

„Heuristische Methode für die kombinierte Standort- und Tourenplanung für die Entwicklung eines Biogaskonzeptes“

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und
Verfahrenstechnik

der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Adel Al-Mansi

aus

Irbid / Jordanien

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Noche

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Renatus Widmann

Tag der mündlichen Prüfung: 05.05.2010

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut „Produkt Engineering“ am Lehrstuhl für Transportsysteme und Logistik der Universität Duisburg-Essen in den Jahren 2005 bis 2009 unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Noche.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Noche für die wertvollen Anregungen zu dieser Arbeit und die jederzeit gewährte Unterstützung bei der Durchführung und Abfassung.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Renatus Widmann bedanke ich mich für die Übernahme des Koreferats und die damit verbundene kritische Durchsicht der Arbeit.

Meinen wissenschaftlichen und technischen Kollegen des Institutes danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit und den praktizierten Teamgeist. Mein Dank gilt weiterhin den studentischen Hilfskräften und den Masterstudenten für ihren immerwährenden persönlichen Einsatz und Beitrag.

Für die großzügige Bereitstellung von Dateninformationen und die Unterstützung beim Aufbau der Simulationsmodelle bedanke ich mich besonders bei der Firma Bolz in Recklinghausen, dem Bergisch-Rheinischen Wasserverband und der Stadt Duisburg.

Abschließend möchte ich mich besonders bei meinen Eltern und meinen Geschwistern bedanken, die mich zu jeder Zeit unterstützt und motiviert haben.

Literaturverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Methodik	2
2 Zielsetzung	3
2.1 Struktur der Arbeit	5
3 Stand des Wissens	6
3.1 Biogas Supply Chain	8
3.2 Logistische Prozesse bei der Biogas Supply Chain	12
3.2.1 Beschaffungslogistik	13
3.2.2 Produktionslogistik	14
3.2.3 Distributionslogistik	16
3.3 Stoffstrommanagement	17
3.4 Biogas in Verkehr und Transport	23
3.4.1 Vergleich Biogas, Diesel und Benzin im Abfallsammlungsbereich	23
3.4.2 Vergleich von Biogas mit fossilen Kraftstoffen.....	25
3.5 Rechtliche Grundlagen	26
3.6 Betriebliche Planung bei der Supply Chain	28
3.6.1 Standortplanung in der Kreislaufwirtschaft	28
3.6.2 Tourenplanung in der Kreislaufwirtschaft	30
3.6.3 Transportprobleme	32
4 Datenbasis und Diskussion	34
4.1 Datenvorbereitung	34
4.2 Bioabfall aus dem Haushalt	36
4.3 Speiseabfälle und Abfallaufkommen aus der Lebensmittel-Industrie	36
4.4 Schlämme aus der Abwasserbehandlung	36
4.5 Datenvorbereitung mit GIS-Software	37
4.5.1 Georeferenzierung von der Mitte des Straßenabschnittes	37
4.5.2 Daten-Erfassungskonzept.....	38
4.5.3 Abfallaufkommen aus den Haushalten.....	39
4.5.4 Abfallaufkommen aus dem Gewerbe	40
4.5.5 Abfallaufkommen aus der Lebensmittelindustrie	41
4.5.6 Klärschlammaufkommen	42
4.6 GIS-unterstützte Tourenplanung	42
5 Vorgeschlagenes mathematische Modell für die Biogas Supply Chain	44
5.1 Zielfunktion	44
5.2 Allgemeines mathematisches Modell	50
5.3 Exakte Lösungsmethode und Ansätze	52
5.4 Auswertung der Ergebnisse der mathematischen Algorithmen	57

5.4.1 Benutzte Tools: Vorstellung--MATLAB.....	57
5.4.2 Erklärung der Aufgabe mit exakter Lösungsmethode und Auswertung	59
5.5 Knotenorientierte Lösungsmethode und Ansätze	67
5.5.1 Vorgeschlagenes heuristisches Modell	68
5.5.2 Zweite Phase: Zwischen Umladestation und Biogasanlagen bzw. Klärwerken.....	80
5.5.3 Knotenorientierte Modellbildung und Simulation	85
5.5.4 Auswertung der knotenorientierten Simulationsergebnisse.....	89
5.6 Kantenorientierte Methode und Ansätze	95
5.6.1 Mathematisches Modell der kantenorientierte Methode	95
5.6.2 Lösungsverfahren für CARP mittels heuristischer Algorithmen	97
5.6.3 Kantenorientierte Modellbildung und Simulation	105
5.6.4 Auswertung der Kantenroutenoptimierung	110
6 Analyse der Bioabfall-Sammel-Logistik.....	116
6.1 Standortmodelle	118
6.2 Stoffstrommodelle.....	118
6.3 Biogasmodelle und Containerkonzepte.....	119
6.3.1 Transportkonzepte.....	119
6.4 Biogasmodell in Duisburg	122
6.4.1 Industrielle Biogasanlage (CO-Fermentation) - Modell.....	124
6.4.2 Biogas-Kläranlage - Modell	124
6.5 Transportmodelle	125
7 Ökologische und ökonomische Bewertung	147
7.1 Ökologische Bewertung.....	147
7.2 Ökonomische Bewertung.....	149
7.2.1 Transportkosten.....	149
8 Standort- und Substratauswahl der Biogasanlage	161
8.1 Standort Duisburg mit verschiedenen Substraten.....	161
8.2 Drei dezentrale Anlagen für Bioabfall	167
8.2.1 Fahrleistung, Transportkosten und CO ₂ -Emission.....	168
8.3 Zentrale Biogasanlage	169
8.3.1 Standortwahl.....	169
8.3.2 Fahrleistung, Transportkosten und CO ₂ -Emission.....	171
8.4 Vergleich der zentralen und dezentralen Biogasanlage	172
9 Zusammenfassung und Ausblick.....	174
10 Literaturverzeichnis	177

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1 Primärenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2007	7
Abbildung 3.2 Die Bedeutung der Bioenergie unter den erneuerbaren Energien	7
Abbildung 3.3 Der Umsatz von erneuerbaren Energien	8
Abbildung 3.4 Darstellung der Lieferkette	9
Abbildung 3.5 Biogas Supply Chain.....	10
Abbildung 3.6 Energetische Nutzung von Biomassen	11
Abbildung 3.7 Logistischer Prozessablauf bei Biogas aus biogenen Abfällen.....	12
Abbildung 3.8 Sammelsystem nach Erfassungsort	14
Abbildung 3.9 Aufbau einer Biogasanlage.....	15
Abbildung 3.10 Funktionen der Distributionslogistik	16
Abbildung 3.11 Vergleich der Prozessketten	17
Abbildung 3.12 Stoffströme bei der Verwertung von Bioabfällen aus Haushalten	20
Abbildung 3.13 Übersicht der Massenströme bei der Lebensmittelindustrie	21
Abbildung 3.14 Stoffströme bei der Entsorgung von Klärschlämmen	22
Abbildung 3.15 Treibstoffvergleich	25
Abbildung 3.16 Rechtlicher Rahmen der Biogas Supply Chain	26
Abbildung 3.17 Sequentielle Vorgehensweise bei der Standort- und Tourenplanung	29
Abbildung 3.18 Kostenvergleich mit und ohne Umschlagpunkte	29
Abbildung 3.19 Transportstrecken der Abfallverwertung	31
Abbildung 4.1 Karte des Untersuchungsgebiets	34
Abbildung 4.2 Karte des Untersuchungsgebiets	35
Abbildung 4.3 Georeferenzierung der Kanten.....	37
Abbildung 4.4 Layer eines Informationssystems.....	38
Abbildung 4.5 Darstellung von Straßenabschnitt und Kreuzung	38
Abbildung 4.6 Anzahl der Einwohner und Häuser.....	39
Abbildung 4.7 Bioabfallaufkommen der Haushalte je Haus alle zwei Wochen	39
Abbildung 4.8 Anzahl von Schank, Imbiss, Bäckerei, Hotels und Krankenhaus.....	40
Abbildung 4.9 Biogenes Abfallaufkommen je Gastgewerbe alle zwei Wochen	40
Abbildung 4.10 Anzahl der Lebensmittelindustrien in drei Ortsteilen.....	41
Abbildung 4.11 Biogenes Abfallaufkommen je Lebensmittelindustrie alle zwei Wochen	41
Abbildung 4.12 Klärschlammaufkommen je Ortsteil alle 14 Tage	42
Abbildung 4.13 Untersuchungsgebiet	43
Abbildung 5.1: Benutzeroberfläche von MATLAB.....	58
Abbildung 5.2: Beispiel 3D-Grafikausgabe	58
Abbildung 5.3: Beispiele zur a) dreidimensionalen, b) zweidimensionalen, c) Statistik- Grafikausgabe.....	59
Abbildung 5.4: Modellbildung bei MATLAB-Simulink	59

Abbildung 5.5: Lösungsbilder von MATLAB bei Stufe 1.....	60
Abbildung 5.6: Depots mit Ablauf des P-Median-Problems im MATLAB gefunden	62
Abbildung 5.7: Lösungsbilder von MATLAB bei der zweiten Stufe.....	63
Abbildung 5.8: Zuordnung der Tourenplanung	64
Abbildung 5.9: Lösungsbilder von MATLAB bei Stufe 3.....	66
Abbildung 5.10: Darstellung der Lösungsverfahren für Standort- und Tourenplanung	67
Abbildung 5.11: Vorgeschlagenes heuristisches Modell	68
Abbildung 5.12: ADD- und DROP-Algorithmus.....	70
Abbildung 5.13: Swap-Algorithmus.....	71
Abbildung 5.14: Hybrid-Algorithmus	72
Abbildung 5.15: Eröffnungsverfahren der Metaheuristik	75
Abbildung 5.16: Flussdiagramm des Verbesserungsverfahrens auf der LAP-Ebene	77
Abbildung 5.17: Flussdiagramm des Verbesserungsverfahrens auf der VRP-Ebene.....	79
Abbildung 5.18: Transportproblem zwischen Umladestationen und Biogasanlagen	80
Abbildung 5.19: Flussdiagramm der Spaltenminimum-Methode	83
Abbildung 5.20: Knotenorientierte Modellbildung und Simulation	86
Abbildung 5.21: ADD/DROP-Hybrid-Programm zur Festlegung der Umschlagpunkte	87
Abbildung 5.22: Flussdiagramm des ADD/DROP-Hybrid-Programms	88
Abbildung 5.23: Das Programm zur Tourenplanung.....	89
Abbildung 5.24: Tourenanzahl der Sammelbezirke	90
Abbildung 5.25: Initiale und beste Lösungen der Routen in Duisburg.....	90
Abbildung 5.26: Initiale und beste Lösungen der Routen in Oberhausen.....	90
Abbildung 5.27: Initiale und beste Lösungen der Routen in Mülheim.....	91
Abbildung 5.28 Gesamttourlänge der drei Städte	91
Abbildung 5.29: Tourlänge und Sammelgewichte pro Tour in Duisburg.....	92
Abbildung 5.30: Tourlänge und Sammelgewichte pro Tour in Oberhausen	92
Abbildung 5.31: Tourlänge und Sammelgewichte pro Tour in Mülheim	92
Abbildung 5.32: Gesamtzeitaufwand für verschiedene Szenarien	93
Abbildung 5.33: Zeitaufwand der einzelnen Touren in drei Städten.....	94
Abbildung 5.34: Flussdiagramm für PCARP	98
Abbildung 5.35: Flussdiagramm für die Erstellung eines Eulergraph und einer Eulertour	99
Abbildung 5.36: Flussdiagramm des Tabu Search-Algorithmus (CARPET).....	102
Abbildung 5.37: Erklärung des SHORTEN-Algorithmus.....	104
Abbildung 5.38: Bioabfall-Sammelkonzept von drei Ortsteilen.....	106
Abbildung 5.39: Knoten-Kanten-Modell und Dateien	107
Abbildung 5.40: Unterteilung einer Beispielsammeltour in Zeitintervalle	107
Abbildung 5.41: Unterteilung der Sammelzeit.....	108
Abbildung 5.42: Das Programm zur kantenorientierten Tourenplanung.....	110

Abbildung 5.43: Sammelstrecke der einzelnen Touren.....	111
Abbildung 5.44: Gesamttourlänge von drei Ortsteilen.....	111
Abbildung 5.45: Sammelgewichte und Sammelstrecke pro Tour.....	112
Abbildung 5.46: Gesamtzeit der einzelnen Touren.....	112
Abbildung 5.47: Theoretisch berechneter relativer Anteil der Aktivitäten an der Gesamtzeit	113
Abbildung 5.48: Gesamttourlänge und -zeitaufwand der drei Ortsteile.....	114
Abbildung 5.49: Durchschnittliche Tourlänge und Zeitaufwand der drei Ortsteile.....	114
Abbildung 5.50: Einzeltourlänge für alle Jahreszeiten.....	115
Abbildung 5.51: Die Tourzeiten für alle Jahreszeiten.....	115
Abbildung 6.1: Stoffstrommodell mit Abfalltausch.....	119
Abbildung 6.2: Direkttransporte mit Sammelfahrzeugen.....	120
Abbildung 6.3: Wechselcontainer auf einem Sammelplatz.....	120
Abbildung 6.4: Wechselcontainer im Sammelgebiet.....	121
Abbildung 6.5: Transport mit Umladestation.....	122
Abbildung 6.6: Vorgeschlagenes Modell für die Stadt Duisburg.....	123
Abbildung 6.7: Übersicht über den Bezirk Duisburg-Süd.....	123
Abbildung 6.8: Standortkonzepte mit Biogas- und Kläranlagen.....	124
Abbildung 6.9: Topografische Lage.....	127
Abbildung 7.1: Transportkosten in Abhängigkeit von der Entfernung.....	152
Abbildung 7.2: Umschlagkosten in Abhängigkeit von der Umschlagmenge.....	154
Abbildung 7.3: Transportkosten mit Sammelfahrzeug.....	155
Abbildung 7.4: Transportkosten mit WC-Fahrzeug.....	156
Abbildung 7.5: Transportkosten mit Sammelfahrzeugen und Containergliederzügen.....	157
Abbildung 7.6: Kosten mit Sammelfahrzeugen und Schubbodensattelaufliegern.....	158
Abbildung 7.7 Gesamtkostenvergleich mit verschiedenen Fahrzeugarten.....	159
Abbildung 7.8: Wirtschaftlichkeit für Einsatzradien der verschiedenen Fahrzeuge.....	159
Abbildung 8.1: Investitionskosten.....	164
Abbildung 8.2: Wirtschaftlichkeitsanalyse der drei Anlagen.....	168
Abbildung 8.3 Zentrale Biogasanlage mit zusätzlichem BHKW.....	171

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1	Aufkommen und Stoffdaten für Speiseabfälle	18
Tabelle 3.2	Stoffdaten für Bioabfälle aus Haushalten	20
Tabelle 3.3	Stoffdaten für verschiedene Abfälle aus der Lebensmittelindustrie	21
Tabelle 3.4	Zusammensetzung des Klärschlammes.....	23
Tabelle 3.5	Kraftstoffäquivalente	24
Tabelle 3.6	Kraftstoffmengenvergleich	24
Tabelle 3.7	Kraftstoffpreise.....	24
Tabelle 3.8	Zusammenfassung der Daten für verschiedene Fahrzeuge	26
Tabelle 4.1	Anzahl der Abfallquellen in drei Städten.....	36
Tabelle 5.1:	Knoten Anpassung mit Tourenplanung.....	63
Tabelle 5.2:	Matrix-Tableau.....	66
Tabelle 5.3:	Gewerbliche Standorte in Duisburg.....	87
Tabelle 5.4:	Sammelpunkte in Duisburg	88
Tabelle 5.5:	Sammelpunkte in Oberhausen.....	88
Tabelle 5.6:	Sammelpunkte in Mülheim.....	88
Tabelle 5.7:	Festlegung der Ladezeiten je Ladepunkt	109
Tabelle 5.8:	Regressionsfunktionen der Zwischenfahrtzeit	109
Tabelle 5.9:	Bioabfallmenge für alle Jahreszeiten.....	113
Tabelle 6.1:	Bestand und Transportwege der Landverkehrsträger 2003.....	116
Tabelle 6.2:	Nutzlasten und Transportleistungen der Landverkehrsträger	116
Tabelle 6.3:	Vor- und Nachteile der Landverkehrsträger.....	117
Tabelle 6.4:	Last- und Leerkilometern von deutschen Lkw	117
Tabelle 6.5:	Technische Daten der Fahrzeuge für Abfalltransporte nach.....	117
Tabelle 6.6:	Übersicht über Feldertrag und Biogasertrag.....	124
Tabelle 6.7:	Bioabfallaufkommen in Duisburg.....	128
Tabelle 6.8:	Bioabfallaufkommen in Oberhausen	128
Tabelle 6.9:	Bioabfallaufkommen in Mülheim	128
Tabelle 6.10:	Entfernungen und Fahrzeiten von der Umladestation bis zu den Abfallsenken	128
Tabelle 6.11:	Entfernungen und Fahrzeiten von Abfallquellen bis zur Umladestation.....	129
Tabelle 6.12:	Durchschnittliche Entfernungen der Routen	129
Tabelle 6.13:	Entfernungen beim Direkttransport mit Sammelfahrzeug	130
Tabelle 6.14:	Sammel- und Transporttourenanzahl	131
Tabelle 6.15:	Tourenanzahl für Fall 3 bis 5.....	132
Tabelle 6.16:	Containerholsystem für die Biogasanlage über Sammelgebiet in Duisburg...	133
Tabelle 6.17:	Containerholsystem für die Biogasanlage über Sammelgebiet in Oberhausen	133
Tabelle 6.18:	Containerholsystem für die Biogasanlage über Sammelgebiet in Mülheim....	134

Tabelle 6.19: Containerholsystem für die Biogasanlage über Sammelplatz in Duisburg.....	134
Tabelle 6.20: Containerholsystem für die Biogasanlage über Sammelplatz in Oberhausen	135
Tabelle 6.21: Containerholsystem für die Biogasanlage über Sammelplatz in Mülheim.....	135
Tabelle 6.22: Mit Umschlag für die Biogasanlage in Duisburg	136
Tabelle 6.23: Mit Umschlag für die Biogasanlage in Oberhausen.....	136
Tabelle 6.24: Mit Umschlag für die Biogasanlage in Mülheim	137
Tabelle 6.25: Jahresfahrleistung mit Sammelfahrzeugen beim Direkttransport von Haushaltsabfällen, Gewerbeabfällen und Speiseresten.....	138
Tabelle 6.26: Jahresfahrleistung mit Wechselcontainer über Sammelgebiet	140
Tabelle 6.27: Jahresfahrleistung mit WC-Gliederzug über Sammelplatz	142
Tabelle 6.28: Jahresfahrleistung mit Containergliederzug über Umschlagpunkt	143
Tabelle 6.29: Jahresfahrleistung mit Schubbodenaufleger über Umschlagpunkt	144
Tabelle 6.30: Vergleich der Jahresfahrleistung nach Fahrzeugtypen.....	145
Tabelle 6.31: Vergleich der Jahresfahrleistung nach Modellen	146
Tabelle 6.32: Optimierter Routenplan nach dem Abfalltausch	146
Tabelle 7.1: CO ₂ -Emissionen von verschiedenen Fahrzeugen	147
Tabelle 7.2: CO ₂ -Emissionen-Vergleich.....	148
Tabelle 7.3: Spezifischer CO ₂ -Emissionen-Vergleich	149
Tabelle 7.4: Anschaffungskosten und fixe Kosten	150
Tabelle 7.5: Wiederbeschaffungs-, Grund- und Betriebskosten	151
Tabelle 7.6: Abnutzbare Anlagevermögen.....	153
Tabelle 7.7: Gesamtkostenvergleich.....	160
Tabelle 8.1: Energievergleich in Biogasanlagen	162
Tabelle 8.2: Vergütung nach EEG 2009	163
Tabelle 8.3: Vergleich der Annahmen.....	164
Tabelle 8.4: Kostenvergleich	166
Tabelle 8.5: Biogasanlagen Duisburg/Oberhausen/Mülheim	167
Tabelle 8.6: Wirtschaftlichkeitsanalyse der drei Anlagen	168
Tabelle 8.7: Jahresfahrleistung bei dezentralen Biogasanlagen	168
Tabelle 8.8: Zentrale Biogasanlage Mülheim/Duisburg.....	170
Tabelle 8.9: Jahresfahrleistung bei zentraler Biogasanlage in Mülheim.....	172
Tabelle 8.10: Jahresfahrleistung bei zentraler Biogasanlage in Duisburg	172
Tabelle 8.11: Vergleich der zentralen und dezentralen Biogasanlage.....	173

Abkürzungsverzeichnis

AIDA	Informationsplattform Abfall in NRW
AK	Anschaffungskosten
ASIM	Arbeitsgemeinschaft Simulation
ASU	Abgasuntersuchung
AT	Arbeitstage
Be	Betriebshof
BGA	Biogasanlage
BK	Betriebskosten
BSE	Bovine spongiforme Enzephalopathie
CARP	Capacitated Arc Routing Problem
CLRP	Combined Location Routing
CMDLRP	Capacitive Multi-Depot Location Routing Problem
CPP	Chinese Postman Problem
CPLEX	Optimization Software Package
e	CO ₂ -Emissionen
E	Einwohner
EE	Erneuerbare Energie
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
FL	Fahrleistung
FM	Frische Masse
GIS Software	Geografisches Informationssystem
GK	Grundkosten
K	Kläranlage
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LANUV NRW	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LAP	Location Allocation Problem
MEG	Mülheimer Entsorgungsgesellschaft mbh
Mg	Megagramm
MODI	Modified Distribution
MWh	Megawattstunde
ND	Nutzungsdauer
Nges	Organische + anorganische Stickstoffverbindung
oTS	Organische Trockensubstanz
PK	Personalkosten
PEV	Primärenergieverbrauch
RPP	Rural Postman Problem
RW	Restwert
SA	Simulated Annealing
SF	Sammelfahrzeug
SG	Sammelgebiet
TA	Transportaufkommen
TA Lärm	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm
TM	Trockenmasse
TPP	Transportproblem
TS	Trockensubstanz
TSE	Transmissible Spongiforme Enzephalopathie
TSP	Travelling Salesman Problem
TÜV	Technischer Überwachungs-Verein
US	Umladestation
VBA	Visual Basic Application
VK	Verwaltungskosten

VRP
WBK
WC

Vehicle Routing Problem
Wiederbeschaffungskosten
Wechselcontainer

1 Einleitung

Die Entsorgung der anfallenden Abfälle ist heute kein Problem im Alltag der meisten Menschen. Es ist jedoch nur schwer vorstellbar, dass vor etwa hundert Jahren kein öffentliches Abfallentsorgungssystem existierte. Aufgrund hygienischer Aspekte ist die Gesellschaft seit dem letzten Jahrhundert auf den veränderten Umgang mit wertlosen und nicht mehr länger benötigten Produkten aufmerksam geworden. Die Anforderungen im Hinblick auf die progressive getrennte Erfassung von Abfällen zur Verwertung sind seitdem ständig gestiegen.

Mit dieser Arbeit sollen die Stoffströme im Bereich der Biomasseabfälle identifiziert werden, die aus Sicht des Klima- und Ressourcenschutzes optimiert werden können. Diese Optimierung bzw. die Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft zur ressourcenschonenden Stoffwirtschaft darf nicht zulasten schutzgutbezogener Anforderungen gehen. Angesichts der Entwicklung, welche die Abfallwirtschaft seit Beginn der 90er Jahre genommen hat, sind zum heutigen Zeitpunkt keine großen Ressourcenschonungspotenziale mehr zu erwarten, die durch einzelne Maßnahmen in der Abfallwirtschaft erschlossen werden können.

Nach dem Abfallgesetz werden die ökonomischen Strategien in zwei Gruppen unterteilt: die Abfallvermeidung und die Abfallentsorgung. Die Abfallentsorgungsstrategien lassen sich ebenfalls in zwei Gruppen unterteilen, die Beseitigung und die Verwertung [1]. In dieser Arbeit wird die Abfallentsorgungsstrategie, auch Entsorgungslogistik genannt, als Verwertung untersucht. Die Entsorgungslogistik enthält allgemein die Sammlung von Abfällen, den Transport zu Umladestationen bzw. Abfallbehandlungsanlagen und gegebenenfalls die Zwischenlagerung und Vorbehandlung von Abfällen.

Der Untersuchungsrahmen begrenzt sich auf die biogenen Abfälle. Die beiden Strategien sind mit Kosten verbunden. Um diese Kosten zu decken und zusätzlich die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu verringern, können die Abfälle verwertet werden. Zurzeit decken die fossilen Energieträger 88 % des weltweiten Energiebedarfs [2], deshalb ist aus ökonomischen und ökologischen Gründen die Verwertung der biogenen Abfälle sehr wichtig. Die Verwertungsmöglichkeiten der Abfälle sind: Verbrennung, Vergärung oder Kompostierung. Vergärung oder Kompostierung bietet gegenüber der Verbrennung ökologische Vorteile. Dadurch können Ressourcen eingespart und Stoffkreisläufe geschlossen werden [3]. Im Jahr 2001 wurde der jährliche biogene Abfall auf 12 Mio. Mg (Megagramm) geschätzt [4] und im Jahr 2005 wurden nach Angaben des Statistischen Bundesamtes ca. 8 Mio. Mg Bio- und Grünabfälle getrennt gesammelt [4] (davon 4 Mio. Mg Bioabfall). Der mittlere Anschlussgrad an die Bioabfallerfassung beträgt ca. 50% [5], d. h., die theoretischen Bioabfallaufkommen können bis 8 Mio. Mg betragen [6]. Abfälle aus der Fleischindustrie und dem Gastgewerbe betragen jeweils 1,4 und 2 Mg pro Jahr [7]. Das Klärschlammaufkommen beträgt nach Angaben des Umweltbundesamts 2 Mio. Mg TS pro Jahr. Mit dieser Arbeit sollen die Biomasseabfälle identifiziert werden, deren Bewirtschaftung aus Sicht des Klimaschutzes und des Schutzes fossiler und mineralischer Ressourcen durch Beeinflussung der Biomasseströme optimiert werden können. Optimierungsmöglichkeiten betreffen sowohl die Umlenkung der Stoffströme in andere Entsorgungswege bzw. Nutzung als auch Effizienzsteigerung bei der Nutzung der Biomasse (bspw. durch die Optimierung der energetischen Nutzung). Ein effektiver Klimaschutz und eine umfassende Schonung fossiler und mineralischer Ressourcen sind nicht durch einzelne Maßnahmen zu erzielen. Um die formulierten Ziele eines nachhaltigen Umgangs mit knappen Ressourcen zu erreichen, sind alle Bereiche von Wirtschaft und Gesellschaft auf Ansatzpunkte zu überprüfen, ob und in welchem Maße sie Möglichkeiten zu einer Optimierung der Stoffströme bieten. Hierzu gehört auch der Umgang mit Biomasse, die als Nebenprodukt, Reststoff oder Abfall in unterschiedlichen Wirtschaftsbereichen neben dem eigentlichen Produkt entsteht und verwertet oder beseitigt werden muss. Dabei ist nicht nur die schadlose und umweltverträgliche Beseitigung der Biomasse-, Rest- und Abfallstoffe sicherzustellen, sondern auch das darin enthaltende Potenzial für eine stoffliche bzw. energetische Verwertung. Im Sinne von Klimaschutz und nachhaltiger Bewirtschaftung fossiler und mineralischer Ressourcen muss auch Biomasse möglichst umfassend genutzt werden.

Die spezielle Struktur dieser Problematik spiegelt sich in mathematischen Modellierungen wider. Die untersuchten Modelle lassen sich zwei unterschiedlichen Problemen zuordnen: die knotenorientierte und die kantenorientierte Logistikplanung. Location-Allocation-Probleme (LAP), Vehicle Routing-Probleme (VRP) und Transportprobleme (TPP) [8] sind in der Regel Standardinstrumente zur Optimierung in der Logistik.

1.1 Methodik

Für die folgenden diskutierten Bereiche, d. h. Bioabfall aus Haushalten, Speisereste, Abfall aus der Lebensmittelindustrie sowie Klärschlamm, werden die Biomasseströme in einer Übersicht aufgezeigt. Diese Bilanzierung umfasst sowohl die Produkte als auch die Nebenprodukte, Reststoffe oder Abfälle mit dem Ziel, diejenigen Biomasseabfallströme im Gesamtzusammenhang zu identifizieren, die aus Sicht des Klimaschutzes und der Schonung fossiler und mineralischer Ressourcen als besonders relevant eingestuft werden können bzw. deren bisherige Nutzung oder Entsorgung noch Optimierungsmöglichkeiten erkennen lassen.

Die Relevanz ergibt sich demnach aus der Kombination von Masseanfall und Grad einer möglichen Optimierung. Ein Optimierungsansatz kann eine Beeinflussung des Biomassestoffstroms sein (Stoffstromlenkung oder zusätzlicher Nutzungsschritt) oder eine Optimierung auf Prozessebene bedeuten. Die als relevant erkannten Biomasseabfallströme werden einer vertiefenden Analyse unterzogen. Die erkannten Optimierungsansätze werden als Verwertungsoptionen quantitativ bilanziert und nach den verschiedenen Umweltwirkungskategorien bewertet. Maßstab ist jeweils der aktuelle oder zukünftig zu erwartende nicht optimierte Umgang mit Biomasseabfällen. Die mit der Verwertung bzw. Entsorgung verbundenen Umweltlasten werden beachtet und in die Bilanzierung miteinbezogen, d. h., die Substitution von Energie oder Produkten, die konventionell unter Nutzung von Primärrohstoffen erzeugt werden müssten. Eine Optimierung der Bewirtschaftung von Biomasseabfällen kann dabei sowohl eine bessere stoffliche als auch verstärkte energetische Nutzung bedeuten.

Optimal sind dabei Nutzungskaskaden im Sinne einer Kombination von energetischer und vorheriger stofflicher Nutzung oder umgekehrt. Die wertgebenden Eigenschaften der einzelnen Biomassen lassen sich häufig nicht nur stofflich oder energetisch, sondern auch als eine Kombination aus beidem nutzen. So wird bspw. der Kohlenstoffgehalt einer Biomasse möglicherweise energetisch am Besten genutzt. Der ebenfalls wertgebende Gehalt an Pflanzennährstoffen sollte zusätzlich für eine optimierte Bewirtschaftung nicht ungenutzt bleiben.

2 Zielsetzung

Biogene Abfälle (biogener Anteil des Hausmülls, Industrie-, Altholz-, Stroh-, Waldrest-, Biogrünabfall, Klärschlamm, Gülle u.a.) könnten einen beträchtlichen Beitrag zur Energieversorgung Deutschlands auf Basis nachwachsender Energieträger liefern. Im nationalen Klimaschutzprogramm [9] wurde u.a. das Ziel festgeschrieben, die deutsche CO₂-Emission um 25 % bis 2005 (Bezugsjahr 1990) zu reduzieren. Zur Deckung der derzeit bestehenden Reduktionslücke von 5 bis 7 % (entspricht 50 bis 70 Millionen Mg CO₂) sollen die Abfallwirtschaft ca. 15 Mio. Mg und die Energiewirtschaft ca. 20 Mio. Mg CO₂ beitragen, der Rest ist durch andere Emittenten wie Industrie, private Haushalte, Verkehr zu leisten. Auf nationaler Ebene [9], eingebettet in eine europäische Kampagne (Europäisches Parlament, 2001, Europäische Kommission, 1997), wird außerdem eine Erweiterung der Stromversorgung aus erneuerbarer Energie (EE) auf 12,5 % bis 2010 angestrebt. Zur Erreichung dieser Zielvorgaben muss die energetische Verwertung von biogenen Abfällen als Teil der vorhandenen Biomasse gemäß Biomasseverordnung (Biomasse V, 2001 auf Grundlage des EEG, 2000) einen erheblichen Beitrag leisten, der auf EU-Ebene sogar bei 50 % des Zuwachses des Biomasseanteils an der Energieversorgung aus erneuerbaren Energien liegen soll. Weiter zielen die abfallrechtlichen Vorgaben auf deutscher [10] und europäischer Ebene (Europäischer Rat, 1999) darauf ab, den deponierten Anteil von biologisch abbaubaren Abfällen stark (25 % von 2001 bis 2006) zu reduzieren bzw. deren unbehandelte Ablagerung vollständig zu verbieten, was dazu führt, dass dieser Entsorgungsweg für biogene Abfälle langfristig nicht mehr zur Verfügung steht. Auch die Entsorgungswege der stofflichen Verwertung sind langfristig nicht gesichert. Es werden Tendenzen der Marktsättigung für stoffliche Verwertung von Bioabfällen, Grünschnitt u.a. als (Qualitäts-) Komposte gezeigt. Die stoffliche Verwertung von Klärschlamm ist vor dem Hintergrund der BSE- und MKS-Diskussion im Jahr 2001 (Bundesrat, 2001) erneut in Verruf gekommen und soll langfristig nur noch für sehr schwach belastete Klärschlamm zulässig sein (Bundesregierung, 2002a). Insgesamt ist die stoffliche Verwertung von biogenen Abfällen, darunter auch die Verwertung im Landbau (Verfüllen von Tagesbaustätten in Ostdeutschland), vor einer zunehmend präventiv orientierten Bodenschutzpolitik zu betrachten, die darauf ausgerichtet ist, alle Schadstoffeinträge in die Böden unabhängig von der Quelle gleichsam streng zu bewerten (Bundesregierung, 200b, UBA, 2001 BBodSchV, 1990, BBodSchG, 1998). Vor diesem Hintergrund erschließt die energetische Nutzung von biogenen Abfällen Möglichkeiten, sowohl die Ziele des Klimaschutzes und der Energieversorgung auf regenerativer Basis zu verwirklichen als auch die Abfall- und bodenschutzrechtlichen Vorgaben auf deutscher und EU-Ebene zu verfolgen bzw. einzuhalten. Das zentrale Problem einer energetischen Nutzung von biogenen Abfällen besteht jedoch darin, dass die Abfälle in ihrem ursprünglichen Zustand aufgrund ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften (Inhomogenität in Zusammensetzung und Partikelgröße, Verunreinigungen, niedriger Heizwert durch hohen Wassergehalt, mikrobielle Instabilität und Geruchsentwicklung u.a.) und ihrer räumlichen Verteilung an Aufkommensstoffe (z. B. kleine Chargen in Haushalten) nicht für eine direkte Nutzung als Ersatzbrennstoff geeignet sind. Sie müssen folglich, durch eine i.d.R. mehrstufige Prozesskette, als Ersatzbrennstoffe aufbereitet werden. Die vollständigen Prozessketten setzen sich deswegen aus anlagentechnischen Komponenten (z. B. Entwässerungsmaschinen), welche die physikalisch-chemischen Eigenschaften verändern, und logistischen Komponenten, die die Mengen zusammenfassen und die räumliche Distanz zwischen Aufkommensort und Verwertungsort überbrücken, zusammen. Betrachtet man die zu Beginn genannten biogenen Abfälle, so zeigt sich, dass darunter die Abfälle aus der Landwirtschaft, wie z. B. Stroh mit ca. 15 Mio. Mg TM/a, oder Waldrest- und Durchforstungsholz aus der Forstwirtschaft mit ca. 16,6 Mio. Mg TM/a [11] zwar ein erhebliches Aufkommen besitzen, ihre energetische Nutzung jedoch aufgrund des fehlenden Entsorgungsbedarfs optional ist. Ihre Aufbereitung zum Brennstoff gestaltet sich wegen des hohen TS-Gehalts und der Sorteneinheit im ursprünglichen Zustand relativ einfach. Die großen Güllemengen von ca. 20 Mio. Mg TM/a werden zurzeit ausschließlich als

Wirtschaftsdünger verwendet, was sich jedoch mit zunehmenden Bodenschutzauflagen, wie dies in Holland [12] bereits geschehen ist, rasch ändern und andere Entsorgungswege (z. B. Verbrennung in der Wirbelschicht) erforderlich machen kann. Die Reststoffe aus der Land- und Forstwirtschaft wurden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Anders verhält es sich bei Klärschlamm, Bioabfall oder Grünabfall. Hier besteht seitens der Abfallbesitzer, meist Kommunen, ein Entsorgungsbedarf („Entsorgungsdruck“), der mit Entsorgungskosten verbunden ist. Bei diesen Abfallarten lassen sich also die anfallenden Entsorgungskosten (für Entsorger: Entsorgungserlöse) mit den bei der energetischen Verwertung anfallenden Kosten für Aufbereitung und Logistik verrechnen, was die Wirtschaftlichkeit der biogenen Energieträger im Vergleich zu den fossilen verbessern kann (negative Brennstoffkosten). Der hohe Wassergehalt, die Inhomogenität oder die Verunreinigungen mit Fremdstoffen (Plastik, Metall) erfordern bei diesen Abfällen eine mehrstufige, vorgelagerte Prozesskette zur Aufbereitung, bestehend aus anlagentechnischen und logistischen Komponenten. Die Aufbereitung ist deswegen mit einem erheblichen technischen, ökonomischen und energetischen Aufwand verbunden, der zu korrespondierenden Treibhausgasemissionen führt. Bei Annahme von geschlossenen CO₂-Kreisläufen lässt sich auf Basis des Aufkommens der Abfälle „Klärschlamm“, „Bioabfälle“ und „Grünabfall“ für das Jahr 1999 eine Wärmemenge von ca. 30 TWh und eine Strommenge von rund 10 TWh/a bereitstellen, die ca. 1 % des bundesdeutschen Primärenergieverbrauchs (PEV) bzw. 2 % des bundesdeutschen Stromverbrauchs entspricht. Vor dem geschilderten Hintergrund wurden im Rahmen dieser Arbeit die in der Praxis eingesetzten Prozessketten zur Bereitstellung von Bioabfall, Speiseresteabfall aus der Lebensmittelindustrie und Klärschlamm inklusive der erforderlichen Logistikaufgaben unter technischen, ökonomischen und energetischen Gesichtspunkten (Energieverbrauch und korrespondierende CO₂-Emissionen) analysiert, miteinander verglichen und bewertet, wobei folgende zentrale Fragen zu untersuchen sind:

- Aus welchen Einzelkomponenten setzen sich die Prozessketten (anlagentechnische und logistische Komponenten) zur Bereitstellung der betrachteten biogenen Abfälle (Klärschlamm, Bioabfall, Speisereste) zusammen und welche Technologien stehen hierfür am Markt zur Verfügung?
- Welche Kosten sind mit der Bereitstellung der biogenen Abfälle inkl. der erforderlichen Logistik für den Betreiber bzw. den Abfallbesitzer verbunden?
- Welchen Energiebedarf verursacht die Bereitstellung der logistischen Komponenten und welche Technologien bzw. Prozesskettenkonzepte können dazu beitragen, den Energieverbrauch zu minimieren?
- Welcher Anteil des nationalen Energiebedarfs (PEV und Strom) lässt sich durch die energetische Nutzung von Klärschlamm, Bioabfall und Speiseresten decken?
- Welche Schlussfolgerungen hinsichtlich Forschung und Entwicklungsbedarf, staatlicher Bezuschussung und möglicher Synergieeffekte (z. B. gemeinsame Aufbereitung mehrerer Abfälle, vgl. CO-Vergärung) lassen sich ziehen?

Die Zielsetzung, aus biogenen Abfällen erneuerbare Energie zu erzeugen, verlangt eine Organisationsstruktur mit fest definierten Zielen. In Abhängigkeit der rechtlichen und technischen Veränderungen soll eine Vielfalt von möglichen praktischen Szenarien modelliert und methodische Lösungen für die Problemstellungen angeboten werden. Die Arbeit betrachtet drei unterschiedliche Biogas Supply Chains; das Biogasmodell für die Stadt Duisburg, das Modell für drei ausgewählte Ortsteile in Duisburg und ein Modell anhand dreier nebeneinanderliegender Städte.

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein Planungswerkzeug konzipiert und als Demonstrator umgesetzt worden, das es ermöglicht, auf der Basis von abfragbaren Datensätzen Energie Supply Chains zu designen. Dazu gehört die Entwicklung von Logistikkonzepten zur qualitätsgerechten Sammlung der Biomasse, gegebenenfalls über Umschlagpunkte, das Verbringen der Biomasse an zentrale oder dezentrale Verarbeitungsstellen zur Umwandlung in Biogas und anschließend die Zuführung der Energie an Verbraucher durch Verstromung, Wärmeeinspeisung oder Bereitstellung als Gas zur dezentralen Versorgung.

Da der Abfalltransport mit Sammelfahrzeugen über große Entfernungen unwirtschaftlich ist, muss auch die Transportlogistik entsprechend geändert werden. Die Abfälle aus privaten Haushalten werden zu größeren Transporteinheiten gebündelt, mit der Folge, dass Transportaufwand und -kosten für diese Abfälle erheblich steigen können. Da diese Abfälle weiterhin überwiegend mit Fahrzeugen transportiert werden, steigt die Straßenverkehrsbelastung stark an. Aus diesem Grund werden unterschiedliche Modelle mit unterschiedlichen Fahrzeugtypen untersucht.

2.1 Struktur der Arbeit

Allgemein ist die Arbeit in einen theoretischen und einen praktischen Teil aufgegliedert, schließlich werden die Ergebnisse vorgestellt und bewertet. An die Einleitung, Methodik und Zielsetzung der Arbeit schließen sich sieben weitere Kapitel an. Kapitel Drei beginnt mit einer Beschreibung der Biogas Supply Chain und beinhaltet Begriffe der Entsorgung und Kreislaufwirtschaft, des Stoffstrommanagements, der Nutzungsmöglichkeiten von Biogas und der rechtlichen Grundlagen, welche die verschiedenen Motivationsquellen und die Relevanz der Problemstellung verdeutlichen. Eine Begriffsklärung der logistischen Prozesse der Entsorgungskette sowie ihre wesentlichen Bestandteile und Parameter werden im Zusammenhang mit einer objektorientierten Analyse durchgeführt. Am Ende des Kapitels wird auf die unterschiedlichen logistischen Planungsaufgaben, nämlich Standortplanung, Tourenplanung und Transport, die im untersuchten Anwendungsgebiet zu bearbeiten sind, eingegangen.

Das vierte Kapitel behandelt die Datenbasis der untersuchten Gebiete, da es von Bedeutung ist, die Aussagekraft der Studie zu erhöhen und dadurch auch die praktische Relevanz der Modellierung von Szenarien zu unterstützen. Durch den Einsatz digitaler Informationssysteme wird die Verwaltung und Aktualisierung von Daten erheblich vereinfacht und überhaupt möglich gemacht. Mathematische computerbasierte Modelle sind heutzutage in einem sinnvollen Kosten-Nutzen-Verhältnis durchführbar. Die Verwaltung von alphanumerischen Datenbanken ist Stand der Technik und wird auch in der Entsorgungslogistik eingesetzt.

Auf Basis der durchgeführten Datenanalyse wird im fünften Kapitel zuerst ein mathematisches Modell für den zweistufigen Entsorgungsprozess des Bioabfalls dargestellt, gefolgt von einer ausführlichen Beschreibung der konventionellen Lösungsverfahren der Kostenfunktion und ihrer wesentlichen Komponenten, zusätzlich werden exakte Lösungsmethoden mithilfe des Tools MATLAB bearbeitet. Das sechste Kapitel beschäftigt sich mit vier allgemeinen Transportmodellen mit unterschiedlichen Abfallfahrzeugen: mit Sammelfahrzeugen, Wechselcontainersammelfahrzeugen, Containergliederzügen und Schubbodensattelaufliegern, welche unterschiedliche Eigenschaften haben. Damit werden unterschiedliche, denkbare Modelle vorgestellt. Im Folgenden werden drei Szenarien für die untersuchten Entsorgungsgebiete behandelt, nämlich: Testgebiet Duisburg, drei ausgewählte Ortsteile innerhalb Duisburgs und drei Städte (Duisburg, Mülheim und Oberhausen).

Aus einer ökologischen und ökonomischen Perspektive werden in Kapitel Sieben die aus der Simulation resultierenden Ergebnisse analysiert und bewertet. In Kapitel Acht wird die Standort- und Substratauswahl der Biogasanlage untersucht. Es handelt sich um zwei Analysen: drei dezentrale Anlagen und eine zentrale Anlage für die drei Städte. Schließlich wird ein Vergleich zwischen beiden durchgeführt. Im letzten Kapitel werden die wichtigen gefundenen Ergebnisse zusammengefasst und auf Basis der gesammelten Erfahrungen zukünftige anwendungsorientierte und verfahrenstechnische Verbesserungsmöglichkeiten benannt. Des Weiteren erfolgt ein Ausblick, bei dem die sich verändernden logistischen Rahmenbedingungen und die daraus resultierenden zukünftigen Forschungsfragen beschrieben werden.

3 Stand des Wissens

Der Stand des Wissens soll im Folgenden aus politischen, technischen und ökologischen Blickwinkeln heraus betrachtet werden. Biogas aus Abfällen bietet viele Alternativen und wird künftig maßgeblich zu einer nachhaltigen Mobilität beitragen. Umfangreiche Marktpotenziale und vertretbare Kosten, gekoppelt mit bestehenden Steuererleichterungen, sprechen dafür, dass Biogas erforderlich stärker genutzt werden wird. Biogas kommt der Automobil- und Mineralölindustrie insofern entgegen, als dass es Benzin und Diesel in vielen Parametern ähnelt und in hoch entwickelten Verbrennungsmotoren mit verhältnismäßig einfachen Anpassungsmaßnahmen eingesetzt, ins Gasnetz eingespeist oder für die Stromerzeugung genutzt werden kann [13].

Biomethan ist chemisch identisch mit Erdgas. Es verfügt über eine ähnlich hohe Energiedichte wie konventionelle Kraftstoffe und engt die Reichweite der Fahrzeuge demzufolge nicht ein. Biogas aus organischem Abfall ist nicht nur eine alternative Energiequelle, sondern auch eine mögliche Entsorgungsart für organische Abfälle. Als Rohstoffbasis dient eine breite Palette von Abfällen aus Haushalt, Gastgewerbe, Fleischindustrie und Klärschlamm. Schließlich tragen Biokraftstoffe zum Klimaschutz bei, da bei ihrer Verbrennung nur das Kohlendioxid frei wird. Auch wenn ihre CO₂-Bilanz bedingt durch die Herstellungsverfahren nicht vollständig neutral ist, können sie doch in erheblichem Maß zur Reduktion von Treibhausgas-Emissionen im Verkehrssektor beitragen. Die EU-Richtlinie 2003/30/EG enthält auch die Aufforderung, dass der Einsatz der Biokraftstoffe von einer genauen Analyse der ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Auswirkungen begleitet wird, damit entschieden werden kann, ob eine Erhöhung des Anteils der Biokraftstoffe gegenüber den konventionellen Kraftstoffen sinnvoll ist. Die bisherigen Studien haben in diesem Zusammenhang logistische Fragestellungen fast vollständig außer Acht gelassen.

Einzelne Betrachtungen beruhen im Wesentlichen auf Mengenbilanzen bei der Rohstoffherzeugung oder auf der Distribution innerhalb bestehender Tankstellennetze. Die aktuellen Veränderungen in der Wirtschaft sind stark mit einem erhöhten Aufkommen in Transport, Verkehr und Logistik verknüpft. Sie gehen einher mit einer immer stärkeren Internationalisierung der Beschaffungs- und Distributionslogistik von Unternehmen und stellen die verantwortlichen Manager ständig vor neue Herausforderungen. Hinzu kommt, dass die seit einigen Jahren permanent und überproportional steigenden Preise konventioneller Energieträger auch immer mehr Sorgen hinsichtlich des „Kostenfaktors Transport“ aufkommen lassen. Es liegt auf der Hand, dass vorhandenes technisches Potenzial bei Weitem nicht ausgeschöpft wird.

