

SyWaTeC Logistic GmbH  
Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart

## **Praxismethodik zur optimierten Fahrzeugauswahl und ökologischen Routenplanung für die kommunale Abfalllogistik**

**Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 31627/02 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

**von**

**Manuel Hagg  
Steffen Link  
Robert Schulz  
Karl-Heinz Wehking**

**Dieburg/Stuttgart  
Mai 2019**

Bezugsmöglichkeiten des Abschlussberichtes:

**Universität Stuttgart**  
**Institut für Fördertechnik und Logistik**

Abteilung Logistik

Projektleitung: Manuel Hagg, M.Sc.

Holzgartenstraße 15 B

70174 Stuttgart

Tel.: 0711 685-83795

E-Mail: [manuel.hagg@ift.uni-stuttgart.de](mailto:manuel.hagg@ift.uni-stuttgart.de)

SyWaTeC Logistic GmbH  
Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart

## **Praxismethodik zur optimierten Fahrzeugauswahl und ökologischen Routenplanung für die kommunale Abfalllogistik**

**Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 31627/02 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

**von**

**Manuel Hagg  
Steffen Link  
Robert Schulz  
Karl-Heinz Wehking**

**Dieburg/Stuttgart  
Mai 2019**

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>31627/02</b>	Referat	<b>23</b>	Fördersumme	<b>124.509 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Praxismethodik zur optimierten Fahrzeugauswahl und ökologischen Routenplanung für die kommunale Abfalllogistik</b>			
<b>Stichworte</b>		Luft, Verkehr, Abluft, Transport			
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
<b>15 Monate</b>		<b>01.12.2017</b>		<b>28.02.2019</b>	
Projektphase(n)		<b>1</b>			
Zwischenberichte		-			
<b>Bewilligungsempfänger</b>		SyWaTeC Logistic GmbH Albert-Schweitzer-Str. 5 64807 Dieburg		Tel 0711/685-83795 Fax 0711/685-83769	
				Projektleitung Manuel Hagg	
				Bearbeiter Manuel Hagg	
<b>Kooperationspartner</b>		Universität Stuttgart Institut für Fördertechnik und Logistik Holzgartenstr. 15 B 70174 Stuttgart			

### ***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

In Deutschland werden jährlich über 50 Millionen Tonnen Siedlungsabfälle erzeugt. Das Aufkommen der deutschlandweit erzeugten Siedlungsabfälle liegt somit im europäischen Spitzenfeld. Um diese Abfallmengen zu entsorgen, werden in regelmäßigen Abständen kommunale Entsorgungsfahrten zur Verbringung des Abfalls durchgeführt, bei denen Emissionen in großen Mengen freigesetzt werden. Die umwelteffiziente Routenplanung und Fahrzeugauswahl bietet somit ein großes Potential zur Reduzierung der Emissionen. Daher verfolgte das Projekt zwei Ziele: Zum einen die Implementierung einer Praxismethodik zur optimierten Fahrzeugauswahl und ökologischen Routenplanung für die kommunale Abfalllogistik. Zum anderen die Erweiterung der Datenbasis und die Validierung der bisherigen Ergebnisse.

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Um die Methodik in die Praxis zu überführen, wurde diese auf die marktseitigen Anforderungen der Entsorgungsbranche ausgerichtet und angepasst. Die Methodik basiert auf einer ressourcenorientierten Prozessrechnung und die Emissionsberechnung ist an die Norm DIN EN 16258 angelehnt. Während des Projekts wurde an zwei Heckladern die Flottenmanagement-Schnittstelle freigeschaltet, sodass der Kraftstoffbedarf während des Sammlungsprozesses direkt am Fahrzeug ausgelesen und die Daten automatisiert an die Software ATOS übertragen werden konnten. Anschließend erfolgte die Auswertung der Daten und die Erweiterung sowie Validierung der Methodik.

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Im Mittelpunkt des modular aufgebauten ATOS-Emissionscontrollings stehen die Kennzahlen Sammlungseffizienz, Behälter- und Stundenkraftstoffverbrauch. Während der Behälterkraftstoffverbrauch die benötigte Menge an Kraftstoff definiert, die für die Entleerung eines Abfallbehälters erforderlich ist, beschreibt der Stundenkraftstoffverbrauch den Kraftstoffbedarf, der für die einstündige Durchführung eines (Teil-)Prozesses benötigt wird. Im Unterschied zum Behälterkraftstoffverbrauch hat der Stundenkraftstoffbedarf somit auch eine hohe Aussagekraft für Teilprozesse, die unabhängig sind von der Anzahl an Behälterentleerungen. Für die Ermittlung der Sammlungseffizienz wird die Behälterladeleistung, welche die Anzahl der entleerten Behälter pro Stunde widerspiegelt, dividiert durch die freigesetzten Treibhausgasemissionen.

Grundsätzlich lassen sich die Kenngrößen in der Praxis unabhängig voneinander einsetzen, jedoch wird empfohlen, die Kenngrößen in ihrer Gesamtheit in den Entscheidungsprozess miteinfließen zu lassen, um die Fehlinterpretation der Daten zu vermeiden. Die erstellten Kennzahlenberichte ermöglichen das Ableiten vielfältiger Entscheidungen. Zum einen sind sowohl einzelne Fahrzeuge als auch der gesamte Fuhrparkbestand hinsichtlich der Emissionseffizienz bewertbar und vergleichbar. Zum anderen sind mit Hilfe dieser Kenngrößen Anpassungen im Kontext der Personal- und Fahrzeugeinsatzplanung steuerbar und zukünftige fuhrparkrelevante Investitionsentscheidungen unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Faktoren ableitbar.

Wie die Auswertung der Daten gezeigt hat, nimmt sowohl der Behälterkraftstoffverbrauch als auch der Stundenkraftstoffverbrauch mit zunehmendem Behälterabstand während des Sammelprozesses der untersuchten Hecklader zu. Die unterschiedlichen Funktionsverläufe der Hecklader lassen sich einerseits durch die ungleiche Anzahl an durchschnittlichen Behälterentleerungen der Fahrzeuge erklären. Andererseits beeinflusst auch die Fahrzeug- und Revierbeschaffenheit den Behälter- und Stundenkraftstoffverbrauch. Die Sammlungseffizienz der Sammelfahrt nimmt dahingegen mit zunehmendem Behälterabstand für beide Fahrzeuge ab. Eine geringere Behälterladeleistung und ein zunehmender Kraftstoffverbrauch bei steigendem Behälterabstand lassen sich als Gründe nennen. Die Sammelfahrt ist der energieintensivste Teilprozess einer Sammeltour. Somit werden in diesem Teilprozessschritt auch die meisten Treibhausgase freigesetzt. Die erfolgreiche Validierung und Gegenüberstellung von Heck- und Seitenladern erfolgte anhand der Kategorien Geschwindigkeit, Kraftstoffverbrauch und Zeitanteile. Auf Basis der verfügbaren Daten konnten die Geschwindigkeiten für die Hecklader ermittelt werden. Die Unterschiede hinsichtlich der Zeitanteile resultieren aus der prozess- bzw. ablauforganisatorischen Heterogenität der beiden Fahrzeugtypen. Zudem konnten Regressionsgleichungen für den Kraftstoffverbrauch und die Zeit zwischen den Behälterentleerungen ermittelt werden. Es sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich, um die Treibhausgasemissionen über einen längeren Zeitraum und über verschiedene Siedlungsstrukturgebiete hinweg zu untersuchen.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Forschung: Praxismethodik zur optimierten Fahrzeugauswahl und ökologischen Routenplanung für die kommunale Abfalllogistik, IFT-Jahresbericht 2017/2018, S. 26-27.

Emissionsorientierte Kennzahlen für die kommunale Entsorgungslogistik, VKS NEWS, Publikation eingereicht, Veröffentlichung in der Juni 2019 Ausgabe.

## ***Fazit***

Die Projektziele wurden erreicht. Die Methodik zur optimierten Fahrzeugauswahl und ökologischen Routenplanung für die kommunale Abfalllogistik wurde erfolgreich in der Praxis implementiert. Der Untersuchungsrahmen konnte um den Fahrzeugtyp eines Heckladers erweitert werden und die Validierung der Ergebnisse ist mit Hilfe der vorliegenden Datenbasis gelungen.

## Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt.....	4
Tabellenverzeichnis.....	7
Abbildungsverzeichnis.....	8
Formelverzeichnis.....	9
Abkürzungsverzeichnis.....	10
Variablenverzeichnis.....	11
Zusammenfassung.....	12
1. Ausgangssituation und Zielsetzung.....	13
2. Anpassung der entwickelten Methodik.....	16
2.1 Aufstellen der Emissionsfunktionen der Teilprozesse.....	19
2.2 Aufstellen der Kostenfunktionen der Teilprozesse.....	21
3. ATOS-Emissionscontrolling – Implementierung der Methodik in der Praxis.....	22
3.1 Behälterkraftstoffverbrauch.....	27
3.2 Stundenkraftstoffverbrauch.....	27
3.3 Sammlungseffizienz.....	28
4. Erweiterung und Validierung der Methodik.....	29
4.1 Beschaffenheit der Daten und Fahrzeuge.....	29
4.2 Datenauswertung ATOS-Emissionscontrolling.....	32
4.2.1 Behälterkraftstoffverbrauch.....	34
4.2.2 Stundenkraftstoffverbrauch.....	35
4.2.3 Sammlungseffizienz.....	36
4.3 Gegenüberstellung von Heck- und Seitenlader.....	38
5. Fazit.....	41
Literaturverzeichnis.....	43

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Übersicht Softwaretools in der Abfallwirtschaft .....	15
Tabelle 2: Emissionsfaktoren nach DIN EN 16258.....	20
Tabelle 3: Fahrzeugüberblick Hecklader .....	30
Tabelle 4: Überblick Abfallsammeltouren .....	32
Tabelle 5: Verbrauchssätze Seiten- und Hecklader.....	38
Tabelle 6: Regressionsgeraden Seiten- und Hecklader .....	41

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Nomogramm .....	17
Abbildung 2: Prozessübersicht Projekt Az: 31627/01 .....	17
Abbildung 3: Prozessübersicht ATOS .....	17
Abbildung 4: Überblick ATOS-Benchmarkingsystem.....	24
Abbildung 5: ATOS-Emissionscontrolling .....	25
Abbildung 6: Beispielhafte Reportauswertung ATOS-Emissionscontrolling .....	26
Abbildung 7: Barcode Klebeetikett.....	30
Abbildung 8: Simulationsmodell.....	31
Abbildung 9: Prozentuale Kraftstoffverteilung.....	33
Abbildung 10: Behälterkraftstoffverbrauch.....	35
Abbildung 11: Stundenkraftstoffverbrauch.....	36
Abbildung 12: Sammlungseffizienz.....	37



## Formelverzeichnis

Formel 1: Benötigter Gesamtkraftstoff, Sammeltour.....	19
Formel 2: Emissionsfunktion, Reviereinfahrt .....	20
Formel 3: Emissionsfunktion, Sammelfahrt .....	20
Formel 4: Emissionsfunktion, Entleerungsfahrt .....	20
Formel 5: Emissionsfunktion, Revierausfahrt .....	20
Formel 6: Emissionsfunktion, sonstige Prozessschritte .....	20
Formel 7: Gesamtemissionsfunktion, Sammeltour .....	21
Formel 8: Energiekostenfunktion, Reviereinfahrt.....	21
Formel 9: Energiekostenfunktion, Sammelfahrt.....	21
Formel 10: Energiekostenfunktion, Entleerungsfahrt.....	22
Formel 11: Energiekostenfunktion, Revierausfahrt.....	22
Formel 12: Energiekostenfunktion, sonstige Prozessschritte .....	22
Formel 13: Gesamtenergiekostenfunktion, Sammeltour.....	22
Formel 14: Behälterkraftstoffbedarf, Sammelfahrt .....	27
Formel 15: Behälterkraftstoffbedarf, Sammeltour .....	27
Formel 16: Stundenkraftstoffverbrauch, Sammelfahrt .....	28
Formel 17: Stundenkraftstoffverbrauch, Sammeltour .....	28
Formel 18: Sammlungseffizienz, Sammelfahrt .....	28
Formel 19: Sammlungseffizienz, Sammeltour .....	29

## Abkürzungsverzeichnis

ASF	Abfallsammelfahrzeug
ATOS	Analytische-Touren-Optimierungs-Software
Az	Aktenzeichen
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
FMS	Flottenmanagement-Schnittstelle
IFT	Institut für Fördertechnik und Logistik
THG	Treibhausgase
WBO	Wirtschaftsbetriebe Oberhausen

