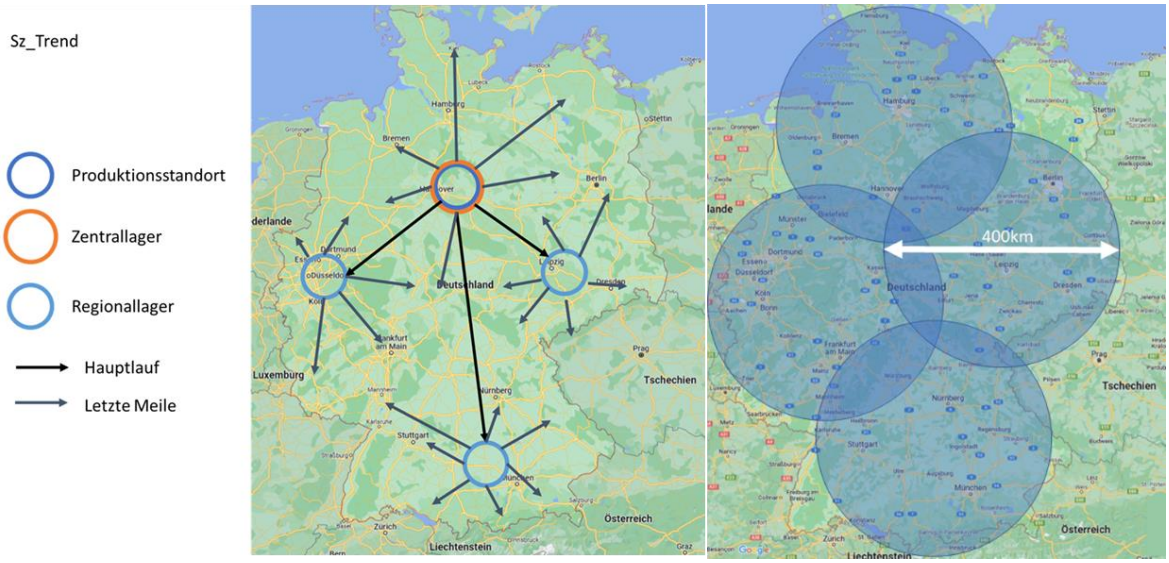


Abbildung 4: Struktur der POWERPASTE-Distribution

5.1.2. Quantifizierung der Anwendungsszenarien und Generierung von Planungsdaten zur POWERPASTE-Nachfrage

Zur Quantifizierung der benötigten POWERPASTE-Mengen ist eine Prognose des Marktanteils erforderlich. Als Ausgangspunkt für die grundlegenden Bedarfsermittlungen wurde, nach Abstimmung mit dem Projektkonsortium, zunächst ein Marktanteil von 1 % in den drei Anwendungsszenarien (Sharing, KEP, Intralogistik) angenommen.

Die zuvor ermittelten Anwendungsszenarien wurden zunächst durch typische Fahrzeugklassen konkretisiert, für die im Projektverlauf eine umfassende Parameterrecherche erfolgte. Dabei wurden für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge sowie Flurförderfahrzeuge folgende wesentliche Parameter betrachtet:

- Gegenwärtige Stückzahl genutzter Systeme
- Marktanteil zur Ableitung der POWERPASTE-Systemzahl
- Energieverbrauch pro Zeiteinheit oder Längeneinheit eines Referenz-Batteriesystems
- Auslastungsgrad bzw. Jahresfahrleistung zur Berechnung des POWERPASTE-Bedarfs

Aus diesen Parametern konnten für jedes Szenario die Anzahl der zu erwartenden POWERPASTE-Fahrzeuge sowie der jährliche Gesamtenergiebedarf näherungsweise bestimmt werden. Unter Berücksichtigung der spezifischen Energie und der Wirkungsgrade wurden daraus Gesamtbedarfe der POWERPASTE für die jeweiligen Szenarien berechnet (siehe Tabelle 23).

Tabelle 23: Approximation der POWERPASTE-Grundbedarfe für die ermittelten Anwendungsszenarien

	Sharing	**KEP**	**Intra**
Stückzahl Deutschland	26.220	127.400	534.691
Verbrauch kWh pro 100km	17,9	29,6	-
Verbrauch kWh pro h	-	-	6,7
Jahresfahrleistung	30.500	37.857	-
Auslastungsgrad	-	-	0,67
Marktanteil	25%	25%	25%
Anzahl Powerpaste Fahrzeuge Deutschland	6.555	31.850	133.673
Verbrauch PP in kWh/d Deutschland	2.4511.659	14.782.8253	35.824.284
Absatz PP in t/d Deutschland	7.660	46.196	11.195
Absatz PP in t/a Deutschland	279.5861	16.861.660	4.086.207
Räumliche Verteilung | Qualitative Beschreibung	Großstädte	Vorrangig Großstädte	Nähe von übergeordneter Infrastruktur (Fernstraßen, Bahnstrecken etc.)

Um konkrete Planungsdaten abzuleiten, wurde auf Grundlage eines initialen Marktanteils von 1 % ein Berechnungstool entwickelt, das den jährlichen POWERPASTE-Gesamtbedarf (17.429 t/a) detailliert auf die Szenarien Sharing, KEP und Intralogistik verteilt. Diese Werte basieren auf typischen Fahrzeugverbräuchen (Kleinwagen für Sharing, Leichtfahrzeug für KEP, Gabelstapler für Intralogistik), deren durchschnittlichen Jahresfahrleistungen (25.000 km, 38.000 km und 1.300 Betriebsstunden) sowie einer entsprechenden Anzahl von Fahrzeugen (302, 1.020, 1.848).

Darauf aufbauend wurde die Anzahl der Kundenstandorte pro Szenario ermittelt. Zusätzlich wurde die typische jährliche Abnahmemenge pro Kundenstandort bestimmt. Die regionale Verteilung der Kunden erfolgte auf Basis der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit (für Intralogistik) sowie der Bevölkerungszahl (für Sharing und KEP). Für jeden Standort wurden reale Unternehmensdaten recherchiert (Name, geografische Lage, Anwendungsszenario und Klassifizierung in klein/mittel/groß). Eine Zusammenfassung der Planungsdaten befindet sich in Tabelle 24:

Tabelle 24: Übersicht zu angenommener Kundennachfrage

	Intra-logistik	**KEP**	**Sharing**	**Summe**
Jährliche Nachfrage [t]	12461	4132	837	17429
Arbeitstage pro Jahr	250	250	250	
				…

Tägliche Nachfrage [t]	49,84	16,53	3,35	
Tägliche Nachfrage je Kunde [t]	0,41	0,66	0,12	
Anzahl Kunden	123	25	29	177
Anzahl Gtoßkunden (GK)	14	5	4	23
Anzahl mittlerer Kunden (MK)	95	15	21	131
Anzahl kleiner Kunden (KK)	14	5	4	23
Bestellmenge [Paletten]	34	34	13	
Belieferungen pro Jahr	709	235	124	
Annahmen Simulation				
Nachfrage im Verhältnis zum Basiswert (GK)	150%	150%	150%	
Nachfrage im Verhältnis zum Basiswert (MK)	100%	100%	100%	
Nachfrage im Verhältnis zum Basiswert (KK)	50%	50%	50%	
Tägliche Nachfrage je Kunde (GK) [t]	0,61	0,99	0,17	1,77
Tägliche Nachfrage je Kunde (MK) [t]	0,41	0,66	0,12	1,18
Tägliche Nachfrage je Kunde (KK) [t]	0,20	0,33	0,06	0,59

Zudem ermöglicht das entwickelte Berechnungstool die Verteilung der kumulierten POWERPASTE-Mengen auf die drei Kundentypen (klein/mittel/groß) innerhalb jedes Anwendungsszenarios. Mithilfe des euklidischen Abstands zwischen Kunden und Distributionsstandorten werden Kunden dem jeweils nächstgelegenen Standort zugeordnet. Die auf diese Weise generierten Daten (insgesamt 177 Kunden) können als Excel-Datensatz direkt in die Simulationssoftware importiert werden und bilden somit die Grundlage für die weitere Logistikplanung.