Gleichwohl ist dieses Potenzial begrenzt: Schätzungen gehen davon aus, dass durch Nutzung der vorhandenen organischen Reststoffe immerhin 3 % des Primärenergiebedarfs in Deutschland gedeckt werden kann. Von diesem Potenzial ist zurzeit aber erst rund ein Zehntel erschlossen. Während bei Industrie- und Restholz bereits 50 % und bei Deponie- und Klärgas rund 70 % genutzt werden, ist die Potenzialausschöpfung in anderen Bereichen sehr viel niedriger [14]. Das EEG allein kann das nicht leisten, da es nur auf die Verstromung von Biomasse zielt und die Ökosteuer sieht in ihrer derzeitigen Konzeption keine weiteren Aufschläge auf die fossilen Brennstoffe im Heizenergiebereich vor. Deswegen ist beispielsweise vorgeschlagen worden, für größere Anlagen ein Quotierungssystem zu prüfen, das, ähnlich wie die zurzeit für die KWK diskutierte Quotenlösung, einen Anteil von regenerativen Energien am Verbrauch von Öl und Gas für reine Heizzwecke vorgibt und mittels eines Zertifikatshandels sichert [15].

Zurzeit basiert weltweit die Energieversorgung auf fossilen Energieträgern. Das wird sich zugunsten der Umwelt verändern und der steigende Energiebedarf kann auch langfristig allein mit Mineralöl nicht gedeckt werden [16]. Andererseits wird aus Umwelt- und Klimaschutzgründen sowie aus Gründen der Ressourcenschonung die Mineralölnutzung abnehmen [17]. Infolgedessen wächst die Nutzung der alternativen und erneuerbaren

Energieträger. Abbildung 3.1 stellt die Struktur des Primärenergieverbrauchs in Deutschland im Jahr 2007 dar. Der Primärenergieverbrauch wird durch 6,7 % erneuerbare Energie gedeckt [18], davon wurden 14,2 % des Stroms, 6,6 % der Wärme und 7,4 % des Kraftstoffs zur Verfügung gestellt [16].

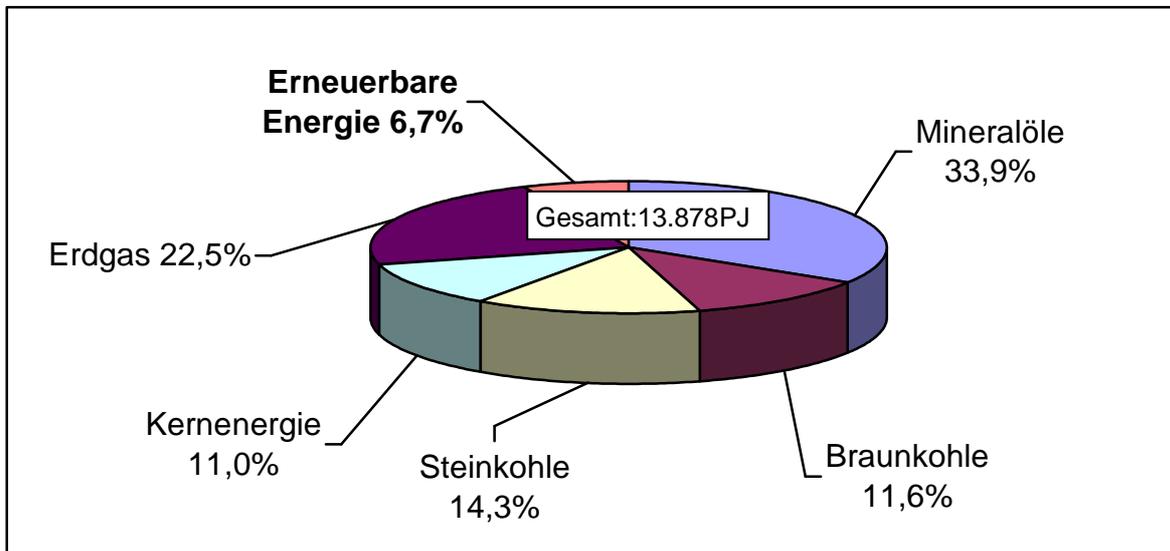


Abbildung 3.1: Primärenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2007 [18]

Die Bedeutung der Bioenergie unter den erneuerbaren Energien und der Umsatz der erneuerbaren Energien werden in Abbildung 3.2 und 3.3 dargestellt [18].

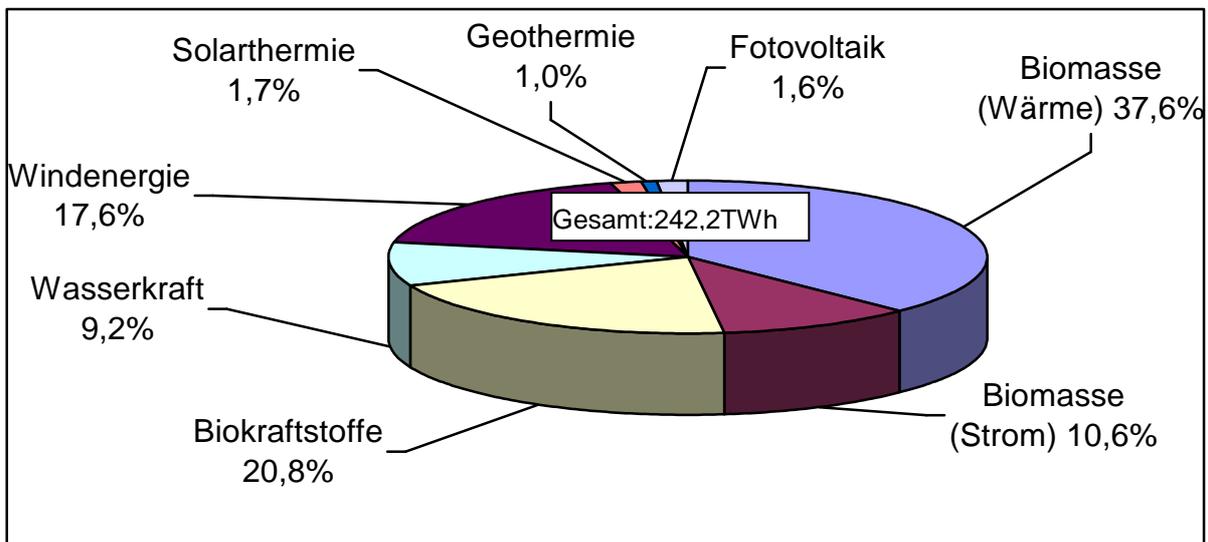


Abbildung 3.2: Die Bedeutung der Bioenergie unter den erneuerbaren Energien [15]

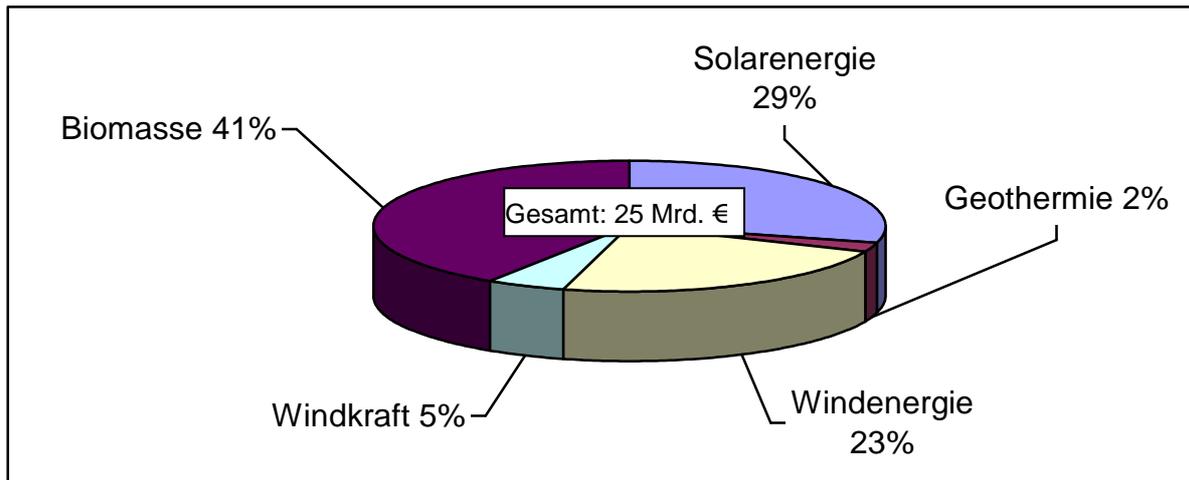


Abbildung 3.3: Der Umsatz von erneuerbaren Energien [17]

Mit 69 % leistet Biomasse den größten Beitrag zur Endenergie aus regenerativen Quellen. Vor allem zum Heizen wird sie genutzt [19]. 93 % der regenerativen Wärme kommt aus Biomasse, vor allem aus Holz. Während bei der Stromerzeugung die Windkraft eindeutig dominiert, wurde 2007 erstmals mehr Strom aus Biomasse als aus Wasserkraft bereitgestellt. Im Kraftstoffsektor ist die Biomasse derzeit die einzige regenerative Quelle. Der Umsatz der Gesamtbranche lag in 2007 bei ca. 25. Mrd. Euro.

Die verschiedenen Konzepte sollen mithilfe der ereignisdiskreten stochastischen Simulationstechnik bewertet werden. Diese Methode wird häufig bei der Gestaltung von Materialfluss- und Logistiksystemen angewendet. Dementsprechend gibt es auch eine Vielzahl von Veröffentlichungen in diesem Bereich – sowohl in Deutschland als auch auf internationaler Ebene. Zu erwähnen sind hier insbesondere die Proceedings der Winter Simulation Conferences der Society for Computer Simulation in den USA. Im deutschsprachigen Raum gibt es verschiedene Veröffentlichungen in Verbindung mit der ASIM (Arbeitsgemeinschaft Simulation), der Gesellschaft für Informatik. Dort hat die Fachgruppe Simulation in Produktion und Logistik in verschiedenen Tagungsbänden über Applikationen, überwiegend aus dem Materialfluss, veröffentlicht. Mitglieder dieser Fachgruppe haben wesentlich bei der Erarbeitung der VDI-Richtlinie 3633 (Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen) und ihren Blättern (1 bis 8, 11) [20] mitgewirkt. Sie enthält eine Zusammenfassung der im deutschsprachigen Raum gewonnenen Erfahrungen und Entwicklungen. Diese Richtlinie wurde vor wenigen Jahren überarbeitet und erweitert und kann deshalb auch als Grundlage für diese Forschung dienen. Arns und seine Kollegen [21] befassen sich in einem Methodenprojekt mit der Modellierung von Beschaffungsnetzen und verwenden dabei ein Prozesskettenmodell. In ihrer Veröffentlichung beschreiben sie insbesondere verschiedene Anwendungen und Anwendungsaspekte, ohne allerdings dabei den methodischen Aufbau der Simulationsmodelle detaillierter zu beschreiben. Heinrichmeyer und Vastag [22] befassen sich mit dem Thema der Transportnetzplanung im Spannungsfeld zwischen Qualität und Kosten und geben Hinweise auf die Gestaltung der entsprechenden Netze. Mehrere Autorenkollektive befassen sich mit der Anwendungsseite der großen Netze. Hellmann und Jessen [22] betrachten Planungsprozesse, während Kuhn und Laakmann [23] in einem Grundsatzpapier die Beherrschung großer Logistiknetze in den Vordergrund der Diskussionen stellen. In einem bemerkenswerten Methodenpapier stellen Buchholz und Kemper [18] neue Ansätze für effizientere Simulationsmethoden vor.

3.1 Biogas Supply Chain

Die Lieferkette, „Supply Chain“, auch Wertschöpfungskette genannt, ist die Bezeichnung für das Netzwerk von funktionalen Abteilungen des Unternehmens (Beschaffung, Produktion und Distribution), das über vor- und nachgelagerte Verbindungen an den verschiedenen

Prozessphasen und Vorgängen der Wertschöpfung beteiligt ist [24]. Die Supply Chain kann aber auch als ein unternehmenübergreifendes System betrachtet werden [25] und umfasst die folgenden Aufgabenbereiche der Unternehmenslogistik: Beschaffung, Produktion, Distribution, Information und Entsorgung [26] (siehe Abbildung 3.4).

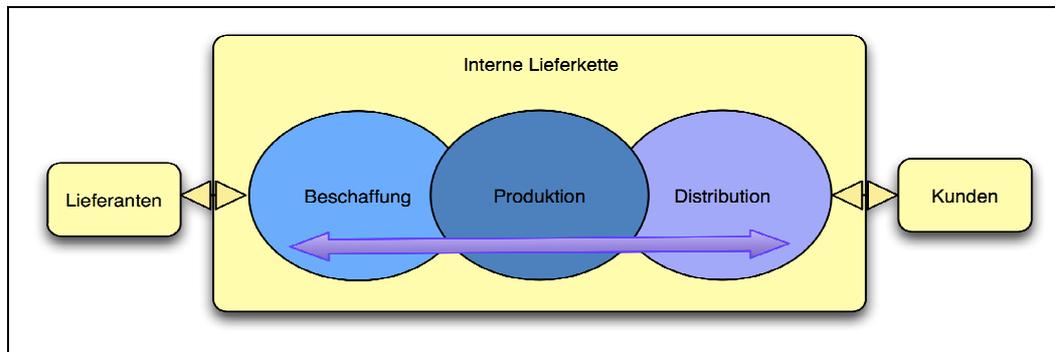


Abbildung 3.4: Darstellung der Lieferkette [26]

Die überwiegenden Bestandteile der Lieferkette bei der Entsorgung von biogenen Abfällen sind das Sammeln, der Transport, d. h. die Entsorgung, die Verwertung in Abfallbehandlungsanlagen [24] und die Distribution des Endproduktes an die möglichen Kunden. Die nachrangigen Ziele entlang der Lieferkette sind, unter anderem, die Orientierung an Endkunden, die Verbesserung der Kundenzufriedenheit, Flexibilität im Markt, eine Reduzierung des Peitscheneffektes, der besagt, dass die unterschiedlichen Bedarfsverläufe bzw. kleine Veränderungen der Endkundennachfrage zu Schwankungen der Bestellmengen führen, die sich entlang der logistischen Kette wie ein Peitschenhieb aufschaukeln können [27].

Die Vermeidung von „Out-of-Stock“-Situationen, damit verbundenen Zusatzkosten, die Senkung der Lagerbestände in der gesamten Supply Chain, die Schaffung von Kostenvorteilen durch Optimierung der Lieferprozesse über mehrere Stufen, eine Vereinfachung des Güterflusses, verkürzte Lieferzeiten und Qualitätsvorteile sind Ziele einer Supply Chain. Sie gewährleistet, dass die Rohstoffversorgung nach Zeit, Ort, Menge und Qualität für die Biomasseverwertung stets und ununterbrochen abgewickelt wird, d. h., ein einwandfreier Transport von der Quelle bis zur Senke in der geforderten Qualität, Menge und in der erforderlichen Zeit. Die Biogas Supply Chain umfasst die Vernetzung von Quellen, Umladestationen bzw. Depots und Senken. Als Quellen in der vorliegenden Arbeit sind zu nennen: Haushaltungen, das Gastgewerbe, dazu zählen Restaurants, Imbissstandorte und auch Hotels und Pensionen mit ihren Speiseresten, die Lebensmittelindustrie, darunter lediglich die Fleischindustrie und Metzgereien und die Klärschlämme aus der Abwasserbehandlung.

In allen diesen Bereichen fallen große Mengen an biogenen Rohstoffen an, die einer optimalen Verwertung zugeführt werden müssen. Je nach Beschaffenheit der Biomassen und Entfernung zur Produktion können Direkttransporte oder Transporte über Umladestationen sinnvoll sein. In den Umladestationen werden die einzelnen Rohstoffe aus den unterschiedlichen Quellen zu größeren Transporteinheiten zusammengefasst und zur Produktion (Biogasanlage) abtransportiert. Zudem ist es sinnvoll, die eingesammelten biogenen Rohstoffe in den Umladestationen einer kurzen Vorbehandlung zu unterziehen. Dies kann eine Gewichts- und/oder Volumenreduzierung oder eine Entwässerung der feuchten Bioabfälle sein, um den Transport zur Biogasanlage effizienter zu gestalten.

Das Biogas wird dann als Treibstoff für Gasmotoren oder direkt zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt. Der dabei entstandene Kompost kann als Dünger, z. B. in der Landwirtschaft, Verwendung finden. Die Biogas Supply Chain fordert eine Infrastruktur, die in der Lage ist, biogenen Abfall aus unterschiedlichen Quellen zu sammeln und zu Behandlungsanlagen zu verfrachten. Ganz allgemein lässt sich so eine Struktur als eine logistische Verknüpfung zwischen zwei Marktschnittstellen definieren, die einerseits Rohstoffe anbieten, andererseits Endprodukte (Energien) nachfragen. Aus einer logistischen

Perspektive weist die Allgemeinstruktur ein Viel-zu-Viel-Netzwerk auf (siehe Abbildung 3.5). Das bedeutet, es muss unterschieden werden, dass die ankommende Phase konvergent, d. h., alle Knoten werden zu einem Knoten zusammengeführt (Sammlung), und die auslaufende Phase divergent ist, d. h. ein Knoten wird in unterschiedlichen Zielpunkten verteilt (Distribution).

Die Eigenschaften des Reverse-Logistik-Netzwerks beziehen sich auf die strategischen Entscheidungen bezüglich des logistischen Netzwerks. Sie beinhalten die Entscheidung nach der Sammelmethode, den Stellen und Kapazitäten, der Vorbehandlung, der entsprechenden Lagerung und der Feststellung verschiedenartiger Transportverknüpfungen in Bezug auf die Quellen und Kapazitäten. Wenn ein solches Modell mit einem konventionellen Produktions-Distributions-Netzwerk verglichen wird, ist die Netzwerkstruktur an dieser Stelle entscheidend für die Differenzierung. Wie angeführt, besagt die Reverse-Logistik, dass die Netzwerkstruktur einem Many-to-Many-Modell mit einer konvergierenden Phase und einer divergierenden Phase entspricht. Während ein klassisches Modell ein divergierendes Few-to-Many-Modell ist.

Drei fundamentale Eigenschaften des Reverse-Logistik-Netzwerks sind zu nennen:

- Ungewisse Versorgung bezüglich Qualität und Menge
- Mögliche Zentralisierung der Vorbehandlung in Umladestationen
- Verflechtung zwischen Vorwärts- und Reverse-Logistik [28]

Abbildung 3.5 zeigt die mehrstufige Lieferkette zwischen den Quellen und Senken in Analogie zu einer Darstellung der Struktur des Reverse Logistik-Netzwerks.

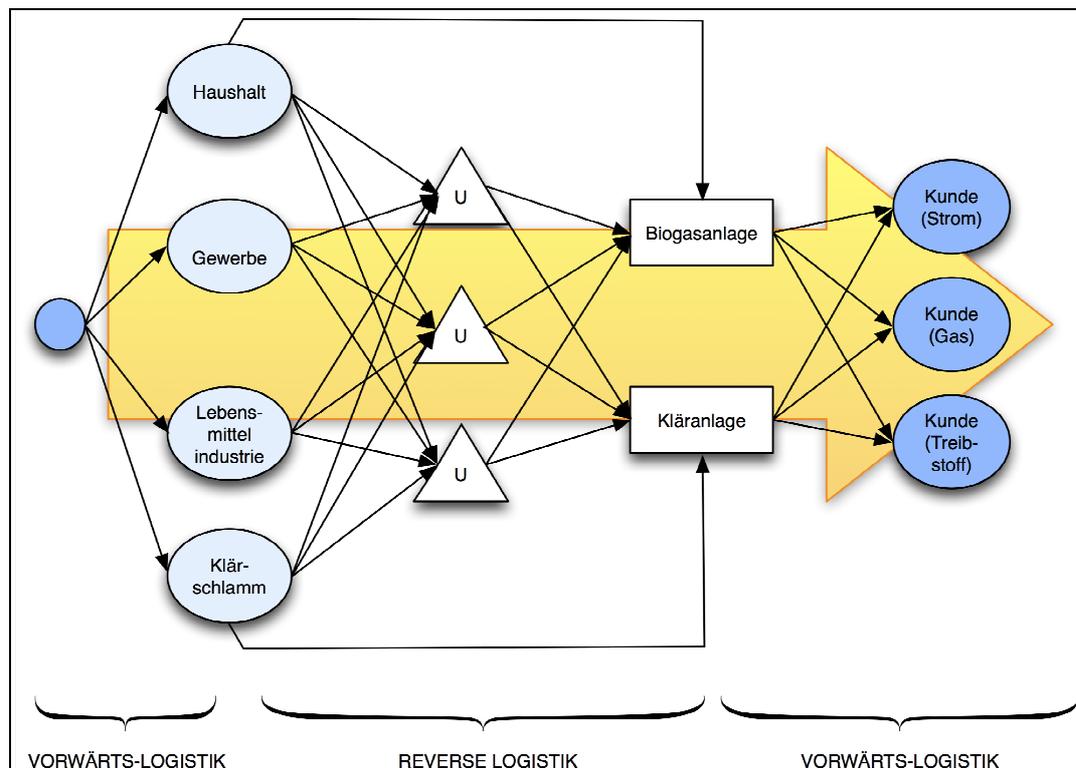


Abbildung 3.5: Biogas Supply Chain

Biogene Abfälle weisen in Deutschland ein geschätztes Aufkommen von ca. 80 Mio. Mg (Megagramm) Trockenmasse pro Jahr auf [29]. Bei vollständiger energetischer Verwertung ließe sich daraus eine Wärmemenge von 400 TWh_{th}/a (Terawattstunde, thermisch pro Jahr) gewinnen, was ca. 10 % des bundesdeutschen Stromverbrauchs ausmacht [14].

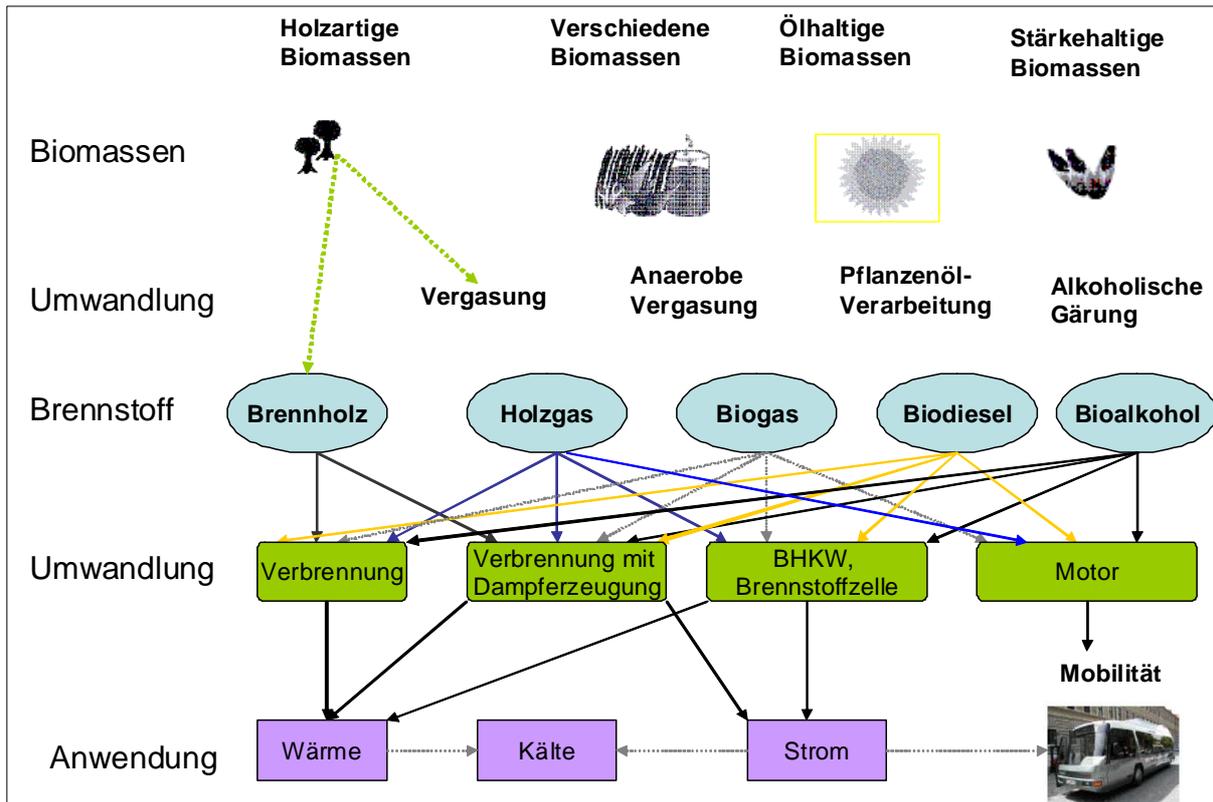


Abbildung 3.6: Energetische Nutzung von Biomassen [30].

Bei Substitution von Kohle durch organische Abfälle könnten, bei vollständiger Nutzung des biogenen Abfallaufkommens, einem Emissionsfaktor von $0,4 \text{ Mg CO}_2/\text{MWh}_{\text{th}}$ (Megagramm CO_2 pro Megawattstunde, thermisch) und der Annahme eines geschlossenen CO_2 -Kreislaufs für die Bioenergieträger, ca. 160 Mio. Mg CO_2 eingespart werden und damit die erforderlichen Emissionsreduktionen insgesamt und der beiden relevanten Sektoren (Energie-, Abfallwirtschaft) bei Weitem übertroffen werden [31].

Mit dem Verbot der Deponierung von nicht vorbehandelten Abfällen, der Vorgabe, das Deponieren von vorbehandelten biogenen Abfällen stark zu reduzieren und dem Verbot der Verfütterung von Speiseresten in der gesamten Europäischen Union muss nun nach neuen Entsorgungswegen für diese Abfallfraktion gesucht werden. Dabei stellt die Erzeugung von Biogas in Biogasanlagen oder Klärwerken eine sinnvolle Verknüpfung der Energie- und Abfallwirtschaft dar. Vor diesem Hintergrund erschließt die energetische Nutzung von biogenen Abfällen Möglichkeiten, sowohl die Ziele des Klimaschutzes als auch der Energieversorgung auf regenerativer Basis zu verwirklichen. Die Transportlogistik trägt einen großen Teil zu den Emissionen bei. In den vergangenen Jahren stand die Optimierung der Transporte zur Minimierung der Kosten im Fokus. Die reine Fixierung auf Transportkosten und -wege ohne eine Berücksichtigung der Emission ist aber nicht länger vertretbar.

Routenplanung und Transportoptimierung sind in der Wirtschaft Standardinstrumente zur Verbesserung der Logistik. Im Bereich der Entsorgungstransporte, insbesondere bei der Klärschlambeseitigung, werden diese Ansätze bisher kaum eingesetzt. Die bisherigen Erfolge in der Wirtschaft lassen große Potenziale für die Entsorgungstransporte vermuten. Die effiziente und ökologische Verwertung von biogenen Abfällen umfasst eine Vielzahl von logistischen Komponenten wie z. B.: Erfassungspunkte, Transporte, Lagerungen sowie produktionstechnische Anlagen (Entwässerungs-, Hygienisierungs- und Sterilisationsanlagen, Zerkleinerungs- und Sortiermaschinen), die Bestandteile der Prozessketten bei der Verarbeitung der Wertstoffe darstellen.

Die Bereitstellung der biogenen Abfälle zur richtigen Zeit, in der richtigen Qualität und am richtigen Ort ist mit einem großen logistischen Aufwand verbunden, da gerade in Städten mit hoher Einwohnerzahl eine Vielzahl an Rohstoffquellen vorhanden ist. Da es eine Vielfalt von

verschieden biogenen Abfällen in fast allen Bereichen des heutigen Lebens gibt, erschwert dies die Erfassung der einzelnen Fraktionen. Zu den Abfallfraktionen gehören Reste aus der Lebensmittelproduktion, Küchen- und Rüstreste aus der Gastronomie und dem Gastgewerbe, Schlachtabfälle und die organische Fraktion aus der getrennten Abfallsammlung der Haushalte, um nur einige zu nennen. Es liegt somit innerhalb der Prozessketten an der Logistik, die Abfälle zu erfassen, zu größeren Transporteinheiten zusammenzufassen, die räumliche Distanz zwischen Anfallsort und Verwertungsort zu überbrücken, und an den anlagentechnischen Komponenten, die biogenen Rohstoffe entsprechend der geforderten Qualität aufzubereiten beziehungsweise einer Vorbehandlung zu unterziehen (z. B. Ausscheidung von Fremdstoffen, gewünschte Homogenitätseinstellung). Im nächsten Punkt wird die Prozesskette anhand logistischer Prozesse ausführlich behandelt.

3.2 Logistische Prozesse bei der Biogas Supply Chain

Die Logistik zielt auf ein bereichübergreifendes Systemdenken bezüglich der Gesamtkosten ab. Sie ist eine wissenschaftliche Lehre von Planung, Gestaltung, Steuerung und Kontrolle der Material- und Informationsflüsse in Systemen. Wesentliche Faktoren, die eine wichtige Rolle spielen, sind die Güter bzw. Waren, Materialien, Werkstücke und Informationen [32]. Ziel der Logistik ist die Minimierung der Kosten, dafür werden technische, informatorische und betriebswirtschaftliche Funktionen benötigt. Es handelt sich um operative Funktionen wie z. B. für den:

- **Material- und Güterfluss:** Transportieren, Lagern, Sammeln, Verpacken, Steuern,
- **Daten- und Informationsfluss:** Erfassen, Speichern, Übertragen, Verarbeiten, Ausgeben und
- **Führungsfaktoren:** Planen, Bewerten, Entscheiden, Kontrollieren, Überwachen.

Die übergreifende Sicht der Logistik ist der Schlüssel zur Optimierung der logistischen Struktur mit den Zielen, einen hohen Lieferservice zu gewährleisten und die Marktleistungsfähigkeit zu erhöhen. Die vier Aufgabenbereiche bei der Biogasproduktion, die sogenannten logistischen Prozesse sind: Beschaffungs-, Produktions-, Distributions- und Entsorgungslogistik (siehe Abbildung 3.7).

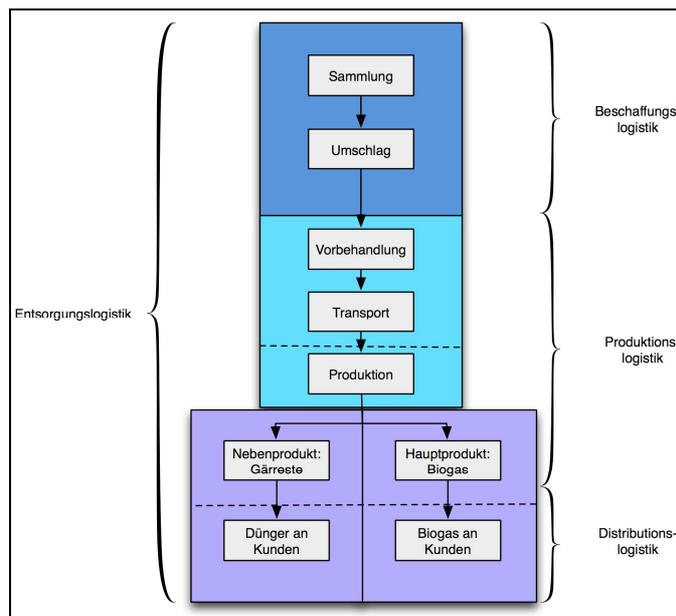


Abbildung 3.7: Logistischer Prozessablauf bei Biogas aus biogenen Abfällen

Der Beschaffungsprozess des Rohstoffes bzw. organischer Abfälle besteht aus drei unterschiedlichen Phasen: Erstens die Abfallsammlung, die anhand von Tourenplanungen

optimiert werden muss. Zweitens der Umschlag, wo eine mögliche Vorbehandlung infrage kommen könnte. Je nachdem erfolgt die Vorbehandlung in der Umladestation oder in der Abfallbehandlungsanlage. Drittens der Weitertransport zu den Abfallbehandlungsanlagen. Anschließend werden in der Distributionslogistik die Produkte zu den Kunden gebracht und das Nebenprodukt, der Gärrest, als Dünger verkauft.

Ein besserer Überblick über die Wirtschaftlichkeit kann durch die Gesamtbetrachtung der Biogas Supply Chain eingebracht werden. Durch logistische Maßnahmen können nicht nur die Leistung der Beschaffung bei der Biogas Supply Chain, sondern auch die der Distribution erhöht werden.

3.2.1 Beschaffungslogistik

Der erste Schritt im Rahmen der Entsorgungslogistik ist die Erfassung und Sammlung von Rohstoffen zur Biogaserzeugung. Dies ist meistens der teuerste Anteil der Biogas Supply Chain, andererseits gibt es auch Einnahmen bzw. Entsorgungsgebühren von Kunden, welche die Kosten der Sammlung und Bereitstellung abdecken. Unter dem Begriff Sammlung werden alle Vorgänge zwischen dem Anfall der Abfälle und dem Abfüllen des Sammelfahrzeugs verstanden. Die allgemeinen Komponenten der Sammlung lassen sich wie folgt unterscheiden:

- Sammelverfahren,
- Sammelbehälter und
- Sammelfahrzeuge.

Die Sammelverfahren lassen sich grundsätzlich in systemlose Sammlung und Systemsammlung unterteilen. Unter systemloser Sammlung wird die Bereitstellung von Abfall ohne, oder in, nach Größe und Form uneinheitlichen, systemlosen Abfallbehälter verstanden. Aufgrund des erheblichen Aufwandes und der umständlichen Handhabung wird die systemlose Sammlung nur noch im Bereich der Sperrmüllabfuhr eingesetzt.

Die Sammlung von Abfall wird anhand der Systemabfuhr durchgeführt. Das bedeutet, dass einheitliche Behälter und entsprechende Fahrzeuge genutzt werden. Einige typische Verfahren der Systemsammlung sind: der Transport mit Sammelfahrzeugen, der Transport mit Wechselcontainern und Gliederzug und der Transport mit Umladestation [33]. Zusätzlich wird die Systemsammlung noch in Bring- und Holsysteme unterteilt. Abbildung 3.8 zeigt drei Systeme nach dem Erfassungsort auf [34].

Bei dem Bringsystem werden die Abfälle in zentralen Sammelstellen gesammelt und die Sammelfahrzeuge fahren die Sammelstellen ab, d. h., der Kunde sorgt für den Transport des Bioabfalls zur jeweiligen Umladestation. Dieses Verfahren hat sich immer dann etabliert, wenn:

- die erforderlichen Transportwege von den Quellen zum Verwerter kurz sind,
- die Anzahl der Quellen sehr groß ist und/oder
- die anfallende Menge pro Quelle gering ist.

Andererseits fahren die Sammelfahrzeuge bei dem Holsystem jeden einzelnen Haushalt ab, d. h., sie fahren nacheinander die Standorte der Kunden an, wo die Übergabe des Abfalls erfolgt. Auf diese Weise sind im Allgemeinen sehr hohe Rückführungsquoten realisierbar. Der spezifische Transportaufwand pro Bioabfalltonne liegt schon durch die Vermeidung von Leerfahrten wesentlich niedriger als in Bringsystemen. Dem steht allerdings ein hoher organisatorischer Aufwand entgegen, der durch die Disposition der Sammelstellen und die Erfassung des gesammelten Bioabfalls verursacht wird. Dazu kommen noch mehrstufige Holsysteme, bei denen die Materialflüsse zwischen den Umladestationen und den Bioabfallbehandlungsanlagen nicht direkt, sondern als Sammeltour zwischen mehreren Zwischenpunkten ausgeführt werden. Solche Systeme eignen sich für Fälle, bei denen die Ladekapazität des Sammelfahrzeugs nicht ausgelastet wird bevor ein Zwischenlagerstandort

erreicht wird. Es besteht auch die Möglichkeit, dass sich in mehrstufigen Systemen die Strategien in Abhängigkeit der Anforderungen zu sogenannten kombinierten Systemen zusammenstellen lassen. [34]

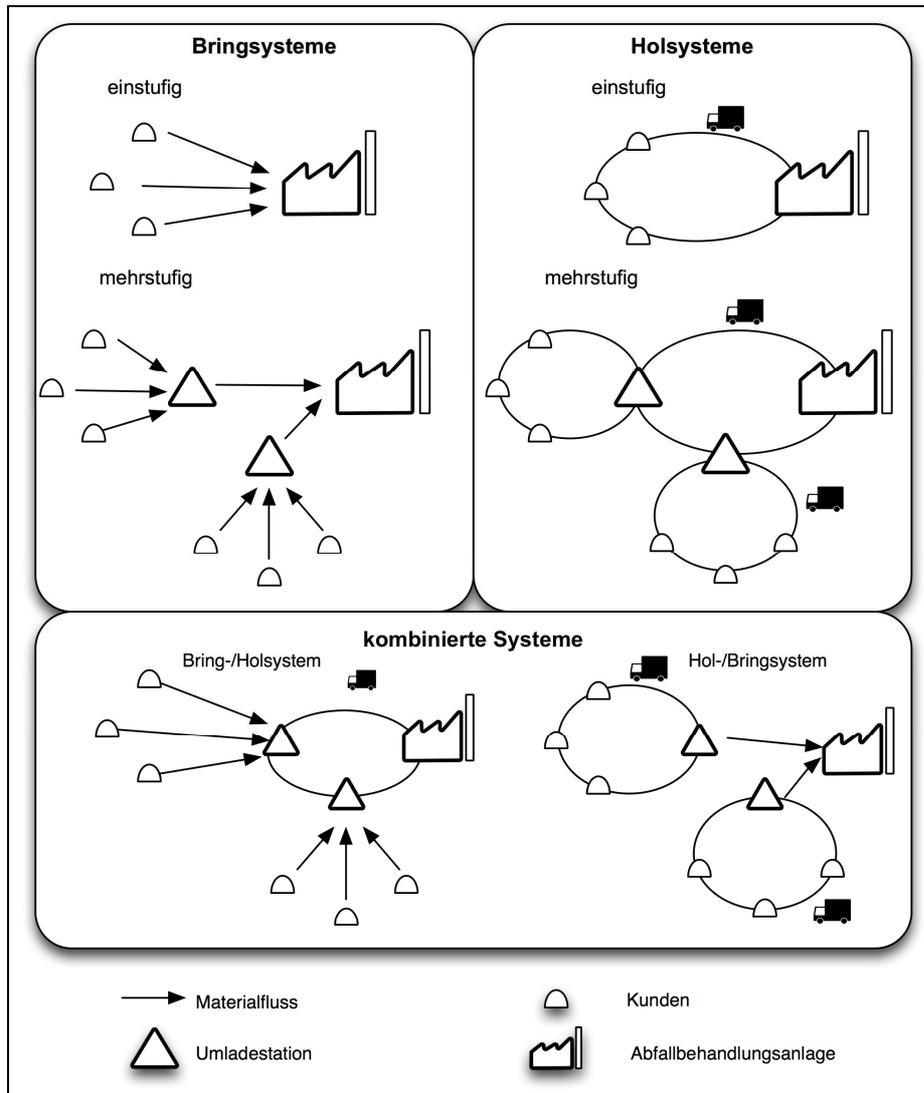


Abbildung 3.8: Sammelsystem nach Erfassungsort [34]

3.2.2 Produktionslogistik

In Deutschland sind bereits seit einigen Jahren Biogasanlagen im Einsatz, welche die biogenen Abfälle aus Haushalt, Gewerbe, Lebensmittelindustrie und Klärschlamm verwerten. In NRW werden zurzeit über 223 Biogasanlagen betrieben [35]. In der Behandlung und Bereitstellung von biogenen Rohstoffen (Gülle, Klärschlamm, Waldrest-, Industrie- und Altholz, Stroh, Biogrünabfall, organischer Anteil des Hausmülls, Speisereste aus dem Gewerbe u.a.) finden verschiedene logistische und anlagentechnische Komponenten Verwendung. Infolgedessen werden hier die wesentlichen Komponenten und Verfahrensschritte, die in einer Biogasanlage stattfinden, erläutert. Vor der Produktion des Biogases muss der Rohstoff erst vorbehandelt werden, weil neben den Bioabfällen auch Plastik, Inertmaterial und Grobmaterial erfasst werden. Biogas wird aus einem Gärungs- oder Faulungsprozess von biologisch leicht abbaubaren Stoffen produziert. Die für die Produktion benötigten Rohstoffe bestehen aus biogenen Haushaltsabfällen, den biogenen Gastronomie- und Lebensmittelindustrieabfällen, Abfällen aus der Fleischindustrie und Klärschlämmen.

Die biogenen Abfälle werden in ihre Bestandteile aufgelöst, wobei Methangas entsteht. Dies kann entweder als Biogas verwendet oder durch Kraft-Wärme-Kopplung zu Strom und

Wärme umgewandelt werden. Es sind drei unterschiedliche Vergärungsverfahren, und dadurch drei unterschiedliche Abläufe, vorhanden. Ein grober Aufbau einer Biogasanlage wird in Abbildung 3.9 dargestellt [36].

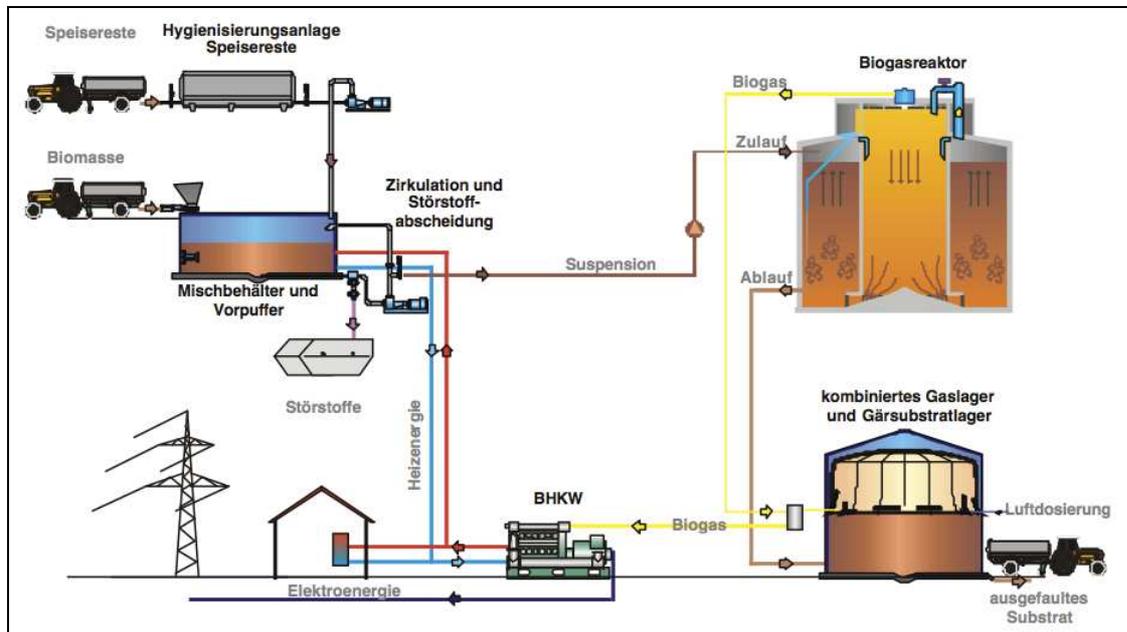


Abbildung 3.9: Aufbau einer Biogasanlage [37]

Die Biogasanlagen unterscheiden sich voneinander in Bezug auf die Vergärungsverfahren: [36]

- Nassvergärung
- Trockenvergärung
- CO-Vergärung

Bei der **Nassvergärung** werden die biogenen Abfälle in den Annahmehunker abgekippt und die sichtbaren Störstoffe entfernt. Von dort werden sie mithilfe des Förderbands zur Mühle transportiert. Dann werden die metallischen Verunreinigungen mit Metallabscheidern getrennt. Anschließend erfolgt im Pulper die weitere Zerkleinerung des Bioabfalls. Nach der Wasserzugabe werden die Leichtstoffe über einen Rechen abgezogen. Im nachfolgenden Hydrozyklon werden die Schwerstoffe getrennt. Die homogene und störstofffreie Suspension wird beim einfachen Vergärungsprozess vergoren und auf ca. 33 % TS entwässert.

Bei der **Trockenvergärung** können organischer Abfälle im Trockenverfahren durch eine geringe Zugabe von Wasser direkt vergoren werden. Die Abfälle werden zerkleinert, Metall-, Leicht- und Schwerstoffe abgetrennt. Im Vorhaltebunker werden sie homogenisiert. Anschließend wird im Methanreaktor das Vorprodukt vergoren und Biogas gewonnen.

Bei der **CO-Vergärung** werden die Bioabfälle mithilfe einer Mühle zerkleinert und zum Pulper geleitet. Dort wird das rezirkulierte Prozesswasser hinzugefügt und die enthaltenen Störstoffe werden abgetrennt. Bioabfälle und Abfälle aus der Fleischindustrie werden zusammen verarbeitet. Speisereste werden in einen Bunker zwischengelagert und bis zu 70°C pasteurisiert. Anschließend werden die feinen Störstoffe im Hydrozyklon getrennt. Zum Schluss werden die aufgearbeiteten Rohmaterialien in den Methanreaktor geladen.

Für die Biogasproduktion zugelassene Substrate können pflanzliche Substrate, wie Obst- und Gemüsereste, Grünschnitt, Gras- und Maissilage und Roggen, Gülle, tierische Substrate, wie Speisereste aus der Gastronomie und Hotellerie, Abfälle aus der Lebensmittelproduktion und Fleischindustrie und dem Lebensmittelhandel sowie Klärschlämme sein, je nach Substrat fluktuiert die Biogasmenge. Zudem hängt die

Biogasmenge nicht nur vom Substrat ab, sondern auch von den Anlagen, der Temperatur und der Verweilzeit. Diese Faktoren können auch die Biogasmenge stark beeinflussen. Die biogenen Abfälle und Klärschlamm werden als Rohstoff bzw. Substrat betrachtet.

3.2.3 Distributionslogistik

Die Distributionslogistik ist ein Teil der gesamten logistischen Prozesskette und kann als ein komplementärer Schritt der Beschaffungslogistik betrachtet werden. Sie umfasst den Waren- und Materialfluss, den Informationsfluss zwischen den Umladestationen und den Abfallbehandlungsanlagen sowie den zugehörigen Informationsfluss vom Ende der Biogasproduktion bis zu den Kunden. Mit anderen Worten stellt sie die räumliche und zeitliche Überbrückung zwischen dem allgemeinen Produktionsverfahren und den Kunden dar. Die Distributionslogistik bedient sich dabei unterschiedlicher Transportfahrzeuge zur Verteilung von Biogas an die Kunden. Die wesentliche Aufgabe der Distributionslogistik ist die art- und mengenmäßige Bereitstellung von Biogas an Kunden und Abnehmer. Dazu gehört auch die Transportplanung. Ziel des Prozesses ist die termingerechte und kostengünstigste Bereitstellung der Güter beim Kunden durch Planung, Steuerung und Kontrolle des Material- und Informationsflusses von der Abfallbehandlungsanlage zu den Kunden.

