

# Einfluss eines elektrifizierten Schwerlastfuhrparks auf die Standortbestimmung von Verteilerzentren und deren Filialzuordnung

Dr.-Ing. Alexander Goudz, M. Sc. Markus Schädle

**Abstract** – Das Ziel dieser Arbeit besteht darin den Einfluss des Einsatzes eines elektrifizierten Schwerlastfuhrparks auf die Standortbestimmung von Verteilerzentren und deren Filialzuordnung zu bewerten - zum einen im Bezug zu der räumlichen Ausprägung und zum anderen im Hinblick auf die Transport- und Lagerkosten. Die Thematik ist im Kontext des bereits beginnenden Wandels in der Fahrzeugbranche hinsichtlich der Einkehr der elektrischen Antriebstechnologie vor allem für Unternehmen mit einem großen Distributionssystem von Relevanz. Durch die fortschreitende Entwicklung der Speichertechnologie, wie beispielsweise durch die Erhöhung der Kapazität oder einer Verringerung der Ladezeiten, bieten sich vermehrt elektrisch basierte Lastkraftwagen zur Versorgung der Kunden mit Waren an. Die Untersuchung zeigt dennoch auf, dass die technischen Eigenschaften, allen voran die Reichweite der E-Lastkraftwagen, im Jahr 2018 noch einen negativen Einfluss bezüglich der logistischen Umsetzung und der Kosten ausüben. Die prognostizierte technische Entwicklung der Speichertechnologie und der Senkung der Produktionskosten der Akkumulatoren bis zum Jahr 2030, lässt das elektrische Antriebskonzept jedoch zu einer alltagstauglichen Alternative zum konventionellen dieselbetriebenen LKW heranwachsen. Die Untersuchung wird mit Hilfe des mathematischen Optimierungsmodells **Single-Source-Capacitated-Multi-Facility-Location-Problem (SSCMFLP)** anhand eines Fallbeispiels, situiert im Lebensmittel Einzelhandel, durchgeführt.

## I. EINFÜHRUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Der motorisierte Individualverkehr befindet sich in einem großen Umbruch. Durch Vorgaben der Europäischen Union Grenzwerte hinsichtlich des Ausstoßes von klima- und gesundheitsschädlichen Abgasen einzuhalten, sind Fahrzeughersteller dazu aufgefordert, die durchschnittliche Abgasemission ihrer produzierten Fahrzeuge zu reduzieren.<sup>1</sup> Manche Städte gehen noch einen Schritt weiter. Hamburg führte im Mai 2018 als erste deutsche Stadt Fahrverbote für Autos und LKWs in bestimmten Straßen ein, welche die Abgasnorm *Euro 6* nicht erfüllen.<sup>2</sup> Diese Vorgaben und Verbote verursachen für etablierte Fahrzeughersteller hohe Kosten zur Abgasminimierung ihrer konventionellen Verbrennungsmotoren. Die strikten Regelungen bieten im Gegenzug die Chance die Weiterentwicklung von alternativen emissionsarmen beziehungsweise lokal emissionslosen Antriebskonzepten voranzutreiben. Neben Hybriden und Brennstoffzellenfahrzeuge stehen

vor Allem rein elektrisch betriebene Fahrzeuge im Fokus. Die benötigte elektrische Energie wird vorzugsweise durch eine Lithium-Ionen-Batterie gespeichert und zur Verfügung gestellt<sup>3</sup>. In der Speichertechnologie besteht zugleich die größte Herausforderung dieses Antriebskonzeptes. Hohe Produktionskosten, eine geringe Speicherkapazität bei kalten Temperaturen und eine lange Ladezeit sind gängige Gegenargumente für dessen Einsatz<sup>4</sup>. Jedoch zeichnet sich eine, durch Forschung und Entwicklung, kontinuierlich positive Verbesserung dieser Problemfelder ab<sup>5</sup>.

Begünstigt durch die Erfahrungen und Entwicklungen von Akkumulatoren im PKW-Segment, präsentieren nun auch etablierte und neue Nutzfahrzeughersteller elektrisch betriebene Lastkraftwagen im Schwerlastsegment<sup>6</sup>. Durch die Vorstellung neuer Modelle mit einer alltagstauglichen Reichweite, wird dessen Einsatz für Unternehmen mit einem regionalen Distributionsnetz interessant<sup>7</sup>.

Die Reichweite der Fahrzeuge ist jedoch nur einer von vielen Faktoren, die über einen realistischen Einsatz dieser Fahrzeuge entscheiden. Unternehmen mit hohem distributiven Logistikaufwand sind dazu bedacht, ihre Ausgaben für den Transport und die Lagerung von Waren zu den Kunden unter spezifischen Umständen möglichst gering zu halten<sup>8</sup>. Wird nun der konventionelle Fuhrpark elektrifiziert, entstehen transportseitig differenzierte Kosten<sup>9</sup>. Durch diese Änderung des Verhältnisses aus Lager- und Transportkosten ist es möglich, dass sich ein optimales Distributionsnetz aus Warenverteilerzentren und Kunden aus räumlicher und monetärer Sicht grundlegend verändern könnte, auch weil technischen Eigenschaften wie die Reichweite oder die Ladedauer möglicherweise limitierende Faktoren darstellen können. Unternehmen sollten sich diesem Einfluss nicht entziehen und sich frühzeitig mit dem Wandel beschäftigen.

Aus dieser Problemstellung ergibt sich folgende Fragen: In welcher Weise beeinflusst die Elektrifizierung eines Schwerlastfuhrparks die Standortbestimmung von Verteilerzentren und deren Filialzuordnung unter der Berücksichtigung der Transport- und Lagerkosten?

Aufgrund der schnellen Entwicklung im Bereich der elektrischen Speichertechnologie bezieht sich die Frage neben einem Szenario 2018 auch für das Jahr 2030. Damit soll die zweite Frage beantwortet werden: Inwiefern ändert dieser Einfluss des

<sup>1</sup> Europäische Kommission (2017): [14]

<sup>2</sup> Behörde für Umwelt und Energie Hamburg (2018) [7]

<sup>3</sup> Füßel (2017): 40 [16]

<sup>4</sup> Füßel (2017): 1f. [16]

<sup>5</sup> Thielmann et al. (2017): 5f. [36] und Breass, Seifert (2013): 83 [10]

<sup>6</sup> Hoffmann (2018): 12f. [20]

<sup>7</sup> Zimmermann et al. (2016): 90 [43]

<sup>8</sup> Vahrenkamp, Kotzab (2012): 103ff. [39]

<sup>9</sup> Raiber et al. (2014): 31-41 [39]

elektrischen Antriebskonzepts in Abhängig der zeitlichen Entwicklung von 2018 bis 2030?

## II. VORGEHENSWEISE UND METHODIK

Für die Beantwortung der Fragestellungen ist die Behandlung zweier grundlegenden Themengebiete notwendig.

Die Recherche über die betriebliche Standortplanung dient der Findung eines geeigneten normativen Modells, zur Untersuchung der Frage auf rechnerischem Wege. Des Weiteren trägt eine Behandlung der bisherigen und der zu erwartenden Entwicklung bis 2030 in der Thematik der Elektromobilität bei, den Einfluss eines elektrischen Antriebskonzepts von Lastkraftwagen auf die Standortplanung zu bewerten.

Aufbauend auf diesen Grundlagen werden die gewonnenen Erkenntnisse auf ein praktisches Fallbeispiel, situiert im Lebensmitteleinzelhandel, überführt. Um eine Vergleichsgrundlage zu besitzen, wird zu den beiden Szenarien jeweils eines mit konventionellem Antrieb zur Seite gestellt. Um diese Gegenüberstellung durchführen zu können, ist die Wahl eines geeigneten Standortmodells und eine Bestimmung und Definition der notwendigen Eingangsdaten erforderlich. Diese Parameter, wie beispielsweise die Koordinaten der Kunden und die Bestimmung von potentiellen Lagerstandorten, werden mit computertechnischer Unterstützung in ein richtiges Format gebracht. Die eigentliche Standortplanung- und Zuordnung sowie die Ermittlung der Gesamtkosten wird, für jedes Szenario, mit einem *MIT-Solver* von *Gurobi Optimization*, einem Computerprogramm zur Lösung von numerischen Optimierungsproblemen, durchgeführt.

Als Ergebnis resultiert daraus eine räumliche Verortung der Lager und deren Kundenzuordnung, sowie der anfallenden Lager- und Transportkosten. In einer anschließenden Analyse werden die Ergebnisse aufbereitet und bilden die Basis für die Beantwortung der Zielfrage.

## III. BETRIEBLICHE STANDORTPLANUNG

Die übergeordnete Aufgabe der Logistik ist die Lagerung und der Transport von Gütern, dabei ist sie zuständig für eine optimale Verwaltung und Planung des Material- und Informationsflusses.<sup>10</sup> Ein Teil des Bindeglieds Logistik ist die betriebliche Standortplanung. Sie beschäftigt sich mit Fragen, die sich um die Lokalisation von Betriebsstätten, Lager jeglicher Art, Umladestationen für Waren oder Verkaufsstätten. Ebenso gehört die Verortung von öffentlichen Einrichtungen wie Behörden oder Krankenhäuser unter diesen Punkt.<sup>11</sup>

Die allgemeine Standortplanung gliedert sich in drei Kategorien. Neben der hier behandelten betrieblichen Betrachtung findet eine Unterscheidung in eine volkswirtschaftliche und innerbetriebliche Standortplanung statt. Volkswirtschaftlich bedeutet dahingehend die Untersuchung und Begründung der Ansiedlung von Unternehmen oder Betriebe eines Wirtschaftssektors in einem Wirtschaftsgebiet und deren Standortbedingungen. Innerbetrieblich gesehen spielt die Standortplanung oder auch

Layoutplanung bei der Anordnung von verschiedenen Bereichen innerhalb der Grundstücksgrenzen eine Rolle. Dabei wird das Ziel verfolgt Abteilungen wie beispielsweise Werkstätten, Lager oder auch Büros in einem optimalen Layout anzuordnen. Diese drei Kategorien befinden sich in einer Wechselwirkung und sollten deshalb in einem realen Fall beachtet werden<sup>12</sup>.

