

**Entwicklung einer Methodik zur Berechnung eines umweltschonenden
Sammel- und Transportkonzeptes auf Basis eines Algorithmus für individuelle
Sammelgebiete für die optimale Einsatzgrobplanung und ökologische
Fahrzeugauswahl**

Band 2

**Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt
gefördert unter dem AZ: 31627 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



von

**Franziska Schloz
Karl-Heinz Wehking**

November 2016



Bezugsmöglichkeiten des Abschlussberichtes:

Institut für Fördertechnik und Logistik
Abteilung Logistik
Projektleitung: Franziska Schloz, M.Sc.
Holzgartenstraße 15 B
70174 Stuttgart
Tel.: 0711 685-83698
E-Mail: franziska.schloz@ift.uni-stuttgart.de

**Entwicklung einer Methodik zur Berechnung eines umweltschonenden
Sammel- und Transportkonzeptes auf Basis eines Algorithmus für individuelle
Sammelgebiete für die optimale Einsatzgrobplanung und ökologische
Fahrzeugauswahl**

Band 2

**Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt
gefördert unter dem AZ: 31627 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



von

**Franziska Schloz
Karl-Heinz Wehking**

November 2016



Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	31627/01	Referat	23	Fördersumme	122.428 €
----	-----------------	---------	-----------	-------------	------------------

Antragstitel **Entwicklung einer Methodik zur Berechnung eines umweltschonenden Sammel- und Transportkonzeptes auf Basis eines Algorithmus für individuelle Sammelgebiete für die optimale Einsatzgrobplanung und ökologische Fahrzeugauswahl**

Stichworte Energie, Abfall, Treibhausgase, Logistik, Software, Transport

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
20 Monate	30.01.2015	29.09.2016	1

1 Zwischenbericht

Bewilligungsempfänger	Heilemann GmbH	Tel	0711/685-83698
	Boßlerstr. 27 - 31	Fax	0711/685-83769
	73240 Wendlingen	Projektleitung	
		Franziska Schloz	
		Bearbeiter	
		Artur Katkow	

Kooperationspartner

RESO GmbH Relystr. 14 64720 Michelstadt	Universität Stuttgart Institut für Fördertechnik und Logistik Holzgartenstr. 15B 70174 Stuttgart
---	---

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Auf jeden Bürger in Deutschland entfällt heute über eine halbe Tonne Siedlungsabfall im Jahr. Um diese Abfallmenge zu entsorgen, werden in regelmäßigen Abständen kommunale Entsorgungsfahrten zur Verbringung des Abfalls durchgeführt. Ein Sammelfahrzeug emittiert dabei durchschnittlich im Einsatz ca. 80 Tonnen an Treibhausgasen bei einem Dieselverbrauch von ca. 26.000 Litern pro Jahr. Das Projektziel war die Entwicklung einer Methodik zur optimalen Fahrzeugsystemwahl in individuellen Sammelgebieten zur Reduzierung der Emissionen. Durch die verhältnismäßig langsame aber stetige Entwicklung der urbanen und ruralen Regionen sind somit entsprechende Fahrzeugkonfigurationen anzupassen, die dem jeweiligen Charakter der Sammelgebiete entsprechen. Auf diese Weise wird eine Möglichkeit aufgezeigt, wie die Umwelteffizienz von Sammelsystemen in bestimmten Regionen optimieren werden kann. Die Methodik analysiert und bewertet ausgewählte Entsorgungsfahrzeuge und Behältersysteme sowie Distanzen zu Sammelgebieten, Behandlungsanlagen und Siedlungsstrukturen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Mit Hilfe der beteiligten mittelständischen Entsorgungsunternehmen wurden Prozessabläufe während der Sammlung und während des Transports in der Praxis analysiert und für jede untersuchte Fahrzeugkombination eine Prozesskette dargestellt. Weiterhin wurden technische Größen der betreffenden Fahrzeuge (z. B. Ladevolumen) festgehalten, die den Ablauf der festgelegten Prozesse beeinflussen. Zeitgleich wurden auf Basis der erstellten Prozessketten ausgewählte Sammelgebiete auf die Siedlungsstruktur hin untersucht. Hier galt es quantitative Unterscheidungsmerkmale in Form von Parametern in den einzelnen Siedlungsstrukturen zu identifizieren. Auf diese Weise konnten Eigenheiten einer Siedlung herausgearbeitet werden. Weiterhin wurden durch die Standorte der Sammelgebiete und der entsprechenden Abfallbehandlungsstationen unterschiedliche Entfernungen identifiziert, die verschiedene Fahrzeugkombinationen mit und ohne Umschlagprozesse erfordern. Als Methode wurde die Ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung gewählt, die um Emissionsfunktionen erweitert wurde. Somit ist neben der Prognose der Kosten des logistischen Entsorgungsprozesses eine Treibhausgasbilanzierung der Prozessketten möglich. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Software-Demonstrator erstellt.

Ergebnisse und Diskussion

Im Projekt wurde mittels einer Methodik aufgezeigt, wie Emissionen in der kommunalen Abfallsammlung über eine Erweiterung der Ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung um Emissionsfunktionen, fahrzeugspezifisch ermittelt werden können. Hierbei werden zum einen unterschiedliche Abfallsammelfahrzeuge aber auch unterschiedliche Transportarten berücksichtigt. Es konnte anhand der Analyse der vorliegenden Daten durch zwei Fahrzeuge der Praxispartner weiterhin gezeigt werden, dass sich die Emissionen durch das genutzte Fahrzeug und die Gestaltung des Transportes deutlich unterscheiden.

Durch die vorhandene Datenbasis konnte die Methodik erstellt und die zu berücksichtigten Parameter des Modells identifiziert werden, in einem nächsten Schritt sollten nun die Ausprägungen dieser Parameter ermittelt werden. Es sind weitere Tourdaten von den vorhandenen und anderen Fahrzeugkonfigurationen nötig, um die Parameterausprägungen dementsprechend die Verbrauchssätze und Ressourcentreiber der einzelnen Teilprozesse für verschiedene Abfallsammeltouren ermitteln zu können. So gilt es beispielsweise zu untersuchen, inwiefern sich die Zeiten und Kraftstoffverbräuche pro Stopp des Abfallsammelfahrzeuges in Abhängigkeit des eingesetzten Fahrzeugs und der gesammelten Behälter unterscheiden.

Um die unterschiedliche Beschaffenheit der Siedlungsgebiete innerhalb eines Sammelgebietes mit den Auswirkungen auf die Prozesse berücksichtigen zu können, wurden Geoinformationen über die Gebiete benötigt. Hierzu wurde auf Open Source-Daten zurückgegriffen. Es hat sich gezeigt, dass diese nicht vollständig sind und überarbeitet werden müssen. Dies war für die untersuchten Sammelgebiete möglich, schließt die Nutzung dieser Daten für eine allgemeine Anwendung allerdings aus. Es muss hier eine andere, aus Kostensicht akzeptable Lösung gefunden werden.

Es erfolgte die Abbildung der Methodik in einem auf MS-Excel basierenden Demonstrator. Hierfür wurden die ermittelten Zusammenhänge der Modellparameter und die bekannten Parameterausprägungen in der Software hinterlegt. Die übrigen Informationen können über Eingabemasken vom Anwender hinzugefügt werden. Für eine Anwendung in der Praxis ist jedoch neben der Verallgemeinerung der Methodik eine Verbindung der Software mit Schnittstellen zu den Fahrzeugen und einem Geoinformationssystem sinnvoll. Es gilt, die Entsorgungsunternehmen dahingehend zu motivieren, die Emissionsproblematik bei der Tourenplanung zu berücksichtigen. Hierfür müssen Nutzungsbarrieren, wie der Aufwand durch die Emissionsanalyse, reduziert und die Informationsbeschaffung vereinfacht werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Ökonomisch und ökologisch optimierte Fahrzeugeinsatzplanung in der Abfallsammlung. Vortrag im Rahmen der IFAT – Weltleitmesse für Wasser-, Abwasser-, Abfall- und Rohstoffwirtschaft, 31.05.16, München.

Forschung: Optimierte Einsatzplanung für Abfallsammelfahrzeuge, IFT-Jahresbericht 2014/2015, S. 21.

Fazit

In dem Projekt wurde eine Methode entwickelt, mit der es ermöglicht wird, die bei der Abfallsammeltour anfallenden Emissionen und Kosten zu berechnen. Die Methodik berücksichtigt verschiedene Abfallsammelfahrzeuge, aber auch die Möglichkeit eines indirekten Transports. Zur Berechnung wurden die Einflussparameter auf die Emissionen anhand der vorhandenen Daten untersucht. Diese Parameter sollten jedoch anhand weiterer Daten validiert und erweitert werden. Der erstellte Demonstrator setzt die Methodik softwaretechnisch in MS-Excel um. Für den Praxiseinsatz sollte die Methodik jedoch in eine Software integriert werden, die über die notwendigen Schnittstellen zu den Fahrzeugen und ggf. zu einem Geoinformationssystem verfügt.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt.....	4
Tabellenverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis.....	7
Formelverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	9
Variablenverzeichnis	9
Zusammenfassung.....	11
1. Motivation und Zielsetzung.....	12
2. Praxispartner und Beschaffenheit der Praxisdaten.....	14
3. Sammlungsanalyse	15
4. Fahrzeuganalyse	17
5. Prozessanalyse.....	19
6. Siedlungsstrukturanalyse	21
6.1 Methode zur Identifizierung des Siedlungsgebietes	21
6.1.1 Bekannte Siedlungsstruktureinteilungen	21
6.1.2 Projektbezogene Siedlungsstruktureinteilung	22
6.2 Entwicklungsvorgehen	23
6.3 Nutzung der Open-Source-Daten	28
7. Ermittlung der Emissionen und Kosten der Prozessketten	29
7.1 Ressourcenorientierte Prozessrechnung	29
7.2 Ressourcendefinition, Ressourcentreiber und Verbrauchsfunktionen.....	29
7.3 Ermittlung der Verbrauchssätze und der Ausprägungen der Ressourcentreiber	33
7.4 Aufstellen der Emissions- und Kostenfunktionen der Teilprozesse	38
8. Demonstrator	42
8.1 Tool zur Ermittlung der Siedlungsstruktur	42
8.2 Tool zur Ermittlung der Emissionen und Kosten	45
8.3 Leitfaden zur Nutzung des Demonstrators	48
9. Umweltpotenzialanalyse	53
10. Fazit	55
Literaturverzeichnis.....	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fahrzeugkenndaten Heilemann.....	14
Tabelle 2: Fahrzeugkenndaten RESO.....	15
Tabelle 3: Externe Faktoren der Sammlung.....	16
Tabelle 4: Klassenzuordnung.....	27
Tabelle 5: Zuordnung der Siedlungsstrukturtypen.....	27
Tabelle 6: Ressourcen der Teilprozesse.....	30
Tabelle 7: Ressourcentreiber der Teilprozesse.....	30
Tabelle 8: Einsatztage Seitenlader.....	34
Tabelle 9: Leerungen nach Siedlungsgebiet.....	34
Tabelle 10: Gemessene Zeiten zwischen Leerungen.....	35
Tabelle 11: Standardisierte Koeffizienten.....	36
Tabelle 12: Verbrauchssätze Seitenlader.....	37
Tabelle 13: Anzahl an Stopps pro Siedlungskilometer.....	38
Tabelle 14: Sammelanalyse Heilemann.....	38
Tabelle 15: Emissionsfaktoren nach DIN EN 16258.....	39
Tabelle 16: Überblick Funktionen.....	41
Tabelle 17: Klassenzuordnung für den Nutzer.....	43
Tabelle 18: Emissionen mit und ohne Umschlag.....	54

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektvorgehen.....	13
Abbildung 2: Allgemeines Flussdiagramm des Entsorgungsprozesses.....	19
Abbildung 3: Flussdiagramm Klein-ASF.....	20
Abbildung 4: Flussdiagramm Seitenlader.....	20
Abbildung 5: Untersuchungsgebiet einer Tour.....	24
Abbildung 6: Erstelltes Raster im Bereich Michelstadt / Erbach im Odenwaldkreis (Hessen).....	25
Abbildung 7: Nomogramm.....	29
Abbildung 8: Entfernung zwischen Leerungen in Metern.....	35
Abbildung 9: Zeitliche Abstände zwischen Leerungen in Minuten.....	35
Abbildung 10: Werkzeugmaske zur Siedlungsstrukturierung.....	42
Abbildung 11: Maske Verbindung hinzufügen.....	44
Abbildung 12: Maske Räumliche Verbindung.....	45
Abbildung 13: Ergebnistabelle.....	48
Abbildung 14: Hauptmenü.....	48
Abbildung 15: Maske Fahrzeuge einpflegen.....	49
Abbildung 16: Informationsboxen.....	49
Abbildung 17: Tabellenblatt <i>Quelldaten</i>	49
Abbildung 18: Maske der Tourdaten.....	50
Abbildung 19: Maske der Sammlungsdaten.....	50
Abbildung 20: Maske der Fahrzeugdaten.....	51
Abbildung 21: Maske der Personaldaten.....	51
Abbildung 22: Eingabeboxen.....	52
Abbildung 23: Eingabe der Pausen.....	52
Abbildung 24: Skizze der Transportwege.....	54

Formelverzeichnis

Formel 1: Kraftstoffverbrauch ASF ohne Zuladung	30
Formel 2: Verbrauchsfunktion Energie, An- und Rückfahrt	30
Formel 3: Verbrauchsfunktion Personal, An- und Rückfahrt	31
Formel 4: Verbrauchsfunktion Energie, Sammlung	31
Formel 5: Verbrauchsfunktion Personal, Sammlung.....	31
Formel 6: Kraftstoffverbrauch Nahtransport	31
Formel 7: Verbrauchsfunktion Energie, Nahtransport.....	32
Formel 8: Verbrauchsfunktion Personal, Nahtransport.....	32
Formel 9: Zeitbedarf Energie, Umschlag	32
Formel 10: Verbrauchsfunktion Energie, Umschlag.....	32
Formel 11: Kraftstoffverbrauch Ferntransport	33
Formel 12: Verbrauchsfunktion Energie, Ferntransport.....	33
Formel 13: Verbrauchsfunktion Energie, An- und Rückfahrt Ferntransportfahrzeug.....	33
Formel 14: Verbrauchsfunktion Personal, Ferntransport	33
Formel 15: Verbrauchsfunktion Personal An- und Rückfahrt Ferntransportmittel	33
Formel 16: Berechnung der Anzahl an Stopps	37
Formel 17: Berechnung der Sammeltourlänge	37
Formel 18: Emissionsfunktion An- und Rückfahrt des ASF	39
Formel 19: Emissionsfunktion Sammlung	39
Formel 20: Emissionsfunktion Nahtransport	39
Formel 21: Emissionsfunktion Umschlag	39
Formel 22: Emissionsfunktion Ferntransport.....	39
Formel 23: Emissionsfunktion An- und Rückfahrt des Transportfahrzeugs.....	39
Formel 24: Personalkosten Anfahrt und Rückfahrt.....	40
Formel 25: Personalkosten Sammlung.....	40
Formel 26: Personalkosten Nahtransport.....	40
Formel 27: Personalkosten Fahrer Ferntransportfahrzeug An- und Rückfahrt	40
Formel 28: Personalkosten Fahrer Ferntransportfahrzeug Transportfahrt	40
Formel 29: Personalkosten Durchführender Umschlag	40
Formel 30: Energiekosten ASF An- und Rückfahrt	40
Formel 31: Energiekosten Sammlung	40
Formel 32: Energiekosten Umschlag.....	40
Formel 33: Energiekosten Nahtransport.....	40
Formel 34: Energiekosten Ferntransport.....	41
Formel 35: Energiekosten An- und Rückfahrt Ferntransportmittel	41
Formel 36: Reparatur- und Wartungskosten	41
Formel 37: Kalkulatorische Leistungsabschreibung	41

Abkürzungsverzeichnis

ABA	Abfallbehandlungsanlage
AbfAbIV	Abfallablagerungsverordnung
ASF	Abfallsammelfahrzeug
FID	Feature ID
GIS	Geoinformationssystem
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HBEFA	Handbuch der Emissionsfaktoren
OSM	Open Street Map
RPKR	Ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung
SG	Siedlungsgebiet
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
TASi	Technische Anleitung Siedlungsabfall
THG	Treibhausgase
VBA	Visual Basic for Applications

Variablenverzeichnis

Ressourcenverbräuche	
$L_{AR,ASF}$	Benötigter Kraftstoff des ASF während der An- und Rückfahrt [l]
$L_{AR,FTM}$	Benötigter Kraftstoff des FTM während der An- und Rückfahrt [l]
L_{FT}	Benötigter Kraftstoff während der Ferntransportfahrt [l]
L_{NT}	Benötigter Kraftstoff während der Nahtransportfahrt [l]
L_S	Benötigter Kraftstoff während der Sammlung [l]
L_U	Benötigter Kraftstoff während des Umschlags [l]
$T_{AR,ASF}$	Benötigte Zeit des ASF während der An- und Rückfahrt [h]
$T_{AR,FTM}$	Benötigte Zeit des FTM für die An- und Rückfahrt [h]
T_{FT}	Benötigte Zeit für den Ferntransport [h]
T_{NT}	Benötigte Zeit für den Nahtransport [h]
T_S	Benötigte Zeit für die Sammlung [h]
T_U	Benötigte Zeit für den Umschlag [h]
Verbrauchssätze	
$KV_{AR,ASF}$	Kraftstoffverbrauch eines unbeladenen ASF [l/100 km]
KV_{NT}	Kraftstoffverbrauch während des Nahtransports [l/100 km]
$KV_{AR,FTM}$	Kraftstoffverbrauch während der An- und Rückfahrt [l/100 km]
KV_{FT}	Kraftstoffverbrauch während des Ferntransports [l/100 km]
KV_U	Kraftstoffverbrauch während des Umschlags [l/h]
L_{Stopp}	Kraftstoffverbrauch pro Stopp mit Zwischenfahrt [l]
T_{Stopp}	Zeit pro Stopp mit Zwischenfahrt [h]
T_m	Zeit für den Umschlag einer Tonne [h]
$v_{AR,ASF}$	Geschwindigkeit des ASF bei der An- und Rückfahrt [km/h]
v_{NT}	Geschwindigkeit des ASF beim Nahtransport [km/h]
$v_{AR,FTM}$	Geschwindigkeit des FTM bei der An- und Rückfahrt [km/h]
v_{FT}	Geschwindigkeit beim Ferntransport [km/h]
Ressourcentreiber	
$D_{A,ASF}$	Distanz der Anfahrt ASF [km]

$D_{A,FTM}$	Distanz der Anfahrt des FTM [km]
D_{FT}	Distanz des Ferntransports [km]
D_{NT}	Distanz des Nahtransports [km]
$D_{R,ASF}$	Distanz der Rückfahrt ASF [km]
$D_{R,FTM}$	Distanz der Rückfahrt des FTM [km]
N_{Stopp}	Anzahl der Stopps
T_{AA}	Zeit bei der Abfallanlage [h]
m_{Abfall}	Masse des Abfalls [t]
Teilprozesskosten	
$EK_{AR,ASF}$	Energiekosten der An- und Rückfahrt des ASF [€]
$EK_{AR,FTM}$	Energiekosten der An- und Rückfahrt des FTM [€]
EK_{FT}	Energiekosten des Ferntransports [€]
EK_{NT}	Energiekosten des Nahtransports [€]
EK_S	Energiekosten der Sammlung [€]
EK_U	Energiekosten des Umschlags [€]
$PK_{M,AR,ASF}$	Personalkosten des Mitarbeiters bei der An- und Rückfahrt des ASF [€]
$PK_{AR,FTM}$	Personalkosten bei der An- und Rückfahrt des FTM [€]
$PK_{M,NT}$	Personalkosten des Mitarbeiters beim Nahtransport [€]
$PK_{M,S}$	Personalkosten des Mitarbeiters bei der Sammlung [€]
PK_{FT}	Personalkosten beim Ferntransport [€]
PK_U	Personalkosten beim Umschlag [€]
Kostensätze	
$k_{E,ASF}$	Energiekosten des ASF [€/l]
$k_{E,FTM}$	Energiekosten des FTM [€/l]
$k_{E,UM}$	Energiekosten des Umschlagmittels [€/l]
$k_{M,ASF}$	Personalkosten der ASF-Mitarbeiter [€/h]
$k_{M,FTM}$	Personalkosten der FTM-Mitarbeiter [€/h]
$k_{M,UM}$	Personalkosten der UM-Mitarbeiter [€/h]
Prozessemissionen	
$THG_{AR,ASF}$	Emissionen bei der An- und Rückfahrt des ASF [kg]
$THG_{AR,FTM}$	Emissionen bei der An- und Rückfahrt des FTM [kg]
THG_{FT}	Emissionen beim Ferntransport [kg]
THG_{NT}	Emissionen beim Nahtransport [kg]
THG_S	Emissionen bei der Sammlung [kg]
THG_U	Emissionen beim Umschlag [kg]
Emissionsfaktoren	
e_{ASF}	Emissionsfaktor des ASF [kg/l]
e_{FTM}	Emissionsfaktor des FTM [kg/l]
e_{UM}	Emissionsfaktor des UM [kg/l]

Zusammenfassung

Um die Erwärmung der Erdoberfläche zu beschränken und damit die Auswirkungen auf das Klima mitsamt der damit verbundenen Konsequenzen zu reduzieren, müssen die vom Menschen geschaffenen Treibhausgase (THG) in allen Bereichen reduziert werden. Da Deutschland europaweit an der Spitze der pro Kopf erzeugten Siedlungsabfälle liegt, befasst sich dieses von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Projekt (AZ31627/1) deshalb mit der Emissionsreduzierung bei der Sammlung und dem Transport von Siedlungsabfällen.

Neben den Emissionen werden in der entwickelten Methode die Kosten als wichtiges Entscheidungskriterium bei der Einsatzplanung von Fahrzeugen erfasst. Dies geschieht durch die Nutzung der Ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung (RPKR). Dabei wird berücksichtigt, dass verschiedene Fahrzeugkonfigurationen unterschiedliche Prozessketten erzeugen. In der RPKR werden teilprozessbezogen zunächst die benötigten Ressourcen ermittelt und daraufhin die Ressourcenverbräuche über Verbrauchsfunktionen mit den Ressourcentreibern verknüpft. Neben sammlungsspezifischen Parametern wie der Behältergröße oder Abfallart, beeinflussen auch siedlungsspezifische Parameter diese Verbrauchsfunktionen. Hierfür wurde eine Methodik entwickelt, mit welcher die Siedlungsgebiete (SG), durch die die Tour führt, spezifiziert werden können. Die notwendigen Parameter wurden daraufhin durch eine Analyse von Praxisdaten eines Seitenladers und eines Abfallsammelfahrzeugs (ASF) ohne Ladeeinrichtung ermittelt.