Abbildung 3.10 stellt die Zuordnung der Funktionen dar, die zu optimieren sind. [32]

Die Faktoren, welche die Distribution beeinflussen, sind:

- Produktsortiment
- Fertigungsart
- Kundenstruktur: Großabnehmer, Einzelabnehmer
- Verteilungsprinzip: Zentral- und/oder Regionallager
- Produktionsstandort: eine Biogasanlage, mehrere Biogasanlagen, eine Kombination von Biogasanlagen und Klärwerken
- Auftragszusammenstellung- und Verteilungskonzept

Die Bedeutung der Distributionslogistik bei der Biogasproduktion ist aus der Höhe der Kosten und in der Eignung zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit gegenüber konventionellen Produkten wie Benzin oder Erdgas ersichtlich.

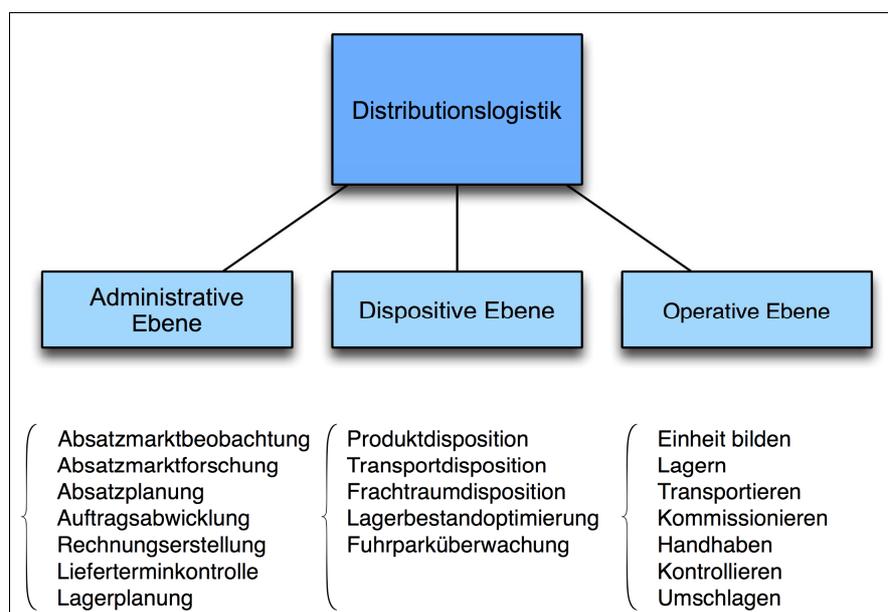


Abbildung 3.10: Funktionen der Distributionslogistik [32]

3.3 Stoffstrommanagement

Es werden nun die 4 verschiedenen Prozessketten für biogene Abfälle aus den unterschiedlichen Bereichen betrachtet (siehe Abbildung 3.11). Es soll nach Optimierungspotenzialen zur gemeinsamen Verwertung der Abfälle gesucht werden. Dazu werden verschiedene Prozessketten-Szenarien methodisch durchgespielt und in der Ergebnisbetrachtung im Hinblick auf ihre Kosteneffizienz miteinander verglichen. Wenn die 4 Prozessketten gemeinsam betrachtet werden, fällt auf, dass sich die der Haushalte, des Speiseabfalls und der Lebensmittelindustrie sehr ähnlich sind.



Abbildung 3.11: Vergleich der Prozessketten [30]

Lediglich die Vorbehandlung und Aufbereitung der biogenen Abfallstoffe aus dem Gastgewerbe und der Lebensmittelindustrie sind aufgrund der gesetzlichen Bestimmungen unterschiedlich. Die Vorbehandlung der Schlämme aus der Abwasserbehandlung ist mit derjenigen der anderen Fraktionen nicht zu vergleichen und muss daher stets gesondert betrachtet werden. Mit dem Ziel der Optimierung der Verwertung und Verwendung organischer Abfälle sollen die Stoffströme im Bereich der Bioabfälle identifiziert werden, die aus Sicht des Klima- und Ressourcenschutzes optimiert werden können [38]. Entsprechend der Zielsetzung wurden die sich bietenden Optionen umfassend bewertet. Angesichts der Entwicklung, die die Abfallwirtschaft seit Beginn der 90er Jahre genommen hat, sind zum heutigen Zeitpunkt keine großen Ressourcenschonungspotenziale mehr zu erwarten, die durch einzelne Maßnahmen in der Abfallwirtschaft erschlossen werden können. Mit dem aktuellen Stand der Bioabfallkompostierung wird bereits jetzt ein positiver Beitrag zum Klimaschutz geleistet. Um künftig weitere Steigerungen erzielen zu können, werden zahlreiche kleinere Maßnahmen sowie eine Ausweitung des „Abfallblicks“ auf landwirtschaftliche Reststoffe (die im juristischen Sinn keine Abfälle darstellen) und Produkte, auf Produktion und Konsum notwendig sein. Das dabei genutzte Instrument der Materialflussanalyse soll auch bei der Untersuchung weiterer Materialströme genutzt werden. Bei Umsetzung aller in dieser Arbeit entwickelten Szenarien könnten weitere Mio. Mg an CO₂-Äquivalenten durch eine Optimierung der Verwertung biogener Rest- und Abfallstoffe erzielt werden. Dazu kommen die aufgezeigten Möglichkeiten der Rückgewinnung der mineralischen Ressourcen. Die Umsetzung der Optimierungsmöglichkeiten in die Entsorgungsrealität bedarf an einigen Stellen noch der Entwicklung einer innovativen und betrieblichen Technologie bspw. adaptiert an die besondere Prozess- und Emissionssituation bei der Biomassenutzung. In vielen Fällen sind damit Kosten verbunden, die deren Realisierung bislang noch verhindern. Dies gilt auch für die Kosten der aufgezeigten Ansätze zur Rückgewinnung von Biogas im Verhältnis zu den heute noch höheren Biogaspreisen. Die Entwicklung von Instrumenten erfordert dann u.a.

auch eine eingehende Analyse der ökonomischen Randbedingungen. Für die diskutierten Bereiche, d. h. die Klärschlamme, den Bioabfall und die Speisereste, werden die Biomasseströme aufgezeigt. Diese Bilanzierung umfasst sowohl die Produkte als auch die Nebenprodukte, Reststoffe oder Abfälle mit dem Ziel, im Gesamtzusammenhang diejenigen Bioabfallmasseströme zu identifizieren, die aus Sicht des Klimaschutzes und der Schonung fossiler und mineralischer Ressourcen als besonders relevant eingestuft werden können bzw. deren bisherige Nutzung oder Entsorgung noch Optimierungsmöglichkeiten erkennen lassen. Die Relevanz ergibt sich demnach aus der Kombination von Masseanfall und Grad einer möglichen Optimierung. Ein Optimierungsansatz kann eine Beeinflussung des Biomassestoffstroms sein (Stoffstromlenkung oder zusätzlicher Nutzungsschritt) oder eine Optimierung auf Prozessebene bedeuten.

Speiseabfälle - bei diesen handelt es sich um Großküchenabfälle, die nicht nur die pflanzlichen Rückstände beinhalten, sondern auch die nicht verzehrten Reste von den Tellern. Die Abfälle wurden in der Vergangenheit erhitzt und anschließend flüssig in der Schweinemast eingesetzt. Dies ist nach Artikel 32 der Verordnung über Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte in einer Übergangsvorschrift nur noch dieses Jahr zulässig. Speiseabfälle werden entweder von Entsorgungsunternehmen durch Tankfahrzeuge bei den Großküchen abgeholt und zu Schweinefutter weiter verarbeitet oder aber in ländlichen Regionen auch direkt durch die Schweinehalter gesammelt und verwertet. Es kann davon ausgegangen werden, dass in der Vergangenheit der überwiegende Anteil des Speiseabfallaufkommens über diesen Weg verwertet wurde. Erst im Laufe des Jahres 2006 erfolgte die Umstellung weg von der Verfütterung. Nach Angaben von Lang (1998) wurde mit 6 % nur ein kleiner Anteil der Speiseabfälle über Tierkörperverwertungsanlagen entsorgt. In dezentrale Anlagen der Landwirtschaft gelangten demgegenüber zum damaligen Zeitpunkt knapp 65 %. Die übrigen Mengen wurden in Spezialbetrieben der Entsorgungsindustrie zu Futtermittel verarbeitet [39].

Tabelle 3.1: Aufkommen und Stoffdaten für Speiseabfälle

Speiseabfälle	Feucht-Masse t/a	TS-Gehalt	oTS der TS	Nges. An TS	P an TS	Biogausbeute m ³ /kg oTS _{zu}
	358.000	11,9%	85%	1,33%	0,55%	0,55

Grundsätzlich unterliegen Speiseabfälle, die auch Anteile tierischer Herkunft enthalten, dem Tierkörperbeseitigungsrecht und sind auf dieser Grundlage zu entsorgen. Tierkörperverwertungsanlagen sind jedoch nicht für derart flüssige Abfälle ausgelegt. Auch würden bei größeren Mengenanteilen und einer gemeinsamen Behandlung mit den Tierkörpern die Produkte „Tierfett“ und „Tiermehl“ leiden [39]. Es ist daher nicht zu erwarten, dass Speiseabfälle zusammen mit anderen Biomassen in Tierkörperbeseitigungsanlagen eingesetzt werden. Es ist eher zu erwarten, dass diese, wie auch die Schlachthofabfälle (Magen- und Darminhalte), wegen des hohen Feuchtgehalts (12 % TS-Gehalt) aber auch wegen ihres hohen Biogaspotenzials zukünftig vor allem in Vergärungsanlagen eingesetzt werden. Schon Jäger [40] berichtete, dass Biogasanlagen zunehmend eine Konkurrenz zur Speiseabfallverwertung als Futtermittel darstellen. Ein Einsatz in Kompostierungsanlagen ist nicht möglich bzw. nicht sonderlich wahrscheinlich.

Es ist zu vermuten, dass die Speiseabfälle, aufgrund des Fütterungsverbots, nach einer entsprechenden Hygienisierung in vorhandenen Faulbehältern auf Kläranlagen, in Vergärungsanlagen als Co-Substrate eingesetzt werden. Auch die Monovergärung von Speiseabfällen ist mittlerweile Stand der Technik, eine der ersten Anlagen wurde in Mögglingen errichtet [41]. Die spezifischen Biogaserträge werden sich verfahrensbedingt unter diesen Verwertungsoptionen, d. h. den verschiedenen Anlagentechniken und Hauptsubstraten, nicht wesentlich unterscheiden. Tendenziell ist ein Einsatz als Co-Substrat mit etwas höheren spezifischen Ausbeuten verbunden, soweit man dies aus den wenigen entsprechenden Untersuchungen [42] ableiten kann. Die Unterschiede sind aber nicht derart groß und die Erkenntnisse auch wenig belastbar als dass sich daraus Empfehlungen ableiten ließen, Speiseabfälle aus Sicht des Klimaschutzes und der Schonung fossiler und

mineralischer Ressourcen gezielt bestimmten Behandlungskonzepten innerhalb der Biogaserzeugung zuzuführen. Im Zweifel wesentlich entscheidender ist die Frage, in welchem Umfang das erzeugte Biogas verwertet wird [43], und hier insbesondere die Frage, ob auch die Abwärme möglichst ganzjährig genutzt werden kann. Mit der Wahl der Vergärungsart wird auch über die Verwertung des verbleibenden Behandlungsrückstandes entschieden.

Bei einer CO-Vergärung in Faulbehältern von Kläranlagen fallen die Rückstände als kommunale Kläranlagen zur Entsorgung an. Sie werden nur zu einem Teil stofflich verwertet, der Anteil ist zugunsten einer thermischen Behandlung rückläufig. Die Gehalte an Stickstoff und Phosphor sind in diesem Anteil als Pflanzennährstoff verloren. Erfolgt die Vergärung als Co-Substrat in einer landwirtschaftlichen Vergärungsanlage, werden die Behandlungsrückstände in vollem Umfang ohne weitere Verluste auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht. Da keine Entwässerung erfolgt, besteht auch kein weiterer Verlust an Pflanzennährstoffen.

Erfolgt die Vergärung zusammen mit Biomüll aus Haushalten, werden die Pflanzennährstoffe teilweise auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht. Mit Speiseabfällen sind aber nur 234 Mg Phosphor verbunden [44]. Unabhängig von der aufgezeigten Art der Verwertung der Behandlungsrückstände sind daher keine gravierenden Einflüsse in der Frage der Rückgewinnung von Phosphor in den Wirtschaftskreislauf zu erwarten.

Bioabfall aus Haushalten wird getrennt erfasst und einer Verwertung zugeführt. Mögliche Verwertungswege sind die Kompostierung und die Vergärung von Bioabfällen. Die aktuellen Stoffströme und Potenziale sowie Möglichkeiten zu ökologischen Optimierungen werden im Folgenden dargestellt. Das Bioabfallaufkommen ist seit Jahren nahezu konstant und erreicht etwa 3,5 Millionen Jahrestonnen [44]. Seit 2002 werden, neben den Abfällen aus der Biotonne, in dieser Statistik auch Grünabfälle in Höhe von 3,8 Millionen Jahrestonnen genannt, die bis zu diesem Zeitpunkt als Garten-, Park- und Friedhofsabfälle und damit als Teil der sonstigen Siedlungsabfälle geführt wurden. Bei diesen Mengen ist ungeklärt, welcher Anteil der Grünabfälle aus Privatgärten stammt bzw. von öffentlichen Grünflächen oder aus der Anlieferung von Garten- und Landschaftsbaubetrieben.

In 77 % der entsorgungspflichtigen Körperschaften (ÖrE) werden Bio- und Grünabfälle flächendeckend oder zumindest in Teilgebieten separat erfasst [45]. Nach der Auswertung der Abfallbilanzen der einzelnen Bundesländer beläuft sich das Gesamtaufkommen auf etwa 73 kg/(E*a), davon sind 52 % Bioabfälle und 48 % Grünabfälle. Die Unterschiede in den Sammelquoten zwischen West- und Ostdeutschland sind sehr groß, aber auch innerhalb einzelner Bundesländer weisen die Kommunen äußerst unterschiedliche Sammelquoten auf. Während bspw. in Baden-Württemberg durchschnittlich 130 kg/(E*a) Bioabfall gesammelt wird, waren es 2003 in Baden-Baden 420 kg/(E*a) [46]. Bei diesen großen Spannbreiten der in den Statistiken dokumentierten Mengenangaben wird deutlich, dass das Bioabfallaufkommen sehr stark von dem Grünabfallaufkommen beeinflusst wird und hierbei immer ungeklärt ist, welche Anteile in der Praxis tatsächlich durch die Haushalte getrennt erfasst wurden und welche Anteile aus unterschiedlicher Herkunft (bspw. Pflege städtischer Parkanlagen oder Anlieferungen von Garten- und Landschaftsbaubetrieben) stammen. Die in den Statistiken dokumentierten Werte haben einen unterschiedlichen Bezug, teilweise werden nur die Mengen als Bioabfall erfasst, die auch tatsächlich über die Abfallentsorgung, insbesondere über die Biotonne ab Haushalt, abgefahren werden. Teilweise werden die Daten nur an den Entsorgungsanlagen als Anlieferungsmenge erhoben. Selbst bei einem Vergleich der Zahlen für die ab Haushalt erfassten Bioabfälle zeigen sich deutliche Unterschiede im Aufkommen. Je nach Sammelsystem, verfügbarem spezifischem Behältervolumen und Größe der Müllgefäße sowie des Charakters des Sammelgebiets werden nicht nur Küchenabfälle, sondern auch Gartenabfälle über die Biotonne erfasst.

Das Gartenabfallpotenzial schwankt stark in Abhängigkeit von der Bebauungsstruktur und den Jahreszeiten. Die tatsächlich über die Biotonne erfassten Mengen sind abhängig von dem zur Verfügung stehenden spezifischen Behältervolumen und der Gebührensatzung. Ist

die Erfassung über die Biotonne gering, steigt in der Regel die Bedeutung der Eigenkompostierung [47]. Eine genaue Abgrenzung der Bioabfälle aus Haushalten gegenüber Biomassen anderer Herkunft (Grünabfälle) ist ebenso wenig möglich wie eine genaue Ableitung des Mengenaufkommens aus den Abfallstatistiken.

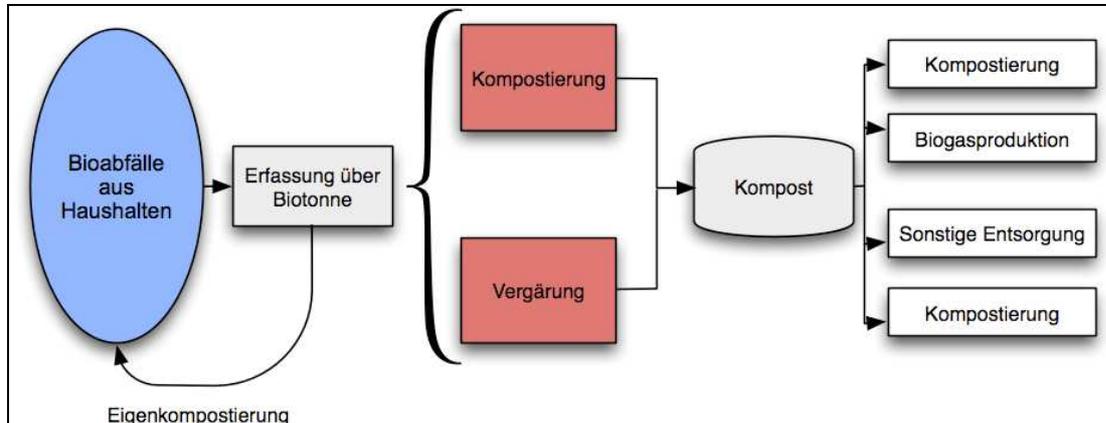


Abbildung 3.12: Stoffströme bei der Verwertung von Bioabfällen aus Haushalten [48]

Nimmt man die erwähnten 73 kg/(E*a) [26] als spezifisches Aufkommen an Bioabfällen aus Haushalten, ergibt sich rechnerisch für Deutschland eine Gesamtmenge von knapp 6 Mio. Jahrestonnen. Damit verbundene Stoffflüsse an Frisch- und Trockenmasse, Stickstoff und Phosphor sind in Tabelle 7-8 aufgeführt [49].

Tabelle 3.2: Stoffdaten für Bioabfälle aus Haushalten

Biomüll	Feucht- masse t/a	TS-Gehalt	oTS in % TS	N ges. in %TS	P ges. in % TS	Spez. Biogasproduktion
	6.000.000	40%	50%	1,65%	0,43%	390 l/kg oTS _{zu}

Die getrennt gesammelten Bioabfälle werden vollständig verwertet und als Kompost auf Flächen ausgebracht. In aller Regel erfolgt die biologische Behandlung aerob. Erst gegen Ende der 90er Jahre wurden auch Vergärungskapazitäten für Biomüll aus Haushalten geschaffen. Nach einer umfassenden Bestandsaufnahme Ende der 90er Jahre [39] betrug der Anteil der Vergärungsanlagen an den Gesamtkapazitäten zur Bioabfallbehandlung etwa 15 %. Diese Angaben lassen sich ausschließlich auf Bioabfälle aus Haushalten beziehen, da sie auch andere biogene Abfälle mitbehandeln. Deutlich wird allerdings, dass bislang nur ein kleiner Teil der Bioabfälle aus Haushalten auf anaerobem Weg zu Kompost verwertet wird. Nach der Vermarktungsstatistik der Bundesgütegemeinschaft Kompost [50] werden zu etwa 2/3 Fertig- und etwa 1/3 Frischkompost erzeugt. Während der Frischkompost vor allem in der Landwirtschaft (zu 75 %) abgesetzt wird, gelangt Fertigkompost verstärkt in den Landschaftsbau, in den Hobby- und Erwerbsgartenbau sowie in Erdenwerke. Über die Landwirtschaft werden nur 36 % des Fertigkompostes vermarktet.

Bioabfall aus der Lebensmittelindustrie: Bei der Lebensmittelindustrie handelt es sich um unterschiedliche Nahrungs- und Genussmittel, dabei werden unterschiedliche Verarbeitungsverfahren durchgeführt, die entsprechende Produktionsrückstände, Nebenprodukte oder biogene Abfälle generieren. Als Rückstände sind zu nennen: feste Rückstände aus der Herstellung von Getränken aus Obst, wie zum Beispiel Apfelreste, Rebenreste u.a. und Schalen von Zitrusfrüchten. Theoretisch kann man mit einem spezifischen Rückstandsaufkommen von 0,25 kg pro Liter Saft rechnen. Bei der Herstellung von Trinkalkohol bzw. Ethanol fallen Schlempen mit Trockensubstanzgehalten von weniger als 10 % an. Zu nennen sind hier z. B. Kartoffelschlempe, Weizenschlempe oder Melassenschlempe.

Bei der Milchverarbeitung fällt Molke als Rückstand an, mit einem spezifischen Aufkommen von 2 m³ Reststoff pro m³ angelieferter Milch. Bei der Herstellung von Ölen aus

unterschiedlichen pflanzlichen Rohstoffen fallen nach der Pressung verbleibende Rückstände als Produktionsabfälle an. Bei der Herstellung von Bier fallen unterschiedliche Arten von Rückständen an, darunter findet man Treber mit fast 80 % der gesamten Rückstände, zusätzlich fallen noch Hefe-, Heiß- und Kühltrub, Kieselgur sowie Malztaub an.

Landwirtschaftliche Produkte werden weiter verarbeitet, dadurch entstehen Rückstände wie z. B. Putzrückstände und Schalen, um nur einige zu nennen. Das geschieht bei der Konservenherstellung, der Kartoffelverarbeitung oder in Getreidemöhlen. Bei der Zuckerherstellung fallen Rübenschnitzel und Melasse an. Abbildung 3.13 zeigt die Übersicht über die Massenströme bei der Lebensmittelindustrie.

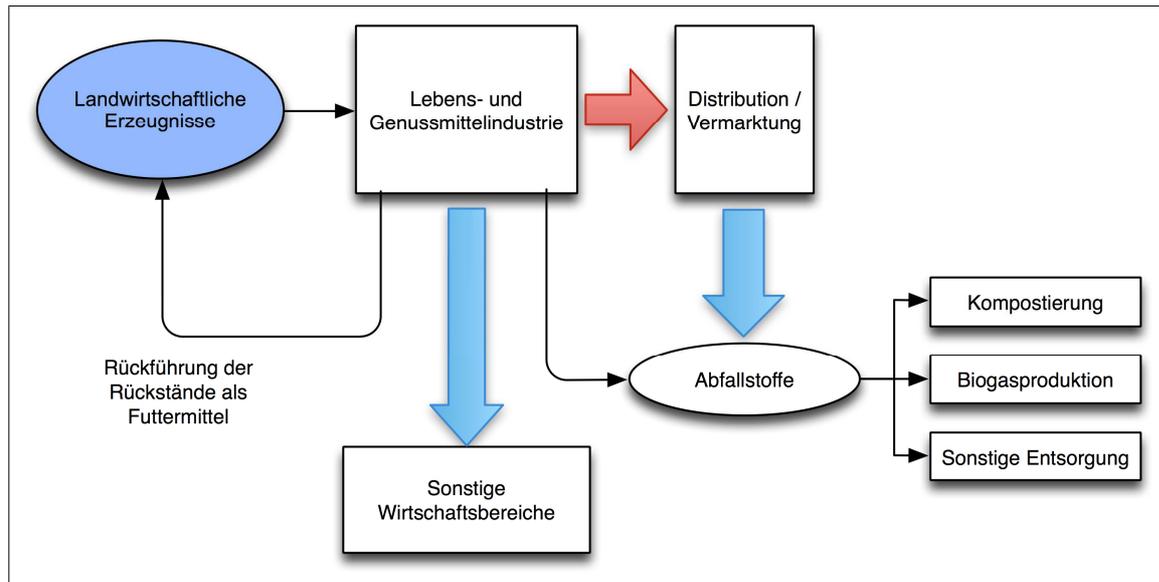


Abbildung 3.13: Übersicht der Massenströme bei der Lebensmittelindustrie [48]

Derartige Produktionsrückstände aus der Lebensmittelindustrie fallen nur dann als Abfall zur Entsorgung an, wenn sie, beispielsweise aufgrund von Überlagerungsproblemen, nicht mehr als Rohstoff für die Herstellung anderer Produkte genutzt werden können. Während ihre Verwendung als Rohstoffe mit Erlösen verbunden ist, ist ihre Entsorgung als biogener Abfall tendenziell mit Kosten verbunden. Eine ökologische Alternative ist die Verwendung in der Landwirtschaft. Ist eine solche im Einzelfall nicht möglich, gelangen sie in der Regel als Co-Substrat in eine landwirtschaftliche Vergärungsanlage [Tabelle 3.3].

Tabelle 3.3: Stoffdaten für verschiedene Abfälle aus der Lebensmittelindustrie

	Feuchtmasse t/a	TS-Gehalt	oTS in % TS	N ges. in %TS	P in % TS	Gasertrag (m ³ /t FM)
Kartoffelschlempe	780.000	5,5 %	80 %	5,6 %	0,39 %	36-42
Apfelreste	250.000	25 %	86 %	1,1 %	0,13 %	145-150
Biertreber	2.800.000	25 %	66-95 %	4-5 %	0,65 %	105-130
Melasse	900.000	80 %	95 %	1,5 %	0,13 %	290-340

In Abhängigkeit des Wassergehalts gelangen die biogenen Abfälle in Vergärungs- oder Kompostierungsanlagen. Die verbliebenen Pflanzenreststoffe werden auf die Ackerflächen zurückgebracht und als Ersatz für Mineraldünger verwendet.

Klärschlämme gehören auch zu den Biomasseströmen. Sie fallen als fester Rückstand der Abwasserreinigung zur Entsorgung an. Der Klärschlamm resultiert aus den entsprechenden Abwasserinhaltsstoffen sowie der Biomasse der für die Abwasserreinigung eingesetzten

Bakterien. Dazu kommen Betriebsmittel, die für die Präzipitation der Abwasserinhaltsstoffe eingesetzt werden. So eine Präzipitation findet nicht nur für Schwermetalle, sondern auch für Phosphor statt. Der Schlamm wird in der Regel über Faultürme stabilisiert und dann mechanisch entwässert, für kleine Anlagen eignet sich auch eine aerobe Stabilisierung. Als Ausnahme können auch Klärschlämme ohne Entwässerung zur Entsorgung abgegeben werden. Eine weitere Alternative ist die Verbrennung. Zuvor werden einige Verfahren durchgeführt, um das Material zu trocknen und anorganische oder organische Entwässerungshilfsmittel werden zugegeben, um das Trocknen zu unterstützen. Nach statistischen Angaben liegt das Klärschlammaufkommen bei etwa 2,2 Millionen t TS pro Jahr. In 2001 erfolgte die Entsorgung zu etwa 25 % thermisch (Verbrennung). Mittlerweile hat sich die Situation geändert, da die stoffliche Verwertung in der Landwirtschaft und im Landschaftsbau retrograde Mengen aufweist und insbesondere Kraftwerke in großem Umfang Verbrennungskapazitäten für Klärschlämme geschaffen haben. Bezogen auf eine Rückmeldung von etwa 25 % der Kläranlagen in Deutschland kommen sie auf einen Verbrennungsanteil von 38 %. Mehr als ein Drittel der thermisch behandelten Klärschlämme gelangt also in Kraftwerke. Abbildung 3.14 zeigt die Stoffströme für die Klärschlämme auf.

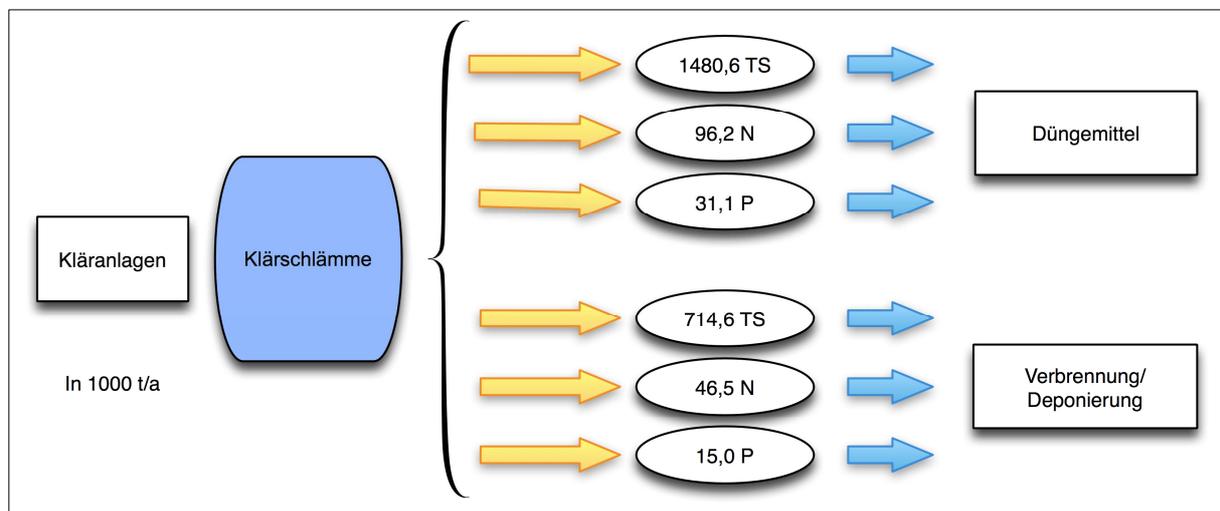


Abbildung 3.14: Stoffströme bei der Entsorgung von Klärschlämmen [48]

Neben den privaten Haushalten sind auch gewerbliche Standorte an die Kanalisation angeschlossen. Aus diesen wird hauptsächlich produktionsspezifisches Abwasser eingeleitet, welches nicht nur organische und anorganische Stoffe, sondern auch Nährstoffe, wie z. B. Phosphor, enthält. Mit den Verbrennungskapazitäten in Kraftwerken zusammen mit Monoverbrennungsanlagen, Müllverbrennungsanlagen, der Zementindustrie und weiteren kleinen Kraftwerken können bis zu 2,2 Millionen t TS Klärschlamm verbrannt werden. Tabelle 3.4 zeigt, dass Klärschlamm ein großes Potenzial zur Rückgewinnung von Phosphor hat. Bei dem angenommenen Trend hin zu einer Mitverbrennung von kommunalen Klärschlämmen, vor allem in Kraftwerken und der Zementindustrie, würde dieser Pflanzennährstoff dem Kreislauf verloren gehen. Aus Sicht des Klimaschutzes zeigen alle Studien der vergleichenden Bewertung von unterschiedlichen stofflichen und energetischen Entsorgungsansätzen für kommunale Klärschlämme keine signifikanten Ergebnisunterschiede, wobei die Mitverbrennungsoptionen eher vorteilhaft sind.

Tabelle 3.4: Zusammensetzung des Klärschlammes

KS-Aufkommen in t/a TS	P _{ges.} in % TS	P _{ges.} in t	N _{ges.} in % TS	N _{ges.} in t
2.195.000	2,1 %	46.100	6,5 %	142.700

3.4 Biogas in Verkehr und Transport

Das erste Fahrzeug mit Gasmotor wurde bereits 1862 von Etienne Lenoir gebaut, noch bevor es Benzin- und Dieselfahrzeuge gab [51]. Im Laufe der Jahre begann eine immer stärker werdende weltweite Motorisierung und verschiedene Gasfahrzeuge wurden betrieben. Als Treibstoff diente u. a. Biogas, Campinggas, Erdgas, Holzgas, Koksgas oder Stadtgas. Ab 1950 fand eine Konzentration auf Benzin- und Dieselfahrzeuge statt. Dies wurde auch durch das bis in die 70er Jahre fallende Preisniveau für Benzin und Diesel begünstigt.

Aus Klima- und Umweltschutzgründen nimmt der Einsatz von Erdgas weltweit immer mehr zu. Hinzu kommt die Verknappung der Ölressourcen. Da auch das Erdgas nicht unbegrenzt vorhanden ist, wird der Einsatz von Biogas immer wichtiger. Nach einem Vorschlag des Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschusses für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Förderung sauberer Straßenfahrzeuge [52] soll bei jährlichen Ausschreibungen von öffentlichen Stellen für Fahrzeuge über 3,5 Mg eine Mindestquote für besonders umweltfreundliche Fahrzeuge existieren. Diese Mindestquote soll 25 % der Ersatzanschaffungen schwerer Nutzfahrzeuge (wie Busse und Müllfahrzeuge) betragen. Dies soll eine schrittweise Einführung ökologischer Vergabekriterien in die Vergabeverfahren ermöglichen und die öffentlichen Stellen und die Industrie auf eine mögliche Ausdehnung auf andere Fahrzeugkategorien vorbereiten. Hauptzielsetzungen der Richtlinie sind:

- Reduzierung des Schadstoffausstoßes durch den Verkehr,
- Förderung des Marktes für umweltfreundliche Fahrzeuge mit einem Gesamtgewicht über 3,5 Mg.

Schätzungen zufolge sind von diesem Richtlinienvorschlag etwa 52.000 jährlich angeschaffte Fahrzeuge betroffen, davon 17.000 Busse und 35.000 sonstige schwere Nutzfahrzeuge. 25 % davon, also 13.000 Fahrzeuge jährlich, sollen besonders umweltfreundliche Fahrzeuge sein.

Seit 2002 begann die SEAB Energie-Umweltbetriebe Bozen AG [53] in Italien ihren Fuhrpark auf Methangas umzustellen. Etwa 13 % der Fahrzeuge vom Gesamtfuhrpark sind auf Gas umgerüstet worden, u.a zählt man auch 4 Müllsammelfahrzeuge dazu.

In Deutschland waren 54.772 Erdgasfahrzeuge am 1. Januar 2007 registriert. In den nachfolgenden Kapiteln werden die Vorteile (Kostensparnis, reduzierter CO₂-Ausstoß) dargestellt, die beim Einsatz von gasangetriebenen Fahrzeugen gegenüber Benzin- oder Dieselfahrzeugen entstehen.

3.4.1 Vergleich Biogas, Diesel und Benzin im Abfallsammlungsbereich

Im UFO-Plan-Vorhaben des Umweltbundesamtes [54] wird die Anzahl der benötigten Fahrzeuge zur Abfallsammlung mit grob 24.000 Stück geschätzt. Daraus ergeben sich jährliche Kosten von ca. 410 Mio. Euro für Wartung und Ersatzinvestitionen (inklusive Behälter). Der Transportaufwand für die Abfallsammlung wird auf knapp 230 Mio. Kilometer geschätzt. Daraus ergibt sich ein Dieserverbrauch von 113 Mio. Litern pro Jahr. Damit ergibt sich für den Treibstoffverbrauch pro km:

$$\text{Dieselverbrauch} = \frac{\text{Dieselmenge}}{\text{Strecke}} = \frac{113 \text{ Mio. l}}{230 \text{ Mio. km}} = 0,49 \frac{\text{l}}{\text{km}} \quad (3-1)$$

Mit diesen Zahlen und einem mittleren Dieselpreis von 1,08 Euro pro Liter in 2008 [55] ergeben sich Kosten von 122,04 Mio. Euro pro Jahr. Biogas kostet 0,93 € pro Kilogramm. Die Bio- bzw. Erdgasmengen werden in kg angegeben. Um eine Vergleichbarkeit mit Benzin oder Diesel zu ermöglichen, wurden das Benzin- und das Dieseläquivalent eingeführt. Diese Äquivalente geben an, wie viel Liter Benzin bzw. Diesel die gleiche Energie wie 1 kg Biogas enthalten. Nach [56] und [57] ergibt sich die folgende Tabelle.

Tabelle 3.5: Kraftstoffäquivalente

Biogas/kg	Dieseläquivalent/l	Benzinäquivalent/l
1	1,3	1,5

Einem Kilogramm Biogas entsprechen 1,3 Liter Diesel und 1,5 Liter Benzin. Danach könnten die benötigten 113 Mio. Liter Diesel durch 86,9 Mio. kg Biogas ersetzt werden. Die Werte für Biogas und Benzin erhält man mithilfe der Äquivalente. Die Ergebnisse für Benzin sind nur zum Vergleich angeführt. Fahrzeuge dieser Art werden ausschließlich mit Gas oder Diesel betrieben. Mithilfe der Dichte ρ ergibt sich (m : Masse, V : Volumen):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3-2)$$

$$\rho_{\text{Diesel}} = 0,87 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \quad (3-3)$$

$$\rho_{\text{Benzin}} = 0,78 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \quad (3-4)$$

Welche Mengen der Kraftstoffe Benzin und Biogas statt der Dieselmenge aus Gleichung (3-1) von 0,49l/km eingesetzt werden müssten, zeigt Tabelle 3.6.

Tabelle 3.6: Kraftstoffmengenvergleich

	Biogas [kg]	Diesel [l]	Diesel [kg]	Benzin [l]	Benzin [kg]
Menge pro km	0,38	0,49	0,43	0,57	0,44

Tabelle 3.7 zeigt den Preis pro Kilometer, der sich nach den offiziellen Tankstellenpreisen [55] ergibt (z. B. für Biodiesel: 0,38 kg/km x 0,93€/kg = 0,35€/km).

Tabelle 3.7: Kraftstoffpreise

	Biogas	Diesel	Benzin
Preis [€/km]	0,35	0,53	0,7
CO ₂ -Emission [kg/km]	0	1,3	1,35

Anhand der tabellarischen Darstellung erkennt man, dass durch Biogastanken (statt Diesel) ca. 0,18 € pro km gespart werden könnten. Diese Ergebnisse sind in den nachfolgenden Diagrammen noch einmal dargestellt.

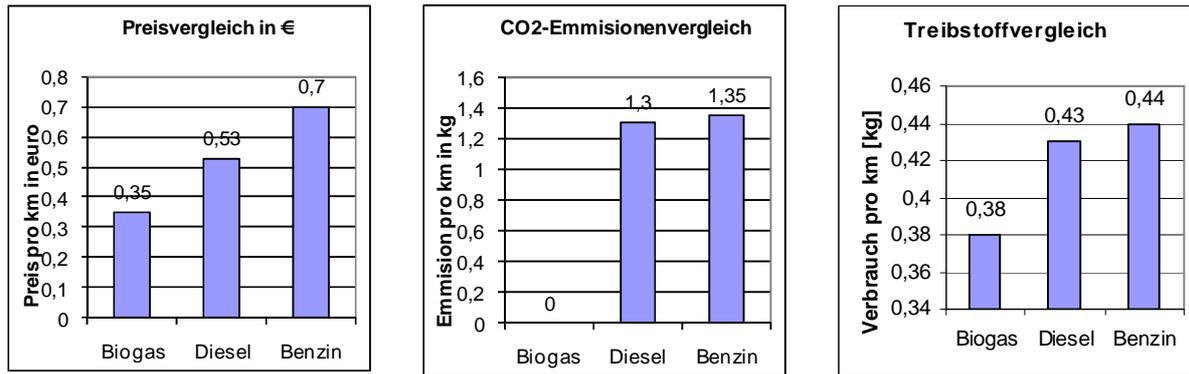


Abbildung 3.15: Treibstoffvergleich

3.4.2 Vergleich von Biogas mit fossilen Kraftstoffen

In den folgenden Kapiteln wird der Einsatz von Biogas in verschiedenen Fahrzeugarten unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten betrachtet und mit fossilen Kraftstoffen verglichen. Das Erdgas, dessen Hauptbestandteil Methan ist, ist der kohlenstoffärmste Brennstoff und verbrennt daher auch praktisch geruchsfrei, auch wenn odorisiertes Erdgas verwendet wird. Zudem ist die Nutzung von veredeltem Biogas, in der Schweiz auch Kompogas genannt, als Treibstoff für Erdgasfahrzeuge möglich [51].

Ein Abfallsammelfahrzeug mit Gasbetrieb kostet 15.000 € bis 30.000 € mehr als ein vergleichbares Fahrzeug mit Dieselmotor. Prozentual betrachtet liegen diese Mehrkosten der Anschaffung bei 4 % bis 9 %. Die Fahrzeuge mit Gasantrieb zeigen aber im Betrieb die günstigeren Kraftstoffkosten. Die Betriebsstunden pro Tag ergeben sich aus den 1.875 Stunden pro Jahr dividiert durch 251 Arbeitstage pro Jahr [58].

Eine Ersparnis von 20,25 € pro 100 km ergibt sich bei einer Fahrstrecke von 25.000 km und führt zu einer Kostenreduzierung von 5.062,5 € pro Jahr. Die Mehrkosten von 15.000 € amortisieren sich bereits nach ca. 3 Jahren. Die Kosten für Diesel und Biogas stammen aus den Quellen [55]. Bei Diesel handelt es sich dabei um den mittleren Dieselpreis von 2008. Legt man einen Dieselpreis von 1,509 € zugrunde (dies war der Dieselpreis vor der Wirtschaftskrise), ergibt sich eine Ersparnis von 50,91 € pro 100 km. In diesem Fall hätten sich die Mehrkosten von 15.000 € bereits nach 1,2 Jahren amortisiert. Bei einer CO₂-Ersparnis von 35,95 kg pro 100 km ergibt sich bei einer Fahrstrecke von 25.000 km pro Jahr und einer Lebensdauer von 15 Jahren eine CO₂-Ersparnis von 135 MgCO₂. Die Minderemission von CO₂ der erdgasbetriebenen Busse ist gegenüber den modernen Dieselnissen der Euro 4-Norm mit CRT-Filter zu vernachlässigen. Bei der Emission von Stickoxiden (NO_x) zeigen erdgasbetriebene Busse immer noch deutlich bessere Werte. Die Emission eines Erdgasbusses liegt hier um 42 % unter der eines vergleichbaren Dieselnisses. Die Partikelemissionen eines erdgasbetriebenen Busses liegen bei 0,002 g/kWh und sind damit zu vernachlässigen. Verwendet man Biogas anstelle von Erdgas, ist der Busbetrieb CO₂-neutral, da nur die Menge an CO₂ ausgestoßen wird, die Pflanzen zuvor bei ihrem Wachstum verbraucht haben. Ausgehend von einer Laufleistung von 70.000 km pro Jahr und einer Lebensdauer von 8 Jahren ergibt sich eine Ersparnis von 73.360 € bei den Tankkosten gegenüber dem Dieselniss. Unter Berücksichtigung der um 27.560 € höheren Anschaffungskosten bleibt eine Ersparnis von 45.800€.

Tabelle 3.8: Zusammenfassung der Daten für verschiedene Fahrzeuge [59], [60]

Fahrzeuge	Abfallsammelfahrzeug		Bus	
Gewicht [Mg]	26		28	
Motorleistung	205 kW / 279 PS		228 (kW)	
Lebensdauer [Jahre] (Ø)	15		8	
Geschwindigkeit [km/h] (Ø)	13,3		17,0 – 18,6	
Betriebsstunden pro Jahr [h]	1.875			
Betriebsstunden pro Tag [h]	7,5		19 – 22	
Fahrstrecke pro Jahr [km]:	20.000 - 25 000		70.000	
Fahrstrecke pro Tag [km]:	80 - 100		364	
Antrieb	ECONIC NGT (Gasbetrieb)	DIESEL	Gasbetrieb	Diesel
Anschaffungskosten [€]	365.000 - 380.000	350.000	364.000	336.440
Platzkapazität insg. (Stehen und Sitz)			158	151
Nutzbarer Tankinhalt	100 kg	k.Angabe	222 kg	350 l
Reichweite [km]	130-150	120-140	433	583
Kraftstoffverbrauch pro 100 km	63 kg	73 l	53,8 kg	60,6 l
Kraftstoffkosten (Ø)	0,93 €/kg	1,08 €/l	0,93 €/kg	1,08 €/l
Kraftstoffkosten pro 100 km [€]	58,59	78,84	50,03	65,45
CO ₂ -Emission pro 100 km [kg]	157,5	193,45	k.A.	
Ersparnis pro 100 km [€]:	25,25		15,42	

3.5 Rechtliche Grundlagen

Die rechtlichen Grundlagen zur Biogasproduktion aus den in dieser Arbeit berücksichtigten biogenen Abfallstoffen werden in drei Gruppen unterteilt [38], welche die Biogas Supply Chain beeinflussen. Die rechtlichen Grundlagen werden in Abbildung 3.16 dargestellt.

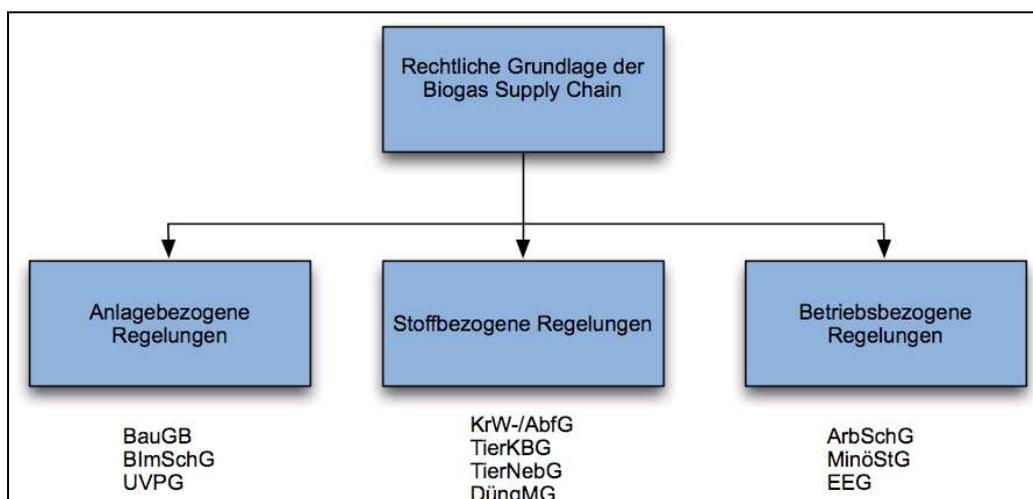


Abbildung 3.16: Rechtlicher Rahmen der Biogas Supply Chain [38]

Biogasanlagen sind standortgebundene Anlagen, deswegen ist eine Genehmigung (BauGB) für die Errichtung der Anlage erforderlich. Die Anlagen, in denen tierische Ausscheidungen in Form von Gülle vergoren werden, werden landwirtschaftliche Anlagen genannt. Solche Anlagen können aufgrund ihrer betrieblichen Zugehörigkeit als landwirtschaftlicher

Nebenbetrieb angesehen werden, und sie können an der Privilegierung eines landwirtschaftlichen Betriebes nach §35 BauGB teilhaben.

Entscheidend kann die Anlagengröße für die Art und den Umfang der Genehmigung sein. Für kleine Anlagen erfolgt die Genehmigung nach dem Baurecht, und es besteht die Möglichkeit der Erteilung von zusätzlichen immissionsschutzrechtlichen Auflagen. Bei den größeren Anlagen erfolgt die Genehmigung nach dem Immissionsschutzrecht. Die Anlagen, deren Feuerungswärmeleistung bis 350 kW oder deren elektrische Leistung bis 120 kW beträgt, werden nach Baurecht genehmigt. Die Anlagen, deren Feuerungswärmeleistung ab 10 MW beträgt, werden in einem förmlichen immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung genehmigt.