### A. Deskriptive und Normative Betriebliche Standortplanung

Die Wahl eines Standortes stellt in den meisten Fällen eine langfristige und kostenintensive Maßnahme für Unternehmen dar<sup>13</sup>. Vor allem für Firmen, welche ein großes Filialnetz mit dazugehörigen Lagern unterhalten oder neu planen, wie beispielsweise Lebensmitteldiscounter, sollten eine in die Zukunft gerichtete Standortplanung beinhalten. Dabei sind betriebsinterne -und externe Erfordernisse gleichermaßen zu berücksichtigen. Ungünstig geplante Standorte sind nur mit hohen finanziellen Mitteln zu verbessern. Hierbei unterscheidet sich bei der Findung des optimalen beziehungsweise der optimalen Standorte in eine deskriptive und eine normative Herangehensweise. Bei der beschreibenden Standortplanung wird das Ziel verfolgt, die Anforderungen eines zu planenden Objektes mit den Bedingungen potentieller Standorte abzugleichen und diese in einen Vergleich zu setzen. Standortanforderung sind Voraussetzung für eine ordentliche Durchführung eines Leistungsprozesses, während Standortbedingungen für deren Umsetzung notwendig sind<sup>14</sup>.

Der Ansatz normativer Methoden ist die Entwicklung und Anwendung von nachprüfbar mathematischen Entscheidungsmodellen und Lösungsverfahren zur Planung von Standorten. Ein Modell spiegelt dabei ein vereinfachtes Bild der Realität wieder<sup>15</sup>. Dabei lassen sich Modelle anhand der Fragestellung und der räumlichen Betrachtungsweise in unterschiedliche Probleme unterscheiden.

Drei wichtige Modelle sind unter Anderem Median-Probleme, Center-Probleme und Überdeckungsprobleme. Median-Probleme sind darauf spezialisiert die Effizienz eines Distributionsystems zu erhöhen und dadurch Kosten jeglicher Art zu sparen, das heißt Standorte von Versorgungseinrichtung gesamt-kostenminimal (Minisum) zu positionieren bei einer totalen Bedarfsbefriedigung der Nachfrager.<sup>16</sup>

Einen anderen Gedanken wird verfolgt, wenn es darum geht, einen oder mehrere Standorte so zu positionieren, um die Maximaldistanz zwischen Versorgungseinrichtung und Nachfrager möglichst minimal zu halten – ein sogenanntes Center-Problem oder auch Minimax-Problem genannt.<sup>17</sup>

Überdeckungs- beziehungsweise Covering-Probleme versuchen entweder mit möglichst wenigen Versorgungseinrichtungen alle Nachfrager in einer maximal definierten Zeit oder Distanz zu versorgen (Set-Covering-Problem) oder mit einer festgelegte Anzahl an Versorgungseinrichtungen und einer maximal definierten Zeit oder Distanz die Nachfrage möglichst vieler Nachfrager zu decken (Maximal-Covering-Problem).<sup>18</sup>

Diese Modellarten lassen sich wiederum nach dem räumlichen Basismodell kategorisieren. Eine in der Ebene angewendete

<sup>10</sup> Koether (2011): 21 [23]

<sup>11</sup> Arnold et al. (2008): 95 [4] und Domschke, Drexel (1996): 10 [13]

<sup>12</sup> Domschke, Drexel (1996): 1-4 [13]

<sup>13</sup> Arnold et al. (2008): 95 [4]

<sup>14</sup> Rüschenpöhler (1958): 64-67 [32]

<sup>15</sup> Werners (2008): 3 [43]

<sup>16</sup> Gadegaard (2016): 1 [17]

<sup>17</sup> Arnold et al. (2008): 101 [4]

<sup>18</sup> Mattfeld, Vahrenkamp (2014): 103f, 147 – 153. [28]

Standortbestimmung basiert auf einer homogenen (kontinuierlichen) Fläche, worauf eine bestimmte Anzahl von Kunden oder Lieferanten verteilt sind. Jeder Punkt dieser Ebene kann als potentieller Standort in Frage kommen. Ziel ist die Transportkostenminimierung unter der Annahme von proportionalen Transportkosten im Verhältnis zur zurückgelegten Strecke. Die Distanz zwischen zwei Punkten wird mit Hilfe von Metriken gemessen. Eine rechtwinklige Entfernungsmessung ( $L_1$ -Metrik) findet zumeist bei innerbetrieblichen Planungen Anwendung, wohingegen die euklidische Metrik ( $L_2$ -Metrik) bei außerbetrieblichen Standortfragen genutzt wird.<sup>19</sup>

Semidiskrete Modelle oder auch Netzwerkmodelle basieren hingegen auf einem Netzgraph auf Basis eines ungerichteten und zusammenhängenden Graph  $G = [V, E, c, b]$  mit nicht negativen Kanten- und Knotenbewertungen. Dabei finden Transportbewegungen auf den Kanten  $E$  (Verbindung zwischen zwei Knoten  $i, j \in V$ ) statt, während die Knoten  $V$  als Bedarfsknoten fungieren. Potentielle Standorte für Versorgungseinrichtungen können auf den Knoten  $V$  und auf Nachfragepunkte auf den Kanten  $E$  positioniert werden, während Nachfrageknoten nur auf den Knoten  $V$  liegen können.<sup>20</sup>

Diskrete Modelle gehen von einer definierten Menge der für die Versorgungseinrichtungen in Frage kommenden Standorte aus<sup>21</sup>. Durch die limitierte Anzahl ist es möglich neben den Transportkosten auch Standortkosten für die Einrichtungen miteinzubeziehen<sup>22</sup>. Liegt der Fall vor, in Netzwerkmodellen Standorte für Einrichtungen exklusiv auf Knoten zu beschränken, handelt es sich ebenfalls um ein diskretes Modell<sup>23</sup>. Distanzen oder Kosten zwischen den Nachfragern müssen dabei nicht linear sein<sup>24</sup>. In Tabelle 1 sind bekannte Standortmodelle aufgelistet.

Tabelle 1: Normative Standortmodelle<sup>25</sup>

		Räumliche Betrachtungsweise		
		Modell	Kontinuierlich	Semidiskret
Zielsetzung / Fragestellung	Median	<ul style="list-style-type: none"> <li>Weber-Problem,</li> <li>Multi-Weber-Problem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Absolutes 1-Median-Problem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Warehouse-Location-Problem</li> <li>1-Median-Problem</li> <li>p-Median-Problem</li> </ul>
	Center	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planar Center-Problem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Absolutes 1-Center-Problem</li> <li>Absolutes p-center-Problem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Knoten-1-Zentrum-Problem</li> <li>Knoten-p-Zentrum-Problem</li> </ul>
	Covering	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planar Maximum-Covering-Problem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maximum-Covering-Problem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Set-Covering-Problem</li> <li>Maximum-Covering-Problem</li> </ul>

Für die Beantwortung der Zielfrage eignet sich ein diskretes Modell mit einer medianen Zielsetzung. Dies begründet sich daraus, dass im späteren Fallbeispiel das Ziel besteht, die Logistikkosten zu minimieren, bei einer optimalen Standortbestimmung und Kundenzuordnung. Die für die Untersuchung notwendigen Kostenangaben für jede Relation Verteilerzentrum – Kunde ist in einer Liste exklusiv definiert und daher diskret. Innerhalb dieses Blocks in Tabelle 1 sind drei Probleme

abgebildet. 1-Median beziehungsweise p-Median-Probleme fokussieren sich auf die Zuordnung und Auswahl der Standorte unter der Prämisse der Distanzminimierung aller Verbindungen. Außerdem legen sie im Vorhinein fest wie viele Standorte zur Versorgung der Kunden geöffnet werden sollen ( $p =$  Anzahl der geöffneten Standorte). Das dritte Modell wird als Warehouse-Location-Problem (WLP) oder auch Facility-Location-Problem (FLP) bezeichnet. Dieses dient als Basis für das im Folgenden beschriebene Modell, welches im späteren praktischen Anwendungsfall verwendet wird.<sup>26</sup>

### B. Single-Source-Capacitated-Multi-Facility-Location-Problem (SSCMFLP)

Da der Einfluss eines elektrifizierten Schwerlastfuhrparks hinsichtlich der Gesamtkosten der Logistikaufwendungen untersucht wird, sind neben Transportkosten auch die Betriebskosten der zu planenden Verteilerzentren zu beachten. Mithilfe eines Warehouse-Location-Modells lässt sich die Summe aus Transportkosten und Betriebskosten der zur Versorgung der Nachfrager notwendigen Einrichtungen minimieren. WLPs unterscheiden darin, ob die Einrichtungen kapazitiert beziehungsweise unkapazitiert, einstufig oder mehrstufig sind. Erstere Eigenschaft bezieht sich auf die Beschränkung der Kapazität potentieller Lagerstandorte. Die zweite Ausprägung hingegen bezieht sich auf die Transportstufen, die zwischen dem Nachfrager und der Versorgungseinrichtung liegen. Bei einer einstufigen Distributionskette besteht eine direkte Verbindung zwischen Nachfrager und Versorgungseinrichtung. Bei mehrstufigen Systemen sind eine oder mehrere Transportstufen vor- oder zwischengelagert.<sup>27</sup>

Bei SSCMFLPs, einer Unterart des WLPs, besitzt jeder Nachfrager eine bestimmte Nachfrage, welche von genau einer geöffneten Versorgungseinrichtung beliefert werden muss. Die Standorte der Nachfrager sind bekannt. Die Versorgungseinrichtungen können nur an zuvor festgelegten Standorten situiert werden. Jeder Standort verursacht Kosten für die Eröffnung und den Betrieb, wobei die Kapazitäten der Lager gedeckelt sind. Die Kosten für den Transport zwischen den Filialen und den potentiellen Standorten sind als Daten gegeben. Bei diesem diskreten Modell sind hier die jeweiligen Distanzen und die Nachfragemengen in diese Kosten eingebettet.<sup>28</sup> Das SSCMFLP wird folgendermaßen als binäres mathematische Optimierungsmodell formuliert.<sup>29</sup>