In einem nächsten Schritt konnten dann für jedes zu untersuchende Fahrzeug über Emissionsfunktionen die THG-Emissionen und über Kostenfunktionen die Kosten des Fahrzeugs bzw. der Fahrzeuge bei einem indirekten Transport für jeden Teilprozess berechnet werden. Für die Erstellung der Emissionsfunktionen wird hierbei auf sog. Emissionsfaktoren zurückgegriffen. Mit diesen ist es möglich, den benötigten Kraftstoff in Emissionen umzurechnen. Auf der Kostenseite werden Kostenfaktoren wie beispielsweise das Gehalt pro Stunde oder der Dieselpreis genutzt. Diese Teilprozesswerte können daraufhin, basierend auf den fahrzeugspezifischen Prozessketten zusammengefügt werden. Dies wird für alle zur Verfügung stehenden, bzw. für die zu analysierenden Fahrzeuge durchgeführt. Durch einen Vergleich der entstehenden Emissionen und Kosten kann somit das emissionsärmste bzw. das kostenoptimale Fahrzeug ermittelt werden. Eine Wertung zwischen den Kosten und den Emissionen findet nicht statt. Es liegt beim Anwender, welches Entscheidungskriterium er bei aus Emissions- und Kostensicht unterschiedlichen optimalen Fahrzeugen anwendet.

Neben der erstellten Methodik ist ein weiteres Projektergebnis ein auf Visual Basic for Applications (VBA) basierender Demonstrator, der die Berechnungen automatisiert durchführen kann. Hierfür kann der Anwender die spezifischen Daten über Excel-Masken einfügen. Diese Informationen werden daraufhin mit den gewonnenen Erkenntnissen aus dem Projekt verknüpft und das Ergebnis ausgegeben.

Die Untersuchungen basieren auf den Daten der Praxispartner Heilemann GmbH und RESO GmbH. Es konnten hierbei ein Seitenlader im Sammelgebiet Odenwaldkreis und ein kleineres Abfallsammelfahrzeug ohne automatische Ladeeinrichtung im Kreis Göppingen analysiert werden. Die Prozesse wurden auf einer theoretischen Ebene soweit unterteilt, dass die Abhängigkeit der Prozesse von den Fahrzeugen, dem Siedlungsgebiet und anderer externer Parameter sichtbar wird. Eine Berechnung für andere, nicht in der bisherigen Analyse enthaltene Fahrzeuge wäre somit möglich, ist aber aufgrund der dann subjektiv zu schätzenden Parameter der Verbrauchsfunktionen nicht empfehlenswert. Es wird deshalb die Untersuchung weiterer Fahrzeugkonfigurationen angestrebt.

1. Motivation und Zielsetzung

Die vom Menschen verursachten Treibhausgase (THG) nehmen seit der vorindustriellen Zeit stark zu. Die damit verbundenen hohen Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid, Methan und Stickoxid in der Atmosphäre sind sehr wahrscheinlich die Gründe für die zu beobachtende globale Erwärmung. Ohne zusätzliche Anstrengungen zur Reduktion von THG-Emissionen wird sich die Temperatur bis zum Ende dieses Jahrhunderts voraussichtlich um 3,7 bis 4,8 °C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit erhöhen, wobei bei einer Erhöhung um 4 °C mit erheblichen Konsequenzen, wie beispielsweise weitreichendem Artensterben oder Nahrungsmittelknappheit gerechnet werden muss. Um die Erwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen und die Klimaänderungen damit abzuschwächen, sollten sich bis zum Jahr 2050 die THG-Emissionen im Vergleich zu 2010 um 40-70 % verringern. [IPC14]

Der Siedlungsabfall in Deutschland hatte im Jahr 2014 ein Volumen von ca. 51 Millionen Tonnen. [UBA16] Bei den nur in Haushalten angefallenen Abfallmengen 2012 lag Deutschland mit 36,5 Millionen Tonnen europaweit an erster Stelle vor Italien mit 29,5 Millionen Tonnen. [EUR16] Um diese angefallenen Mengen zu sammeln und zu transportieren, sind Schätzungen zufolge deutschlandweit 13.500 Abfallsammelfahrzeuge (ASF) im Einsatz. [Bör10] Zusätzlich zu der großen Abfallmenge in Deutschland kommt noch hinzu, dass seit dem Inkrafttreten der Abfallablagerversordnung (AbfAbV) und der Technischen Anleitung Siedlungsabfall (TASi) keine unbehandelten Abfälle mehr auf Deponien beseitigt werden dürfen [DeV09], was zu zentralen Abfallbehandlungsanlagen (ABA) mit weiteren Transportwegen geführt hat. Auch wird je nach Entsorgungsvertrag der Kommunen nicht immer die nächstgelegene ABA genutzt. [Web08]

Nach eigenen Untersuchungen benötigt ein Seitenlader ca. 100 l Diesel pro Tag. Unter der Annahme, dass die Fahrzeuge 260 Tage pro Jahr im Einsatz sind, ergibt sich ein jährlicher Verbrauch von 3.510.000 Hektoliter Diesel. Um Kraftstoffe in Emissionsmengen umzuwandeln, können verschiedene Emissionsfaktoren genutzt werden. Bei der Berücksichtigung der Emissionen, die durch die Verbrennung von Diesel und auch bei der Dieselherstellung entstehen, kann ein Wert von 3,17 kg CO₂e (Kohlenstoffdioxid-Äquivalent) pro Liter genutzt werden. Damit entstehen pro Jahr Emissionen in Höhe von ca. 1.1 Mio. t CO₂e. Um ihren Beitrag zur Reduzierung der THG um 40 % zu leisten, müsste die Abfallsammlung die Emissionen um ca. 420.000 t CO₂e verringern. Trotz des Wissens um die nötige Emissionsreduzierung, findet eine Berücksichtigung der anfallenden Treibhausgase in der gängigen Software zur Tourenplanung und -optimierung nicht statt.

Ziel des Forschungsvorhabens war es deshalb, einen Beitrag zur Integration der THG-Problematik in die Planungssoftware zu leisten und hierfür eine Methodik zu entwickeln, mit welcher unter kosten- und umweltspezifischen Aspekten die geeignete Fahrzeugkonfiguration für eine gegebene Abfallsammeltour ermittelt werden kann. Diese Methode soll es ermöglichen, die Sammel- und Transportprozesse unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten zu beurteilen, um so, unter Einbeziehung des jeweiligen Fuhrparks der Entsorgungsunternehmen, das optimale Abfallsammelfahrzeug zu ermitteln. Hierzu wurden folgende Teilaufgaben bearbeitet:

Die einzelnen Prozesse der Prozesspartner und darauf aufbauend, durch Literaturrecherche ergänzt, allgemeine Prozesse in der Abfallsammlung und dem Abfalltransport wurden untersucht und dargestellt.

Zur Untersuchung der Abhängigkeiten der Prozessketten von der Fahrzeugkonfiguration mussten die gängigen Fahrzeuge der Abfallsammlung, des Abfalltransports und des Umschlags untersucht werden und für jede Fahrzeugkonfiguration eine Prozesskette erstellt werden.

Um die Auswirkungen der Siedlungsstrukturen auf die Prozesse zu analysieren, wurden zunächst Geoinformationen beschafft und eine Möglichkeit zur Siedlungseinteilung entwickelt. Anhand der

entstandenen Siedlungsstrukturierung konnten daraufhin die Sammlungsdaten der Praxispartner strukturiert analysiert werden. Hierzu wurden die in der Abfallsammlung gängigen Möglichkeiten zur Siedlungsstrukturierung betrachtet und auf ihre Anwendbarkeit auf die Datengrundlage hin überprüft. Da die bestehenden Möglichkeiten nicht mit den zur Verfügung stehenden Daten kompatibel waren, wurde eine eigenständige Siedlungsstrukturierung anhand der Parameter Abstand der Gebäude zueinander, Gebäudedichte und Gebäudegröße durchgeführt.

Zur Ermittlung der Emissionen und zur Vollständigkeit auch der Kostenberechnung wurde die Methodik der Ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung (RPKR) genutzt. Hierzu erfolgte zunächst, aufbauend auf der bereits erfolgten Prozessanalyse, die Bildung von Teilprozessen. Anschließend wurden die genutzten Ressourcen und die Ressourcentreiber ermittelt. Über die Bildung von Verbrauchsfunktionen wurde zunächst der Ressourcenverzehr pro Teilprozess und Ressource ermittelt, bevor über die Kostenfunktionen die Kosten und über die Emissionsfunktionen der THG-Ausstoß berechnet werden konnte. Das in Abbildung 1 dargestellte Abhängigkeits- bzw. Auswirkungsgefüge zwischen den Fahrzeugen, den Sammelgebieten und sammlungsspezifischen Aspekten wie der Sammelart, des Servicegrades oder der Abfallart, gehen in die Verbrauchsfunktionen ein und werden somit in der Analyse berücksichtigt.

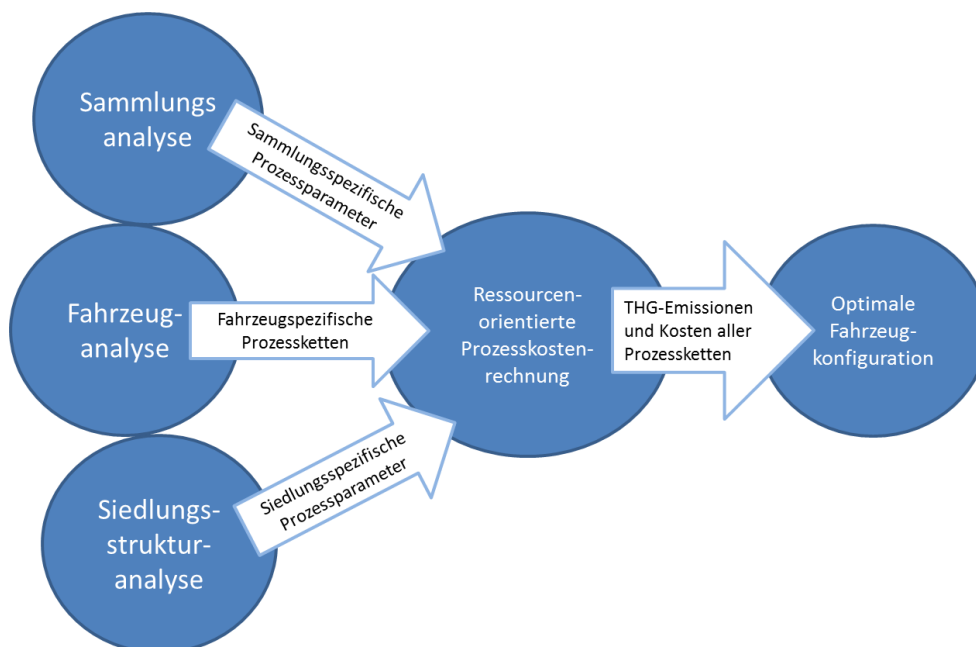


Abbildung 1: Projektvorgehen

Die geplanten Projektergebnisse waren neben der Entwicklung der genannten Methode zur Ermittlung der Emissionsmengen in der Abfallsammlung, die Integration des Ansatzes in eine Excel-Anwendung. Der entstandene Demonstrator veranschaulicht die Methodik und bereitet den Praxistransfer vor. Die vom Anwender einzugebenden Daten werden mit den gewonnenen Projekterkenntnissen verknüpft, um für jedes zu untersuchende Fahrzeug die Emissionsmenge und die Kosten auszugeben. Es bleibt dabei dem Anwender überlassen, welche der beiden Kennzahlen gewählt wird, um das für die jeweilige Sammeltour optimale Fahrzeug bzw. – bei einem Transport mit Umschlag – die optimalen Fahrzeuge aus der gewählten Sichtweise zu bestimmen.

2. Praxispartner und Beschaffenheit der Praxisdaten

Heilemann GmbH

Die Heilemann GmbH ist ein mittelständisches Entsorgungsunternehmen mit Sitz in Wendlingen und Niederlassungen in Bempflingen und Eisingen. Von den ca. 100 Mitarbeitern und 70 Entsorgungsfahrzeugen werden die Tätigkeitsbereiche nationaler und internationaler Güterverkehr, kommunale Entsorgung, Industrieentsorgung und Rohstoffverwertung abgedeckt.

Für das bearbeitete Projekt ist nur die kommunale Entsorgung relevant. Diese wird nochmals unterteilt in die Biomüll-Entsorgung, die Straßen- und Hofreinigung, die Haus- und Sperrmüllabfuhr sowie diverse Mülltransporte.

Für das Projekt konnte die Biomüllsammlung analysiert werden. Der Biomüll wird von den Erzeugern in 7,5 l oder 15 l Säcken gesammelt und an der Straße bereitgestellt (Teilservice). Das Klein-ASF, für das ein Mitsubishi Fuso als Basis dient, wurde speziell für die Sammlung angepasst. Das Fahrzeug kann zur Entleerung gekippt werden. Tabelle 1 stellt die Kenndaten des Fahrzeugs dar.

Fahrzeug/Maschine	Abfallsammelfahrzeug
Hersteller	Mitsubishi
Zulässige Gesamtmasse	7.490 kg
Leermasse	3.995 kg
Höchstgeschwindigkeit	138 km/h
Leistung	129 kW bei 3500 1/Min
Länge	5.970 mm
Breite	2.270 mm
Höhe	2.500 mm
Ladevolumen	17 cbm

Tabelle 1: Fahrzeugkenndaten Heilemann

Für die Beschaffung der Tourdaten wurde ein Kamerasystem mit Langzeitrecorder und GPS-Empfänger am Fahrzeug angebracht. Die Kamera konnte im Laderaum oben hinten installiert werden, wodurch die Beladeluken rechts und links im vorderen Bereich aufgenommen wurden. Durch die Videoanalyse konnten dann die Beladungen mit Ort und Uhrzeit ermittelt werden. Die Installation war durch das Kippen des Fahrzeuges und die Belastung des Aufnahmesystems durch den Biomüll mit einigen Schwierigkeiten verbunden. Auch war die Videoanalyse mit der manuellen Übertragung der Daten in eine Excel-Datei zeitlich sehr aufwändig.

RESO GmbH

Auch die RESO GmbH ist ein mittelständisches Unternehmen und ansässig in Michelstadt. Es sind 120 Mitarbeiter beschäftigt und 69 Fahrzeuge im Einsatz. Die Tätigkeiten teilen sich in die Bereiche Entsorgung, Containerdienst, Beratung und Recycling auf. Bei der RESO GmbH konnte auf einen Seitenlader zurückgegriffen werden, welcher bereits über ein System zur Datenaufnahme verfügt. Somit entfiel die Installation eines eigenen Systems. Da ein Umschlag des Abfalls auf dem Unternehmensgelände erfolgt, werden außerdem das Umschlagmittel (Bagger) und das Fahrzeug für den Ferntransport (Sattelaufliieger mit Zugmaschine) betrachtet. Die Sattellast der Sattelzugmaschine beträgt 9.894 kg und die Aufliegebelastung des Sattelaufliegers 11.000 kg. Es ergibt sich daraus eine Nutzlast des Sattelzuges von 23.844 kg. Die Kennzahlen der betrachteten Fahrzeuge sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Fahrzeug/Maschine	Seitenlader	Sattelzugmaschine	Sattelauflieger, Walking-Floor	Bagger
Hersteller	Daimler	Daimler	Martin Reisch	Liebherr
Zul. Gesamtmasse	26.000 kg	18.000 kg	35.000 kg	Einsatzg.: 20.100 kg
Leermasse	15.450 kg	8.106 kg	8.050 kg	-
Höchstgeschw.	90 km/h	90 km/h	-	-
Leistung	265 kW bei 1800 1/Min	375 kW bei 1800 1/Min	-	120 kW
Länge	8.650 mm	6.157 mm	14.050 mm	4.530 mm
Breite	2.550 mm	2.550 mm	2.550 mm	2.550 mm
Höhe	3.920 mm	2.640-4.000 mm	4.000 mm	3.200 mm
Ladevolumen	28 cbm	-	90 cbm	-

Tabelle 2: Fahrzeugenndaten RESO

Das im Abfallsammelfahrzeug bereits enthaltene System zur Datenaufnahme hält ab dem Start der Einsatzzeit des ASF alle 15 Sekunden die Koordinaten des ASF mit einem Zeitstempel fest. Zusätzlich ist angegeben, ob es sich um eine Revierfahrt, Sammelfahrt, Depotfahrt oder Fahrt in die Pause handelt. Jede Leerung wird zudem, wiederum mit Koordinaten und Zeitstempel, erfasst. Weitere relevante Angaben sind das Datum und die Tournummer. Die Daten wurden zur Analyse in das MS-Excel Format umgewandelt.

3. Sammlungsanalyse

Die Sammlungsanalyse dient der Bestimmung der sammlungsspezifischen Prozessparameter, die in die Ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung eingehen.

Für die spätere Analyse wird zunächst das Sammelverfahren betrachtet. Es kann in das Umleer- das Wechsel- und das Einwegverfahren unterschieden werden. [KC10]

Umleerverfahren:

Der Behälterinhalt wird in das ASF entleert und anschließend, ggf. nach dem Ausspülen, wieder zurückgestellt und weiterhin benutzt. Dies ist das gängige Verfahren bei der Hausmüllsammlung.

Wechselverfahren:

Der Behälter wird mit Inhalt auf das ASF geladen und ein neuer leerer Behälter wird für den Abfallerzeuger bereitgestellt. Dies ist vor allem bei größeren Behältern und im Gewerbebereich üblich.

Einwegverfahren:

Beim Einwegverfahren wird der Behälter mit dem Abfall entsorgt. Dieses Verfahren wird bei der Sammlung von Säcken, z. B. dem gelben Sack für Verpackungsmaterialien, genutzt.

Ein weiterer Prozessparameter ist die Art des Behälters. Die gängigen Behälter sind die Abfalltonne oder der Sack. Mülleimer und Mülltonnen müssen aufgrund der fehlenden Räder zum ASF getragen werden und sind deshalb kaum noch im Einsatz. Sie wurden von Müllgroßbehältern aus Kunststoff oder Stahlblech abgelöst. Für die Hausmüllsammlung sind Volumen von 120 l und 240 l üblich, es sind jedoch von 40 l bis 5000 l noch weitere Größen im Umlauf. Auch bei den Säcken gibt es unterschiedliche Füllgrößen. Abfälle mit geringer Dichte können in größeren Säcken, im Falle des gelben Sackes 90 l, gesammelt werden. Säcke für Biomüll sind dagegen in der Regel kleiner. Es ist auch eine behälterlose Sammlung möglich, beispielsweise die Sperrmüllabfuhr.

Neben dem Volumen des Behälters ist für die Berechnung der anfallenden zu sammelnden Abfallmasse der Füllgrad von Bedeutung. Dieser ist je nach Sammelgebiet, Behälterart und -größe, Sammelintervall und Abfallart für jede Sammeltour über alle Behälter zu schätzen bzw. aus vergangenen Touren zu übernehmen.

Um berechnen zu können, wie viele Behälter gesammelt werden können, muss die Dichte des Abfalls berücksichtigt werden. Diese unterscheidet sich je nach Abfallart bzw. Abfallzusammensetzung, die durch die Richtlinien zur Abfalltrennung vorgegeben werden, und Behältergröße. Der Abfall in kleineren Behältern wird vom Erzeuger meist komprimiert, um mehr Abfall in den Behälter zu bekommen. Alternativ kann, sofern das durchschnittliche Abfallvolumen bekannt ist, die durchschnittliche Masse des Abfalls in den Behältern zur Berechnung genutzt werden.

Ein weiteres sammlungsspezifisches Kriterium, welches die Prozesse der Abfallsammlung beeinflusst, ist der Servicegrad. Beim Teilservice wird der Behälter vom Abfallerzeuger an den Straßenrand gebracht. Der Weg für den Müllwerker ist dementsprechend gering. Beim Vollservice dagegen wird der Behälter vom Müllwerker am Behälterstandort auf dem Gelände des Abfallerzeugers abgeholt. Die Behälter befinden sich dabei teilweise in Mülltonnenboxen und die Handhabung ist je nach Geländebeschaffenheit, z. B. durch vorhandene Treppen, mit Aufwand verbunden. In manchen Innenstädten befinden sich die Behälter im Hauseingang und die Müllwerker müssen warten, bis die Haustüre für sie geöffnet wird. Je nach Tour ist auch eine Mischung von Voll- und Teilservice möglich, sodass je nach Kunde der Behälter vom Kunden bereitgestellt oder vom Müllwerker abgeholt wird. Ein pauschaler Zeitaufschlag kann durch die unterschiedlichen Ausprägungsmöglichkeiten nicht gegeben werden und muss pro Tour vom Anwender geschätzt bzw. durch die Analyse weiterer Touren mit unterschiedlichen Ausprägungen ermittelt werden.

Die genannten sammlungsspezifischen Prozessparameter gehen als externe Faktoren in die Analyse ein. Sie werden von der Kommunen oder dem Erzeuger bestimmt und verändern sich im entwickelten Modell nicht.

Die vorliegenden Parameterausprägungen der Sammelprozesse bei den beiden Projektpartnern werden in Tabelle 3 dargestellt.

externe Faktoren Sammlung	RESO	Heilemann
Sammelverfahren	Umleerverfahren	Einwegverfahren
Behälterart	Mülltonne (120 l)	Müllsack (7,5 und 15 l)
Füllgrad	90 %	60 %
Masse	20 kg	3 kg
Servicegrad	Teilservice	Teilservice

Tabelle 3: Externe Faktoren der Sammlung

Zu den sammlungsspezifischen Parametern werden auch die Distanzen der Tour gezählt. Hierzu gehört z. B. die Entfernung des Fahrzeugstandorts zum Sammelbeginn, vom Sammelende zur Abfallanlage bzw. zum Umschlagort, von der Abfallanlage / Umschlagort zum Fahrzeugstandort. Da sich diese Entfernungen je nach Fahrzeugkapazität und Transportart ändern, zählen sie zu den internen Faktoren der sammlungsspezifischen Prozessparameter.

4. Fahrzeuganalyse

Die in diesem Projekt betrachteten Entsorgungsfahrzeuge sind ASF, Transportfahrzeuge für den Ferntransport des Abfalls sowie Fahrzeuge bzw. Maschinen für den Umschlag. Neben den unten genannten Merkmalen der Fahrzeuge gehen in die Analyse kalkulatorische Abschreibungen sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten ein.

Abfallsammelfahrzeuge

Die ASF werden zunächst anhand der Position der Schüttvorrichtung unterschieden. Die Schüttung ist für die Aufnahme der Behälter, das Umleeren sowie das Abstellen zuständig. Über die Positionierung kann in Frontlader, Seitenlader und Hecklader, sowie Fahrzeuge ohne automatische Schüttvorrichtung differenziert werden. Je nach vorhandenem Behältersystem wird eine der gängigen Schüttungsarten Ringschüttung, Kammschüttung, Zapfenaufnahme oder Diamond-Lifter genutzt. Es besteht dabei auch die Möglichkeit, je nach Größe der Behälter, zwei Behälter durch einen Schüttvorgang zu entleeren (Doppelschüttung). Während für die spätere Analyse die Differenzierung anhand der Positionierung der Schüttung und der Anzahl der zu entleerenden Behälter relevant ist, werden die unterschiedlichen Schüttungsarten nicht berücksichtigt.