Die Biogasanlagen können Emissionen von Luftschadstoffen verursachen, die von der Technologie und dem Substrat abgängig sind. Besonders die Nachbarschaft kann von solchen Luftschadstoffen und Geruchsemissionen belastet werden. Die Geruchsemissionen entstehen besonders bei der Anlieferung der Rohstoffe, der Lagerung und der Einbringung in der Biogasanlage [53]. Außer den Emissionen können Geräusche auftreten, die durch die Anlieferung oder die Stromerzeugung durch Verbrennungsmotoren entstehen. Sie werden mit der Technischen Anleitung Lärm Gesetz (TA Lärm) begrenzt, die sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm) VwV vom 26. August 1998 [61].

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz ist am 07.10.1996 in Kraft getreten. Kernpunkt des KrW-/AbfG ist der Abfallbegriff: „Bewegliche Sachen, deren sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss.“ Wenn der Besitzer diese entweder einer Verwertung oder einer Beseitigung zuführt oder die tatsächliche Sachherrschaft über sie unter Wegfall jeder weiteren Zweckbestimmung aufgibt, dann liegt eine Entledigung vor. Das KrW/AbfG unterteilt weiterhin in die Begriffe Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen. In der sogenannten „Tierische Nebenprodukte-Verordnung“ sind tierische Nebenprodukte, dazu gehören Speise- und Rüstreste sowie Schlachtabfälle, in 3 Kategorien unterteilt:

Kategorie 1: Enthält alle jene tierischen Nebenprodukte, die das höchste Risiko für Mensch, Tier und Umwelt (hygienisches Risiko, BSE-Risiko, etc.) darstellen.

Kategorie 2: Enthält alle tierischen Nebenprodukte, die weder in Kategorie 1 noch in Kategorie 3 aufgelistet sind (unter anderem Gülle, Pansen-, Magen- und Darminhalt oder nicht schlachtaugliche Tiere). Dabei sind Abfälle, die in die Kategorie 1 fallen, grundsätzlich nicht für die Verwertung in Biogasanlagen vorgesehen [55].

Kategorie 3: Hier sind jene tierischen Nebenprodukte zusammengefasst, die von schlacht- bzw. genusstauglichen Tieren stammen, aber (z. B. aus kommerziellen Überlegungen) nicht für den menschlichen Verzehr bestimmt sind.

Dazu gehören unter anderem Tierkörper oder Körperteile, die im Rahmen von TSE (Transmissible Spongiforme Enzephalopathie) getötet wurden, andere Tiere als Nutz- und Wildtiere, spezifiziertes Risikomaterial und Erzeugnisse, die von Tieren stammen. Weiter alles Tiermaterial, das bei der Behandlung von Abwässern aus Verarbeitungsbetrieben für Material der Kategorie 1 und anderen Anlagen, Küchen- und Speiseabfälle von Beförderungsmitteln im grenzüberschreitenden Verkehr und Gemische von Material der Kategorie 1 mit Material der Kategorie 2 oder der Kategorie 3 stammt. Material der Kategorie 2 ist unter gewissen Auflagen für die Verwertung in Biogasanlagen zugelassen. Nur Gülle sowie Magen- und Darminhalte (von Magen und Darm getrennt; sofern keine Gefahr der Verbreitung von schwer übertragbaren Krankheiten besteht), Milch und Kolostrum, können unvorbehandelt der Verwertung zugeführt werden. Darunter fallen auch Speise- und Rüstreste, exklusive das Material der Kategorie 1. Für Material der Kategorie 3 ist teilweise eine Hygienisierung notwendig. Zum Material der Kategorie 3 zählen unter anderem genusstaugliche Schlachtkörperteile, die aus kommerziellen Gründen nicht dem menschlichen Verzehr dienen.

Für die Erzeugung von Biogas existieren viele Rechtsvorschriften, die jeweils aufgrund von vielfältigen Verweisen, Rückverweisen und Bedingungen in enger Beziehung zueinander stehen. Die anlagenbezogenen, stoffbezogenen und betriebsbezogenen Regelungen und die Ausführungen zu den jeweiligen Bereichen können nicht jede Detailfrage beantworten, sie können nur einen Überblick über die Rechtsvorschriften und deren Verknüpfung geben.

3.6 Betriebliche Planung bei der Supply Chain

Die Planung ist die Gestaltung von Prozessen oder Anlagen, welche eine bestimmte Aufgabe in einer bestimmten Zeitspanne zu erfüllen hat [32].

Um logistische Systeme allgemein und insbesondere in der Entsorgung zu planen, liegt eine Vielzahl von möglichen Tätigkeitsgebieten vor, u.a. die Ablaufplanung (Gestaltung der Transportkette), die Arbeitsmittelplanung (Fuhrparkplanung) und die Fabrikplanung (Aufbau von Abfallbehandlungsanlagen). Gegenstand der Planung sind die untersuchten Objekte (Abfall, Entfernungen, Sammelfahrzeuge, Zeit) und die notwendige Infrastruktur.

Zur Entwicklung entsprechender Modelle werden Methoden aus dem Bereich des *Operation Research* wie die Graphentheorie, Netzplantechnik und die lineare und nicht lineare Optimierung angewandt. Hinzu kommen noch Verfahren wie Entscheidungstabellen, Systemanalysen, Materialflusspläne und Flussdiagramme. Weiter werden Simulationsprogramme und andere Systeme als Planungswerkzeuge genannt, die im Laufe der Zeit eine wichtigere Rolle spielen. Neben diesen Objekten sind folgende Aspekte zu berücksichtigen: Anlagentechnik, Energietechnik, Organisation, Wirtschaftlichkeit und, speziell im Bereich der Entsorgung, Gesetze und Verordnungen. Angesichts der Verkehrssituation, der Kosten und der Berücksichtigung von ökologischen Prinzipien spielt die Standort- und Tourenplanung und schließlich die Distribution in der Planung eine wichtige Rolle. Diese werden im folgenden Teil beschrieben.

3.6.1 Standortplanung in der Kreislaufwirtschaft

Mit der Kreislaufwirtschaft sollen die Materialien nach dem Konsum entweder vermieden oder als Sekundärrohstoff stofflich verwertet werden [62].

Die einmal realisierten Entscheidungen können nur mit großem Aufwand und hohen Kosten rückgängig gemacht werden. Aus diesem Grund ist die Standortauswahl in der strategischen Planung ganz besonders zu berücksichtigen. Bei der Standortplanung ist eine begrenzte Region zu betrachten. Alle Standorte werden durch bestimmte Nebenbedingungen gekennzeichnet. Danach wird der optimale Standort mithilfe geeigneter heuristischer Methoden bzw. exakter Verfahren berechnet [63].

Ziel der Standortplanung ist, aus einer Menge von potenziellen Standorten denjenigen auszuwählen, der Standortanforderungen und Standortbedingungen berücksichtigt. Dazu müssen folgende Aufgaben gelöst werden:

- Beschreibung des Problems mit einer Ableitung von den daraus resultierenden Anforderungen an einen Standort
- Beurteilung der Standorte bezüglich der Standortfaktoren

Bei der Auswahl des Produktionsorts ist es wichtig, dass dieser sich räumlich nah an den Rohstoffquellen befindet, während für die Transportkostenreduzierung die Planung der Umschlagpunkte wichtiger ist. [64] Die Standort- und Zuordnungsplanung ist ein Teilgebiet des *Operation Research*, mit dessen Hilfe die Logistiknetzwerke optimiert werden. Sie hat typische Strukturen der kombinatorischen Optimierungsprobleme, die schwierig zu lösen sind. Tourenplanungsprobleme weisen einen wirtschaftlichen Bezug auf, weil ein großer Anteil der Kosten eines Endproduktes aus Transportleistungen bestehen kann. Es entstehen 15 % der Kosten aus Transportaufgaben, die möglicherweise auf 25 % steigen könnten [63]. Bei der Abfallsammlung handelt es sich um viele Quellen und kleine Mengen, das bedeutet hohe Transportkosten.

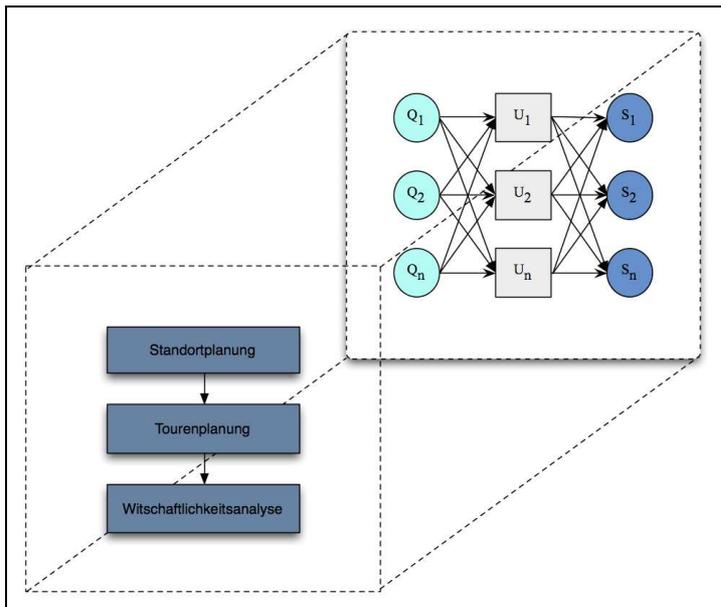


Abbildung 3.17: Sequenzielle Vorgehensweise bei der Standort- und Tourenplanung [62]

Ein wichtiger Teil der Standortplanung steht in engem Zusammenhang mit dem Begriff **Umschlag**, welcher die Gesamtheit aller Förder- und Lagervorgänge bei dem Übergang der Güter auf ein Arbeitsmittel, beim Abgang der Güter von einem Arbeitsmittel und bei einem Wechsel der Güter zwischen Arbeitsmitteln kennzeichnet [65]. Bei der Biogas Supply Chain wird der Umschlagpunkt als ein Zwischensammelpunkt betrachtet.

Der direkte Transport der gesammelten Abfälle wurde früher durchgeführt, um die personalintensive Abfallsammlung von dem Transportvorgang zu trennen. Abbildung 3.18 veranschaulicht den Kostenvergleich mit und ohne Umschlag [66]. Bis zu einem Transportweg von „a“ Kilometern ist ein Direkttransport aufgrund der Umschlagkosten günstiger. Wenn die Entfernung größer als „a“ Kilometer ist, steigen die Transportkosten, infolgedessen ist der Umschlag sinnvoll.

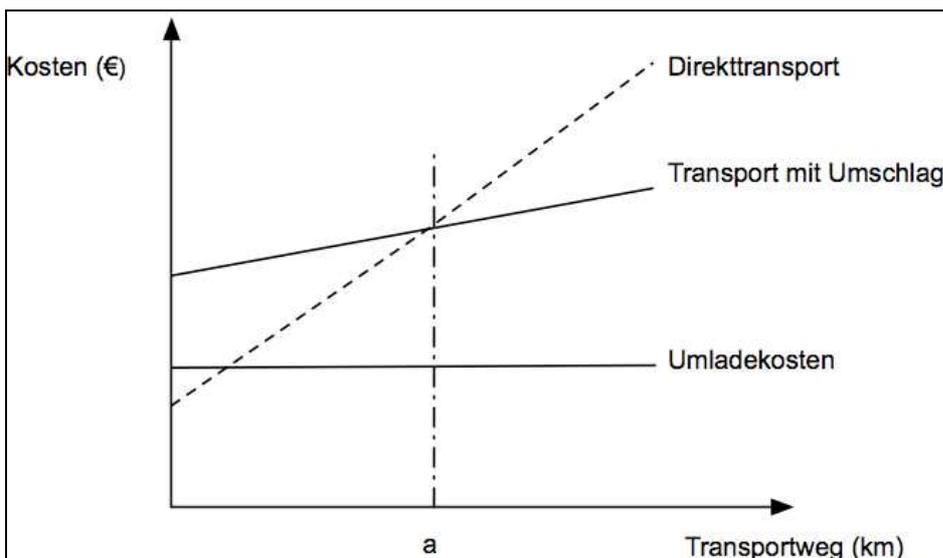


Abbildung 3.18: Kostenvergleich mit und ohne Umschlagpunkte [66]

Die Lagerung ist auch von Bedeutung. Der Begriff „Lagern“ kennzeichnet das geplante Liegen von Arbeitsgegenständen im Materialfluss [67]. Lager sind demnach Räume oder Flächen zum Aufbewahren von Arbeitsgegenständen, die mengen- und/oder wertmäßig erfasst werden. Insbesondere in der Entsorgungswirtschaft übernehmen sie die Aufgaben

des Bevorratens, Pufferns und Verteilens von Abfällen (zur Entsorgung, Verwendung, Verwertung oder Beseitigung). Je nach Typ dienen sie vorrangig zur Überbrückung einer Zeitdauer oder zum Wechsel der Zusammensetzungsstruktur zwischen Zu- und Abgang. Dadurch wird eine verbesserte Auslastung der Behandlungs- und Beseitigungsanlagen möglich und eine ökonomisch sowie ökologisch günstigere Entsorgung durch die Zusammenfassung gleichartiger Abfälle erreicht [65].

Lager erfüllen eine wichtige logistische und abfalltechnische Funktion in der Entsorgungskette, da sich durch die Sortierung und Konfektionierung von Abfällen und die Zusammenstellung gleichartiger Abfälle zu größeren Transporteinheiten die Beseitigungskosten reduzieren lassen. Ein Beispiel hierfür sind Recyclinghöfe, die von Gebietskörperschaften unterhalten werden und an denen Bürger ihre Abfälle, z. T. gegen Gebühr, abgeben können. Hier erfolgt eine Zusammenführung kleinerer Abfallmengen, wie beispielsweise Sonderabfälle aus Haushalten, die anschließend in größeren Einheiten (Fässer oder ASF-Behälter) zur Verwertungs- bzw. Beseitigungsanlage transportiert werden.

Nach Domschke [68] ist der erste Arbeitsschritt der Standortoptimierung die Formulierung des Problems als ein mathematisches, das mithilfe bestehender Verfahren zu lösen ist. Dabei spielt die Modellbildung in Zusammenhang mit der Lösungsfindung eine wichtige Rolle, da nur ein genaues Modell die optimalen Standorte finden kann. Die Literatur zur Standortplanung basiert auf betriebswirtschaftlich orientierten Grundgedanken. Solche Modelle basieren auf den Entscheidungsgrundsätzen des Unternehmens und dem Ziel, die Gewinnmaximierung zu erreichen. Als Zielvariable in der Entscheidungsfunktion wird der Gewinn maximiert bzw. die anfallenden Kosten werden minimiert. Eine Alternative ist die Minimierung der Entsorgungskosten mit der Berücksichtigung der CO₂-Emissionen als eine Restriktion.

3.6.2 Tourenplanung in der Kreislaufwirtschaft

Um die Abfälle zu sammeln, wird die Tourenplanung zur Optimierung und Rationalisierung in der Entsorgungsbranche oft eingesetzt. Darüber hinaus führt die Zentralisierung von Entsorgungseinrichtungen und die zunehmende Fraktionierung getrennt zu sammelnder Materialien zu einer drastischen Zunahme der Transportbeziehungen. Dadurch verlängern sich die Anfahrwege für die Sammlung und die spezifischen Sammelzeiten verringern sich, wodurch sich ein Mehraufwand an Personal- und Fuhrparkkosten ergibt [69].

In verschiedenen Literaturen werden die anteiligen Kosten für die Logistik (Sammlung, Umschlag und Transport) auf 30 bis 80 % der Gesamtkosten der Entsorgung geschätzt [69]. Bei der Optimierung der Tourenplanung ist nicht allein die Entfernung wichtig, sondern auch der Quotient aus Fahrstrecke und Geschwindigkeit. Mit einer Tourenplanungsoptimierung oder -verbesserung kann die Gesamtstrecke zwischen 5 bis 10 % reduziert werden. [70]

Die Sammlung besteht aus Teilstrecken: Anfahrt vom Fuhrpark zum Sammelgebiet, Sammelstrecke, Weitertransport zur Behandlungsanlage, der u.U. auch über eine Umladestelle erfolgen kann, je nach Erfassungssystem einer privat zurückgelegten Strecke und der Strecke zur Entsorgung. Abbildung 3.19 stellt die möglichen Verbindungen zwischen Teilstrecken dar. Sowohl die Sammlung als auch der Transport kann zwischen verschiedenen Transportsystemen wie Bahn, Schiff, Lkw, Pkw und verschiedenen Transportmitteltypen, z. B. LKW mit unterschiedlicher maximaler Zuladung, geleistet werden [71].

Die Distributionslogistik beschäftigt sich mit der Verteilung der Endprodukte zu den Kunden. Demgegenüber handelt es sich bei der Redistribution um die erneuerte Verteilung von gebrauchten oder rückgeführten Gütern [71]. Die Retrodistribution beschäftigt sich mit der Umkehrung des Warenflusses im Absatzkanal [72]. Die Struktur eines Produktrückführungssystems wird im Wesentlichen wie ein Distributionssystem geplant. Wesentliche Unterschiede bestehen hinsichtlich der Strategien, mit denen die Systeme betrieben werden. Grundsätzlich wird zwischen Bring- und Holsystem unterschieden. In Bringsystemen sorgt der Abfallerzeuger selbst für den Transport der Altprodukte zum

jeweiligen Sammelort. In Holsystemen fährt ein Sammelfahrzeug in einem regelmäßigen Turnus nacheinander die Standorte der Abfallerzeuger an [71].

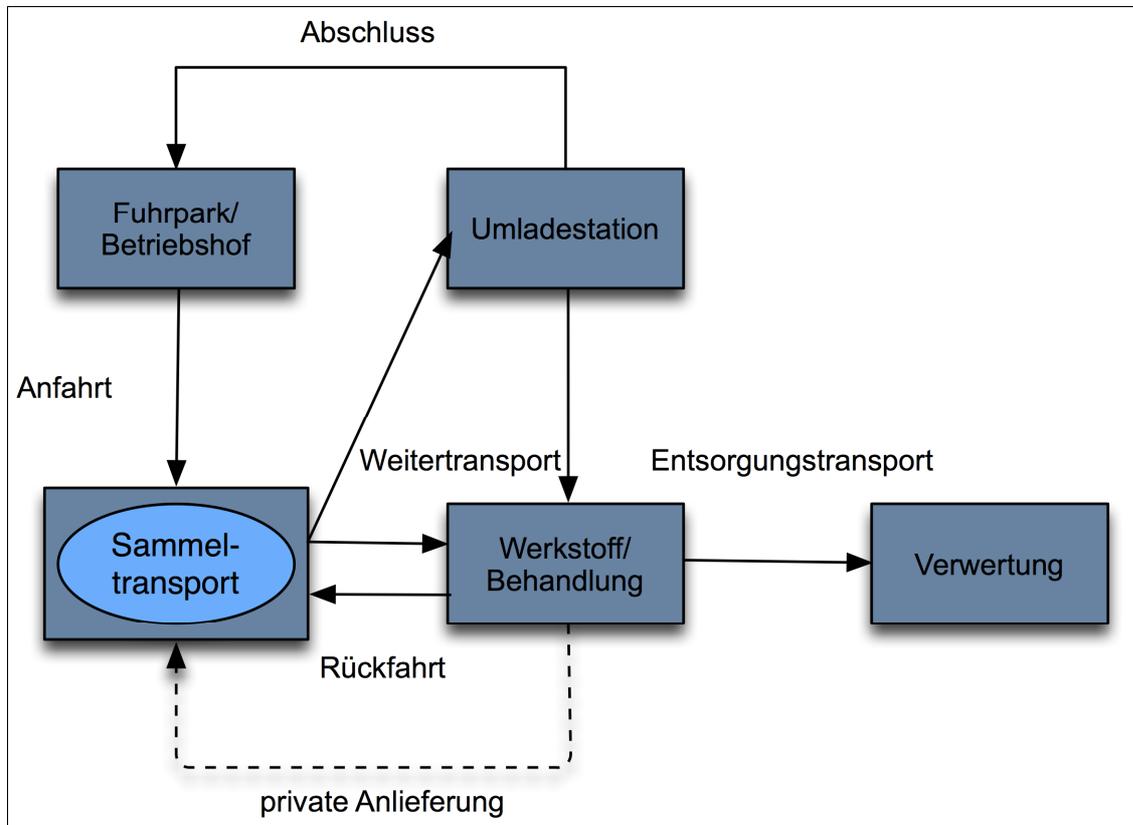


Abbildung 3.19: Transportstrecken der Abfallverwertung [70]

Die allgemeine Problemstellung für die Sammlung der biogenen Abfälle kann folgendermaßen beschrieben werden: Eine bestimmte Anzahl von Straßen, deren Koordinaten bekannt sind und deren jeweilige Bioabfallmenge bekannt oder abgeschätzt ist, soll mit Sammelfahrzeugen aufgesucht werden. Die Sammelfahrzeuge, deren Anzahl bekannt ist, haben beschränkte Ladekapazität. Die Fahrzeuge haben eine Servicekapazität, weil sie von Mitarbeitern begleitet werden, die eine begrenzte Arbeitszeit haben. Die Restriktionen ermöglichen nicht, dass alle Kunden von einem Fahrzeug bedient werden. Außerdem gibt es auch Einschränkungen, wo das Material entleert wird. In der betrieblichen Praxis wird versucht, solche Probleme kostengünstig zu lösen [69].

Die Tourenplanungsprobleme lassen sich in kanten- und knotenorientierte Probleme unterteilen. Die kantenorientierten Rundreisen werden durch ein Netzwerk beschrieben, wie z. B. das Chinese Postman-Problem (CPP), engl. für Briefträgereitour. Für die Hausmüllentsorgung in dicht besiedelten Gebieten ist also ein kantenorientierter Ansatz zu wählen. Kantenorientierte Tourenplanungsprobleme zielen auf das Finden einer kürzesten Tour durch eine Kantenuntermenge eines Graphen mit oder ohne Restriktionen. Die Aufgabenerfüllung stellt den Briefträger somit vor zwei Teilprobleme:

- Zum einen muss er eine geschlossene Tour, d. h. die Tour beginnt und endet an einem Punkt (dem Postamt), abarbeiten.
- Zum anderen ist er daran interessiert, die Tour so kurz wie möglich bzw. so effektiv wie möglich zu gestalten.

„Der Briefträger interessiert sich für einen geschlossenen, jede zu bedienende Straße enthaltenden Weg, in dem die Länge der unproduktiven Strecken so gering wie möglich ist.“ [73] Eine analoge Aufgaben- bzw. Problemstellung ergibt sich für die Planung und Durchführung der Müllabfuhr. Das Briefträgerproblem kann sowohl mittels klassischer

Konstruktionsverfahren aus dem Bereich der Graphentheorie als auch mithilfe intelligenter Strategien bzw. heuristischer Algorithmen gelöst werden.

Das knotenorientierte Tourenplanungsproblem wird in der Literatur „das Problem des Handlungsreisenden“ genannt (Travelling Salesman Problem [TSP]). Es wird davon ausgegangen, dass ein Handlungsreisender an einem bestimmten Ausgangspunkt anfängt, nacheinander eine fest vorgegebene Zahl von Kunden zu besuchen und am Schluss seiner Reise wieder an seinen Ausgangspunkt zurückkehrt. Die Touren (bzw. Routen) sind so zu planen, dass bei vollständiger Bedienung der Kunden die insgesamt zurückgelegte Entfernung minimiert wird.

Das knotenorientierte Tourenplanungsproblem hat viele Ähnlichkeiten mit dem kantenorientierten Planungsproblem. Ein wesentlicher Unterschied besteht in der Art der zu bedienenden Elemente. Beim knotenorientierten Tourenplanungsproblem befinden sich die Kunden an den Knoten des zugrunde liegenden Graphen. In der bei der Hausmüllentsorgung vorliegenden Situation befinden sich die zu entsorgenden Abfälle entlang der Straßenabschnitte, also den Kanten des Graphen. Prinzipiell ließen sich auch die einzelnen Adressen als Knoten und die Strecke zwischen zwei Haushalten als Kante modellieren.

Die allgemeine Problemstellung lässt sich wie folgt definieren:

Eine gegebene Anzahl von Kunden, deren Abfallmengen und Standorte bekannt sind, muss von einem Betriebshof angefahren werden. Zu diesem Zweck müssen folgende Annahmen getroffen werden:

- Die Anzahl von Sammelfahrzeugen mit beschränkter Kapazität steht bereit.
- Die Fahrzeuge werden von Mitarbeitern gesteuert, die eine begrenzte Arbeitszeit haben, das so genannte Time Window.

3.6.3 Transportprobleme

Transport wird als die Raumüberbrückung oder Ortsveränderung von Transportgütern mithilfe von Transportmitteln bezeichnet. Jedes Transportsystem besteht hiernach aus Transportgütern, Transportmitteln und Transportprozessen. Die Verknüpfung von mehreren Prozessen wird Transportkette genannt. Im Prinzip sind die möglichen Transportketten [68]:

- Eingliedrige Transportkette,
- Ungebrochener Verkehr (Direkttransport),
- Mehrgliedrige Transportkette,
- Kombiniertes Verkehr i.w.S. (im Wechsel von Transportmitteln),
- Kombiniertes Verkehr (Behälterverkehr).

Die eingliedrige Transportkette ist im Bereich der Entsorgungslogistik häufiger verbreitet. Besonders für zugeschnittene Fahrzeuge erfolgt heute der Transport zu den Bioabfallbehandlungsanlagen oder der Deponie. Die kritische Entfernung für einen Direkttransport liegt zwischen 20 und 40 km. Für größere Entfernungen eignet sich der Einsatz von Umladestationen, also Strecken zwischen 70 und 100 km. Der Vorteil liegt dabei in dem günstigsten Einsatz von Sammelfahrzeugen und Ladepersonal.

Darüber hinaus ist bei der Direktentleerung durch die Sammelfahrzeuge auf einer Deponie zu ergänzen, dass die Fahrzeuge, bevor sie die Entleerstelle erreichen, den Deponiekörper befahren müssen. Dieses bewirkt erhöhte Abnutzungen und Beschädigungen an den nicht für die Fahrt auf den unbefestigten Deponiestraßen konzipierten Fahrzeugen. Abhängig von der Umschlagtechnik kommen auch mehrgliedrige Transportketten mit gebrochenem oder kombiniertem Verkehr zum Einsatz. Durch die Umstellung auf die Kreislaufwirtschaft kann

mit einem Zuwachs der gebrochenen Transportkette gerechnet werden. Dabei könnte es auch zu einer Zunahme des Transportes mit der Bahn kommen.

Beim Schienentransport besteht der Vorteil in der geringen Umweltbelastung und vor allem in der Möglichkeit des Transports großer Lasten, was allerdings die Verdichtung der Abfälle erfordert. Als Folge der Verringerung des Verkehrsaufkommens wird neben der finanziellen Auswirkung die Senkung der Umweltbelastung bewilligt. Deshalb muss in der Zukunft über gebrochene Transportketten nachgedacht werden. Eine Bruchstelle sollte sowohl nach der Sammlung zum Langstreckentransport als auch vor einer Deponie zur Befahrung der Deponie eingerichtet werden. Insbesondere im Bereich der Citylogistik kann auch eine zentrale Umladestation für Bioabfälle installiert werden.

4 Datenbasis und Diskussion

Nordrhein-Westfalen ist mit 34.080 km² Landfläche und ca. 18 Mio. Einwohnern ein Ballungsgebiet und unterteilt sich in 23 Städte und 31 Kreise. Laut LANUV NRW beträgt das biogene Abfallpotenzial ca. 2.372.000 Mg/a, das Speise- und Lebensmittelabfallpotenzial 600.000 Mg/a und das Abfallpotenzial aus der Fleischindustrie 72.000 Mio. Mg/a. Das entspricht mehr als 20 % der biogenen Abfälle der Bundesrepublik [74] [75].

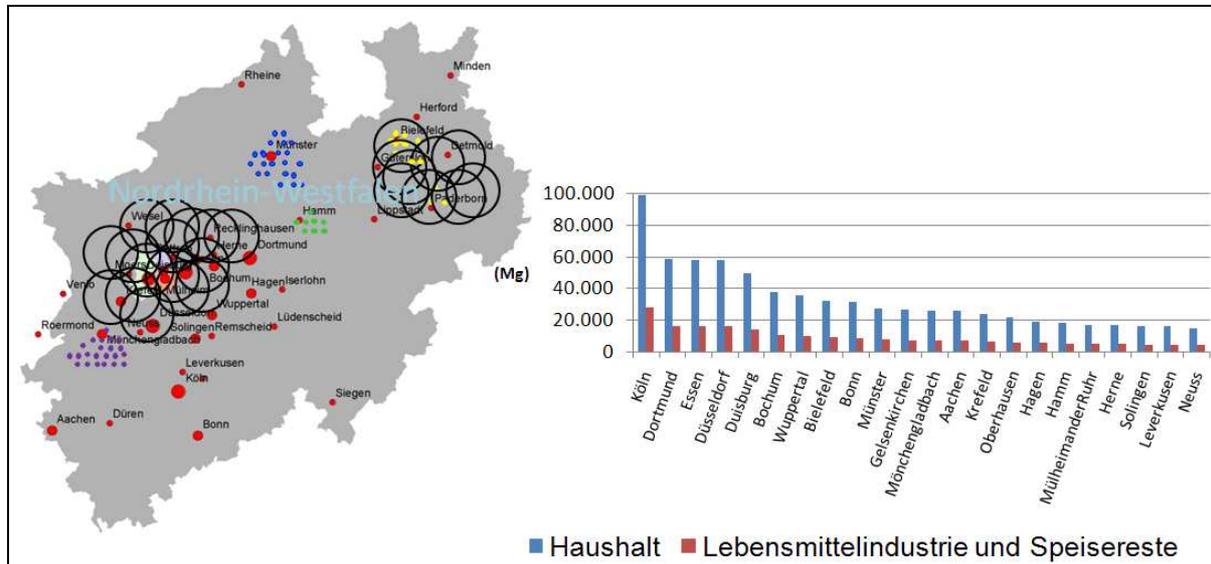


Abbildung 4.1: Karte des Untersuchungsgebiets

4.1 Datenvorbereitung

Zur Erhöhung der Aussagekraft einer Studie soll das Simulationsmodell praktische Relevanz haben. Für diese praktische Relevanz ist die Verfügbarkeit, Aktualität und Genauigkeit der Inputdaten Voraussetzung. Durch die Anwendung der digitalen Informationssysteme kann diese Voraussetzung erfüllt und die Gewinnung, Verwaltung und Aktualisierung der Daten ermöglicht werden. Zur Beschaffung, Visualisierung und Verwaltung der Geodaten können die Geografischen Informationssysteme (GIS) angewandt werden.

GIS dient dazu, Daten mit Raumbezug zu erfassen, zu verwalten und zu analysieren. Die Daten sind der Hauptbestandteil eines geografischen Informationssystems (GIS). Sie können aus einem Punkt, einer Linie oder auch einem Polygon bestehen. Neben der Verwaltungsfunktion können mit dem GIS auch digitale Karten erstellt werden. Diese Funktion ermöglicht einen besseren Blick für den bestehenden Raum.

Die Daten, die mit geometrischen Objekten anfallen, können in vier Klassen eingeteilt werden:

- Topografische Daten;
- Daten, die aus der Topografie abgeleitet werden;
- Topologie, die aus der Topografie abgeleitet wird;
- Informationen, die mit den topografischen Objekten verbunden sind.

Die topografischen Daten (z. B. Lage eines Punktes oder Verlauf einer Linie) werden durch den Anwender eingegeben und mithilfe der Software kann die Länge einer Linie oder die Fläche eines Polygons abgeleitet werden. GIS ermöglicht auch die Ableitung der Nachbarschaftsbeziehungen (Topologie) aus der Topografie und speichert die Informationen von Objekten wie Straßennamen oder Farben.

Um die biogenen Abfallaufkommen zu berechnen, werden in der Literatur zwei verschiedene Methoden angewendet: die behälterbezogene und die einwohnerbezogene Berechnung. Da die getrennte Sammlung nur teilweise durchgeführt wird und keine GIS-Daten zu Verfügung gestellt wurden, wurde die Untersuchung in Bezug auf die Einwohneranzahl und Befragungen durchgeführt.

Um die Sammelkosten bzw. die gesamte gefahrene Strecke zu berechnen, werden Kreuzungen (Straßenabschnitt) als ein Knoten (Mitte des Straßenabschnittes) dargestellt und die Koordinaten werden mithilfe der GIS-Software ermittelt. Jedes Haus wird einem Straßenabschnitt zugeordnet, der mit einem bestimmten Namen bezeichnet wird. Die Database von Häusern enthalten auch die Namen des Straßenabschnittes, um eine doppelte Zuordnung zu vermeiden.

Als Untersuchungsgebiet wurden drei Städte ausgewählt; Duisburg, Mülheim und Oberhausen [siehe Abbildung 4.2]. Die drei Städte haben 6 Kläranlagen und 5 Recyclinghöfe (Umschlagpunkte). Insgesamt enthalten die Untersuchungsgebiete 4560 Quellen. Die Sammelfläche liegt bei 401,15 km² und hat bis zu 882.698 Einwohner [50].

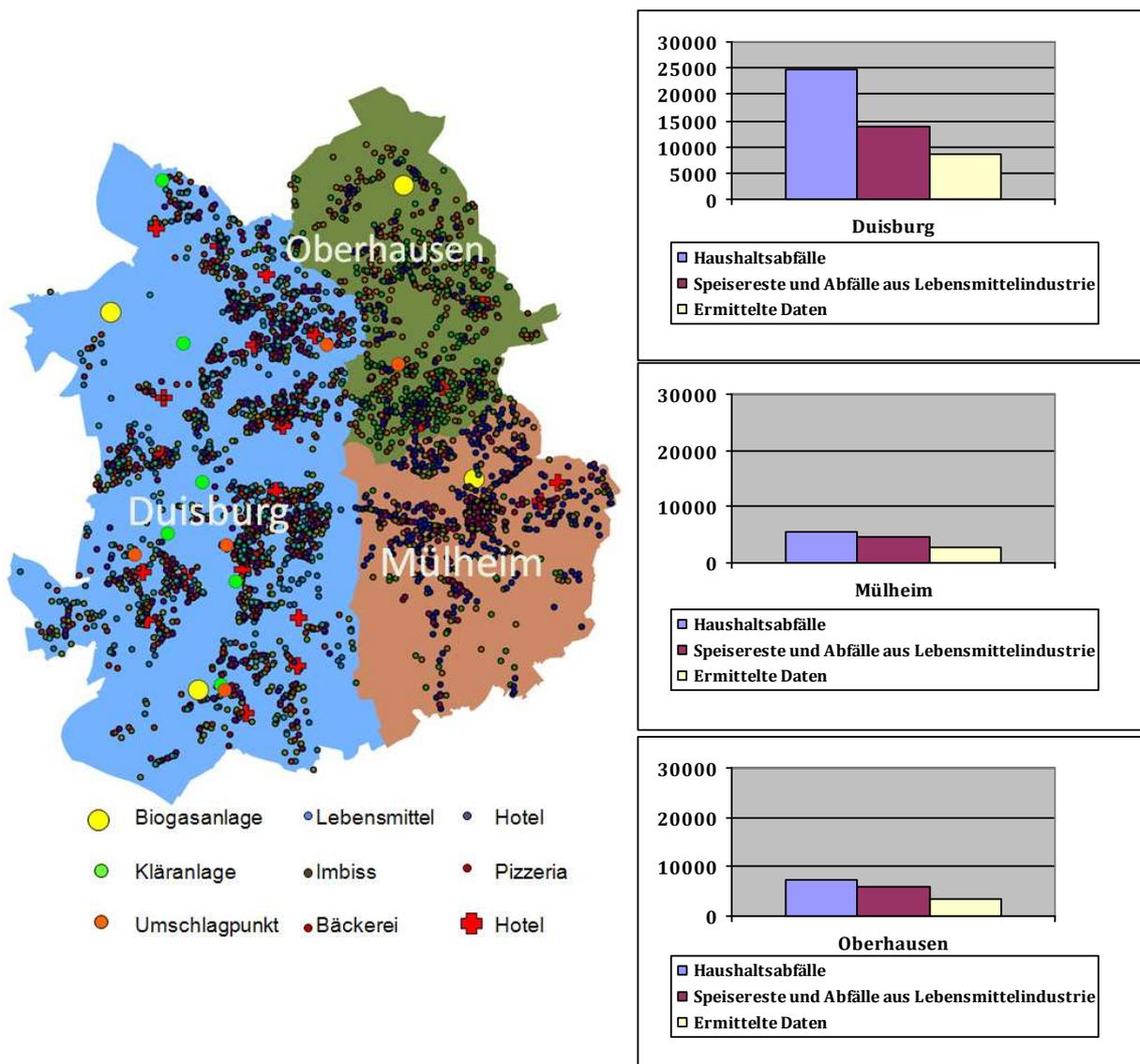


Abbildung 4.2: Karte des Untersuchungsgebiets

4.2 Bioabfall aus dem Haushalt

Im Jahr 2006 wurden in Duisburg 36.598,44 Mg kompostierbare Abfälle gesammelt, wovon rund ein Drittel Grünabfälle sind, die an den Recyclinghöfen angenommen werden. Dies entspricht etwa 11.025 Mg Grünabfälle im Jahr 2006. Diese Abfallfraktion wird jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet. Der geringe Anteil von 447,94 Mg wird über die Biotonne im Probebezirk eingesammelt. Der Rest stammt mit gut zwei Dritteln der Gesamtmenge aus der Park- und Friedhofspflege sowie zu einem geringen Anteil aus der Weihnachtsbaumsammlung. Die Sammelmenge aus dem Haushalt beträgt in Duisburg 50 kg/E*a, in Oberhausen 33,45 kg/E*a und in Mülheim 32,26 kg/E*a.

4.3 Speiseabfälle und Abfallaufkommen aus der Lebensmittel-Industrie

Im Bereich der Speiseabfälle und der Lebensmittelindustrieabfälle werden die Mengen von Krankenhäusern, Hotellerie, Bäckereien, Imbissen, Obst- und Gemüsehändlern und sonstigen Lebensmittelproduzenten erfasst. Darunter fallen beispielsweise Backreste aus der Herstellung von Teigwaren oder Biertreiber aus der Bierherstellung. Da keine genauen Daten über Mengen verfügbar sind, werden in dieser Arbeit die Angaben von Befragungen übernommen. Bei den Krankenhäusern lag die durchschnittliche Menge pro Krankenhaus bei etwa 300 kg alle zwei Wochen. Die 22 Krankenhäuser in den Städten produzieren bis zu 171,6 Mg im Jahr. Zusätzlich gibt es 36 Hotels, die insgesamt 187,2 Mg im Jahr produzieren. Das entspricht 200 kg pro Hotel alle zwei Wochen. Bei jeder Bäckerei fällt eine Menge von 80 kg alle zwei Wochen an. Die insgesamt 431 Bäckereien produzieren 896,48 Mg im Jahr. Bei den einzelnen Imbissen fällt eine Menge von 160 kg alle zwei Wochen an. Die 1001 Imbisse produzieren jährlich ungefähr 4.164,16 Mg. Bei der Schank- und Speisewirtschaft fällt eine Menge von 180 kg alle zwei Wochen an. Die jährlich produzierte Menge von 1119 Gaststätten liegt bei 5.236,92 Mg. Bei den einzelnen Lebensmittelgeschäften fällt eine Menge von 80 kg alle zwei Wochen an. Die 1496 Lebensmittelgeschäfte produzieren jährlich ungefähr 3.111,68 Mg. Beim Obst- und Gemüsehandel fällt ebenfalls eine Menge von 80 kg alle zwei Wochen an. Die jährlich produzierte Menge von 455 Händlern liegt bei 946,4 Mg. Dadurch beläuft sich die Abfallmenge aus den Speiseresten und der Lebensmittelindustrie auf ca. 14.714,44 Mg/a. Die Anzahl unterschiedlicher Abfallquellen wird in Tabelle 4.1 ausführlich dargestellt. Es konnten mithilfe von Schätzungen ungefähre Werte bestimmt werden, die in dieser Arbeit vergleichend betrachtet werden. So wird angenommen, dass 28 kg/E*a an Speiseresten und Lebensmittelabfällen anfallen [76]. Dadurch beläuft sich die Abfallmenge in diesem Bereich auf ca. 24.715,54 Mg/a.

Tabelle 4.1: Anzahl der Abfallquellen in drei Städten

Abfallquelle	Duisburg	Mülheim	Oberhausen	Summe
Krankenhaus	16	2	4	22
Hotel	22	7	7	36
Bäckerei	243	104	84	431
Imbiss	510	215	276	1001
Schank und Speise	699	179	241	1119
Lebensmittel	912	282	302	1496
Gemüse	261	92	102	455

4.4 Schlämme aus der Abwasserbehandlung

Als Schlämme der Abwasserbehandlung werden Klärschlämme zusammengefasst, die in den Duisburger Klärwerken anfallen. In Duisburg existieren sechs Kläranlagen, welche für die Abwasserbehandlung der Stadt verantwortlich sind. Über die Informationsplattform Abfall in NRW (AIDA) lassen sich die genauen Standorte und erzeugten Mengen an

Klärschlämmen ablesen [77]. Da es in Mülheim und Oberhausen keine Klärwerke gibt, wurde in dieser Arbeit das Klärschlammabfallaufkommen über die Einwohneranzahl ermittelt. Das sogenannte Rechen- und Sandfanggut wurde nicht in die Analyse einbezogen. Sandfanggut findet nach einem maschinellen Waschvorgang Verwendung im Baugewerbe, beispielsweise im Straßenbau. Rechengut wird ebenfalls maschinell gewaschen und anschließend kompostiert, deponiert oder verbrannt [78]. Insgesamt ergibt sich für NRW ein Aufkommen an Schlämmen aus der Abwasserreinigung von 300.000 Mg/a TS. Das entspricht ca. 16,6 kg/a Klärschlamm pro Einwohner.

4.5 Datenvorbereitung mit GIS-Software

Die Daten, die für die Implementierung benötigt werden, werden mithilfe der ArcGIS-Software vorbereitet. ArcGIS ist eine Software, die dazu dient, Daten mit Raumbezug zu erfassen, zu verwalten und zu analysieren. Die Daten sind der Hauptbestandteil eines geografischen Informationssystems (GIS). GIS speichert sowohl die Geometriedaten zur Orientierung im Raum als auch dazugehörige Sachdaten. Sachdaten enthalten Informationen über das dargestellte Objekt. Die Geometriedaten symbolisieren räumliche Elemente und geben diesen durch eine Verknüpfung mit den Sachdaten thematische Inhalte. Sie geben Auskunft über die Lage der Elemente im Raum, aber auch über die Lage der Elemente zueinander.

4.5.1 Georeferenzierung von der Mitte des Straßenabschnittes

Zur Berechnung der gesamten gefahrenen Strecke wird jeder Straßenabschnitt als eine Kante dargestellt und die Rohstoffquellen (Häuser, Hotels, Imbiss) werden diesen Kanten zugeordnet (georeferenziert) (siehe Abbildung 4.3).

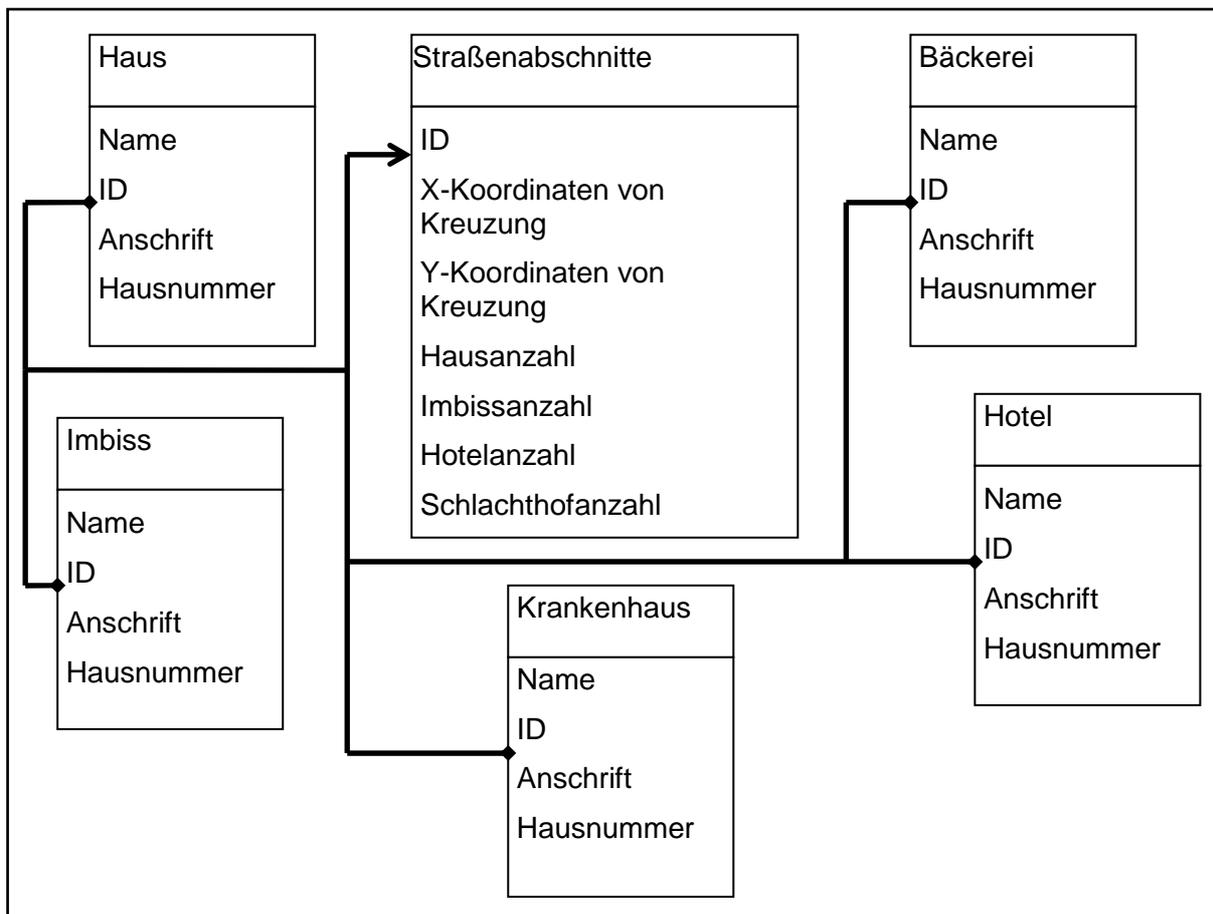


Abbildung 4.3: Georeferenzierung der Kanten

Eine visuelle Darstellung der Straßenkreuzung (Knoten) und des Straßenabschnitts (Kante) befindet sich in Abbildung 4.5.