Parameter:

$$I \quad \text{Menge aller möglichen Standorte der Lager}$$

$$(I = \{1, \dots, m\})$$

<sup>19</sup> Arnold et al. (2008): 97 – 105 [4]

<sup>20</sup> Annen (2003): 28 [3]

<sup>21</sup> Gadegaard (2016): 2 [17]

<sup>22</sup> Thonemann (2010): 112 [38]

<sup>23</sup> Mattfeld, Vahrenkamp (2014): 101 [28]

<sup>24</sup> Annen (2003): 30 [3]

<sup>25</sup> Eigene Darstellung nach Bogdanow, Kotzab (2018): 34 [11] auf Basis von Gadegaard (2016) : 6 [17]

<sup>26</sup> Arnold et al. (2008): 97 – 105 [4]

<sup>27</sup> Arnold et al. (2008): 97ff. [4]

<sup>28</sup> Ulukan, Demircioglu (2015): 3 [39]

<sup>29</sup> Ulukan, Demircioglu (2015): 3 [39]

$J$	Menge der zu versorgenden Filialen ( $J = \{1, \dots, n\}$ )
$c_{ij}$	Transportkosten zwischen Standort $i = 1, \dots, m$ zu Filiale $j = 1, \dots, n$ pro Periode
$a_i$	Kapazität des Lagers $i = 1, \dots, m$
$b_j$	Nachfrage der Filiale $j = 1, \dots, n$
$f_i$	fixe Kosten der Lagerhaltung des Lagers $i = 1, \dots, m$ pro Periode, wenn dieses geöffnet ist.

Entscheidungsvariablen:

$x_{ij}$	Binärvariable, welche angibt ob der Nachfrager $j$ dem potentiellen Standort $i$ zugeordnet wird ( $x_{ij} = 1$ ) oder nicht ( $x_{ij} = 0$ )
$y_i$	Binärvariable, welche angibt ob der Standort $i$ als Lager dient ( $y_i = 1$ ) oder nicht ( $y_i = 0$ ).

Daraus ergibt sich folgende Zielfunktion<sup>30</sup>:

$$\text{Minimiere } z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^m f_i y_i \quad (1)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad \text{für } j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n b_j x_{ij} \leq a_i y_i \quad \text{für } i = 1, \dots, m \quad (3)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \text{für } i = 1, \dots, m \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \text{für } j = 1, \dots, n \quad \text{und } i = 1, \dots, m. \quad (5)$$

Die Zielfunktion minimiert die Summe aus Transport- und Lagerhaltungskosten (1). Die Nebenbedingung 2 garantiert, dass jede Filiale von genau einem Lager beliefert wird. In der Bedingung 4 wird die Kapazität der Lager bestimmt. Die beiden letzten Nebenbedingungen (4 und 5) bestimmen den Wertebereich der beiden Binärvariablen.<sup>31</sup>

#### IV. ELEKTROMOBILITÄT IM SCHWERLASTVERKEHR

Nach dem die Elektromobilität vermehrt in den PKW-Markt drängt, präsentieren immer mehr Nutzfahrzeughersteller elektrisch betriebene Lastkraftwagen – zuerst für kleinere LKWs für den Stadtverkehr und nun auch im Segment von Sattelzugmaschinen mit 40t zulässigem Gesamtgewicht<sup>32</sup>. Durch das Angebot, gewinnt der elektrisch betriebene LKW an Inte-

resse von Unternehmen mit einem regionalen Distributionsnetz. Für einen realistischen Einsatz darf jedoch der Elektro-LKW aus technischer und wirtschaftlicher Sicht gegenüber dem dieselbetriebenen Pendant keine gravierenden Nachteile aufweisen.<sup>33</sup>

##### A. Lithium-Ionen-Technologie (LIB) als Referenzspeichersystem

Eine große Herausforderung der Elektromobilität besteht in der Speicherung des elektrischen Stromes. Der Lithium-Ionen-Speicherung werden durch Vorteile im Bereich der Energiedichte, Lebensdauer und Schnellladefähigkeit gegenüber anderen Akkumulatoren wie der Nickel-Metallhydrid-Technik die Führungsrolle als zukünftige Speichertechnologie attestiert. Durch Skaleneffekte und Lernkurven aus der Produktion von kleinförmigen Akkumulatoren, lässt sich eine stetige technische Entwicklung des Speichers bis zum Jahr 2030 prognostizieren. Danach werden sich vermutlich andere Batteriezusammensetzungen das LIB als führende Speichertechnik ablösen.<sup>34</sup>

##### B. Aktuelle und weiter Entwicklung der Batterietechnologie bis 2030

Verschiedene Einrichtungen und Institute versuchen Prognosen über die technische und preisliche Entwicklung der Batterie und allgemein über die Elektromobilität aufzustellen. Sie beziehen sich dabei auf Lernkurven von kleinformatigen LIB-Speichern der Unterhaltungsindustrie und gehen von Preissenkungen durch Prozessinnovationen und Massenanfertigung bei der Produktion von großformatigen Batteriesystemen aus.<sup>35</sup>

Die Recherche dieser Arbeit basiert zu einem Großteil aus den genannten wissenschaftlichen Arbeiten: Das Fraunhofer Institut verfasst in regelmäßigen Abständen eine *Roadmap für Energiespeicher bis 2030*. Dort werden verschiedene Speichersysteme untersucht und deren Potenzial und Entwicklung eingeschätzt<sup>36</sup>. Auch der *Verband Deutscher Maschinen- und Anlagbau* gibt eine Abschätzung über den aktuellen und zukünftigen Stand der Entwicklung in diesem Segment in einer *Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030* ab<sup>37</sup>. Zudem bildet das Buch *Technische Potenzialanalyse der Elektromobilität* aus dem Jahr 2017 von Andreas Füßel einen Forschungsausblick, in wieweit sich die Batterie- und Elektromobiltechnik technisch und preislich entwickeln<sup>38</sup>.

In der dargestellten Tabelle sind die Erkenntnisse aus den Arbeiten über wichtige Kennzahlen des LIB-Systems zusammengefasst.

<sup>30</sup> Holmberg et al. (1999): 544 – 559 [21]

<sup>31</sup> Ulukan, Demircioglu (2015): 3 [39]

<sup>32</sup> Hoffmann (2018): 13 [20]

<sup>33</sup> Zimmermann et al. (2016): 82-90 [45]

<sup>34</sup> Füßel (2017): 40 – 49 [16]

<sup>35</sup> Thielmann et al. (2017): 4 -19 [36] und Maiser et al. (2016): 21 [27]

<sup>36</sup> Thielmann et al. (2017): 4f. [36]

<sup>37</sup> Raiber et al. (2016): 3 [30]

<sup>38</sup> Füßel (2017): 1f. [16]

Tabelle 2: Zusammenstellung wichtiger Kennzahlen eines LIB-Moduls für 2018 und 2030<sup>39</sup>

Eigenschaft	2018	2030	Veränderung
Gravimetrische Energiedichte Wh/kg	250	310	+24,0 %
Volumetrische Energiedichte Wh/l	375	670	+78,7 %
Ladedauer Gleichstrom (DC)		Halbierung	-50,0 %
Ladedauer Wechselstrom (AC)		Gleichbleibend	0,0 %
Lebensdauer	8 – 10 Jahre	10 - 15 Jahre	
Temperaturabhängige Reichweitenverluste	bis zu 50%	bis zu 15%	
Kosten pro Speicherkapazität	Min. 150 €/kWh	Min. 75 €/kWh	- 50,0 %

Die Angaben der Energiedichte zeigt die Bauartbedingte Verbesserung eines Speichersystems. Für 2030 werden dahingehend deutlich kompaktere Batteriesysteme bei gleicher Kapazität oder gleichbleibende, mit einer deutlich höheren Speicherkapazität, erwartet<sup>40</sup>. Im Bereich der Ladedauer wird von einer Halbierung mittels Schnellladung durch Gleichstromladestationen ausgegangen<sup>41</sup>. Besonders im Winter, bei kalten Temperaturen, neigen Batterien zu Kapazitätsverlusten, welche die Reichweite deutlich verringern. Durch eine Verbesserung des Wärmemanagements des LIB-Systems, wird dahingehend eine Verminderung des Verlustes von 50 auf 15% erwartet.<sup>42</sup> Durch die schon erwähnten Skaleneffekte und Prozessinnovationen, besteht der allgemeine Konsens, dass der Preis pro gespeicherte Kilowattstunde bis auf 75€ sinkt (auf Modulebene wird mit dem Preisfaktor 1,5 gerechnet)<sup>43</sup>.