## Variablenverzeichnis

<b>Ressourcenverbräuche</b>	
$KV_E$	Benötigter Kraftstoff, Entleerungsfahrt [l]
$KV_G$	Benötigter Gesamtkraftstoff, Sammeltour [l]
$KV_{RA}$	Benötigter Kraftstoff, Revierausfahrt [l]
$KV_{RE}$	Benötigter Kraftstoff, Reviereinfahrt [l]
$KV_S$	Benötigter Kraftstoff, Sammelfahrt [l]
$KV_{Sonst.}$	Benötigter Kraftstoff, sonstige Prozessschritte [l]
<b>Teilprozesskosten</b>	
$EK_E$	Energiekosten, Entleerungsfahrt [€]
$EK_G$	Gesamtenergiekosten, Sammeltour [€]
$EK_{RA}$	Energiekosten, Revierausfahrt [€]
$EK_{RE}$	Energiekosten, Reviereinfahrt [€]
$EK_S$	Energiekosten, Sammelfahrt [€]
$EK_{Sonst.}$	Energiekosten, sonstige Prozessschritte [€]
<b>Prozessemissionen</b>	
$THG_E$	Emissionen, Entleerungsfahrt [kg CO <sub>2e</sub> ]
$THG_G$	Gesamtemissionen, Sammeltour [kg CO <sub>2e</sub> ]
$THG_{RA}$	Emissionen, Revierausfahrt [kg CO <sub>2e</sub> ]
$THG_{RE}$	Emissionen, Reviereinfahrt [kg CO <sub>2e</sub> ]
$THG_S$	Emissionen, Sammelfahrt [kg CO <sub>2e</sub> ]
$THG_{Sonst.}$	Emissionen, sonstige Prozessschritte [kg CO <sub>2e</sub> ]
<b>Emissionscontrolling</b>	
$BKV_G$	Behälterkraftstoffverbrauch, Sammeltour [l/100 Behälter]
$BKV_S$	Behälterkraftstoffverbrauch, Sammelfahrt [l/100 Behälter]
$SE_G$	Sammlungseffizienz, Sammeltour [Beh. <sub>LL</sub> /kg CO <sub>2e</sub> ]
$SE_S$	Sammlungseffizienz, Sammelfahrt [Beh. <sub>LL</sub> /kg CO <sub>2e</sub> ]
$SKV_G$	Stundenkraftstoffverbrauch, Sammeltour [l/h]
$SKV_S$	Stundenkraftstoffverbrauch, Sammelfahrt [l/h]
<b>Weitere Variablen</b>	
$Beh_{LL}$	Behälterladeleistung [Behälter/h]
$e$	Emissionsfaktor [kg CO <sub>2e</sub> /l]
$k$	Energiekostenfaktor [€/l]
$N_{Beh.}$	Anzahl entleerter Behälter [Stück]
$Z_G$	Benötigte Gesamtzeit, Sammeltour [h]
$Z_S$	Benötigte Zeit, Sammelfahrt [h]

## **Zusammenfassung**

Das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Forschungsprojekt mit dem Aktenzeichen 31627/02 hat die Implementierung einer Praxismethodik zur optimierten Fahrzeugauswahl und ökologischen Routenplanung für die kommunale Abfalllogistik zum Ziel. Hierfür wird eine in einem vorangegangenen Projekt entwickelte Methodik an die Praxisanforderungen angepasst und in das am Markt verfügbare Softwaretool der SyWaTeC Logistic GmbH integriert. Die SyWaTeC Logistic GmbH ist Projektträger dieses Projektes und Kooperationspartner ist das Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart. Die Methodik ist an das Vorgehen der ressourcenorientierten Prozessrechnung angelehnt und die Berechnung des Energieverbrauchs sowie der Treibhausgasemissionen beruht auf der Norm DIN EN 16258.

Für die erste prototypische Umsetzung, Erweiterung und Validierung der Methodik stehen Daten aus dem Stadtgebiet Oberhausen zur Verfügung. Durch die fahrzeugseitige Freischaltung der Flottenmanagement-Schnittstellen konnte der Kraftstoffverbrauch direkt an zwei Heckladern ausgelesen und die Werte automatisiert an die Software übertragen werden. Basierend auf dieser Datengrundlage werden im Rahmen des ATOS-Emissionscontrollings aussagekräftige Kennzahlenreports generiert, mit Hilfe derer einzelne Prozessschritte gezielt hinsichtlich emissionsrelevanter Faktoren ausgewertet werden können. Bestandteil dieses Instrumentariums sind die Kennzahlen Sammlungseffizienz, Behälter- und Stundenkraftstoffverbrauch. Grundsätzlich lassen sich die Kenngrößen in der Praxis unabhängig voneinander einsetzen, dennoch sollten die Größen in ihrer Gesamtheit in den Entscheidungsprozess miteinfließen, um die Fehlinterpretation der Datenbasis zu vermeiden. Zum einen sind sowohl einzelne Fahrzeuge als auch der gesamte Fuhrparkbestand hinsichtlich der Treibhausgasemission auswertbar. Zum anderen kann für verschiedene Sammlungs- und Siedlungsstrukturgebiete oder (Teil-)Prozesse der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck generiert werden. Neben der erfolgreichen Praxisimplementierung wurde die Methodik zielführend erweitert und validiert. Somit sind die Ziele des Projektes erreicht. Weitere Forschungsarbeiten sind erforderlich, um beispielsweise neue Lösungswege für die wirtschaftliche Implementierung der Siedlungsstrukturanalyse zu erarbeiten.

## 1. Ausgangssituation und Zielsetzung

Die Emission der Treibhausgase (THG) ist von 1990 bis zum Jahr 2017 in Deutschland um 27,5 Prozent gesunken [SG19]. Dennoch ist zu erwarten, dass das Ziel der nationalen Klimaschutzpolitik, die Emissionen bis 2020 um 40 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 zu reduzieren, kaum zu erreichen ist [Bun18b]. Dieses Ziel ist abgeleitet aus den Klimaschutzzielen der Europäischen Union und leistet einen wichtigen Beitrag zur Umsetzung des Pariser Klimaabkommens [Bun18a]. Ein Ziel dieses Abkommens ist es, die durchschnittliche Erwärmung der Erde nach Möglichkeit unter zwei Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau zu halten, um die Folgen und Risiken des Klimawandels einzudämmen [Uni15]. Neben weiteren Faktoren tragen insbesondere die THG-Emissionen zu Veränderungen des Energiehaushalts der Erde bei und somit auch zur Erwärmung der Erdoberfläche [Umw18]. Einen bedeutenden Beitrag zur Reduzierung und Begrenzung der Emissionen leistet das Kyoto-Protokoll, in welchem die THG Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O), halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW), Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) und Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) reglementiert sind [Uni98].

Gemäß des Statistischen Bundesamtes wurden im Jahr 2016 in Deutschland insgesamt 52,1 Millionen Tonnen Siedlungsabfälle erzeugt [Sta18]. Damit liegt das Aufkommen der erzeugten Siedlungsabfälle unter Voraussetzung der Fortschreibung dieses Trends in Deutschland nach Schätzungen für das Jahr 2017 mit 633 Kilogramm pro Kopf deutlich über dem europäischen Durchschnitt (487 Kilogramm pro Kopf) [Eur17]. Bis zum Jahr 2050 prognostiziert die Weltbank die Zunahme des weltweiten Abfallaufkommens von ca. 2 Milliarden Tonnen (bezogen auf das Jahr 2016) auf 3,4 Milliarden Tonnen [Ka18]. Um diese Abfallmengen zu entsorgen, werden heutzutage und auch in Zukunft in regelmäßigen Abständen kommunale Entsorgungsfahrten zur Verbringung des Abfalls durchgeführt, bei denen THG in großen Mengen freigesetzt werden. Ein großes Potential zur Reduzierung der THG-Emissionen bietet somit auch der Transport und die Sammlung von Abfällen in der kommunalen Abfallwirtschaft. Aus diesem Grund wurde am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart bereits 2016 ein von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderteres Forschungsprojekt mit dem Aktenzeichen (Az) 31627/01 durchgeführt, welches die Entwicklung einer Methodik zur Berechnung eines umweltschonenden Sammel- und

Transportkonzepts für die kommunale Abfalllogistik zum Ziel hatte [SW16].<sup>1</sup> Ein Ziel dieses Nachfolgeprojekts ist es, die im vorangegangenen Projekt entwickelte Methodik in der Praxis zu implementieren, sodass Unternehmen der kommunalen Entsorgungsbranche über die Möglichkeit verfügen, eine softwarebasierte Optimierung der Fahrzeugauswahl und Routenplanung mit Hilfe ökologischer Faktoren durchzuführen. Denn die derzeit am Markt verfügbaren gängigen Softwaretools für die Touren- und Fahrzeugplanung verfügen nicht über die Option, eine explizit auf THG-Emissionen basierende Prozessoptimierung durchzuführen. Tabelle 1 gibt einen kurzen Überblick über die gängigen Softwareprodukte der Branche, wobei die dargestellten Informationen von den Internetseiten der Unternehmen stammen (Stand April 2019).

Unternehmen/Softwaretool	Überblick über die Softwaremodule
ATHOS Unternehmensberatung GmbH <i>-New Line-</i>	U. a. Behälterverwaltung, Wiegedatenverwaltung, Gebührenabrechnung, Sperrmüll auf Abruf, Straßenreinigung, Tourenplanung, Telematik-Integration [ <a href="https://www.athos.com/produkte">https://www.athos.com/produkte</a> ]
c-trace GmbH <i>-Telematiksystem Abfallwirtschaft-</i>	U. a. Softwarelösungen für die kommunale Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Winterdienst sowie Entsorgung, Tourenplanung und -aufzeichnung, Auftragsmanagement, Identsystem [ <a href="http://www.c-trace.de/de-DE/loesungen/telematiksystem-abfallwirtschaft">http://www.c-trace.de/de-DE/loesungen/telematiksystem-abfallwirtschaft</a> ]
Daimler Fleetboard GmbH <i>-FLEETBOARD-</i>	U. a. Zeiterfassung, Disposition, Einsatzanalyse, Fahranalyse, Optimierung des Kraftstoffbedarfs, Fahrtenaufzeichnung, Track & Trace [ <a href="https://www.fleetboard.de/loesungen.html">https://www.fleetboard.de/loesungen.html</a> ]
GIPA <i>-CANDIS-</i>	U. a. Tourenplanung mit Telematik-Integration, Ablaufoptimierung, Auftragsmanagement, Überwachung der Behälterbewegung [ <a href="http://www.gipa.de/entsorgung.html">http://www.gipa.de/entsorgung.html</a> ]
Infa GmbH <i>-INFA-DSPE-</i>	U. a. Tourenplanung, Behälterverwaltung, Auftragsverwaltung, Identsystem [ <a href="https://infa.de/management-und-organisation/entsorgungslogistik">https://infa.de/management-und-organisation/entsorgungslogistik</a> ]
Insert Information Technologies GmbH <i>-Betriebs-Management-System-</i>	U. a. Behälterverwaltung, Tourenplanung, Tourenoptimierung, Behältermanagement, Sperrmüll, Einsatzplanung, Straßenreinigung, Containerdienst, Anbindung an Identsysteme [ <a href="https://www.insert-infotech.de/software-loesungen">https://www.insert-infotech.de/software-loesungen</a> ]

<sup>1</sup> In diesem Abschlussbericht wird des Öfteren Bezug auf die im Forschungsprojekt Az: 31627/01 erarbeitete Methodik und die dort präsentierten Ergebnisse genommen. Nachfolgend wird mit dem Kürzel „Az: 31627/01“ auf dieses Projekt verwiesen.

MOBA Mobile Automation AG -MAWIS EM-	U. a. Behälterverwaltung, Tourenplanung, Behälteränderungsdienst, online Fahrzeugverfolgung, Tourenoptimierung [ <a href="https://moba-automation.de/maerkte-und-loesungen/abfallwirtschaft/software/mawis-em">https://moba-automation.de/maerkte-und-loesungen/abfallwirtschaft/software/mawis-em</a> ]
OAS AG -eANV AV-IS- bzw. -e:maxx-	U. a. Auftragsmanagement, Begleitscheinverwaltung, Fakturierung, Betriebstagebuch, Reporting [ <a href="https://www.oas.de/de/geschaeftsfelder/it-loesungen/eanv-software">https://www.oas.de/de/geschaeftsfelder/it-loesungen/eanv-software</a> ]
Q-Soft GmbH -A/C/S neo-	U. a. Software für Vertrieb, Finanzen und Controlling, Tourenplanung und Optimierung (z. B. Streckenführung oder Fahrzeugkapazitäten), geografisches Informationssystem, Ressourcenverwaltung, Telematik [ <a href="https://www.q-soft.de/entsorgungsmanagement">https://www.q-soft.de/entsorgungsmanagement</a> ]
S&F Datentechnik GmbH & Co. KG -EMOS-	U. a. Abrechnungssystem, Einsatzplanung, Tourenmanagement, Informationsmanagement, Nachweiswesen, Objektverwaltung [ <a href="https://www.emos-system.de">https://www.emos-system.de</a> ]
Sensis GmbH -TRAS-	U. a. Vertriebsunterstützung, Behälter- und Objektverwaltung, Gebührenberechnung, Anlagenabwicklung, Tourenplanung, Einsatzplanung, Telematik [ <a href="https://sensis-gmbh.de/produkte">https://sensis-gmbh.de/produkte</a> ]
Soptim AG -SOPTIM IBIS/E-	U. a. Lösungen von der Abfallsammlung über Lagerung und Aufbereitung bis hin zur Entsorgung, Verwertung bzw. Verkauf der Rohstoffe [ <a href="https://www.soptim.de/de/unternehmen/kreislaufwirtschaft/betriebsfuehrung-entsorgung/">https://www.soptim.de/de/unternehmen/kreislaufwirtschaft/betriebsfuehrung-entsorgung/</a> ]
SULO Deutschland GmbH Verschiedene Produkte wie z. B. -OPTI-MANAGER-, -OPTIFILL-, oder -OPTI-SYSTEM-	U. a. Tourenplanung, online Flottenmanagement, Fahrzeugverfolgung und -navigation, Reklamationsmanagement, Verwaltung, Identifikationstechnik, Behälterfüllstandmessung, Fahrzeugmanagement, Monitoringsystem [ <a href="http://www.sulo.de/index.php/de/produkte">http://www.sulo.de/index.php/de/produkte</a> ]
Tegos GmbH -Enwis-	U. a. Behälterverwaltung, Tourenplanung, Fuhrparkverwaltung, Telematik-Lösungen [ <a href="https://www.tegos-group.com/de/enwis">https://www.tegos-group.com/de/enwis</a> ]