5.1.3. Prozessdefinition und -beschreibung

Für die Powerpaste-Distribution wurde eine umfassende Prozessdefinition und -beschreibung erarbeitet. Das Distributionssystem wurde in vier zentrale Bereiche untergliedert:

- Management: Umfasst die Steuerung und Kontrolle aller logistischen Prozesse
- Befüllung und Versand: Beinhaltet Prozesse von der Abfüllung der POWERPASTE bis zur Verladung für den Transport
- Transport und Auslieferung: Umfasst alle transportbezogenen Prozesse
- Regionale Verteilung und Lagerung: Beinhaltet die Prozesse in den Distributionszentren

Für jeden Prozess wurde ein Prozesssteckbrief erstellt, der folgende Elemente enthält:

- Eine eindeutige ID-Nummer, die den zugeordneten Bereich und den Flusstyp (Material-, Informations- oder Finanzfluss) kennzeichnet
- Eine Prozessbezeichnung, einen Kurznamen und eine ausführliche Prozessbeschreibung

- Eine Dokumentation der vor- und nachgelagerten Flüsse, wobei die nachgelagerten Flüsse nach ihrer Art differenziert wurden
- Eine Auflistung aller erforderlichen Ressourcen für die Prozessdurchführung

Insgesamt wurden über 100 Prozesse definiert und dokumentiert. Der Großteil davon entfällt auf den Bereich Befüllung und Versand, was die Komplexität dieses Bereichs widerspiegelt. Exemplarisch sind einige Schlüsselprozesse aus diesem Bereich in der nachfolgenden Tabelle 25 dargestellt.

Die Analyse der kritischen Prozesse ermöglichte die Identifikation potenzieller Engpässe und die darauf aufbauende Dimensionierung der benötigten Ressourcen. Insbesondere die Abfüllprozesse wurden als potenzielle Engpässe identifiziert, was zu einer Parallelisierung mit vier Abfülleinheiten führte.

Neben einer textuellen Beschreibung wurden die Prozesse weiterhin in ein Prozessdiagramm Abbildung 5 überführt, um Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen den jeweiligen Prozessen bzw. Bereichen transparent darzustellen.

5.1.4. Stoffflussrechnung

Auf Basis der definierten Prozesse wurde eine detaillierte Stoffflussrechnung durchgeführt, um die quantitativen Aspekte der POWERPASTE-Distribution zu erfassen. Die Stoffflussrechnung umfasst folgende zentrale Elemente:

1. **Berechnung der Durchlaufzeiten**: Für jeden Prozess wurden spezifische Bearbeitungszeiten ermittelt und zu Gesamtdurchlaufzeiten aggregiert. Die Werte wurden in enger Abstimmung mit dem Projektkonsortium festgelegt. Aufgrund des experimentellen Stadiums von Produktions- und Abfüllprozessen handelt es sich dabei aktuell noch um Annahmen, welche bei zusätzlichem Erkenntnisgewinn weiter präzisiert werden müssen.
2. Materialbedarf: Die jährliche Nachfrage von 17.429 Tonnen POWERPASTE erfordert etwa 3,77 Millionen Kartuschen. Dies entspricht etwa 1,89 Millionen Containern (bei 2 Kartuschen pro Container) und 36.298 voll beladenen Paletten pro Jahr.
3. Ressourcendimensionierung:
   - Für die Abfüllung wurden vier parallele Befülllinien dimensioniert, um die erforderliche Kapazität zu gewährleisten
   - Das Zentrallager wurde mit 2.613 Palettenstellplätzen ausgelegt, wobei die regionale Verteilung zwischen 194 (Ost) und 365 (West) Stellplätzen vorsieht
   - Die Transportkapazität wurde mit 8 LKW (40t) dimensioniert, die auf die Regionen verteilt wurden (4 für Nord, 2 für West, je 1 für Süd und Ost)
4. Zeit- und Kapazitätsbedarfe: Für jeden Prozess wurden die kumulierten Zeitbedarfe berechnet und mit der verfügbaren Zeit (24/7-Betrieb) ins Verhältnis gesetzt, um den Parallelisierungsbedarf zu ermitteln. Die ermittelten Verhältniswerte dienten als Grundlage für die Ressourcendimensionierung.

Tabelle 25: Kritische Prozesse im POWERPASTE-Distributionssystem (Auswahl)

Nr.	Kurzname	Prozess	Vorg. Prozess	Nachg. Prozess	Beschreibung	Ressourcen
P32	Fil_Cart_Em	Abfüllung Kartusche	P10, P31	P33	Powerpaste und Stickstoff werden in die leeren Kartuschen gefüllt, das Ventil wird aufgesetzt und verschlossen.	Abfüllstation, Leerkartuschen, Produktionslinie PP/ Powerpaste, Mitarbeiter
P39	Pac_Cart_Fu	Packen Kartusche in Container	P37, P38	P40	Der Deckel des leeren Containers wird geöffnet. Kartuschen werden in den Container gelegt. Der Deckel des vollen Containers wird geschlossen.	Volle Kartuschen, leere Behälter, Packstation für Kartuschen in Behälter, Verpackungsmaterial in Behältern, Mitarbeiter
P42	Pac_Con_Fu	Packen Container auf Palette	P41	P44	Die vollen Container werden durch einen Roboter/Mitarbeiter auf Palette gepackt.	Voll beladene Container, Packstation für Container, Packmaterial, Mitarbeiter
P48	Shi_Pal_Wr_PS	Auslagern/ Versenden	P34, P45, P48	T1	Die vollen und verpackten Paletten werden kommissioniert und in den Versandbereich gebracht.	Lager für verpackte Paletten, Förderer für den Transport verpackter Paletten, Gabelstapler, Lastwagen, verpackte Paletten, Mitarbeiter
T05	Tra_Tru_DC	Transportieren zum DC	T4	T6	Volle Paletten werden per LKW vom Produktionsstandort zum DC transportiert.	Lastwagen, volle Paletten, Fahrer
T11	Tra_Tru_Cs	Transportieren zum Kunden	T4, T10	T12	Volle Paletten werden per LKW vom Produktionsstandort/DC zum Kunden transportiert	Lastwagen, volle Paletten, Fahrer