4.5.2 Daten-Erfassungskonzept

In Verbindung mit den Geometriedaten werden die Sachdaten als unterschiedliche Themen in einem GIS dargestellt. Hier ist vor allem das sogenannte Layerkonzept eines der verbreiteten Darstellungskonzepte. Beim Layerkonzept wird ein und derselbe räumliche Ausschnitt pro Thema der Sachdaten in einem Layer dargestellt. Man kann sich Layer wie Folien vorstellen, die entweder einzeln oder auch übereinander aufgelegt werden können. In Abbildung 4.4 wird die Struktur des Layerkonzepts dargestellt. Die zur Implementierung benötigten Daten sind bei der Stadt Duisburg teilweise vorhanden. Die Stadt Duisburg hat ein Knoten-Kanten-Modell, in dem die Häuser, Straßenabschnitte, Straßenkreuzungen und Ortsteile jeweils als Layer gezeichnet wurden. Jeder Layer hat eine eigene Attributliste, in der die Sachdaten gespeichert werden können. Die Stadt Duisburg hat für die Untersuchung einen Probebezirk zur Verfügung gestellt, aus dem folgende Daten ermittelt werden konnten [10]:

- Anzahl Häuser für jeden Straßenabschnitt (Kante),
- Koordinaten der Straßenkreuzungen (Knoten),
- Stadtteilgrenzen,
- Durchschnittliche Abfallmenge für jeden Straßenabschnitt (60 kg pro Haus).

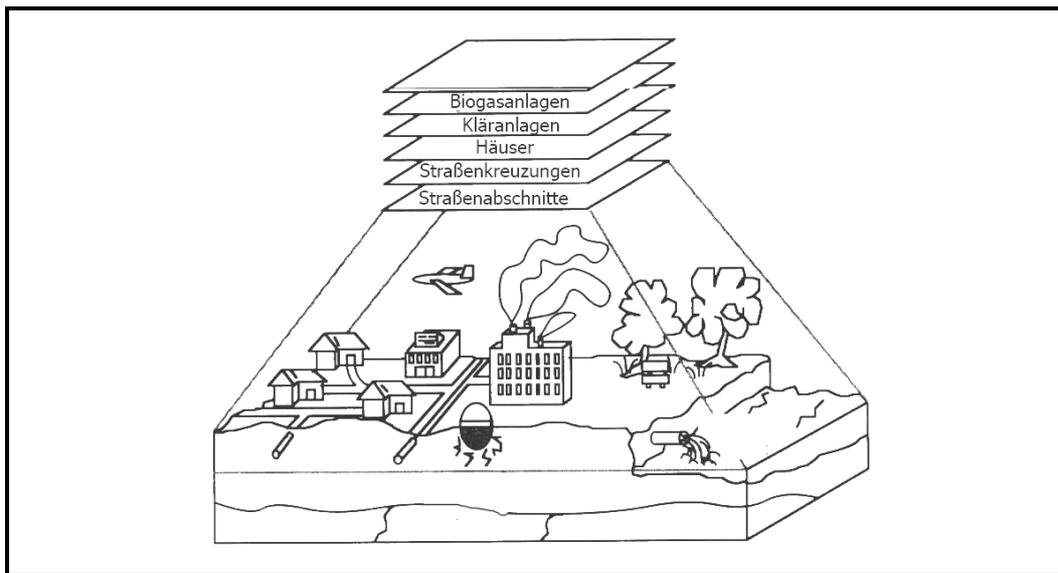


Abbildung 4.4: Layer eines Informationssystems



Abbildung 4.5: Darstellung von Straßenabschnitt und Kreuzung

4.5.3 Abfallaufkommen aus den Haushalten

Die Anzahl der Einwohner für jeden Ortsteil und die vom GIS abgeleitete Hausanzahl wird in Abbildung 4.6 dargestellt.

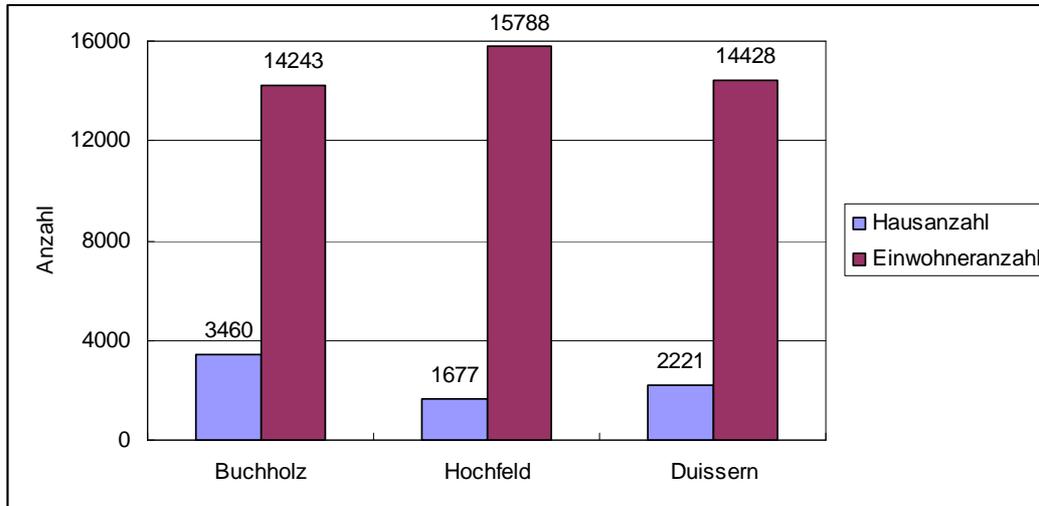


Abbildung 4.6: Anzahl der Einwohner und Häuser

Um das theoretische Bioabfallpotenzial für die Haushalte aus drei Ortsteilen abzuschätzen, werden jährliche Aufkommen je Einwohner von 50 kg angenommen [79]. Die Menge pro Haus alle zwei Wochen lässt sich wie folgt berechnen:

$$\text{Bioabfall je Haus in 14 Tagen} = \frac{\text{Abfallmenge pro Einwohner} \times \text{Einwohneranzahl}}{\text{Sammelintervall pro Jahr} \times \text{Anzahl der Häuser}} \quad (4-1)$$

Es wird angenommen, dass der Bioabfall aus Haushalten alle zwei Wochen gesammelt wird. Dadurch beträgt das Sammelintervall pro Jahr 26. Die biogenen Abfallmengen je Haus von jedem Ortsteil werden in Abbildung 4.7 dargestellt. Nach den Berechnungen ist festzustellen, dass die Menge je nach Ortsteil abweicht. Die Ursache dafür ist, dass es in Hochfeld mehr Hochhäuser und Mehrfamilienhäuser gibt. Dagegen gibt es in Buchholz mehr Einfamilienhäuser und weniger Einwohner pro Haus, dadurch sinkt das Abfallaufkommen je Haus. Die Einwohneranzahl in Duissern ist ähnlich wie in Buchholz, jedoch ist die Anzahl der Häuser in Duissern größer. Dadurch ist das Abfallaufkommen je Haus in Duissern höher. Insgesamt handelt es sich um eine Abfallmenge von insgesamt 22.230 Mg Abfall pro Jahr für die drei Ortsteile.

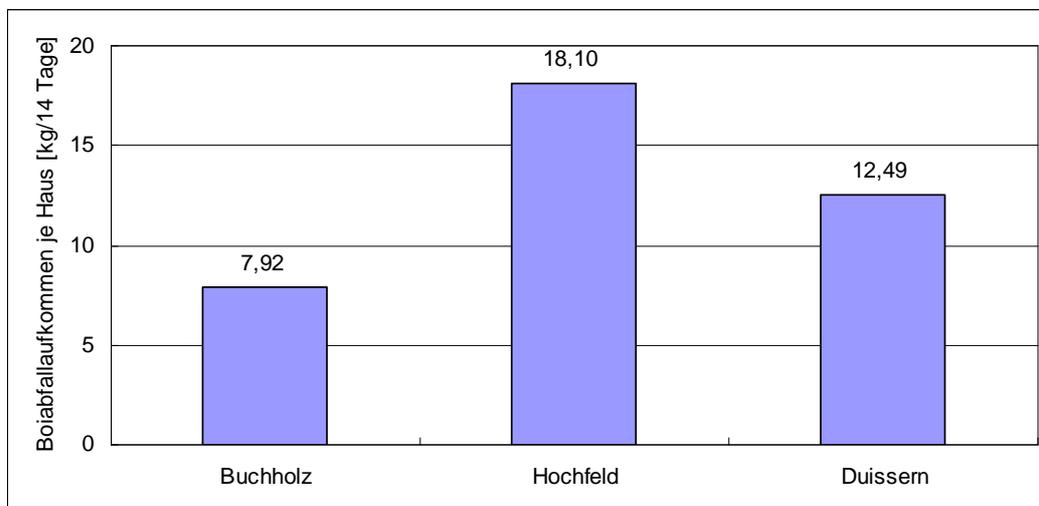


Abbildung 4.7: Bioabfallaufkommen der Haushalte je Haus alle zwei Wochen

4.5.4 Abfallaufkommen aus dem Gewerbe

Die Stadt Duisburg hat keine Informationen über das Abfallaufkommen im Bereich der Gastgewerbe, deswegen wird es von der Einwohnerzahl abgeleitet. Es konnten mithilfe von Schätzungen ungefähre Werte bestimmt werden, die in dieser Arbeit vergleichend betrachtet werden. So wird angenommen, dass 25 kg/E*a an Speiseresten im Stadtgebiet Duisburg anfallen [6]. Dadurch beläuft sich die Abfallmenge aus dem Gastgewerbe auf ca. 1111,48 Mg/a. Das Abfallaufkommen pro Gewerbe wird wie folgt berechnet:

$$\text{Abfallaufkommen pro Gewerbe} = \frac{\text{Abfallmenge pro Einwohner} \times \text{Einwohneranzahl}}{\text{Sammelintervall pro Jahr} \times \text{Anzahl der Gewerbe}}$$

Die Abfallsammlung der Gastgewerbe wird zusammen mit den Haushalten durchgeführt, daher folgte die Georeferenzierung nur auf einem Knoten für jeden Straßenabschnitt.

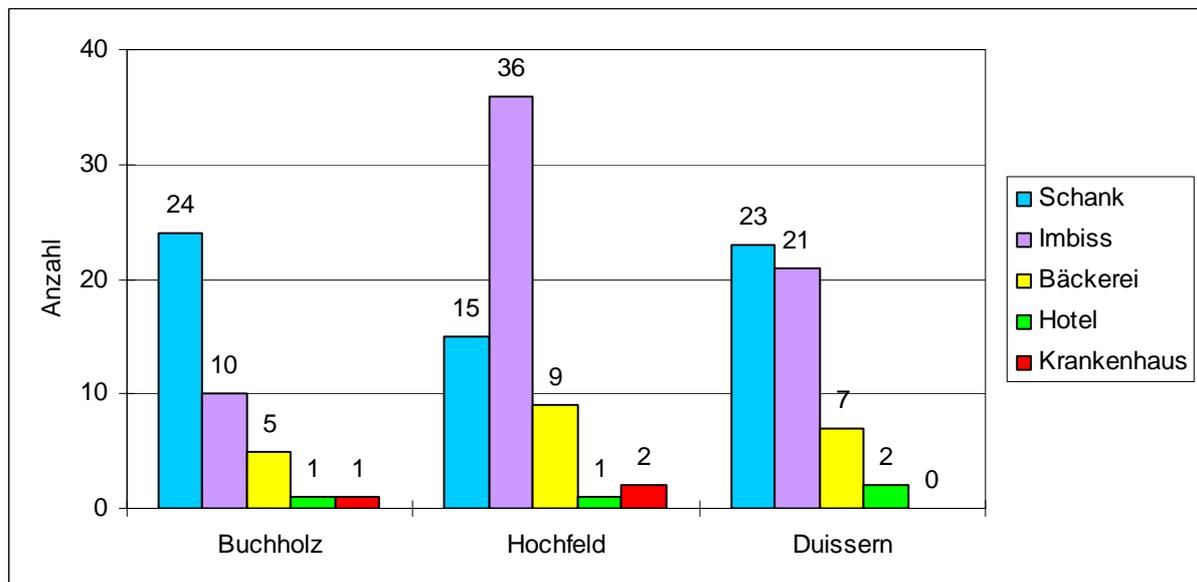


Abbildung 4.8: Anzahl von Schank, Imbiss, Bäckerei, Hotels und Krankenhaus

Da keine genaueren Informationen über das Gastgewerbe vorhanden sind, weichen die Werte des Abfallaufkommens pro Gastgewerbe ab (s. Abbildung 4.9).

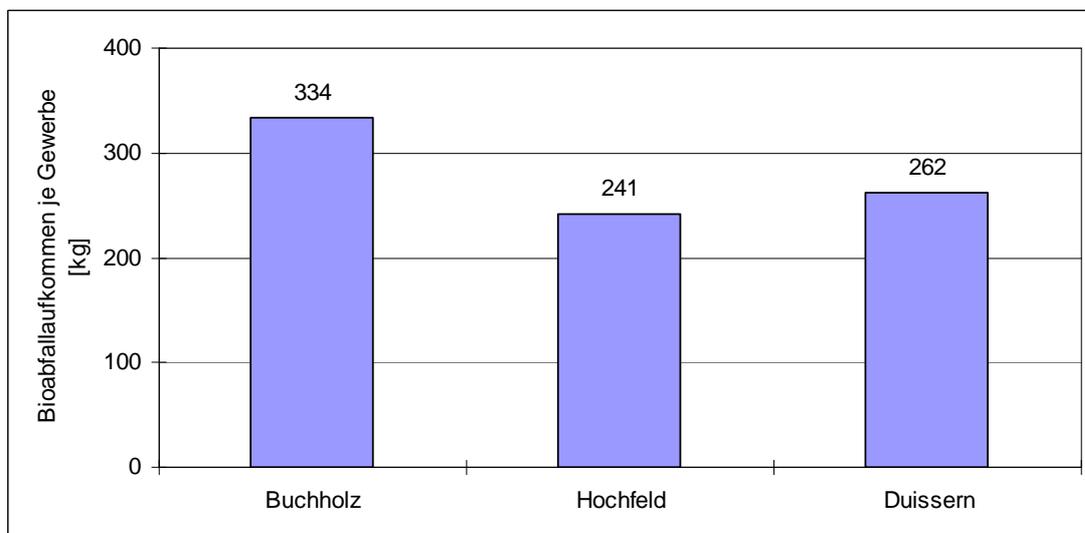


Abbildung 4.9: Biogenes Abfallaufkommen je Gastgewerbe alle zwei Wochen

4.5.5 Abfallaufkommen aus der Lebensmittelindustrie

Zu den biogenen Abfällen aus der Lebensmittelindustrie, beispielsweise Obst- und Gemüsehändler und sonstige Lebensmittelproduzenten, gehören alle organischen Reste aus der Produktion und Herstellung von Lebensmitteln. Da keine genauen Daten der Mengen verfügbar sind, werden die Angaben von Befragungen übernommen. Bei den einzelnen Lebensmittelgeschäften fällt eine Menge von 80 kg alle zwei Wochen an. Im Obst- und Gemüsehandel fällt ebenfalls eine Menge von 80 kg alle zwei Wochen an. In der Literatur wurden pro Einwohner 20 kg pro Jahr berechnet [6]. Es konnten mithilfe von Schätzungen ungefähre Werte bestimmt werden, die in dieser Arbeit vergleichend betrachtet werden. Das Abfallaufkommen von drei Ortsteilen kann ebenfalls über einen Pro-Kopf-Verbrauch bestimmt werden. Das einwohnerbezogene Abfallaufkommen wird wie folgt berechnet:

$$\text{Abfallaufkommen pro Gewerbe} = \frac{\text{Abfallmenge pro Einwohner} \times \text{Einwohneranzahl}}{\text{Sammelanzahl pro Jahr} \times \text{Anzahl der Gewerbe}} \quad (4-2)$$

Abbildung 4.10 zeigt die Anzahl der Lebensmittelindustrien und Abbildung 4.11 das 14-tägliche Abfallaufkommen in Buchholz, Hochfeld und Duissem.

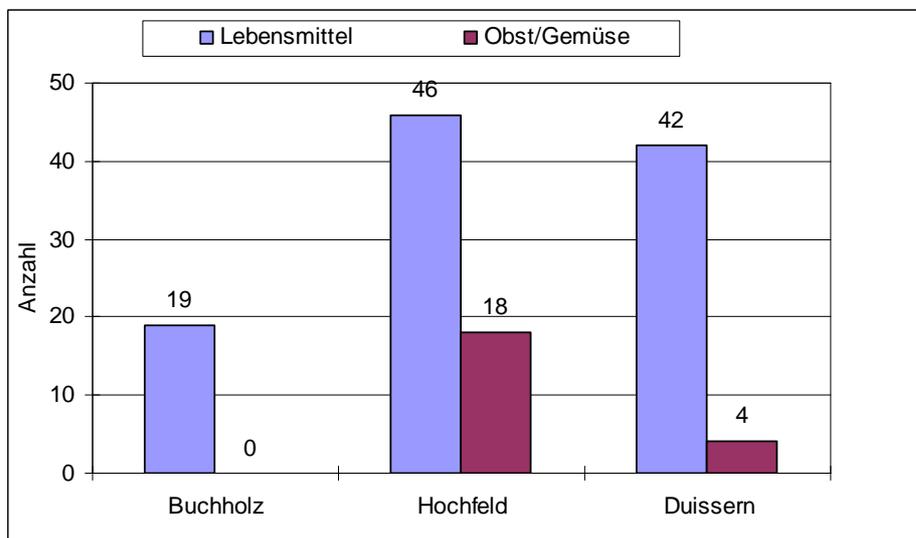


Abbildung 4.10: Anzahl der Lebensmittelindustrien in drei Ortsteilen

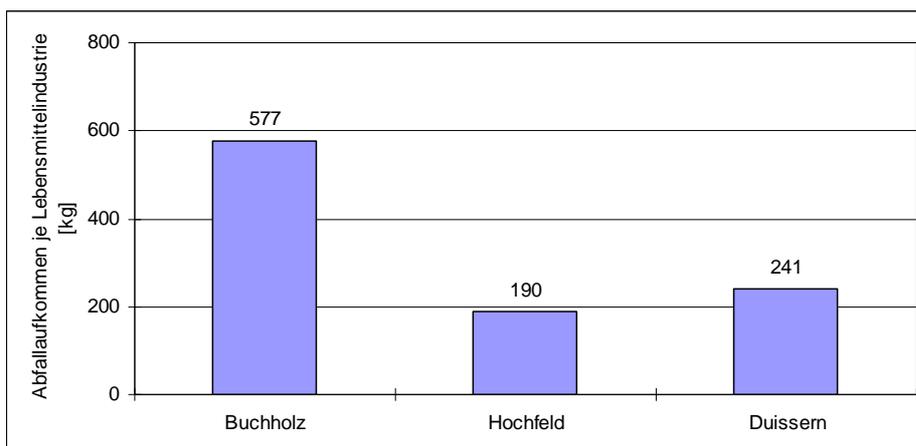


Abbildung 4.11: Biogenes Abfallaufkommen je Lebensmittelindustrie alle zwei Wochen

4.5.6 Klärschlammaufkommen

Das Klärschlammaufkommen in den drei Ortsteilen wird vom Klärschlammaufkommen pro Kopf abgeleitet. Die Gesamtmenge an Klärschlämmen aus der Abwasserreinigung der Stadt Duisburg beträgt 16.644,06 (t/a), d. h. 33 kg/a im Jahr. Das Klärschlammaufkommen je Ortsteil wird in Abbildung 4.12 dargestellt.

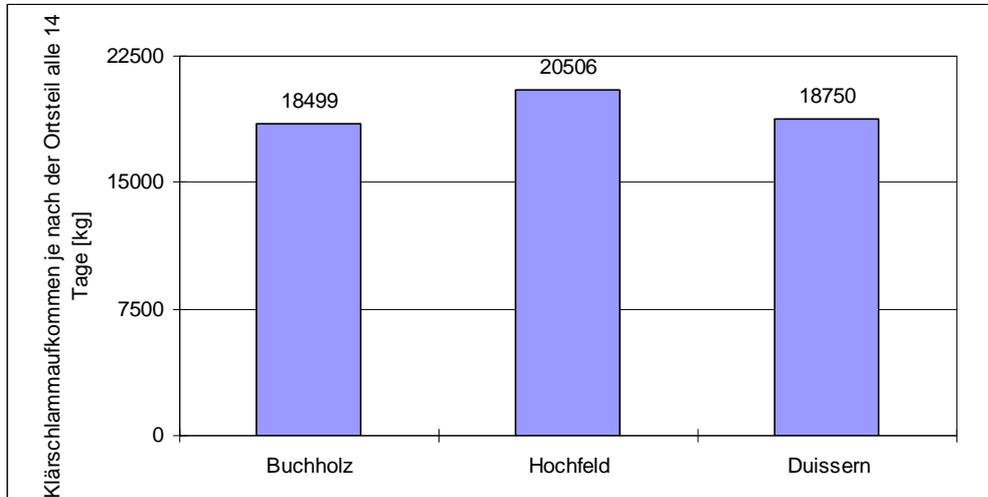


Abbildung 4.12: Klärschlammaufkommen je Ortsteil alle 14 Tage

4.6 GIS-unterstützte Tourenplanung

Für die Untersuchung der Biogas Supply Chain werden drei Ortsteile aus Duisburg ausgewählt (siehe Abbildung 4.13). Damit werden 44.459 Einwohner (9 % der Gesamteinwohnerzahl Duisburgs), 12,4 km² Fläche (5 % der gesamten Fläche), 7.375 Häuser, 68 Imbisse, 4 Hotels, 3 Krankenhäuser und 14 Fleischereien berücksichtigt.

Mithilfe der GIS-Software werden die Koordinaten der Knoten (Mitte des Straßenabschnittes) ermittelt und jedes Haus, Hotel, Krankenhaus und jede Fleischerei zu Knoten zugeordnet. Eine ausführliche Darstellung vom Ortsteil Hochfeld befindet sich in Abbildung 4.13 (siehe Anhang Einwohner und Stadtpläne für die Ortsteile in Duisburg).

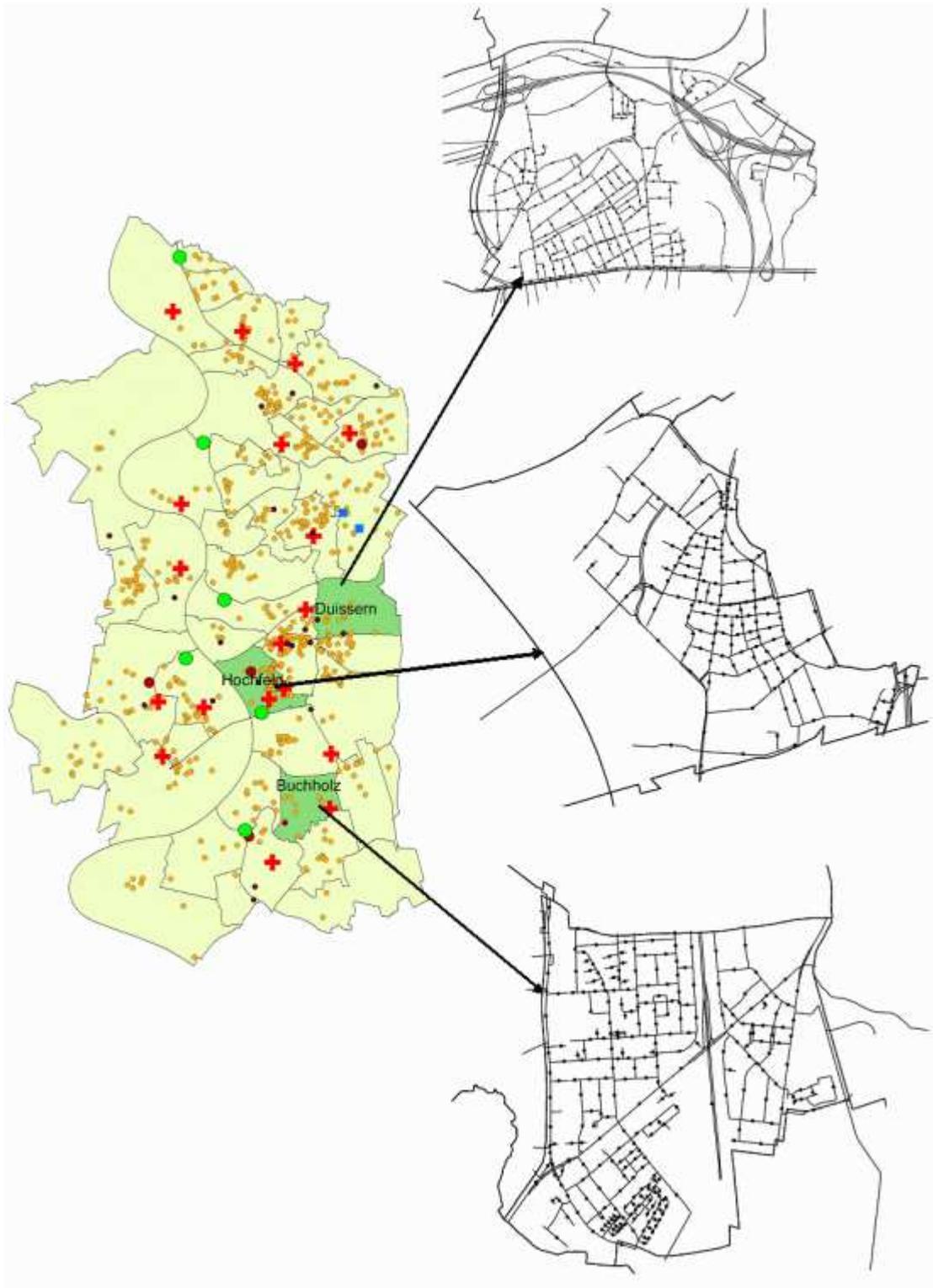


Abbildung 4.13: Untersuchungsgebiet

5 Vorgeschlagenes mathematische Modell für die Biogas Supply Chain

Zur Berechnung der gesamten Prozessketten und der Prozessketten-Szenarien wird ein allgemeines mathematisches Modell vorgeschlagen. Das mathematische Modell beinhaltet alle Sammel- und Transportrouten für den Transport über Umladestationen und Direkttransporte. Die Zielfunktion soll für das Nettoeinkommen aus der Abfallentsorgung und -verwertung maximiert werden. Dafür wurden einige Annahmen getroffen:

- Das Lagern der Biomasse in den Umladestationen ist zeitlich begrenzt. Das Material in den Umladestationen sollte nicht länger als zwei Tage gelagert werden, da bei längerer Lagerung Negativeffekte auftreten könnten (z. B. unangenehmer Geruch).
- Die Kapazitäten der Umladestationen sind in jedem Punkt gleich.
- Die Produktionsanlage hat keine maximal begrenzte Kapazität.
- Jeder Kunde wird nur von einem Fahrzeug bedient.

Die Entwicklung des mathematischen Modells basiert auf einer Ausarbeitung von Liu, Lin [80] und Liu, Lee [81] in der sie ein Location Allocation-Problem (LAP) und ein Vehicle Routing-Problem (VRP) unter Berücksichtigung einiger Bedingungen lösen. Auch, wenn sie in ihrem Artikel eine andere Zielrichtung verfolgen, erscheint der Ansatz auch interessant für die Lösung des hier beschriebenen „Capacitive Multi-Depot Location Routing Problem“ (CMDLRP). Im Jahr 2008 sind zwei Artikel [82] [83] über die Biogas Supply Chain veröffentlicht worden.

5.1 Zielfunktion

Die Zielfunktion für die Prozessketten allgemein lautet:

$$\text{Max}Z = E_{\text{Biogas}} + E_{\text{Ents.}} - C_{\text{vorb.}} - C_{\text{umlade.}} - C_{\text{biogas}} - C_{\text{S.T}} \quad (5-1)$$

mit

Z	Zielfunktionswert (Nettoeinkommen) (€)
E_{Biogas}	Ertrag aus dem Verkauf des Biogases (€)
$E_{\text{Ents.}}$	Ertrag aus den Entsorgungskosten der Haushalte/Gewerbe (€)
$C_{\text{S.T}}$	Sammel- und Transportkosten (€)
$C_{\text{vorb.}}$	Vorbehandlungskosten (€)
$C_{\text{umlade.}}$	Kosten für die Umladestationen (€)
C_{biogas}	Prozesskosten in Biogasanlagen (€)

○ Ertrag aus der Entsorgung von biogenem Abfall

Für die biogenen Abfälle der Haushalte wird ein Entgelt erhoben, welches wie folgt berechnet wird:

$$E_{\text{Ents.}} = E_e * \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{g=1}^G D_{\text{gij}} X_{\text{gij}} + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F D_{\text{fik}} X_{\text{fik}} \right) \quad (5-2)$$

mit

E_{Ents}	gesamter Ertrag aus der Entsorgung von biogenem Abfall
E_e	Kosten für die Entsorgung pro Tonne Abfall (€/Mg)
k	Anzahl der Produktionsanlagen
K	Gesamtanzahl von Biogasanlagen/Produktionsanlagen
i	Anzahl der Quellen
I	Gesamtanzahl von Quellen
j	Anzahl der Umladestationen
J	Gesamtanzahl von Umladestationen
g	Anzahl der Touren von Quelle i zur Umladestation j
G	Gesamtanzahl der Touren von Quelle i zur Umladestation j
f	Anzahl der Touren von Quelle i zur Biogasanlage k
F	Gesamtanzahl der Touren von Quelle i zur Biogasanlage k
D_{gij}	Menge an Abfall von Quelle i zur Umladestation j über Tour g
D_{fik}	Menge an Abfall von Quelle i zur Biogasanlage k über Tour f
x_{gij}	1, wenn der Abfall von Quelle i zur Umladestation j über Tour g transportiert wird, sonst 0
x_{fik}	1, wenn der Abfall von Quelle i zur Biogasanlage k über Tour f transportiert wird, sonst 0

o Ertrag aus den Biogasanlagen

Das produzierte Biogas kann entweder nach einer Veredelung in das bestehende Gasnetz eingespeist oder durch Kraft-Wärme-Kopplung in Elektrizität und Wärme umgewandelt werden, um dann in das bestehende Strom-, bzw. Wärmenetz eingespeist zu werden. Der Ertrag kann wie folgt berechnet werden:

$$E_{\text{Biogas.}} = E_g \cdot \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^I \sum_{f=1}^F D_{fik} x_{fik} + \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H D_{hjk} x_{hjk} \right) \quad (5-3)$$

mit

E_{Biogas}	gesamter Ertrag aus dem Verkauf des Biogases (€)
E_g	Ertrag pro Tonne biogenen Abfalls (€/Mg)
h	Anzahl der Touren von Umladestation j zur Biogasanlage k
H	Gesamtanzahl der Touren von Umladestation j zur Biogasanlage k
D_{fik}	Menge an Abfall von der Quelle i zur Produktionsanlage k über Tour f
D_{hjk}	Menge an Abfall von der Umladestation j zur Produktionsanlage k über Tour h
x_{hjk}	1, wenn der Abfall von Umladestation j zur Biogasanlage k über Tour h transportiert wird, sonst 0

o Sammel- und Transportkosten

Bei Betrachtung der Modelle gibt es 3 Hauptabfallströme ($n=3$):

- o Der Abfallstrom von den Abfall produzierenden Quellen zu den Produktionsanlagen.
- o Der Abfallstrom von den Abfall produzierenden Quellen zu den Umladestationen.
- o Der Abfallstrom von den Umladestationen zu den Produktionsanlagen.

Die Sammel- und Transportkosten von jedem Hauptabfallstrom können nach den folgenden Gleichungen definiert werden:

$$C_{S,T} = C_{ik} + C_{ij} + C_{jk} + C_{\text{Fahrzeug}}^{\text{fix}} \quad (5-4)$$

$$C_{\text{Fahrzeug}}^{\text{fix}} = \frac{\sum_{z=1}^Z C_z^a}{P_a} \quad (5-5)$$

mit

$C_{S,T}$	Sammel- und Transportkosten
C_{ik}	gesamte Kosten für Sammlung und Transport von Quelle i zu Produktionsanlage k über Tour f (€)
C_{ij}	gesamte Kosten für Sammlung und Transport von Quelle i zu Umladestation j über Tour g (€)
C_{jk}	gesamte Kosten für Transport von Umladestation j zu Produktionsanlage k (€)
$C_{\text{Fahrzeug}}^{\text{fix}}$	Fixkosten der Fahrzeuge pro Sammeltour
z	Anzahl der Fahrzeuge
Z	gesamte Anzahl der Fahrzeuge
C_z^a	jährliche Fixkosten der Fahrzeuge z
P_a	Anzahl des Sammeltour pro Jahr

Demnach ist die Gleichung für den Abfallstrom von den Abfall produzierenden Quellen zu den Produktionsanlagen:

$$C_{ik} = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F (cm \cdot Dis_{fik}) \cdot x_{fik} \quad (5-6)$$

$$\text{Tourenanzahl: } F = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K D_{ik}}{V_{\text{kap}(ik)}} \cdot x_{ik} \quad (5-7)$$

mit

cm	Reisekosten pro Entfernungseinheit
Dis_{fik}	Entfernung über Tour f von Quelle i zu Produktionsanlage k (km)
x_{fik}	1, wenn die Nachfrage von Quelle i der Produktionsanlage k über Tour f zugeordnet wird, sonst 0
D_{ik}	Abfallmenge von Quelle i zur Biogasanlage k
x_{ik}	1, wenn die Nachfrage von Quelle i der Produktionsanlage k zugeordnet wird, sonst 0
$V_{\text{kap}(ik)}$	Kapazität des Fahrzeugs von Quelle i zu Produktionsanlage k (Mg)
0	Fuhrpark
$c_{F(0,i)}$	gesamte Beförderungskosten zwischen dem Fuhrpark und der ersten Quelle i über Tour f
I	Gesamtanzahl von Quellen
K	Gesamtanzahl von Biogasanlagen/Produktionsanlagen
F	Gesamtanzahl der Touren von Quelle i zur Biogasanlage k

Die Gleichung für den Abfallstrom von den Abfall produzierenden Quellen zu den Umladestationen lautet:

$$C_{ij} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{g=1}^G (cm \cdot Dis_{gij}) \cdot x_{gij} \quad (5-8)$$

$$G = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J D_{ij}}{V_{kap(ij)}} \cdot x_{ij} \quad (5-9)$$

mit

cm	Reisekosten pro Entfernungseinheit
Dis_{gij}	Entfernung über Tour g von Quelle i zu Umladestation j (km)
x_{gij}	1, wenn die Nachfrage von Quelle i der Produktionsanlage k über Tour g zugeordnet wird, sonst 0
D_{ij}	Nachfrage von Quelle i zu Umladestation j (Mg)
x_{ij}	1, wenn die Nachfrage von Quelle i der Produktionsanlage k zugeordnet wird, sonst 0
$V_{kap(ij)}$	Kapazität des Fahrzeugs von Quelle i zu Umladestation j (Mg)
I	Gesamtanzahl von Quellen
J	Gesamtanzahl von Umladestationen
G	Gesamtanzahl der Touren von Quelle i zur Umladestation j

Die Gleichung für den Abfallstrom von den Umladestationen zu den Produktionsanlagen lautet:

$$C_{jk} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H (cm * Dis_{hjk}) \cdot x_{hjk} \quad (5-10)$$

$$H = \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K D_{jk}}{V_{kap(jk)}} \cdot x_{jk} \quad (5-11)$$

Mit

Dis_{hjk}	Entfernung über Tour h von Umladestation j zu Produktionsanlage k (km)
x_{hjk}	1, wenn die Nachfrage von Umladestation j der Produktionsanlage k über Tour h zugeordnet wird, sonst 0
D_{jk}	Nachfrage über Route h von Umladestation j zu Produktionsanlage k (Mg)
$V_{kap(jk)}$	Kapazität des Fahrzeugs von Umladestation j zu Produktionsanlage k (Mg)
x_{jk}	1, wenn die Nachfrage von Umladestation j der Produktionsanlage k zugeordnet wird, sonst 0
J	Gesamtanzahl von Umladestationen
K	Gesamtanzahl von Biogasanlagen/Produktionsanlagen
H	Gesamtanzahl der Touren von Umladestation j zur Biogasanlage k

Die Sammel- und Transportkosten werden überwiegend durch die Faktoren „Entfernung“ und „Zeit“ beeinflusst. Die Entfernung wird hauptsächlich durch den Treibstoffverbrauch und die Arbeitszeit beeinflusst. Auf die Zeit bezogen haben die Anzahl der Besatzung eines Fahrzeuges, die Anzahl der Fahrzeuge und Routen und die Gehälter der Arbeiter einen großen Einfluss.

o **Tourzeit**

Die Tourzeit bezieht sich auf die Zeit zwischen dem Start auf dem Betriebshof bis zum Tourende auf dem Betriebshof. Durch die Analyse der Aktivitäten bei den Sammel- und Transportprozessen wird eine Tour in folgende Zeitintervalle unterteilt:

- Ladezeit: Zeit, die das Sammelfahrzeug am Ladepunkt zum Zweck des Ladens steht
- Zwischenfahrzeit: Fahrzeit zwischen den einzelnen Ladepunkten
- Umfahrzeit: Fahrzeit zwischen Betriebshof, Sammelgebiet und Entleerungsort
- Pausenzeit: Zeit für die von der Fahrzeugbesatzung durchgeführten Pausen während der Tour
- Entleerzeit: Zeit von der Ankunft am Entleerungsort bis zur Abfahrt
- Sonderzeit: Zeiten in der Tourzeit, die weder der Umfahrt-/Entleer-/Lade- und Zwischenfahrzeit zugeordnet werden können

$$t_{\text{time}} = t_{\text{Lade}} + t_{\text{Zwischenfahrt}} + t_{\text{Umfahrt}} + t_{\text{Pause}} + t_{\text{Entleer}} + t_{\text{Sonder}} \quad (5-12)$$

$$t_{\text{Lade}} = \sum_{i=1}^I (a_{y=1} + a_{y=2} + a_{y \geq 3}) \quad (5-13)$$

$$t_{\text{Zwischenfahrt}} = \frac{\text{DIS}_{\text{zs}}}{v_{\text{Zwischenfahrt}}} \quad (5-14)$$

$$t_{\text{Umfahrt}} = \frac{\text{DIS}_v - \text{DIS}_{\text{zs}}}{v_{\text{Umfahrt}}} \quad (5-15)$$

mit

t_{time}	Zeitdauer einer Tour (h/Tour)
t_{Lade}	Ladezeit der Tour v
t_{Umfahrt}	Umfahrzeit der Tour v
$t_{\text{Zwischenfahrt}}$	Zwischenfahrzeit der Tour v
t_{Pause}	Pausenzeit der Tour v
t_{Entleer}	Entleerzeit der Tour v
t_{Sonder}	Sonderzeit der Tour v
i	Anzahl der Ladepunkte (Häuser, Hotels, Imbisse usw.)
I	Gesamte Anzahl der Ladepunkte
y	Anzahl der Behältertypen MGB 60-240 pro Ladepunkt
Y	Gesamte Anzahl der Behältertypen MGB 60-240 pro Ladepunkt
$a_{y=1}$	Ladezeit für die Ladepunkte mit nur 1 Behälter
$a_{y=2}$	Ladezeit für die Ladepunkte mit 2 Behältern

$a_{y \geq 3}$	Ladezeit für die Ladepunkte mit mehr als 3 Behältern
DIS_{ZS}	Gesamte Zwischenfahrstrecke der Tour v
DIS_v	Gesamte Fahrstrecke der Tour v
$v^{Umfahrt}$	Geschwindigkeit der Umfahrt
$v^{Zwischenfahrt}$	Geschwindigkeit der Zwischenfahrt

o **Gesamtkosten der Anlagen**

- Umladestationen:

$$C_{\text{umlade.}} = C_{\text{fix}}^{\text{US}} + C_{\text{p}}^{\text{US}} \quad (5-16)$$

Einrichtungskosten:

$$C_{\text{fix}}^{\text{US}} = \frac{\sum_{j=1}^J C_{\text{US}} \cdot x_j}{T^{\text{US}}} \quad (5-17)$$

Prozesskosten:

$$C_{\text{p}}^{\text{US}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_j \cdot D_{ij} \cdot x_{ij} \quad (5-18)$$

mit

$C_{\text{umlade.}}$	Gesamtkosten aller Umladestationen (€)
$C_{\text{fix}}^{\text{US}}$	jährliche Fixkosten/Einrichtungskosten der Umladestation (€)
C_{p}^{US}	jährliche Prozesskosten der Umladestation (€)
C_{US}	gesamte Einrichtungskosten für eine Umladestation (€)
x_j	1, wenn die Umladestation eingerichtet ist, sonst 0
T^{US}	Nutzungsdauer der Umladestation
P_j	Stückprozesskosten für jede Umladestation (€/Mg)
D_{ij}	Menge an Abfall von Quelle i zu Umladestation j (Mg)

- Produktionsanlagen:

$$C_{\text{Biogas}} = C_{\text{fix}}^{\text{BA}} + C_{\text{p}}^{\text{BA}} \quad (5-19)$$

Einrichtungskosten/Fixkosten:

$$C_{\text{fix}}^{\text{BA}} = \frac{\sum_{k=1}^K C_b \cdot x_k}{T^{\text{BA}}} \quad (5-20)$$

Prozesskosten:

$$C_{\text{Biogas}} = \sum_{k=1}^K P_k \cdot \left(\sum_{i=1}^I D_{ik} x_{ik} + \sum_{j=1}^J D_{jk} x_{jk} \right) \quad (5-21)$$

mit

C_{Biogas}	Gesamtkosten aller Biogasanlagen (€)
$C_{\text{fix}}^{\text{BA}}$	jährliche Fixkosten/Einrichtungskosten einer Biogasanlage (€)
C_{p}^{BA}	jährliche Prozesskosten der Biogasanlagen (€)
T^{BA}	Nutzungsdauer einer Biogasanlage
P_{k}	Stückprozesskosten von jeder Biogasanlage (€/Mg)
D_{ik}	Menge an Abfall, die von der Quelle i zur Biogasanlage k transportiert wird (Mg)
D_{jk}	Menge an Abfall, die von der Umladestation j zur Biogasanlage h transportiert wird (Mg)

o **Vorbehandlungskosten**

$$C_{\text{vorb}} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[C_{\text{hom}1} + C_{\text{hyg}1} x_{\text{hyg}} + C_{\text{ster}1} x_{\text{ster}} + C_{\text{st}1} + C_{\text{Entw}1} x_{\text{Entw}} \left(\sum_{i=1}^I D_{\text{ij}} x_{\text{ij}} + \sum_{l=1}^I D_{\text{lk}} x_{\text{lk}} \right) \right] \quad (5-22)$$

mit

$C_{\text{vorb}1}$	Gesamte Kosten für die Vorbehandlung der biogenen Abfallstoffe in Umladestationen j und in Biogasanlagen (€)
$C_{\text{hom}1}$	Kosten für die Homogenisierung in Umladestationen j (€/Mg)
$C_{\text{hyg}1}$	Kosten für die Hygienisierung in Umladestationen j (€/Mg)
$C_{\text{ster}1}$	Kosten für die Sterilisation in Umladestationen j (€/Mg)
$C_{\text{st}1}$	Kosten für die Störstoffbeseitigung in Umladestationen j (€/Mg)
$C_{\text{Entw}1}$	Kosten für die Entwässerung in Umladestationen j (€/Mg)
x_{hyg}	1, falls die Hygienisierung erforderlich ist, sonst 0
x_{ster}	1, falls die Sterilisation erforderlich ist, sonst 0
x_{Entw}	1, falls die Entwässerung erforderlich ist, sonst 0
D_{ij}	Menge an Abfall, die von der Quelle (i) zur Umladestation (j) transportiert wird
D_{ik}	Menge an Abfall, die von der Quelle (i) zur Biogasanlagen (k) transportiert wird

Die Kosten für die einzelnen Prozesskomponenten (Sterilisierung, Hygienisierung usw.) beinhalten alle Kosten, die für den jeweiligen Prozess anfallen (Personalkosten (€/Mg), Anlagenkosten pro Stück (€/Mg), Energiekosten (€/Mg) usw.). Die Kosten der Störstoffbeseitigung beinhalten mehrere kleine Prozessschritte, welche unter dem Begriff „Störstoffbeseitigung“ zusammengefasst wurden.

5.2 Allgemeines mathematisches Modell

Diese Funktionen dienen zur Erarbeitung eines allgemeinen mathematischen Modells zur Berechnung der gesamten Kosten. Das allgemeine mathematische Modell für alle Prozessketten kann folgendermaßen aus den vorangegangenen Gleichungen aufgestellt und auf die Biogas Supply Chain angewendet werden:

$$\begin{aligned}
 \text{MaxZ} = E_e * & \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{g=1}^G D_{gij} X_{gij} + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F D_{fik} X_{fik} \right) + E_g \cdot \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^I \sum_{f=1}^F D_{fik} X_{fik} + \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H D_{hjk} X_{hjk} \right) \quad (5-23) \\
 & - \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F (cm \cdot \text{Dis}_{fik}) \cdot X_{fik} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{g=1}^G (cm \cdot \text{Dis}_{gij}) \cdot X_{gij} - \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H (cm * \text{Dis}_{hjk}) \cdot X_{hjk} - \\
 & \frac{\sum_{z=1}^Z C_z^a}{P_a} - \frac{\sum_{j=1}^J C_{US} \cdot X_j}{T_{US}} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_j \cdot D_{ij} \cdot X_{ij} - \frac{\sum_{k=1}^K C_b \cdot X_k}{T_{BA}} - \sum_{k=1}^K P_k \cdot \left(\sum_{i=1}^I D_{ik} X_{ik} + \sum_{j=1}^J D_{jk} X_{jk} \right) \\
 & \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[\left(C_{\text{nom}1} + C_{\text{hyg}1} X_{\text{hyg}} + C_{\text{ster}1} X_{\text{ster}} + C_{\text{st}1} + C_{\text{Entw}1} X_{\text{Entw}} \right) \left(\sum_{i=1}^I D_{ij} X_{ij} + \sum_{l=1}^I D_{ik} X_{ik} \right) \right]
 \end{aligned}$$

Unter folgenden Nebenbedingungen:

$$\begin{aligned}
 D_{g(ij)} &\leq V_{\text{kap}(ij)} && g = 1, \dots, G; i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J \\
 D_{h(jk)} &\leq V_{\text{kap}(jk)} && h = 1, \dots, H; j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K \\
 D_{f(ik)} &\leq V_{\text{kap}(ik)} && f = 1, \dots, F; i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K \\
 D_{ij} \cdot X_{ij} &\leq TS_{\text{kap}} && g = 1, \dots, G; i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J \\
 &&& \text{wo:} \\
 &&& TS_{\text{kap}} \text{ Kapazität der Umladestation } j \\
 D_{ij} \cdot X_{ij} &\leq F_{ts} \cdot TS_{\text{kap}} && g = 1, \dots, G; i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J \\
 &&& \text{wo:} \\
 &&& TS_{\text{kap}} \text{ Kapazität der Umladestation } j \\
 &&& F_{ts} \text{ Minimaler Anteil an der Kapazität, um eine} \\
 &&& \text{Umladestation zu errichten} \\
 \\
 \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J X_{g(ij)} &= 1 && i = 1, \dots, I \\
 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J X_{g(ij)} &= 1 && g = 1, \dots, G \\
 \sum_{g=1}^G X_{hgk} - \sum_{g=1}^G X_{ghk} &= 0 && k = 1, \dots, K, h = 1, \dots, H \\
 X_{g(ij)} &= \{0, 1\} && g = 1, \dots, G; i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J \\
 X_j &= \{0, 1\} && j = 1, \dots, J \\
 X_{hjk} &= \{0, 1\} && h = 1, \dots, H; j = 1, \dots, J, k = 1, \dots, K \\
 X_{fik} &= \{0, 1\} && f = 1, \dots, F; i = 1, \dots, I, k = 1, \dots, K \\
 X_i &= \{0, 1\} && i = 1, \dots, I
 \end{aligned}$$

Die Nebenbedingungen (1), (2) und (3) begrenzen die Kapazität des Fahrzeugs in den drei Hauptfallströmen, d. h. direkter Transport zwischen Kunden und Biogasanlagen, Transport zwischen Kunden und Umladestationen, anschließend Transport zwischen Umladestationen und Biogasanlagen. Die Nebenbedingung (4) sorgt dafür, dass die Kapazität der Umladestation nicht überschritten wird. Nebenbedingung (5) sorgt dafür, dass die minimale Kapazität in der Umladestation ständig berücksichtigt wird. Um die Annahmen des Modells zu erfüllen, wird mit der Nebenbedingung (6) jeder Kunde nur einer Route zugeordnet. Nebenbedingung (7) versichert, dass eine Route nur von einem Depot versorgt wird, dann garantiert (8), dass der Ankunftspunkt des Fahrzeugs zugleich auch der Abfahrtpunkt sein

soll. Nebenbedingungen (9) bis (13) sichern, dass die Entscheidungsvariablen entweder den Wert 1 oder 0 annehmen.