Tabelle 1: Übersicht Softwaretools in der Abfallwirtschaft

Im Projektverlauf wird die Methodik in die bestehende **Analytische-Touren-Optimierungs-Software (ATOS)** der SyWaTeC Logistic GmbH integriert. Die SyWaTeC Logistic GmbH ist Projektträger dieses Forschungsprojekts und bietet neben Softwarelösungen auch Behältermanagement, Wägetechnik, Ident- und Logistiksysteme sowie unter der Firmierung ViSy Sicherheits- und Assistenzsysteme (z. B. Abbiege- und Rückfahrassistent) für die Entsorgungsbranche an. ATOS ermöglicht neben einer Live-Verfolgung des Abfallsammelfahrzeugs (ASF) auch die automatische Erfassung wichtiger Tourendaten, indem die geografischen Koordinaten der ASF sowie die Positionen der

Behälterentleerungen kontinuierlich aufgezeichnet werden und die Sammeltour in verschiedene Fahrabschnitte eingeteilt wird. Basierend auf den aufgezeichneten Daten werden verschiedene Kennzahlenreports zur gezielten Auswertung der Sammeltouren generiert. Da bisher in ATOS keine Umweltaspekte berücksichtigt werden, wird in diesem Projekt das ATOS-Emissionscontrolling entwickelt. Ein weiteres Ziel dieses Projekts ist die Erweiterung sowie die Validierung der Ergebnisse um den Fahrzeugtyp eines Heckladers, denn bisher war ausschließlich ein Seitenlader und ein Klein-ASF Gegenstand der Untersuchungen.

Dieser Abschlussbericht ist wie folgt aufgebaut: Im nächsten Abschnitt wird die im Projekt Az: 31627/01 entwickelte Methodik und die dazugehörige ressourcenorientierte Prozessrechnung auf die bestehende ATOS-Struktur angepasst, um die Methodik anschließend in der Praxis anzuwenden. Hierfür werden im dritten Kapitel im Rahmen des ATOS-Emissionscontrollings neue Kennzahlen für die kommunale Abfalllogistik konzipiert. Darauf aufbauend werden im vierten Kapitel die im ersten Forschungsprojekt gewonnenen Ergebnisse validiert und um neue Erkenntnisse erweitert.

## **2. Anpassung der entwickelten Methodik**

Aufgrund der hohen Detailliertheit des existierenden wissenschaftlichen Ansatzes ist es erforderlich, die Methodik an die bestehende ATOS-Struktur der SyWaTeC Logistic GmbH anzupassen, wobei das Fundament der im Projekt Az: 31627/01 erarbeiteten Vorgehensweise erhalten bleibt. Die Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen basiert weiterhin auf der Norm DIN EN 16258 und den Faktoren des Well-to-Wheel-Verfahrens [DIN13]. Zudem ist die Methodik nach wie vor an das Vorgehen der ressourcenorientierten Prozessrechnung angelehnt. Hierbei werden Verbrauchsfunktionen aufgestellt, die für jeden Prozess und jede Ressource definiert sind. Mit Hilfe des dann bekannten Verbrauchs jeder Ressource werden über sogenannte Emissions- bzw. Kostenfunktionen die durch den Prozess entstehenden Kosten und die Umweltbelastung ermittelt. In Abbildung 1 ist dieses Vorgehen in einem Nomogramm grafisch dargestellt. Für eine ausführliche Beschreibung der allgemeinen Vorgehensweise der Methodik sei an dieser Stelle auf [SW16] verwiesen.



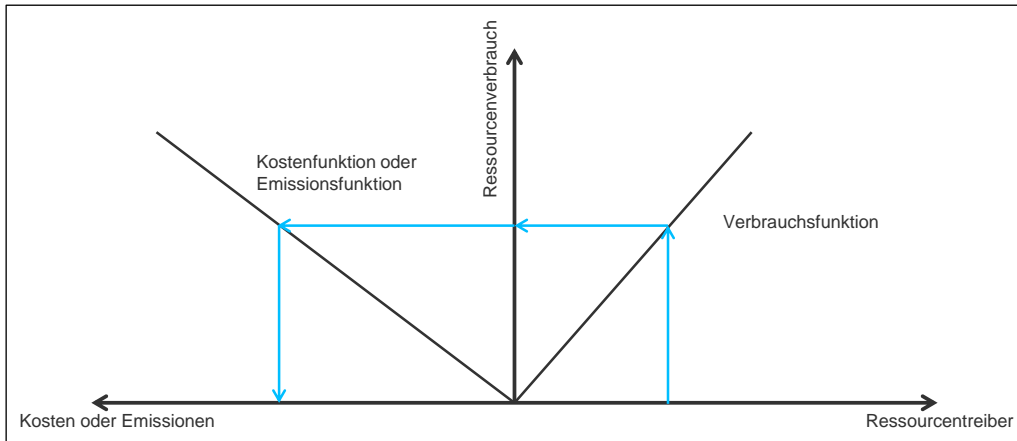


Abbildung 1: Nomogramm

Die bei einer Sammeltour stattfindenden Prozesse sind abhängig von der Art des Sammelverfahrens und der Schüttung des ASF. Die Prozesskette des Projekts Az: 31627/01 ist sowohl für einen Seitenlader als auch ein Klein-ASF definiert. Aus diesem Grund besteht die Prozesskette dieser Methodik aus den in Abbildung 2 dargestellten Teilprozessen der Anfahrt, Sammlung, Transport, Umschlag, Ferntransport und Rückfahrt.



Abbildung 2: Prozessübersicht Projekt Az: 31627/01

Die in ATOS hinterlegte Prozesskette umfasst weniger Teilprozesse und weicht deshalb von der beschriebenen Prozessabfolge ab, wenngleich alle wesentlichen branchenspezifischen Prozessschritte in der Softwarearchitektur abgebildet sind. Somit ist es erforderlich, die Kompatibilität von Methodik und Praxis herzustellen, indem die Prozesse des Projektes Az: 31627/01 auf die bestehende ATOS-Struktur ausgerichtet und angeglichen werden. Nach Anpassung der Methodik werden, wie in Abbildung 3 zu sehen ist, die Prozesse Einfahrt in das Revier, Sammelfahrt, Entleerungsfahrt und Ausfahrt aus dem Revier unterschieden.



Abbildung 3: Prozessübersicht ATOS

Die Anfahrt vom Betriebshof in das Sammelrevier wird als Einfahrt in das Revier bezeichnet. Die Sammelfahrt umfasst die Fahrt im Sammelrevier für das Entleeren der Behälter, wohingegen die Fahrt vom Sammelrevier zur Deponie als Entleerungsfahrt bezeichnet wird. Sammel- und Entleerungsfahrten können sich mehrmals abwechseln. Dies ist in etwa bei großen Sammelrevieren der Fall, wenn das Fassungsvermögen des eingesetzten ASF für die zu sammelnde Abfallmenge nicht ausreicht. Erfolgt nach einer Entleerungsfahrt eine erneute Sammelfahrt, wird die Fahrt von der Deponie zurück ins Sammelrevier dem Prozess der Entleerungsfahrt zugerechnet. Die Ausfahrt aus dem Revier beinhaltet die Fahrt von der Deponie zum Betriebshof. Während der Reviereinfahrt und -ausfahrt ist das ASF nicht beladen.

ATOS ermöglicht neben der Echtzeitverfolgung und Navigation der ASF auch das automatisierte Erfassen wichtiger Tourendaten und das Abbilden dieser Größen in aussagekräftigen Kennzahlenberichten. Da die Anwender von ATOS zumeist über ergänzende Softwaretools zur Abbildung eines prozessübergreifenden Personal- und Flottenmanagements (z. B. für die Personaleinsatzplanung, die Abbildung fuhrparkrelevanter Dienstleistungen wie Reparatur- und Wartungsarbeiten oder Leasinglösungen) verfügen, ist die Integration der Ressourcenarten Personal und Fahrzeug in die Softwarestruktur nicht erforderlich. Interessierte Anwender können die Beschreibung und Ermittlung dieser Ressourcenarten aus dem Abschlussbericht des Projekts Az: 31627/01 ableiten und auf die jeweilig vorliegende Prozessstruktur anpassen. Im Nachfolgenden wird somit vorrangig die Energieressource Kraftstoff (insbesondere Diesel) betrachtet, da der Einsatz von Dieselfahrzeugen in der kommunalen Abfallwirtschaft weit verbreitet ist. Die ressourcenorientierte Prozessrechnung sieht für den ersten Anwendungsschritt das Aufstellen der Verbrauchs- und Ressourcenfunktionen vor. Da der Verbrauch der Energieressource Kraftstoff mittels einer sogenannten Flottenmanagement-Schnittstelle (FMS) direkt am Fahrzeug ausgelesen wird und die generierten Daten direkt an ATOS übertragen werden, kann dieser Schritt aufgrund der automatisierten Datengenerierung und -übertragung bei der Integration der Methodik in die Praxis vernachlässigt werden. In der Software steht nach der Datenübertragung der benötigte Kraftstoff für die Teilprozesse zur Verfügung. Dieser wird differenziert nach den Prozesskategorien der Reviereinfahrt ( $KV_{RE}$ ), der Sammelfahrt ( $KV_S$ ), der Ent-

leerungsfahrt ( $KV_E$ ) und der Revierausfahrt ( $KV_{RA}$ ) ausgewiesen. Dabei ist der benötigte Kraftstoff als die Menge eines Energieträgers zu verstehen, welcher durch ein ASF verbraucht wird [DIN13]. Fallen während einer Sammeltour mehrere Sammel- und Entleerungsfahrten an, werden die Kraftstoffbedarfe in ATOS aufsummiert, sodass nach Beendigung der Tour sowohl für die Sammelfahrt als auch für die Entleerungsfahrt lediglich der konsolidierte Kraftstoffverbrauch in der Software verfügbar ist. Zusätzlich wird der benötigte Kraftstoff während der Leerfahrten, der Pausen sowie der Ausfallzeiten des ASF erfasst. Diese Kenngrößen sind im Folgenden unter der Kategorie benötigter Kraftstoff für sonstige Prozessschritte ( $KV_{Sonst.}$ ) zusammengefasst. Die Zuordnung des Kraftstoffverbrauchs zu den einzelnen Prozessschritten erfolgt in der betrieblichen Praxis, indem der Fahrer/in des ASF den jeweiligen Prozessabschnitt aktiviert. Wenn also beispielsweise die Einfahrt in das Revier abgeschlossen ist und die Sammelfahrt beginnt, aktualisiert der Fahrer/in fahrzeug- bzw. softwareseitig den entsprechenden Prozessabschnitt und der Kraftstoffbedarf wird ab diesem Zeitpunkt dem Teilprozess der Sammelfahrt zugeordnet. Der benötigte Kraftstoff für den Gesamtprozess einer Sammeltour ( $KV_G$ ) ergibt sich durch Addition der Kraftstoffbedarfe der einzelnen Teilprozesse:

$$KV_G = KV_{RE} + KV_S + KV_E + KV_{RA} + KV_{Sonst.} \quad (1)$$

In den Kapiteln 2.1 und 2.2 wird im Folgenden dargestellt, wie sich basierend auf diesen Ressourcenverbräuchen die Emissions- und Kostenfunktionen ermitteln lassen.

## 2.1 Aufstellen der Emissionsfunktionen der Teilprozesse

Die Emissionsfunktion der Teilprozesse lässt sich ermitteln durch Multiplikation des Ressourcenverbrauchs eines Teilprozesses mit dem sogenannten THG-Emissionsfaktor  $e$ . Tabelle 2 gibt einen Überblick über den THG-Emissionsfaktor  $e$ , welcher in der Norm DIN EN 16258 für verschiedene Kraftstofftypen definiert ist [DIN13]. Gegenstand der Norm ist eine Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen bei Transportdienstleistungen.