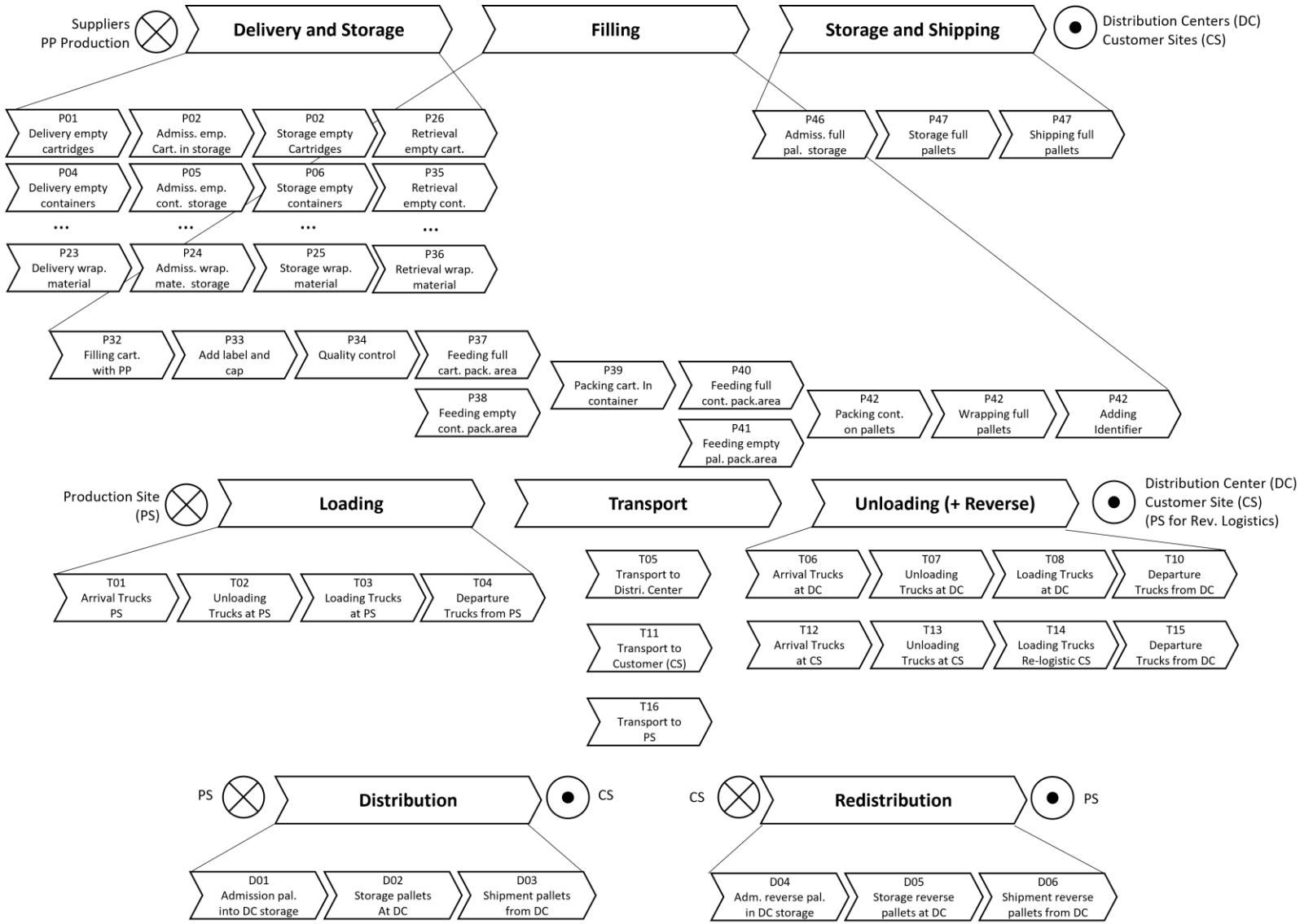


Abbildung 5: Prozessfluss

Die Stoffflussrechnung zeigt, dass die Kapazitäten des geplanten Systems ausreichend dimensioniert sind, um die prognostizierte Nachfrage zu bedienen. Kritische Prozesse wie die Befüllung (Parallelisierungsfaktor 3,6) und das Packen der Container auf Paletten (Faktor 0,54) wurden identifiziert und entsprechend mit redundanten Systemen ausgestattet.

5.1.5. Instrumentaler Entwurf

Die Ergebnisse der vorangegangenen Planungsschritte wurden in einem umfassenden Excel-Planungsmodell zusammengeführt. Dieses Modell integriert sämtliche relevanten Parameter der POWERPASTE-Distribution, von den Grunddaten über die Prozesszeiten bis hin zu den Ressourcenbedarfen und daraus resultierenden Kosten. Es ermöglicht die Berechnung verschiedener Szenarien durch die Variation von Eingangsparametern wie:

- Marktanteilen und resultierenden Absatzmengen
- Ausstattung der Produktions- und Distributionszentren
- Anzahl und Kapazität der eingesetzten Transportmittel
- Automatisierungsgrad der Prozesse
- Verschiedene Lager- und Transportstrategien

Das Planungsmodell dient als zentrale Schnittstelle zwischen der qualitativen und quantitativen Planung und liefert die Eingangsparameter für das Simulationsmodell. Durch die systematische Zusammenführung aller Planungsdaten konnten Konsistenzprüfungen durchgeführt und die Robustheit des Gesamtkonzepts bereits vor der eigentlichen Simulation überprüft werden.

5.2. Modellierung und Simulation POWERPASTE-Distribution

Um die Dynamik und Leistungsfähigkeit des entwickelten Logistikkonzepts für die POWERPASTE-Distribution realistisch abzubilden und zu evaluieren, wurde ein umfassendes Simulationsmodell entwickelt. Dieses Modell dient sowohl der Validierung des konzeptionellen Logistikansatzes als auch der Quantifizierung relevanter Kennzahlen für verschiedene Szenarien.

5.2.1. Konzeptionelles Modell

Das konzeptionelle Modell zur Simulation der POWERPASTE-Logistik basiert auf einem mehrschichtigen Ansatz, der die wesentlichen Komponenten des Logistiksystems abbildet. Wie in Abbildung 6 dargestellt, besteht das Modell aus vier Hauptebenen:

1. Input-Ebene: Dient der Erfassung und Aufbereitung der Nachfragedaten aus den drei definierten Anwendungsszenarien (Intralogistik, KEP-Dienste und Fahrzeugsharing).
2. Steuerungs- und Managementebene: Umfasst die zentralen Steuerungssysteme für das Order Management, Fleet Management, Stock Management und Financial Management.
3. Operative Ebene: Bildet die physischen Prozesse der Produktion, des Transports und der Distribution ab.
4. Output- und KPI-Dashboard: Erfasst und visualisiert die relevanten Leistungskennzahlen des Logistiksystems.

Im Mittelpunkt des Modells stehen drei zentrale Objekttypen, die den Materialfluss charakterisieren:

- Orte: Produktionszentrum (PC), Distributionszentren (DC) und Kundenstandorte
- Transportmittel: LKW verschiedener Größenklassen (40t und 18t)
- Transporteinheiten: POWERPASTE-Kartuschen, Container und Paletten

Das Modell berücksichtigt dabei die vollständige Prozesskette von der Herstellung und Abfüllung der POWERPASTE über den Transport bis hin zur Auslieferung und potenziellen Rückführung von Leergebinden.

5.2.2. Integration des Berechnungsmodells

Ein besonderer Mehrwert des Simulationsansatzes liegt in der engen Verknüpfung mit dem in Abschnitt 5.1.5 beschriebenen Excel-Planungsmodell. Sämtliche Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitsschritte, insbesondere die Stoffflussrechnung und die detaillierte Prozessdefinition, wurden in die Simulation überführt.

Das Berechnungsmodell ermöglicht eine vielfältige Anpassung der Eingangsparameter und bildet damit die Grundlage für eine breite Palette an Simulationsexperimenten. Diese Flexibilität ist besonders wertvoll vor dem Hintergrund, dass sowohl die Produktions- als auch die Abfüllungsprozesse für POWERPASTE noch experimentellen Charakter haben und die optimalen Parameter noch nicht vollständig definiert sind.

Folgende Parameter können im Modell flexibel variiert werden:

- Marktpenetration: Anpassung der Marktanteile (z.B. 0,5 %, 1 %, 2 %) und daraus resultierende Absatzmengen
- Infrastruktur: Konfiguration der Produktions- und Distributionszentren hinsichtlich Anzahl, Standort und Kapazität
- Transportflotte: Variation der Anzahl, Kapazität und Zuordnung der Transportfahrzeuge
- Prozessparameter: Anpassung von Abfüll-, Be- und Entladezeiten sowie Lagerkapazitäten
- Betriebsstrategien: Implementierung verschiedener Zuordnungs- und Routingstrategien

Diese Parametrisierbarkeit erlaubt es, nicht nur die aktuelle Planungssituation abzubilden, sondern auch zukünftige Entwicklungen und alternative Szenarien zu untersuchen.