### C. Machbarkeit und Fahrzeugangebot

Die sinnvolle Einsatzfähigkeit von E-LKWs hängt sowohl von der Verfügbarkeit als auch von den technischen Eigenschaften der Fahrzeuge ab. In einer Studie über den *Elektrischen Schwerlastverkehr im urbanen Raum* von Raiber et al. werden drei verschiedene Unternehmen im Verteilerverkehr in Mannheim untersucht. Bei einem Fall wurde eine Einzelfahrt mit 73km einfacher Strecke untersucht. Das Versuchsfahrzeug ist das Modell E18 der Firma EFORCE ONE mit einem zulässigem Gesamtgewicht von 18t und einer theoretischen Reichweite von bis zu 300km. In der Studie wird die Eignung dieses Typs speziell für Einzeltouren als geeignet empfunden, jedoch der Wirtschaftlichkeit die Elektrifizierung als noch nicht konkurrenzfähig erachtet. Gründe dafür liegen bei den hohen Anschaffungskosten des Fahrzeugs. Bezüglich der Einsatzfähigkeit von Sattelzugmaschinen mit einem zulässigem Gesamtgewicht von 40t gibt es zum Zeitpunkt dieser Untersuchung keine adäquaten Fahrzeuge. Jedoch unterscheiden sich diese von der 18t-Variante nur bedingt. Um das Mehrgewicht bewältigen zu können, müssen die eingesetzten Motoren eine höhere Dauerleistung und die Akkumulatoren eine ausreichende Kapazität besitzen, um zumindest den logistischen Anforderungen nachzukommen.<sup>44</sup>

Im Rahmen einer Untersuchung über verschiedene Studien zu diesem Thema der praktischen Einsatzfähigkeit von elektrischen Lastkraftwagen, werden diese von Zimmermann et al. (2016) hinsichtlich der Methodik und deren Ergebnisse untersucht. Dabei lautet das allgemeine Fazit, dass im Stückgutmarkt und bei Shuttleverkehren (Einzeltouren) der Einsatz von E-LKW technisch machbar ist und ein großes Potential besteht. Zimmermann et al. (2016) kritisiert jedoch die Untersuchungsmethoden der Studien. Beispielsweise wird oftmals die Maximalreichweite, welche nur bei optimalen Bedingungen erzielt werden kann, als Berechnungsgrundlage verwendet.<sup>45</sup>

Der Fahrzeugmarkt im Bereich der Sattelzugmaschinen ist noch sehr überschaubar, dennoch drängen neue sowie etablierte Hersteller in den noch jungen Markt. Unternehmen wie *DAF* oder *MAN* stellen nach und nach elektrisch betriebene Sattelzugmaschinen vor. Die Reichweiten reichen nach Angaben der Hersteller von 100 bis 300km.<sup>46</sup>

Als späteres Referenzfahrzeug im untersuchten Fallbeispiel, dient die 2018 vorgestellte Sattelzugmaschine der Firma *E-FORCE ONE*<sup>47</sup>. Die Wahl dieses Modells begründet sich aus der verfügbaren Datengrundlage über Preise und technische Angaben. So lässt sich ein genaues Bild über die Eigenschaften machen. Für das Szenario 2030 werden die Spezifikationen des verfügbaren Modells unter der Berücksichtigung der Erkenntnisse aus Tabelle 2 hochgerechnet. Hierbei ergeben sich, unter Berücksichtigung des Verbrauchs, des Gewichts und des wetterbedingten Reichweitenverlustes (vgl. Tabelle 2) sich im schlechtesten Fall eine Reichweite von etwa 115km, bei einer Ladedauer von 58 Min über eine Gleichstromladesäule<sup>48</sup>. Durch Fortschritte in der Batterieentwicklung und des Batteriewärmemanagements wird für 2030 eine Mindestreichweite von 495km angenommen<sup>49</sup>.

### V. ANWENDUNGSFALL

Die Aufarbeitung der betrieblichen Standortplanung und der Recherche auf dem Gebiet der Elektromobilität von Schwerlastkraftwagen über dessen aktuellen Stand und der Entwicklung bis 2030 werden anhand eines Fallbeispiels in Verbindung gebracht. Mit Hilfe von öffentlich zur Verfügung stehenden Filialadressdaten eines großen Discounters im Lebensmitteleinzelhandel wird der Einfluss des Antriebskonzeptes auf die Standortplanung der Verteilerzentren und deren Filialzuordnung untersucht<sup>50</sup>. Die Wahl des Beispiels beruht auf folgenden Gründen: Lebensmitteldiscounter versorgen ihre Filialen hauptsächlich in Einzeltouren aus dezentral gelegenen Verteilerzentren.<sup>51</sup> D.h. die zu fahrende Distanz je Filiale ist im Vergleich zu zentral geführten Distributionssystemen deutlich kürzer und kommt so dem E-Fahrzeug entgegen. Zudem erweist sich eine Belieferung durch Einzeltouren, bei einer stetigen Nachfrage der Waren, als kontinuierlich. Diese Kontinuität

<sup>39</sup> Zusammengestellt aus Füßel (2017): 51 [16], Thielmann et al. (2017): 4-19 [36] und Breass, Seifert (2013): 83 [10]

<sup>40</sup> Thielmann et al. (2017): 18f. [36]

<sup>41</sup> Füßel (2017): 51 [16]

<sup>42</sup> Breass, Seifert (2013): 83 [10]

<sup>43</sup> Thielmann et al. (2017): 14f. [36]

<sup>44</sup> Raiber et al. (2014): 37-41, 86 [30]

<sup>45</sup> Zimmermann et al. (2016): 82-90 [45]

<sup>46</sup> Hoffmann (2018): 14 [20]

<sup>47</sup> Leutenberger (2018): 1 [25]

<sup>48</sup> Leutenberger (2018): 2 [25]

<sup>49</sup> Bemerkung: Für 2030 wird ein Akkupaket mit einer Kapazität von maximal zweimal 430 kW/h gerechnet, bei gleicher Baugröße. Bei einem Verbrauch von etwa 150 kW/h bei einem mittleren Gewicht von 33t und einem witterungsbedingten Reichweitenverlust von 15%.

<sup>50</sup> Bischof (2018) [8]

<sup>51</sup> ALDI International Services GmbH & Co. oHG (2017): 7 [1], ALDI Einkauf GmbH & Co. oHG (2017): 15 [2], Lidl Dienstleistung GmbH & Co. KG (2017): 8f. [26]

könnte den Vorteil bieten, die Möglichkeiten und die Dauer einer Aufladung an den Filialen und den Verteilerzentren für die Verlängerung der Reichweite des E-LKWs zu verwenden und zu berechnen.

Der besagte Einfluss eines elektrifizierten Antriebskonzeptes auf die Standortplanung wird in einem Vergleich mit einem konventionell betriebenen Fuhrpark bewertet. Deshalb werden mit Hilfe des SSCMFLP für die Jahre 2018 und 2030 zusätzlich zwei Szenarien mit einem dieselbetriebenen Fuhrpark berechnet. Die Szenarien sind folgendermaßen benannt.

- Fuhrpark mit elektrischem Antriebskonzept für 2018 (E2018)
- Fuhrpark mit konventionellem Antriebskonzept für 2018 (D2018)
- Fuhrpark mit elektrischem Antriebskonzept für 2030 (E2030)
- Fuhrpark mit konventionellem Antriebskonzept für 2030 (D2030)

#### A. Aufarbeitung notwendiger Eingangsparameter

Das SSCMFLP erfordert in seiner Grundbasis verschiedene Parameter, deren Werte sich je nach Szenario unterscheiden (vgl. Kapitel III.B). Tabelle 3 stellt diese dar.

Tabelle 3: Eingabedaten<sup>52</sup>

Parameter	Symbol	E2018	D2018	E2030	D2030
Anzahl Perioden				1	
Menge Kunden	$I$			890	
Menge pot. Verteilerzentren	$J$			890	
Nachfrage der Kunden	$b_j$			1 ME	
Kapazität der Verteilerzentren	$a_i$			80 ME	
Minimal zu beliefernde Kundenanzahl pro Verteilerzentrum	$aMin_i$			60 ME	
Transportkostensatz (Grundkosten/h + Fahrwegkosten/km)	$c_{ij}$	45,24€/h + 0,45€/km	35,81€/h + 0,67€/km	44,67€/h + 0,56€/km	41,67€/h + 0,81€/km
Stoppkosten / Filiale	$c_j$	36,19€/h	28,65€/h	35,73€/h	33,32€/h
Fixkosten Verteilerzentrum	$f_i$		18 900€		20 095€
Maximaldistanz Filiale - Verteilerzentrum	$dMax_{ij}$	47,75km	-	281,50km	-

Die Anzahl der Perioden bezieht sich auf eine Einsatzzeit von 12h pro Tag bei 302 Arbeitstagen.<sup>53</sup> Die Kundenanzahl begründet sich aus der Anzahl aller in Bayern und Baden-Württemberg befindlichen Filialen des Lebensmitteldiscounters *ALDI-Süd*<sup>54</sup>. Sie dienen gleichzeitig als potentielle Standorte für Verteilerzentren. Dies begründet sich daraus, dass damit die Verteilung der Nachfrage über das Untersuchungsgebiet abgebildet werden kann. Eine Alternative dazu ist, durch qualitative Kriterien, ausgewählte Standorte zu berücksichtigen (vgl. Kapitel III.A).

Ein grundstücksgenaue Standortsuche, bei dem der Schwerpunkt auf betriebliche Standortfaktoren liegt, könnte in einer weiteren Untersuchung behandelt werden. Die Nachfrage der Filialen wird mit der Mengeneinheit 1ME angegeben<sup>55</sup>. Es wird davon ausgegangen, dass die Kapazität einer Sattelzugmaschine, unabhängig der Antriebsart, für die tägliche Nachfrage ausreicht<sup>56</sup>. Die Kapazität der Verteilerzentren richtet sich nach der Strategie des Unternehmens 60 – 80 Filialen pro Lager zu versorgen<sup>57</sup>. Um die Anforderung pro Verteilerzentrum, mindestens 60 Filialen zu versorgen, wird die Nebenbedingung

$$\sum_{j=1}^n b_j x_{ij} \geq aMin_i y_i \text{ für } i = 1, \dots, m \quad (7)$$

dem in Kapitel III.B formulierten SSCMFLP hinzugefügt. Der Transportkostensatz spiegelt die aufzuwendenden Gesamtkosten zur Belieferung der Filialen in Abhängigkeit der Fahrstanz- und Dauer wieder. Diese beinhalten sowohl alle Kosten, welche bei der Bewegung des Fahrzeugs entstehen (Fahrwegkosten), als auch fixe Kosten, die unabhängig des Einsatzes anfallen<sup>58</sup>. Diese Grundkosten werden in dieser Kalkulation auf die Einsatzstunden heruntergebrochen, um diese je nach Fahrzeit der Strecke exakt zuzuordnen und damit variabel zu machen. Die angesetzten Werte sind an der Fahrzeugselbstkostenrechnung von Eberhardt et al. (2014) im Buch *Rechnungswesen. Spedition und Logistikdienstleistung* angelehnt und spiegeln die Kosten (D2018 und E2018) der Referenzfahrzeuge wieder<sup>59</sup>. Diese dienen als Grundlage für die prognostizierten Kosten der Szenarien D2030 und E2030. Die Stoppkosten ergeben sich aus den anfallenden Grundkosten für die Dauer der Be- und Entladung der Waren am Lager und an der Filiale. Diese sind mit 30 Minuten an der Filiale und 20 Minuten am Verteilerzentrum veranschlagt<sup>60</sup>. Im Anhang werden die Kosten für jedes Szenario genauer aufgeführt. Neben den allgemeinen Daten wie der Verbrauch oder die Nutzungsdauer, sind auch relevante Kosten wie beispielsweise die Wartungskosten oder der Kaufpreis abgebildet. Die Kosten für ein Verteilerzentrum beinhalten die Fix- und Betriebskosten, welche für eine Periode anfallen<sup>61</sup>. Sie sind für jeden potentiellen Standort gleich, damit jeder Standort als gleichwertig angesehen wird. Bei einer qualitativen Auswahl der Standorte für Verteilerzentren sind diese naturgemäß verschieden (vgl. Kapitel III.A).