5.3 Exakte Lösungsmethode und Ansätze

Exakte Verfahren werden als Verfahren charakterisiert, die stets optimale Lösungen für Optimierungsprobleme liefern, einige davon sind:

- **P-Median**

Bei der Standortplanung bezüglich des Einrichtens von Umladestationen kann das Entscheidungsproblem als ein Graph modelliert werden, die Knoten des Graphen stellen die Kunden und potenziellen Standorte dar. Mit diesem Graphenmodell können eine Reihe von Problemen der Standortplanung formuliert werden, unter anderen die sogenannten „Warehouse-Location-Problems“. Zunächst wird der Median als optimaler Knoten hinsichtlich der Transportkosten dargestellt. Der Median eines Graphen - nach dem lateinischen Wort „medianus“, welches als „in der Mitte liegend“ übersetzt werden kann - ist derjenige Knoten des Netzwerks, für den die Gesamtkosten minimiert werden. Zeitgleich wird die Nachfrage der Kunden zufriedengestellt [84]. Die Transporte werden meist als Summe der mit der Kundennachfrage gewichteten kürzesten Entfernung zwischen den Knoten bestimmt. Die Ermittlung des Medians eines Graphen ist also ein Mini-Sum-Location-Problem, bei dem die Nachfrageknoten und die potenziellen Standorte und Entfernungen zwischen Nachfrageknoten und Standorten gegeben sind. Das Ziel ist, die Summe der minimalen Abstände zwischen Nachfrageknoten und allen Standorten unter vollständiger Deckung des Bedarfs zu finden. Es handelt sich um die Minimierung der durchschnittlichen gewichteten Entfernungen zum Ziel und damit um die Minimierung der Transportkosten. Die wesentliche Aufgabe des P-Medians ist, die Standorte für eine vorgegebene Anzahl von p logistischen Knoten in einem Logistiknetzwerk zu finden, sodass die Summe der gewichteten Entfernungen zwischen Kunden und den jeweils ausgewählten Standorte minimal wird.

Solche Probleme werden als NP-schwer bezeichnet und sind schwierig zu lösen. In der Regel wird das Medianproblem in ein binäres lineares Optimierungsproblem transformiert und entsprechend mit geeigneter Software gelöst, wie z. B. mit CPLEX oder MOPS.

Das Optimierungsproblem verwendet zwei Typen von Variablen: Die binäre Zuordnungsvariable x_{ij} und die binäre Schaltvariable y_i mit der folgenden Bedeutung:

$$x_{ij} \begin{cases} 1 & \text{Kunden } j \text{ wird dem Standort } i \text{ zugeordnet,} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$y_i \begin{cases} 1 & \text{Knoten } i \text{ wird als Standort ausgewählt,} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Mit den Variablen wird die Optimierungsaufgabe formuliert [85]

$$\text{Min } z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_j \cdot d_{ij} \cdot x_{ij} \tag{5-24}$$

unter folgenden Bedingungen:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, \quad j=1,2,\dots,n \tag{1}$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq M \cdot y_i, \quad i=1,2,\dots,m \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = p \quad (3)$$

$$x_{ij}, y_i \in \{0,1\}, \quad \forall i, j \quad (4)$$

Die gesuchte Anzahl von Medianen darf die Anzahl der potenziellen Standorte nicht überschreiten. Aus diesem Grund muss $p \leq m$ betragen. Die erste Bedingung (1) fordert, dass ein Kunde j genau einem Standort i zugeordnet werden darf. Mit der Nebenbedingung (2) wird sichergestellt, dass eine Zuordnung der Kunden nur zu einem tatsächlich geöffneten Standort bzw. einer Umladestation durchgeführt wird. Die große Zahl „M“ muss folgende Bedingung stets erfüllen: $M \geq n - p + 1$. Anschließend sichert die Nebenbedingung (3), dass die Anzahl der ausgewählten Standorte genau die Zahl p ist, und die Nebenbedingung (4) besagt, dass es sich um eine binäre Variable handelt.

○ **Branch-and-Bound-Verfahren von Little et al.:**

Das Branch-and-bound-Verfahren wird zur Lösung von Traveling Salesman-Problemen eingesetzt. Die Grundidee des Verfahrens lautet wie folgt: Das Verfahren besteht aus zwei Schritten: Branch (deutsch: Verzweigung) und Bound (deutsch: Schranke). Die „Verzweigung“ hat die Aufgabe, das Problem in zwei oder mehr Teilprobleme aufzuteilen, dadurch wird das ursprüngliche Problem vereinfacht dargestellt. Durch rekursives Ausführen des Branching-Schritts für die erhaltenen Teilprobleme entsteht eine Baumstruktur. Es gibt verschiedene Auswahlverfahren für die Wahl des nächsten zu bearbeitenden Knotens im Branching-Baum, die unterschiedliche Zielsetzungen haben.

Die „Bound“ hat die Aufgabe, bestimmte Zweige des Baumes "abzuschneiden", das bedeutet, dass sie in den nächsten Berechnungen nicht mehr zu betrachten sind, dadurch wird der Rechenaufwand begrenzt. Dies erreicht der Algorithmus durch Berechnung und Vergleich zweier Schranken. Obere Schranken ergeben sich aus jeder zulässigen Lösung. Dafür kann gegebenenfalls zuvor eine Heuristik benutzt werden [86].

Vorgehensweise [87]:

Das Problem wird in kleine Probleme zerlegt. Für jede Kante in einem Graphen, d. h. mögliche Wege zwischen Knoten, gilt folgendes: Sie nimmt an einer optimalen Tour teil oder nicht (systematisches „Ausprobieren“ aller Möglichkeiten):

1. Zu Beginn ist für keinen Weg zwischen den Knoten festgelegt, ob er Teil einer Tour ist oder nicht.
2. Eine Kante wird ausgewählt, für die noch nicht festgelegt wurde, ob sie Teil einer Tour ist oder nicht.
3. Streichung des betrachteten Problems und Bildung zwei neuer Teilprobleme:
 - (a) Festlegung, dass diese Kante nicht Teil der Tour sein soll.
 - (b) Festlegung, dass diese Kante Teil der Tour sein soll.
4. Ein Teilproblem wird ausgewählt und es wird mit Schritt 2 fortgesetzt.

Festlegung der Kanten:

- Soll eine Kante von h nach k nicht Teil der Tour sein, dann wird die aktuelle Kostenmatrix modifiziert, indem $c_{hk} = \infty$ gesetzt wird.

– Soll eine Kante von h nach k Teil der Tour sein, dann gibt es zwei Alternativen:

1. Setzen von $c_{hi} = \infty$ für alle j nicht gleich k und Setzen von $c_{ik} = \infty$ für alle i nicht gleich h. c_{hk} bleibt unverändert oder
2. Streichen der zum Knoten h gehörige Zeile und der zum Knoten k gehörige Spalte aus der aktuellen Kostenmatrix.

Das Ausloten der Teilprobleme:

– Vollständige Touren:

Sind in einem Teilproblem bereits $n - 2$ Kanten als Teil der Tour festgelegt, dann kann es nur noch eine einzige Möglichkeit geben, eine vollständige Tour zu konstruieren. Die Länge dieser Tour ist mit der Länge der bisher besten gefundenen Tour (zu Beginn: ∞) zu vergleichen.

Die Teilprobleme werden wie folgt ausgelotet:

– Untere Schranken:

Relaxiert man in einem Teilproblem die Kurzyklusbedingung (= Weglassen dieser Bedingung), dann verbleibt ein Zuordnungsproblem. Die optimale Lösung dieses Zuordnungsproblems liefert eine untere Schranke für das Traveling Salesman-Problem. Ist diese untere Schranke größer oder gleich der Länge der bisher besten gefundenen Tour, dann kann das betrachtete Teilproblem keine kürzere Tour ergeben. Häufig wird das Zuordnungsproblem nicht optimal gelöst, sondern es wird lediglich eine untere Schranke für das Zuordnungsproblem bestimmt:

1. Betrachtung der aktuellen Kostenmatrix und Bestimmung des Zeilenminimums u_i in jeder Zeile $i = 1, \dots, n$. Subtrahierung von u_i von jedem Element der Zeile i.
2. Betrachtung der sich ergebenden Kostenmatrix und Bestimmung des Spaltenminimums v_j in jeder Spalte $j = 1, \dots, n$. Subtraktion von v_j von jedem Element der Spalte j, dann ergibt sich die sog. reduzierte Matrix.
3. Die gesuchte untere Schranke für den optimalen Zielfunktionswert des Zuordnungsproblems ist:

$$\sum_{i=1}^n u_i + \sum_{j=1}^n v_j$$

Auswahl des zunächst zu untersuchenden Teilproblems:

– Unter den Teilproblemen, die nicht ausgelotet werden können, muss eines als das nächste zu bearbeitende Teilproblem ausgewählt werden. Dazu kann man die Minimum-Lower-Bound-Regel einsetzen, die das Teilproblem mit der kleinsten unteren Schranke auswählt, da hier die Hoffnung am größten ist, dass man eine Tour mit möglichst kurzer Länge erhält.

Fixierung der nächsten Kante:

Grundidee: Es wird diejenige Kante fixiert, die, wenn man sie nicht Teil der Tour werden lässt, zu einer maximalen Erhöhung der unteren Schranke führt. Dazu betrachtet man das aktuelle Teilproblem und dessen dazugehörige reduzierte Matrix. Ist eine Kante von i nach j nicht Teil der Tour (setzt man also $c_{ij} = \infty$), dann ergibt sich eine neue reduzierte Matrix (mit u'_i und v'_j als den entsprechenden minimalen Werten in Zeile/Spalte i/j). Die untere Schranke steigt dabei um $u'_i + v'_j$ an.

Sucht man nach einem Pfeil, der zu einer maximalen Erhöhung der unteren Schranke führt, dann genügt es, sich bei der Suche auf diejenigen Pfeile (i, j) zu beschränken, deren Wert in der reduzierten Matrix 0 ist (alle anderen Pfeile würden die untere Schranke um, 0 erhöhen).

o **Simplex Verfahren**

Die Distributionsphase kann mithilfe des Simplex-Verfahrens optimal gelöst werden, unter der Voraussetzung, dass die Angebots- und Nachfragemengen ganzzahlig sind und eine zulässige Lösung existiert. Das Simplex-Verfahren liefert stets für dieses spezielle Problem eine ganzzahlige Lösung, da jede Ecke des zugehörigen Polyeders ganzzahlig ist. Das Simplex-Verfahren dient zur Lösung linearer Programme der Form:

$$(LP)\max\{c^T x \mid Ax \leq b, x \geq 0\}$$

Andere Verfahren, die auch verwendet werden können, sind: das Netzwerk-Simplex-Verfahren, eine schnellere Variante, die speziell für Min-Cost-Flow-Probleme geeignet ist [84].

Vorgehensweise eines Simplex-Algorithmus mit impliziter Berücksichtigung oberer Schranken (kapazitiertes Transportproblem) [88]:

Voraussetzung: Simplextableau mit einer zulässigen Basislösung, bei der die aktuellen Koeffizienten a_{ij} , b_i und c_i bekannt sind und die obere Schranken k_j für einige oder alle Variablen festgelegt wurden.

Durchführung: Jede Iteration des Simplex-Algorithmus besteht aus folgenden drei Schritten:

Schritt 1 (Wahl der Pivotspalte t): Enthält die n Zeile nur nicht negative Werte, so ist die aktuelle Basislösung optimal; Abbruch des Verfahrens. Sonst Suche derjenigen Spalte t mit dem kleinsten (negativen) Wert in der F -Zeile (stehen mehrere Spalten mit kleinstem Wert zur Auswahl, unter dieser Wahl einer beliebigen). Die zugehörige Nichtbasisvariable x_t wird neu in die Basis aufgenommen. Die Spalte t nennt man Pivotspalte.

Schritt 2 (Wahl der Pivotzeile s): Die Bestimmung der ausscheidenden Basisvariablen erfolgt dadurch, dass (a) in der umrandeten Spalte alle streng positiven Koeffizienten (>0) ausgewählt werden, (b) die „rechte Seite“ der betreffenden Zeilen durch diese Koeffizienten dividiert wird und (d) die Basisvariable aus dieser Gleichung gewählt wird. (Es ist dies die Basisvariable, die erst, null wird, wenn die hereinkommende Basisvariable zunimmt.) Die Zeile wird umrandet. Sie wird Pivotzeile genannt, das Element heißt Pivotelement.

Schritt 3 (Berechnung der neuen Basislösung des neuen Simplextableaus):

a) Durch lineare Transformation des Nebenbedingungssystems wird unter der neuen Basisvariablen ein Einheitsvektor mit 1 geschaffen (Gauß-Jordan-Verfahren).

b) Durch Vertauschen der Spalten der beiden beim Basistausch beteiligten Variablen einschließlich der variablen Bezeichnung könnte ein neues Tableau in kanonischer Form ermittelt werden.

Eine Iteration des Simplex-Algorithmus mit impliziter Berücksichtigung oberer Schranken (Kapazitiertes Transportproblem)

Voraussetzung: Simplextableau mit einer zulässigen Basislösung mit den aktuellen Koeffizienten a_{ij}' , b_i' und c_i' ; obere Schranken k_j für einige oder alle Variablen.

Durchführung: Jede Iteration des Simplex-Algorithmus besteht aus folgenden Schritten.

Schritt 1 (Wahl der Pivotspalte t): Wie beim primalen Simplex-Algorithmus beschrieben. x_t sei die Variable mit dem kleinsten negativen Eintrag in der Ergebniszeile.

Schritt 2 und 3 (Wahl der Pivotzeile s und Tableautransformation): Berechne q_1 und q_2 wie folgt:

$$q_1 := \begin{cases} \infty & \text{falls kein } a_{it}' < 0 \text{ existiert} \\ \min \left\{ \frac{b_i'}{a_{it}'} \mid i = 1, \dots, m \text{ mit } a_{it}' > 0 \right\} & \text{Sonst} \end{cases} \quad (5-25)$$

Mit der Erhöhung des Wertes von x_t würde sich der Wert der in einer Zeile i mit $a_{it}' > 0$ stehenden Basisvariablen $x_{B(i)}$ verringern.

$$q_2 := \begin{cases} \infty & \text{falls kein } a_{it}' > 0 \text{ existiert} \\ \min \left\{ \frac{k_{B(i)} - x_{B(i)}}{a_{it}'} \mid i = 1, \dots, m \text{ mit } a_{it}' < 0 \right\} & \text{Sonst} \end{cases} \quad (5-26)$$

Bei Erhöhung des Wertes von x_t würde sich der Wert der in einer Zeile i mit $a_{it}' < 0$ stehenden Basisvariablen $x_{B(i)}$ erhöhen, sie darf ihre obere Schranke jedoch nicht überschreiten. Das in der Formel verwendete k_i ist die obere Schranke der in der aktuellen Lösung in der i -ten Zeile stehenden Basisvariablen x_i , das in der Formel angesetzte x_i ist (zugleich) ihr aktueller Wert.

Bestimme $q := \min \{ q_1, q_2, k_t \}$ und transformiere das Problem und/oder die Basislösung nach folgender Fallunterscheidung:

Fall 1 ($q = q_1$): Diejenige (oder eine) Basisvariable x_s , für die $\frac{b_s'}{a_{st}'} = q_1$ gilt, verlässt die Basis.

Die Transformation erfolgt wie üblich.

Fall 2 ($q = q_2$; $q < q_1$): Eine Basisvariable $x_{B(s)}$ erreicht ihre obere Schranke; für sie gilt $\frac{k_{B(s)} - x_{B(s)}}{a_{st}'} = q_2$. In diesem Fall sind zwei Schritte auszuführen:

Schritt 1: Die Variable $x_{B(s)}$ wird durch $\bar{x}_{B(s)} := k_{B(s)} - x_{B(s)} (= 0)$ ersetzt.

Schritt 2: Die Variable $\bar{x}_{B(s)}$ verlässt für x_t die Basis. Die Tableautransformation erfolgt wie üblich.

Fall 3 ($q = k_t$), $q < q_1$; $q < q_2$: Die bisherige Nichtbasisvariable x_t erreicht ihre obere Schranke und wird durch $\bar{x}_t := k_t - x_t$ ersetzt. Diese neue Variable erhält den Wert 0; sie bleibt Nichtbasisvariable. Es erfolgt kein Basistausch und damit auch keine Tableautransformation.

5.4 Auswertung der Ergebnisse der mathematischen Algorithmen

5.4.1 Benutzte Tools: Vorstellung---MATLAB

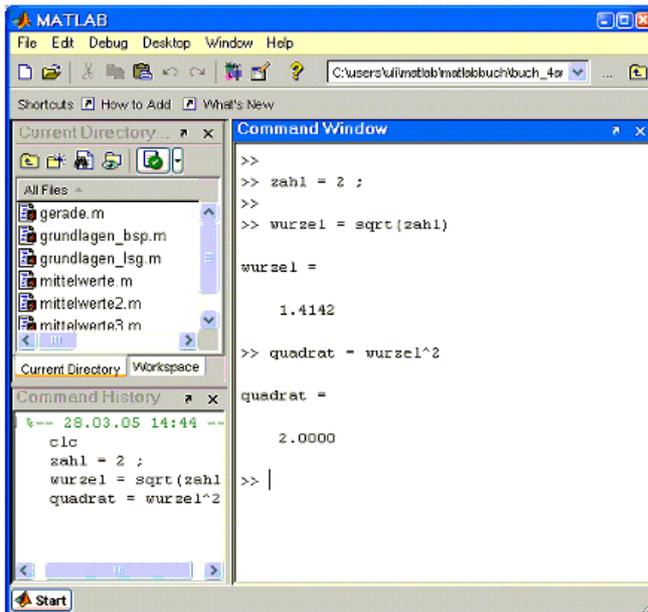
MATLAB ist, laut Entwickler, eine Hochleistungssprache für technisches Rechnen. MATLAB integriert Berechnung, Visualisierung und Programmierung in eine leicht zu bedienende Umgebung (grafische Benutzeroberflächen, GUI). Probleme und Lösungen werden in bekannter mathematischer Notation ein- und ausgegeben [89]. Typische Verwendungen von MATLAB sind:

- Technisch-wissenschaftliches Rechnen,
- Entwicklung von Algorithmen,
- Datenakquisition,
- Modellierung, Simulation und Prototyping,
- Datenanalyse und Visualisierung,
- grafische Darstellung von Daten aus Wissenschaft und Ingenieurwesen und
- Entwicklung von Anwendungen, einschließlich grafischer Benutzeroberflächen.

MATLAB ist ein interaktives System, dessen grundlegender Datentyp das Array (oder Matrix) ist, das nicht dimensioniert werden muss. Es erlaubt, viele technische Probleme (vor allem jene, die in Matrix-/ Vektornotation beschrieben sind) in einem Bruchteil der Zeit zu lösen, die benötigt würde, um ein Programm in C oder FORTRAN zu schreiben.

MATLAB steht für MATRizen-LABoratorium. MATLAB wurde ursprünglich als interaktives Programm (in FORTRAN) geschrieben, um bequemen Zugriff auf die bekannte Software für Matrixberechnungen aus den LINPACK- und EISPACK-Projekten zu haben. Heute umfasst die MATLAB-Maschine die LAPACK und BLAS-Bibliotheken, welche der „State of the Art“ der Matrixberechnungen sind.

MATLAB hat sich sehr stark entwickelt und ist nicht mehr nur auf die Basisalgorithmen der numerischen linearen Algebra beschränkt. Mit sogenannten Toolboxen kann MATLAB durch anwendungsspezifische Lösungsverfahren erweitert werden. Toolboxen sind Sammlungen von MATLAB-Funktionen (M-Files). Gebiete, für die es Toolboxen gibt, sind z. B. Signalverarbeitung, Regelungstechnik, neuronale Netzwerke, 'Fuzzy Logic', Wavelets, Simulationen und viele andere.



MATLAB ist mehr als ein Taschenrechner auf dem PC .

Im **MATLAB-Command-Window** können Befehle direkt eingegeben werden - fast wie in den Taschenrechner. In MATLAB stehen jedoch zusätzlich fertige Befehle für unzählige, auch ausgefallene, Berechnungen zur Verfügung.

Zusätzlich bietet MATLAB eine eigene **Programmiersprache**, die an gängige Standards angelehnt ist. Damit können sog. **MATLAB-Scripts** erstellt werden, die die Funktionalität von MATLAB mit eigenen Befehlen erweitern.

Abbildung 5.1: Benutzeroberfläche von MATLAB

Grafik

Die Ergebnisse lassen sich leicht abspeichern und exportieren. Ebenso können Zusammenhänge auch grafisch visualisiert und interaktiv nachbearbeitet werden (z. B. Ansicht, Beschriftung).

Zur Analyse mathematischer Funktionen stehen leistungsfähige Befehle zur Verfügung, mit deren Hilfe sich selbst die Lösungen implizit vorgegebener Funktionen grafisch darstellen lassen.

Grafiken können in vielen gängigen Dateiformaten abgespeichert und gedruckt werden, um sie z. B. in Präsentationen oder Texte einzubinden.

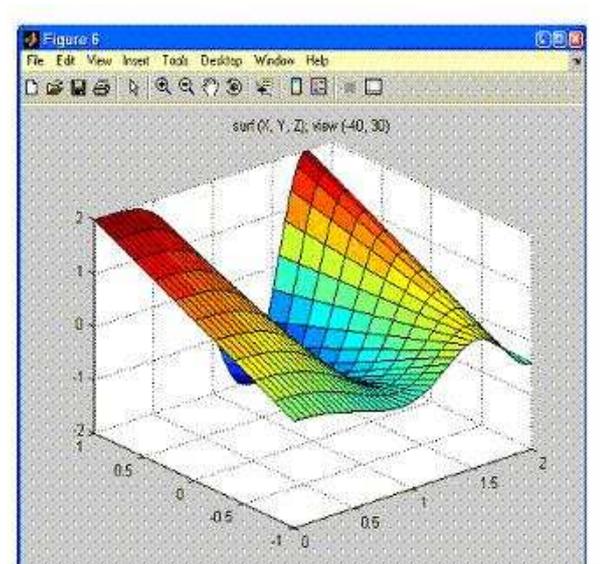


Abbildung 5.2: Beispiel 3D-Grafikausgabe

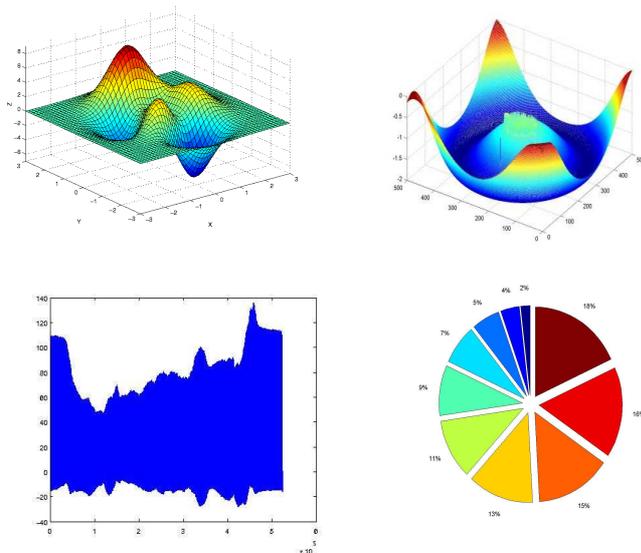


Abbildung 5.3: Beispiele zur a) dreidimensionalen, b) zweidimensionalen, c) Statistik-Grafikausgabe

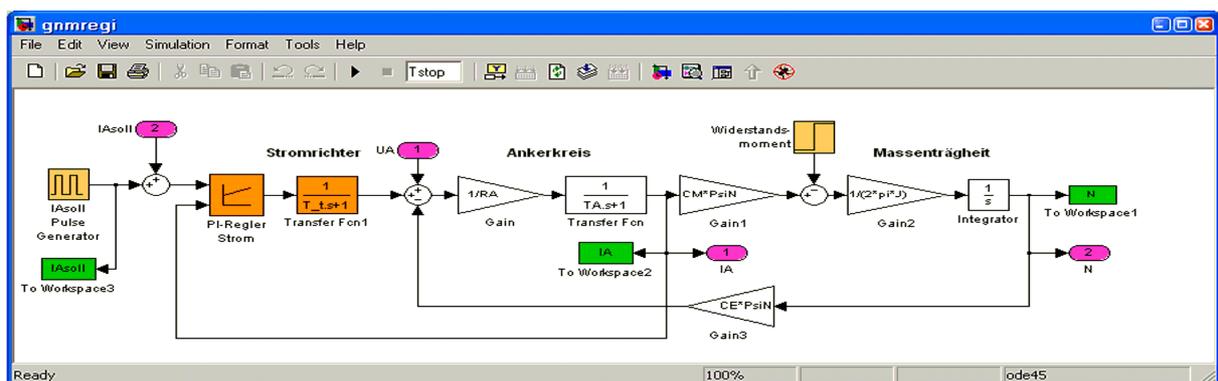


Abbildung 5.4: Modellbildung bei MATLAB-Simulink

5.4.2 Erklärung der Aufgabe mit exakter Lösungsmethode und Auswertung

○ Erste Stufe: P-Median-Problem

Hier werden zwei Depots in einer 20-Quellen (Haus, Straße)-Region eingerichtet. Koordinate und Demand sind in folgender Tabelle angegeben.

Aufgabe: Es ist zu untersuchen, an welchen Standorten zwei Depots errichtet werden sollten.

$$\begin{aligned}
 ZF = & 7 \cdot (0 \cdot x_{11} + 13 \cdot x_{21} + 20 \cdot x_{31} + 17 \cdot x_{41} + 23 \cdot x_{51} + 12 \cdot x_{61} + 25 \cdot x_{71} + 13 \cdot x_{81} + 19 \cdot x_{91} + 21 \cdot x_{101} + \dots + 31 \cdot x_{171} + 28 \cdot x_{181} + 46 \cdot x_{191} + 21 \cdot x_{201}) + \\
 & 5 \cdot (20 \cdot x_{13} + 16 \cdot x_{23} + 0 \cdot x_{33} + 31 \cdot x_{43} + 42 \cdot x_{53} + 17 \cdot x_{63} + 25 \cdot x_{73} + 36 \cdot x_{83} + 20 \cdot x_{93} + 13 \cdot x_{103} + \dots + 35 \cdot x_{173} + 36 \cdot x_{183} + 51 \cdot x_{193} + 9 \cdot x_{203}) + \\
 & 6 \cdot (17 \cdot x_{14} + 29 \cdot x_{24} + 31 \cdot x_{34} + 0 \cdot x_{44} + 42 \cdot x_{54} + 17 \cdot x_{64} + 25 \cdot x_{74} + 36 \cdot x_{84} + 20 \cdot x_{94} + 13 \cdot x_{104} + \dots + 35 \cdot x_{174} + 36 \cdot x_{184} + 51 \cdot x_{194} + 49 \cdot x_{204}) + \\
 & \quad \vdots \\
 & 4 \cdot (21 \cdot x_{120} + 13 \cdot x_{220} + 9 \cdot x_{320} + 49 \cdot x_{420} + 33 \cdot x_{520} + 38 \cdot x_{620} + 41 \cdot x_{720} + 27 \cdot x_{820} + 26 \cdot x_{920} + 38 \cdot x_{1020} + \dots + 47 \cdot x_{1720} + 48 \cdot x_{1820} + 63 \cdot x_{1920} + 0 \cdot x_{2020})
 \end{aligned}$$

NB:

$$\begin{aligned}
 x_{11} + x_{21} + x_{31} + x_{41} + \dots + x_{201} & \leq 9y_1 & y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + \dots + y_{20} & = 2 \\
 x_{12} + x_{22} + x_{32} + x_{42} + \dots + x_{202} & \leq 9y_2 & x_{11}, x_{12}, \dots, x_{20,20} & \in \{0,1\} \\
 x_{13} + x_{23} + x_{33} + x_{43} + \dots + x_{203} & \leq 9y_3 & y_1, y_2, \dots, y_{20} & \in \{0,1\} \\
 x_{14} + x_{24} + x_{34} + x_{44} + \dots + x_{204} & \leq 9y_4 & & \\
 & \quad \vdots & & \\
 x_{16} + x_{26} + x_{36} + x_{46} + \dots + x_{206} & \leq 9y_6 & & \\
 & \quad \vdots & & \\
 x_{120} + x_{220} + x_{320} + x_{420} + \dots + x_{2020} & = 1 & &
 \end{aligned}$$

Mithilfe von MATLAB wurden Depots von 20 Knoten errichtet. (siehe Abbildung 5.5).

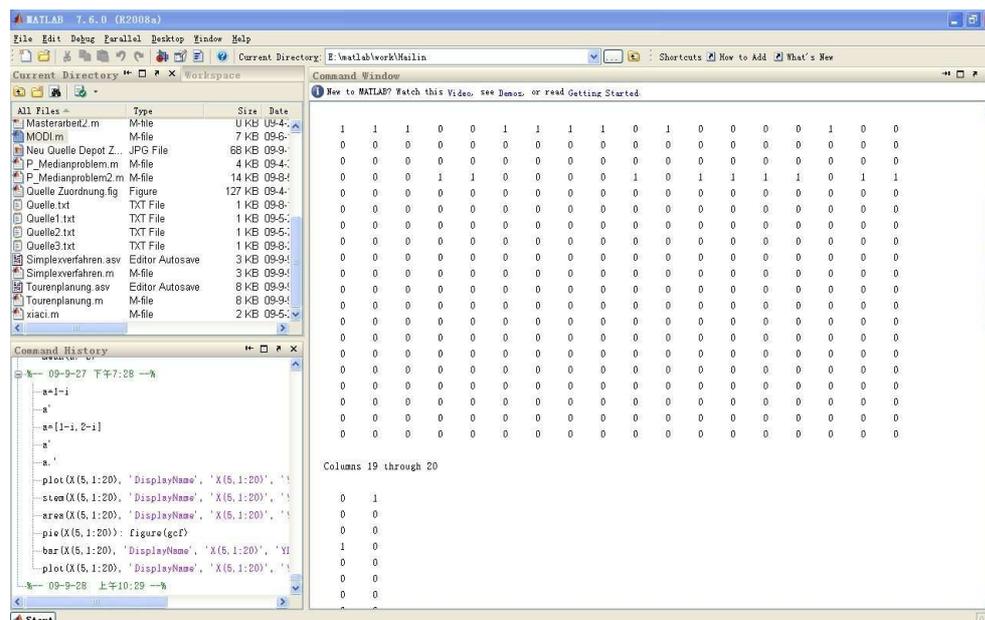


Abbildung 5.5: Lösungsbilder von MATLAB bei Stufe 1.

• **Grund zur Auswahl von 20 Knoten statt 2000 Knoten im MATLAB**

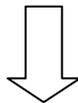
MATLAB ist eine ideale technische Berechnungssprache für exakte Lösungsverfahren. Sie integriert Berechnung, Programmierung und Visualisierung in einer benutzerfreundlichen Umgebung, in der Probleme und Lösungen auf eine einfach zu verstehende mathematische Weise ausgedrückt werden. Die Möglichkeiten für die Zuordnung von allen 20 Knoten zu 2 Depots sind:

$$\begin{aligned}
 & C_{20}^2 \cdot (C_{18}^0 + C_{18}^1 + C_{18}^2 + C_{18}^3 + C_{18}^4 + C_{18}^5 + C_{18}^6 + C_{18}^7 + C_{18}^8 + C_{18}^9 + \\
 & C_{18}^{10} + C_{18}^{11} + C_{18}^{12} + C_{18}^{13} + C_{18}^{14} + C_{18}^{15} + C_{18}^{16} + C_{18}^{17} + C_{18}^{18}) \\
 & = 190 \cdot \{2 \cdot (1 + 18 + 153 + 816 + 3060 + 8568 + 78564 + 31824 \\
 & + 43758) + 48620\} \\
 & = 49.807.360 \approx 50 \text{ Millionen}
 \end{aligned}$$

In Bezug auf den Rechenaufwand ist zu beachten, dass, je komplexer und umfangreicher sich das Problem gestaltet, desto schwieriger und komplexer auch das Lösen mit einem exakten Verfahren wird, da die Anzahl der benötigten Variablen und Möglichkeiten mit steigender Anzahl von Knoten schnell anwächst. Für die Zuordnung aller 20 Knoten zu 2 Depots gibt es fast 50 Millionen Möglichkeiten. Das heißt, es gibt 50 Millionen verschiedene Vorgehensweisen des Routings. Mithilfe des Programms MATLAB wird jede Möglichkeit zur Erstellung einer Lösung berechnet und alle Lösungen werden verglichen, um die beste Lösung zu ermitteln. Die erste Stufe (P-Median-Problem) benötigte ungefähr 50 Minuten Berechnungszeit. Die Möglichkeiten steigen exponentiell an, wenn 2000 Knoten in das Programm eingegeben werden. Eine gute und sinnvolle Alternative ist die Anwendung eines Eröffnungsverfahrens, auch Eröffnungsheuristik genannt, in einem ersten Schritt und danach die Anwendung eines Verbesserungs- bzw. Optimierungsverfahrens. In der Literatur werden meist knotenorientierte Probleme untersucht und es existieren deutlich mehr Lösungsansätze. Dennoch kann das verallgemeinerte kantenorientierte Problem in ein verallgemeinertes knotenorientiertes Problem transformiert werden, indem jeder Verbindungsweg durch einen Knoten in der Mitte des Weges ersetzt wird.

Lösung:

$ \begin{aligned} & Y_4 = 1; Y_1 = 1 \\ & X_{11} = 1; X_{12} = 1; X_{13} = 1; X_{16} = 1; X_{17} = 1; X_{18} = 1; \\ & X_{19} = 1; X_{1,11} = 1; X_{1,16} = 1; X_{1,20} = 1 \\ & X_{44} = 1; X_{45} = 1; X_{4,10} = 1; X_{4,12} = 1; X_{4,13} = 1; \\ & X_{4,14} = 1; X_{4,15} = 1; X_{4,17} = 1; X_{4,18} = 1; X_{4,19} = 1 \end{aligned} $
--



Die beiden Depots sollten in D_1 und D_4 eingerichtet werden.
Die Orte $Q_1, Q_2, Q_3, Q_6, Q_7, Q_8, Q_9, Q_{11}, Q_{16}$ und Q_{20} werden dem Depot1(D_1) zugeordnet; dem Depot in D_4 werden die Orte $Q_4, Q_5, Q_{10}, Q_{12}, Q_{13}, Q_{14}, Q_{15}, Q_{17}, Q_{18}$ und Q_{19} zugewiesen.

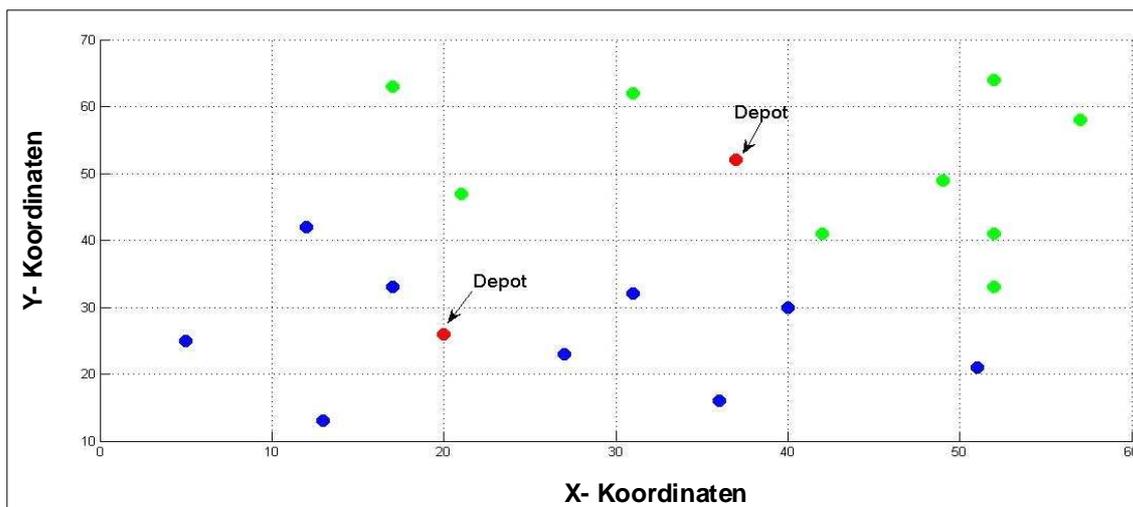


Abbildung 5.6: Depots mit Ablauf des P-Median-Problems im MATLAB gefunden

○ **Zweite Stufe: Tourenplanung**

Nach dem Ablauf der ersten Stufe im MATLAB ist Depot 1 den Quellen 2,3,6,7,8,9,11,16,20 und Depot 4 den Quellen 5,10,12,13,14,15,17,18,19 mit der maximalen Distanz ≤ 65 km zugeordnet. Das Ziel besteht darin, einen Tourenplan (inklusive der dazugehörigen Routen) mit minimaler Gesamtfahrzeit bzw. Gesamtfahrkosten zu suchen. Dazu gehört die Festlegung der Besuchsreihenfolge (Route) in der „Kunden“ auf einer Tour besucht werden, und die Festlegung der Anzahl der Touren, die durchgeführt werden sollen.

Nach dem Ablauf des Programms im MATLAB ist die zweite Stufe mit 20 Knoten folgendermaßen zugeordnet (siehe Abbildung 5.7):

Tabelle 5.1: Knotenanpassung mit Tourenplanung

U	$f(U)=c(U)$	U	$f(U)=c(U)$	U	$f(U)=c(U)$	U	$f(U)=c(U)$	U	$f(U)=c(U)$
{2}	26	{6,11}	52	{5}	42	{14}	36	{6,7}	57
{2,3}	49	{7}	46	{5,12}	44	{14,17}	51	{20}	42
{2,6}	59	{7,8}	50	{5,15}	55	{14,18}	37	{6,8}	48
{2,8}	48	{8}	24	{5,17}	44	{14,19}	63	{3,16}	62
{2,9}	55	{8,11}	49	{5,18}	53	{15}	38	{6}	34
{2,11}	37	{8,16}	61	{10}	64	{15,17}	39	{16,20}	58
{2,16}	41	{8,20}	60	{12}	26	{15,18}	53	{13,19}	46
{2,16,20}	61	{9}	50	{12,14}	53	{15,19}	58	⊙	0
{2,20}	47	{9,11}	51	{12,15}	49	{17}	16	{3,20}	49
{3}	40	{9,16}	52	{12,18}	36	{17,18}	31	{16}	38
{3,8}	54	{11}	26	{13}	32	{17,19}	41	{13,18}	39
{3,11}	59	{11,16}	42	{13,14}	53	{18}	16	{19}	30
{18,19}	44	{11,20}	57	{13,17}	47				

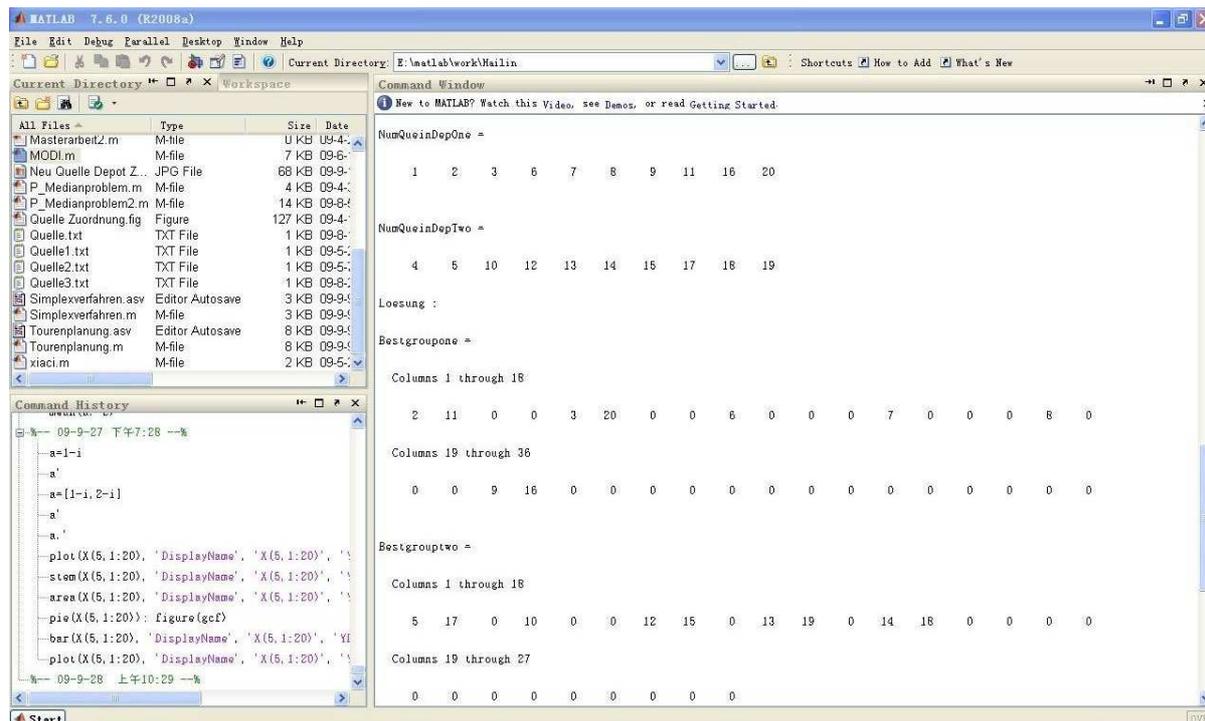


Abbildung 5.7: Lösungsbilder von MATLAB bei der zweiten Stufe

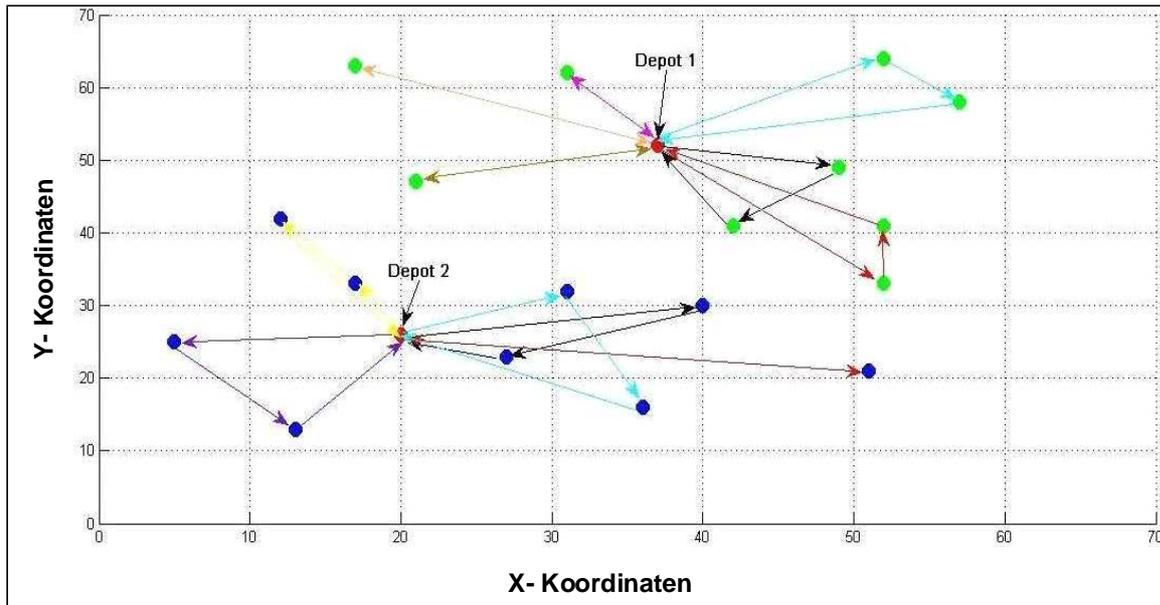


Abbildung 5.8: Zuordnung der Tourenplanung

○ **Grund zur Auswahl von 20 Knoten für die zweite Stufe**

Die Stadt Duisburg hat bis zu 2000 Quellen für den Aufbau der Route. In Bezug auf diese Quellen wird es schwierig, Routen mit dem exakten Verfahren (dynamisches Programm) zu konstruieren. Die Anzahl der benötigten Variablen und Möglichkeiten wächst schnell mit steigender Anzahl der Knoten. Mit 8 Depots können die 2000 Quellen der Stadt Duisburg in 8 Gebiete aufgeteilt werden. Jedes Depot bekommt dann 250 Quellen.

1. Liste aller Möglichkeiten der Kombination von 250 Quellen mit Längen.

Quellen	Möglichkeiten der Kombination
1	{1}
	{1,2}
	...
	{1,250}
	{1,2,3}
	{1,2,4}

	{1,2,250}
	{1,3,4}

	{1,3,250}

	{1,2,3,...,250}
2	{2}
	{2,3}
	{2,4}
	...
	{2,250}
	{2,3,4}
	...
	{2,3,...,250}
...	...
250	{250}

Die Anzahl aller Möglichkeiten der Kombination aller Quellen ist:

$$[1 + 249 + \sum (248 + 247 + \dots + 1) + \sum (247 + \dots + 1) + \dots + \dots + \sum (1)] +$$

$$[1 + 248 + \sum (247 + 246 + \dots + 1) + \sum (246 + \dots + 1) + \dots + \sum (1)] + \dots + \dots$$

Für Quelle 1 liegen die Möglichkeiten der Kombination bei 5.160.118, für Quelle 2 liegen die Möglichkeiten bei 5.110.976. Die gesamten Möglichkeiten liegen bei 397.385.501, das heißt, es sind fast 400 Millionen= 0,4 Milliarden Möglichkeiten.

2. Zuordnung und Festlegung der Besuchsreihenfolge (Route), in der „Kunden“ auf einer Rundreise, wie beim Traveling Salesman-Problem, besucht werden. Jede Tour muss geprüft werden, um Wiederholungsbesuche zu vermeiden. Für 20 Knoten ist eine Prüfung einfach. Angesichts von 313 Quellen (in nur einem Gebiet) ist es zu schwierig, jede Möglichkeit zu berücksichtigen. Die Möglichkeiten der Zuordnung sind variabel und die unterschiedlichen Mengen der Quellen erschweren die Prüfung ebenfalls.