Weiterhin sind das mögliche zuzuladende Abfallvolumen und die zuzuladende Abfallmasse des ASF Kriterien, die in die Berechnungen einfließen. Das Volumen ist dabei zum einen von der Größe des Laderaumes, der für die Abfallsammlung zur Verfügung steht (dem sogenannten Ladevolumen), zum anderen von der Verdichtung des Abfalls abhängig. Es gibt hauptsächlich zwei Verdichtungsprinzipien: das Drehtrommel- und das Pressplattensystem. Der Verdichtungsgrad richtet sich nach der Abfallart und der späteren Weiterbehandlung. Je nach Sortieranlage und weiterem Prozess, wird der Abfall mehr oder weniger stark komprimiert. Dementsprechend verfügen die Presssysteme über eine Regelungstechnik, durch welche der Verdichtungsgrad variiert werden kann, die sogenannte fraktionsoptimierte Verdichtung. Wie viele Abfallbehälter pro Fahrt gesammelt werden können, ist zudem von der Dichte des Abfalls in den Behältern abhängig. Die Verdichtungstechnik geht durch den berücksichtigten individuellen Verdichtungsgrad nicht in die Berechnung des zuzuladenden Volumens ein, jedoch wirken sich die Unterschiede in den Systemen auf die zu erwartenden Reparatur- und Wartungskosten aus.

Die zuzuladende Masse ist je nach Fahrzeug unterschiedlich und kann dem Fahrzeugschein entnommen werden. Neben der zulässigen Gesamtmasse des Fahrzeugs, gibt es auch ein zulässiges Gesamtgewicht pro Fahrzeugachse. Im weiteren Verlauf wird jedoch angenommen, dass das Gewicht auf die Achsen verteilt wird und somit nur das Gesamtgewicht berücksichtigt werden muss.

Die ASF unterliegen der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO). Größeneigenschaften des ASF, sowie damit zusammenhängend die Wendekreise gehen allerdings nicht in die Analyse ein, da zwar die Winkel der Kreuzungen und Kurven durch Geoinformationssysteme (GIS) bestimmt werden können, die Informationen über die Straßenbreite und parkende Autos allerdings nicht flächendeckend vorliegen und eine Unterscheidung des ASF aufgrund der Fahrzeugbreite und des Wendekreises bzw. der Schleppkurve deshalb nicht zielführend ist. Die dahingehenden Unterschiede gehen über die ermittelten Zeiten der Fahrzeuge in den einzelnen SG ein.

Ein weiteres Unterscheidungskriterium ist der benötigte Kraftstoff und der Kraftstoffverbrauch, wobei bei ASF in der Regel Diesel genutzt wird. Alternative Antriebstechniken und Hybridfahrzeuge werden im Projekt nicht betrachtet, können jedoch bei Bedarf mit wenig Aufwand eingebunden werden.

Das letzte betrachtete Merkmal ist die Möglichkeit, den Aufbau mit dem gesammelten Abfall abzusetzen und einen leeren Sammelaufbau aufzunehmen. Dieser Wechselaufbau wird dann

anschließend von einem Transportfahrzeug aufgenommen und zur Abfallbehandlungsanlage (ABA) gebracht. Das ASF kann nach dem Wechsel seine Sammeltour mit einem neuen Wechselaufbau fortsetzen.

Transportfahrzeuge

Bei einer Abfallsammlung ohne Umschlag dient das ASF, sobald die Kapazitätsgrenze erreicht bzw. die Sammlung beendet ist, als Transportfahrzeug. Der Transport nach dem Umschlag, beispielsweise mit einem Wechselbehälter oder wenn der Abfall durch ein Umschlagmittel auf das Transportfahrzeug geladen wird, wird im weiteren Verlauf Ferntransport genannt. Dieser grenzt sich vom Nahtransport ab, welcher mit dem Umschlag endet. Kriterium ist damit, ob ein direkter oder ein indirekter Transport stattfindet. Die tatsächliche Entfernung ist nicht relevant.

In diesem Projekt wird nur der Verkehrsträger Straße betrachtet. Bei Bedarf kann der Transport über Schienen und den Wasserweg der Methodik hinzugefügt werden. Dies ist für das Untersuchungsgebiet jedoch nicht relevant und kommt in der Praxis, im Vergleich zum Straßentransport, auch weitaus seltener vor.

Für den hier betrachteten Ferntransport sind LKW mit oder ohne Anhänger sowie Sattelzugmaschinen mit Sattelaufleger möglich. Die Fahrzeuge können dabei mit Wechselaufbauten ausgestattet sein. Die Fahrzeuge unterscheiden sich in diesem Projekt weiterhin im Ladevolumen, bzw. der zul. Gesamtmasse sowie anhand des Entlademechanismus, der die benötigte Zeit zur Entladung maßgeblich beeinflusst. Daneben sind, wie bei den ASF, der Kraftstoffverbrauch und die Kraftstoffart relevant.

Umschlagmittel

Je nach Ausgestaltung der Umschlagstation, ist auch ein direkter Umschlag ohne Umschlagmittel möglich. Der Abfall wird dabei aus dem ASF direkt in das Ferntransportfahrzeug umgeladen, beispielsweise durch ein direktes Umschütten des Abfalls aus dem ASF in das Ferntransportfahrzeug. Ist dies nicht möglich, werden Hilfsmittel wie Förderbänder oder Umschlagbagger eingesetzt. Für die Analyse gehen dabei folgende Kriterien ein: der Personalbedarf, die Zeit für den Umschlag einer Tonne an Abfall und die Energiekosten pro Stunde.

5. Prozessanalyse

Im Folgenden wird der Prozess des Klein-ASF mit Einwegverfahren dem Prozess des Seitenladers mit Umleerverfahren gegenübergestellt. Es wurde hierfür zunächst ein allgemeines Flussdiagramm des Entsorgungsprozesses erstellt.

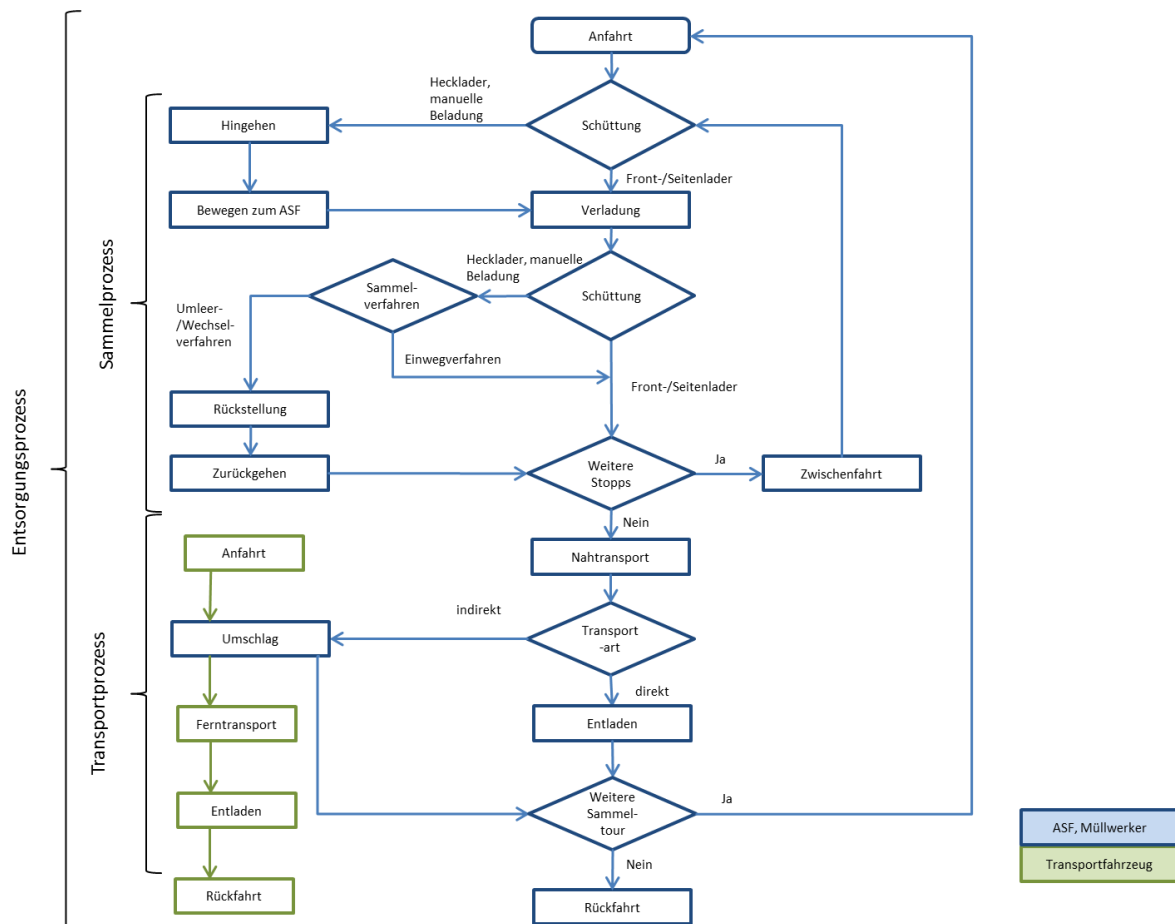


Abbildung 2: Allgemeines Flussdiagramm des Entsorgungsprozesses

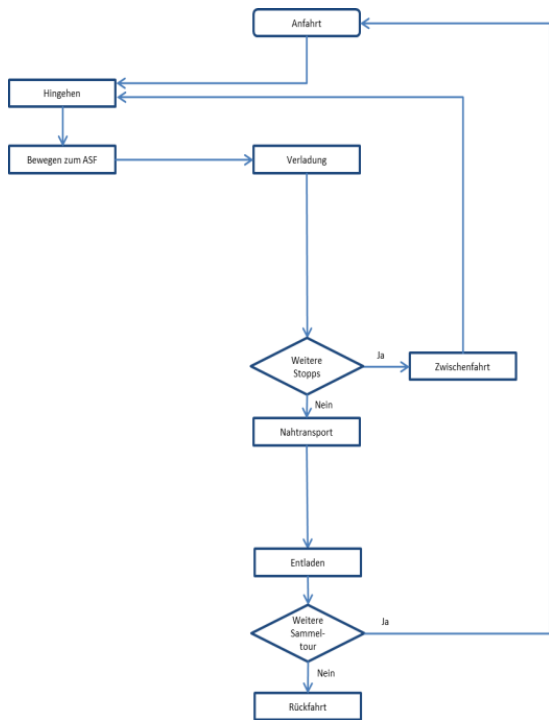


Abbildung 3: Flussdiagramm Klein-ASF

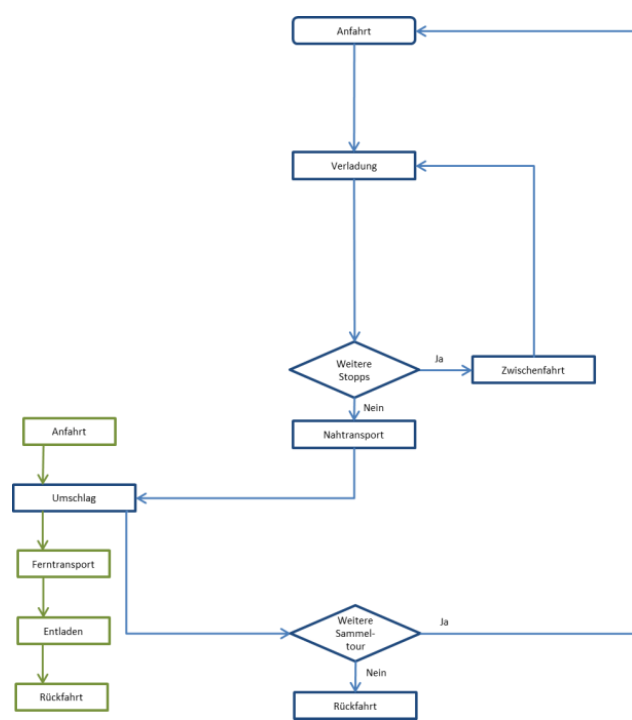


Abbildung 4: Flussdiagramm Seitenlader

Anhand der Abbildungen wird ersichtlich, dass unterschiedliche Prozesse stattfinden. Es konnten sechs Eingriffsmöglichkeiten auf die Prozessketten identifiziert werden. Beim Sammelprozess bestimmen die Schüttung des ASF und das Sammelverfahren die ablaufenden Prozesse. Ob weitere Stopps erfolgen, bzw. wie viele Stopps bei einer Sammel-tour erfolgen, hängt von der möglichen zuzuladenden Masse, bzw. von dem möglichen zuzuladenden Volumen ab. Der Transportprozess wird durch das Vorliegen eines direkten oder indirekten Transports, dementsprechend der Transportart bestimmt. Ob eine weitere Sammel-tour stattfindet, hängt von der Länge der Tour und der insgesamt zu sammelnden Abfallmasse bzw. dem zu sammelnden Volumen ab.

Die beschriebenen Teilprozesse werden zu den Prozessen Anfahrt, Sammlung, Transport, Umschlag, Ferntransport und Rückfahrt zusammengefasst, da auf dieser Aggregationsebene die vorhandenen Praxisdaten analysiert werden können.

6. Siedlungsstrukturanalyse

6.1 Methode zur Identifizierung des Siedlungsgebietes

6.1.1 Bekannte Siedlungsstruktureinteilungen

Dass zwischen der Siedlungsstruktur der Gebiete, in denen eine Abfallsammlung durchgeführt wird und der Abfallsammlung im Allgemeinen und der Zusammensetzung und Dichte des gesammelten Abfalls sowie der zur Sammlung benötigte Zeit im Besonderen ein Zusammenhang besteht, wurde in einer Vielzahl an Arbeiten bereits herausgearbeitet bzw. als gegeben vorausgesetzt. So weisen unter anderem Kranert et al. auf die Bedeutung der Siedlungsstruktur für die Abfallzusammensetzung und das Stoffstrommanagement hin und unterscheiden folgende Siedlungsstrukturtypen [KC10]:

- Hohe verdichtete städtische Bebauung
- Mehrfamilienhausbebauung (Stadttrandbereiche)
- (Dörfliche) Stadttrand-/Wohngebiete mit überwiegend Ein- und Zwei-Familienhäusern mit relativ großen Gartenanteilen
- Aufgelockerte ländliche Bebauung.

Kranert et al. beschränken sich in ihren Ausführungen auf das Nennen der von ihnen herausgearbeiteten Siedlungsstrukturtypeneinteilung, ohne zu erläutern, welche objektiv quantifizierbaren Merkmale die Zuordnung eines konkret vorliegenden Siedlungsgebietes zu einem der Typen zulassen bzw. rechtfertigen.

Eine ähnliche Einteilung der Siedlungsstrukturtypen nimmt Gallenkemper vor. Er unterscheidet nachfolgende Gebietsstrukturen [Gal77]:

- Citygebiete (innerstädtische Bebauung mit hohem Gewerbeanteil)
- Geschlossene Mehrfamilienhausbebauung (innerstädtisch)
- Offene Mehrfamilienhausbebauung
- Ein- und Zweifamilienhausbebauung
- Aufgelockerte Ein- und Zweifamilienhausbebauung

Nach Gallenkemper sind die die Gebietsstrukturen kennzeichnenden Merkmale z. B. die Geschosshöhe und die Anzahl der Wohneinheiten je Gebäude, für die jeweils konkrete Vorgaben gemacht werden. Die Erreichbarkeit von Pkw-Stellplätzen spielt hierbei ebenso eine Rolle wie der Zersiedelungsgrad.

Eine stark differenzierende Einteilung nehmen Schneider et al. vor, die folgende Siedlungsstrukturtypen unterscheiden [SBL96]:

- A: Citygebiete (Großstadt)
- B: sonstige Citygebiete
- C: Mehrfamilienhausbebauung
- D: Ein-, Zwei- u. Mehrfamilienhausbebauung
- E: Streusiedlungen
- F: aufgelockerte Bebauung
- G: Gewerbegebiet
- H: Industriegebiet

Die feinere Unterteilung der Siedlungsstrukturtypen geht mit einer auch dem subjektiven Empfinden nach diffizileren Abgrenzbarkeit zueinander einher. So bleibt z. B. unklar, in Hinblick auf welche objektiven Kriterien sich ein Gewerbe- von einem Industriegebiet unterscheidet bzw. wie genau Gewerbe von Industrie abzugrenzen ist, ohne dem Betrachter einen subjektiven Entscheidungsspielraum einzuräumen.

6.1.2 Projektbezogene Siedlungsstruktureinteilung

Die im vorliegenden Projekt vorgenommene Siedlungsstrukturtypeneinteilung orientiert sich an den oben dargestellten Klassifizierungen, kann diese jedoch aufgrund der bei den verwendeten Open Street Map-Daten vorliegenden geringen Attributvielfalt, -tiefe und -genauigkeit nicht ohne Anpassungen übernehmen. So enthalten die durch Open Street Map (OSM) bereitgestellten Daten keine Angaben zur Geschoszahl bzw. Höhe der Gebäude und nur eingeschränkt Angaben zu ihrer Nutzung. OSM-Straßendaten sind in ihrer Klassifizierung inkonsistent, enthalten keine Angaben über die Straßenbreite, verlaufen nicht durchgehend an einem bestimmten Punkt des Straßenquerschnitts (z. B. der Straßenmitte) und enthalten zum Teil sogar Angaben über Gänge und Fußwege innerhalb von Gebäuden, weshalb sie für die Bestimmung des Siedlungsstrukturtyps nicht geeignet erscheinen.

Die im Rahmen des Projekts entwickelte Methode zur Siedlungsstrukturtypeneinteilung stellt vollkommen auf die vorhandenen OSM-Daten über die Gebäudegrundflächen ab, da diese meist hinreichend genau die Realität abbilden und es bei Bedarf möglich ist, diese ausschließlich anhand von Satellitenbildern, wie sie durch GIS-Anbieter zur Verfügung gestellt werden, zu ergänzen. Diese Ergänzung ist in der Mehrzahl der Fälle notwendig. Im vorliegenden Projekt werden folgende Siedlungsstrukturtypen mit ebenfalls aufgeführten Eigenschaften unterschieden:

- *S: Stark verdichtete Bebauung* – eine vergleichsweise hohe Zahl an Gebäuden, die zusammengenommen einen Großteil der Gesamtbetrachtungsfläche bedecken, bereits aus sich heraus zu einem hohen Flächenversiegelungsgrad beitragen und in minimalem Abstand zueinander stehen. Hierzu zählen unter anderem Citygebiete mit großflächigen Einzelhandelsgeschäften etc.
- *D: Dichte Bebauung* – eine einen nicht unerheblichen Teil der Gesamtbetrachtungsfläche bedeckende Bebauung, deren Gebäude sich in minimalem Abstand zueinander befinden. Hierunter subsumierbar ist beispielsweise städtische Blockrandbebauung.
- *O: Offene Bebauung* – einzeln stehende Gebäude bedecken einen nicht unerheblichen Teil der Gesamtbetrachtungsfläche.
- *A: Aufglockerte Bebauung* – eine nicht zu vernachlässigende Zahl an einzeln stehenden Gebäuden erweckt noch den Eindruck einer zusammenhängenden Bebauung.
- *V: Vereinzelte Bebauung* – das Vorhandensein eines Bauungszusammenhangs muss aufgrund des großen Abstands der Gebäude zueinander und der vergleichsweise geringen Gesamtgebäudefläche verneint werden.
- *G: Gewerbegebiet* – besonders großflächige nicht dem Wohnen dienende Gebäude in nicht zu vernachlässigender Zahl bedecken einen Großteil der Gesamtbetrachtungsfläche.

Im folgenden Abschnitt wird das genaue Vorgehen zur geoinformationsgestützten Siedlungsstruktureinteilung realer Siedlungsflächen beschrieben. Das dargestellte Vorgehen teilt einen vorgegebenen räumlichen Bereich in quadratische Kacheln ein, die als Ganzes anhand der erhobenen Daten zur bedeckten Kachelfläche, der durchschnittlichen Gebäudefläche und des durchschnittlichen Abstandes eines Gebäudes zum nächsten hinsichtlich der Siedlungsstruktur analysiert werden.

6.2 Entwicklungsvorgehen

Um eine computergestützte Strukturanalyse der durch die Abfallentsorgungsfahrzeuge während einer Tour durchfahrenen Siedlungsgebiete durchführen zu können, wird das im Folgenden beschriebene auf der GIS-Software ArcGIS 10.3 der Firma Esri basierende Vorgehen, das einerseits eine hinreichende Genauigkeit garantieren, andererseits aber leicht anwendbar sein soll, gewählt. Als vorhanden vorausgesetzt werden hierfür ein Layer, der die Grundrisse des Untersuchungsgebietes in der Form von Polygonen beinhaltet und ein die Abfallentsorgungstour durch Messpunkte eines Global Navigation Satellite System (GNSS) beschreibender Layer.

Diese Eingabedaten werden verwendet, um die zu analysierenden Siedlungsgebiete zu definieren und ihre Siedlungsstrukturtypen mit Hilfe eines Rasters kleinräumig zu bestimmen, wobei die Entfernung der Gebäude zum nächsten Gebäude, die anteilig von Gebäuden bedeckte Fläche und die durchschnittliche Gebäudegrundfläche als Analyseparameter dienen.

Räumliche Abgrenzung der Siedlungsgebiete

In einem ersten Schritt werden die zu analysierenden Siedlungsgebiete definiert. Als Siedlungsgebiet gilt ein räumliches Gebiet, das sich durch das Vorhandensein von Wohn- bzw. Gewerbebebauung von Gebieten ohne eine solche abgrenzen lässt. Um ein Siedlungsgebiet hinreichend genau von seiner Umgebung abgrenzen zu können, wird davon ausgegangen, dass alleine die Abwesenheit von Bebauung auf einem gewissen Stück Grund nicht die Abwesenheit einer Siedlung bedeutet, d. h. dass erst ab einer gewissen Entfernung zum nächsten Gebäude davon ausgegangen werden kann, dass sich ein Punkt außerhalb eines Siedlungsgebiets befindet. Umgekehrt kann also für einen gewissen Bereich um bestehende Gebäude herum ausgeschlossen werden, dass sich dieser nicht in einem Siedlungsgebiet befindet, worauf im Folgenden auch abgestellt wird, wenn Siedlungsgebiete maßgeblich durch die vorhandene Bebauung bestimmt werden.

Um vorhandene Siedlungsgebiete unter Verwendung von ArcGIS lokalisieren zu können, wird wie folgt vorgegangen: Die vorhandenen, die Grundrisse der Gebäude beschreibenden Polygone werden mit Hilfe des Werkzeugs *Feature in Punkt* in Punktfeatures umgewandelt, welche den Schwerpunkt der Grundfläche des Gebäudes festlegen. Dieser Schritt hat sich als notwendig erwiesen, da ArcGIS 10.3 vielfach nicht in der Lage war, Puffer um Polygone herum anzulegen. Um dieses Problem zu umgehen, werden die Polygone folglich zuerst in Punktfeatures umgewandelt.