Die Maximaldistanz zwischen einer Filiale und einem Verteilerzentrum ergibt sich aus der maximalen Reichweite des Elektro-LKWs und der Möglichkeit diese per Nachladen an den Filialen zu erweitern. Zudem besteht eine weitere Lademöglichkeit am Verteilerzentrum selbst. Durch die Prämisse einen LKW immer nur mit vollem Akkumulator dort losfahren zu lassen, ist darauf zu achten, dass ein LKW bei der Rückkehr von einer Warenauslieferung genug Restreichweite verfügt, um innerhalb der Standzeit am Lager wieder voll aufladen zu können. Bei den Szenarien mit dieselbetriebenen Fahrzeugen wird die Betankung vernachlässigt, da dadurch keine Begrenzung der Reichweite angenommen wird.

<sup>52</sup> Eigene Darstellung

<sup>53</sup> PTV Group (2018) [29]

<sup>54</sup> Bischof (2018) [8]

<sup>55</sup> Die gleiche Nachfrage dient der Vereinfachung des Fallbeispiels

<sup>56</sup> PTV Group (2018) [29]

<sup>57</sup> Brandes (2006): 142 [9]

<sup>58</sup> Gudehus (2010): 840 [18]

<sup>59</sup> Eberhardt et al. (2010): 183 [14]

<sup>60</sup> PTV Group (2018) [29]

<sup>61</sup> PTV Group (2018) [29]

## B. Computergestützte Umsetzung

Um die Standortzuordnung und -planung durchführen zu können, wird eine computergestützte Software zur Lösung von Linearen Programmen zur Hilfe genommen. Hierfür eignet sich beispielsweise der *MIT-Solver* von *Gurobi Optimization*. Dieser löst Warehouse-Location-Probleme mithilfe des exakten Lösungsverfahrens Branch & Cut<sup>62</sup>. Zum anderen ist es notwendig das mathematische Optimierungsmodell in eine algebraische Modellierungssprache umzuformen. Hierfür wird eine von der Firma *PTV* zur Verfügung gestellte Java-Anwendung verwendet, welche die Eingangsdaten in einer Listenform im *.txt*-Dateiformat benötigt.

Als ersten Schritt sind die Distanzen und die Fahrzeiten zwischen den Filialen und den potentiellen Standorten auszurechnen. Hierzu werden die jeweiligen Adressen in das Standortplanungsprogramm *PTV Map&Market* eingefügt und mit Hilfe eines Straßenmaterials, auf Fahreigenschaften eines schweren Lastkraftwagens angepasst, eingepflegt. Dadurch entsteht eine Liste mit 792 100 Relationen. Sie bilden die Grundlage für den Transportkostensatz  $c_{ij}$ . Relationen, bei der die Distanz höher als die in Tabelle 3 genannten Werte liegen, werden mit einem Malus belegt, damit diese bei der Optimierung vermieden werden.

Eine weitere Liste gibt die Nachfrage aller 890 Filialen an. Analog dazu stellt eine dritte Liste die Minimal- und Maximalkapazitäten und die Fixkosten der einzelnen potentiellen Lagerstandorte dar.

Das Programm gibt die minimierten Transport- und Lagerkosten sowie die Zuordnung der Filialen zu den geöffneten Lagern aus.

## VI. ERGEBNIS UND INTERPRETATION

### A. D2018 und E2018

Die Berechnung des Szenarios D2018 haben ergeben, dass 12 Standorte für Verteilerzentren geöffnet werden müssen, um die Summe aus Transport- und Lagerkosten zu minimieren (vgl. Tabelle 4). Dabei werden im Durchschnitt etwa 75 Filialen pro Lager bedient. Die räumliche Verteilung der Standorte spiegelt die Verteilung der Filialen wieder. Die zwei Hauptballungsgebiete von Bayern und Baden-Württemberg - München und Stuttgart – werden von jeweils zwei Lagern aus direkter Umgebung bedient. Lagerstandorte in weniger dicht besiedelten Regionen, wie Ost- und Nordbayern, versorgen flächenmäßig ein deutlich größeres Gebiet. Zudem verfügen alle Lagerstandorte über eine sehr gute Verkehrsanbindung. Dies ist durch die Berücksichtigung der Fahrzeit im Berechnungsmodell zu begründen.

Tabelle 4: Berechnungsergebnis Szenarien 2018<sup>63</sup>

Ergebnis	D2018	E2018*
Anzahl geöffneter Standorte	12	13
Ø Anzahl Filialen / Standort	75	69
Ø Auslastung	92,70%	85,60%
Σ Gefahrene Distanz	79762km	81154km
Σ Fahrzeit	1687h	1798h
Ø Distanz / Einzeltour	89,6km	91,2km
Ø Fahrzeit / Einzeltour	1h 54Min	2h 2Min
<b>Kosten</b>		
Differenz Fahrtkosten		-32%
Differenz Grundkosten		35%
Differenz Stoppkosten		132%
Differenz Lagerkosten		8%
Differenz Gesamtkosten		15%

Die Berechnung von Szenario E2018, mit der Bedingung der maximalen Reichweite, ergab kein plausibles Ergebnis. Die Prämisse, bei Fahrtbeginn einen vollgeladenen Akkumulator durch Wiederaufladen innerhalb der Standzeit am Lager, um eine volle Einsatzfähigkeit des Fahrzeugs zu garantieren, steht in Konflikt der Bedienung von mindestens 60 Filialen pro Lager. Würde weiterhin die Anforderung der Maximaldistanz von 47,5km aber keine Beschränkung der Minimalanzahl der zu bedienenden Kunden bestehen, würden sich 31 Verteilerzentren mit durchschnittlich 28 zugeordneten Filialen öffnen. Dadurch reduziert sich einerseits die Gesamtfahrleistung, andererseits steigen Lagerkosten unverhältnismäßig stark an. Deshalb wird dieser Fall als nicht sinnvoll erachtet. Um zu untersuchen, ob eine realistische Lösung vorherrscht, werden die Prämissen der Mindestkapazität und des hundertprozentigen Aufladens des Akkumulators innerhalb der Standzeit am Lager aufgegeben (E2018\*). Stattdessen bleibt der E-LKW solange am Verteilerzentrum stehen bis er wieder aufgeladen ist. Dies entspricht einer Änderung der Standzeit von 20 auf 60 Minuten. Die Maximaldistanz zwischen Kunde und Versorger erweitert sich dadurch auf 87,5km. Als Ergebnis dieser Abwandlung des Szenarios werden 13 Standorte mit einer Auslastung von 85,6% eröffnet, welche im Durchschnitt etwa 69 Filialen bedienen.

Aufgrund der bestehenden Maximaldistanz ist die Eröffnung eines zusätzlichen Standortes notwendig, um alle Filialen bedienen zu können. Dadurch verteilen sich die Lagerstandorte homogener im Raum, um die Distanzbegrenzung auch in weniger dicht besiedelten Regionen einzuhalten.

Im direkten Vergleich der beiden Szenarien (vgl. Tabelle 4) liegen die verschiedenen Kennzahlen auf ähnlichem Niveau. Jedoch sind Unterschiede zu erkennen. Die um 1392km höhere gefahrene Distanz und die um 111h höhere Fahrzeit mittels E-LKWs, zeigt, dass die Lagerstandorte im Szenario E2018 verkehrstechnisch schlechter angebunden sind. Werden nur die Fahrwegkosten betrachtet, fallen diese in Szenario E2018\* um

<sup>62</sup> Gurobi Optimization (2018) [19]

<sup>63</sup> Eigene Darstellung

32% geringer aus. Dies ist auf die allgemein günstigeren kilometerabhängigen Kosten zurückzuführen. Werden hingegen die Grundkosten gegenübergestellt, zeigt sich ein deutlicher Kostenvorteil zugunsten des Diesel-LKWs (-35%), der durch den deutlich günstigeren Anschaffungspreis resultiert (vgl. Anhang I). Dieser Effekt wird darüber hinaus durch die längere Fahrzeit bei E2018\* verstärkt, da er sich direkt auf die Grundkosten auswirkt. Durch die deutlich längeren Standzeiten am Lager, welche zur Aufladung der Akkumulatoren nötig sind, steigen die Stoppkosten sehr stark an. Die Lagerkosten fallen bei E2018 aufgrund der Anzahl um 8% höher aus. Aus Sicht der Gesamtkosten aus Lager- und Transportaufwendungen liegen diese im Szenario E2018\* um 15% höher als im Referenzfall D2018.