Kraftstofftyp	THG-Emissionsfaktor [kg CO <sub>2</sub> e/l]
Ottokraftstoff	2,88
Ethanolkraftstoff	1,24
Ottokraftstoff mit 5% Ethanol	2,80
Dieselmkraftstoff	3,24
Biodiesel	1,92
Dieselmkraftstoff mit 5% Biodiesel	3,17
Autogas	1,90

Tabelle 2: Emissionsfaktoren nach DIN EN 16258

Mit Hilfe des Emissionsfaktors lassen sich die THG-Emissionen während der Revier-einfahrt wie folgt ermitteln:

$$THG_{RE} = KV_{RE} * e \quad (2)$$

Formel 3 zeigt, wie die THG-Emissionen für die Sammelfahrt berechnet werden.

$$THG_S = KV_S * e \quad (3)$$

Die Ermittlung der THG-Emissionen für den Teilprozess der Entleerungsfahrt ist in Formel 4 dargestellt. Dabei ist die potenzielle Rückfahrt von der Deponie in das Sammelrevier nach dem Entleeren des ASF bereits im Ressourcenverbrauch des Teilprozesses der Entleerungsfahrt berücksichtigt.

$$THG_E = KV_E * e \quad (4)$$

Für die Berechnung der Emissionsfunktion während der Ausfahrt aus dem Revier gilt:

$$THG_{RA} = KV_{RA} * e \quad (5)$$

Um die Emissionsfunktion für die sonstigen Prozessschritte (z. B. Leer- und Pausenfahrten oder während der Ausfallzeit eines ASF) aufzustellen, wird der benötigte Kraftstoff der sonstigen Prozessschritte ( $KV_{Sonst.}$ ) ebenfalls mit dem Emissionsfaktor multipliziert.

$$THG_{Sonst.} = KV_{Sonst.} * e \quad (6)$$

Die so ermittelten Emissionen der Teilprozesse werden daraufhin addiert, um die fahrzeugspezifischen Gesamtemissionen einer Sammeltour zu ermitteln. Folglich werden die Gesamtemissionen eines ASF während einer Sammeltour durch Summation der Einzelverbräuche der Teilprozesse und anschließender Multiplikation mit dem THG-Emissionsfaktor gemäß Formel 7 bestimmt:

$$THG_G = e * (KV_{RE} + KV_S + KV_E + KV_{RA} + KV_{Sonst.}) \quad (7)$$

Wird die Gesamtemissionsfunktion für verschiedene Fahrzeugtypen berechnet, ist beispielsweise das emissionseffizienteste Fahrzeug für eine Sammeltour ermittelbar. Darüber hinaus stehen durch das Aggregieren der Gesamtemissionsfunktion umfangreiche Informationen für das Ableiten von Entscheidungsalternativen zur Verfügung. Zum einen können unterschiedliche Sammelreviere detailliert hinsichtlich umweltrelevanter Fragestellungen miteinander verglichen und ausgewertet werden. Zum anderen ermöglicht das Ausweiten des Betrachtungszeitraums – also z. B. die Betrachtung der THG-Emissionen über mehrere Wochen, Monate oder Jahre hinweg – die Bewertung des gesamten Fuhrparkbestands über einen längerfristigen Zeitraum.

## 2.2 Aufstellen der Kostenfunktionen der Teilprozesse

Da jeder Ressourcenverbrauch auch mit der Entstehung direkter oder indirekter Kosten verbunden ist, wird an dieser Stelle auf das Aufstellen der Kostenfunktionen für die Energieressource Kraftstoff eingegangen. Ähnlich wie bei der Ermittlung der Emissionsfunktionen, werden die Kostenfunktionen für die einzelnen Teilprozesse aufgestellt. Die Energiekosten werden berechnet, indem der Kraftstoffverbrauch mit dem Energiekostenfaktor  $k$  multipliziert wird. Den Energiekosten liegen für gewöhnlich die marktüblichen Kraftstoffpreise zugrunde. Die durchschnittlichen Preise für die Kraftstoffkategorie Diesel sind in etwa über das Statistische Bundesamt beziehbar. Unter Anwendung von Formel 8 lassen sich die Energiekosten für den Teilprozess der Reviereinfahrt ermitteln:

$$EK_{RE} = KV_{RE} * k \quad (8)$$

Für die Berechnung der Energiekosten während der Sammelfahrt gilt:

$$EK_S = KV_S * k \quad (9)$$

Mit Hilfe von Formel 10 lassen sich die Kraftstoffkosten für den Teilprozess der Entleerungsfahrt bestimmen:

$$EK_E = KV_E * k \quad (10)$$

Für die Bestimmung der Energiekosten während der Ausfahrt aus dem Revier gilt:

$$EK_{RA} = KV_{RA} * k \quad (11)$$

Die Energiekosten der sonstigen Prozessschritte sind gemäß Formel 12 zu berechnen:

$$EK_{Sonst.} = KV_{Sonst.} * k \quad (12)$$

Die Gesamtenergiekosten einer Sammeltour ergeben sich aus der Summe der Kraftstoffbedarfe der Teilprozesse multipliziert mit dem Faktor  $k$ .

$$EK_G = k * (KV_{RE} + KV_S + KV_E + KV_{RA} + KV_{Sonst.}) \quad (13)$$

Basierend auf den Gesamtenergiekosten lassen sich, ähnlich wie mittels der Emissionsfunktionen, umfassende Informationen zur Steuerung der Fahrzeugauswahl und Routenoptimierung in der kommunalen Abfalllogistik gewinnen. Denkbar sind in etwa Ursachenanalysen für positive oder negative Kostenabweichungen sowie weitere Maßnahmen für die Verbesserung der Fahrzeugeinsatzplanung. Sowohl die Kostenfunktion als auch die Emissionsfunktion sind Bestandteil des ATOS-Emissionscontrollings, auf welches im nächsten Kapitel eingegangen wird.

### **3. ATOS-Emissionscontrolling – Implementierung der Methodik in der Praxis**

Um die Methodik erfolgreich in der Praxis zu integrieren, sind diverse marktseitigen Anforderungen der Entsorgungsbranche zu berücksichtigen. Für den Anwender sollen beispielsweise keine zusätzlichen Kosten entstehen, die Methodik soll einfach anzuwenden und die Nutzung nachvollziehbar und ohne größeren Aufwand möglich sein. Vorgesehen war zunächst die Durchführung einer geoinformationsgestützten Siedlungsstrukturanalyse, um die Abfallsammeltouren basierend auf den spezifischen Eigenschaften der Siedlungsgebiete abbilden zu können. Hierfür wurde im Projekt Az:

31627/01 auf Open Source-Daten zurückgegriffen, wobei eine hohe Qualität der Siedlungsstrukturanalyse lediglich unter sehr hohem manuellen Arbeitsaufwand sichergestellt werden konnte. Um die Siedlungsstrukturanalyse effizienter zu gestalten, war in diesem Projekt geplant, Daten am Markt zu erwerben, auf deren Basis eine anwenderfreundliche und weitestgehend automatisierte Siedlungsstrukturtypenanalyse ermöglicht wird. Eine ausführliche Marktanalyse führte jedoch zu dem Ergebnis, dass die Beschaffung detaillierter Geoinformationen ohne Gefährdung der oben genannten Anforderungen nicht zu realisieren ist. Zwar bieten Geomarketingdienstleister strukturelle Geoinformationen in unterschiedlichen Detailliertheitsgraden an (z. B. Gebäudekoordinaten und -umrisse, Siedlungsblock-Geometrien oder umfassende Gebietslayer), jedoch lassen die existierenden Kauf- und Lizenzierungsmodelle keine wirtschaftliche Beschaffung und softwareseitige Implementierung der Geoinformationen in ATOS zu. Auch über statistische Landes- und Kreisämter konnten die Daten nicht in erforderlicher Güte beschafft werden. Um diese Nutzungsbarriere für die meist mittelständischen Entsorger zu umgehen und die Projektziele nicht zu gefährden, wird auf die Implementierung und Beschaffung kostenintensiver Geodaten für die Siedlungsstrukturtypenanalyse verzichtet. Hier gilt es neue Lösungsmöglichkeiten speziell für die Abfalllogistik zu erarbeiten. Vorgeschlagen wird stattdessen z. B. die Einteilung der Sammlungsgebiete nach dem Behälterabstand, denn dadurch erfolgt die Berücksichtigung der Struktur des Sammelreviers.

Um eine optimierte Fahrzeugauswahl und ökologische Routenplanung in der kommunalen Abfalllogistik zu ermöglichen, wird nun das in diesem Projekt entwickelte ATOS-Emissionscontrolling vorgestellt. Diesbezüglich werden die bereits in ATOS existierenden betriebswirtschaftlichen Reports um einen Emissionsreport erweitert, der es den Anwendern ermöglicht, gezielte Touren- und Fuhrparkanalysen im Hinblick auf umweltrelevante Aspekte durchzuführen. Abbildung 4 gibt einen Überblick über das um die Elemente Kraftstoffverbrauch und THG-Emissionen erweiterte ATOS-Benchmarkingsystem.

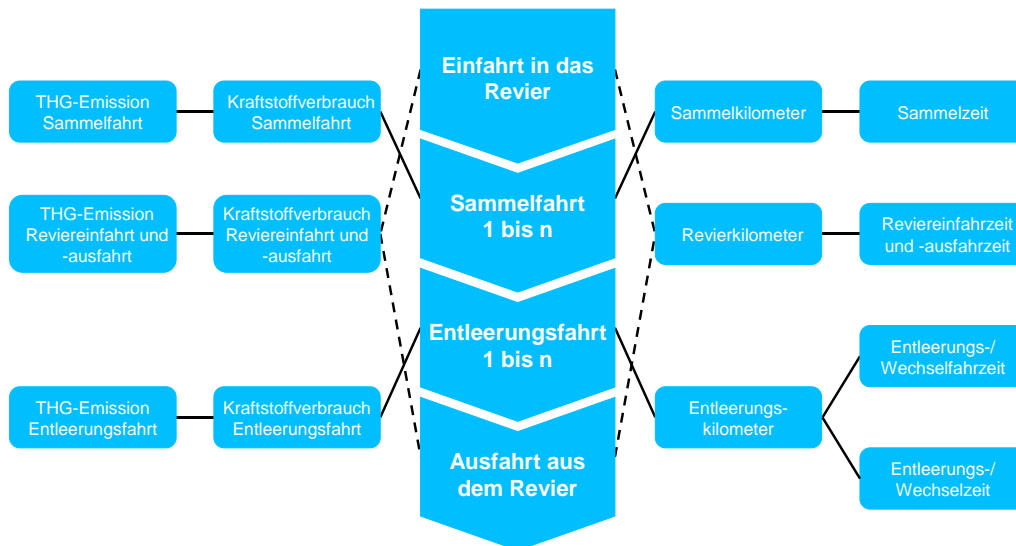


Abbildung 4: Überblick ATOS-Benchmarkingsystem

Das ATOS-Benchmarkingsystem bildet das Grundgerüst für die täglichen Aufgabstellungen der Entsorgungsbranche, zu denen in etwa die Erstellung von Soll-Ist-Vergleichen, systematische Kostenreduktionen, Behältermanagement oder Gebührenabrechnungen zählen. Durch den modularen Aufbau des ATOS-Emissionscontrollings werden diese Funktionalitäten um weitere individuelle Aufgabenschwerpunkte der Branche ergänzt. Im Mittelpunkt des Emissionscontrollings steht die Kennzahl der Sammlungseffizienz. Ergänzt wird diese durch die Kenngrößen Behälter- und Stundenkraftstoffverbrauch. Diese Kennzahlen ermöglichen die strategische, taktische und operative Koordination und Optimierung aller relevanten Planungs- und Steuerungsprozesse der Abfalllogistik unter Berücksichtigung der THG-Emissionen. Die inhaltliche Beschreibung der Kennzahlen erfolgt in den Unterkapiteln 3.1, 3.2 und 3.3. Kennzahlen sind dabei als Informationen zu verstehen, die komplexe Gegebenheiten komprimiert darstellen [WSB16]. Hinsichtlich der Kennzahlenarten lassen sich absolute und relative Kenngrößen unterscheiden. Während absolute Kennzahlen den tatsächlichen Wert einer Größe darstellen, entstehen relative Kennzahlen, wenn absolute Kenngrößen mit einer weiteren Größe ins Verhältnis gesetzt werden. Wie Abbildung 5 zu entnehmen ist, lassen sich die relativen Kenngrößen Behälter- und Stundenkraftstoffverbrauch in den Kategorien Kraftstoffverbrauch, THG-Emission und Kosten ausweisen. Die Sammlungseffizienz hingegen ist eine übergeordnete Kennzahl, die mittels in Beziehung zueinanderstehenden relativen Einzelkennzahlen gebildet wird. Die



Anwender des ATOS-Emissionscontrollings können die abzubildenden Kennzahlen selbständig wählen.