Um diese Punktfeatures werden durch das Werkzeug *Puffer* Kreisscheiben vom Radius 200 Meter gelegt. Es hat sich gezeigt, dass ein Radius von 200 Metern eine analysefreundliche Größe darstellt, da so einerseits tatsächlich zusammenhängende Siedlungsflächen als Einheit betrachtet werden und andererseits das Risiko reduziert wird, dass weiter voneinander entfernt befindliche Siedlungsgebiete miteinander verwachsen und die Analysegenauigkeit abnimmt. Hierbei ist in der Eingabemaske der Dissolve-Typ *All* auszuwählen. Dies stellt sicher, dass sich überlappende Kreisscheiben zu einer einzigen Fläche verbunden werden und nicht um jedes Gebäude eine einzelne Kreisscheibe gelegt wird. Der so erstellte Layer enthält nun genau ein Feature, das sämtliche, auch räumlich nicht miteinander verbundene, Siedlungsgebiete beinhaltet. Um jedes von den anderen Siedlungsgebieten räumlich getrennte Siedlungsgebiet als einzelnes Feature vorliegen zu haben, wird das Werkzeug *Multipart in Singlepart* angewendet, wobei das alle Siedlungsgebiete beinhaltende Feature als Eingabefeature dient. Nach der Anwendung liegen die Siedlungsgebiete separiert vor, d. h. jedes Polygon stellt ein einzelnes Feature dar, während zuvor alle Polygone gemeinsam genau ein Feature darstellten. Um genau die Siedlungsgebiete auszuwählen, durch die eine Abfallentsorgungstour verläuft, werden durch die *Lagebezogene Auswahl* genau die Siedlungsgebiete ausgewählt, die den Verlauf der Tour beschreibenden Punktfeatures schneiden. Die ausgewählten Siedlungsgebietfeatures werden als eigener Layer exportiert. Dieser Layer beinhaltet nun alle von einer Abfallentsorgungstour durchfahrenen Siedlungsgebiete und wird im Folgenden als

Untersuchungsgebiet bezeichnet. Abbildung 5 zeigt das Untersuchungsgebiet (grün) mit Abfallentsorgungstourmesspunkten (schwarz), Gebäudegrundflächen (braun) und Gebäudegrundflächenschwerpunkten (gelb).

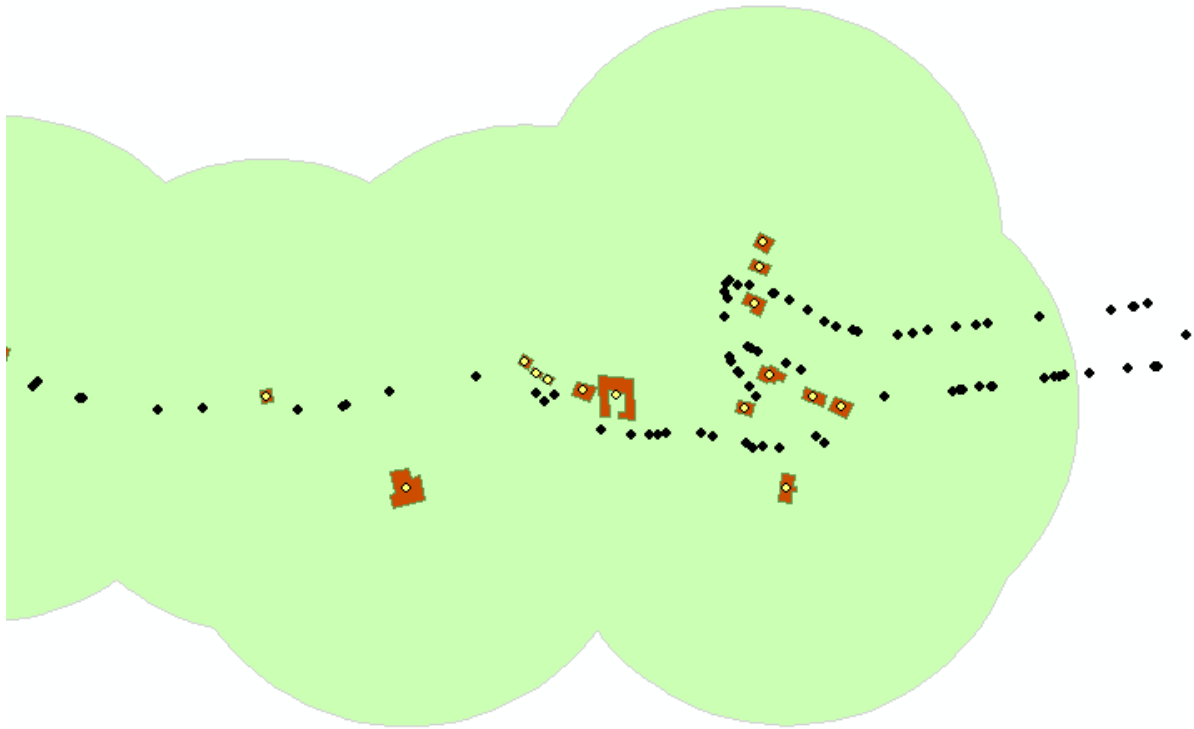


Abbildung 5: Untersuchungsgebiet einer Tour

Erstellen eines Analyserasters

Der zweite Schritt beinhaltet die Erstellung eines räumlichen Analyserasters, welches nachfolgend als räumlicher Bezugsrahmen für die zu errechnenden Entfernungen und Verknüpfungen dient. Hierbei wird unter Anwendung des Werkzeugs *Netz erstellen* ein Raster mit Zellenbreite und -höhe von jeweils 50 Metern und der Ausdehnung des Untersuchungsgebiets erstellt. Der zu wählende Geometrietyp lautet Polygon. Um die Rechengeschwindigkeit bei späteren Prozessschritten zu erhöhen, werden über die *Lagebezogene Auswahl* die Features des Rasters ausgewählt, die das Untersuchungsgebiet schneiden. Die so ausgewählten Features werden in einen neuen Layer exportiert, der als Grundlage für die folgenden Untersuchungen dient und im Folgenden als Raster bezeichnet wird, wobei seine Features *Kacheln* genannt werden.

Abbildung 6 zeigt das für den Raum Michelstadt / Erbach erstellte Raster.

Als Vorbereitung für die Entfernungsbetrachtung wird auf die Gebäudegrundflächenschwerpunkte beschreibenden Features das Tool *Räumliche Verbindung* angewandt, wobei der Rasterlayer der Verbindung dient.

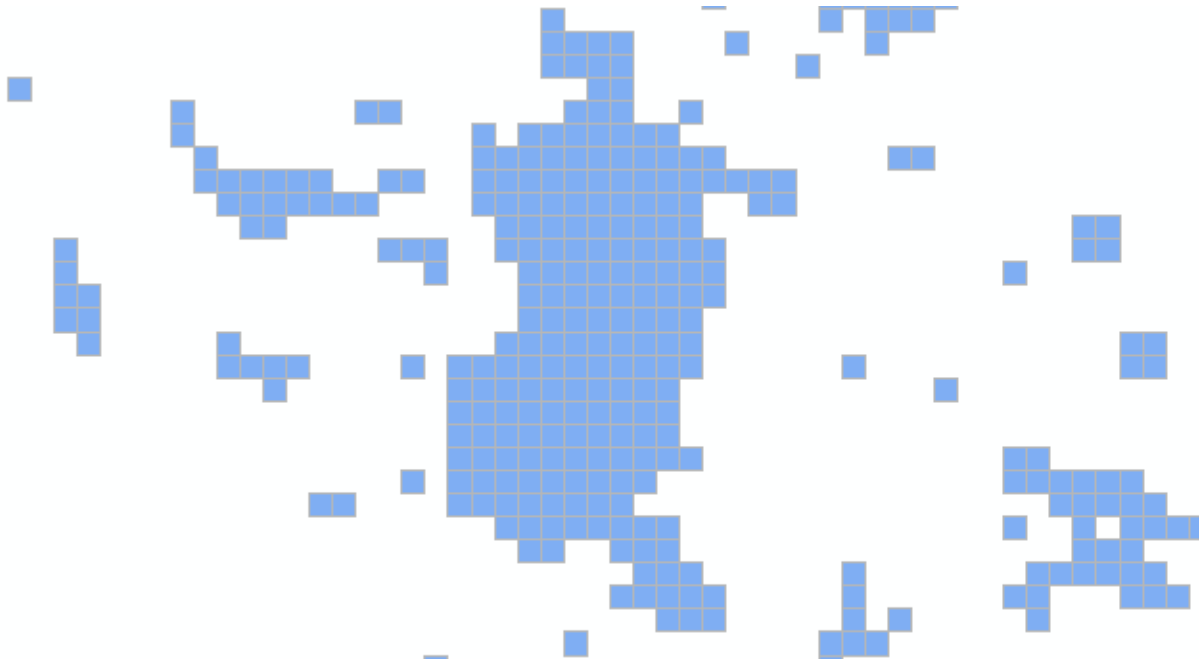


Abbildung 6: Erstelltes Raster im Bereich Michelstadt / Erbach im Odenwaldkreis (Hessen)

Ermittlung des durch Gebäude bedeckten Kachelgrundflächenanteils

Um die durch Gebäude bedeckte Fläche je Kachel ermitteln zu können, werden unter Einsatz des Werkzeugs *Überschneiden (Intersect)* die Gebäudefeatures entlang der Rasterfeaturegrenzen zerteilt, wobei die Gebäudepolygone beinhaltende Layer und der Rasterlayer die Eingabegrößen darstellen. Die Attributtabelle des Ausgabelayers (im Folgenden *zerteilte Gebäude*) enthält in einem Feld die Feature ID (FID) der ursprünglichen Kachel und in einem weiteren die ursprüngliche FID des Gebäudes. Ihr wird ein Feld hinzugefügt. Unter Zuhilfenahme der Anwendung *Geometrie berechnen* wird in dieses Feld die von jedem einzelnen Gebäudeteil bedeckte Fläche eingetragen.

Im Layer des Rasters wird ebenfalls ein Feld zur Attributtabelle hinzugefügt. Es erhält unter Benutzung der Anwendung *Geometrie berechnen* als Wert die durch die einzelnen Kacheln bedeckte Fläche.

Zur Berechnung der je Kachel von Gebäuden bedeckten Fläche wird in dem Layer, der die zerteilten Gebäude beschreibt, bezüglich des Feldes, das die FID der Kacheln beinhaltet, die Anwendung *Feldstatistik* genutzt. Berechnet wird die Summe der durch Gebäude bedeckten Fläche. Die Ausgabetabelle wird im Anschluss mit der Attributtabelle des Rasters verbunden, wobei jeweils das die FID der Kachel beinhaltende Feld die Verbindung herstellt. Wird der Rasterattributtabelle ein weiteres Feld hinzugefügt, welches als Wert den Quotienten aus durch Gebäude bedeckter Fläche und Fläche der Kachel beinhaltet, so lässt sich aus diesem der durch Gebäude bedeckte Anteil der Kachelfläche ablesen.

Die so ermittelten Werte geben einen ersten Aufschluss über die vorhandene Siedlungsstruktur. In dicht bebauten Innenstädten ergeben sich naturgemäß höhere Anteile an durch Gebäude bedeckten Flächen, während diese in ländlichen Gebieten je nach Lage der Kacheln auch Null werden können.

Berechnung der durchschnittlichen Gebäudefläche je Kachel

Aufbauend auf der bereits berechneten durch Gebäude bedeckten Fläche pro Kachel soll im Folgenden herausgearbeitet werden, wie groß die Grundfläche eines Gebäudes innerhalb einer Kachel durchschnittlich ist. Da viele Gebäude durch die Lage der Kachelkanten zerschnitten sind und in mehreren Teilen vorliegen, erscheint es folgerichtig, dass Gebäude, die nur zum Teil in einer

Kachel liegen, auch nur teilweise in die Berechnung der durchschnittlichen Gebäudegrundfläche einfließen. Hierzu wird der Attributtabelle des die ursprünglichen Gebäudepolygone enthaltenden Layers ein Feld hinzugefügt, welches über die Funktion *Geometrie berechnen* als Eintrag die Fläche des jeweiligen Gebäudes erhält.

Die Attributtabelle der zerteilten Gebäude wird nun mit der Attributtabelle der ursprünglichen (unzerteilten) Gebäude über die FID des unzerteilten Gebäudes verbunden und enthält nun in je einem Feld die Fläche des zerteilten Stücks und die Fläche des ursprünglichen Gebäudes. In ein hinzuzufügendes Feld wird der Quotient dieser beiden Werte eingetragen. Er beschreibt den Anteil der Gesamtgebäudegrundfläche, der durch einen geschnittenen Gebäudeteil bedeckt wird. Nun wird die Funktion *Feldstatistik* in Bezug auf das die FID der Kachel beinhaltende Feld angewendet, wobei die Summe der im vorangegangenen Schritt berechneten Quotienten ermittelt wird. Die Ausgabetabelle wird über die ID der Kachel mit dem Rasterlayer verbunden. Das Hinzufügen eines weiteren Feldes, in welches der Quotient aus der gesamten je Kachel durch Gebäude bedeckten Fläche und der soeben berechneten Summe eingetragen wird, schließt diesen Schritt ab. Die Rastertabelle enthält nun den in Bezug auf die Gesamtgebäudegrundfläche gewichteten Mittelwert.

Ermitteln des Abstandes Gebäude-Gebäude

Um die Siedlungsstrukturanalyse noch differenzierter betreiben zu können, wird eine weitere Analysegröße erhoben: Die Entfernung eines Gebäudes zum nächsten anderen Gebäude. Zu Grunde liegt hierbei der Gedanke, dass beispielsweise in Innenstädten mit vorherrschender Blockrandbebauung die Entfernung von Gebäuden zum jeweils nächsten verschwindend und in offen bebauten Einfamilienhausgebieten von Null verschieden ist.

Mithilfe eines GIS lässt sich die zuvor beschriebene Abstandsmessung ohne übermäßigen Arbeitsaufwand durchführen, sofern die die Gebäudegrundflächen beschreibenden raumbezogenen Daten vorliegen. Für die Berechnung des Abstands eines Gebäudes zum nächsten Gebäude wird in ArcGIS das Werkzeug *Near-Tabelle* herangezogen. Als Eingabelayer dient in diesem Fall der die Gebäudegrundflächenpolygone beinhaltende Layer, welcher auch als der die Nearfeatures beschreibender Layer gilt. Es wird eine Ausgabetabelle erstellt, die im Feld „IN_FID“ die FID des betrachteten Gebäudes und im Feld „NEAR_DIST“ die Entfernung dieses Gebäudes zum nächsten Gebäude enthält. Diese Tabelle wird über ihr „IN_FID“-Feld mit der Attributtabelle der Gebäudegrundflächenschwerpunkte verbunden. Dieser Schritt dient dazu, ein Gebäude genau einer Kachel zuzuordnen, was allein über die Grundflächenpolygone nicht möglich wäre, da diese auch in mehreren Kacheln liegen können, was wiederum dem Ansatz, die Analyse Kachelbezogen durchzuführen, widerspräche. Aus der nunmehr erweiterten Attributtabelle der Gebäudegrundflächenschwerpunkte wird erneut eine Summenstatistik in Bezug auf die Kachel-FID erstellt, wobei die durchschnittliche Entfernung der Gebäude zum nächsten Gebäude für jede Kachel berechnet wird. Die Ausgabetabelle wird wiederum über die Kachel-FID mit der Rasterattributtabelle verbunden.

Nunmehr enthält die Attributtabelle des Rasterlayers nicht nur die Daten über die durch Gebäude bedeckte Fläche, sondern auch über den durchschnittlichen Abstand der Gebäude zum nächsten Gebäude, deren Gebäudegrundflächenschwerpunkte in den entsprechenden Kacheln liegen.

Klassenzuordnung der Kacheln

Um die Siedlungsstrukturtypenzuordnung vollständig durchzuführen, wird nun jede Kachel mit drei weiteren Attributen versehen, die die Kacheln entsprechend Tabelle 4 je einer Klasse bezüglich des Abstandes Gebäude-Gebäude, des bedeckten Flächenanteils und der durchschnittlichen Gebäudegrundfläche zuordnet.

Anteil bedeckter Fläche [-]			Fläche pro Gebäude [m ²]			Abstand Gebäude-Gebäude [m]		
untere Grenze	obere Grenze	Bezeichnung	untere Grenze	obere Grenze	Bezeichnung	untere Grenze	obere Grenze	Bezeichnung
0	0,0095	ABed_1	0	56	AGeb_1	0	0,15	HH_1
0,0095	0,0592	ABed_2	56	264	AGeb_2	0,15	7,03	HH_2
0,0592	0,2541	ABed_3	264	792,3322	AGeb_3	7,03	28,26	HH_3
0,2541	0,4031	ABed_4	792,3322	1191,1042	AGeb_4	28,26	48,58	HH_4
0,4031	1	ABed_5	1191,1042	472030,716	AGeb_5	48,58	4225,5376	HH_5

Tabelle 4: Klassenzuordnung

Anschließend werden die Kacheln gemäß Tabelle 5 z. B. unter Verwendung eines Tabellenkalkulationsprogramms einem Siedlungsstrukturtypen zugeordnet, sodass der Siedlungsstrukturtyp des untersuchten Gebietes kachelgenau bekannt ist.

		HH_1	HH_2	HH_3	HH_4	HH_5
ABed_1	AGeb_1	V	V	V	V	V
	AGeb_2	V	V	V	V	V
	AGeb_3	V	V	V	V	V
	AGeb_4	V	V	V	V	V
	AGeb_5	V	V	V	V	V
ABed_2	AGeb_1	O	O	A		
	AGeb_2	A	A	A	A	A
	AGeb_3	A	A	A	A	A
	AGeb_4	G	G	G	A	A
	AGeb_5	G	A	G	G	G
ABed_3	AGeb_1	O	O			
	AGeb_2	D	D	O		
	AGeb_3	G	O	O	O	
	AGeb_4	G	G	G	G	G
	AGeb_5	G	G	G	G	G
ABed_4	AGeb_1					
	AGeb_2	D	D			
	AGeb_3	D	D	O		
	AGeb_4		G	G		
	AGeb_5	G	G	G	G	G
ABed_5	AGeb_1					
	AGeb_2	S	S			
	AGeb_3	S	S			
	AGeb_4	S	G			
	AGeb_5	G	G	G	G	G

Tabelle 5: Zuordnung der Siedlungsstrukturtypen

6.3 Nutzung der Open-Source-Daten

Zur Beurteilung der Güte der Open-Source-Daten wurde die Analyse zweimal durchgeführt. Einmal mit den unveränderten Geodaten und ein zweites Mal, nachdem die fehlenden Häuserumrisse händisch ergänzt wurden. Die Geokoordinaten der Leerungen wurden mit den untersuchten Siedlungsgebieten verglichen.

Hierbei konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

Odenwaldkreis:

- Ursprünglich konnte 7.040 von 141.280 Leerungskoodinaten kein Siedlungsgebiet zugewiesen werden. Hierfür gab es zwei Gründe: Entweder, dass kein Gebäudeflächenschwerpunkt der Kachel zugewiesen wurde, aber zumindest ein Teil eines Gebäudes vorhanden war. Oder zum anderen, dass für die Geokoordinaten der Leerung keine Kachel gebildet wurde, da sich in diesem Gebiet, basierend auf den Open-Source-Daten kein Gebäude befindet.
- Nach der Optimierung der Geoinformationen konnte festgestellt werden, dass sich das zugewiesene Siedlungsgebiet von 57.655 Leerungskoodinaten verändert hat. Das entspricht einem Prozentsatz an ursprünglich inkorrekten Siedlungsgebietseinteilungen von 41 %.

Göppingen:

- Nach der manuellen Ergänzung von Gebäudeumrissen wurden 28 % der durch untersuchte Abfallsammeltouren durchquerten Kacheln anderen Siedlungsstrukturtypen zugeordnet

Eine händische Überprüfung und Ergänzung der OSM-Daten durch den Bearbeiter ist also unabdingbar, um die geforderte hohe Qualität der Siedlungsstrukturtypeneinteilung zu erhalten. Eine solche ist zwar im untersuchten Gebiet möglich, da es sich auf den Odenwaldkreis und den Landkreis Göppingen beschränkt, allerdings ist eine flächendeckende Optimierung in einem Bundesland oder dem gesamten Bundesgebiet zeitlich zu aufwändig und somit aus wirtschaftlicher Sicht nicht zu empfehlen. Es erscheint daher sinnvoll, auch im Sinne einer anwenderfreundlichen Analysemethode bereits auf vollständige, die Grundfläche der Gebäude beschreibenden Daten zurückgreifen zu können.

Solche Daten sind gegen ein entsprechendes Entgelt auf dem Markt erhältlich. Die hierfür nötigen Aufwendungen werden in der Abwägung deutlich von dem durch sie hervorgerufenen Nutzen überwogen, denn vollständige, nach einheitlichen Kriterien klassifizierte und umrissene Gebäudedaten erlauben eine schnelle, unkomplizierte, in ihren Ergebnissen genauere Siedlungsstrukturtypenanalyse als solche aus frei zugänglichen Quellen. Des Weiteren eröffnen sie Möglichkeiten einer feineren Analyse. So kann z. B. eine einheitliche Attributierung der Gebäude bezüglich ihrer Nutzung (z. B. Gewerbe) eine Validierung der entwickelten Methodik zulassen und dafür sorgen, dass im Analysealgorithmus Fehlererkennungs- und Korrekturmechanismen implementiert werden können, die die Siedlungsstrukturtypenanalyse genauer und damit in der Praxis besser anwendbar werden lassen.

7. Ermittlung der Emissionen und Kosten der Prozessketten

7.1 Ressourcenorientierte Prozessrechnung

Zur Ermittlung der Emissionen und Kosten einer Tour mit den jeweiligen Fahrzeugen, wurde die Methodik an das Vorgehen der Ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung (RPKR) angelehnt. Dementsprechend wurden für die identifizierten Prozesse der An- und Rückfahrt, der Sammlung, des Nahtransports, des Umschlag und des Ferntransports die Ressourcen ermittelt, an denen durch den Prozess ein Verbrauch stattfindet. Dies geschieht über Verbrauchsfunktionen, die pro Prozess für jede Ressource aufgestellt wurden. Durch den dann bekannten Verbrauch können über Emissions- bzw. Kostenfunktionen die durch den Prozess entstehenden Kosten und die Umweltbelastung ermittelt werden. Die folgende Abbildung stellt das Vorgehen in einem Nomogramm grafisch dar.

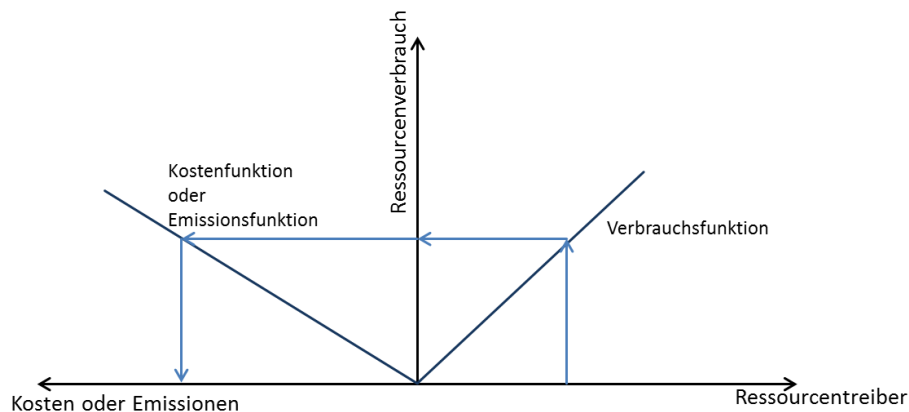


Abbildung 7: Nomogramm

Die bereits vorgestellten sammlungs-, siedlungs-, und fahrzeugspezifischen Parameter beeinflussen den Ressourcenverbrauch entweder über die Verbrauchssätze der Verbrauchsfunktionen oder über die Ausprägung des Ressourcentreibers.