Der Einfluss eines elektrischen Fuhrparks auf die Standortbestimmung von Verteilerzentren und deren Filialzuordnung zeigt sich sowohl bei der räumlichen Verteilung, als auch in der Berechnung der Kosten. Es bildet sich ab, dass die Einschränkung der Reichweite und der Ladezeit des Lastkraftwagens einen negativen Einfluss ausübt – nicht nur auf die Zu- und Anordnung der Lager und Filialen durch die Distanzbegrenzung, welche eine Verschlechterung an das Verkehrsnetz bedeutet, sondern auch aufgrund der längeren Standzeiten am Lager. Durch längere Wartezeiten entstehen weitere Kosten und machen es notwendig zusätzlich LKWs einzusetzen, um die reibungslose Belieferung der Filialen gewährleisten zu können. Bei idealen Wetterbedingungen verringert sich der Einfluss der Reichweite, durch die besser funktionierenden Akkumulatoren, deutlich. Jedoch liegt das Untersuchungsgebiet (Bayern und Baden-Württemberg) in einer gemäßigten Klimazone mit einem sehr hohen Anteil an kalten Tagen. Die Anforderung der Untersuchung ist jedoch die ganzjährige Einsatzfähigkeit der elektrisch betriebenen Fahrzeuge.

#### B. D2030 und E2030

Aus Sicht der Machbarkeit des Szenarios E2030 besteht keine Fahrzeugseitige Einschränkung. Aufgrund der erwartenden technischen Verbesserungen bezüglich der Speichertechnologie, beträgt die Maximaldistanz zwischen Filialen und Verteilerzentrum 281,5km. Die längste Relation in der gesamten Untersuchung liegt mit 145,3km (Memmingen – Krün) deutlich darunter. Der erweiterte Radius ergibt sich aus der höheren Speicherkapazität des Akkumulators und dessen doppelt so schnelle Ladefähigkeit im Vergleich zum Fahrzeug aus dem Szenario E2018.

Aus Sicht der räumlichen Anordnung der Verteilerzentren und der Filialanordnung ergeben sich bei beiden Szenarien nur geringfügige Unterschiede – beispielsweise bei der Zuordnung von Filialen, welche von zwei Lagerstandorten ähnlich weit entfernt sind.

Die direkte Gegenüberstellung der Kennzahlen in Tabelle 5 zeigt eine ähnliche Ausprägung der Werte. Durch die gleiche Anzahl der zu öffnenden Standorte, werden bei beiden Fällen jeweils 75 Filialen pro Verteilerzentrum versorgt. Die kilometerabhängigen Kosten des Fahrzeugs mit elektrischem Antrieb liegen mit -30% auch in diesem Vergleich deutlich geringer. Durch eine erwartete Verringerung des Kaufpreises des E-LKWs und des Stromspeichers durch geringere Produktions-

und Herstellungskosten gleichen sich die kilometerunabhängigen Fixkosten der beiden Antriebskonzepte bis auf 7% an (vgl. Anhang II). Die Standzeiten für die Be- und Entladung der Waren an den Filialen und an den Lagern sind bei beiden Szenarien identisch. Im Falle von E2030 reicht die Standzeit aus um den Stromspeicher ausreichen aufzuladen. In Abhängigkeit der identischen Lagerkosten, resultieren im Szenario E2030 um 3% geringere Gesamtkosten.

Tabelle 5: Berechnungsergebnis Szenarien 2030<sup>64</sup>

Ergebnis	D2030	E2030
Anzahl geöffnete Standorte	12	12
Ø Anzahl Filialen / Standort	75	75
Ø Auslastung	92,70%	92,70%
Σ Gefahrene Distanz	79472km	80381km
Σ Fahrzeit	1651h	1650h
Ø Distanz / Einzeltour	89,3km	90,3km
Ø Fahrzeit / Einzeltour	1h 52Min	1h 51Min
<b>Kosten</b>		
Differenz Fahrtkosten		-30%
Differenz Grundkosten		7%
Differenz Stoppkosten		7%
Differenz Lagerkosten		0%
Differenz Gesamtkosten		-3%

Der Einfluss eines elektrischen Lastkraftwagens auf die Standortbestimmung der Verteilerzentren und deren Filialzuordnung fällt im Vergleich zum Jahr 2018 deutlich geringer aus. Die räumliche Verteilung der Lagerstandorte wird durch die zu erwartenden verbesserten technischen Eigenschaften der Elektrofahrzeuge nicht mehr eingeschränkt. Der negative Einfluss der höheren Anschaffungskosten des E-Fahrzeugs verringert sich, während die Vorteile bei den kilometerabhängigen Kosten weiterhin bestehen. Der Einsatz von elektrisch betriebenen Lastkraftwagen im 40t-Segment im Jahre 2030, unter den Bedingungen des Fallbeispiels, wirkt sich somit nicht negativ auf die Standortbestimmung von Verteilerzentren und deren Filialzuordnung aus, sondern leicht positiv. Sie stellt sich unter den gegebenen Annahmen als Voraussetzungen der angenommenen Entwicklung als mindesten ebenbürtige Alternative heraus.

#### VII. FAZIT UND AUSBLICK

Die aus der Recherchearbeit gewonnenen Kenntnisse im Bereich der Elektromobilität und der Zuhilfenahme eines Werkzeugs der betrieblichen Standortplanung, dem Single-Source-Capacitated-Multi-Facility-Location-Problem (SSCMFLP), haben gezeigt, auf welche Weise sich eine Elektrifizierung des Schwerlastfuhrparks auf die Standortbestimmung von Verteilerzentren und deren Filialzuordnung auswirkt. Im Untersuchungszeitraum 2018 fällt der Einfluss dieser Antriebstechnologie im Vergleich zum konventionell angetrieben deutlich negativ aus. Aus räumlicher und damit aus Sicht der Standortbestimmung erweisen

<sup>64</sup> Eigene Darstellung



sich die technischen Eigenschaften des elektrischen Referenzmodells als beschränkender Faktor. Durch die starken Reichweitenverluste bei kalten Temperaturen limitiert sich der Aktionsradius des Fahrzeugs auf ein nicht praktikables Maß. Nicht praktikabel heißt: Für die Befriedigung aller Kunden müssten deutlich mehr Lagerstandorte geöffnet werden als im Vergleichsszenario. Erst durch die Anpassung der Standzeiten am Lager, um den Batteriespeicher vor jeder Abfahrt voll aufzuladen, hat sich der Radius auf ein alltagstaugliches Niveau erweitert. Jedoch schlägt sich diese Veränderung direkt auf die Stoppkosten nieder. In Anbetracht der Gesamtkosten macht der momentan um das 3,6-Fache höhere Kaufpreis der elektrischen Sattelzugmaschine inklusive Batteriemodul einen großen Anteil dieser aus.

Dieses Bild des negativen Einflusses ändert sich im Zuge der fortschreitenden Weiterentwicklung in der Elektromobilität. Durch die allgemein prognostizierten verbesserten Eigenschaften der Speichertechnik und der erwarteten Preissenkung der Akkumulatoren, wirkt sich der Einsatz von Elektro-Lastkraftwagen aus räumlicher und monetärer Sicht nicht mehr negativ aus. Lange Reichweiten, auch bei kalten Bedingungen, und kurze Ladezeiten, schränken die Belieferung der Kunden aus logistischer Sicht nicht ein. Dies erfordert somit keine Änderung in der Standortplanung und deren Filialzuordnung. Aus dem Blickwinkel der Gesamtkosten wirkt sich der Einfluss des elektrischen Antriebs sogar leicht positiv aus. Die geringeren variablen Kilometerkosten amortisieren den weiterhin höheren, aber in der Differenz geringer werdenden Anschaffungspreis des E-Fahrzeugs.

Die Verwendung eines mathematischen Optimierungsmodells in Form des SSCMFLP zur Beantwortung dieser Frage, hat sich als geeignet erwiesen. Alle wichtigen Parameter, wie Kosten oder Adressdaten, konnten in das Modell verarbeitet oder mit Hilfe der diskreten Eingangsdaten eingepflegt werden. Die Wahl des Fallbeispiels mit bereits realen Filialadressen zeigt sich für die Beantwortung der Fragestellungen als ein gutes Untersuchungsbeispiel, ohne den Anspruch zu erheben, die Wirklichkeit komplett abzubilden, auch unter dem Hintergrund, in Zukunft liegende Werte nur näherungsweise abschätzen zu können. Ein Modell ist ein vereinfachtes Abbild der Realität. Jedoch ließe sich dieses durch weitere Informationen, wie beispielsweise das Einfließen von realen Nachfragen der Filialen oder vorgegebenen Lieferzeiten einem echten Fall annähern.

Innerhalb dieses Themenfelds, der betrieblichen Standortplanung unter der Verwendung von elektrisch betriebenen Lastkraftwagen, könnten Fragestellungen zur Emissionseinsparung oder der zusätzlichen Belastung des Stromnetzes interessant sein. Des Weiteren ließe sich diese Untersuchung mit einem gemischten Fuhrpark und einem über die Zeit steigenden Anteil an Elektro-Lastkraftwagen erweitern.

Durch die Beschäftigung der Materie hat sich gezeigt, dass sich der momentan stattfindende Wandel in der Fahrzeugbranche hin zu alternativen Antriebskonzepten auch auf Unternehmen mit einem großen Distributionsnetz auswirkt. Deshalb sollten sich diese früh genug mit dem Thema der Elektromobilität auseinandersetzen um den Umbruch nicht als Nachteil zu erfahren, sondern als Chance zu nutzen.