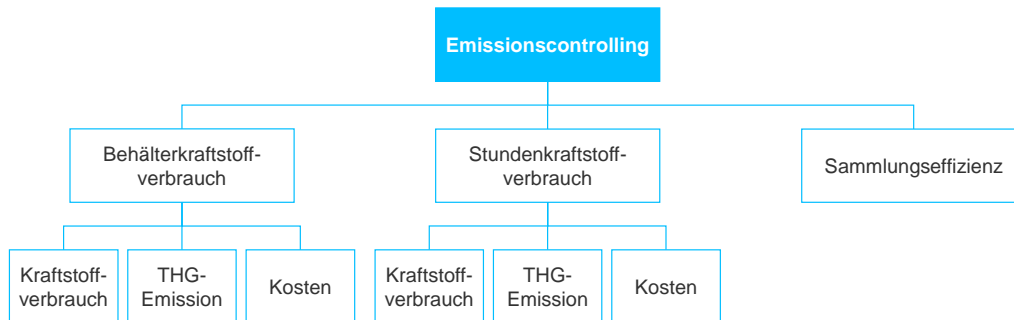


Abbildung 5: ATOS-Emissionscontrolling

Durch diesen modularen Aufbau ist sichergestellt, dass die jeweils relevante Parameterstruktur und der Implementierungsgrad des Emissionscontrollings für jeden Anwender individuell bestimmbar ist. Die aus den erhobenen Daten abgeleiteten Kennzahlen werden in Emissionsreports visualisiert. Des Weiteren sind die Emissionsreports für verschiedene Parameterkonfigurationen skalierbar (z. B. Betrachtungszeitraum, Sammelreviere oder die Auswahl verschiedener Fahrzeuge). So lassen sich in etwa detaillierte Tagesauswertungen verschiedener ASF oder Jahresanalysen für den gesamten Fuhrpark konfigurieren, womit dem Anwender ein ausführliches Analyse- und Benchmarkinginstrument zur Verfügung steht. Abbildung 6 zeigt einen auf Beispieldaten basierenden Report für die Tagesauswertung eines einzelnen ASF sowie die Monats- und Jahresauswertung für mehrere ASF. Die Reports enthalten jeweils allgemeine fahrzeug- und tourenspezifische Informationen sowie eine Prozessanalyse, welche die prozentuale Verteilung des Kraftstoffbedarfs auf die einzelnen Teilprozessschritte widerspiegelt. Des Weiteren wird der Gesamtkraftstoffverbrauch, der Behälter- und Stundenkraftstoffverbrauch, die THG-Emissionen sowie die Sammlungseffizienz abgebildet. Grundsätzlich sollten die hier vorgestellten Kennzahlen in ihrer Gesamtheit bei der Abwägung von Entscheidungsalternativen herangezogen werden, um die Fehlinterpretation der Datenstruktur zu vermeiden.

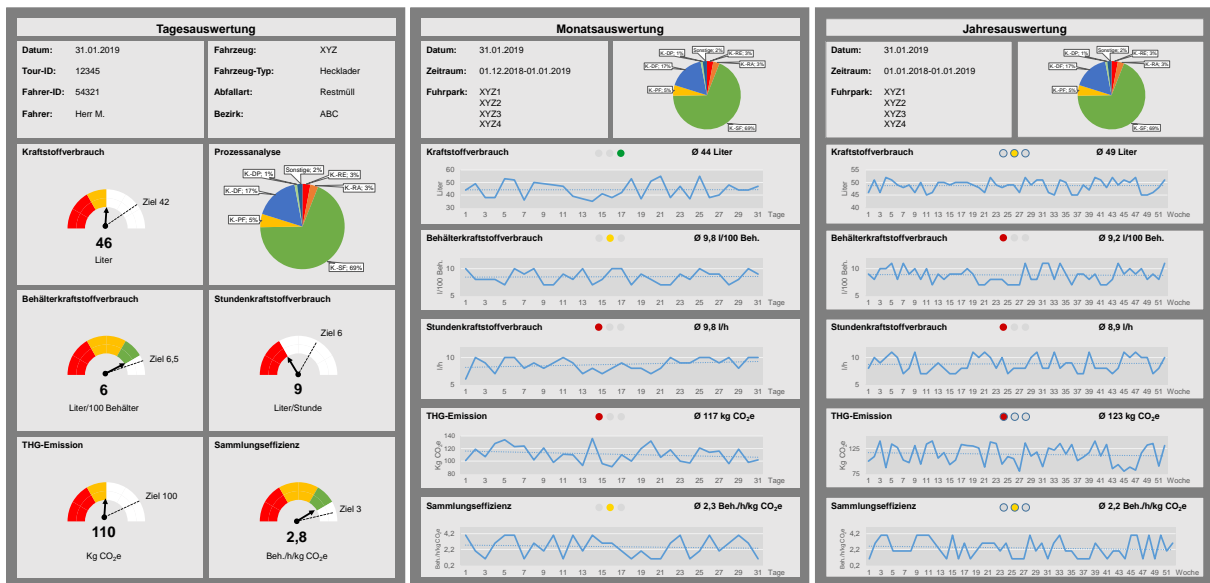


Abbildung 6: Beispielhafte Reportauswertung ATOS-Emissionscontrolling

Darüber hinaus eignet sich das ATOS-Emissionscontrolling auch für die Implementierung eines Gamification-Ansatzes. Unter Gamification wird das Integrieren von spieltypischen Elementen in einen spielfremden Kontext verstanden. Das Ziel ist die Anreicherung einer Tätigkeit oder eines Prozesses durch spielerische Elemente, wodurch die Motivation der beteiligten Akteure zur Aufgabenerfüllung gesteigert wird [De11]. Im konkreten Anwendungsfall der kommunalen Abfallentsorgung kann der Gamification-Ansatz in etwa derart ausgestaltet sein, dass mit Hilfe spezifischer Anreizsysteme, die mit spielerischen Elementen angereichert werden, eine hohe Sammlungseffizienz oder geringe THG-Emissionen erzielt werden. So können beispielsweise die Fahrer/innen der ASF in Weiterbildungen auf eine emissionseffiziente Fahrweise geschult werden, um diese Fähigkeit daraufhin im Realbetrieb anzuwenden und basierend auf anonymisierten und spielerisch ausgestalteten Ranking- und Bonussystemen leistungsbezogen vergütet zu werden. Weitere mögliche Ziele, die mit einem Gamification-Ansatz adressiert werden können, sind die Reduzierung des THG-Fußabdrucks einer Sammeltour oder des Fuhrparkbestands. In diesem Kontext ist jedoch darauf zu achten, dass zentrale Erkenntnisse der Motivationspsychologie zu berücksichtigen sind, wie in etwa die Beeinflussbarkeit der vorgegebenen Zielgrößen durch die Mitarbeiter/innen, um deren individuelle Bedürfnisse miteinzubeziehen.

Um den Anwendern eine Hilfestellung für die korrekte Ermittlung und Interpretation der im Rahmen des ATOS-Emissionscontrollings konzipierten Kenngrößen zu ermöglichen, werden diese nun definiert und erläutert.

### 3.1 Behälterkraftstoffverbrauch

Der Behälterkraftstoffverbrauch beschreibt, welche Kraftstoffmenge für die Entleerung eines Behälters benötigt wird. Für die Ermittlung des Behälterkraftstoffverbrauchs während der Sammelfahrt ( $BKV_S$ ) wird der Kraftstoffverbrauch des Sammlungsprozesses ( $KV_S$ ) auf die Anzahl an entleerten Behältern ( $N_{Beh.}$ ) bezogen. Dieser Quotient wird mit dem Faktor 100 multipliziert, wodurch die Benutzerfreundlichkeit und Zielorientierung der Kenngröße verbessert wird. Der Behälterkraftstoffverbrauch für den Teilprozess der Sammelfahrt ( $BKV_S$ ) berechnet sich nach Formel 14 wie folgt:

$$BKV_S = \frac{KV_S}{N_{Beh.}} * 100 \quad (14)$$

Der Behälterkraftstoffverbrauch ist auch für eine Sammeltour eines ASF ( $BKV_G$ ) ermittelbar. In diesem Fall wird der Gesamtkraftstoffverbrauch ( $KV_G$ ) durch die Anzahl der Behälterentleerungen ( $N_{Beh.}$ ) dividiert. Die Berechnung ist Formel 15 zu entnehmen:

$$BKV_G = \frac{KV_G}{N_{Beh.}} * 100 \quad (15)$$

Wird der Behälterkraftstoffverbrauch mit dem in Kapitel 2.1 eingeführten Emissionsfaktor bewertet, lassen sich die entstandenen THG-Emissionen für die Behälterentleerungen einer Sammelfahrt oder Sammeltour berechnen. Ebenso ermöglicht die monetäre Bewertung des Behälterkraftstoffverbrauchs mit dem Energiekostenfaktor aus Kapitel 2.2 die Ermittlung der Kraftstoffkosten in Abhängigkeit der Behälterentleerungen.

### 3.2 Stundenkraftstoffverbrauch

Der Stundenkraftstoffverbrauch stellt den Kraftstoffbedarf dar, der für die einstündige Durchführung eines (Teil-)Prozesses benötigt wird. Im Gegensatz zum Behälterkraftstoffverbrauch verfügt diese Kenngröße über eine hohe Aussagekraft für Teilprozesse, die keinen direkten Bezug zur Anzahl an Behälterentleerungen aufweisen. Somit ermöglicht der Stundenkraftstoffverbrauch die Verhaltenssteuerung z. B. durch gezielte Weiterbildung der Fahrzeugführer/in während der Reviereinfahrt und -ausfahrt oder der Fahrt in die Pause. Berechnet wird der Stundenkraftstoffverbrauch, indem der

Kraftstoffverbrauch durch die benötigte (Teil-)Prozesszeit (ausgedrückt in Stunden) dividiert wird. Mittels Formel 16 lässt sich der Stundenkraftstoffverbrauch für den Prozess der Sammelfahrt ( $SKV_S$ ) ermitteln. Hierbei wird der während des Sammlungsprozesses benötigte Kraftstoff ( $KV_S$ ) auf die zur Durchführung der Sammelfahrt benötigten Zeit ( $Z_S$ ) bezogen.

$$SKV_S = \frac{KV_S}{Z_S} \quad (16)$$

Der Stundenkraftstoffverbrauch kann für jeden einzelnen Teilprozess oder auch für den gesamten Fuhrpark berechnet werden. Der Stundenkraftstoffverbrauch für eine Sammeltour eines ASF ( $SKV_G$ ) lässt sich berechnen, indem der Gesamtkraftstoffverbrauch der Sammeltour ( $KV_G$ ) dividiert wird durch die Gesamtdauer der Sammeltour ( $Z_G$ ).

$$SKV_G = \frac{KV_G}{Z_G} \quad (17)$$

Wiederum ist mit Hilfe der Emissions- und Energiekostenfaktoren die Bewertung des Stundenkraftstoffverbrauchs möglich, sodass detaillierte Informationen über die entstandenen THG-Emissionen und Kraftstoffkosten für die einstündige Prozessdurchführung vorliegen.

### 3.3 Sammlungseffizienz

Die Sammlungseffizienz ist eine Kennzahl, die die Input-Output-Relation des Sammlungsprozesses beschreibt. Sie ist abhängig von den prozessrelevanten Zeitanteilen, der Anzahl an Behälterentleerungen und den THG-Emissionen. Die Parameter Zeit und Anzahl an Behälterentleerungen kommen in der Behälterladeleistung ( $Beh_{LL}$ ) zum Ausdruck, da diese Größe die Anzahl der entleerten Behälter pro Stunde widerspiegelt. Die Berechnung der Sammlungseffizienz für den Prozess der Sammelfahrt ( $SE_S$ ) ist in Formel 18 dargestellt. Hierbei wird die Behälterladeleistung durch den THG-Emissionswert der Sammelfahrt ( $THG_S$ ) dividiert:

$$SE_S = \frac{Beh_{LL}}{THG_S} \quad (18)$$

Wird die Behälterladeleistung durch die gesamten THG-Emissionen einer Sammeltour dividiert, ergibt sich die Sammlungseffizienz der Sammeltour eines ASF. Diese Berechnung ist in Formel 19 dargestellt:

$$SE_G = \frac{Beh_{LL}}{THG_G} \quad (19)$$

Die Sammlungseffizienz hat sowohl für die Auswertung einer individuellen Sammel-fahrt als auch für eine gesamte Sammeltour eine hohe Aussagekraft. Basierend auf dieser Kenngröße lassen sich beispielsweise Gemeinden, Städte oder Landkreise im Hinblick auf die Effizienz der Abfallsammlung vergleichen. Die Sammlungseffizienz ist umso besser, je höher der Quotient aus Behälterladeleistung und THG-Emissionen ist. Wird die Sammlungseffizienz in Relation zum Behälterabstand betrachtet, lassen sich unterschiedliche Siedlungsstrukturgebiete hinsichtlich ökologischer Faktoren miteinander vergleichen. Des Weiteren werden dadurch analytische Untersuchungen verschiedener Fahrzeugtypen ermöglicht.

#### **4. Erweiterung und Validierung der Methodik**

Bevor in diesem Kapitel die Erweiterung und Validierung der Methodik erfolgt, wird zunächst auf die Beschaffenheit der Daten und Fahrzeuge eingegangen.

##### **4.1 Beschaffenheit der Daten und Fahrzeuge**

Für die erste prototypische Umsetzung der Praxismethodik wird auf Daten der Wirtschaftsbetriebe Oberhausen (WBO) zurückgegriffen. Zu dem Aufgabengebiet des Dienstleistungsunternehmens gehört neben der Stadtentwässerung und -reinigung auch die Abfallentsorgung in der Stadt Oberhausen. Für die Entsorgung der verschiedenen Abfallarten (z. B. Haus-, Papier-, Bio- oder Sperrmüll) steht ein Fuhrpark mit über 100 Fahrzeugen zur Verfügung [WBO19]. Im Juni 2018 hat die Stadt Oberhausen in Kooperation mit der WBO damit begonnen, die über 60.000 gebührenpflichtigen Abfallbehälter im Stadtgebiet mit einem Identensystem der SyWaTeC Logistic GmbH auszustatten. Hierbei werden die Abfallbehälter mit speziellen Kunststofffolien gekennzeichnet, die mit einem Barcode und Transponder ausgestattet sind und als Datenträger fungieren. Abbildung 7 zeigt ein solches Klebeetikett der SyWaTeC Logistic GmbH [SyW19].