7.2 Ressourcendefinition, Ressourcentreiber und Verbrauchsfunktionen

Es werden insgesamt drei Ressourcenarten berücksichtigt: Fahrzeuge, Personal und Energie.

Bei den Fahrzeugen wird unterschieden in ASF, Transportfahrzeuge und Umschlagmittel. Die Personalressourcen unterteilen sich in Fahrer für die verschiedenen Fahrzeuge und Müllwerker. Als Energieressource wird bisher nur Kraftstoff, insbesondere Diesel betrachtet.

Für jede Ressource, bei der ein Verbrauch durch den jeweiligen Prozess entsteht und jeden der sechs Teilprozesse wurden die Ressourcentreiber ermittelt und mit den Verbrauchssätzen die Verbrauchsfunktionen aufgestellt, die den Zusammenhang zwischen dem Ressourcentreiber und der Ressource herstellen und mit denen somit der Ressourcenverbrauch ermittelt werden kann.

Die folgenden Tabellen geben eine Übersicht über die ermittelten Ressourcen und Ressourcentreiber.

Prozess	Ressource
Anfahrt / Rückfahrt	ASF, Fahrer ASF, Energie, ggf. Müllwerker
Sammlung	ASF, Fahrer ASF, Energie, ggf. Müllwerker
Transport	ASF, Fahrer ASF, Energie, ggf. Müllwerker
Umschlag	Umschlagmittel, ggf. Fahrer, Energie
Ferntransport	Transportfahrzeug, Fahrer, Energie

Tabelle 6: Ressourcen der Teilprozesse

Prozess	Ressourcentreiber
Anfahrt / Rückfahrt	Entfernung in km
Sammlung	Sammelentfernung pro SG in km, bzw. Anzahl an Stopps pro SG
Transport	Entfernung in km
Umschlag	Umschlagzeit pro t
Ferntransport	Entfernung in km

Tabelle 7: Ressourcentreiber der Teilprozesse

Ausfallzeiten der Fahrzeuge und Maschinen werden über die einzelnen Prozesse nicht berücksichtigt. Die Definitionen der Variablen mit den dazugehörigen Einheiten können dem Variablenverzeichnis entnommen werden. Neben den Ressourcentreibern wird der Ressourcenverbrauch von den Verbrauchssätzen bestimmt. Diese ergeben sich für die einzelnen Prozesse wie folgt:

Teilprozess An-/Rückfahrt:

Ressourcenverbrauch Energie

Bei der Anfahrt und Rückfahrt ist das ASF nicht beladen. Es wird der Verbrauch pro 100 km als Verbrauchssatz verwendet. Ist dieser für das Fahrzeug nicht bekannt bzw. nicht berechenbar, kann auf allgemeine Werte aus der Literatur zurückgegriffen werden. Diese sind z. T. kostenpflichtig online abrufbar. Die Verbrauchswerte für Dieselfahrzeuge können beispielsweise aus dem Handbuch der Emissionsfaktoren (HBEFA) oder auf den Seiten der Verkehrs-Rundschau entnommen werden. [HEF14]; [VRS14]; [KSS11] Dabei sind die Verbräuche der LKWs jeweils für die Leerfahrt und eine 100 %-ige Auslastung angegeben. Über die Formel zur Berechnung des benötigten Kraftstoffes bei variabler Zuladung kann das Gewicht des Aufbaus des ASF berücksichtigt werden. [KSS11]

Formel 1: Kraftstoffverbrauch ASF ohne Zuladung

$$KV_{AR,ASF} = KV_{LKW,leer} + (KV_{LKW,voll} - KV_{LKW,leer}) * m_{Aufbau} / NL_{max}$$

Dabei ist KV der Kraftstoffverbrauch in Litern pro 100 km, m die Masse und NL die Nutzlast, beides gemessen in Tonnen. Die Indizes *leer* und *max* beziehen sich auf eine Nutzlast des LKW von null Tonnen bzw. eine volle Auslastung. Damit ergibt sich folgende Verbrauchsfunktion:

Formel 2: Verbrauchsfunktion Energie, An- und Rückfahrt

$$L_{AR,ASF} = (D_{A,ASF} + D_{R,ASF}) / 100 * KV_{AR,ASF}$$

Ressourcenverbrauch Personal

Bei der Anfahrt und Rückfahrt wird ein Fahrer benötigt. Ob und wie viele Müllwerker eingesetzt werden ist tourenabhängig. Gemessen wird der Verbrauch in Arbeitsstunden. Wie lange für die An- und Rückfahrt benötigt wird, hängt von der zu fahrenden Distanz und der Geschwindigkeit ab. Diese ist wiederum von den Straßenbedingungen sowie dem Verkehrsaufkommen abhängig.

Formel 3: Verbrauchsfunktion Personal, An- und Rückfahrt

$$T_{AR,ASF} = (D_{A,ASF} + D_{R,ASF}) * 1/v_{AR,ASF}$$

Teilprozess Sammlung

Ressourcenverbrauch Energie

Um den während der Sammlung benötigten Kraftstoff zu ermitteln, kann nicht auf den Verbrauch pro 100km zurückgegriffen werden, da durch das ständige Bremsen und Anfahren, sowie das Schütten und Verdichten zusätzlich Energie benötigt und damit Kraftstoff verbraucht wird. Es wird deshalb der benötigte Kraftstoff pro Stopp bzw. Leerung berechnet. Wie viele Stopps anfallen kann, soweit ansonsten unbekannt, über die Tourenlänge und die Siedlungsgebietszusammensetzung abgeschätzt werden. Zum Verbrauch pro Stopp wird auch der Verbrauch für die Zwischenfahrt gezählt. Somit ergibt sich folgende Verbrauchsfunktion der Ressource Energie für den gesamten Sammelprozess:

Formel 4: Verbrauchsfunktion Energie, Sammlung

$$L_S = N_{Stopp} * L_{Stopp}$$

Ressourcenverbrauch Personal

Wie bei der An- und Rückfahrt, fällt auch bei der Sammlung der Ressourcenverbrauch des Fahrers und der eingesetzten Müllwerker an. Die benötigte Zeit wird über die Anzahl an Stopps berechnet. Wie viel Zeit bei einem Stopp vergeht, ist von mehreren Größen abhängig, vor allem aber davon, ob es sich um einen Voll- oder Teilservice handelt bzw. – bei einer gemischten Tour – wie viele Tonnen im Vollservice gesammelt werden. Auch das Sammelverfahren beeinflusst die Zeit, da beim Einwegverfahren das Zurückstellen der Behälter entfällt. Weitere Einflussfaktoren sind die Schüttung, die Anzahl der Müllwerker sowie die Behälterart und -größe. Aufgrund dieser vielen Einflussgrößen, wird von einer Berechnung über Systeme vorbestimmter Zeiten abgesehen. Die Zeiten sollten über eine Datenanalyse der Touren ermittelt oder pro Tour gemessen werden.

Formel 5: Verbrauchsfunktion Personal, Sammlung

$$T_S = N_{Stopp} * T_{Stopp}$$

Nicht berücksichtigt wird, dass bei mehreren Sammelgebieten in einer Tour beim Wechseln der Gebiete keine Behälter gesammelt werden, da angenommen wird, dass die Gebiete in der Regel nah beieinander liegen.

Teilprozess Nahtransport

Ressourcenverbrauch Energie

Für die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs während des Nahtransports kann auf dieselbe Formel wie für die Berechnung der An- und Rückfahrt zurückgegriffen werden. Bei der Berechnung muss allerdings das Gewicht des Abfalls zum Gewicht des Aufbaus hinzugefügt werden.

Formel 6: Kraftstoffverbrauch Nahtransport

$$KV_{NT} = KV_{LKW,leer} + (KV_{LKW,voll} - KV_{LKW,leer}) * (m_{Aufbau} + m_{Abfall})/NL_{max}$$

Formel 7: Verbrauchsfunktion Energie, Nahtransport

$$L_{NT} = D_{NT} / 100 * KV_{NT}$$

Ressourcenverbrauch Personal

Auch die benötigten Arbeitsstunden werden analog zu denen der An- und Rückfahrt berechnet.

Formel 8: Verbrauchsfunktion Personal, Nahtransport

$$T_{NT} = D_{NT} * 1/v_{NT} + T_{AA}$$

Zum Nahtransport wird auch die Entladung gezählt. In der Regel wird dafür nur wenig Energie benötigt, da der Abfall einfach abgekippt werden kann bzw. der Motor des Fahrzeugs beim Warten nicht läuft. Für den ganzen Prozess mit Warten und Wiegen an der Abfallanlage sollte jedoch ein Zeitaufschlag berücksichtigt werden. Dieser ist je nach Abfallanlage und ASF verschieden.

Wie häufig die Teilprozesse An- und Rück- und Transportfahrt des ASF anfallen, ist von der Abfallmasse bzw. -volumen und der Kapazität des ASF sowie der Verdichtung abhängig. Hierzu müssen die benötigten Transportfahrten unter Berücksichtigung des Volumens und der Masse berechnet werden. Die Kilometer der Rückfahrten von der Abfallanlage bzw. dem Umschlagort zum Sammelgebiet werden zum Prozess An- und Rückfahrt gezählt, da derselbe Verbrauchssatz genutzt werden kann. Der Verbrauch des Nahtransports wird mit der Anzahl an Nahtransporten multipliziert.

Teilprozess Umschlag

Ressourcenverbrauch Energie

Falls ein Umschlagmittel verwendet wird, entsteht dabei ein Energieverbrauch. Dieser wird bei den meisten Fahrzeugen bzw. Maschinen aufgrund der geringen zurückzulegenden Distanz nicht in Kilometern, sondern in Betriebsstunden gemessen. Kostentreiber ist die umzuschlagende Abfallmasse, Verbrauchssatz die benötigte Zeit für den Umschlag einer Tonne.

Formel 9: Zeitbedarf Energie, Umschlag

$$T_U = m_{Abfall} * T_m$$

Die Verbrauchsfunktion ergibt sich dementsprechend aus der Multiplikation der benötigten Zeit mit dem Kraftstoffverbrauch pro Stunde.

Formel 10: Verbrauchsfunktion Energie, Umschlag

$$L_U = T_U * KV_U$$

Ressourcenverbrauch Personal

Personal ist für den Umschlag nicht zwangsweise erforderlich. Wenn ein Fahrer für das Umschlagmittel benötigt wird, entspricht seine Arbeitszeit der oben ermittelten Betriebszeit (Formel 9) sofern Pausen vernachlässigt werden. Sollten der Fahrer und die Müllwerker beim Umschlag warten, ist ihre Arbeitszeit auch zu berücksichtigen.

Teilprozess Ferntransport und Rückfahrt

Ressourcenverbrauch Energie

Der Kraftstoffverbrauch des vollbeladenen Transportmittels, sofern unbekannt, kann wieder über die Verbrauchstabellen berechnet bzw. bei voller Beladung abgelesen werden.

Formel 11: Kraftstoffverbrauch Ferntransport

$$KV_{FT} = KV_{TM,leer} + (KV_{TM,voll} - KV_{TM,leer}) * m_{Abfall}/NL_{max}$$

Durch das Multiplizieren der Transportdistanz mit dem Verbrauch bei Beladung und der zurückzulegenden Wegstrecke der Rückfahrt mit dem Verbrauch mit einer Nutzlast von null, kann der Ressourcenverbrauch des Prozesses festgelegt werden:

Formel 12: Verbrauchsfunktion Energie, Ferntransport

$$L_{FT} = D_{FT}/100 * KV_{FT}$$

Formel 13: Verbrauchsfunktion Energie, An- und Rückfahrt Ferntransportfahrzeug

$$L_{AR,FTM} = (D_{A,FTM} + D_{R,FTM})/100 * KV_{AR,FTM}$$

Ressourcenverbrauch Personal

Die benötigte Arbeitszeit des Fahrers des Transportmittels wird analog zu der des Nahtransports berechnet, zuzüglich der Zeit für die Rückfahrt.

Formel 14: Verbrauchsfunktion Personal, Ferntransport

$$T_{FT} = D_{FT} * 1/v_{FT}$$

Formel 15: Verbrauchsfunktion Personal An- und Rückfahrt Ferntransportmittel

$$T_{AR,FTM} = (D_{A,FTM} + D_{R,FTM}) * 1/v_{AR,FTM}$$

Die Zeit für das Entladen wird, wie bei der Entladung nach dem Nahtransport, pauschal aufgeschlagen. Der Abfall kann meist abgekippt bzw. bei Anhängern mit Walking-Floor in kurzer Zeit abgeladen werden. Der Kraftstoffverbrauch wird als vernachlässigbar angenommen.

7.3 Ermittlung der Verbrauchssätze und der Ausprägungen der Ressourcentreiber

Die oben beschriebenen Verbrauchssätze und Ressourcentreiber wurden anhand der Daten für die beiden untersuchten Fahrzeuge bestimmt.

Die Analyse der Tourdaten des Seitenladers ergaben folgende Erkenntnisse:

Tabelle 8 zeigt die Einsatztage des Seitenladers im Untersuchungszeitraum. Insgesamt wurde das ASF auf 14 unterschiedlichen Touren eingesetzt. Nach Abzug der Einsatztage, an denen keine Leerungen

stattfanden bzw. nur eine sehr geringe Anzahl ASB geleert wurde, konnten 208 Touren zur weiteren Analyse herangezogen werden.

Wochentag/Tournummer	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Total
0	10	6	9	12	12	52	52	153
13724			1					1
14111		1						1
14112	1	3						4
14114				1				1
14115					1			1
14211	39	3			1			43
14212		39	2					41
14213			33					33
14214				1				1
14215				3	37			40
14311	2							2
14313			2					2
14314			5	36				41
14315					1			1
Total	52	52	52	53	52	52	52	365

Tabelle 8: Einsatztage Seitenlader

Zur Analyse der zeitlichen und geographischen Abstände der Leerungspunkte allgemein wurden die Daten um Ausreißer bereinigt. Dies führt dazu, dass Pausezeiten und das Wechseln von Sammelgebieten nicht in die Analyse eingehen. Hierzu wurden alle Datenpunkte entfernt deren zeitliche oder geographische Distanz zur vorherigen Leerung größer als das 3. Quartil zuzüglich dem dreifachen des Interquartilsabstandes betrug.

Durchschnittlich werden 737 Leerungen pro Tour durchgeführt, der Mittelwert der Zeit zwischen zwei Leerungen liegt bei 31 Sekunden, die mittlere Entfernung bei 44,51 Metern.

Für die Analyse des Teilprozesses Sammlung wurden die vorhandenen Leerungen tourspezifisch und siedlungsgebietspezifisch betrachtet. Da es sich um einen Seitenlader handelt, entspricht eine Leerung einem Stopp. Das Ergebnis ist in Tabelle 9 und Abbildung 8 zu sehen.

Siedlungsgebiet	Anzahl	Mittelwert	Minimum	Maximum	Standardabweichung
A	17708	58	0	474	54
D	80503	44	0	422	41
G	583	72	0	293	61
O	41030	47	0	478	45
V	1232	79	0	451	71
Gesamtergebnis	141056	46	0	478	45
Tourspezifisch $\bar{\sigma}$	208	47	35	84	6

Tabelle 9: Leerungen nach Siedlungsgebiet

Es konnte festgestellt werden, dass sich die Mittelwerte, Minima und Maxima sowie die Standardabweichung nach SG strukturiert teils erheblich vom Tourmittelwert unterscheiden.

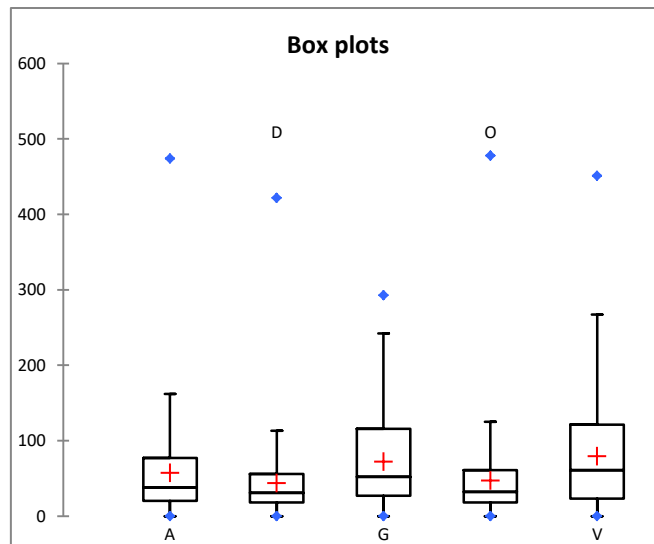


Abbildung 8: Entfernung zwischen Leerungen in Metern

Zu erkennen ist hierbei auch, dass die gebildeten Siedlungsgebiete O und D sich aus Abfallsammlungssicht, basierend auf den Entfernungen zwischen den Leerungen nur wenig unterscheiden. Eine *stark verdichtete Bebauung* kam im Odenwaldkreis nicht vor. Der Grund hierfür ist, dass Großstädte im Odenwaldkreis nicht vorhanden sind, die größte Stadt ist Michelstadt. Die gleiche Analyse wurde mit den Zeiten zwischen den Leerungen durchgeführt.

Siedlungsgebiet	Anzahl	Mittelwert	Minimum	Maximum	Standardabweichung
A	17708	0:00:32	0:00:04	0:02:04	0:00:17
D	80503	0:00:31	0:00:03	0:02:11	0:00:16
G	583	0:00:33	0:00:05	0:01:32	0:00:18
O	41030	0:00:32	0:00:04	0:02:09	0:00:17
V	1232	0:00:33	0:00:05	0:02:05	0:00:18
Gesamtergebnis	141056	0:00:32	0:00:03	0:02:11	0:00:16
Tourspezifisch ϕ	208	0:00:32	0:00:28	0:00:37	0:00:02

Tabelle 10: Gemessene Zeiten zwischen Leerungen

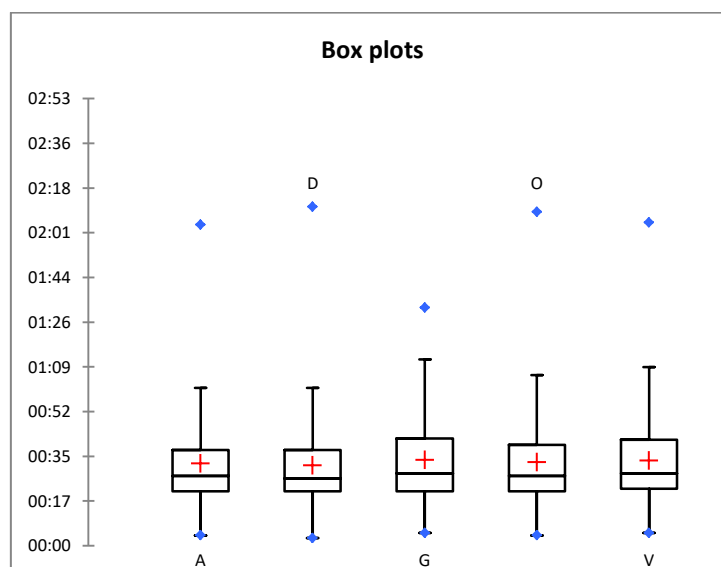


Abbildung 9: Zeitliche Abstände zwischen Leerungen in Minuten

Hier ist zu erkennen, dass zwischen den einzelnen SG und dem Tourdurchschnitt keine Unterschiede vorhanden sind.

Eine lineare Regression mit der Zeit in Sekunden als abhängige Variable und der Entfernung in Metern als unabhängige Variable führt zu folgender Regressionsgleichung:

$$\text{Zeit zwischen Leerungen} = 23 + 0,2 * \text{Entfernung}$$

Die Variable ist signifikant ($p < 0,0001$), allerdings können bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,286 nur knapp 30 % der Varianz durch die Entfernung erklärt werden. Der Rest besteht aus der Zeit für das genaue Anfahren an den Behälter, das Entleeren und das Zurückstellen und das Losfahren. Zur Überprüfung ob sich diese Leerungszeit in den einzelnen SG unterscheidet, wurde eine Regression auch für die einzelnen SG durchgeführt. Es konnten hierbei keine Unterschiede festgestellt werden. Die Einbindung weiterer Variablen für eine genauere Untersuchung ist aufgrund der Datengrundlage nicht möglich.

Es wurde außerdem eine Kraftstoffanalyse durchgeführt:

Von den 208 Analysetouren ist der Kraftstoffverbrauch von 104 Touren angegeben. Das Minimum liegt bei 55 und das Maximum bei 225 Litern pro Tour. Im Durchschnitt wurden 98,89 Liter verbraucht. Durch die Sammlung erhöhen sich die zu transportierende Masse und damit der Verbrauch des Fahrzeugs. Dies wird durch die Tonnage berücksichtigt. In 104 Touren wurden 880 Tonnen Abfall transportiert, das Minimum liegt bei 6,15 und das Maximum bei 13,57 Tonnen. Für die weitere Analyse wurden die Ausreißer entfernt. Es lagen somit 58 Touren vor.

Eine Regression mit dem Kraftstoffverbrauch als abhängige Variable und der Sammelentfernung, der sonstigen Entfernung (Anfahrt, Rückfahrt, Pausefahrt und Transportfahrt) sowie der Tonnage führt zu folgender Regressionsgleichung:

$$\text{Kraftstoff} = 27,55 + 0,63 * \text{Sammelentfernung} + 0,55 * \text{sonstige Entfernung} + 1,15 * \text{Tonnage}$$

Quelle	Wert
sonstige Entfernung	0,581
Sammelentfernung	0,878
Tonnage	0,124

Tabelle 11: Standardisierte Koeffizienten

Wie erwartet, hat die Sammelentfernung einen höheren Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch, als die sonstige Entfernung ohne Leerungen. Allerdings ist die Regressionskonstante und der Verbrauch für einen km sonstige Entfernung, dementsprechend Anfahrt und Rückfahrt mit 0,55 l pro km sehr hoch.

Mit einem angepassten Bestimmtheitsmaß von 0,855 werden 85 % der Varianz durch die gewählten unabhängigen Variablen erklärt. Alle Variablen sind signifikant (Achsenabschnitt, Sammelentfernung und sonstige Entfernung $p < 0,0001$, Tonnage $p < 0,023$). Auch das Modell ist signifikant ($p < 0,0001$).

Mit der Gleichung wurde daraufhin der Kraftstoffverbrauch während der Sammlung berechnet und durch die Anzahl der Leerungen geteilt. Damit ergibt sich ein Wert für den Kraftstoff pro Leerung von 0,08 Litern.