5.2.3. Implementierung

Das konzeptionelle Modell wurde mittels der Simulationssoftware AnyLogic implementiert, die eine kombinierte Anwendung verschiedener Simulationsmethoden ermöglicht. Für die Powerpaste-Logistiksimulation wurden hauptsächlich folgende Ansätze integriert:

- Diskrete Ereignissimulation für die Abbildung der Prozessabläufe (z.B. Abfüllung, Be- und Entladung)

- Agentenbasierte Simulation für das Verhalten individueller Entitäten (z.B. LKW, Gabelstapler)
- GIS-Integration für die realistische Darstellung der geografischen Zusammenhänge und Transportrouten

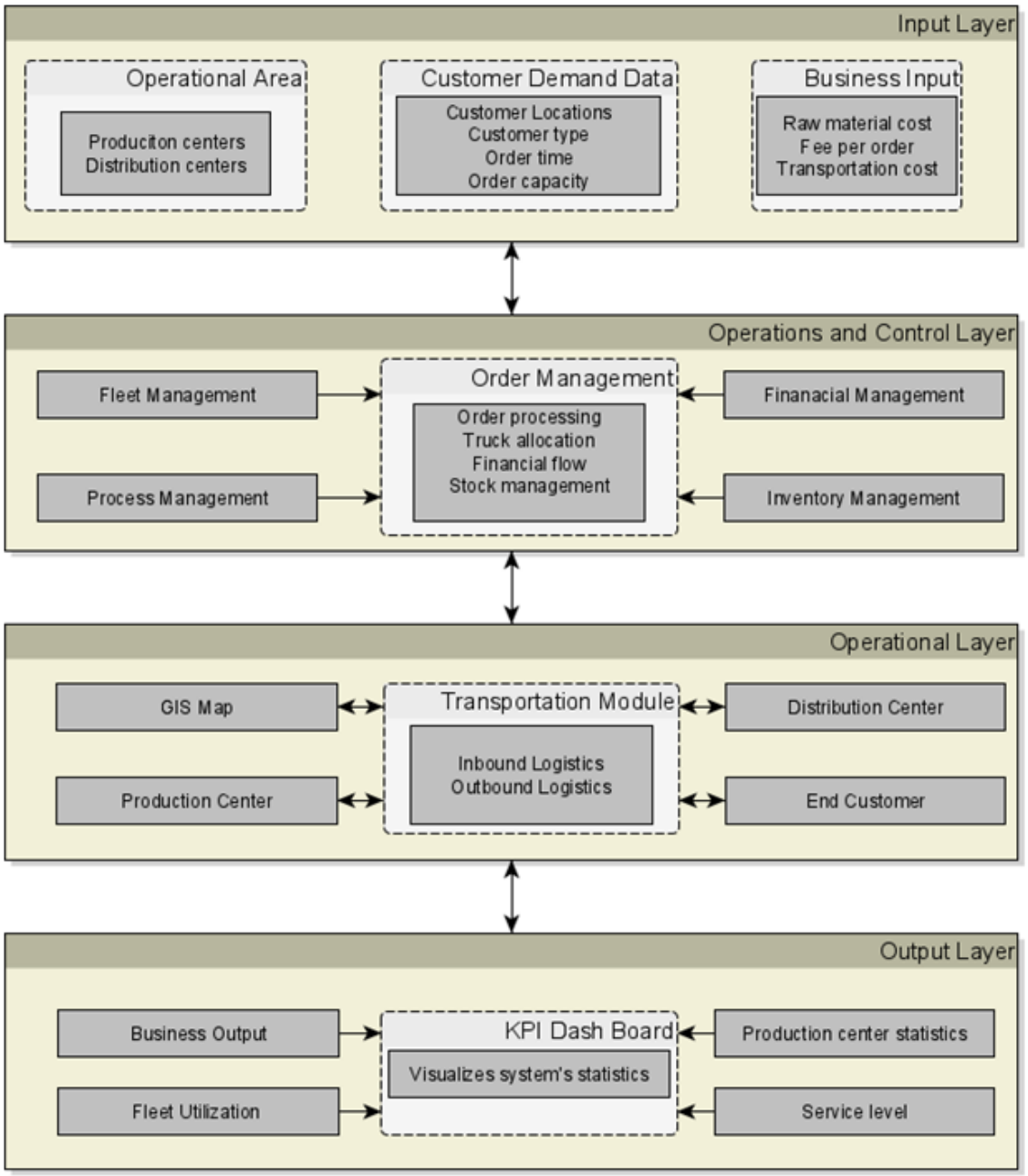


Abbildung 6: Konzeptionelles Modell

Das Simulationsmodell umfasst die im Folgenden dargestellten Hauptkomponenten.

5.2.3.1. Produktionszentrum (PC)

Das Produktionszentrum beinhaltet die Abfüllanlage für POWERPASTE sowie Lagerbereiche für Rohstoffe, leere Kartuschen und befüllte Paletten. Die Produktion folgt einem konfigurierbaren Rhythmus und kann auf Basis des Lagerbestands gesteuert werden:

Algorithmus 1: Produktionssteuerung (Auszug)

```
java
// Auszug aus der Produktionssteuerung
if(storage_PC.size() > 750) {
      // Produktion anhalten bei vollem Lager
}
```

Die Logikprozesse umfassen:

- Abfüllung der POWERPASTE in Kartuschen
- Verpackung der Kartuschen in Container
- Zusammenstellung der Container auf Paletten
- Zwischenlagerung der Paletten im Hochregallager

5.2.3.2. Distributionszentren (DC)

Die regionalen Distributionszentren dienen als Umschlagspunkte für die Versorgung der Kunden. Jedes DC verfügt über:

- Lagerflächen für die Zwischenlagerung der POWERPASTE-Paletten
- Be- und Entladezonen für LKW
- Zugeordnete Flotten von Lieferfahrzeugen

Die Bedarfsplanung erfolgt durch ein integriertes Bestandsmanagement:

Algorithmus 2: Bestandsmanagement (Ausschnitt)

```
java
// Bedarfsprüfung und Auslösung von Nachbestellungen
if(storageofDC < 100) {
      generateDistributionOrder();
}
```

5.2.3.3. Transportflotte

Die Fahrzeugflotte besteht aus LKW, die zwischen Produktionszentrum, Distributionszentren und Kundenstandorten verkehren. Jedes Fahrzeug ist als autonomer Agent modelliert mit eigener Zustandslogik:

- IDLE_WAITING_AT_PDC: Warteposition am Produktionszentrum
- IDLE_WAITING_AT_DC: Warteposition am Distributionszentrum
- Fahrzustände für Transporte zwischen PC, DC und Kunden

Die Zuordnung der Fahrzeuge zu den jeweiligen Standorten kann flexibel konfiguriert werden:

Algorithmus 3: Fahrzeugzuordnung (Ausschnitt)

```
java
// Zuweisung von Fahrzeugen zum Produktionszentrum
assignTruckstoNorth_PDC(p_TrucksAtNorth);
// Zuweisung von Fahrzeugen zu den Distributionszentren
assignTruckstoSouth_DC(p_TrucksAtSouth);
assignTruckstoWest_DC(p_TrucksAtWest);
assignTruckstoEast_DC(p_TrucksAtEast);
```

5.2.3.4. Kundenintegration

Die Kundennachfrage wird auf Basis der im AP1 definierten Anwendungsszenarien modelliert. Die Kunden werden anhand ihrer geografischen Lage und ihres Verbrauchsprofils charakterisiert:

Algorithmus 4: Modellierung Kundennachfrage (Ausschnitt)

```
java
// Erstellung der Kunden aus Exceldaten
for(int l=2; l<excelFile.getLastRowNum(name);l++){
      String customerID = excelFile.getCellStringValue(name,l,1);
      double lat = excelFile.getCellNumericValue(name, l, 2);
      double lon = excelFile.getCellNumericValue(name, l, 3);
      double shipmentsperyear = excelFile.getCellNumericValue(name, l, 7);
      double utilization = excelFile.getCellNumericValue(name, l, 5);

      // Kunde erstellen und nach Typ differenzieren
      if (customerID.contains("i_")) {
            // Intralogistik-Kunde
            Customer cus = add_customers();
            cus.p_customerId = customerID;
            cus.p_customerLat = lat;
            cus.p_customerLon = lon;
            cus.p_shipmentsperyear = shipmentsperyear;
            cus.p_utilization = utilization;
            cus.setLatLon(lat, lon);
            cus.customerType.setVisible(true);
            cus.customerType.setFillColor(red);
      }
      // Ähnliche Logik für Sharing- und KEP-Kunden
}
```

5.2.3.5. Auswertungsmöglichkeiten

Das Simulationsmodell erfasst kontinuierlich relevante Kennzahlen, die in Echtzeit visualisiert und für die spätere Analyse aufbereitet werden:

1. Transportindikatoren:
   - Zurückgelegte Strecken für unterschiedliche Transportrelationen (PC-DC, DC-PC, DC-Kunden, Kunden-DC)
   - Energieverbrauch und CO_2-Emissionen der Transportflotte
   - Auslastungsgrade der Fahrzeuge
2. Bestandsindikatoren:
   - Füllstände der Lager (leere Paletten am PC, volle Paletten am PC, volle Paletten am DC)
   - Durchschnittliche Verweilzeiten der Güter in den Lagern
   - Füllstände der Fahrzeuge
3. Betriebswirtschaftliche Kennzahlen:
   - Kosten für Transport, Lagerung und Handling
   - Investitionsbedarfe für Infrastruktur und Fahrzeuge
   - Gesamtwirtschaftlichkeit des Distributionssystems

Die Visualisierung erfolgt durch ein integriertes Dashboard mit verschiedenen Diagrammtypen, das sowohl die aktuelle Systemleistung als auch die kumulierten Werte über den Simulationszeitraum darstellt.