Abbildung 7: Barcode Klebeetikett

Wird ein Behälter während der Sammelfahrt geleert, identifiziert das am ASF angebrachte Transponder-Lesegerät während des Schüttvorgangs den Behälter, ohne den Prozess zu verlangsamen. Die gesammelten Daten werden im Bordcomputer des Fahrzeugs gespeichert, um anschließend an ATOS überspielt zu werden, wobei für die Datenübertragung verschiedene Kommunikationstechnologien zur Verfügung stehen. Neben abfallspezifischer Daten werden auch fahrzeugspezifische Prozessinformationen mit Hilfe der bereits erwähnten FMS aufgezeichnet und übertragen. Hierbei handelt es sich um eine standardisierte Schnittstelle für Nutzfahrzeuge, über die verschiedene Fahrzeugparameter erfasst werden. Als Beispiel kann die Fahrzeuggeschwindigkeit, die zurückgelegte Strecke oder der Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge genannt werden. Im Rahmen dieses Pilotprojekts sind bei zwei Heckladern des WBO-Fuhrparks die FMS freigeschalten worden, sodass detaillierte Kraftstoffverbräuche für weitere Analysezwecke zur Verfügung stehen. Tabelle 3 stellt die Charakteristika der beiden Hecklader vergleichend gegenüber.

Fahrzeug	ASF1	ASF2
Hersteller Fahrgestell/Typ	MAN/TGS	MAN/TGS
Hersteller Aufbau/Typ	Faun/Rotorpresse	Faun/Rotorpresse
Zul. Gesamtgewicht [kg]	26.000	26.000
Leergewicht [kg]	14.500	15.260
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	89	90
Leistung [kW]	235	235
Länge [cm]	8.700	9.600
Breite [cm]	2.500	2.500
Höhe [cm]	3.690	3.510
Ladevolumen [ccm]	21	21

Tabelle 3: Fahrzeugüberblick Hecklader

Bei der Freischaltung der Schnittstellen an den Fahrzeuggestellen waren verschiedene Herausforderungen zu überwinden, was im Projektverlauf zu zeitlichen Verzögerungen führte, weswegen eine Projektverlängerung beantragt und genehmigt wurde. Die beiden Hecklader werden im Folgenden als ASF1 und ASF2 bezeichnet. Ab Oktober 2018 standen die Kraftstoffverbräuche in ATOS zur Verfügung, sodass ab diesem Zeitpunkt die Validierung und Erweiterung der Methodik mit Daten aus dem Stadtgebiet Oberhausen begonnen wurde. Zu diesem Zeitpunkt war der Verteilungsprozess der Klebeetiketten noch nicht vollständig abgeschlossen, sodass während der Datenaufzeichnung einige Abfallbehälter entleert wurden, ohne systematisch identifiziert zu werden [Szy19, WAZ18, Lud18]. Folglich konnten nicht alle Behälterentleerungen automatisiert in ATOS erfasst werden. Die tatsächliche Anzahl der Entleerungen wird nachträglich nach Abschluss der Tour in separaten Optimierungsläufen ermittelt. Um die derart generierten Daten auf Plausibilität zu überprüfen, werden in diesem Projekt die Sammeltouren simulativ nachgebildet und analysiert. Gleichzeitig werden die Daten für den Auswertungsprozess aufbereitet. Durch dieses Vorgehen steht ein zweites Tool zur Überprüfung der in der Praxis erhobenen Daten zur Verfügung, wodurch einige Unregelmäßigkeiten in der Datenerfassung während der Testphase ermittelt werden konnten. Hierfür wird das auf Java basierende Simulationswerkzeug AnyLogic als Umgebung für die Multimethodenmodellierung eingesetzt. Die im Simulationstool hinterlegte Karte des Geoinformationssystems OpenMap ermöglicht das realitätsnahe Nachbilden der Sammeltour, indem die geographischen Koordinaten (Längen- und Breitengrade) der tatsächlichen Behälterentleerungen abgebildet werden. Die Geodaten der Behälterstandorte werden während der Abfallsammeltour in Echtzeit generiert und stehen anschließend in ATOS zur Verfügung, unabhängig davon, ob der jeweilige Abfallbehälter mit einem Klebeetikett ausgestattet ist oder nicht. Abbildung 8 zeigt einen beispielhaften Ausschnitt des Simulationsmodells.



Abbildung 8: Simulationsmodell

Nach Aufbereitung der aufgezeichneten Datensätze liegen insgesamt 108 Sammeltouren für die weitere Auswertung vor. Die Datensätze der 108 Sammeltouren sind alle zwischen den Monaten Oktober und Dezember 2018 aufgezeichnet worden. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Verteilung der Abfallsammeltouren auf die Wochentage:

Fahrzeug-ID	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Summe
ASF1	12	9	9	9	9	3	51
ASF2	13	11	11	9	11	2	57
Summe	25	20	20	18	20	5	108

Tabelle 4: Überblick Abfallsammeltouren

Bevor in den nachfolgenden Unterkapiteln 4.2.1, 4.2.2 und 4.2.3 die Auswertung der in diesem Projekt entwickelten Kenngrößen vorgestellt wird, wird zunächst ein allgemeiner Überblick über die Grobstruktur der aufgezeichneten Daten gegeben.

## 4.2 Datenauswertung ATOS-Emissionscontrolling

Im Durchschnitt finden bei jeder der 108 Sammeltouren 931 Behälterentleerungen statt. Während bei der Sammeltour mit der geringsten Anzahl erfasster Behälterentleerungen 315 Schüttvorgänge im System registriert sind, liegt der höchste Wert bei 1057 Behälterentleerungen. Das Minimum von 315 Behälterentleerung resultiert aus einer Sammeltour, welche lediglich ein einziges Sammelgebiet umfasste. Der mittlere Behälterabstand über alle Sammeltouren beträgt 20,8 Meter. Dabei beträgt die Standardabweichung 5,6 Meter. Der geringste mittlere Behälterabstand einer Sammeltour beträgt 12 Meter und die Maximaldistanz zwischen den Behältern liegt bei einem Mittelwert von 35 Metern. Im Durchschnitt legen die Fahrzeuge für die Entleerung der Behälter 424 Stopp ein. Dieser Wert ist näherungsweise mittels der ATOS-Systemdaten berechnet, indem die Behälterentleerungen, die bei unveränderten geographischen Koordinatenpositionen der ASF während des Sammlungsprozesses stattfinden, zu einem Stopp zusammengefasst sind. Der mittlere Dieselkraftstoffverbrauch pro Tour liegt bei 47,6 Litern, was einem THG-Emissionswert von 154,2 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalent entspricht. Die Standardabweichung des Kraftstoffbedarfes pro Sammeltour liegt bei 10,2 Litern. Dabei benötigt ASF1 durchschnittlich 43,7 Liter und ASF2



51,1 Liter Kraftstoff. Die Verteilung des Kraftstoffbedarfs auf die einzelnen Teilprozesse einer Sammeltour sind in Abbildung 9 dargestellt. Als Grundlage der Auswertung dient hierbei der Mittelwert über alle 108 Sammeltouren.

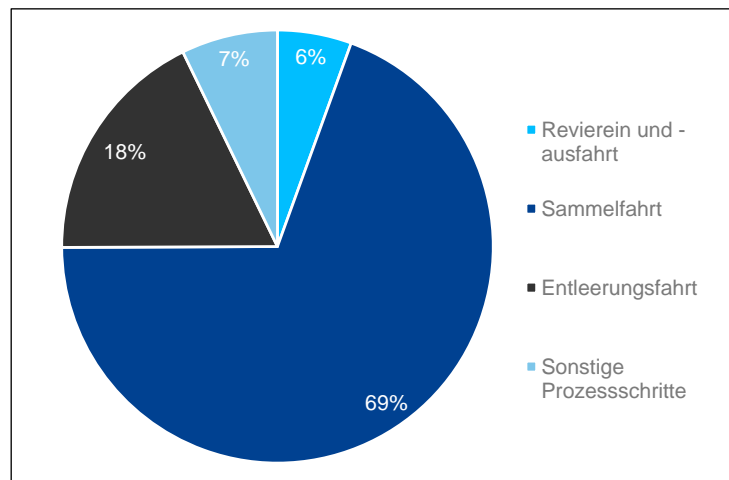


Abbildung 9: Prozentuale Kraftstoffverteilung

Wie der Abbildung zu entnehmen ist, ist der Prozess der Sammelfahrt mit 69 Prozent des Gesamtkraftstoffverbrauchs sehr energieintensiv. Für den Prozess der Entleerungsfahrt wird, im Vergleich zur Revierein- und -ausfahrt, aufgrund des höheren Ladevolumens nach Beendigung der Sammelfahrt und des damit einhergehenden höheren Gewichts mehr Kraftstoff benötigt. Der Kraftstoffverbrauch während der Entleerungsfahrt setzt sich aus mehreren Teilprozessen zusammen. Zum einen ist der Kraftstoffbedarf für die Fahrt aus dem Sammelrevier zur Deponie (ca. 10 Prozent) berücksichtigt. Zum anderen ist der Kraftstoffverbrauch auf der Deponie für das Entleeren der Fahrzeuge (ca. 5 Prozent) Bestandteil dieser Kategorie. Darüber hinaus ist die potentiell stattfindende Rückfahrt in das Sammelrevier der Entleerungsfahrt zugerechnet. Der benötigte Kraftstoff während Leer- und Pausenfahrten sowie den Ausfallzeiten sind unter der Kategorie sonstige Prozessschritte zusammengefasst.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden zunächst die Kenngrößen Sammlungseffizienz, Behälter- und Stundenkraftstoffverbrauch für die Hecklader analysiert. Betrachtungsgegenstand ist der Teilprozess der Sammelfahrt sowie die Sammeltour. In Kapitel 4.3 erfolgt die Gegenüberstellung von Heck- und Seitenlader. Das Konfidenzniveau für die statistischen Auswertungen der nachfolgenden Daten liegt bei 95 Prozent.

#### 4.2.1 Behälterkraftstoffverbrauch

Der Behälterkraftstoffverbrauch definiert die benötigte Menge an Kraftstoff, die für die Entleerung eines Abfallbehälters während der Sammelfahrt benötigt wird. Abbildung 10 zeigt den Verlauf des Kraftstoffverbrauchs pro 100 Behälter in Abhängigkeit des Behälterabstands während der Sammelfahrt. Die Ermittlung dieser Größe basiert auf Anwendung von Formel 14 aus Kapitel 3.1. Der durchschnittliche Behälterkraftstoffverbrauch für beide Hecklader liegt bei 3,5 Litern pro 100 Behälter. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass mit zunehmenden Behälterabstand der Behälterkraftstoffverbrauch ansteigt, wobei der Anstieg bei ASF1 stärker ausfällt als bei ASF2. Ein Grund für den höheren Behälterkraftstoffverbrauch von ASF1 liegt in der durchschnittlich geringeren Anzahl an gesammelter Abfallbehälter pro Sammeltour (ASF1: 919 Behälter und ASF2: 940 Behälter) und der damit einhergehenden Verzerrung durch die rechnerische Umverteilung des benötigten Kraftstoffverbrauchs auf die Behälterentleerungen. Zudem ist die Heterogenität der Beschaffenheit der Sammlungsreviere (z. B. Verkehrsbelastung, Geländeprofil etc.) als weiterer Grund anzuführen. Da dieser Aspekt in diesem Forschungsprojekt nicht ausreichend Berücksichtigung findet, sollte zukünftig in etwa ein kontinuierliches Höhenprofil bei der Planung umwelteffizienter Sammeltouren miteinbezogen werden. Das um Ausreißer bereinigte und angepasste Bestimmtheitsmaß für die linearisierten Behälterkraftstoffverbräuche beträgt für ASF1 0,695 und für ASF2 0,678. Somit erklärt der Behälterabstand als unabhängige Variable für beide Hecklader knapp 70 Prozent der Varianz des Behälterkraftstoffverbrauchs während der Sammelfahrt, wobei beide linearen Funktionsgleichungen statistisch signifikant sind ( $p < 0,0001$ ). Weitere externe Faktoren wie z. B. der Füllgrad der Abfallbehälter beeinflussen den Behälterkraftstoffverbrauch und somit auch das Bestimmtheitsmaß.