## LITERATUR

- [1] ALDI International Services GmbH & Co. oHG (2017): Kennzahlen CR-Bericht 2017. (<https://cr.aldisouthgroup.com/sites/default/files/2018-07/Unternehmensgruppe%20ALDI%20S%C3%9CD%20CR-Bericht%202017.pdf>) (zuletzt geprüft am 11.01.2019)
- [2] ALDI Einkauf GmbH & Co. oHG (2017): Nachhaltigkeitsbericht (2017). ([https://www.aldi-nord.de/content/dam/aldi/germany/verantwortung/unser-verst%C3%A4ndnis/Unternehmensgruppe\\_ALDI\\_Nord\\_NHB\\_Nachhaltigkeitsbericht\\_2017\\_DE-2.pdf](https://www.aldi-nord.de/content/dam/aldi/germany/verantwortung/unser-verst%C3%A4ndnis/Unternehmensgruppe_ALDI_Nord_NHB_Nachhaltigkeitsbericht_2017_DE-2.pdf)) (zuletzt geprüft am 11.01.2019)
- [3] Annen O. (2003): Das Partial Set Covering Problem und Erweiterungen: Modellierung und Lösungsverfahren. (<https://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-5497/AnnenDiss.pdf>) (zuletzt geprüft am 09.01.2019)
- [4] Arnold D., Isermann H., Kuhn A., Tempelmeier H., Furmans K. (2008): Handbuch Logistik. 3., neu bearbeitete Aufl.. Berlin. Verlag: Springer
- [5] Bundesministerium für Finanzen (2000): Afa-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter (Afa-Tabelle „AV“). ([https://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Themen/Steuern/Steuerverwaltung/Steuerrecht/Betriebspruefung/Afa\\_Tabellen/afa\\_tabellen.html](https://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Themen/Steuern/Steuerverwaltung/Steuerrecht/Betriebspruefung/Afa_Tabellen/afa_tabellen.html)) (zuletzt geprüft am 11.01.2019)
- [6] Bundesverband Wirtschaft, Verkehr und Logistik e. V. (2018): Übersicht zur steuerlichen Regelung von Verpflegungsmehraufwendungen (insbesondere Kraftfahrerspesen). (<https://www.bwvl.de/fm/2492/Spesenregelungen.pdf>) (zuletzt geprüft am 11.01.2019)
- [7] Behörde für Umwelt und Energie Hamburg (2018): Dieseldurchfahrtsbeschränkungen. <https://www.hamburg.de/durchfahrtsbeschaenkungen/11087142/diesel-durchfahrtsbeschaenkungen/> (zuletzt geprüft am 09.01.2019)
- [8] Bischof T. (2018): POI Downloads für dein Navi. (<https://www.pocketnavigation.de/poidownload/pocketnavigation/de/?device-format-id=6&country=&poi-group-id=17#selection-step3>) (zuletzt geprüft am 11.01.2019)
- [9] Brandes D. (2006): Die Geheimnisse der ALDI-Erfolgs. München. Verlag: Piper Verlag.
- [10] Breass H.-H., Seifert, U. (2013): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden. Verlag: Springer Vieweg.

- [11] Bugdanow M., Kotzab H. (Hrsg.) (2018): Standortplanungsmodelle: Softwarelösungen und deren praktische Bedeutung in Frachtumschlag und Lageri. In: Schriftenreihe des Lehrstuhls für Logistikmanagement der Universität Bremen.
- [12] Domania R. (2018): Schwedische Dampflok. In: Transport. Die Zeitung für den Gü-terverkehr, (19) S. 13-15. Verlag: Huss-Verlag GmbH
- [13] Domschke W., Drexel A. (1996): Logistik: Standorte. 4., überarbeitete Aufl.. München. Verlag: Oldenbourg Verlag GmbH
- [14] Eberhardt M., Egger N., Weckback M. (2014): Rechnungswesen. Spedition und Logistikdienstleistung. Braunschweig. Verlag: Winklers.
- [15] Europäische Kommission (2017): CO2-Emissionen von Neuwagen sollen bis 2030 um fast ein Drittel sinken. ([https://ec.europa.eu/germany/news/20171108-CO2-Neuwagen\\_de](https://ec.europa.eu/germany/news/20171108-CO2-Neuwagen_de)) (zuletzt geprüft am 09.01.2019)
- [16] Füßel, A. (2017): Technische Potenzialanalyse der Elektromobilität. Stand der Technik, Forschungsausblick und Projektion auf das Jahr 2025. 7. Aufl. Wiesbaden. Verlag: Springer Vieweg.
- [17] Gadegaard S. (2016): Discrete Location Problems – Theory, Algorithms, and Extensions to Multiple Objectives. Dissertation. Institut for Økonomi Aarhus Universitet. Aarhus. ([https://pure.au.dk/portal/files/100556924/PhD\\_dissertation\\_Sune\\_Lauth\\_Gadegaard.pdf](https://pure.au.dk/portal/files/100556924/PhD_dissertation_Sune_Lauth_Gadegaard.pdf)) (zuletzt geprüft am 10.01.2019)
- [18] Gudehus T. (2010): Logistik. Grundlagen, Strategien, Anwendung. 4., aktual. Auflage. Heidelberg. Verlag: Springer Verlag.
- [19] Gurobi Optimization (2018): Mixed-Integer Programming (MIP) - A Primer on the Basics. (<http://www.gurobi.com/resources/getting-started/mip-basics>) (zuletzt geprüft am 11.01.2019)
- [20] Hoffmann J. (2018): In den letzten Zügen. In: E-Mobilität. Chancen und Herausforderungen, (1) : 12-14. Stuttgart. Verlag: EuroTransportMedia Verlags- und Veranstaltungs-GmbH.
- [21] Holmberg K., Ronnqvist M., Yuan D. (1999): An exact algorithm for the capacitated facility location problems with single sourcing. In: European Journal of Operational Research, (113): 544 – 559.
- [22] Kannstätter (2018): Fragen zum Dieselpreis und zur Dieselpreisentwicklung. [Timm.kannstaetter@uni-due.de](mailto:Timm.kannstaetter@uni-due.de) (27.09.2018)
- [23] Koether R. (2011): Taschenbuch der Logistik. 4.,aktual. Auflage. München. Verlag: Carl Hanser Verlag
- [24] Konstantin P. (2009): Praxisbuch Energiewirtschaft. Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt. 2. Aufl.. Heidelberg: Springer Verlag.
- [25] Leutenberger R. (2018): Fragen zum EFORCE E44 R747 Maxi S 310kWh. [Re-to.Leutenberger@e-force.ch](mailto:Re-to.Leutenberger@e-force.ch) (07.09.2018)
- [26] Lidl Dienstleistung GmbH & Co. KG (2017): Nachhaltigkeitsbericht Geschäftsjahre 2016-2017. ([https://www.lidl-nachhaltigkeit.de/fileadmin/downloads/Lidl\\_Nachhaltigkeitsbericht\\_2016-2017.pdf](https://www.lidl-nachhaltigkeit.de/fileadmin/downloads/Lidl_Nachhaltigkeitsbericht_2016-2017.pdf)) (zuletzt geprüft am 11.01.2019)
- [27] Maiser E., Dr. Michaelis S., Müller D. (2016): Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030. 21 (<https://batt-prod.vdma.org/documents/7411591/15357859/VDMA+Roadmap+Batterie-Produktionsmittel+2030+Update/b8c52edd-5c65-4d92-8290-09876153f30b>) (zuletzt geprüft am 10.01.2019)
- [28] Mattfeld D., Vahrenkamp, R. (2014): Logistiknetzwerke. Modelle für Standortwahl und Tourenplanung. 2. Aufl. Wiesbaden. Verlag: SpringerVerlag.
- [29] PTV Group (2018): Erfahrungswerte aus verschiedenen Projekten
- [30] Raiber S., Spindler H., Feldwieser H. (2014): Elektrischer Schwerlastverkehr im urbanen Raum. Potenzialanalyse am Fallbeispiel des Wirtschaftsraums Mannheim. (<https://www.muse.iao.fraunhofer.de/content/dam/iao/muse/de/documents/Verbundprojekte/Elektrischer%20Schwerlastverkehr%20Abschlussbericht.pdf>) (zuletzt geprüft am 09.01.2019)
- [31] Rhein M. (2018): Kostenanfrage eines Iveco Stralis für den Regionalverkehr. [Marcus.rhein@heermann-nutzfahrzeuge.de](mailto:Marcus.rhein@heermann-nutzfahrzeuge.de) (16.10.2018)
- [32] Rüschenpöhler H. (1958): Der Standort industrieller Unternehmen als betriebswirtschaftliches Problem. Berlin. Verlag: Duncker & Humboldt.
- [33] Statistisches Bundesamt (2018): Daten zur Energiepreisentwicklung. Lange Reihen von Januar 2000 bis Juli 2018. ([https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Energiepreise/Energiepreisentwicklung-PDF\\_5619001.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Energiepreise/Energiepreisentwicklung-PDF_5619001.pdf?__blob=publicationFile)) (zuletzt geprüft am 09.01.2019)
- [34] Statistisches Bundesamt (2018b): Verbraucherpreisindizes für Deutschland – Lange Reihen seit 1948. ([https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Verbraucherpreise/VerbraucherpreisindexLangeReihen-PDF\\_5611103.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Verbraucherpreise/VerbraucherpreisindexLangeReihen-PDF_5611103.pdf?__blob=publicationFile)) (zuletzt geprüft am 09.01.2019)

- [35] Schwencke T., Bantle C. (2018): BDEW-Strompreisanalyse Mai 2018. Haushalte und Industrie. ([https://www.bdew.de/media/documents/1805018\\_BDEW-Strompreisanalyse-Mai-2018.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/1805018_BDEW-Strompreisanalyse-Mai-2018.pdf)) (zuletzt geprüft am 09.01.2019)
- [36] Thielmann A., Neef C., Hettesheimer T., Döscher H., Wietschel M., Tübke J. (2017): Energiespeicher-Roadmap (Update 2017). (<https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/Energiespeicher-Roadmap-Dezember-2017.pdf>) (zuletzt geprüft am 09.01.2019)
- [37] Toll Collect (2018): Maut-Tarife. ([https://www.tollcollect.de/de/toll\\_collect/bezahlen/maut\\_tarife/maut\\_tarife.html](https://www.tollcollect.de/de/toll_collect/bezahlen/maut_tarife/maut_tarife.html)) (zuletzt geprüft am 11.01.2019)
- [38] Thonemann U. (2010): Operations Management. Konzepte, Methoden und Anwendungen. 2., aktual. Aufl. München. Verlag: Pearson Studium.
- [39] Ulukan Z., Demircioglu E. (2015): A Survey of Discrete Facility Location Problems. In: International Scholarly and Scientific Research & Innovation, Vol. 9 , No. 7.
- [40] Vahrenkamp R., Kotzab H. (2012): Logistik. Management und Strategien. 7. , überarb. und erweít. Aufl., München. Verlag: Oldenburg Verlag.
- [42] Verkehrsrundschau (2016): Löhne von Lkw-Fahrern steigen überdurchschnittlich. (<https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/loehne-von-lkw-fahrern-steigen-ueberdurchschnittlich-1844803.html>) (zuletzt geprüft am 10.01.2019)
- [43] Wittenbrink P. (2014): Transportmanagement. Kostenoptimierung, Green Logistics und Herausforderungen an der Schnittstelle Rampe. 2., vollst. neu bearb. und erw. Aufl. Verlag: Springer Gabler
- [44] Werners B. (2008): Grundlagen des Operations Research. 2. überarb. Aufl. Heidelberg. Verlag: Springer Gabler.
- [45] Zimmermann B., Kalley C., Quanz A. (2016): Elektromobilität im Schwerlastverkehr. Forschungsergebnisse zur Elektrifizierbarkeit von Lastkraftwagen im Stückgutverkehr. In: Internationales Verkehrswesen (68) 3 : 82 – 90. Baidersbonn. Verlag: Trialog Publishers Verlagsgesellschaft