Anzumerken ist, dass die vorliegenden Verbräuche pro Tour nur sehr ungenau, meist in 5er oder 10er Schritten, angegeben wurden. Des Weiteren waren die Ergebnisse einer Regression unter Berücksichtigung der Siedlungsgebiete nicht signifikant.

Es sind weitere Untersuchungen mit verschiedenen Seiten-, aber auch Heck- und Frontladern nötig, um die Erkenntnisse aus der Regressionsgleichung validieren zu können.

Da dies in diesem Projekt aufgrund der fehlenden Fahrzeuge nicht geschieht, werden die Verbräuche für eine 100 %ige Auslastung und ohne Last aus den HBEFA-Tabellen von Kranke/Schied/Schön abgeleitet. Es wird ein zusätzliches Aufbaugewicht des Seitenladers von 6 t berücksichtigt. Damit wurde ein Verbrauch bei einer Nutzlast von 0 t von 26,24 l/100km, dementsprechend 0,26 l pro km berechnet. Dieser errechnete Wert entspricht ca. der Hälfte des Wertes aus der Regressionsanalyse. Für einen Verbrauch bei voller Auslastung können 30 l/100 km abgelesen werden.

Verbrauchssatz		Wert für Seitenlader
$KV_{ASF,voll}$	Kraftstoffverbrauch des ASF, Nutzlast = max [l/100km]	30
$v_{ASF,AR}$	Geschwindigkeit des ASF bei der An- und Rückfahrt [km/h]	-
L_{stopp}	Benötigter Kraftstoff bei einem Stopp [l]	0,08
S_{stopp}	Benötigte Zeit für einen Stopp [min]	0:32
$KV_{ASF,AR}$	Kraftstoffverbrauch des ASF bei der An- und Rückfahrt [l/100km]	26,24
$v_{ASF,NT}$	Geschwindigkeit des ASF beim Nahtransport [km/h]	-

Tabelle 12: Verbrauchssätze Seitenlader

Der Kraftstoffverbrauch beim Nahtransport hängt von der zu transportierenden Abfallmasse ab. Die Distanzen und benötigten Zeiten werden in der Analyse über Google Maps Distance Matrix API berechnet, dadurch ergeben sich die Geschwindigkeiten. D. h. in diesem Projekt gehen alle Fahrzeuge mit den gleichen Geschwindigkeiten bei An- und Rück- und Transportfahrt ein. Die unterschiedlichen Straßen- und Verkehrsbegebenheiten werden berücksichtigt.

Ist die Anzahl an Stopps pro Tour nicht bekannt, kann sie über die Siedlungsgebietszusammensetzung berechnet werden. Ist die Sammeltourlänge und das Siedlungsgebiet bekannt erfolgt die Umrechnung über Formel 16.

Formel 16: Berechnung der Anzahl an Stopps

$$\text{Anzahl an Stopps} = \sum_{i=1}^5 \text{Sammeltourlänge [km]} * \frac{\text{Anteil } SG_i [\%]}{100} * \text{Stopps } SG_i$$

Wenn die Anzahl an Stopps und das Siedlungsgebiet bekannt ist, erfolgt die Umrechnung in die Sammeltourlänge über:

Formel 17: Berechnung der Sammeltourlänge

$$\text{Sammeltourlänge} = \sum_{i=1}^5 \text{Anzahl an Stopps} * \frac{\text{Anteil } SG_i [\%]}{100} * \frac{1}{\text{Stopps } SG_i}$$

Es ergeben sich dabei aufgrund der vorliegenden Daten des Seitenladers folgende Werte für die einzelnen Siedlungsgebiete, wobei das Siedlungsgebiet *stark verdichtete Bebauung* nicht untersucht werden konnte:

Siedlungsgebiet	Index i	Anzahl an Stopps pro km
A	1	17
D	2	23
G	3	14
O	4	21
V	5	13

Tabelle 13: Anzahl an Stopps pro Siedlungskilometer

Auch hier sind weitere siedlungsspezifische Touranalysen notwendig, um die Distanzen zu validieren.

Das Abfallvolumen der Tour kann über das Behältervolumen, den Füllgrad und die Anzahl an Behältern berechnet werden. Über die abfallspezifische Dichte kann dadurch die Abfallmasse der Tour berechnet werden.

Alle anderen ermittelten Ressourcentreiber sind je nach Tour verschieden. Sie werden später durch den Anwender des Software-Tools eingegeben.

Die Ergebnisse der Analyse des Klein-ASF einer Tour sind in Tabelle 14 dargestellt.

Siedlungsgebiete	Anzahl	Mittelwert Distanz	Standardabweichung Distanz	Mittelwert Zeit	Standardabweichung Zeit
A	25	256,24	409,85	00:01:09	00:01:14
D	308	189,48	432,83	00:01:02	00:01:30
O	108	206,92	289,24	00:01:01	00:01:00
V	3	107,30	113,50	00:00:38	00:00:38
Total	445	197,50	399,95	00:01:02	00:01:22

Tabelle 14: Sammelanalyse Heilemann

Wie anhand Tabelle 14 zu erkennen ist, sind die Standardabweichungen der Distanzen und Zeiten der einzelnen Gebiete im Vergleich zu den Mittelwerten sehr hoch. Auch sind die einzelnen Distanzen deutlich größer als bei den RESO-Daten. Durch die Analyse einer weiteren Tour wurden die Daten bestätigt, weshalb die aufwändige Datenanalyse abgebrochen wurde. Der Grund liegt im Entsorgungsverhalten der Bürger im Sammelgebiet. Einige Haushalte nutzen keinen Biomüll. So muss vom Entsorgungsunternehmen zwar jedes Haus abgefahren werden, vor einigen Häusern liegen aber keine Säcke und somit wird keine Leerung durchgeführt. Die ermittelten Zeiten und Entfernungen in den Siedlungsgebieten müssten um das Entsorgungsverhalten in den einzelnen Gebieten bereinigt werden. Da dies nicht möglich ist, werden die Durchschnittswerte von 197,50 m und 1:02 min für die Entfernung bzw. die Zeit zwischen den Leerungen unabhängig vom Siedlungsgebiet genutzt.

Aus den HBEFA-Verbrauchswerten ergibt sich ein Verbrauch von 14 l pro 100 km, wenn das ASF voll beladen ist bzw. – unter Berücksichtigung eines Aufbaugewichts von 320 kg – ein Verbrauch von 12,5 l ohne Beladung. Mit Berücksichtigung dieser Werte ergibt sich ein Kraftstoffverbrauch von 0,05 l pro Stopp.

7.4 Aufstellen der Emissions- und Kostenfunktionen der Teilprozesse

Die Emissionsfunktionen müssen nur für die Ressource Energie aufgestellt werden, da durch den Verbrauch der anderen Ressourcen keine Treibhausgase entstehen.

Die Emissionsfunktion eines Teilprozesses ergibt sich durch den Ressourcenverbrauch multipliziert mit dem Emissionsfaktor. In der DIN EN 16258 werden diese Faktoren für beliebige Transportdienstleistungen angegeben. Berücksichtigt werden dabei die THG Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC) und Schwefelhexafluorid (SF₆). Bei der Berechnung der entstehenden Emissionen können entweder die THG durch die Verbrennung des Kraftstoffes (Tank-to-Wheel) oder über den gesamten Prozess von der Produktion bzw. Gewinnung bis zum Verbrauch (Well-to-Wheel) berücksichtigt werden. Um die erstellte Methodik zukünftig mit wenig Aufwand an andere Energiequellen anpassen zu können, wurden die Faktoren für Well-to-Wheel übernommen. Somit kann z. B. ein Elektroantrieb, der während der Fahrt keine Emissionen erzeugt, ohne Anpassung in die Methodik integriert werden.

Kraftstofftyp	THG-Emissionsfaktor
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 (LPG)	1,90

Tabelle 15: Emissionsfaktoren nach DIN EN 16258

Die so ermittelten Emissionen der Teilprozesse können daraufhin addiert werden, um die fahrzeugspezifischen Gesamtemissionen der Tour zu erhalten. So kann die emissionsärmste Konfiguration ermittelt werden. Beim Vergleich der Transportarten wird in ähnlicher Weise vorgegangen, mit dem Unterschied, dass die Prozesse des Umschlags und des Ferntransports mitberücksichtigt werden müssen.

Formel 18: Emissionsfunktion An- und Rückfahrt des ASF

$$THG_{AR,ASF} = L_{AR,ASF} * e_{ASF}$$

Formel 19: Emissionsfunktion Sammlung

$$THG_S = L_S * e_{ASF}$$

Formel 20: Emissionsfunktion Nahtransport

$$THG_{NT} = L_{NT} * e_{ASF}$$

Formel 21: Emissionsfunktion Umschlag

$$THG_U = L_U * e_{UM}$$

Formel 22: Emissionsfunktion Ferntransport

$$THG_{FT} = L_{FT} * e_{FTM}$$

Formel 23: Emissionsfunktion An- und Rückfahrt des Transportfahrzeugs

$$THG_{AR,FTM} = L_{AR,FTM} * e_{FTM}$$

Die Kostenfunktionen werden im Gegensatz zu den Emissionsfunktionen für alle betrachteten Ressourcen aufgestellt, da jeder Ressourcenverbrauch Kosten erzeugt.

Personalressource

Für die Personalressource erfolgt die Kostenberechnung über Personalkosten pro Stunde. Die Stundenlöhne der Fahrer unterscheiden sich dabei in der Regel von denen der Müllwerker. Durch die notwendige Qualifikation als Berufskraftfahrer liegen diese meist über denen der Lader. Auch innerhalb der Tätigkeiten sind die Löhne verschieden. Dies ist vom jeweiligen Tarifvertrag abhängig. Für die Berechnung werden die Lohnkosten pro Monat des entsprechenden Mitarbeiters durch seine durchschnittlichen monatlichen Arbeitsstunden geteilt.

Damit ergeben sich folgende Kostenfunktionen für das Personal des ASF:

Formel 24: Personalkosten Anfahrt und Rückfahrt

$$PK_{M,AR,ASF} = T_{AR,ASF} * k_{M,ASF}$$

Formel 25: Personalkosten Sammlung

$$PK_{M,S} = T_S * k_{M,ASF}$$

Formel 26: Personalkosten Nahtransport

$$PK_{M,NT} = T_{NT} * k_{M,ASF}$$

Unterscheiden sich auch die Löhne der Müllwerker, müssen jeweils eigene Gleichungen aufgestellt werden. Personalkosten entstehen weiterhin beim Fahrer des Ferntransportfahrzeugs und – sofern notwendig – beim Durchführenden des Umschlags.

Formel 27: Personalkosten Fahrer Ferntransportfahrzeug An- und Rückfahrt

$$PK_{AR,FT} = T_{AR,FTM} * k_{M,FTM}$$

Formel 28: Personalkosten Fahrer Ferntransportfahrzeug Transportfahrt

$$PK_{FT} = T_{FT} * k_{M,FTM}$$

Formel 29: Personalkosten Durchführender Umschlag

$$PK_U = T_U * k_{M,UM}$$

Energieressource

Als Kostensatz für die Berechnung der Teilprozesskosten, die durch die Ressource Energie entstehen, werden die Kraftstoffpreise verwendet.

Formel 30: Energiekosten ASF An- und Rückfahrt

$$EK_{AR,ASF} = L_{AR,ASF} * k_{E,ASF}$$

Formel 31: Energiekosten Sammlung

$$EK_S = L_S * k_{E,ASF}$$

Formel 32: Energiekosten Umschlag

$$EK_U = L_U * k_{E,UM}$$

Formel 33: Energiekosten Nahtransport

$$EK_{NT} = L_{NT} * k_{E,ASF}$$

Formel 34: Energiekosten Ferntransport

$$EK_{FT} = L_{FT} * k_{E,FTM}$$

Formel 35: Energiekosten An- und Rückfahrt Ferntransportmittel

$$EK_{AR,FTM} = L_{AR,FTM} * k_{E,FTM}$$

Prozess	Ressource	Verbrauchsfunktion	Emissionsfunktion	Kostenfunktion
An- und Rückfahrt ASF	Energie	$L_{AR,ASF} = (D_{A,ASF} + D_{R,ASF})/100 * KV_{AR,ASF}$	$THG_{AR,ASF} = L_{AR,ASF} * e_{ASF}$	$EK_{AR,ASF} = L_{AR,ASF} * k_{E,ASF}$
	Personal	$T_{AR,ASF} = (D_{A,ASF} + D_{R,ASF}) * 1/v_{AR,ASF}$		$PK_{M,AR,ASF} = T_{AR,ASF} * k_{M,ASF}$
Sammlung	Energie	$L_S = N_{Stopp} * L_{Stopp}$	$THG_S = L_S * e_{ASF}$	$EK_S = L_S * k_{E,ASF}$
	Personal	$T_S = N_{Stopp} * T_{Stopp}$		$PK_{M,S} = T_S * k_{M,ASF}$
Nahtransport	Energie	$L_{NT} = D_{NT}/100 * KV_{NT}$	$THG_{NT} = L_{NT} * e_{ASF}$	$EK_{NT} = L_{NT} * k_{E,ASF}$
	Personal	$T_{NT} = D_{NT} * 1/v_{NT} + T_{AA}$		$PK_{M,NT} = T_{NT} * k_{M,ASF}$
Umschlag	Energie	$L_U = T_U * KV_U$	$THG_U = L_U * e_{UM}$	$EK_U = L_U * k_{E,UM}$
	Personal	$T_U = m_{Abfall} * T_m$		$PK_U = T_U * k_{M,UM}$
Ferntransport	Energie	$L_{FT} = D_{FT}/100 * KV_{FT}$	$THG_{FT} = L_{FT} * e_{FTM}$	$EK_{FT} = L_{FT} * k_{E,FTM}$
	Personal	$T_{FT} = D_{FT} * 1/v_{FT}$		$PK_{FT} = T_{FT} * k_{M,FTM}$
An- und Rückfahrt FTM	Energie	$L_{AR,FTM} = (D_{A,FTM} + D_{R,FTM})/100 * KV_{AR,FTM}$	$THG_{AR,FTM} = L_{AR,FTM} * e_{FTM}$	$EK_{AR,FTM} = L_{AR,FTM} * k_{E,FTM}$
	Personal	$T_{AR,FTM} = (D_{A,FTM} + D_{R,FTM}) * 1/v_{AR,FTM}$		$PK_{AR,FT} = T_{AR,FT} * k_{M,FTM}$

Tabelle 16: Überblick Funktionen

Fahrzeugressource

Die Reparatur- und Wartungskosten der ASF unterscheiden sich stark und werden deshalb in der Methodik berücksichtigt. Allerdings werden diese nicht für die Teilprozesse, sondern pro Tour berechnet:

Formel 36: Reparatur- und Wartungskosten

$$K_{RW,tour} [€] = \frac{K_{RW,Jahr} [€] * Tourlänge [km]}{Laufleistung [km]/Jahr}$$

Auch die kalkulatorischen Abschreibungen werden pro Tour mit Berücksichtigung der Tourenlänge berechnet:

Formel 37: Kalkulatorische Leistungsabschreibung

$$Kalk. LA [€] = \frac{(Wiederbeschaffungswert [€] - Schrottwert [€]) * Tourlänge [km]}{Maximalleistung [km]}$$

8. Demonstrator

8.1 Tool zur Ermittlung der Siedlungsstruktur

Im Folgenden wird eine Anleitung gegeben, wie die Siedlungsstruktur in ArcGIS ermittelt werden kann. Die Ergebnisse können in den Demonstrator eingepflegt werden. Ist die Siedlungsstruktur bekannt bzw. kann sie für den Anwender mit einer ausreichenden Genauigkeit abgeschätzt werden, kann dieser Schritt entfallen.

Anleitung Siedlungsstruktureinteilung

1. Werkzeug „Netz_250m_erstellen“ ausführen

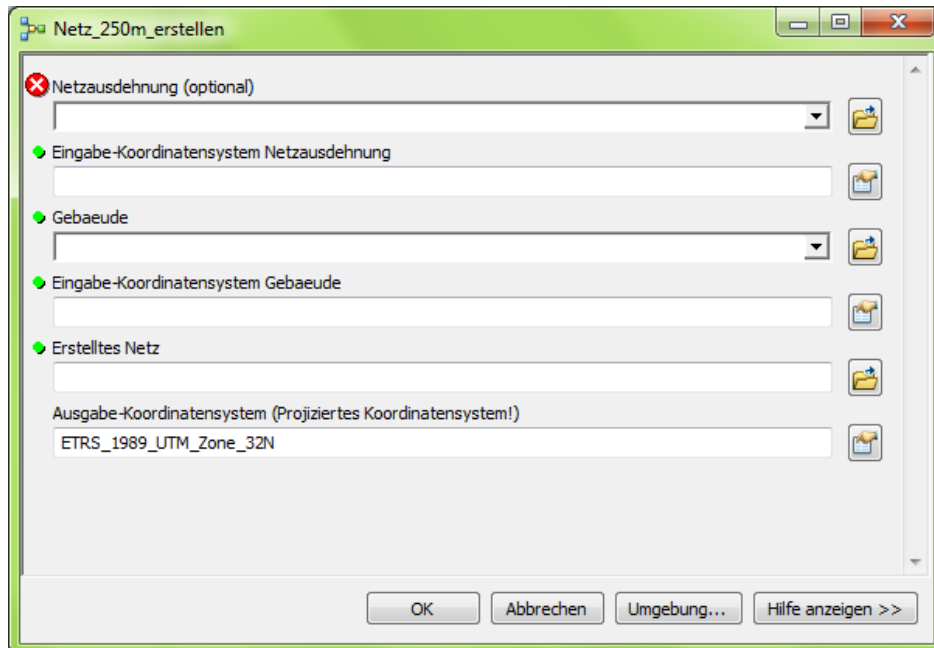


Abbildung 10: Werkzeugmaske zur Siedlungsstrukturierung

Hinweise:

- a. *Netzausdehnung* beschreibt das Gebiet, das vom erstellten Netz bedeckt sein soll bspw. durch einen die Abfallsammeltouren beinhaltenden Layer.
 - b. Das *Eingabe-Koordinatensystem Netzausdehnung* muss dem Koordinatensystem der Netzausdehnung entsprechen.
 - c. *Gebaeude* beinhaltet den Grundflächendatenlayer der Gebäude.
 - d. Das *Eingabe-Koordinatensystem Gebaeude* muss dem Koordinatensystem der Gebäude entsprechen.
 - e. Im Feld *Erstelltes Netz* wird der Speicherort des zu erstellenden Netzes angegeben.
 - f. Das *Ausgabe-Koordinatensystem* muss ein projiziertes sein.
2. Excel-Tabelle erstellen

Vorgehen:

- a. Jeweils ein Arbeitsblatt *Einteilungen* und *SG* nennen
- b. In drittes Arbeitsblatt die Attributtabelle des in 1. erstellten Netzes einfügen, dieses Arbeitsblatt *Netz* nennen, hierbei dafür Sorge tragen, dass der Anteil der bedeckten Kachelfläche in Spalte D, die durchschnittliche Gebäudegrundfläche in Spalte F und der durchschnittliche Abstand Haus-Haus in Spalte O eingetragen sind.

- c. In das Arbeitsblatt *Einteilungen* in die obere linke Ecke folgende Tabelle so einfügen, dass sie eine Ausdehnung A1:I7 besitzt:

Anteil bedeckter Fläche [-]			Fläche pro Gebäude [m ²]			Abstand Gebäude-Gebäude [m]		
untere Grenze	obere Grenze	Bezeichnung	untere Grenze	obere Grenze	Bezeichnung	untere Grenze	obere Grenze	Bezeichnung
0	0,0095	ABed_1	0	56	AGeb_1	0	0,15	HH_1
0,0095	0,0592	ABed_2	56	264	AGeb_2	0,15	7,03	HH_2
0,0592	0,2541	ABed_3	264	792,3322	AGeb_3	7,03	28,26	HH_3
0,2541	0,4031	ABed_Out	792,3322	1191,1042	AGeb_Out	28,26	48,58	HH_4
0,4031	1	ABed_Ext	1191,1042	472030,716	AGeb_Ext	48,58	4225,5376	HH_Out_Ext

Tabelle 17: Klassenzuordnung für den Nutzer

- d. In das Arbeitsblatt *SG* in die obere linke Ecke Tabelle 5 so einfügen, dass sie eine Ausdehnung A1: G26 besitzt.

- e. Im Arbeitsblatt *Netz* in Spalte Q folgende Formel auf Zeile 2 anwenden und auf alle Zeilen übertragen:

```
=WENN(UND($D2>=Einteilungen!$A$3;D2<Einteilungen!$B$3);Einteilungen!$C$3;WENN(UND($D2>=Einteilungen!$A$4;$D2<Einteilungen!$B$4);Einteilungen!$C$4;WENN(UND($D2>=Einteilungen!$A$5;D2<Einteilungen!$B$5);Einteilungen!$C$5;WENN(UND($D2>=Einteilungen!$A$6;D2<Einteilungen!$B$6);Einteilungen!$C$6;WENN(UND($D2>=Einteilungen!$A$7;D2<Einteilungen!$B$7);Einteilungen!$C$7;""))))
```

- f. Im Arbeitsblatt *Netz* in Spalte R folgende Formel auf Zeile 2 anwenden und auf alle Zeilen übertragen:

```
=WENN(UND($F2>=Einteilungen!$D$3;$F2<Einteilungen!$E$3);Einteilungen!$F$3;WENN(UND($F2>=Einteilungen!$D$4;$F2<Einteilungen!$E$4);Einteilungen!$F$4;WENN(UND($F2>=Einteilungen!$D$5;$F2<Einteilungen!$E$5);Einteilungen!$F$5;WENN(UND($F2>=Einteilungen!$D$6;$F2<Einteilungen!$E$6);Einteilungen!$F$6;WENN(UND($F2>=Einteilungen!$D$7;$F2<Einteilungen!$E$7);Einteilungen!$F$7;""))))
```

- g. Im Arbeitsblatt *Netz* in Spalte S folgende Formel auf Zeile 2 anwenden und auf alle Zeilen übertragen:

```
=WENN(UND($O2>=Einteilungen!$G$3;$O2<Einteilungen!$H$3);Einteilungen!$I$3;WENN(UND($O2>=Einteilungen!$G$4;$O2<Einteilungen!$H$4);Einteilungen!$I$4;WENN(UND($O2>=Einteilungen!$G$5;$O2<Einteilungen!$H$5);Einteilungen!$I$5;WENN(UND($O2>=Einteilungen!$G$6;$O2<Einteilungen!$H$6);Einteilungen!$I$6;WENN(UND($O2>=Einteilungen!$G$7;$O2<Einteilungen!$H$7);Einteilungen!$I$7;""))))
```

- h. Im Arbeitsblatt *Netz* in Spalte T folgende Formel auf Zeile 2 anwenden und auf alle Zeilen übertragen:

```
=INDEX(WENN(Q2=SG!$A$2;SG!$C$2:$G$6;WENN(Q2=SG!$A$7;SG!$C$7:$G$11;WENN(Q2=SG!$A$12;SG!$C$12:$G$16;WENN(Q2=SG!$A$17;SG!$C$17:$G$21;WENN(Q2=SG!$A$22;SG!$C$22:$G$26;""))));VERGLEICH(R2;WENN(Q2=SG!$A$2;SG!$B$2:$B$6;WENN(Q2=SG!$A$7;SG!$B$7:$B$11;WENN(Q2=SG!$A$12;SG!$B$12:$B$16;WENN(Q2=SG!$A$17;SG!$B$17:$B$21;WENN(Q2=SG!$A$22;SG!$B$22:$B$26;""))))))))
```

N(Q2=SG!\$A\$17;SG!\$B\$17:\$B\$21;WENN(Q2=SG!\$A\$22;SG!\$B\$22:\$B\$26;"")))));0);VE
RGLEICH(S2;SG!\$C\$1:\$G\$1;0))

Spalte T enthält nun die Siedlungsstrukturtypen der einzelnen Kacheln.