3. Löschen der Routen, die die maximale Distanz übersteigen und Vergleich der Längen aller Route, um die kürzeste Rundreise zu ermitteln.

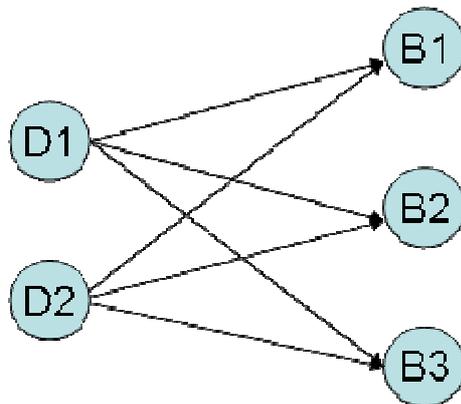
4. Multiplikation der Möglichkeiten von Stufe 1 bis 3 und Multiplikation mit 8. Ergibt mindestens 3,2 Milliarden, d. h. die Anzahl ist zu groß.

○ **Dritte Stufe: Distribution mit dem Simplex-Verfahren**

Die 2 Depots D1 und D2 sollen drei Biogasanlagen B1, B2 und B3 beliefern. Die in den Depots verfügbaren Mengen sind D1= 48 und D2= 44; die in den Biogasanlagen benötigten Mengen sind B1=25, B2=47, B3=35. Die Transportkosten c_{ij} in Euro/ME sind in der

folgenden Matrix dargestellt: $C = (c_{ij}) = \begin{matrix} & \begin{matrix} B1 & B2 & B3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} D1 \\ D2 \end{matrix} & \begin{matrix} 90 & 70 & 60 \\ 85 & 75 & 50 \end{matrix} \end{matrix}$

Es lässt sich grafisch wie folgt darstellen [90]:



$$\text{Min}Z = 90x_{11} + 70x_{12} + 60x_{13} + 85x_{21} + 75x_{22} + 50x_{23}$$

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} = 48$$

$$x_{21} + x_{22} + x_{23} = 44$$

U NB: $x_{11} + x_{21} = 25$

$$x_{12} + x_{22} = 47$$

$$x_{13} + x_{23} = 35$$

Lösung:

Tabelle 5.2: Matrix-Tableau

	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	a1 bzw. B1
X_{11}	1				-1		5
X_{23}			1			1	35
Y_{21}				1			20
X_{12}		1			1		47
Z			60		-45		-7675

X_{11} wurde ausgewählt, die Basis und y_1 eliminiert. So enthalten wir die nunmehr vorliegende Lösung $X_{11}=5$, $X_{12}=47$, $X_{13}=0$, $X_{21}=20$, $X_{22}=0$, $X_{23}=35$ und die Zielfunktion beträgt $Z=7675$.

Die Ergebnisse der 3. Stufe nach dem Ablauf des Programms werden in der Abbildung 5.9 dargestellt.

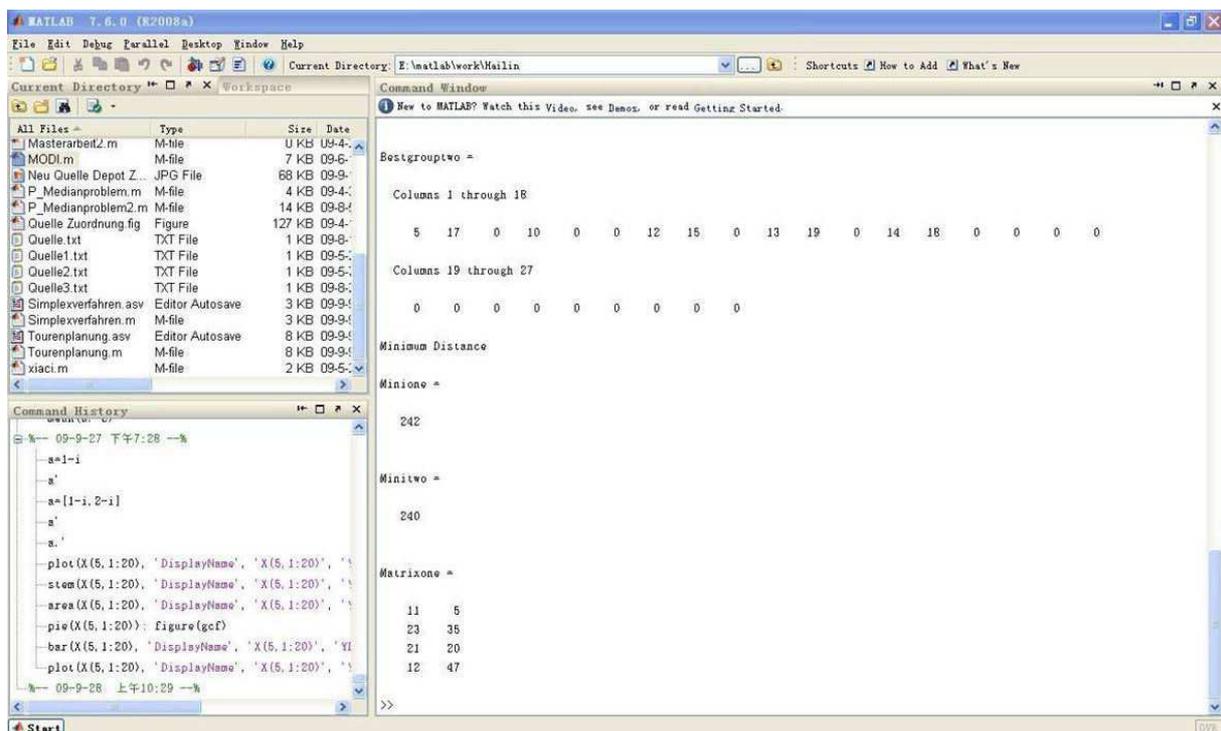


Abbildung 5.9: Lösungsbilder von MATLAB bei Stufe 3

5.5 Knotenorientierte Lösungsmethode und Ansätze

In der Literatur gibt es zahlreiche heuristische Lösungsmethoden. Das Wort „Heuristik“ stammt aus der griechischen Sprache und bedeutet "finden" bzw. "entdecken". Bei der Anwendung von Heuristiken werden Lösungen gefunden, die aufgrund ihres Rechenaufwandes nur schwer mithilfe exakter Verfahren zu lösen sind [91]. Heuristiken sind Suchmethoden, die mit einem angemessenen Rechenaufwand zulässige Lösungen liefern, ohne jedoch zu garantieren, dass es sich um das Optimum handelt und ohne anzugeben, wie weit man von dem Optimum entfernt ist. Die Lösungsmethoden für Standortplanung und Tourenplanung werden in Abbildung 5.10 dargestellt [92]. Eröffnungsverfahren sind problembezogene Verfahren, die Lösungen auf direktem Weg, d. h. ohne Umweg und nicht anhand vorhandener Werte, finden. Solche Lösungen dienen als Anfangslösungen für Metaheuristiken. Eine wesentliche Eigenschaft ist das schrittweise Absuchen von Lösungen, um dadurch möglicherweise bessere Lösungen zu finden. Dazu gehören metaheuristische Verfahren, und hier ganz besonders die Tabusuche [92]. Lagrange-Heuristiken basieren auf der Lösung der Lagrange-Relaxation und ergeben gute Lösungen, weil die Lösung anhand der unteren Schranke abgeschätzt wird [93].

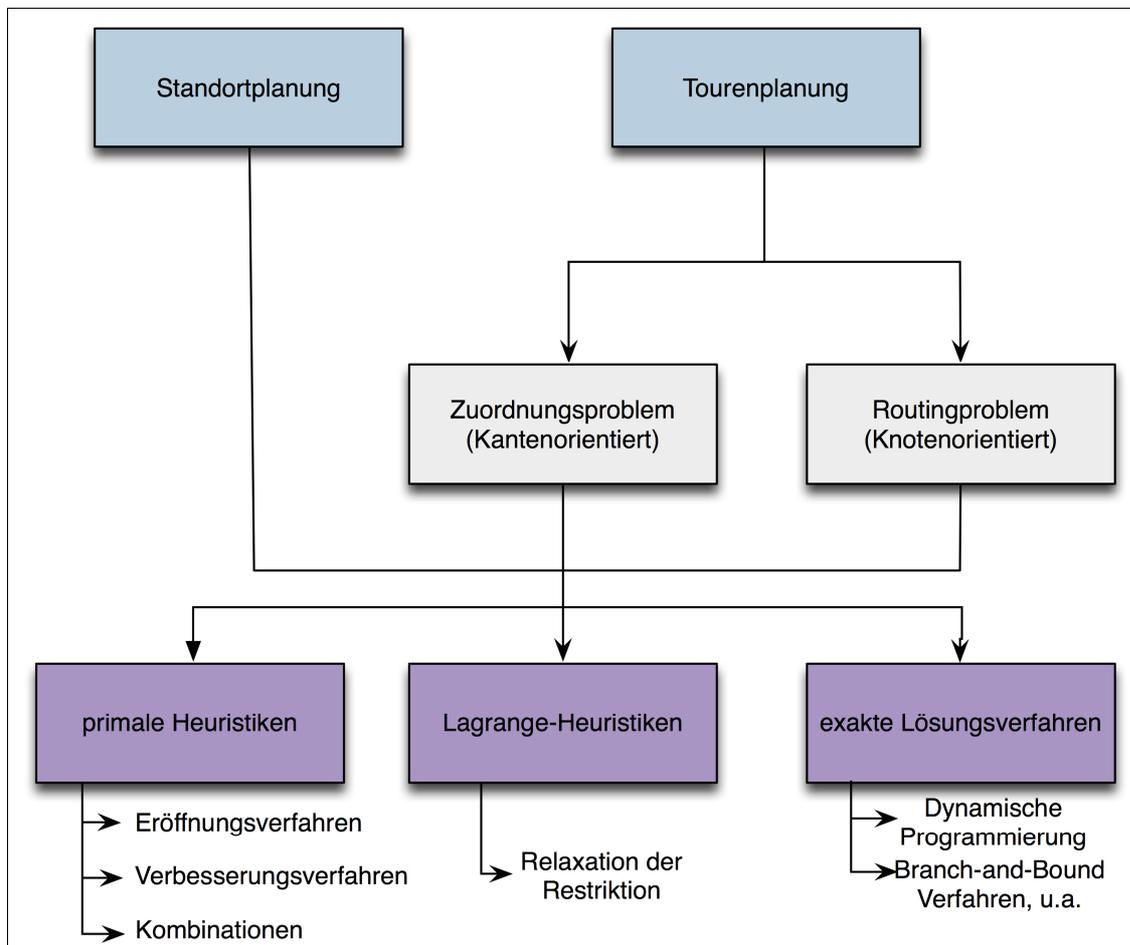


Abbildung 5.10: Darstellung der Lösungsverfahren für Standort- und Tourenplanung [92]

In der Bioabfallsammlung treten sowohl knotenorientierte als auch kantenorientierte Tourenplanungsprobleme auf [92]: das knotenorientierte Problem bei der Sammlung von Grünabfällen (Bringsystem) und das „Briefträgerproblem“ bei der klassischen Haushaltabfallsammlung im Holsystem („Back Haul“) von Haustür zu Haustür entlang der Straßenzüge einer Stadt. Die Tourenplanungssoftware, die am Markt angeboten wird,

basieren auf diesem Prinzip. Diese Software verwendet meistens Standardalgorithmen wie das Savingsverfahren und das Sweep-Verfahren [68].

5.5.1 Vorgeschlagenes heuristisches Modell

Das Modell besteht aus zwei allgemeinen Phasen. Die erste Phase setzt sich aus drei unterschiedlichen Teilproblemen zusammen (siehe Abbildung 5.11).

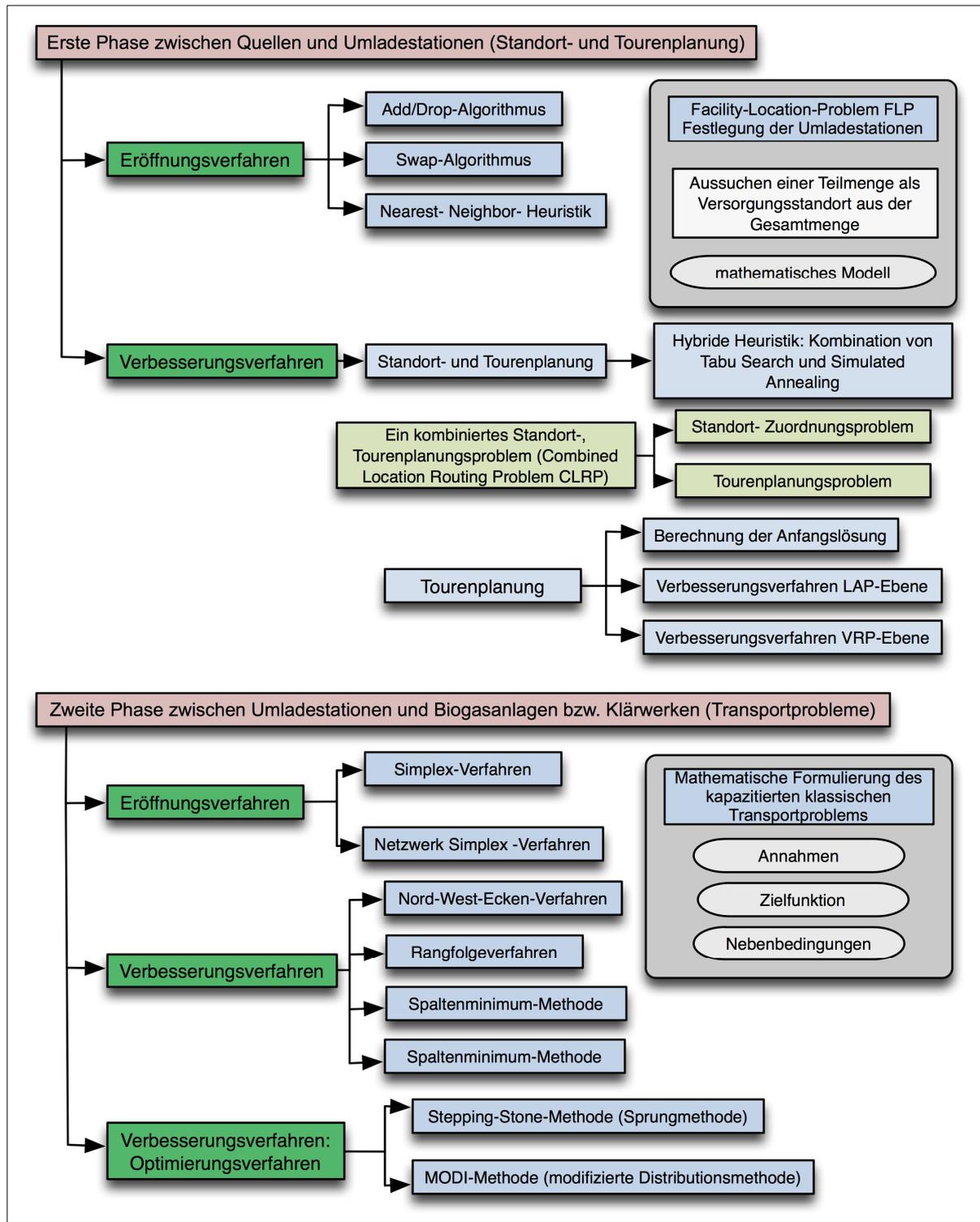


Abbildung 5.11: Vorgeschlagenes heuristisches Modell

Die ersten beiden Teile sind Eröffnungsverfahren: das Standortplanungsproblem, das mithilfe eines hybriden ADD/DROP-Algorithmus für die Festlegung der einzurichtenden Umladestationen und die entsprechende Zuordnung von Kunden gelöst wird und die

modifizierte Nearest-Neighbor-Heuristik, mit der die initialen Routen festgelegt werden können. Das dritte Teilproblem ist das Verbesserungsverfahren anhand eines hybriden Algorithmus (Tabu Search und Simulated Annealing), welches die Lösung zu verbessern versucht, indem Standorte auf der LAP- und VRP-Ebene getauscht werden. Die zweite Phase der Distribution besteht aus zwei Teilproblemen: dem Eröffnungsverfahren und dem Verbesserungsverfahren.

○ **Erste Phase: Eröffnungsverfahren hybrider Algorithmus: ADD-und DROP-Algorithmus für das Standortplanungsproblem**

Die Aufgabe des **ADD-Algorithmus** besteht darin, aus einer Menge von potenziellen Knoten nur diejenigen für Standorte zu errichten, die minimale gesamte Produktions- und Transportkosten einschließlich Fixkosten verursachen. Nacheinander werden Umschlagpunkte nach dem „Greedy“ (gierig)-Prinzip sukzessiv hinzugefügt, bis keine Verbesserung mehr möglich ist.

Vorgehensweise:

Schritt 1: Wahl eines Standortes j , der die geringsten Gesamtkosten liefert.

Schritt 2: Berechnung, des Betrags der Gesamtkosten für jeden Standort, für den die Entscheidung hinsichtlich der Transportkosten der Standorte, die bislang dem Kunden zugeordnet sind, noch offen ist.

Schritt 3: Wahl des Standortes, dessen Gesamtkosten gering sind.

Schritt 4: Wiederholung von Schritt 2, bis die Gesamtkosten sich nicht mehr verringern.

Der **DROP-Algorithmus** funktioniert ähnlich, der Unterschied liegt in der Selektion der Standorte: Während der ADD-Algorithmus die Standorte addiert, entfernt der DROP-Algorithmus sie auf eine iterative Weise. Alle Standorte sind zu Beginn eingerichtet und werden dann sukzessive geschlossen, sofern sich die aktuelle Lösung verbessern lässt.

Vorgehensweise:

Schritt 1: Bestimmung des Anstiegs der Transportkosten für jeden Kunden, wenn der Kunde anstelle seines jetzigen Standortes vom Standort mit den zweitgeringsten Transportkosten bedient werden würde.

Schritt 2: Wahl des Standortes mit dem größten Reduzierungswert der Gesamtkosten. Der Standort bleibt endgültig eingerichtet.

Schritt 3: Schließung desjenigen, der zu einer maximalen Kostenersparnis führt.

Schritt 4: Sofern es noch Standorte gibt, deren Entscheidung offen sind, Wiederholung des Verfahrens ab Schritt 2 (siehe Abbildung 5.12).

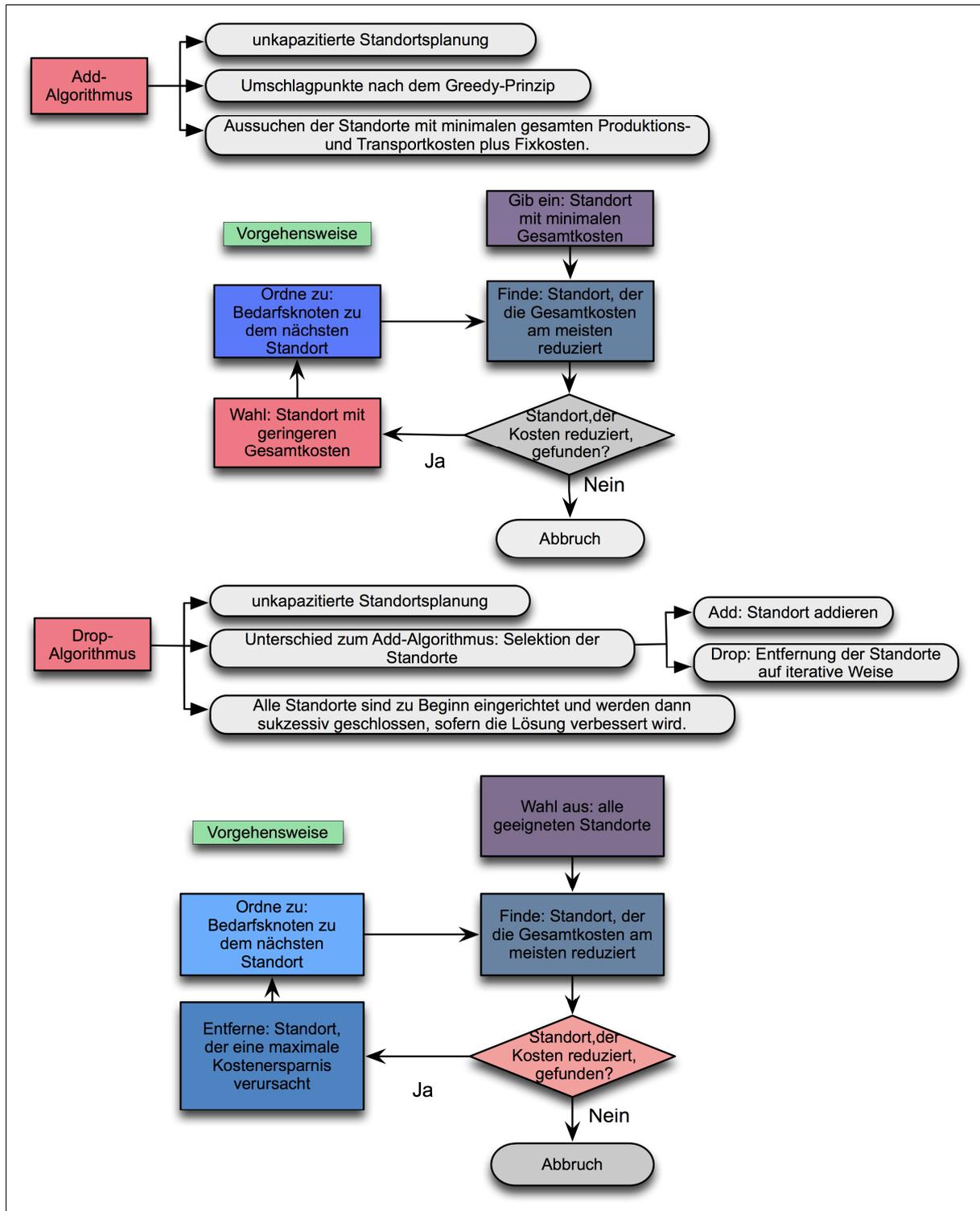


Abbildung 5.12: ADD- und DROP-Algorithmus

Swap-Algorithmus für das Standortplanungsproblem

Der Swap-Algorithmus hat die Funktion, eine vorhandene gefundene Lösung zu verbessern (siehe Abbildung 5.13). Er beginnt mit einer beliebigen, festgelegten Menge von Standorten. In der Implementierung wird nach der besten möglichen Substitution gesucht, bevor ein Tausch durchgeführt wird. Das bedeutet, dass alle Tauschmöglichkeiten von Knoten der aktuellen Lösung und solche, die nicht in der aktuellen Lösung vorhanden sind, betrachtet werden. Nachdem alle Kombinationen ausgewertet worden sind, wird die beste ausgewählt. Falls die betrachtete Kombination die Gesamtkosten verringert, wird ein Knoten der aktuellen Lösung mit einem Knoten getauscht, der bei der aktuellen Lösung nicht erscheint. Des

Weiteren wird untersucht, ob die beste gefundene Kombination keine Gesamtkostenersparnis verursacht. Ist dies der Fall, wird das Verfahren abgebrochen.

Vorgehensweise:

Schritt 1: Bestimmung aller aktuellen in der Lösung gefundenen Standorte.

Schritt 2: Suche des besten Umtauschknotens für jeden Standort in der Lösung.

Schritt 3: Identifikation des besten Umtauschpaares für Entfernung/Tausch. Falls der beste Tausch die Gesamtkosten minimiert, weiter zu Schritt 4, sonst zu Schritt 6.

Schritt 4: Tausch des bestehenden Standortes mit dem besten gefundenen Tauschknoten.

Schritt 5: Zuordnung des Bedarfsknotens zum nächstliegenden Standort, dann zu Schritt 2.

Schritt 6: Abbruch des Algorithmus mit der besten gefundenen Tauschlösung.

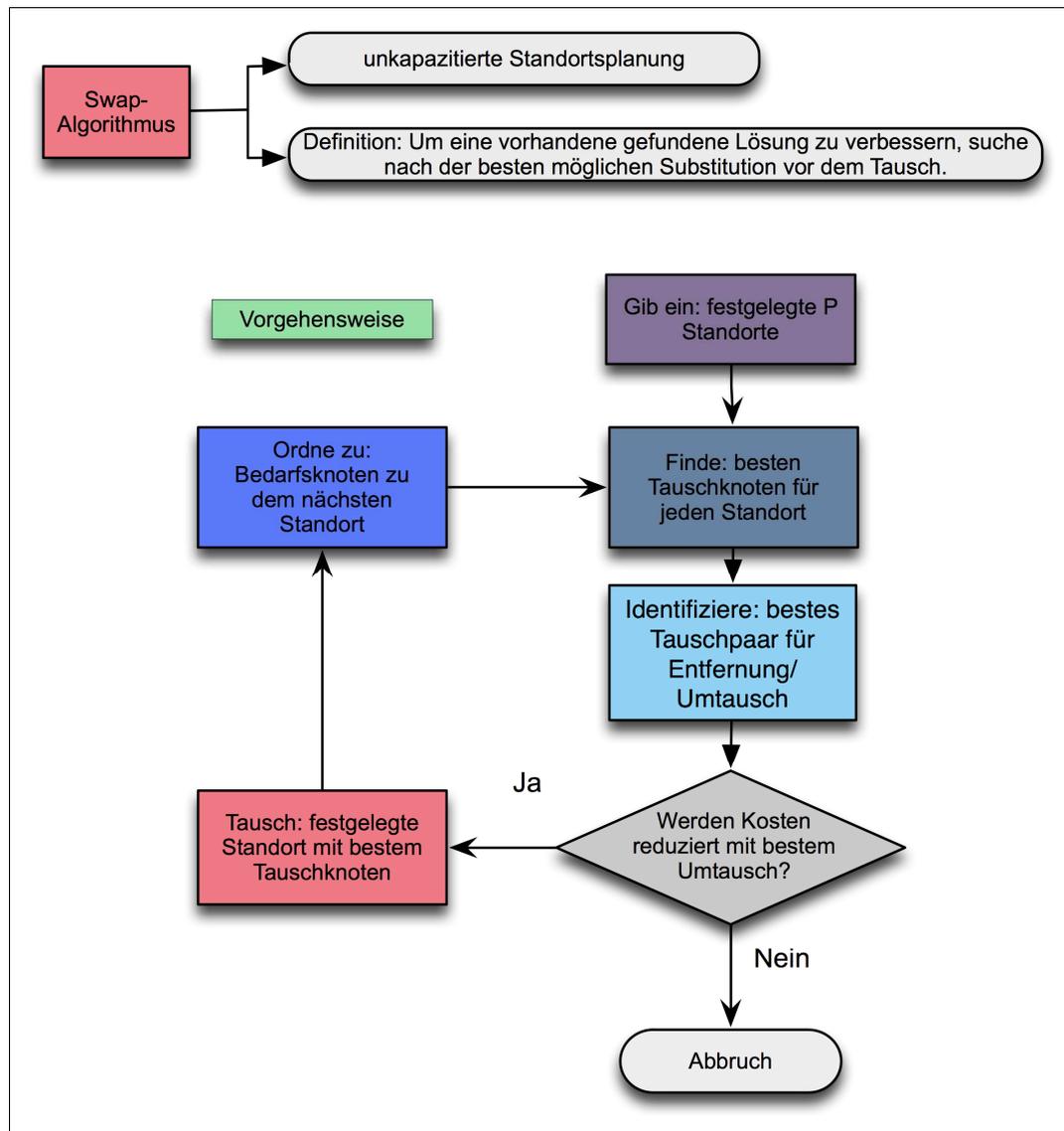


Abbildung 5.13: Swap-Algorithmus

Hybrid-Algorithmus für das Standortplanungsproblem

Die Verbesserung der Heuristik ist nicht erfolgreich, da sie die Anzahl der Standorte als eine gegebene initiale Lösung akzeptiert. Mit einem sogenannten Hybrid-Algorithmus kann das Problem vermieden werden (siehe Abbildung 5.14). Als erster Schritt wird die Initiallösung aus dem ADD-Algorithmus verwendet und mithilfe des Exchange- und DROP-Algorithmus verbessert.

Vorgehensweise:

Schritt 1: Suche einer initialen Lösung mit dem ADD-Algorithmus.

Schritt 2: Verbesserung der Lösung mit der Exchange-Heuristik. Falls die Standorte verändert werden, weiter zum nächsten Schritt, sonst weiter mit Schritt 4.

Schritt 3: Es wird versucht, die Lösung mit dem ADD- und DROP-Algorithmus zu verbessern.

Schritt 4: Die beste Lösung aus dem ADD- und DROP-Algorithmus wird ausgewählt. Falls eine Verbesserung gefunden wird, weiter mit Schritt 2, sonst weiter mit Schritt 5.

Schritt 5: Schließung des Algorithmus mit der besten Hybrid-Lösung.

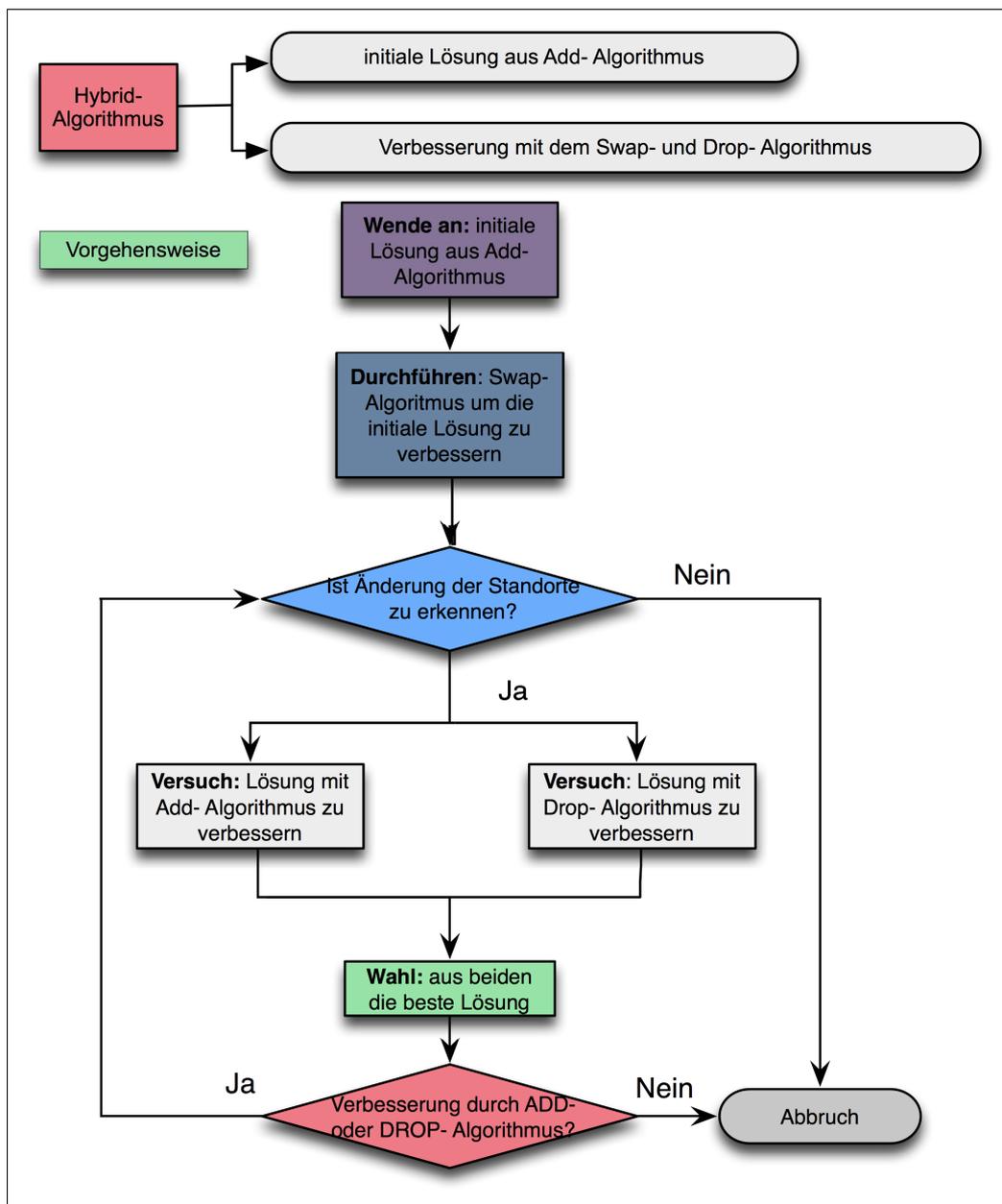


Abbildung 5.14: Hybrid-Algorithmus

Die ADD- und DROP-Algorithmen wurden angewendet, um die Standorte festzulegen, die in Bezug auf die tatsächlichen Quellen, deren Mengenverteilungen und die Entfernungen bestimmt wurden. Nachdem die Sammelpunkte bzw. Umladestationen ausgewählt wurden,

sollten zuerst anhand eines modifizierten Nearest-Neighbor-Verfahrens die Routen aufgebaut werden. Die Routen betrachten stets sowohl die Sammelfahrzeugkapazität als auch die Umladestationskapazität, danach werden sie den jeweiligen passenden Umladestationen mithilfe der Bestimmung der Schwerpunkte der Routen und der Entfernungen zu den Umladestationen zugeordnet. Anschließend sind die Routen anhand eines kombinierten Tabu Search Simulated Annealing-Verfahrens zu verbessern.

○ **Kombinierte Standort- und Tourenplanung**

In der ersten Phase des Modells geht es um ein kombiniertes Standort-Tourenplanungsproblem, ein Combined Location Routing-Problem (CLRP).

Die Menge der Kunden wird in zwei Gruppen eingeteilt:

- Kunden, bei denen etwas angeliefert werden soll (Linehaul Customers) und
- Kunden, bei denen etwas abgeholt werden sollen (Backhaul Customers).

Im konkreten Fall handelt es sich um eine Tourenplanung mit Backhails.

Das CLRP wird in zwei Subprobleme unterteilt: das Standort-Zuordnungsproblem und das Touren-Lagerhaltungsproblem. Die beiden Subprobleme werden mithilfe einer hybriden Heuristik gelöst, die eine Kombination von Tabu Search und Simulated Annealing ist. Gründe zur Anwendung beider Verfahren sind das gemeinsame Nutzen der Tabuliste, um Zyklen bei der Suche zu vermeiden und zugleich die Effizienz der Suche zu verbessern, und die Verbesserung der Suchstrategie.

Gegenstand der Tourenplanung ist die Festlegung

- der Besuchsreihenfolge (Route), in der "Kunden" auf einer Tour besucht werden, und
- die Anzahl der Touren, die durchgeführt werden sollen.

Typische Eigenschaften von Tourenplanungsproblemen:

- Es muss festgestellt werden, ob es bei dem Besuch der Kunden um die Auslieferung bzw. Einsammlung von Gütern oder um eine Kombination von Auslieferung und Einsammlung (Pickup and Delivery) geht.
- Die Anzahl der Fahrzeuge ist ein vorgegebener Parameter
Alle Fahrzeuge sind identisch (homogener Fuhrpark).
- Die Nachfrage der Kunden ist vorab bekannt.

Im kombinierten Standort-, Touren- und Bestandplanungsproblem werden folgende Annahmen vorausgesetzt:

- Alle Touren starten/enden in jeweils der gleichen Umladestation.
- Eine bekannte Menge V von n Kunden $V = \{1, \dots, n\}$ soll bedient werden. Die jeweils kürzesten Strecken zwischen zwei Kunden bzw. zwischen der Umladestation und den Kunden sind bekannt. Der Abstand zwischen Punkten i und j sei d_{ij} (gemessen in Zeiteinheiten — andere Interpretationen des Abstandes sind möglich, z. B. Längeneinheiten, Kosten etc.).
- Die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge ist das Ergebnis der Planung. Alle Fahrzeuge sind identisch und haben eine Transportkapazität Q .
- Die Nachfrage der Kunden ist bekannt und beträgt b_i Kapazitätseinheiten für Kunde i .
- Jeder Kunde soll im Planungshorizont nur ein einziges Mal bedient werden. Die Nachfrage aller Kunden muss dabei vollständig befriedigt werden (also muss für jeden Kunden $b_i \leq Q$ gelten).

- Die Kapazität der Depots ist zu berücksichtigen.

Ziel der Tourenplanung ist es, einen Tourenplan (inklusive der dazugehörigen Routen) mit minimaler Gesamtfahrzeit zu finden.

Berechnung der Anfangslösung:

Der Vorgang läuft in folgenden Schritten ab:

- Schritt 1: Initialisierung von $r=1$, $k=1$ als Zähler. Speicherung aller Kunden in einer Liste F und aller Depots in einer Liste E.
- Schritt 2: Zufällige Wahl eines Kunden aus der Liste F.
- Schritt 3: Falls die Sammelfahrzeugkapazität nicht überschritten wird, weiter mit Schritt 5, sonst zu Schritt 4.
- Schritt 4: Aktualisierung der Variablen k mit $k=k+1$.
- Schritt 5: Speichern der Umladestation in einer Liste R_k . Kunde wird in der Liste F als „zugeordnet“ festgelegt.
- Schritt 6: Fall Liste F leer ist, weiter mit Schritt 8, sonst zu Schritt 7.
- Schritt 7: Wahl eines Kunden aus der Liste F mit der kürzesten Entfernung zum letzten ausgewählten Kunden in R_k . Zurück zu Schritt 3.
- Schritt 8: Falls alle Umladestationen als „in Route“ festgelegt sind, weiter mit Schritt 12, sonst Schritt 9.
- Schritt 9: Wahl der Umladestation mit der kürzesten Entfernung zwischen der Umladestation und dem ersten Kunden aus der Route R_k zuzüglich Entfernung zwischen der Umladestation und dem letzten Kunden aus der Route R_k mithilfe der Stem Distance. Wenn $x_1 + x_2 < x_3 + x_4$, wird die Umladestation ausgewählt, die mit x_1 und x_2 verbunden ist.
- Schritt 10: Bei Überschreitung der Umladestationskapazität zurück zu Schritt 9, um eine neue Umladestation auszuwählen, sonst zu Schritt 11.
- Schritt 11: Speicherung der Umladestation in der Liste R_k und Festlegung in der Liste E als „in Route“.

Toleranzbereich:

- Schritt 12: Falls es Routen R_k ohne zugeordnete Umladestation aus der Liste E gibt, weiter mit Schritt 13, sonst Schritt 14.
- Schritt 13: Auswahl der Umladestation mit der kürzesten Entfernung zwischen der Umladestation und dem ersten Kunden aus der Route R_k zuzüglich Entfernung zwischen der Umladestation und dem letzten Kunden aus der Route R_k mithilfe der Stem Distance. Diese Umladestation wird in R_k gespeichert. Zurück zu Schritt 12.
- Schritt 14: Berechnung der Gesamtsystemkosten SC mithilfe der vorgestellten Zielfunktion. Speicherung der Anfangslösung SC als beste gefundene Lösung, d. h. die beste gefundene Lösung ist gleich der Anfangslösung $X^* = X^0$ und $S(X^*) = S(X^0)$.

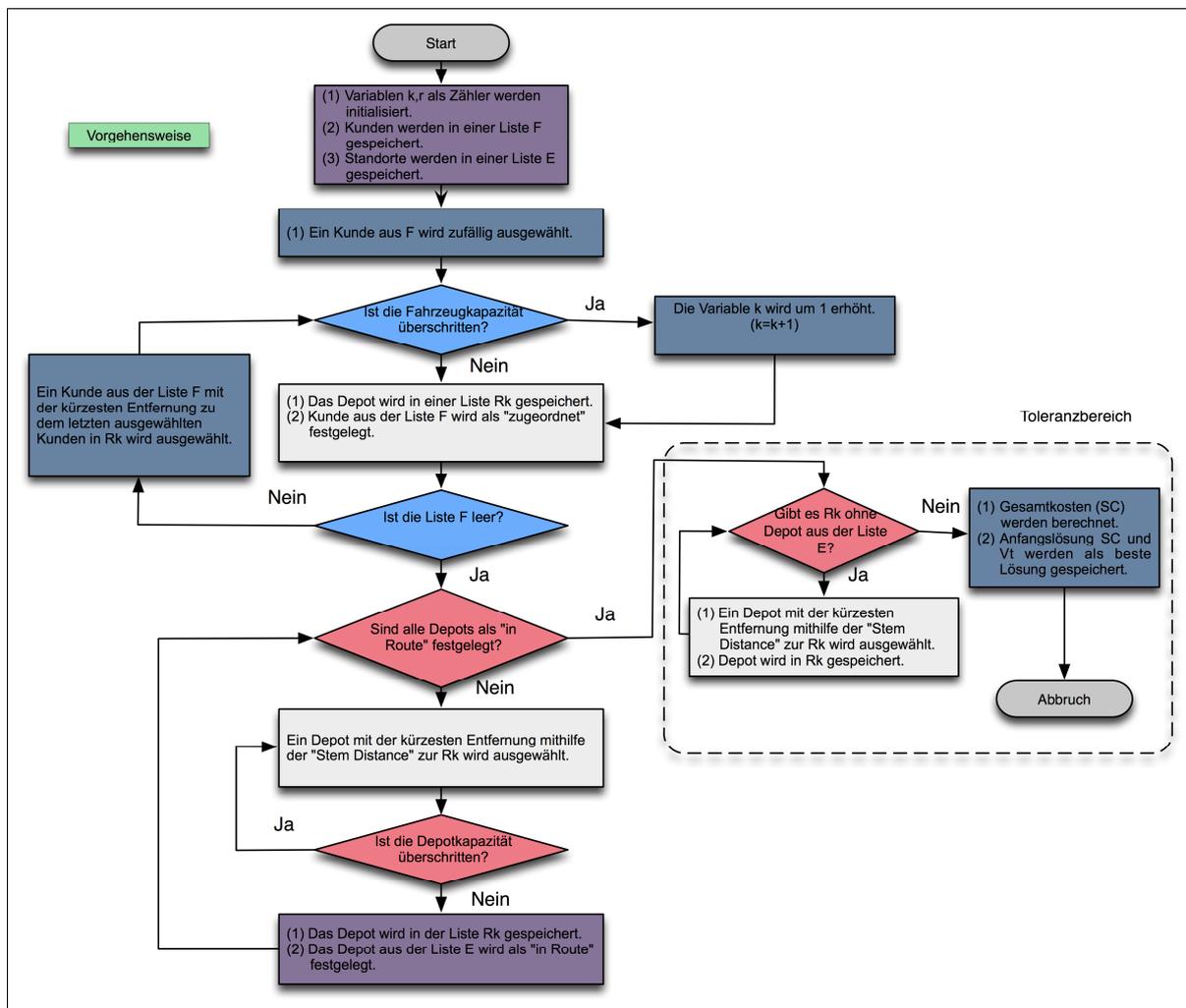


Abbildung 5.15: Eröffnungsverfahren der Metaheuristik

Verbesserungsverfahren auf der LAP-Ebene:

Schritt 15: Erzeugung eines neuen Kandidatzuges x^l um eine Nachbarschaftslösung mithilfe des Verfahrens des Tauschzuges zu erreichen. Der Tauschzug wählt zufällig 2 Depots D_i in V_i und D_j in V_j und tauscht D_i und D_j .

Schritt 16: Ist x^l unter Berücksichtigung der Restriktionen von Fahrzeug- und Depotkapazität zulässig? Dann weiter mit Schritt 17, sonst Wiederholung ab Schritt 15.

Schritt 17: Ist der Kandidatzug in der Tabuliste (nach Definition ist die Größe der Tabuliste gleich 7), dann Durchführung von Schritt 18, sonst Aktualisierung von $X^0 = X^l$ und $SC(X^0) = SC(X^l)$, ebenso Aktualisierung der Tabuliste. Weiter mit Schritt 19.

Schritt 18: Falls $SC(X^*) \geq SC(X^l)$, dann Aktualisierung von $X^* = X^l$, ebenso von $X^0 = X^l$ und $SC(X^0) = SC(X^l)$. Aktualisierung der Tabuliste und weiter mit Schritt 19, sonst zurück zu Schritt 15.

Schritt 19: Initialisierung der Parameter für die simulierte Abkühlung bei einer Anfangstemperatur von 70 ($T = T^0 = 70$) und Wiedererwärmungsfaktor von $r = 0,9$, Abbruchtemperatur 10.

Schritt 20: Erzeugung einer Nachbarlösung X^1 mithilfe des Tauschzuges.

Schritt 21: Ist X^1 unter Berücksichtigung der Restriktionen von Fahrzeug- und Depotkapazität zulässig? Dann Wiederholung ab Schritt 20, sonst weiter mit Schritt 22.

Schritt 22: Ist der Zug (von X^0 zu der Nachbarlösung X^1) in der Tabuliste, dann Wiederholung ab Schritt 20, sonst weiter mit Schritt 23.

Schritt 23: Falls die Nachbarlösung akzeptiert wird, dann

1. sei $\Delta SC = SC(X^1) - SC(X^0)$;

2. falls $\Delta SC \leq 0$, dann $X^0 = X^1$, $SC(X^0) = SC(X^1)$ und Aktualisierung der Tabuliste auf der LAP-Ebene und falls $SC(X^1) = SC(X^*)$, dann $X^* = X^1$ und $SC(X^*) = SC(X^1)$;

3. falls $\Delta SC > 0$, dann $X^0 = X^1$ und $SC(X^0) = SC(X^1)$ nur mit einer Wahrscheinlichkeit von $\exp(-\Delta SC/T)$ und Aktualisierung der Tabuliste.

Schritt 24: Bei Abbruch des Verfahrens unter der Temperatur T weiter mit Schritt 25, sonst Wiederholung ab Schritt 20. Erreicht die Anzahl von akzeptierten Lösungen unter der Temperatur T einen vordefinierten Wert, muss folgende Bedingung überprüft werden:

$$\frac{|AVG_e - AVG_f|}{AVG_f} \leq \varepsilon \quad (5-27)$$

AVG_e ist der durchschnittliche Zielfunktionswert von akzeptierten Lösungen unter der Temperatur T. AVG_f ist der durchschnittliche Zielfunktionswert von akzeptierten Lösungen vor T. ε ist ein vordefinierter Gleichgewichtswert ($0 < \varepsilon < 1$). Falls die oben genannte Bedingung erfüllt wird, ist der Gleichgewichtszustand erreicht und das Verfahren bricht unter T ab.

Schritt 25: $T = T \times r$.

Schritt 26: Ist das Abbruchkriterium ($T < \text{Abbruchtemperatur}$) in der Standortplanungsphase erfüllt, weiter mit Schritt 27, sonst Wiederholung ab Schritt 15.