ANHANG

Anhang I: Kostensätze für Diesel- und Elektrolastkraftwagen für 2018<sup>65</sup>

Nr.	Allgemeine Bedingungen	E2018: EFORCE ONE	D2018: Iveco Stralis	
1	Nutzungsdauer	9 Jahre	9 Jahre	
2	Fahrzeugpreis (inkl. Sattelaufleger)	488000 €	135000 €	
3	Davon Preis für Akkumulator	223000 €	0 €	
4	Einsatztage	302 Tage	302 Tage	
5	Einsatzzeit pro Arbeitstag	12 h	12 h	
6	Energiekosten	0,177 €/kWh	1,02 €/l Diesel	
7	AdBlue-Kosten	n.v.	0,45 €/l	
8	Verbrauch /100 km	148,45 kWh	28,1 l Diesel	
9	Verbrauch Adblue /100km	n.v.	2,2 l	
10	Reparatur- und Wartungskosten/km	0,10 €	0,15 €	
	<b>Grundkosten</b>			<b>Differenz</b>
11	<b>Zeitabhängige kalkulatorischen Abschreibung des LKW</b>	29348 €	16275 €	80%
12	Gesch. Wiederbeschaffungspreis des LKW	269527 €	151875 €	77%
13	Davon gesch. Preis für Akkumulator	128313 €	0 €	
14	Gesch. Wiederbeschaffungskosten Bereifung	5396 €	5396 €	0%
15	Gesch. Wiederverkaufserlös	0 €	0 €	
16	<b>Kalkulatorische Zinsen</b>	20640 €	6520 €	217%
17	Kalkulatorischer Zinssatz	8%	8%	0%
18	Durchschnittlich gebundenes Vermögen	258000 €	81500 €	217%
19	Durch. Gebundenes Umlaufvermögen	14000 €	14000 €	0%
20	<b>Kfz-Steuer bei 40t und S1 und G1 (2018) + Sattelaufleger</b>	0 €	929 €	-100%
21	<b>Kfz-Versicherung</b>	4800 €	4800 €	0%
22	<b>Fahrpersonalkosten je 12h</b>	71315 €	71315 €	0%
23	Lohnkosten (Personalfaktor 1,5)	55320 €	55320 €	0%
24	Sozialversicherungsaufwand	24%	24%	0%
25	Spesen	2718 €	2718 €	0%
26	<b>Summe Fixkosten / Jahr</b>	126103 €	99839 €	26%
27	<b>Allgemeine Kosten / Jahr (30% der Fixkosten)</b>	37831 €	29952 €	26%
28	<b>Summe Fixkosten je Einsatztag</b>	543 €	430 €	26%
29	<b>Kosten / Stunde</b>	<b>45,24 €</b>	<b>35,81 €</b>	<b>26%</b>
	<b>Fahrwegkosten</b>			
30	Kraftstoffkosten (mit Adblue)	0,26 €/km	0,30 €/km	-12%
31	Schmierstoffkosten (3% der Kraftstoffkosten)	0,01 €/km	0,01 €/km	-12%
32	Reifenkosten / km	0,08 €/km	0,08 €/km	0%
33	Reparatur- und Wartungskosten	0,10 €/km	0,15 €/km	54%
34	Maut (Kategorie A, Achszahl 5)	0 €/km	0,13 €/km	-100%
35	<b>Summe variable Einsatzkosten / km</b>	<b>0,45 €/km</b>	<b>0,67 €/km</b>	<b>-33%</b>
	<b>Stoppkosten pro Filiale</b>			
36	Stoppkosten	<b>36,19 €</b>	<b>28,65 €</b>	<b>26%</b>
37	(Be- und Entladezeit Lager und Filiale (50Min))			

<sup>65</sup> Eberhardt et al. (2010): 183 [14], Bundesministerium für Finanzen (2000): 9 [5], Leutenberger (2018): 1 [25], Statistisches Bundesamt (2018) [33], Schwencke, Bantle (2018): 25 [35], Domania (2018): 14 [12], Bundesverband Wirtschaft, Verkehrs und Logistik e.V. (2018): 2 [6], Verkehrsgrundschau.de (2016) [42], Toll Collect (2018) [37], Wittenbrink (2014): 85ff.,112 [43] und Rhein (2018) [31]

Anhang II: Kostensätze für Diesel- und Elektrolastkraftwagen für 2030<sup>66</sup>

Nr.	Allgemeine Bedingungen	E2030: EFORCE ONE	D2030: Iveco Stralis	
1	Nutzungsdauer	9 Jahre	9 Jahre	
2	Fahrzeugpreis (inkl. Sattelaufleger)	240500 €	157820 €	
3	Davon Preis für Akkumulator	96750 €	0 €	
4	Einsatztage	302 Tage	302 Tage	
5	Einsatzzeit pro Arbeitstag	12 h	12 h	
6	Energiekosten	0,230 €/kWh	1,38 €/l Diesel	
7	AdBlue-Kosten	n.v.	0,53 €/l	
8	Verbrauch /100 km	148,45 kWh	28,1 l Diesel	
9	Verbrauch Adblue /100km	n.v.	2,2 l	
10	Reparatur- und Wartungskosten /km	0,11 €	0,18 €	
	<b>Grundkosten</b>			<b>Differenz</b>
11	<b>Zeitabhängige kalkulatorischen Abschreibung des LKW</b>	25062 €	19027 €	32%
12	Gesch. Wiederbeschaffungspreis des LKW	270563 €	177547 €	52%
13	Davon Preis für Akkumulator	108844 €	0 €	
14	Gesch. Wiederbeschaffungskosten Bereifung	6309 €	6309 €	0%
15	Gesch. Wiederverkaufserlös	38700 €	0 €	
16	<b>Kalkulatorische Zinsen</b>	10929 €	7622 €	43%
17	Kalkulatorischer Zinssatz	8%	8%	0%
18	Durchschnittlich gebundenes Vermögen	136617 €	95276 €	43%
19	Durch. Gebundenes Umlaufvermögen	16367 €	16367 €	0%
20	<b>Kfz-Steuer bei 40t und S1 und G1 (2018) + Sattelaufleger</b>	0 €	929 €	-100%
21	<b>Kfz-Versicherung</b>	5611 €	5611 €	0%
22	<b>Fahrpersonalkosten je 12h</b>	82910 €	82910 €	0%
23	Lohnkosten (Personalfaktor 1,5)	64671 €	64671 €	0%
24	Sozialversicherungsaufwand	24%	24%	0%
25	Spesen	2718 €	2718 €	0%
26	<b>Summe Fixkosten / Jahr</b>	124512 €	116099 €	7%
27	<b>Allgemeine Kosten / Jahr (30% der Fixkosten)</b>	37354 €	34830 €	7%
28	<b>Summe Fixkosten je Einsatztag</b>	536 €	500 €	7%
29	<b>Kosten / Stunde</b>	<b>44,67 €</b>	<b>41,65 €</b>	<b>7%</b>
	<b>Fahrwegkosten</b>			
30	Kraftstoffkosten (mit Adblue)	0,34 €/km	0,40 €/km	-15%
31	Schmierstoffkosten (3% der Kraftstoffkosten)	0,01 €/km	0,01 €/km	-15%
32	Reifenkosten / km	0,09 €/km	0,09 €/km	0%
33	Reparatur- und Wartungskosten	0,11 €/km	0,18 €/km	-35%
34	Maut (Kategorie A, Achszahl 5)	0 €/km	0,13 €/km	-100%
35	<b>Summe variable Einsatzkosten / km</b>	<b>0,56 €/km</b>	<b>0,81 €/km</b>	<b>-31%</b>
	<b>Stoppkosten pro Filiale</b>			
36	Stoppkosten	<b>35,73 €</b>	<b>33,32 €</b>	<b>7%</b>
37	(Be- und Entladezeit Lager und Filiale (50Min))			

<sup>66</sup> Leutenberger (2018): 1 [25], Kannstätter (2018) [22]. Alle Werte aus Anhang I, welche keiner gesonderten Entwicklung unterliegen, werden mit einer jährlichen Inflationsrate von 1,31%/a hochgerechnet (Konstantin (2009): 151 [24]). Der Wert gibt den Durchschnittswert der letzten 10 Jahre wieder (Statistisches Bundesamt (2018b): 5 [34]).

## **Einfluss eines elektrifizierten Schwerlastfuhrparks auf die Standortbestimmung von Verteilerzentren und deren Filialzuordnung**

Goudz, Alexander; Schädle, Markus

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt.

Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: <https://doi.org/10.17185/duepublico/48075>

URN: <urn:nbn:de:hbz:464-20190206-161742-9>

Link: <https://duepublico.uni-duisburg-essen.de:443/servlets/DocumentServlet?id=48075>

### Lizenz:

Sofern nicht im Inhalt ausdrücklich anders gekennzeichnet, liegen alle Nutzungsrechte bei den Urhebern bzw. Herausgebern. Nutzung - ausgenommen anwendbare Schrankenregelungen des Urheberrechts - nur mit deren Genehmigung.