3. Touren mit Siedlungstypeneinteilung versehen

- a. Hinzufügen der Siedlungstypeneinteilung zu Netz: ArcToolbox> Data Management Tools > Verbindungen > Verbindung hinzufügen > Layer-Name: „Netz aus 1.“ > Eingabe-Join-Feld: „Kachel_ID“ >Join-Tabelle: „Tabelle aus 2.“ > Ausgabe-Join-Feld: „Kachel_ID“

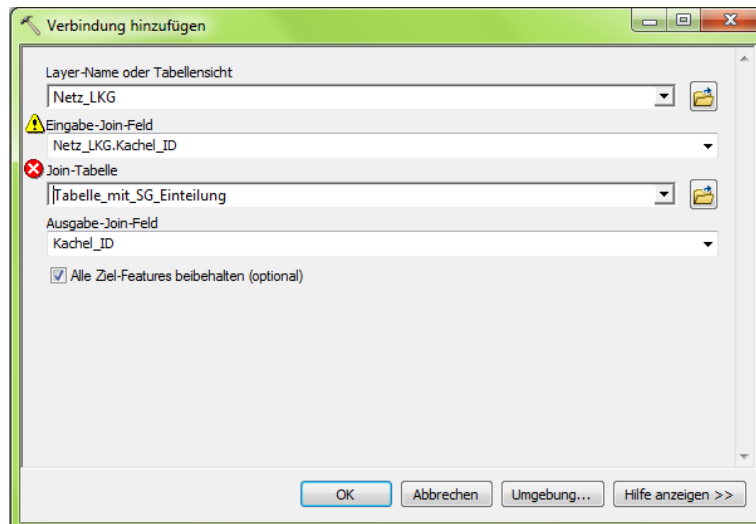


Abbildung 11: Maske Verbindung hinzufügen

- b. Hinzufügen der Tourdaten: Datei > Daten hinzufügen > XY-Daten hinzufügen... > „Auswahl der entsprechenden Tabelle und der zugehörigen Geocodierung“
- c. In b. erstellte Daten in ein neues Shapefile exportieren: Rechtsklick auf den Layer, der in b. hinzugefügt wurde > Daten > Daten exportieren...
- d. Räumliche Verbindung zwischen Tourmessdaten (aus c.) und Siedlungsgebieten herstellen: ArcToolbox> Analysis Tools >Overlay> Räumliche Verbindung > Zielfeatures: „Tourmessdaten aus c.“ > Verbindungsfeatures: „Netz aus a.“

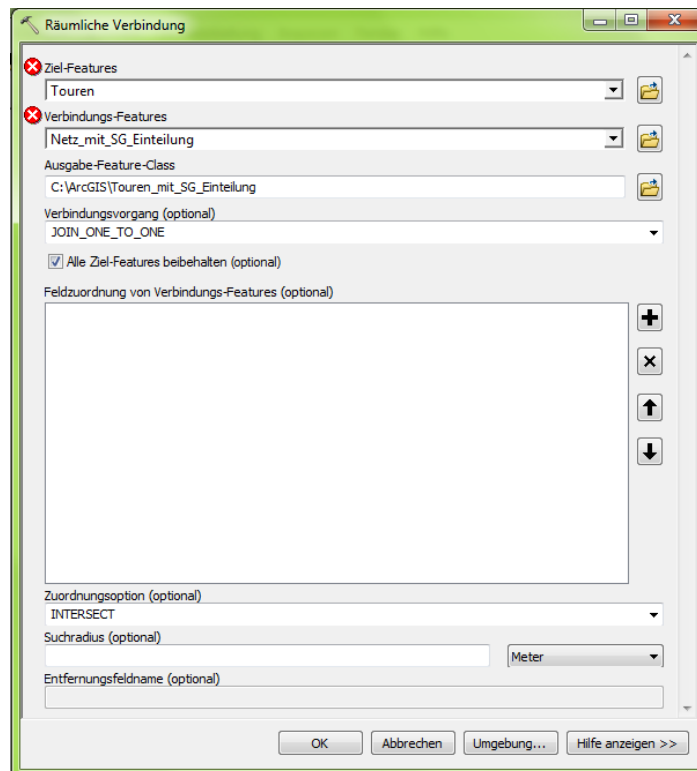


Abbildung 12: Maske Räumliche Verbindung

Die Tourdatentabelle enthält nun in einer Spalte die Siedlungsgebiete. Dadurch kann nun der Anteil der einzelnen Siedlungsgebiete berechnet werden, durch welche die Sammeltour führt.

8.2 Tool zur Ermittlung der Emissionen und Kosten

Hinweis zur Nutzung: Der Demonstrator wurde für MS-Excel 2010 erstellt, die Nutzung unter anderen Excel-Versionen wurde nicht überprüft. Die Abfragen der Distanzen und Zeiten zwischen den eingegebenen Adressen über Google Maps Distance Matrix API wurden getestet unter Verwendung von Firefox 49.0.1.

Nutzen/Ziele

Das Ziel des Demonstrators ist es, die Methodik zur Ermittlung des emissionsärmsten Sammelfahrzeugs bzw. der emissionsärmsten Fahrzeugkombination aus ASF, Umschlagmittel und Transportfahrzeug, umzusetzen. Das fertige Excel-Tool soll eine Möglichkeit aufzeigen, wie die in dem Projekt gewonnen Erkenntnisse verknüpft und softwaretechnisch dargestellt werden können. Der Unterschied zu einer in der Praxis einsatzfähigen Software besteht vor allem darin, dass Informationen manuell eingegeben werden müssen und nicht über Schnittstellen übertragen werden können.

Aufbau

Der Demonstrator besteht aus vier Tabellenblättern und drei Formularen. Zur Eingabe der benötigten Informationen dient die UserForm *Eingabewerte*. Die Informationen können in die Bereiche Tour, Sammlung, Fahrzeug und Personal geordnet auf den jeweiligen Seiten der UserForm eingegeben werden.

Das zweite Formular *Fahrzeuge* dient zur Aufnahme der im Fuhrpark vorhandenen Fahrzeuge. Die Fahrzeuge müssen beim ersten Anwenden des Tools eingepflegt werden. Bei späteren Analysen können die eingegebenen Werte dann, je nach zu analysierenden Kombinationen, wieder ausgegeben werden. Die dritte UserForm ist das *Hauptmenü*.

Die UserForm *Fahrzeuge* besteht aus obligatorischen und optionalen Eingabemöglichkeiten. Optional sind der Wiederbeschaffungswert des Fahrzeugs, die maximale Laufleistung, der Schrottwert, die Laufleistung/Jahr, die Wartungs- und Reparaturkosten pro Jahr, sowie die Einsatztage pro Jahr. Diese Eingaben sind nur erforderlich, wenn die kalkulatorische Leistungsabschreibung sowie die umgerechnet anfallenden Wartungs- und Reparaturkosten durch die Tour berücksichtigt werden sollen. Dies wird empfohlen, da sich diese Kosten je nach betrachtetem Fahrzeug erheblich unterscheiden können.

Pflichteingaben sind die Benennung des Fahrzeugs, beispielsweise kann hier das Kennzeichen genutzt werden. Der Fahrzeugtyp (Klein-ASF, Seiten-, Front-, oder Hecklader) sowie die Kraftstoffart werden über Dropdown-Listen mit vorgegebenen Auswahlmöglichkeiten eingegeben. Benötigt wird außerdem der Kraftstoffverbrauch wenn das Fahrzeug leer bzw. voll ausgelastet ist. Ist dieser nicht bekannt, können die Werte aus Tabellen, wie in Kapitel 7.2 beschrieben, entnommen werden. Unter Berücksichtigung der Masse des Aufbaus berechnet der Demonstrator daraus die benötigten Werte. Bei den ASF und Transportfahrzeugen wird der Verbrauch in l/100 km angegeben, bei Umschlagmitteln wie Baggern der Verbrauch in l/h. Weitere Eingaben sind der Kraftstoffverbrauch pro Leerung, dessen Berechnung in Kapitel 7.3 erfolgt ist, sowie das Ladevolumen, das zulässige Gesamtgewicht und das Leergewicht.

Die Tourspezifischen Eingaben der UserForm *Eingabewerte* sind der Start- und Endpunkt der Sammeltour, welche dem Fahrzeugstandort des ASF entsprechen, der Anfangs- und Endpunkt der Sammlung sowie der Standort der Abfallanlage bzw. Deponie. Findet ein indirekter Transport statt, müssen außerdem der Umschlagort und der Standort des Transportfahrzeugs, sowie die Umschlagzeit pro Tonne Abfall angegeben werden. Gegebenenfalls kann auch ein Pauseort angegeben werden, falls die Pause an einem bestimmten Ort, z. B. der Kantine auf dem Unternehmensgelände stattfindet und nicht während der Tour auf einem Parkplatz. Aus den Ortsangaben werden dann die zu berücksichtigenden Distanzen und die resultierenden Zeiten über Google Maps Distance Matrix API berechnet und tourspezifisch addiert. Dadurch können verschiedene streckenbezogene Höchstgeschwindigkeiten der Fahrzeuge nicht berücksichtigt werden. Die so berechneten Strecken sind die Anfahrt und Rückfahrt des Fahrzeugs bzw. der der Fahrzeuge sowie die Nah- und ggf. die Ferntransportfahrt. Findet eine Pausefahrt statt, wird die Annahme getroffen, dass diese nach der Hälfte der Tour anfällt. Da der Tourverlauf unbekannt ist, wird über die Koordinaten des Anfangs- und Endpunkts der Sammlung die Koordinaten des Mittelpunkts berechnet und die Distanz von diesem Punkt zum Pauseort und zurück berücksichtigt.

Es muss weiterhin entweder die Sammelentfernung mit den Anteilen der Siedlungsgebiete (*vereinzelte, aufgelockerte, offene, verdichtete Bebauung* oder *Gewerbegebiet*) oder die Anzahl der Haltepunkte mit den Anteilen der Siedlungsgebietseinteilung angegeben werden.

Die sammlungsspezifischen Daten werden auf der zweiten Seite der UserForm *Eingabewerte* eingegeben. Über Dropdown-Listen werden wiederum Eingabemöglichkeiten für die Sammelart, den

Servicegrad, die Behälterart, das Behältervolumen und die Abfallart vorgegeben. Außerdem müssen die Behälteranzahl pro Halt und der Füllgrad angegeben werden. Die Sammelart, der Servicegrad sowie die Behälterart haben momentan keinen Einfluss auf die Analyse, da sie im Rahmen des Projektes nicht analysiert werden konnten. Durch die Anzahl an Behältern pro Halt und den Füllgrad kann in Verbindung mit der Anzahl an Stopps oder der Sammelentfernung das anfallende Abfallvolumen der Tour bestimmt werden. Das Tool berechnet dann durch die Dichte der verschiedenen Abfälle aus den Quelldaten die Abfallmasse der Tour.

Die Seiten *Fahrzeuge* der UserForm *Eingabewerte* zeigt die bisher eingepflegten Fahrzeuge, sobald der Button *Fahrzeuginstanz laden/aktualisieren* gedrückt wurde. Zu jedem Fahrzeug erscheint eine Checkbox. Soll ein Fahrzeug in der Analyse berücksichtigt werden, muss die Checkbox über einen Klick aktiviert werden. Dabei ist zu beachten, dass bei indirekten Transporten die Anzahl der zu berechnenden Fahrzeugkombinationen schnell ansteigt.

Die personalspezifischen Informationen beschränken sich auf die Personalkosten. Bei einem indirekten Transport können neben denen des Fahrers des ASF auch die des Fahrers des Transportfahrzeugs und des Umschlagmittels angegeben werden. Für die Müllwerker kann nur ein Kostensatz genutzt werden, d. h. alle Müllwerker haben den gleichen Stundenlohn.

Die Berechnung der Kosten und Emissionen erfolgt im Modul *Analysen*. In diesem Modul sind sowohl die Funktionen zur Ermittlung der Distanzen als auch die einzelnen Berechnungen zum einem bei einem indirekten, zum anderen bei einem direkten Transport zu finden. Die einzelnen Abschnitte sind im Code kommentiert.

Im Modul *Checkboxen* werden die Checkboxen für die Seite *Fahrzeuge* der UserForm *Eingabewerte* auf Basis der Anzahl der eingepflegten Fahrzeuge generiert. Für die eigentliche Berechnung ist dieses Modul nicht relevant.

Im Tabellenblatt *Fahrzeuge* können die bisher gespeicherten Fahrzeuge mit Ihren Ausprägungen eingesehen werden. Das Tabellenblatt *Berechnungen* dient der Übernahme der eingegebenen Informationen der Tour-, Sammlungs-, und Personalinformationen sowie der Berechnung der Geokoordinaten und ist ausgeblendet. Im Blatt *Quelldaten* können die im Tool hinterlegten Parameter, wie beispielsweise die Fahrzeugtypen, Sammelverfahren, Emissionsfaktoren, Kostensätze etc. eingesehen und verändert werden. Die Inhalte der Comboboxen werden über dieses Blatt generiert. Auch dieses Tabellenblatt ist ausgeblendet, kann aber über das Hauptmenü aufgerufen werden. Im Blatt *Auswertung* werden nach der Analyse die Kosten und Emissionen der einzelnen Teilprozesse, sowie der fahrzeugspezifischen Prozessketten aufgelistet, sowie das emissionsärmste bzw. kostenoptimale Fahrzeug bzw. die optimale Fahrzeugkombination aufgezeigt.

Der Aufbau ist dabei folgendermaßen: Ab Zeile zwei werden die in der Analyse berücksichtigten Fahrzeuge mit den Ausprägungen aufgelistet. Darunter werden die fahrzeugspezifischen Prozessketten abgebildet, wobei in den ersten beiden Spalten zu sehen ist, welche Fahrzeuge betrachtet werden. Die einzelnen Fahrzeugkombinationen werden durch einen Strich voneinander getrennt. In Spalte drei ist der Teilprozess (An- und Rückfahrt ASF, Sammlung, Nahtransport, Umschlag, An- und Rückfahrt FTM, Ferntransport) und in Spalte vier die Ressource (Energie, Fahrer ASF, Müllwerker, Umschlagdurchführender, Fahrer FTM) ablesbar. In den Spalten fünf bis acht wird

der Verbrauchssatz, der Ressourcentreiber und der Ressourcenverbrauch jeweils für die Teilprozesse dargestellt. In Spalte neun sind die Kosten des Teilprozesses zu finden, die über die Kostentreiber (zu sehen in Spalte acht) und den Ressourcenverbrauch berechnet werden. Spalte elf bildet die Emissionen der Teilprozesse ab. Analog zu den Kosten werden die Emissionen über den Ressourcenverbrauch und die Emissionsfaktoren berechnet, zu sehen in Spalte zehn. Die Kosten durch die kalkulatorische Leistungsabschreibung sowie Reparatur- und Wartung werden in den Spalten zwölf und 13 dargestellt. Schließlich sind die Prozessemissionen und Prozesskosten in den Spalten 14 und 15 zu sehen. Der Wert der fahrzeugspezifischen Prozesskette mit den niedrigsten Kosten wird blau, derjenige mit den geringsten Emissionen grün dargestellt.

The table displays a detailed breakdown of costs and emissions for various vehicle types and process chains. Key columns include:

- Verbrauchssatz (Consumption Rate):** Column 9
- Ressourcentreiber (Resource Driver):** Column 8
- Ressourcenverbrauch (Resource Consumption):** Column 10
- Kostensätze (Cost Rates):** Column 11
- Teilprozesskosten (Sub-process Costs):** Column 12
- Emissionsfaktoren (Emission Factors):** Column 13
- Teilprozessemissionen (Sub-process Emissions):** Column 14
- Kosten kalk. Leistungsabschreibung (Costs calc. Depreciation):** Column 15
- Kosten Reparatur und Wartung (Costs Repair and Maintenance):** Column 16
- Kosten der Prozesskette (Costs of the Process Chain):** Column 17
- Emissionen der Prozesskette (Emissions of the Process Chain):** Column 18

Abbildung 13: Ergebnistabelle

8.3 Leitfaden zur Nutzung des Demonstrators

Vor Beginn der ersten Analyse müssen die Fahrzeuge eingepflegt werden. Hierzu wird der Button *Fahrzeuge einpflegen* des beim Start des Tools angezeigten *Hauptmenü* betätigt.

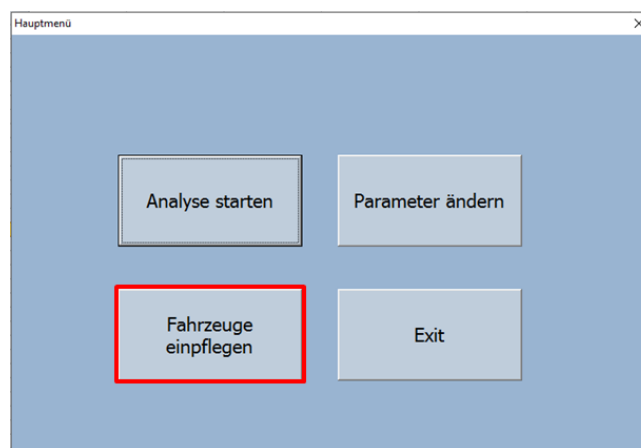


Abbildung 14: Hauptmenü

Es öffnet sich daraufhin die Eingabemaske *Fahrzeuge*. Nach der Bearbeitung der einzelnen Eingabefelder wird der Button *Daten übernehmen* gedrückt. Die eingegebenen Informationen werden gespeichert.

Fahrzeuge einpflegen

Obligatorisch:

Benennung: Seitenlader 1

Fahrzeugtyp: Seitenlader

Kraftstoffart: Seitenlader

Kraftstoffverbrauch leer [l/100 km]:

Kraftstoffverbrauch voll [l/100 km]:

alternativ: Kraftstoffverbrauch Tabelle [l/100 km] voll: 30 leer: 21,3

Masse Aufbau: 6

Kraftstoffverbrauch [l/Leerung]: 0,08

Ladevolumen [cbm]: 28

Zul. Gesamtgewicht [kg]: 26000

Leergewicht [kg]: 15450

Bei Umschlagmittel: Umschlagzeit pro Tonne:

Optional:

Wiederbeschaffungswert [€]:

max. Laufleistung [km]:

Schrottwert [€]:

Laufleistung/Jahr [km]:

Wartungs- und Reparaturkosten/Jahr:

Einsatztage/Jahr:

Zurück

Daten übernehmen

Abbildung 15: Maske Fahrzeuge einpflegen

Zur Kontrolle erscheint eine MsgBox. Wird der *OK*-Button gedrückt, werden die Felder in der Eingabemaske geleert und stehen für das nächste Fahrzeug zur Verfügung. Es werden alle Fahrzeugtypen über diese Maske eingepflegt. Mehrfachbenennungen schließt der Demonstrator aus. Über den *Zurück*-Button gelangt der Anwender wieder ins Hauptmenü.

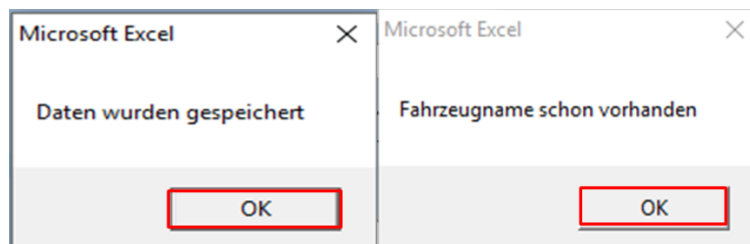


Abbildung 16: Informationsboxen

Außer dem Einpflegen der Fahrzeuge ist es empfehlenswert, die im Tool eingestellten Parameter zu überprüfen. Beim Klick auf den Button *Parameter ändern* des Hauptmenüs öffnet sich das Tabellenblatt *Quelldaten*. Es können die Kostensätze, Emissionsfaktoren und die Abfalldichten angepasst werden. Über den Button oben rechts wird das Hauptmenü wieder geöffnet und das Tabellenblatt ausgeblendet.

Kostensätze	Emissionsfaktor	Abfalldichte	7,5	15	90	120	240
Diesel	Diesel mit 5% Biodiesel	Restmüll				0,093	0,109
Super	Supermit 5% Ethanol	Gelber Sack			0,035		
		Biomüll	0,26	0,26		0,2	0,165

Abbildung 17: Tabellenblatt *Quelldaten*

Um die Kosten und Emissionen der Tour mit den verschiedenen Fahrzeugen zu berechnen, wird der Button *Analyse starten* des Hauptmenüs gedrückt.

Daraufhin öffnet sich die UserForm *Eingabewerte*. Auf der ersten Seite sind die Eingaben so zu gestalten, dass sie bei Google Maps zu eindeutigen Ergebnissen führt. In Abbildung 17 wurden beispielhaft nur die Ortschaften eingegeben. Als Koordinaten wird dann deren Mittelpunkt verwendet. Ein genaueres Ergebnis wird erreicht, wenn die vollständige Adresse eingegeben wird.

Für die Analyse muss entweder die Sammelentfernung oder die Anzahl an Stopps abgeschätzt werden können. Über die Sammelgebieteinteilung können die Werte umgerechnet werden. Ist das Sammelgebiet nicht bekannt, wird über die Eingabe von 20 % für alle SG der Mittelwert berücksichtigt. Nach der Eingabe wird der Button *Daten übernehmen* gedrückt.

Abbildung 18: Maske der Tourdaten

Im zweiten Schritt werden die sammlungsspezifischen Eingaben getätigt und wieder durch den Button *Daten übernehmen* gespeichert. Der Füllgrad und der Verdichtungsfaktor werden jeweils als Zahl zwischen null und eins angegeben. Ein Füllgrad von eins bedeutet, dass der Behälter vollständig gefüllt ist. Insbesondere bei Säcken ist dies nicht der Fall, da diese zugeschnürt werden und der Platz dafür das mögliche Abfallvolumen pro Sack verkleinert.

Abbildung 19: Maske der Sammlungsdaten

Die Seite *Fahrzeuge* der UserForm ist zunächst leer. Beim Klick des Buttons *Fahrzeugliste laden/aktualisieren* werden die eingepflegten Fahrzeuge auf der Seite aufgelistet. Der Anwender

wählt nun diejenigen Fahrzeuge über einen Klick auf das zugehörige Kontrollkästchen aus, die in die Analyse aufgenommen werden sollen.