5.2.3.6. Experimentelle Anwendung und Validierung

Die Kombination aus detailliertem Berechnungsmodell und dynamischer Simulation bietet grundsätzlich die Möglichkeit für verschiedene Analysen, die besonders für die Weiterentwicklung der noch experimentellen Produktions- und Abfüllungsprozesse wertvoll sein können. Mit dem Modell können beispielsweise mögliche Auswirkungen veränderter Prozessparameter oder alternativer Systemkonfigurationen auf die Gesamtperformance abgeschätzt werden.

Im Rahmen des Projekts wurden folgende Basisanalysen durchgeführt:

- Machbarkeitsuntersuchungen: Prüfung der grundsätzlichen Funktionsfähigkeit des konzipierten Distributionssystems
- Bedarfsanalysen: Abschätzung des Ressourcenbedarfs (Fahrzeuge, Lagerkapazitäten) für unterschiedliche Marktszenarios
- Vergleichsanalysen: Gegenüberstellung alternativer Betriebsstrategien und Systemkonfigurationen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit

Ergebnisse dieser Analysen werden in Kapitel 6 dargestellt. Zur Sicherstellung der Aussagekraft des Modells wurden zusätzlich verschiedene Validierungsschritte durchgeführt:

1. Strukturvalidierung: Überprüfung der konzeptionellen Richtigkeit des Modells durch Abgleich mit den definierten Prozessen.
2. Verhaltensvalidierung: Analyse des Modellverhaltens unter verschiedenen Lastszenarien und Vergleich mit erwarteten Systemreaktionen.
3. Plausibilitätsprüfung: Beurteilung der Simulationsergebnisse hinsichtlich ihrer Plausibilität durch Experten aus dem Bereich Logistik.

Das entwickelte Simulationsmodell bietet eine fundierte Grundlage für die weiteren Analysen und kann als Ausgangspunkt für zukünftige, detailliertere Untersuchungen dienen. Mit zunehmender Reife der POWERPASTE-Technologie und Verfügbarkeit empirischer Daten kann das Modell kontinuierlich verfeinert und erweitert werden, um noch präzisere Vorhersagen über das Verhalten des Distributionssystems zu ermöglichen.

6. Wirtschaftlichkeitsanalyse und Verwertung (AP9)

Ziel des AP9 ist es, die wirtschaftliche Tragfähigkeit der POWERPASTE-Distribution zu bewerten und Handlungsempfehlungen für zukünftige Entwicklungen abzuleiten. Aufbauend auf den in vorausgegangenen Arbeitspaketen erarbeiteten Grundlagen konzentriert sich der folgende Abschnitt insbesondere auf die wirtschaftliche Bewertung von Powerpaste-Energiesystemen für die Elektromobilität. Dafür werden in Abschnitt 6.1 eine Wirtschaftlichkeitsanalyse des entwickelten Logistikkonzepts sowie ein Vergleich mit konventionellen Wasserstofftechnologien durchgeführt. Anschließend erfolgt die Identifikation von Optimierungspotenzialen und weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarfen.

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Arbeiten wurden in einer Vielzahl wissenschaftlicher Beiträge verwertet. Diese sind abschließend in Abschnitt 6.2 aufgeführt.

6.1. Ergebnisse Simulationsexperimente

Die aus den Simulationsexperimenten gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen eine detaillierte Analyse der Kostenstruktur des Powerpaste-Distributionssystems. Im Folgenden werden die Ergebnisse für das Basisszenario mit 1 % Marktdurchdringung dargestellt.

6.1.1. Kostenstruktur des Distributionssystems

Bei einer angenommenen Marktdurchdringung von 1 % und einer Simulationszeit von einem Jahr ergeben sich die in Tabelle 26 dargestellten Energiebedarfe für die in Abschnitt 2.2.6 definierten Anwendungsszenarien.

Tabelle 26: Bedarf POWERPASTE für Beispielszenario

	Intra-logistik	Fahrzeug-sharing	KEP	Gesamt
Energiebedarf [kWh]	1.177.800	5.814.912	17.537.520	24.530.232
Bedarf Volumen PP [l]	619.895	3.060.480	9.230.274	12.910.648
Bedarf Masse PP [t]	837	4.132	12.461	17.429
Bedarf Kartuschen PP	181.290	894.973	2.698.997	3.775.043

Die sich daraus ergebene Kostenstruktur der POWERPASTE-Distribution sowie die Kosten pro Kartusche zeigt Abbildung 7. Die Analyse macht deutlich, dass die Kosten für Abfüllung und Verpackung mit 74 % den größten Anteil an den Gesamtkosten ausmachen. Die Transportkosten folgen mit 19 %, während die Kosten für Lagerung und Distribution mit nur 4 % sowie sonstige Kosten (z.B. Bauliches, Verwaltung) mit 3 % einen vergleichsweise geringen Anteil darstellen.

Abbildung 7: Kostenstruktur POWERPASTE-Distribution

6.1.2. Vergleich mit konventioneller Wasserstofflogistik

Um die Wirtschaftlichkeit der POWERPASTE-Distribution im Vergleich zu bestehenden Wasserstofftechnologien zu bewerten, wurde ein detaillierter Vergleich mit Druckwasserstoff (700 bar) durchgeführt. Druckwasserstoff wurde als Referenz gewählt, da diese Technologie aktuell die vorherrschende Methode der Wasserstoffspeicherung im Mobilitätsbereich darstellt und in verschiedenen Fahrzeugklassen bereits kommerziell eingesetzt wird. Zudem zeigen die Analysen aus AP1, dass Druckwasserstoff in den identifizierten Anwendungsszenarien eine der Hauptalternativen zur POWERPASTE darstellt.

Die Bereitstellungskosten pro kWh Energiegehalt werden unter Berücksichtigung des Well-To-Tank (WTT)-Wirkungsgrads wie folgt berechnet:

$$Bereitstellungskosten_{WTT} = \frac{Bereitstellungskosten}{Energiegehalt \cdot Wirkungsgrad_{WTT}} \tag{1}$$

Für Druckwasserstoff (700 bar) ergeben sich unter Annahme von Bereitstellungskosten in Höhe von 17,75 €/kg[16] und einem WTT-Wirkungsgrad von 0,65 folgende Bereitstellungskosten C_{WTT-H2}:

$$C_{WTT-H2} = \frac{17{,}75\ {}^{€}/_{kg}}{33{,}33\ {}^{kWh}/_{kg} \cdot 0{,}65} = 0{,}819\ {}^{€}/_{kWh} \tag{2}$$

Für Powerpaste ergeben sich weiterhin folgende Bereitstellungskosten C_{WTT-PP}

$$C_{WTT-PP} = \frac{(1{,}37 + c_P)\ {}^{€}/_{l}}{1{,}9\ {}^{kWh}/_{l} \cdot Wirkungsgrad_{WTT}} = (0{,}721 + c_{P_{WTT}})\ {}^{€}/_{kWh} \tag{3}$$

wobei c_P die Produktionskosten pro Liter Powerpaste und $c_{P_{WTT}}$ den Quotienten aus Produktionskosten und dem Produkt aus Energiegehalt und WTT-Wirkungsgrad darstellen.

Da der exakte WTT-Wirkungsgrad und die Produktionskosten der POWERPASTE zum aktuellen Zeitpunkt aufgrund des prototypischen Entwicklungsstands noch nicht abschließend bestimmt werden können, wurde für die weitere Analyse eine parametrische Untersuchung durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Kombinationen von WTT-Wirkungsgrad und Produktionskosten betrachtet, um die

[16] Preisrecherche über Webportal https://h2-mobility.de, Preise für Standort Magdeburg, abgerufen am 07.11.2024

Bereiche zu identifizieren, in denen POWERPASTE mit Druckwasserstoff konkurrenzfähig (d.h. Bereitstellungskosten kleiner/gleich 0,819 €/kWh) sein könnte. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt.