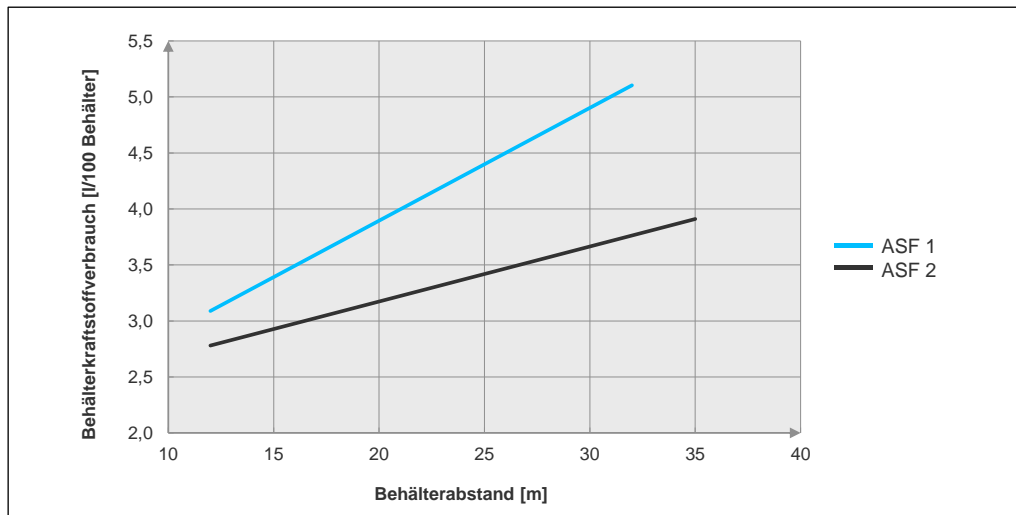


Abbildung 10: Behälterkraftstoffverbrauch

Wird der Behälterkraftstoffverbrauch für jede Sammeltour nach Formel 15 ermittelt und der Mittelwert über alle 108 Sammeltouren gebildet, ergibt sich ein mittlerer Behälterkraftstoffverbrauch von 5,1 Litern. Das entspricht einem THG-Emissionswert von 16,6 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro 100 Behälter.

#### 4.2.2 Stundenkraftstoffverbrauch

Der Stundenkraftstoffverbrauch gibt Auskunft darüber, wie viel Kraftstoff für die einstündige Durchführung eines Prozesses benötigt wird. Abbildung 11 zeigt den nach Formel 16 berechneten Stundenkraftstoffverbrauch in Abhängigkeit des Behälterabstands für den Teilprozess der Sammelfahrt. Der Mittelwert des Stundenkraftstoffverbrauchs liegt für beide Fahrzeuge bei 7,1 Litern pro Stunde. Im Gegensatz zum Behälterkraftstoffverbrauch benötigt ASF1 im Hinblick auf den Stundenkraftstoffverbrauch während der Sammelfahrt weniger Kraftstoff als ASF2. Die durchschnittlich geringere Behälteranzahl je Sammeltour sowie die Diskrepanz in der Beschaffenheit sowie der technischen Ausstattung der Hecklader (z. B. aufgrund des Fahrzeugaltersunterschieds) sind als Gründe für den besseren Stundenkraftstoffverbrauch des ASF1 zu nennen. Hierbei ist jedoch auffallend, dass ASF1 durchschnittlich eine geringfügig höhere Behälterladeleistung pro Stunde bei einem um 2,2 Meter größeren mittleren Behälterabstand erzielt als ASF2, obwohl mit zunehmenden Behälterabstand eine abnehmende Behälterladeleistung zu erwarten ist. Treten derartige Ergebnisse über ei-

nen längeren Zeitraum auf, lassen sich beispielsweise gezielt Handlungen zur Effizienzsteigerung oder anderen ablauforganisatorischen Maßnahmen ableiten. Erneut ist das Gleichungsmodell signifikant ( $p < 0,001$ ), jedoch beträgt das korrigierte Bestimmtheitsmaß für ASF1 lediglich 0,241 und für ASF2 0,194. Das bedeutet, dass der Behälterabstand als unabhängige Variable lediglich 19 bzw. 24 Prozent der Varianz des Stundenkraftstoffverbrauchs erklärt, weswegen umfangreichere Prozessanalysen im Feld vorgeschlagen werden, um die auftretende Varianz umfassend zu untersuchen.

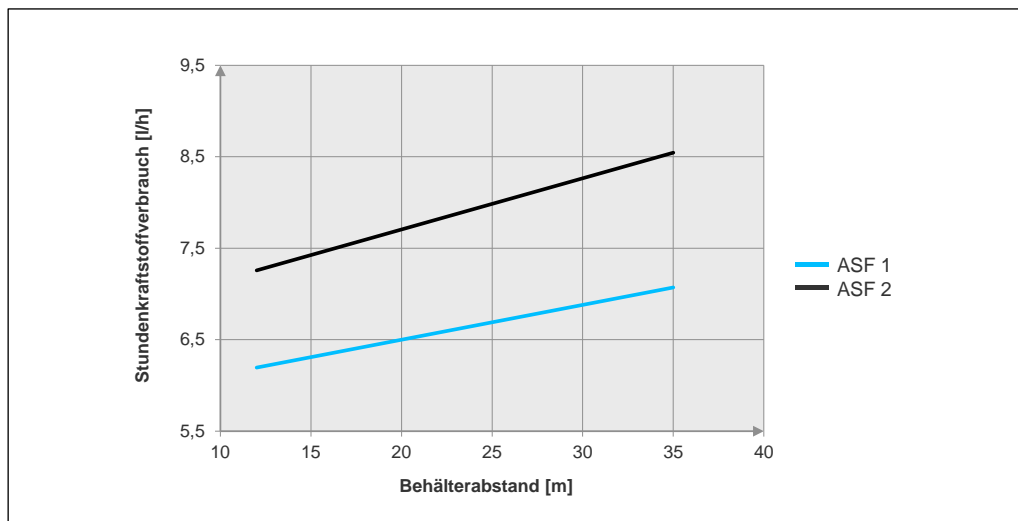


Abbildung 11: Stundenkraftstoffverbrauch

Wird mittels Formel 17 der Mittelwert des Stundenkraftstoffverbrauchs für alle 108 Sammeltouren berechnet, liegt dieser bei 5,9 Litern pro Stunde. Dieser Wert liegt unter dem durchschnittlichen Stundenkraftstoffverbrauch der energieintensiven Sammelfahrt. Somit emittieren die untersuchten ASF bei einem einstündigen Betriebseinsatz 19,3 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalent bezogen auf die Durchschnittswerte der Sammeltouren.

#### 4.2.3 Sammlungseffizienz

In Abbildung 12 ist der exponentielle Verlauf der Sammlungseffizienz in Relation zum Behälterabstand abgebildet. Die Berechnung der Sammlungseffizienz für den Prozess der Sammelfahrt basiert auf Formel 18. Im Unterschied zum Behälter- und Stundenkraftstoffverbrauch wird hierbei auf einen exponentiellen Funktionsverlauf zurückge-

griffen, da dieser die zugrundeliegende Datenmenge in diesem Fall am besten beschreibt. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß für ASF1 beträgt 0,559 und für ASF2 0,423, weswegen der Behälterabstand als unabhängige Variable knapp 50 Prozent der Varianz der Sammlungseffizienz während der Sammelfahrt erklärt.

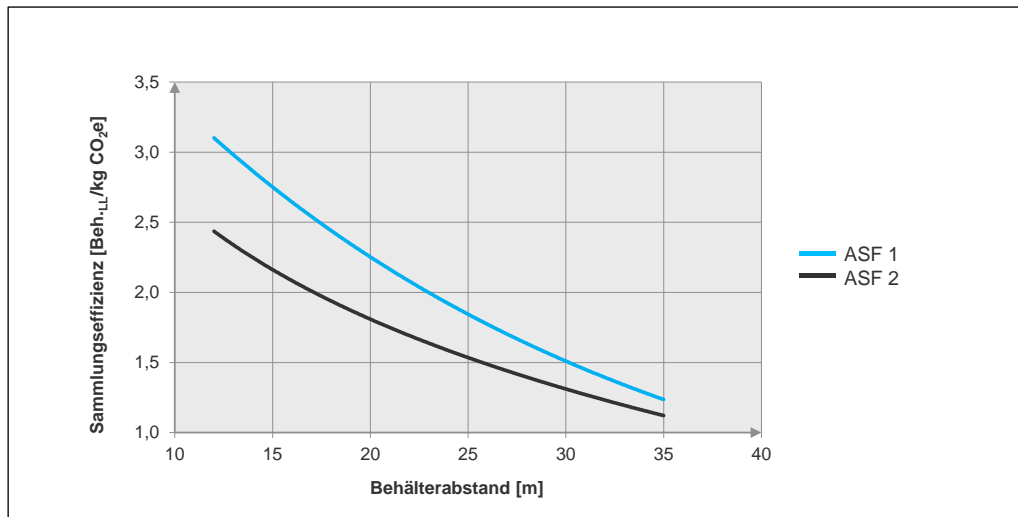


Abbildung 12: Sammlungseffizienz

Der Mittelwert der Sammlungseffizienz der Hecklader beträgt für die Gesamtheit der Sammelfahrten einen Wert von 2,0, wobei mit zunehmendem Behälterabstand die Sammlungseffizienz für beide Fahrzeuge abnimmt. Eine geringere Behälterladeleistung und ein zunehmender Kraftstoffverbrauch mit steigendem Behälterabstand sind als Gründe für die sinkende Sammlungseffizienz während des Betrachtungszeitraums aufzuführen. Wie ebenfalls Abbildung 12 zu entnehmen ist, erzielt ASF1 bei geringem Behälterabstand eine höhere Sammlungseffizienz als ASF2, wobei das Delta der Sammlungseffizienz zwischen den Fahrzeugen mit steigendem Behälterabstand geringer wird. Eine Erhöhung der Fuhrpark-Sammlungseffizienz ist in etwa realisierbar, wenn ASF1 für Sammlungsreviere mit geringem Behälterabstand und ASF2 für Gebiete mit großem Behälterabstand eingesetzt werden.

Wird der Mittelwert der Sammlungseffizienz über die Gesamtheit der Sammeltouren mittels Formel 19 berechnet, ergibt sich eine Sammlungseffizienz von 1,4. Die Sammlungseffizienz der Sammeltour liegt unter dem selbigen Durchschnittswert der Sammelfahrt, da die gleichbleibende Behälterladeleistung durch einen höheren Gesamtemissionswert dividiert wird.

### 4.3 Gegenüberstellung von Heck- und Seitenlader

Die im Projekt Az: 31627/01 stattgefundenene Datenauswertung basiert insbesondere auf dem Fahrzeugtyp des Seitenladers. Da in diesem Projekt die zur Auswertung vorliegenden Informationen von Heckladern stammen, werden die beiden Fahrzeugtypen für die weitere Validierung der Methodik in diesem Kapitel vergleichend gegenübergestellt. Des Weiteren ist mit den verfügbaren ATOS-Datensätzen die Erweiterung der Methodik um zusätzliche Parameter gelungen. Grundsätzlich orientiert sich der Aufbau der Tabelle 5 an der im Vorgängerprojekt Az: 31627/01 erstellten Systematik. Hierbei werden die Kategorien Geschwindigkeit, Kraftstoffverbrauch und Zeitanteile unterschieden, auf die nun im Detail eingegangen wird.

Verbrauchssatz		Seitenlader	Hecklader
Geschwindigkeit	Geschwindigkeit des ASF während der Reviereinfahrt und -ausfahrt [km/h]	-	26
	Geschwindigkeit des ASF während der Entleerungsfahrt [km/h]	-	23
Kraftstoffverbrauch	Kraftstoffverbrauch des ASF während der Revierfahrt [l/100km]	26	46
	Kraftstoffverbrauch des ASF während der Sammelfahrt [l/100km]	-	177,9
	Kraftstoffverbrauch des ASF während der Entleerungsfahrt, Nutzlast = max [l/100km]	30	55,4
	Benötigter Kraftstoff bei einem Stopp während der Sammelfahrt [l]	0,08	0,08
	Benötigter Kraftstoff pro 100 Behälter während der Sammelfahrt [l]	-	3,5
Zeitanteile	Benötigte Zeit für einen Stopp [min]	0:32	0:40
	Benötigte Zeit für einen Behälter [min]	0:32	0:18

Tabelle 5: Verbrauchssätze Seiten- und Hecklader

Mit Hilfe der vorliegenden Fahrzeuggeschwindigkeiten lassen sich die durchschnittlichen Geschwindigkeiten der Hecklader während der Reviereinfahrt und -ausfahrt sowie der Entleerungsfahrt ermitteln. Während der Entleerungsfahrt erreichen die Hecklader eine geringere mittlere Geschwindigkeit als während der Reviereinfahrt und -ausfahrt, da die ASF während der Entleerungsfahrt vollbeladen sind. Aufgrund der teilweise inhomogenen Datengrundlage sind die durchschnittlichen Geschwindigkeiten

der Teilprozesse um Ausreißer bereinigt. Verzerrungen in der Datenstruktur treten beispielsweise auf, wenn der Fahrer/in des ASF bei Erreichen des Betriebshofs nicht sofort die Beendigung der Abfallsammeltour im System vermerkt. Für den Fahrzeugtyp des Seitenladers liegen keine Geschwindigkeitsinformationen vor.