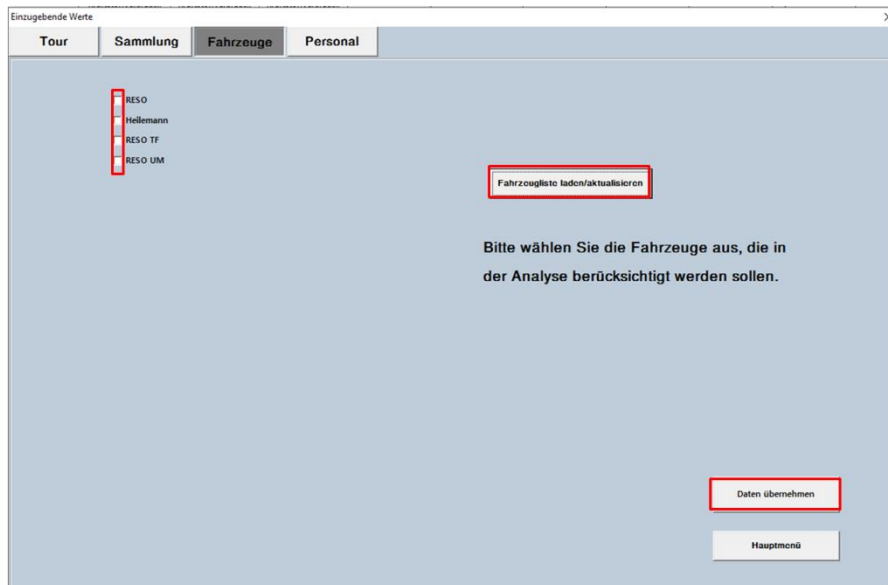


Abbildung 20: Maske der Fahrzeugdaten

Die Personalkosten pro Stunde können im Reiter *Personal* angegeben werden. Durch einen Klick auf den Button *Analyse starten* werden daraufhin die Berechnungen der Kosten und Emissionen durchgeführt.

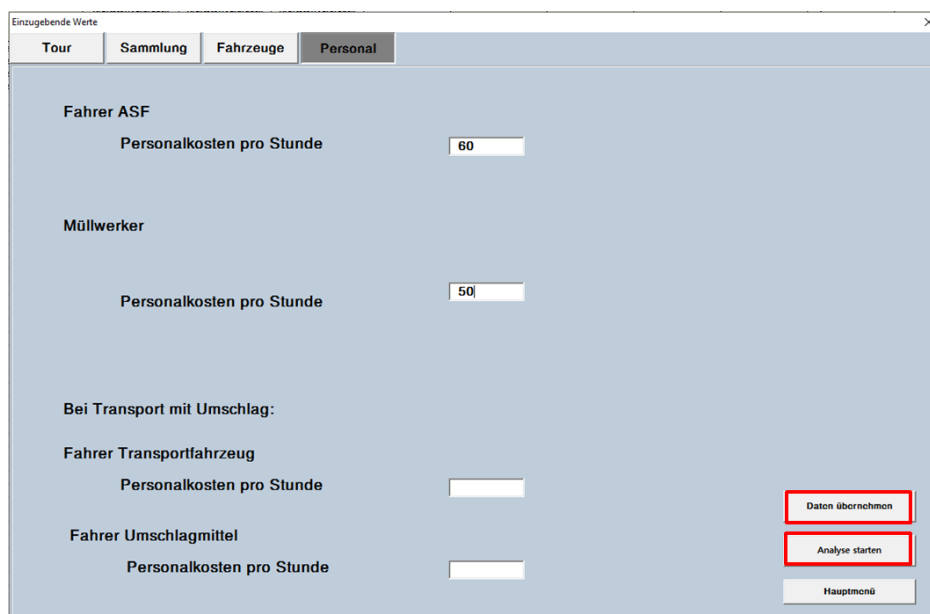


Abbildung 21: Maske der Personaldaten

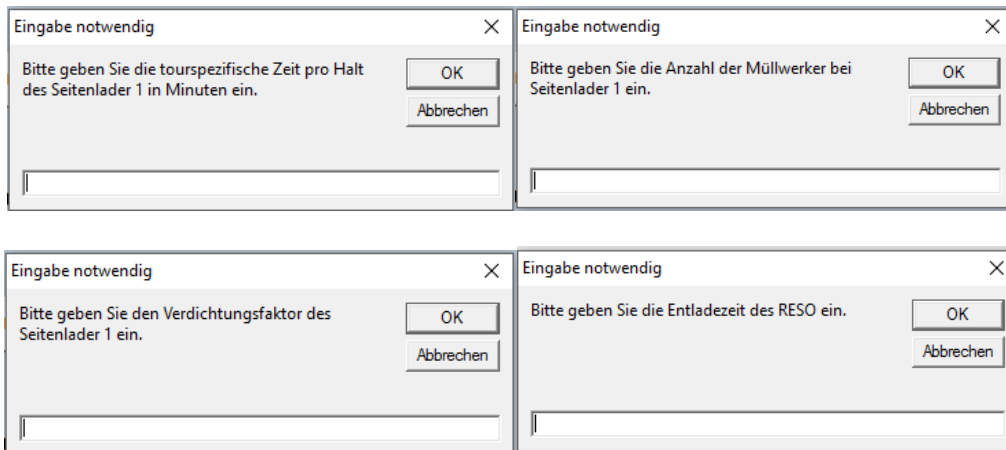


Abbildung 22: Eingabeböden

Für jedes ASF werden daraufhin vier Parameter abgefragt, die sich je nach Fahrzeug unterscheiden können und somit nicht rein tour- oder abfallspezifisch sind. Diese sind die Zeit pro Halt, die Anzahl der Müllwerker und der Verdichtungsfaktor. Beispielsweise wird bei einem Verdichtungsfaktor von 0,5 das Abfallvolumen im Fahrzeug um die Hälfte reduziert. Über diesen Verdichtungsfaktor wird berechnet, ob das Abfallvolumen der Tour, bzw. die Abfallmasse der Tour mit einer Fahrt im ASF bearbeitet werden kann, oder ob mehrere Fahrten notwendig sind. Außerdem muss die Zeit, die für das Entladen einschließlich Wiegen notwendig ist angegeben werden.

Es erfolgt außerdem eine Abfrage, ob eine Zeit für die Pause berücksichtigt werden soll. Hier wird die reine Pausenzeit angegeben, ohne evtl. An- und Rückfahrt zum Pausenort.

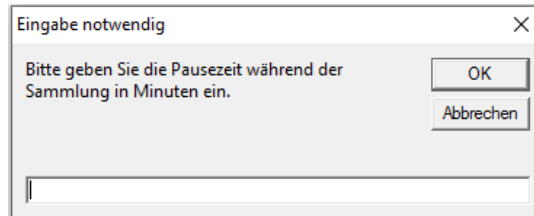


Abbildung 23: Eingabe der Pausen

Alle Eingaben sind mit OK zu bestätigen. Daraufhin wird die Kombination mit den geringsten Kosten und diejenige mit dem niedrigsten Emissionswert in MsgBoxen ausgegeben und in der Tabelle *Auswertung* markiert. Außerdem werden zum Vergleich die Kosten und Emissionen aller Prozessketten im Tabellenblatt *Auswertung* dargestellt.

9. Umweltpotenzialanalyse

Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen lässt sich anhand von Beispielszenarien das Umweltpotenzial durch die Anwendung der Methode aufzeigen. Es wird im Folgenden unterschieden in ein Reduktionspotential durch die Veränderung der Transportvariante und des Sammelfahrzeugs.

Transportvariante

Das Einsparpotenzial ergibt sich hierbei dadurch, dass ein Sammelfahrzeug mit Festaufbau, nachdem die Kapazität erreicht ist, gezwungen ist zur Abfallbehandlungsstation bzw. zum Umschlagplatz zu fahren. Ein Sammelfahrzeug mit Wechselaufbau kann innerhalb des Sammelgebietes den vollen Container gegen einen leeren tauschen. Der Weitertransport des vollen Containers erfolgt dann mit einem geeigneten Transportfahrzeug. Es ist auch möglich, den Abfall der einzelnen ASF an einer Umschlagstation zu lagern, bis ein Transportfahrzeug damit befüllt werden kann. Die hierbei erzielbare Reduktion der THG ist von den Distanzen und den eingesetzten Fahrzeugen abhängig. Bei einem untersuchten Praxisprozess, bei welchem die Sammlung mit einem Seitenlader erfolgt und ein Transport mit Umschlag stattfindet, ergeben sich folgende Werte:

Der Seitenlader benötigt, basierend auf eigenen Berechnungen ohne die Berücksichtigung der geladenen Abfallmasse, pro km, der nicht in einem Sammlungsgebiet gefahren wird, 0,55 l. Die Auswirkungen der Tonnage nur auf die Transportfahrt konnte aus den vorliegenden Daten nicht berechnet werden. Die Entfernung zwischen dem Umschlagplatz, der auch der Fahrzeugstandort nach der Tour ist, und der Abfallanlage beträgt 40 km, die Entfernung vom betrachteten Sammelgebiet zur Abfallanlage beträgt 25 km und die Distanz zwischen Sammelgebiet 1 und Umschlagplatz 15 km. Die mögliche Zuladung des Sattelzuges liegt bei 24 t. Der Sattelaufleger kann das Abfallvolumen von drei Touren aufnehmen. Der Verbrauch mit 100 % Auslastung in hügeliger Umgebung liegt bei 38,7 l/100 km, bei der Leerfahrt ergeben sich 23,2 l/100 km (basierend auf den Werten des Handbuchs für Emissionsfaktoren).

Der Transport ohne Umschlag führt bei 3,17 kg CO₂e/l und 13,8 l Dieserverbrauch zu 43,6 kg CO₂e, bei der Rückfahrt zum Fahrzeugstandort entstehen nochmals 69,74 kg CO₂e. Insgesamt entstehen dadurch 113,3 kg CO₂e.

Für den Ferntransport des Sattelzuges ergibt sich bei der Transportfahrt ein Kraftstoffverbrauch von 15,5 l, damit entstehen 49,1 kg CO₂e auf der Transportfahrt und 29,4 kg CO₂e durch die Leerfahrt. Der Nahtransport von Sammelgebiet 1 zum Umschlagplatz verursacht 26,2 kg CO₂e. Damit entsteht eine Emissionsmenge von 104,7 kg CO₂e.

Die Reduzierung der Emissionen ergibt sich nun durch die Berücksichtigung der zwei weiteren Touren, deren Abfallmassen mit einem Ferntransport zur Abfallanlage gebracht werden können. Für die weiteren Touren fallen dann, wenn die Distanzen gleich bleiben, nochmals 52,4 kg CO₂e für die Nahtransportfahrten der beiden ASF an. Somit entstehen 157,1 kg CO₂e für den Transport mit Umschlag. Beim Transport ohne Umschlag unter Berücksichtigung der Transportwege von drei ASF mit jeweils einer Rückfahrt zum Fahrzeugstandort ergeben sich 339,9 kg CO₂e.

Die geographische Lage des Siedlungsgebiet 1 ist aufgrund der Distanz zur Abfallanlage und zum Umschlagplatz eher ungeeignet für einen indirekten Transport. Dennoch ergibt sich eine Reduzierung der THG um 53 %. Nicht berücksichtigt wurden hierbei der Umschlag an sich und die Tonnage des ASF. Falls ein Umschlagmittel verwendet wird, müssen die entstehenden Emissionen hinzugerechnet werden. Bei einem Verbrauch eines Umschlagbaggers von 20 l Diesel pro Stunde und einer Beladezeit des Aufliegers von 15 min, entstehen 25,36 kg CO₂e und damit eine Reduzierung um 46 %.

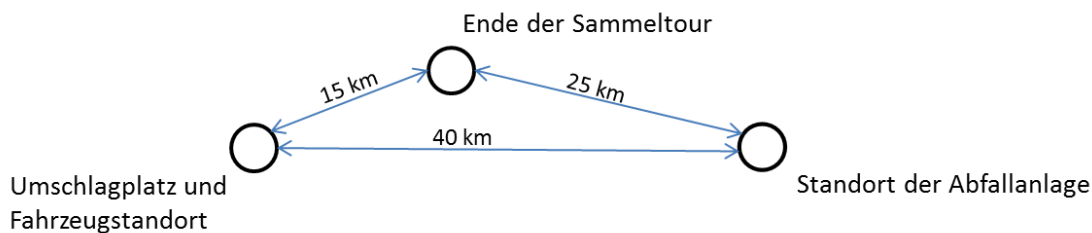


Abbildung 24: Skizze der Transportwege

Transport mit Umschlag	CO ₂ e [kg]	Transport ohne Umschlag	CO ₂ e [kg]
Nahtransportfahrt	26,2	Transportfahrt	43,6
Ferntransportfahrt	49,1	Rückfahrt ASF zum FZS	69,7
Rückfahrt TF zum FZS	29,4	Summe bei einer Sammeltour	113,3
Summe bei einer Sammeltour	104,7	Summe bei drei Sammeltouren	339,9
2 Nahtransportfahrten	52,4		
Summe bei drei Sammeltouren	157,1		

Tabelle 18: Emissionen mit und ohne Umschlag

Abfallsammelfahrzeug

Der eingesetzte Seitenlader benötigt umgerechnet für eine Leerung 0,08 l Diesel (inklusive Zwischenfahrt) und 0,55 l/km (unbeladen). Ein Klein-ASF ohne automatische Schüttvorrichtung und ohne Verdichtung dagegen nur 0,05 l pro Stopp und 0,15 l/km. Bei einem angenommenen Verdichtungsverhältnis von 2:1 ergeben sich zu sammelnde Abfallvolumina von 56 cbm für den Seitenlader und 17 cbm für das Klein-ASF, die Nutzlast liegt bei 10,5 t bzw. 3,5 t. Welches ASF weniger Emissionen erzeugt, hängt von der Leerungsanzahl bzw. Anzahl an Stopps, dem zu sammelnden Volumen bzw. der Masse und von der Entfernung des Sammelgebietes zur Abfallanlage sowie zum Fahrzeugstandort ab. Es werden Säcke im Teilservice gesammelt, und es wird weiterhin angenommen, dass im Falle des Seitenladers die Sammlung in Behältern erfolgen würde.

Die Distanz vom Fahrzeugstandort bis zur ersten Leerung beträgt 25 km. Es werden 450 Säcke bzw. Tonnen gesammelt bzw. geleert, hierfür erfolgen 320 Stopps. Für die Entleerungs- und die Rückfahrt müssen 50 km (10 km + 40 km) zurückgelegt werden. Der zu sammelnde Abfall wiegt 1,5 t und hat ein Volumen von 6 cbm, d. h. es muss während der Tour keine weitere Leerung erfolgen. Die Masse wird in der Berechnung des Verbrauchs, wie auch im oberen Beispiel, vernachlässigt. Damit ergibt sich für den Seitenlader ein Verbrauch von 66,9 l und somit 211,9 kg CO₂e. Beim Klein-ASF ergeben sich nur 27,3 l, dementsprechend 86,4 kg CO₂e. Dies entspricht einer Reduktion um 60 %. Hierbei muss jedoch angemerkt werden, dass es sich bei der untersuchten Tour um ein Extrembeispiel aus der Praxis handelt.

In der Regel werden größere Massen und Volumina gesammelt, die die manuelle Beladung des ASF unwirtschaftlich werden lassen und die den Müllwerkern physisch, ohne Ladehilfe, nicht zuzumuten sind. In dem beantragten Projekt sollen deshalb weitere, tourspezifisch eher austauschbare ASF-Konfigurationen untersucht werden, um ihren Einfluss auf die Emissionsmenge analysieren zu können. Auch sollten die Werte - wie bereits erwähnt - noch durch weitere Analysen bestätigt werden, um belastbare Aussagen treffen zu können.

10. Fazit

Die im Rahmen dieses Projektes entwickelte Methodik zur Ermittlung der entstehenden Treibhausgase und Kosten einer Abfallsammeltour basiert auf der um Emissionsfunktionen erweiterten Ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung. Die bei den einzelnen Teilprozessen, An- und Rückfahrt, Sammlung, Nah- und Ferntransport, entstehenden Ressourcenverbräuche der Ressourcen Personal, Energie und Fahrzeuge unterliegen sammlungsspezifischen-, fahrzeugspezifischen- und siedlungsgebietsspezifischen Einflüssen.

Zur Untersuchung der siedlungsgebietsspezifischen Einflüsse wurden, basierend auf dem Abstand der Häuser zueinander, dem Anteil der durch Häuser bedeckten Fläche, sowie der durchschnittlichen Größe der Gebäude, die von den Praxispartnern durchfahrenen Sammelgebiete in verschiedene Siedlungsgebiete eingeteilt. Hierzu wurde das Geoinformationssystem ArcGIS genutzt. Hieraus konnte ein gebietsspezifischer Abstand zwischen den Leerungspunkten ermittelt werden. Gleichzeitig wurde deutlich, dass sich die Zeiten zwischen den Leerungen in den untersuchten Gebieten kaum unterscheiden.

Zu den sammlungsspezifischen Größen gehören die Behälteranzahl, der Füllgrad, die Abfalldichte und das Behältervolumen, die einen Einfluss auf das Abfallvolumen, bzw. die Abfallmasse haben und damit auf die Anzahl der Prozesswiederholungen des Nahtransportes. Der Einfluss des Servicegrades, des Sammelverfahrens und der Behälterart wird indirekt über die Zeit pro Leerung gemessen.

Die genannten Einflussparameter gelten als externe Faktoren, da sie in der Analyse als gegeben gelten. Als veränderbare Faktoren gehen die fahrzeugspezifischen Parameter in die Analyse ein. Hierzu zählen das Nutzvolumen und die Nutzlast, der Kraftstoffverbrauch ohne Beladung, voll beladen sowie pro Stopp, die Geschwindigkeit des Sammelfahrzeugs sowie die Position der Schüttvorrichtung.

Die Auswirkungen der betrachteten Größen werden innerhalb der Methodik über die gebildeten Ressourcentreiber und Ressourcensätze berücksichtigt. Sie verändern somit den Ressourcenverbrauch und damit die entstehenden Emissionen und Kosten der Teilprozesse. Die Addition dieser Teilprozesse führt zu den entstehenden Treibhausgasen und Kosten durch die betrachteten Fahrzeuge bzw. bei indirekten Transporten mit Umschlag zu denjenigen der Fahrzeugkombinationen. Somit kann das Fahrzeug bzw. die Fahrzeugkombination ermittelt werden, das bzw. die die geringsten THG-Emissionen verursacht.

Zur Analyse standen die Daten eines Seitenladers sowie eines Klein-ASF ohne automatische Schüttung zur Verfügung. Die gewonnenen Erkenntnisse sollten durch weitere Daten validiert und erweitert werden. Das Ziel sollte es sein, Referenztouren unter Berücksichtigung der genannten Einflussgrößen abbilden und anhand dieser die Kosten und Emissionen berechnen zu können. Hierzu werden Daten aus weiteren Touren benötigt, die sich auch hinsichtlich der Einflussgrößen, beispielsweise des Servicegrades unterscheiden.

Es lässt sich festhalten, dass ein Modell entwickelt wurde, das es ermöglicht, die Kosten und Emissionen, die in kommunalen Abfallsammeltouren durch die verschiedenen Fahrzeuge entstehen, zu prognostizieren. Die prognostizierten Werte sind dabei von den Parameterausprägungen des Modells, in diesem Fall von den Verbrauchssätzen und Ressourcentreibern der Teilprozesse und Ressourcen abhängig. Diese konnten exemplarisch für die beiden untersuchten Fahrzeuge und die dazugehörige Tourgestaltung ermittelt werden. Es besteht weiterer Forschungsbedarf dahingehend, dass andere Fahrzeugkonfigurationen und Touren analysiert und damit weiteren Parameterausprägungen ermittelt werden. Damit können die jetzt manuell einzugebenden Werte im Demonstrator, wie beispielsweise die Zeit pro Stopp, für die unterschiedlichen Tourausprägungen

und Fahrzeuge hinterlegt werden. Es kann dann auch ein Abgleich der durchschnittlichen Emissionen durch eine bestimmte Fahrzeugkonfiguration mit den tatsächlich entstehenden Emissionen durch das Fahrzeug des Anwenders erfolgen.

Die Erkenntnisse des Projektes wurden in ein Softwaretool integriert. Dieses basiert auf MS-Excel. Eine Integration der Methodik in eine bereits etablierte Software in der Abfallsammlung mit den notwendigen Schnittstellen zu den Fahrzeugen und ggf. einem Geoinformationssystem vereinfacht die Anwendung und erhöht damit die Akzeptanz der Emissionsproblematik in der kommunalen Entsorgungslogistik.

Literaturverzeichnis

- [Bör10] Börger, L.: *Abfallsammelfahrzeuge mit dieselektrischem Antriebssystem – Ein Beitrag zum Klimaschutz*. In: Urban, A. (Hrsg.): *Praktikable Klimaschutz-Potenziale in der Abfallwirtschaft*. Kassel universitypress 2010.
- [DeV09] *Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV)*. https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/depv_2009/gesamt.pdf
Aktualisierungsdatum: 8.4.16.
- [DIN12] DIN EN 16258, *Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen*. Deutsche Fassung EN 16258:2012.
- [Eur16] EUROSTAT online, URL:
<http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=en&pcode=tsdpc240>, Aktualisierungsdatum: 4.5.16.
- [Gal77] Gallenkemper, B.: *Vergleichende Untersuchungen zur Müllabfuhr beim Einsatz verschiedener Behältersysteme unter besonderer Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten*. Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Hannover 1977, S. 54.
- [IPC14] *Climate Change 2014 – Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change*, URL:
http://www.de-ipcc.de/_media/SYR_AR5_LONGERREPORT_.pdf, Aktualisierungsdatum: 4.5.16.
- [KSS11] Kranke, A., Schmied, M., Schön, A.: *CO₂-Berechnung in der Logistik – Datenquellen, Formeln, Standards*. München 2011.
- [HEF14] *Handbook of Emission Factors for Road Transport*. URL:
http://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA32_EF_Euro_5_6_TUG.pdf.
Aktualisierungsdatum: 24.8.16.
- [VRS14] *Energieverbrauch bei LKW-Transporten 2014*. URL:
<http://www.verkehrsrundschau.de/sixcms/media.php/4513/Euro6-Verbrauch-2014.pdf>.
Aktualisierungsdatum: 24.8.16.
- [KC10] Kranert, M. und Cord-Landwehr, K. (Hrsg.): *Einführung in die Abfallwirtschaft*. Wiesbaden 2010.
- [SBL96] Schneider, D.; Becker, T.; Lehrke, G.: *Leistungssteigerungsmöglichkeiten bei kommunalen Entsorgungsaufgaben durch optimale Tourenplanung*. In: *Kommunalwirtschaft*, Heft 3/ 1996, S. 108-113.
- [UBA16] Umweltbundesamt online, URL:
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/abfall-kreislaufwirtschaft/abfallaufkommen>
Aktualisierungsdatum: 24.10.16.
- [Web08] Weber, M.: *Abfalltausch: Reduzierung von Siedlungsabfalltransporten mit Lkw unter ökologischen und ökonomischen Aspekten*. Kassel 2008.