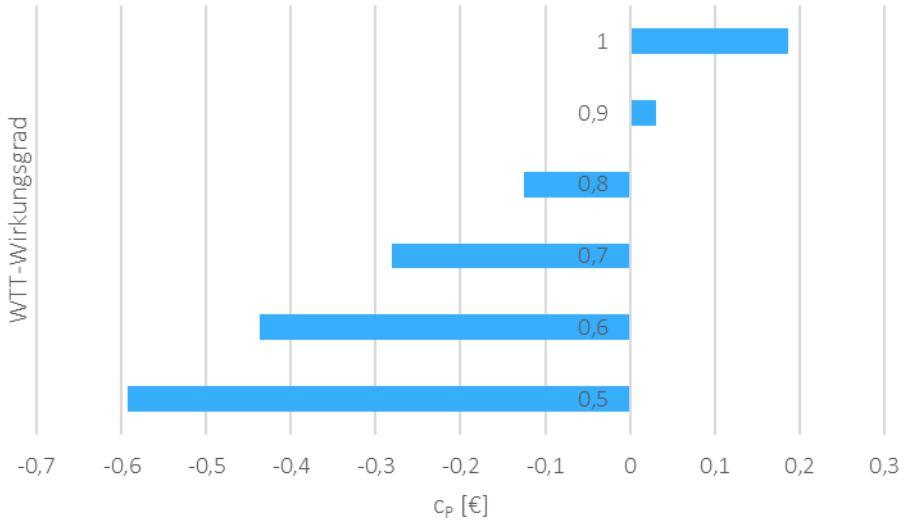


Abbildung 8: Produktionskosten in Abhängigkeit des WTT-Wirkungsgrads

Die Abbildung verdeutlicht den Zusammenhang zwischen WTT-Wirkungsgrad, Produktionskosten und Wettbewerbsfähigkeit gegenüber konventionellem Druckwasserstoff. Bei einem WTT-Wirkungsgrad von 90% dürfen die Produktionskosten pro Liter POWERPASTE maximal 0,03 € betragen, damit die Bereitstellungskosten für POWERPASTE gleich oder niedriger als die für Druckwasserstoff sind. Diese Bedingung ist mit aktueller Technologie nur schwer zu erfüllen und erfordert weitere technologische Entwicklungen.

6.1.3. Optimierungspotenziale

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse identifiziert mehrere Stellhebel zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des POWERPASTE-Systems:

1. Senkung der Abfüllkosten: Mit 74% der Gesamtkosten stellt die Abfüllung den größten Kostentreiber dar. Eine Optimierung der Abfüllprozesse, etwa durch höhere Automatisierung oder verbesserte Kartuschentechnologie, könnte signifikante Kostenreduktionen ermöglichen.
2. Erhöhung des WTT-Wirkungsgrads: Eine Verbesserung des Wirkungsgrads durch technologische Weiterentwicklung der Wasserstoffgeneratoren und Brennstoffzellen würde die Systemwirtschaftlichkeit erheblich verbessern.
3. Optimierung der Kartuschennutzung: Die Analyse zeigt, dass eine mehrfache Nutzung der Kartuschen (ohne Ventil) die Gesamtkosten reduzieren könnte. Bei der Kalkulation wurde bereits eine dreifache Nutzung der Kartuschen berücksichtigt. Eine weitere Erhöhung der Nutzungszyklen bietet zusätzliches Potenzial.
4. Skaleneffekte: Bei steigenden Marktanteilen sind Skaleneffekte zu erwarten, die zu einer weiteren Kostensenkung beitragen können. Die Simulation zeigt, dass bei einer Verdopplung des Marktanteils die Stückkosten um etwa 12% sinken könnten.

Diese identifizierten Optimierungspotenziale bieten nicht nur Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung der Technologie, sondern untermauern auch die in AP1 durchgeführte Anwendungsanalyse. Die Anwendungsszenarien Intralogistik, KEP-Dienste und Fahrzeugsharing stellen grundsätzlich geeignete Einstiegsmärkte für POWERPASTE-Energiesysteme dar, wobei insbesondere Nischenanwendungen mit spezifischen Anforderungen als erste Zielmärkte in Betracht kommen.

Im Rahmen des AP9 wurden weitere Projektvorhaben skizziert, die auf den Ergebnissen des aktuellen Projekts aufbauen. Dabei standen insbesondere die Identifikation weiterer Anwendungspotenziale (hier speziell: Notstrom für Krisensituationen) sowie die Systemintegration in Mobilitätsanwendungen (speziell elektrische Rollerplattform) im Vordergrund. Weitere vielversprechende Ansätze für zukünftige Projekte könnten sein:

1. Entwicklung eines automatisierten Kartuschenwechselsystems für Intralogistikanwendungen, um die Technologieakzeptanz in diesem Bereich zu erhöhen und Arbeitsabläufe zu optimieren
2. Optimierung der Abfülltechnologie durch Einsatz neuartiger Verfahren, die höhere Durchsätze bei geringeren Kosten ermöglichen
3. Erforschung alternativer Kartuschenkonzepte mit verbesserter Restentleerung und höherer Wiederverwendbarkeit, um die Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems zu steigern.

6.2. Wissenschaftliche Verwertung

I m Rahmen des Projekts wurden verschiedene Ergebnisse durch wissenschaftlich-technische Publikationen, Poster, Vorträge und Steckbriefe veröffentlicht. Eine Übersicht der bereits erfolgten ist in Tabelle 27 dargestellt. Weiterhin ist ein Beitrag mit dem Titel “Supporting the logistics planning of Powerpaste Supply Chain - a multi-method simulation approach” (Methodik-Kombination für Planung und Modellierung des Powerpaste-Distributionssystems) in Arbeit. Die Veröffentlichung ist für Q4 2025 geplant.

Darüber hinaus wurden im Rahmen des Projekts zahlreiche studentische Abschlussarbeiten betreut, die verschiedene Aspekte der POWERPASTE-Logistik untersuchten und zur Verwertung der Projektergebnisse beitrugen. Diese sind in aufgeführt.

Tabelle 27: Wissenschaftliche Verwertung

Autor, Titel	**Veröffentlichung**	**Inhalt**	**Status**[17]
Brinken J, Schulz T, Assmann T: Hydrogen as a paste – Application scenarios in the transport sector	EUROPEAN TRANSPORT CONFERENCE 2021	Methodik und Ergebnisse zur Auswahl von Anwendungsgebieten (KEP; Sharing, Intralogistik)	Paper veröffentlicht, abrufbar unter: https://t1p.de/vcjev
Brinken J, Könecke B, Kania M, Assmann T: New Generation Hydrogen – How to Package Pastous Hydrogen for Mobility Applications	4th Vehicle and Automotive Engineering Miscolc 2022	Methodik und Ergebnisse zur Auswahl von Kartusche und Bewertung von Behältersystemen (Kartusche vs. Bag in Box)	Paper veröffentlicht, https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_37
Mukku V D: Zero-emission autonomous micro mobility how to provide energy for autonomous bike sharing	Transport Research Arena Lisbon 2022	Vergleich verschiedener Energieträger für Bike Sharing	Poster vorgestellt und mit Fachpublikum diskutiert
Mukku V D, Kania M, Brinken J, Haj Salah I, Assmann T: Evaluation of energy supply technologies for autonomous cargo bike-sharing system	IFAC World Congress 2023	Vergleich verschiedener Energieträger für Bike Sharing, Einführung von Powerpaste als mögl. Energiespeicher	Paper veröffentlicht, https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1890
Assmann T; Mobile Wasserstoffversorgung der nächsten Generation - TP Logistikkonzept für PowerPaste	Wasserstoffatlas Mitteldeutschland 2023, 2024	Projektbeschreibung	Steckbrief veröffentlicht, abrufbar unter: https://t1p.de/lelu8