Bei Betrachtung der Kategorie Kraftstoffverbrauch ist auffallend, dass der Hecklader in allen Prozessschritten einen höheren Kraftstoffverbrauch bezogen auf die zurückgelegte Wegstrecke aufweist als der Seitenlader. Wenngleich die ansonsten gängige Angabe des Kraftstoffverbrauchs in Liter pro 100 Kilometer in der kommunalen Abfallwirtschaft für den Prozess der Sammelfahrt als ungeeignet erscheint, sind aus Gründen der Vollständigkeit der Kraftstoffverbrauch pro 100 Kilometer für die einzelnen Teilprozesse in Tabelle 5 angegeben. Denn beispielsweise beeinflusst das ständige Beschleunigen und Abbremsen des ASF sowie der Schüttvorgang und das energieintensive Verdichten des Abfalls während der Sammelfahrt den Kraftstoffverbrauch beträchtlich, weswegen insbesondere für diesen Abschnitt der Sammeltour andere Kenngrößen für die Bewertung des Prozesses heranzuziehen sind. Insgesamt zeigen die Auswertungen, wie bereits in Abbildung 9 dargestellt, dass der Kraftstoffverbrauch während der Sammelfahrt mit durchschnittlichen 177,9 Litern pro 100 Kilometer höher ist als der Verbrauch während der Reviereinfahrt und -ausfahrt sowie der Entleerungsfahrt. Zusätzlich unterliegt dieser Wert einer hohen Standardabweichung (36,2 Liter pro 100 Kilometer). Dies ist zurückzuführen auf die unterschiedlichen Verbrauchswerte der Hecklader, denn während ASF1 152 Liter je 100 Kilometer Sammelfahrt benötigt, ist dieser Wert bei ASF2 mit 201 Litern wesentlich höher. Wird der Gesamtkraftstoffverbrauch je 100 Kilometer über alle Teilprozesse betrachtet, ergibt sich für die Hecklader einen Mittelwert von 115,3 Litern je 100 Kilometer. Diese Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen aus dem Projekt Az: 31627/01. Der geringste ermittelte Kraftstoffwert einer Sammeltour liegt bei 72,9 Litern auf 100 Kilometer und der höchste Kraftstoffverbrauch liegt bei 198,4 Litern. Die Standardabweichung beträgt hierbei 23,7 Liter je 100 Kilometer. Des Weiteren zeigt sich, dass die Werte des Heckladers während der Reviereinfahrt und -ausfahrt sowie der Entleerungsfahrt beinahe das Zweifache des Werts des Seitenladers betragen. Mögliche Erklärungen für diesen Effekt sind die Eigenschaften der Sammlungsreviere sowie die verkehrstechnischen Rahmenbedingungen im städtischen Datenaufzeichnungsgebiet dieses Pilotprojekts.

Die Daten des Projekts Az: 31627/01 stammen aus dem Odenwaldkreis und dem Stadtgebiet Göppingen. Hier sind umfangreichere Untersuchungen notwendig, um einen fundierten Erwartungswert zu ermitteln, der dann einerseits mehr ASF berücksichtigt und andererseits auch ländliche, weniger dicht besiedelte Siedlungsgebiete in die Analyse miteinbezieht. Im Kontext der kommunalen Abfallwirtschaft sind prozessspezifische Kenngrößen besser geeignet, die den Kraftstoffverbrauch in Relation zu branchenspezifischen Größen wie z. B. die Anzahl an Behälterentleerungen oder Stopps setzen. Der mittlere benötigte Kraftstoffverbrauch für einen Stopp scheint auf den ersten Blick für beide Fahrzeugtypen identisch zu sein. Die Datenauswertungen für den Teilprozess der Sammelfahrt für die Hecklader haben jedoch gezeigt, dass ASF1 einen durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch pro Stopp von 0,07 Litern erzielt, während ASF2 mit 0,09 Litern pro Stopp einen höheren Wert aufzeigt. Ergänzend ist in der Tabelle der Kraftstoffbedarf pro 100 Behälter für den Prozess der Sammelfahrt für die Hecklader ausgewiesen.

Die in der dritten Kategorie der Tabelle 5 ausgewiesenen Zeitanteile sind unabhängig vom Kraftstoffverbrauch. Die benötigten Zeitanteile je Stopp bzw. Behälter sind auf den Prozess der Sammelfahrt bezogen. Für den Seitenlader stimmt die benötigte Zeit für einen Stopp mit der Zeit für einen Behälter überein (jeweils 32 Sekunden), denn aufgrund der spezifischen Kippvorrichtung und der damit verbundenen stetigen Neupositionierung des Fahrzeugs, findet bei jedem Fahrzeugstopp zumeist eine Behälterentleerung statt. Dahingegen sind beim Hecklader während eines Stopps mehrere Behälterentleerungen realisierbar. Die Hecklader benötigen für einen Stopp 40 Sekunden und die Entleerung eines Behälters 18 Sekunden.

Im nächsten Schritt erfolgt die Erweiterung der im Projekt Az: 31627/01 durchgeführten Regressionsanalysen. Tabelle 6 zeigt die für die Seiten- und Hecklader ermittelten Regressionsgeraden für die Seiten- und Hecklader. Zunächst wird die lineare Regression mit der Zeit in Sekunden als abhängige Variable und der Behälterabstand in Metern als unabhängige Variable betrachtet, um die Zeit zwischen den Behälterentleerungen abzubilden. Die Ergebnisse der Regressionsanalyse für den Hecklader entsprechen weitestgehend den Ergebnissen des Seitenladers. Bei der Regressionsgeraden des Heckladers ist der Achsenabschnitt im Vergleich zum Seitenlader geringer, was auf



einen geringeren Zeitanteil für das genaue Positionieren am Behälter zurückzuführen ist. Obwohl die Variable erneut signifikant ( $p < 0,001$ ) ist, lassen sich bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,289 wiederum lediglich knapp 30 % der Varianz durch die Behälterentfernung erklären. Das geringe Bestimmtheitsmaß ist dadurch erklärbar, dass das Holen und Zurückstellen des Behälters, der Entleerungsprozess und das Losfahren den wesentlichen Anteil der Zeit in Anspruch nimmt.

Regressionsgeraden	Seitenlader	Hecklader
Zeit zwischen Leerungen	$y = 23 + 0,2 * Entfernung$	$y = 13 + 0,2 * Entfernung$
Kraftstoffverbrauch	$y = 27,55 + 0,63 * Sammelentfernung + 0,55 * sonstige Entfernung + 1,15 * Tonnage$	$y = 22,55 + 0,61 * Sammelentfernung + 0,55 * sonstige Entfernung$

Tabelle 6: Regressionsgeraden Seiten- und Hecklader

Des Weiteren zeigt Tabelle 6 eine multiple Regressionsgleichung für den Kraftstoffverbrauch. Hierbei ist der Gesamtkraftstoffverbrauch als abhängige Variable definiert. Die unabhängigen Variablen sind die Sammelentfernung und die sonstige Entfernung. Aufgrund der vorliegenden Datengrundlage ist die Einbindung der Variable Tonnage in diesem Projekt nicht möglich, weswegen der Vergleich der beiden Fahrzeugtypen lediglich eingeschränkt möglich ist. Mit einem angepassten Bestimmtheitsmaß von 0,614 werden knapp über 60 Prozent der Varianz durch die gewählten unabhängigen Variablen erklärt. Das Modell ist für alle Variablen signifikant ( $p < 0,0001$ ). Wie für den Seitenlader, gilt auch für den Hecklader, dass die Sammelentfernung einen stärkeren Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch hat als die sonstigen Entfernungen.

## 5. Fazit

Das Ziel dieses Forschungsprojektes war die Implementierung einer Praxismethodik für ein umweltschonendes Sammel- und Transportkonzept für die optimale Einsatzgrobplanung und ökologische Fahrzeugauswahl. Diesbezüglich wurde die Methodik an die Praxisanforderungen angepasst und auf die Prozesse der Software ATOS ausgerichtet. Das in diesem Kontext entwickelte modulare ATOS-Emissionscontrolling umfasst die Kenngrößen Sammlungseffizienz, Behälter- und Stundenkraftstoffverbrauch. Basierend auf diesen Kennzahlen lassen sich die THG-Emissionen in der

kommunalen Abfallwirtschaft überwachen und optimieren. Die Kennzahlen verfügen insbesondere über eine hohe Aussagekraft, wenn sie in Relation zum Behälterabstand betrachtet werden. Für die Erweiterung und Validierung der Methodik konnte auf entsorgungsspezifische Daten aus dem Stadtgebiet Oberhausen zurückgegriffen werden, sodass im Projektverlauf der Fahrzeugtyp eines Heckladers erfolgreich zur bestehenden Systematisierung hinzugefügt werden konnte. Somit wurden die Ziele des Projektes erreicht.

Da die Datengrundlage aus der Implementierungsphase eines Pilotprojekts stammt, sind Langzeituntersuchungen erforderlich, um die auftretenden Ergebnisse über einen längerfristigen Zeitraum zu beobachten, sodass eine größere Datenbasis für das Abwägen von Handlungsalternativen vorliegt. Auch sind neue Möglichkeiten für die Integration und Beschaffung von Geoinformationen zu erarbeiten, um eine wirtschaftlich softwareseitige Anbindung und Abbildung der Siedlungsstrukturen zu ermöglichen. Daraus lassen sich weitere Parameter für die umwelteffiziente Fahrzeugauswahl und Routenplanung ableiten. In diesem Kontext sind auch Bestrebungen notwendig, um beispielsweise Strecken- bzw. Höhenprofile in den Optimierungsprozess zu integrieren. Ein weiterer Ansatz für Forschungsarbeiten bietet der hohe Kraftstoffverbrauch der ASF während der Sammelfahrt. Hier gilt es innovative Geschäftsmodelle zu entwickeln, mit denen die Sammlungseffizienz gesteigert werden kann. Des Weiteren ist die Entwicklung neuartiger Technologien (z. B. alternative Antriebsformen) für die systematische Reduzierung der THG-Emissionen kontinuierlich voranzutreiben. Diese Punkte sind insbesondere angesichts neuer gesetzlicher Regelungen wie beispielsweise innerstädtischer Dieselfahrverbote für Technologien von Relevanz, die nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen. In diesem Zusammenhang ist auch empirisch zu untersuchen, inwiefern Maßnahmen zur Verbesserung des Fahrstils (z. B. durch Fahrschulungen) den Kraftstoffbedarf und somit auch die THG-Emissionen in der kommunalen Abfalllogistik reduzieren. Das organisatorische Zusammenführen der bestehenden Methodik mit ergänzenden Softwareprodukten, welche in der Entsorgungsbranche z. B. für die übergeordnete Personaleinsatzplanung oder das strategische Flottenmanagement eingesetzt werden, würde zu einer ganzheitlichen Lebenszyklusbetrachtung unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Faktoren führen.

## Literaturverzeichnis

- [Bun18a] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT: *Klimaschutz in Zahlen*. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik, 2018.
- [Bun18b] BUNDESREGIERUNG: *Ein neuer Aufbruch für Europa. Eine neue Dynamik für Deutschland. Ein neuer Zusammenhalt für unser Land*. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 19. Legislaturperiode, 2018.
- [De11] DETERDING, S. et al.: *From Game Design Elements to Gamefulness: Defining "Gamification"*. In Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference: Envisioning Future Media Environments, S. 9-15, 2011.
- [DIN13] DIN EN 16258: *Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen*. Deutsche Fassung EN 16258, 2013.
- [Eur17] EUROSTAT: *Aufkommen von Siedlungsabfällen*. [https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=cei\\_pc031&language=de](https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=cei_pc031&language=de), 2017.
- [Ka18] KAZA, S. et al.: *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. World Bank Group, Washington, 2018.
- [Lud18] LUDWIG, D.: *16.000 Mülltonnen in Oberhausen sind noch ohne Etikett*. <https://www.nrz.de/staedte/oberhausen/16-000-muelltonnen-in-oberhausen-sind-noch-ohne-etikett-id215551757.html>, 2018.
- [SG19] STROGIES, M. und GNIFFKE, P.: *Nationaler Inventarbericht. Zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2017*, 2019.
- [Sta18] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Statistisches Jahrbuch 2018*, 2018.
- [SW16] SCHLOZ, F. und WEHKING, K.-H.: *Entwicklung einer Methodik zur Berechnung eines umweltschonenden Sammel- und Transportkonzeptes auf Basis eines Algorithmus für individuelle Sammelgebiete für die optimale Einsatzgrobplanung und ökologische Fahrzeugauswahl*. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Abschlussbericht, 2016.

- [SyW19] SYWATEC LOGISTIC GMBH: *Transponder und Microchip*. <https://www.sywatec.de/transponder-und-microchip>, 2019.
- [Szy19] SZYMANIAK, P.: *Neue Müllabfuhr-Regeln: Müllwerker schicken letzte Warnung*. <https://www.ikz-online.de/staedte/oberhausen/muellwerker-schicken-letzte-warnung-an-hauseigentuemmer-id216232131.html>, 2019.
- [Umw18] UMWELTBUNDESAMT: *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll*, 2018.
- [Uni15] UNITED NATIONS: *Adoption of the Paris Agreement Framework*. Framework Convention on Climate Change, 2015.
- [Uni98] UNITED NATIONS: *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, 1998.
- [WAZ18] WAZ: *WBO warnt: Keine Leerung für Mülltonnen ohne Etikett*. <https://www.waz.de/staedte/oberhausen/wbo-warnt-keine-leerung-fuer-muelltonnen-ohne-etikett-id216061317.html>, 2018.
- [WBO19] WBO WIRTSCHAFTSBETRIEBE OBERHAUSEN GMBH: *Entsorgungsspezialist - Dienstleister der Stadt Oberhausen*. <https://www.wbo-online.de/abfallentsorgung/uebersicht/>, 2019.
- [WSB16] WEBER, J.; SCHÄFFER, U.; BINDER, C.: *Einführung in das Controlling*. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2016.