[17] alle Links zuletzt geprüft am 18.12.2024

Tabelle 28: Studentische Arbeiten

Titel	Art	Nutzen	Abschluss
Logistikplanung für pastösen Wasserstoff in einem Mehrwegbehältersystem	Bachelorarbeit	Konzepte für Behälterumlauf	03/2021
Simulation eines Transportnetzes für PowerPaste	Masterarbeit	Konzept zur Simulation mit Anylogic	07/2021
Vergleich von etablierten und innovativen Wasserstoffspeichern und ihren Behältersystemen	Masterarbeit	Vergleich verschiedener Wasserstoffspeichersysteme	08/2021
Powerpaste Supply Chain Simulation mit GIS	Projektarbeit	Erarbeitung eines Simulationsmodells	09/2021
Vergleich der Ökobilanz von Mehrweg- und Einwegsystemen am Beispiel Powerpaste	Bachelorarbeit	Vergleich Behältersysteme hinsichtlich Ökologie	11/2021
Vergleich unterschiedlicher Wasserstoffspeicher- und Transportkonzepte für eine kostenoptimale Wasserstoffversorgung	Masterarbeit	Kostenvergleich verschiedener Wasserstoffspeicher	08/2022
Service-Stellen zur Abgabe von Powerpaste für die Nutzung als alternativer Treibstoff in Fahrzeugen	Masterarbeit	Konzept für Abgabe über Automaten	09/2022
Konzept einer Reststoff-Supply Chain für Powerpaste	Bachelorarbeit	Marktrecherche/Konzept für Magnesiumhydroxid	04/2023
Planung der Distributionslogistik für Powerpaste	Bachelorarbeit	Validierung der eigenen Planung und Steckbriefe für Prozesse	04/2023
Generierung von Planungsdaten für die Powerpaste-Systemplanung	Projektarbeit	Methoden zur Berechnung des Hochlaufs	05/2023
Planung des Distributionssystems für ein neues Produkt: Wasserstoffpaste	Masterarbeit	Validierung der eigenen Planung und Steckbriefe für Prozesse	05/2023

7. Literaturverzeichnis

Brinken, J., Könecke, B., Kania, M., & Assmann, T. (2023). New generation hydrogen – How to package pastous hydrogen for mobility applications. In K. Jármai & Á. Cservenák (Eds.), *Vehicle and automotive engineering 4 (VAE 2022)* (Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 411–418). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_37

Brinken, J., Schulz, T., & Assmann, T. (2021). Hydrogen as a paste – Application scenarios in the transport sector. *European Transport Conference 2021, ETC Conference Papers 2021*.

Bundesverband CarSharing e.V. (2022). *CarSharing in Deutschland – Jahresbericht 2021/2022*.

European Commission. (2011). *White paper on transport: Roadmap to a single European transport area – Towards a competitive and resource-efficient transport system*.

Grünig, R., & Kühn, R. (2018). Global environmental analysis. In *The strategy planning process* (pp. 233–254). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56221-5_10

BIEK. (2018a). Fahrzeugbestand und Fahrleistungen. In *Kompendium 2018*.

BIEK. (2018b). Transportaufkommen und durchschnittliches Gewicht. In *Kompendium 2018*.

Mester, V. (2022, March 22). Hoher Benzinpreis: Warum Carsharing noch nicht teurer wird. *Hamburger Abendblatt*. https://www.abendblatt.de/wirtschaft/article234878521/mobilitaet-hoher-benzinpreis-warum-carsharing-noch-nicht-teurer-wird.html

Mukku, V. D. (2022). Zero-emission autonomous micro mobility: How to provide energy for autonomous bike sharing [Poster]. *Transport Research Arena Lisbon 2022*.

Mukku, V. D., Kania, M., Brinken, J., Salah, I. H., & Assmann, T. (2023). Evaluation of energy supply technologies for autonomous cargo bike-sharing system. *IFAC-PapersOnLine, 56*(2), 1784–1790.

Porter, M. E. (1985). *The competitive advantage: Creating and sustaining superior performance*. Free Press.

Robinius, M., Linßen, J. F., & Grube, T. (2018). Comparative analysis of infrastructures: Hydrogen fueling and electric charging of vehicles.

Schawel, C., & Billing, F. (2011a). Morphologischer Kasten. In *Top 100 Management Tools* (pp. 206–209). Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-8349-6605-6_57

Schawel, C., & Billing, F. (2011b). SWOT-Analyse. In *Top 100 Management Tools* (pp. 292–295). Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-8349-6605-6_82

Anhang

A Definition Subsystem Produktion

Der nachfolgende Abschnitt beinhaltet eine detaillierte grafische Darstellung der Ergebnisse des vierten Planungsschritt (Funktionaler Entwurf) der Konzeption des Logistischen Systems (vgl. Abschnitt 2.1.4). Ziel des Planungsschritts ist die Beschreibung der Subsysteme Produktion, Transport, Distribution und Rückführung hinsichtlich relevanter Funktionen, Inputs, Outputs, Struktur sowie der Relation zwischen den jeweiligen Subsystemen.

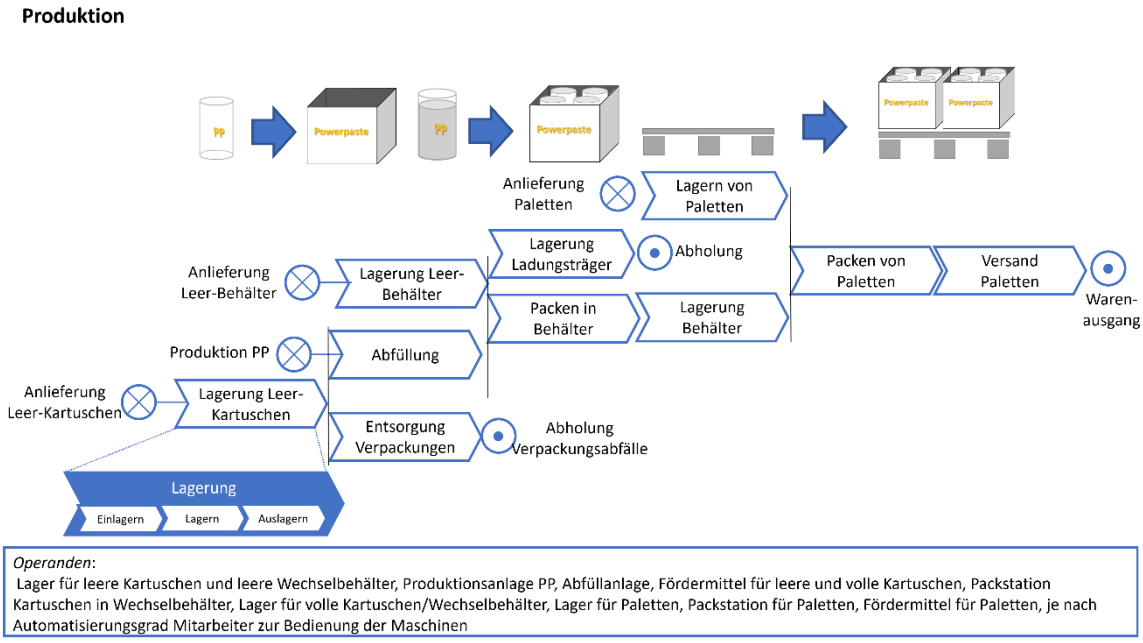


Abbildung A 1: Subsystem Produktion

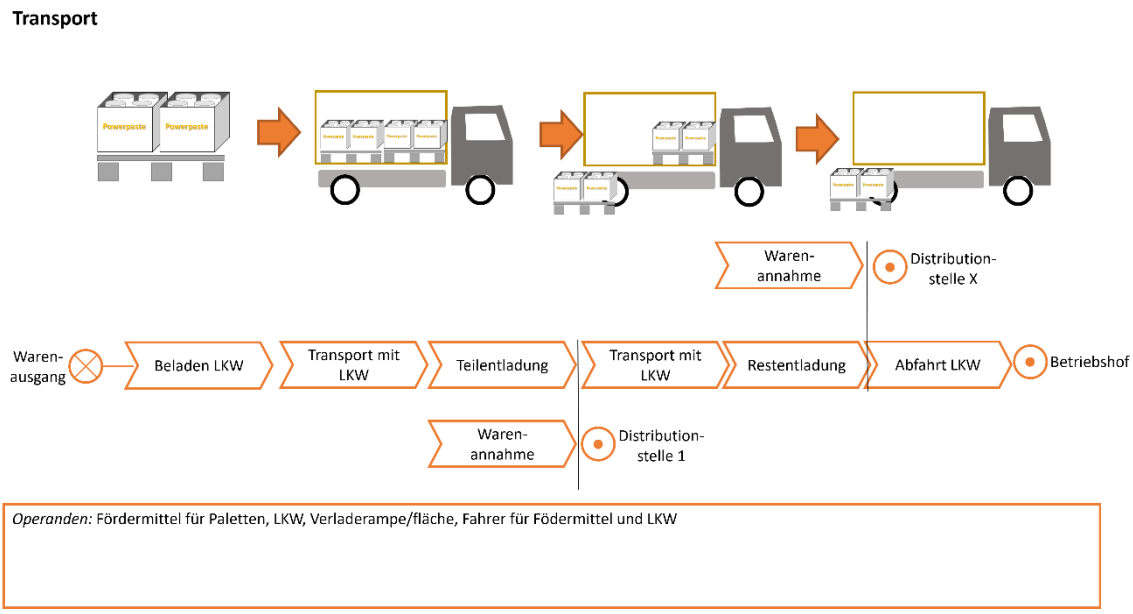
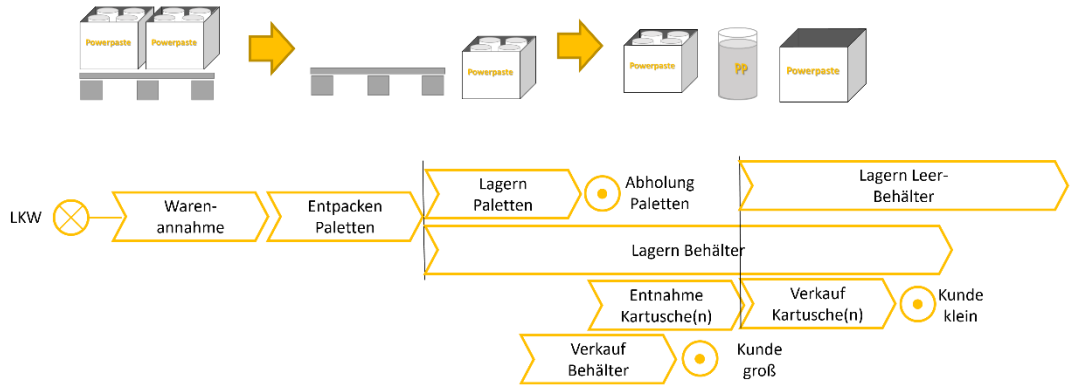


Abbildung A 2: Subsystem Transport

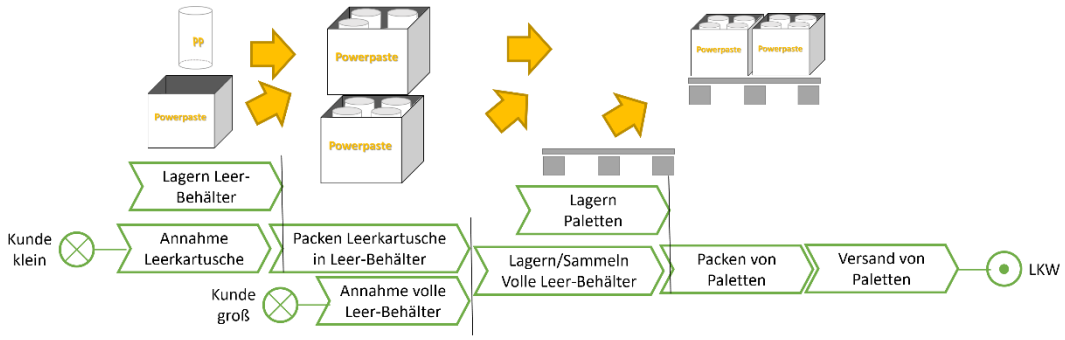
Distribution



Operanden: Fördermittel für Paletten, LKW, Verladerampe/fläche, Fahrer für Fördermittel und LKW

Abbildung A 3: Subsystem Distribution

Re-Logistik



Operanden: Lager Leer-Behälter, Lager Paletten, Fördermittel für Paletten, LKW, Verladerampe/fläche, Fahrer für Fördermittel und LKW

Abbildung A4: Subsystem Rückführung

B Übersicht Fahrzeugparameter

Der nachfolgende Abschnitt beinhaltet eine Übersicht der Fahrzeugspektren der in Abschnitt 2.2.6 definierten Anwendungsszenarien Fahrzeugsharing, KEP und Intralogistik und definiert relevante Fahrzeugparameter für die Versuchsplanung.

Eine Gesamtübersicht der untersuchten Fahrzeuge je Fahrzeugklasse steht bei Bedarf als Excel-Tabelle zur Verfügung.

Tabelle A 1: Übersicht Fahrzeugparameter Fahrzeug-Sharing (Min-Max-Werte)

Fahrzeugklasse	Kleinstwagen				Kleinwagen				Kompaktklasse				Obere Mittelklasse		Mini SUV		Kompakt SUV				Großraum-Van	
Werte	Min		Max		Min		Max		Min		Max		Min/Max		Min/Max		Min		Max		Min/Max	
Verbrauch	14	kWh/100km	5,2	l/100km	15,3	kWh/100km	17,6	kWh/100km	15,4	kWh/100km	9,72	l/100km	0,8	kg/100km	6,2	l/100km	16,9	kWh/100km	18	kWh/100km	6,1	l/100km
Fahrzeugreichweite	320	km	853	km	234	km	307	km	426	km	877	km	650	km	960	km	490	km	533	km	1145	km
Vmax	150	km/h	160	km/h	150	km/h	150	km/h	160	km/h	190	km/h	175	km/h	205	km/h	180	km/h	217	km/h	192	km/h

Tabelle A 2: Übersicht Fahrzeugparameter KEP (Min-Max-Werte)

Fahrzeug-klasse	L2e-U				L6e-BU				Kleintransporter				Leichte Nutzfahrzeuge			
Werte	Min		Max		Min		Max		Min		Max		Min		Max	
Verbrauch					15	kWh/100 km	18	kWh/100 km	28,5	kWh/ 100km	7,3	l/100km	7,1	l/100 km	11,7	l/100km
Fahrzeugreichweite	65	km	80	km	60	km	120	km	158	km	780	km	650	km	1475	km
Vmax	6	Km /h	45	km/h	45	km/h	45	km/h	120	km/h	184	km/h	150	km/h	162	km/h
Zuladung	180	kg	250	kg	350	kg	1000	kg	912	kg	982	kg	1329	kg		
Ladekapazität	1,5	m³	2	m³					5,5	m³	7,7	m³	10,8	m³		
Wendekreis	2	m³	3	m³					12,5	m	14,6	m	13,6	m		

Tabelle A 3: Übersicht Fahrzeugparameter Intralogistik

Fahrzeugklasse	Fahrerloses Transportsystem (FTS)				Gabelstapler				Routenzug			
Werte	Min		Max		Min		Max		Min		Max	
Verbrauch					2,6	kWh/h	11,7	kWh/h	0,75	kWh/h	4,3	kWh/h
Fahrzeugreichweite												
Vmax	1,5	m/s	2	m/s	12,5	km/h	20	km/h	10,5	km/h	25	km/h
Zuladung	600	kg	1000	kg	1000	kg	5000	kg	0	kg	300	kg
Vhub mit Last	0,29	m/s	0,29	m/s	0,29	m/s	0,45	m/s				
Vhub ohne Last	0,29	m/s	0,29	m/s	0,45	m/s	0,63	m/s				
Vsenk mit Last	0,21	m/s	0,21	m/s	0,48	m/s	0,58	m/s				
Vsenk ohne Last	0,21	m/s	0,21	m/s	0,41	m/s	0,6	m/s				
Umschlagsleistung					60	t/h	315	t/h				
Wenderadius	478	mm	618,5	mm	1283	mm	2680	mm	1126	mm	3539	mm
Maximale Zugkraft					4500	N	22590	N	2000	N	21500	N
Anhängelast									3000	kg	35000	kg