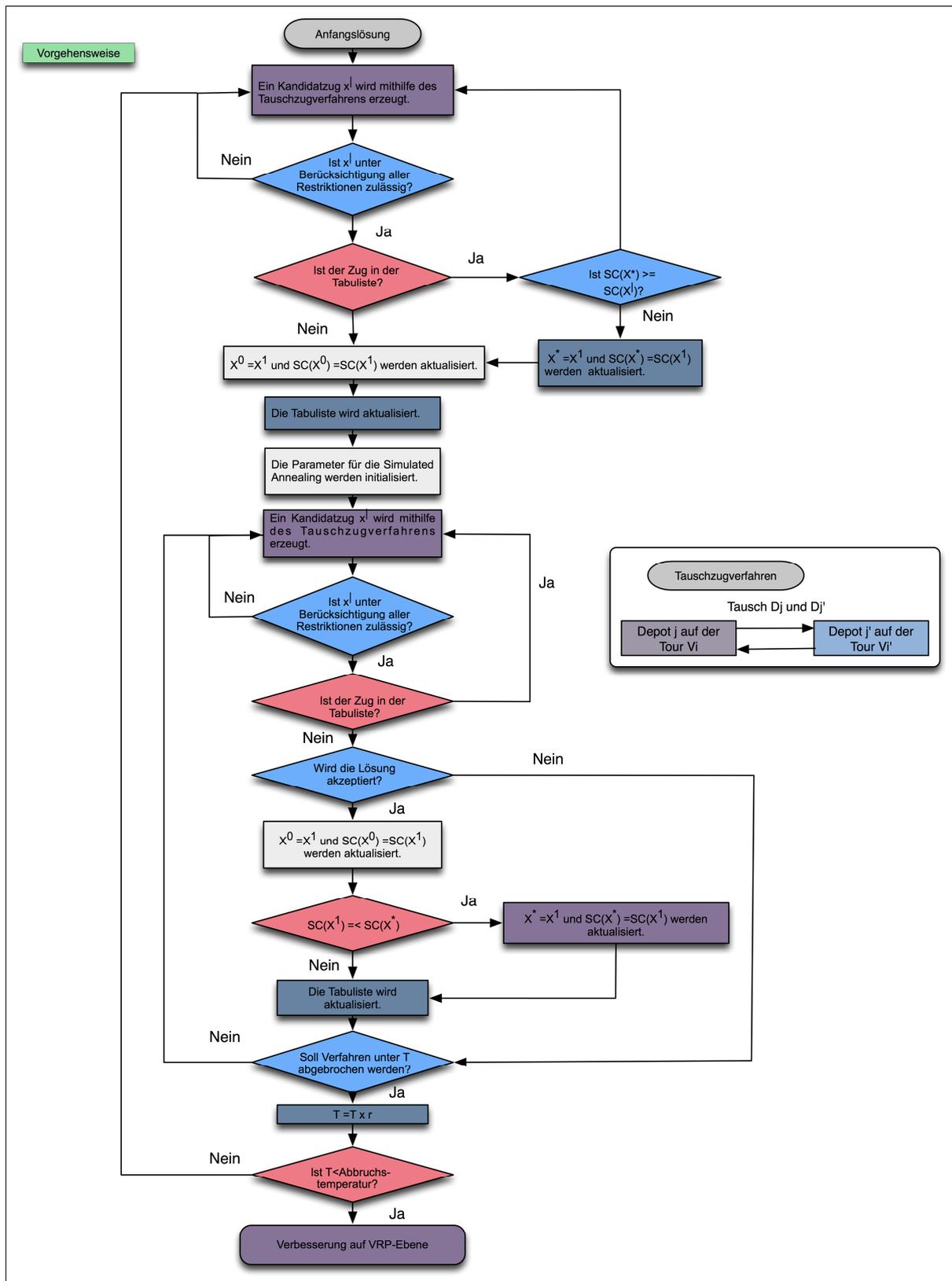


Abbildung 5.16: Flussdiagramm des Verbesserungsverfahrens auf der LAP-Ebene

Verbesserungsverfahren auf VRP-Ebene:

Schritt 27: Erzeugung eines Kandidatzuges (von X^0 zu X^1) mithilfe des Tauschzugverfahrens. Zufällige Wahl von 2 Routen: V_i und V_j , zufällige Wahl eines Kunden C1 von V_i und eines Kunden C2 von V_j , der zu C1 in V_i am nächsten ist, Tausch von C1 und C2.

Schritt 28: Ist x^1 unter Berücksichtigung der Restriktionen von Zeitfenster und Fahrzeug- und Depotkapazität zulässig? Dann weiter mit Schritt 29, sonst Wiederholung ab Schritt 27.

Schritt 29: Ist der Kandidatzug in der Tabuliste, dann weiter mit Schritt 30, sonst Aktualisierung von $X^0 = X^1$ und $SC(X^0) = SC(X^1)$. Aktualisierung der Tabuliste auf der VRP-Ebene und weiter mit Schritt 31.

Schritt 30: Falls $SC(X^*) \geq SC(X^1)$ ist, Aktualisierung von $X^* = X^1$ und $SC(X^*) = SC(X^1)$, Aktualisierung von $X^0 = X^1$, und $SC(X^0) = SC(X^1)$, Aktualisierung der Tabuliste auf VRP-Ebene und weiter mit Schritt 31, sonst Wiederholung ab Schritt 27.

Schritt 31: Initialisierung der Parameter für die simulierte Abkühlung: Anfangstemperatur ($T=T^0=70$), Wiedererwärmungsfaktor ($r=0,9$) und Abbruchtemperatur =10.

Schritt 32: Erzeugung einer Nachbarlösung X^1 als nächster Kandidatzug mithilfe des Tauschzugverfahrens.

Schritt 33: Ist x^1 unter Berücksichtigung der Restriktionen von Zeitfenster und Fahrzeug- und Depotkapazität zulässig? Dann weiter mit Schritt 34, sonst Wiederholung ab Schritt 32.

Schritt 34: Ist der Zug (von X^0 zu X^1) in der Tabuliste, Wiederholung ab Schritt 32, sonst weiter mit Schritt 35.

Schritt 35: Ist die Nachbarlösung akzeptiert, dann

1. sei $\Delta SC = SC(X^1) - SC(X^0)$;
2. falls $\Delta SC \leq 0$, dann $X^0 = X^1$, $SC(X^0) = SC(X^1)$, Aktualisierung der Tabuliste auf der VRP-Ebene und falls $SC(X^1) \leq SC(X^*)$, dann $X^* = X^1$ und $SC(X^*) = SC(X^1)$;
3. falls $\Delta SC > 0$, dann $X^0 = X^1$ und $SC(X^0) = SC(X^1)$ nur mit einer Wahrscheinlichkeit $\exp(-\Delta SC/T)$ und Aktualisierung der Tabuliste auf der VRP-Ebene.

Schritt 36: Soll das Verfahren unter der Temperatur T abgebrochen werden, dann weiter mit Schritt 3, sonst Wiederholung ab Schritt 32. (Bezogen auch auf Schritt 24 der LAP-Ebene.)

Schritt 37: $T = T \times r$.

Schritt 38: Ist das Abbruchkriterium ($T < \text{Abbruchtemperatur}$) auf der VRP-Ebene erfüllt, weiter mit Schritt 39, sonst Wiederholung ab Schritt 27.

Schritt 39: Ist der Zähler $m=5$, dann Abbruch. Wenn nicht, wird $m=m+1$ gesetzt und Wiederholung ab Schritt 15.

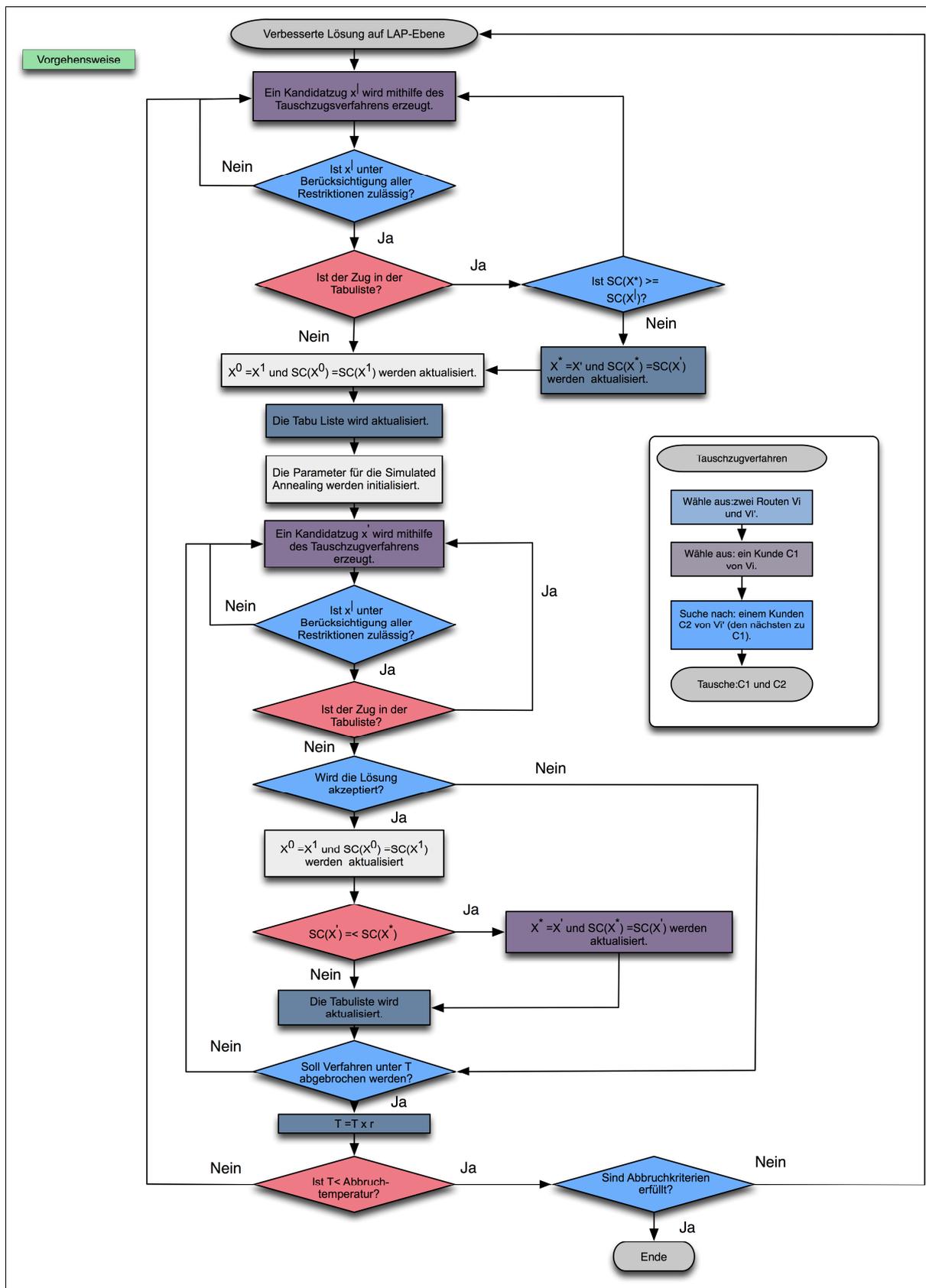


Abbildung 5.17: Flussdiagramm des Verbesserungsverfahrens auf der VRP-Ebene

5.5.2 Zweite Phase: Zwischen Umladestation und Biogasanlagen bzw. Klärwerken

Die zweite Phase des Modells behandelt ein einstufiges Problem, das Transportproblem (siehe Abbildung 5.18).

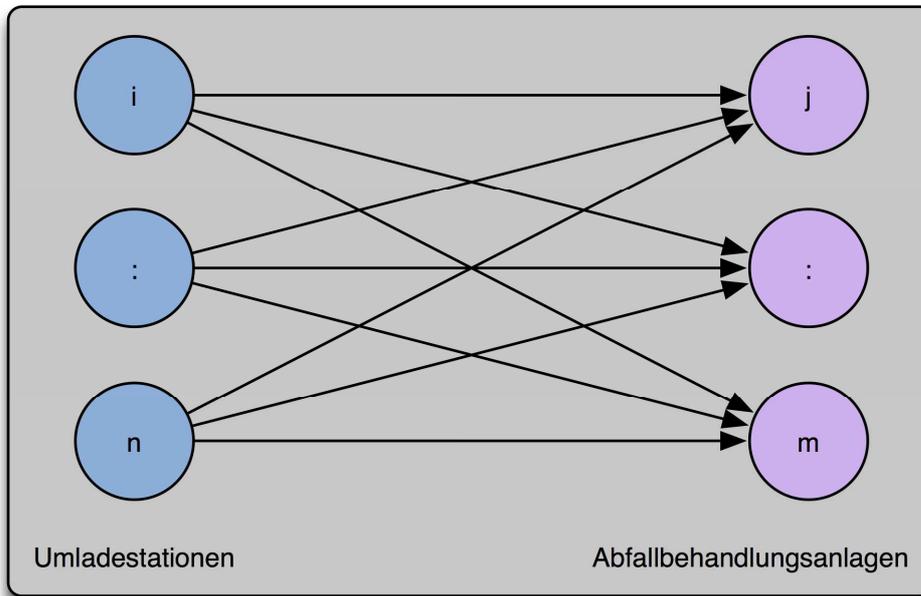


Abbildung 5.18: Transportproblem zwischen Umladestationen und Biogasanlagen

Es handelt sich hier um spezielle Fälle von mehrstufigen Transportproblemen und Umladeproblemen. Die grafische Darstellung enthält keine Zwischenknoten. Umschlagpunkte sind in diesem Fall die Quellen und die Biogasanlagen bzw. Klärwerke, die Senken. Jeder Transport erfolgt einstufig direkt von einem Anbieter (Quelle) zu einem Nachfrager (Senke). Dies ist das klassische Transportproblem (Digraph $G = (V, E, c)$). V stellt die Knotenmenge, E die Kanten- oder Pfeilmenge und c den Kostenwert eines Graphen dar. [12] Beim Anbieter i steht eine bestimmte Menge (a_i) eines Gutes zur Verfügung und der Nachfrager j hat einen bestimmten Bedarf (b_j). Also gilt: $\sum_i a_i = \sum_j b_j$.

Das Ziel des Modells ist die Ermittlung eines Plans der Auskunft darüber gibt, welche Anbieter welche Nachfrager befriedigen, damit die Transportkosten so niedrig wie möglich gehalten werden. Sind für die Transportverbindungen keine Kapazitätsbeschränkungen zu beachten, handelt es sich um ein unkapazitiertes Transportproblem. Sind Fahrzeugkapazitäten zu berücksichtigen, dann wird von einem kapazitierten Transportproblem $G = (V, E, c, k)$ gesprochen. Die maximale Kapazitätsbeschränkung κ ist zu beachten, da die minimale Kapazitätsbeschränkung λ keine Rolle bei der Lösung der Transportprobleme spielt. Sie lässt sich leicht berücksichtigen und eliminieren. [12]

Die mathematische Formulierung des kapazitierten klassischen Transportproblems lautet:

Zielfunktion

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij} \quad (5-28)$$

unter folgenden Nebenbedingungen

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = a_j \quad \text{für alle } i \in V_a \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \quad \text{für alle } j \in E \quad (2)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \text{für alle } (i,j) \in E \quad (3)$$

$$x_{ij} \leq k_{ij} \quad \text{für alle } (i,j) \in E \quad (4)$$

Die Bedingung (1) gewährleistet, dass die Angebotsmengen jedes Anbieters bzw. jeder Quelle zur Verfügung stehen. Die Bedingung (2) hingegen stellt fest, dass die gesamten Nachfragen befriedigt werden. Die Nebenbedingung (3) zeigt die Nicht-Negativität der Entscheidungsvariablen. Die Nebenbedingung (4) zeigt die maximalen Kapazitätsbeschränkungen, die zu beachten sind.

Es ist zu berücksichtigen, dass ein fiktiver Anbieter bzw. Nachfrager, der sogenannte Dummy, eingefügt werden muss, der die restlichen Einheiten anbietet bzw. nachfragt, falls die Summe der Angebotsmengen nicht mit der Summe der Nachfragemengen übereinstimmt, also $\sum_i a_i \neq \sum_j b_j$. Die Kosten der Strecken zu diesem Anbieter/Nachfrager oder von ihm weg sind gleich 0.

o **Eröffnungsverfahren**

Verschiedene iterative Verfahren suchen erst mithilfe einer einfachen Eröffnungsheuristik eine zulässige Ausgangslösung (Basislösung) und versuchen dann, diese zu verbessern. Je mehr Rechenaufwand für die Eröffnungsverfahren angewendet wird, desto bessere Lösungen werden gefunden. Je näher also die Lösung der optimalen Lösung kommt, desto weniger Iterationen werden bei Verbesserungsverfahren benötigt. Jedoch ist es möglich, dass weder mit einem Eröffnungsverfahren, das die beste Anfangslösung findet, noch mit einem anderen Verfahren, das die geringste Rechenzeit hat, eine optimale Kombination zwischen Eröffnungs- und Verbesserungsverfahren gefunden wird.

Die Auswahl eines Eröffnungsverfahrens, das zwischen diesen beiden Extremen liegt, also eines, das weder die beste Lösung findet noch die kürzeste Rechenzeit benötigt, ist von Vorteil. Folgende Verfahren werden üblicherweise als Eröffnungsheuristik verwendet: Nord-West-Ecken-Verfahren, Rangfolgeverfahren, Spaltenminimum-Methode, Vogel'sche Approximationsmethode.

o **Verbesserungsverfahren**

Aus einer zulässigen Startlösung kann iterativ eine Optimallösung konstruiert werden. Als Verfahren kommen beispielsweise infrage: Stepping-Stone-Methode (Sprungbrettmethode), MODI-Methode (Modifizierte-Distributions-Methode).

Mit beiden Methoden wird bei einzelnen Zellen der Tabelle überprüft, ob eine Änderung eine Verbesserung der Kostensituation herbeiführt. Dabei pflanzt sich die Änderung in andere Zellen fort. Diese Änderungen können als geschlossener Kreis beschrieben werden. Es werden so oft Zellen geändert, bis keine Verbesserung mehr möglich und das Optimum erreicht ist. Die MODI-Methode führt in endlich vielen Schritten zu einer Optimallösung, wenn die oben genannten Bedingungen erfüllt sind. Mit ihr wird die optimale Lösung im Allgemeinen schneller gefunden als mit der Stepping-Stone-Methode.

o **Eröffnungsverfahren: Spaltenminimum-Methode**

Im Unterschied zu der einfachsten Methode (Nord-West-Ecken-Verfahren) werden bei der Spaltenminimum-Methode die Transportkosten berücksichtigt. In der Regel gibt es Eröffnungsverfahren, die bessere Lösungen liefern (z. B. Vogel'sche Approximationsmethode), jedoch hat die Spaltenminimum-Methode in Kombination mit der MODI-Methode erwiesen, dass sie effizient und relativ günstig ist.

Bezogen auf Aufwand und Ergebnis liegt diese Methode zwischen dem Nord-West-Ecken-Verfahren und der Vogel'schen Approximations-Methode.

Die Bedingung $\sum_i a_i = \sum_j b_j$ ist notwendig für eine zulässige Lösung, doch aufgrund der Kapazitätsrestriktionen nicht hinreichend. Dafür wird die Matrix durch die Einführung einer $(m+1)$ -ten Zeile und einer $(n+1)$ -ten Spalte erweitert. Für eine solche erweiterte Matrix existiert stets eine zulässige Lösung, dadurch erzeugte neue Variablen $x_{m+1,j}$ ($j = 1, \dots, n+1$)

und $x_{i,n+1}$ ($i = 1, \dots, m+1$) sogenannte Dummies. Die Werte für $a_{m+1} := b_{n+1} := \sum_{i=1}^m a_i$. Die Kosten für

die Dummies sind $c_{i,n+1} := c_{m+1,j} := M$ (für $i = 1, \dots, m$ und $j = 1, \dots, n$) sowie $C_{m+1,n+1} := 0$. Die

Kapazitätsbeschränkungen für die Dummies sind: $k_{i,n+1} := k_{m+1,j} := k_{m+1,n+1} := \sum_{i=1}^m a_i$.

Vorgehensweise: Gegeben seien die Angebotsmengen (a_i), die Nachfragemengen (b_j) und die Kostenmatrix (c_{ij}).

Schritt 1: Aufstellung der Transportmatrix.

Schritt 2: $z := 1$

Schritt 3: Auswahl des kleinsten Kostenelementes c_{ij} der z -Spalte. (Falls es mehr als ein Minimum gibt, wird das Element mit dem kleinsten Zeilenindex ausgewählt).

Schritt 4: Einsetzen des dazugehörigen Elementes in die Transportmatrix, d. h. $x_{ij} = \min\{a_i, b_j, k_{ij}\}$.

Schritt 5: Aktualisierung von a_i und b_j wie folgt: $a_i := a_i - x_{ij}$; $b_j := b_j - x_{ij}$.

Schritt 6: Wenn $b_j = 0$ wird die Spalte gestrichen. Wenn $a_i = 0$ und $b_j \neq 0$ wird die Zeile gestrichen. Können Zeile i und Spalte j gestrichen werden, so ist x_{ij} eine Basisvariable, ansonsten ist $x_{ij} = k_{ij}$ eine gesättigte Nichtbasisvariable. Das Element x_{ij} wird dann von k_{ij} bestimmt.

Schritt 7: $z := z + 1$

Schritt 8: Sind alle n Spalten überprüft, wird $z := 1$ aktualisiert, sonst weiter mit Schritt 9.

Schritt 9: Sind n Spalten gestrichen, weiter mit Schritt 10, sonst weiter mit Schritt 3.

Schritt 10: Überprüfung von Spalte $n+1$. In jeder noch nicht gestrichenen Zeile i wird $X_{i,n+1} := a_i$ gesetzt und die Zeile gestrichen.

Schritt 11: Sind alle Zeilen gestrichen (unter den Spalten bleibt nur Spalte $n+1$ ungestrichen), weiter mit Schritt 12, sonst weiter mit Schritt 10.

Schritt 12: Der Zielfunktionswert wird berechnet (siehe Abbildung 5.19).

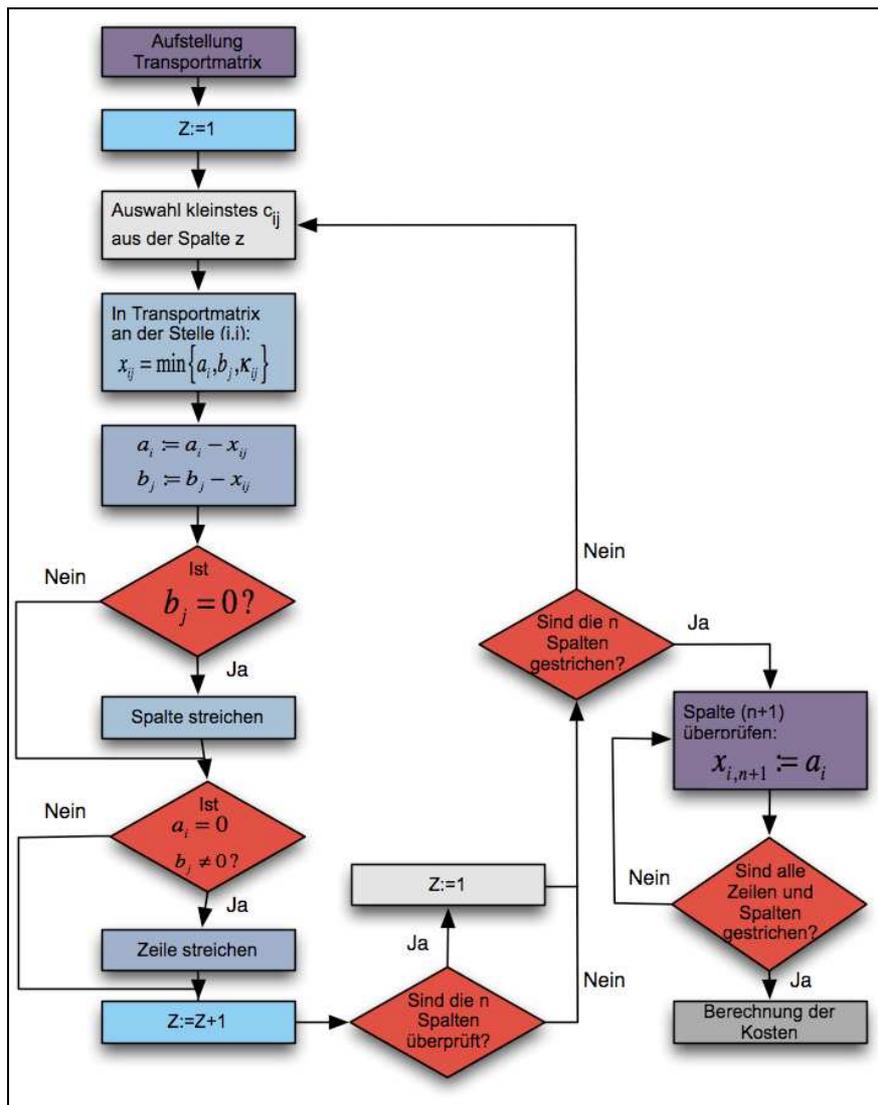


Abbildung 5.19: Flussdiagramm der Spaltenminimum-Methode

o **MODI-Methode**

Die MODI-Methode ist ein Verbesserungsverfahren für klassische Transportprobleme. Der Satz des komplementären Schlupfs wird benötigt, der besagt, dass eine zulässige Lösung für ein primales Modell (lineares Programm) und eine zulässige Lösung für ein duales Modell genau dann optimal sind, wenn das Produkt aus der Schlupfvariablen und der zugehörigen Dualvariablen 0 ist. Das muss für alle Restriktionen gelten. Zunächst wird das duale Modell vorgestellt:

$$\max \sum_{i=1}^m a_i u_i + \sum_{j=1}^n b_j v_j - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n k_{ij} w_{ij} \quad (5-29)$$

unter folgenden Nebenbedingungen:

$$u_i + v_j - w_{ij} \leq c_{ij} \quad \text{für alle } (i, j) \in E \quad (5-30)$$

$$w_{ij} \geq 0, \quad u_i \text{ und } v_j \in \mathbb{R} \quad \text{für alle } (i, j) \in E \quad (5-31)$$

Der Wert der Schlupfvariablen für (2) wird wie folgt berechnet:

$$c_{ij} - u_i - v_j \quad (5-32)$$

Optimalitätsbedingung:

$$x_{ij} \times (c_{ij} - u_i - v_j) = 0 \quad (5-33)$$

Gegeben seien eine zulässige Lösung, ein Zielfunktionswert und die Kostenmatrix $C=(c_{ij})$.

Zur Ermittlung der optimalen Lösungen wird von einer zulässigen Lösung ausgegangen, die mithilfe der Spaltenminimum-Methode berechnet wird.

Vorgehensweise:

Schritt1: Tableauerstellung: Hier werden zunächst lediglich die gelieferten Mengen (Basisvariablen) aus einem der Eröffnungsverfahren eintragen: Statt a_i und b_j werden u_i und v_j eingetragen.

Schritt 2: U_i und V_j werden bestimmt: Ein beliebiger Eintrag wird =0 gesetzt. Die restlichen u_i und v_j werden über die Formel $c_{ij} - u_i - v_j = 0$ bestimmt, allerdings gilt dies nur für die Stellen, an denen im Tableau eine Menge steht (c_{ij} sind Werte der Kostenmatrix).

Schritt 3: Reduzierte Kosten werden berechnet:

- Über die Formel $c_{ij} - u_i - v_j$ werden die restlichen noch freien Stellen bestimmt.
- Gibt es negative reduzierte Kosten, so ist die Lösung noch nicht optimal, zur Optimierung betrachten wir den kleinsten dieser Werte.

Schritt 4: Kreisbildung:

- Ausgehend von dem in Schritt 3 gefundenen kleinsten Wert wird ein Kreis gebildet.
- Abgesehen von diesem einen Wert, dürfen nur Basisvariablen (Mengen), also keine weiteren reduzierten Kosten, im Kreis vorhanden sein, außerdem stellt dieser Wert sowohl den Anfang als auch das Ende des Kreises dar.
- Sprung, ausgehend von der betrachteten Stelle innerhalb einer Zeile oder Spalte, zu einer Basisvariablen. Enthält weder die Spalte noch die Zeile weitere Basisvariablen, muss ein anderer Weg gewählt werden, da der Kreis nicht geschlossen werden konnte.
- Die einzelnen Komponenten des Kreises werden abwechselnd mit d- und d+ versehen, der zu optimierende Startpunkt erhält ein d+. Daraus folgt, dass der Kreis eine gerade Anzahl von Komponenten enthalten muss.

Schritt 5: Basisvariablentausch:

- Als im Folgenden zu betrachtende Menge wird das Minimum aller mit d- versehenen Basisvariablen gewählt.
- Diese Menge wird bei allen Komponenten des Kreises mit d+ hinzuaddiert und bei allen mit d- subtrahiert (Erstellung eines neuen Tableaus).
- Der zu optimierende Punkt mit den negativen Kosten erhält genau diese Menge, da hier vorher eine Menge 0 stand.
- An der Stelle mit dem Minimum aller mit d- versehenen Basisvariablen steht nun theoretisch die Menge 0, sie wird jedoch nicht eingetragen, sondern hier stehen später reduzierte Kosten

Schritt 6: Wiederholung:

- Zurück zu Schritt 1 mit einer verbesserten Ausgangslösung.
- Sämtliche Schritte werden so lange wiederholt, bis es keine negativen reduzierten Kosten mehr gibt. Existiert zum Schluss ein Eintrag 0 in den reduzierten Kosten, gibt es eine weitere optimale Lösung, die gefunden wird, wenn wieder über diesen Punkt optimiert wird.

5.5.3 Knotenorientierte Modellbildung und Simulation

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Planungswerkzeug konzipiert und erläutert, das es ermöglicht, auf der Basis von abfragbaren Datensätzen Energy Supply Chains zu designen. Dazu gehört die Entwicklung von Logistikkonzepten (Kapitel 6) zur qualitätsgerechten Sammlung der Biomasse, gegebenenfalls über Umschlagpunkte, das Verbringen der Biomasse an zentrale oder dezentrale Verarbeitungsstellen zur Umwandlung in Biogas und die Zuführung der Energie an Verbraucher durch Verstromung, Wärmeeinspeisung oder Bereitstellung als Gas zur dezentralen Versorgung.

Insbesondere die Betrachtung der Abfallentsorgung und die Möglichkeiten zur interkommunalen Kooperation, wie sie im Städtedreieck Duisburg–Mülheim a. d. Ruhr–Oberhausen exemplarisch vorgeplant wurde, sowie Wechselwirkungen und Rückkopplungseffekte zwischen Stadtnutzungssystemen und Ökosystemdienstleistungen, z. B. beim Aufbau und Betrieb neuer Biogasanlagen und der Erbringung neuer Dienstleistungen für die Sammlung und Aufbereitung von biogenen Abfällen von unterschiedlichen Quellen, beispielsweise von Hotels, Krankenhäusern, Restaurants und privaten Haushalten, spielen eine zentrale Rolle in dieser Arbeit.

In diesem Abschnitt wird der Bioabfalltransport von ausgewählten Städten mithilfe des knotenorientierten Algorithmus (Kapitel 5.5) untersucht. Das Untersuchungsgebiet (Kapitel 4.1) besteht aus Duisburg, Oberhausen und Mülheim a. d. Ruhr mit deren Sammelpunkten. Die Grundlagen für die Berechnungen der Fahrstrecken werden gelegt sowie die Simulation mit den vorgenommenen Einstellungen und den notwendigen Dateneingaben erläutert.

Für die verschiedenen Modelle des Abfalltauses müssen eine Vielzahl von Daten der komplexen Anfangssituation der Abfallströme und deren Parameter (Quelle, Senke, Abfallart und –menge) verarbeitet werden. Für die Routensimulation der Transporte wurden die Quellen der Abfallströme in einer Datenbank hinterlegt. Die Adressen der Senken (z. B. Biogasanlagen, Duisburg, Oberhausen, Mülheim) wurden ebenfalls eingefügt.

Die nachfolgende Abbildung 5.20 ist eine Einführung des Modellbildungs- und Simulationsablaufs. Das Herz dieses Ablaufprozesses bilden die Daten: die Tourenanzahl bezüglich der Containersammelplätze, die Tourenstrecke, die Abfallmenge pro Touren usw. Die Erfassung erfolgt über Tabellen, Diagramme und Abbildungen, um die Qualität der Daten zu maximieren. Die Daten werden für die Analyse der Sammellogistik und die ökologische und ökonomische Bewertung benötigt.

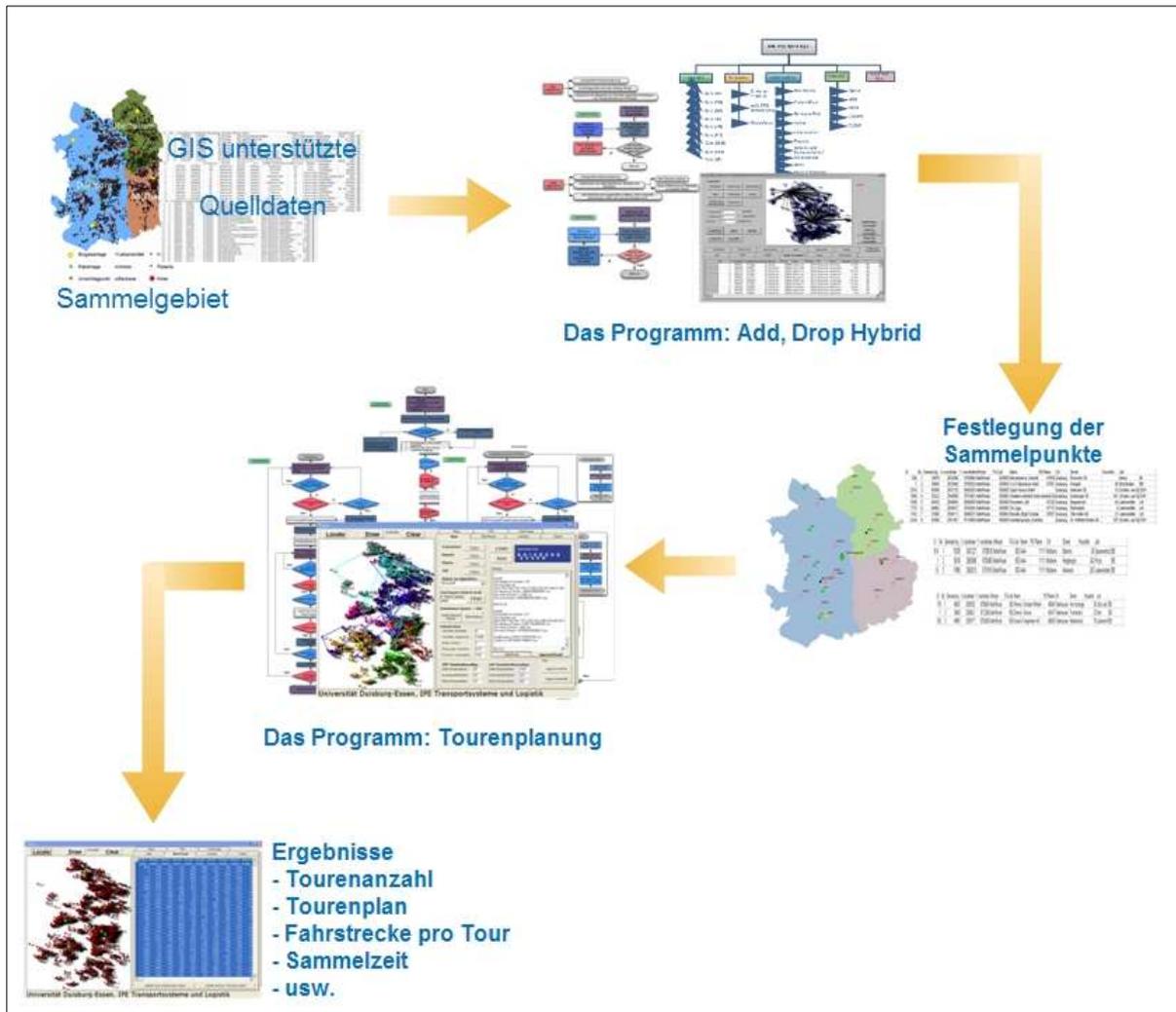


Abbildung 5.20: Knotenorientierte Modellbildung und Simulation

● **Quelldaten (Knotendaten)**

Über eine effiziente Tourenplanung werden die sinnvollen Ladepunkte ermittelt, z. B. unter Beachtung der vorgegebenen Bioabfallmenge pro Sammelturnus, nach geografischen Aspekten und nach Kundengruppe und Kundenname. Wie im Kapitel 4 „Datenbasis und Diskussion“ erwähnt, werden die Daten der Bioabfälle aus den Gewerbebetrieben erfasst und bei der knotenorientierten Simulation als grundlegende Inputdaten verwendet. Nach der Bearbeitung ergibt sich die folgende Excel-

Tabelle 5.3. Hier wird ein Teil der gewerblichen Ladepunkte in Duisburg angezeigt. Eine weitere Tabelle für Duisburg und die Städte Oberhausen und Mülheim befindet sich im Anhang.

Tabelle 5.3: Gewerbliche Standorte in Duisburg

Nummer	Koordinaten [x]	Koordinaten [y]	Menge [kg]	Postleitzahl	Ort	Straße	Tätigkeit
1	2553640	5700028	88	47051	Duisburg	Königstr.	Bäckerei
2	2552839	5700278	91	47051	Duisburg	Münzstr.	Bäckerei
3	2555060	5698385	77	47057	Duisburg	Mozartstr.	Bäckerei
4	2553571	5703911	97	47137	Duisburg	Von-der-Markt	Bäckerei
5	2552839	5700278	88	47051	Duisburg	Münzstr.	Bäckerei
6	2551040	5704989	93	47139	Duisburg	Friedrich-Ebert	Bäckerei
7	2554463	5698986	73	47057	Duisburg	Neudorfer Str.	Bäckerei
8	2552449	5710526	95	47179	Duisburg	Sonnenstr.	Bäckerei
9	2553855	5699822	77	47051	Duisburg	Mercatorstr.	Bäckerei
10	2552221	5708189	77	47169	Duisburg	Weseler Str.	Bäckerei
11	2551522	5706356	85	47166	Duisburg	Reinerstr.	Bäckerei
12	2550839	5699992	70	47059	Duisburg	Essenberger	Bäckerei
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
2500	2553022	5699994	91	47051	Duisburg	Sonnenwall	Imbiss

● Festlegung der Sammelpunkte

Wie im Kapitel 5.5.1 erwähnt, werden die Sammelpunkte mithilfe eines hybriden ADD/DROP-Algorithmus festgelegt. Hier werden sie durch die Simulation bestimmt. Die Abbildung 5.21 zeigt ein ADD/DROP-Hybrid-Programm zur Verwendung der Festlegung der Umschlagpunkte.

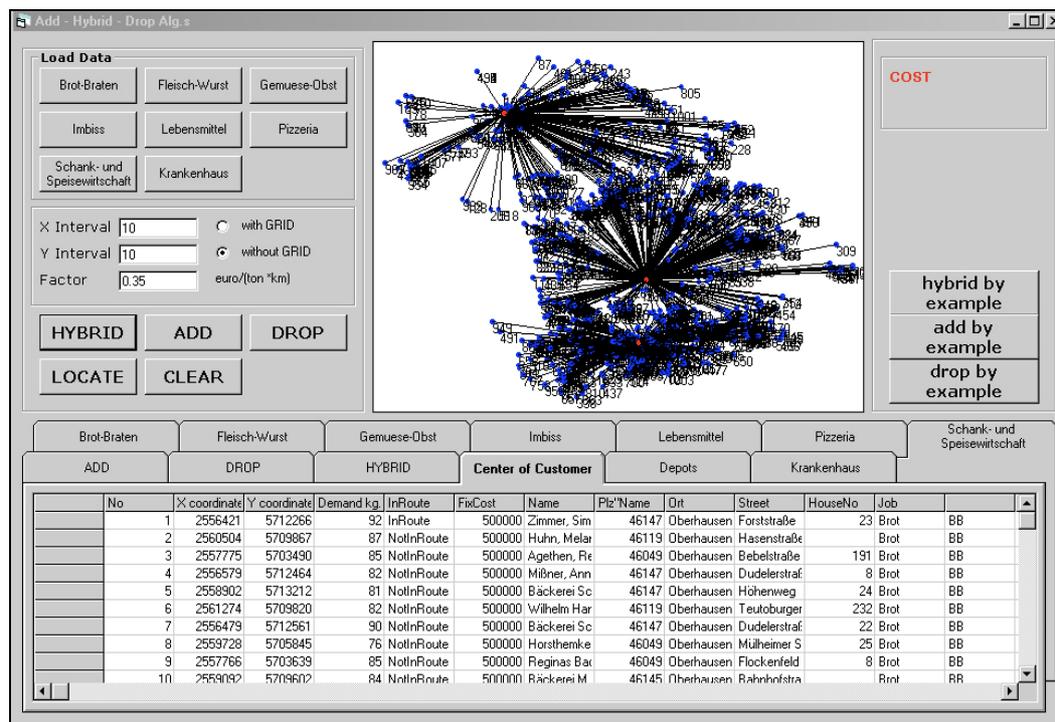


Abbildung 5.21: ADD/DROP-Hybrid-Programm zur Festlegung der Umschlagpunkte

Im oberen linken Fenster (Load Data) werden die unterschiedlichen Quellen aus der Excel-Datenbank ausgewählt. Die Auswahl der Umladestationen erfolgt mit oder ohne den Einsatz von GRID, das in manchen Fällen die Berechnung und Verarbeitung der Daten erheblich reduziert, da es bestimmte Knoten innerhalb eines gegebenen Bereiches verbindet und so die Anzahl der zu betrachteten Knoten reduziert. Die Ergebnisse (Umschlagpunkte) werden grafisch anhand der Programmierung der drei Verfahren (ADD, DROP, Exchange) dargestellt. Im unteren Fenster werden tabellarisch sowohl die Daten der unterschiedlichen

Quellen und Verfahren als auch die Ergebnisse dargestellt. Anschließend werden im oberen rechten Fenster die Kosten für die Einrichtungen der Umladestationen dargestellt. Folgendes Flussdiagramm gibt einen besseren Überblick über das Programm (Abbildung 5.22):

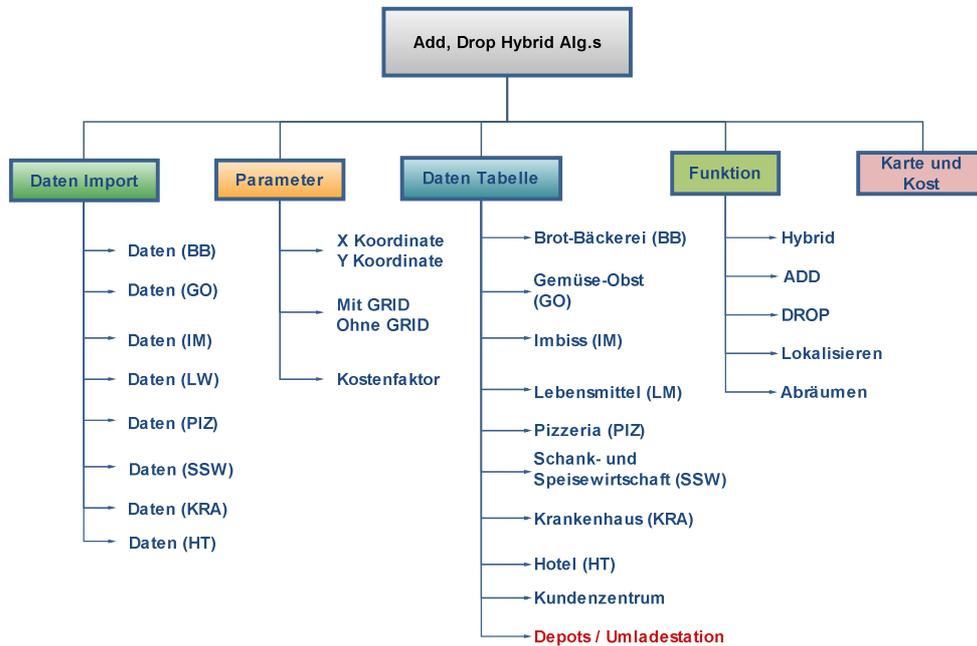


Abbildung 5.22: Flussdiagramm des ADD/DROP-Hybrid-Programms

Die Simulation in der ersten Phase ergibt bis zu 14 Sammelpunkte verteilt auf die drei Städte. Die Tabelle 5.4 bis Tabelle 5.6 zeigen die berechneten Sammelpunkte in jeder Stadt mit Koordinaten und gesammelten Abfallmengen.

Tabelle 5.4: Sammelpunkte in Duisburg

ID	Abfall (kg)	X Koordinaten	Y Koordinaten	Stadt	Straße	Nr.	Kunden- gruppen
SGD1	18678	2552568	5700698	D.	Ruhrorter Str.		IM
SGD2	39850	2553640	5700028	D.	Königstr.	56	BB
SGD3	45596	2551725	5695200	D.	Kalkumer Str.	10	SSW
SGD4	35222	2548800	5701991	D.	Duisburger Str.	241	SSW
SGD5	40543	2548804	5696858	D.	Beguinenstr.	49	LM
SGD6	64882	2554017	5704284	D.	Reinholdstr.	9	LM
SGD7	37994	2554111	5699527	D.	Otto-Keller-Str.	21	LM
SGD8	43856	2551361	5710589	D.	Dr.-Wilhelm-Roelen-Str.	397	SSW

Tabelle 5.5: Sammelpunkte in Oberhausen

ID	Abfall (kg)	X Koordinaten	Y Koordinaten	Stadt	Strasse	Nr.	Kunden- gruppen
SGO9	48631	2559333	5706504	O.	Am Kaisergarten	30	BB
SGO10	30462	2556421	5712266	O.	Forststraße	23	BB
SGO11	49967	2559177	5704300	O.	Marktstraße	75	BB

Tabelle 5.6: Sammelpunkte in Mülheim

ID	Abfall (kg)	X Koordinaten	Y Koordinaten	Stadt	Straße	Nr.	Kunden- gruppen
SGM12	73039	2561227	5700010	M.	Bahnstr.	36	BB
SGM13	13618	2563048	5700405	M.	Hingbergstr.	242	BB
SGM14	17960	2563013	5701915	M.	Aktienstr.	263	BB

- Fahrzeugstammdaten

In die Fahrzeugstammdaten werden die Parameter „Zeitfaktor“ und „Geschwindigkeit“, welche direkten Einfluss auf die Simulationswerte besitzen, eingegeben. Die Geschwindigkeitsbegrenzungen für die Straßenarten (Autobahn, Bundes-, Land- und Stadtstraße) besitzen keinen Einfluss auf den Routenablauf, sondern nur auf die Fahrzeit. Für die Sammlung wurde LKWs von 8 Mg Kapazität eingesetzt.

- Routensimulation

Auf der Grundlage der umfassenden Datenbank aus Werk-, Quellen- und Fahrzeugstammdaten werden definierte Transportrouten berechnet. In Abbildung 5.23 ist die Eingabemaske für die Routensimulation abgebildet. In der Menüleiste „Stationen“ können Tabellen in einem Excel-Pfeil, unter anderem Quellen (Gewerbe) und Depots (Sammelpunkte), aus den entsprechenden Stammdaten gewählt und eine Route berechnet werden. Die Ergebnisse dieser Berechnung (Entfernung, Transportkosten, Fahrleistung) werden in der Abbildung 5.20 im unteren linken Fenster tabellarisch aufgeführt und in der Abbildung 5.23 im linken Fenster grafisch dargestellt.

Nach Bedarf können weitere Alternativrouten berechnet und tabellarisch und grafisch dargestellt werden. Die Grundlage für die komplexe Routensimulation bildet die Entfernungsberechnung von allen Sammelgebieten der Untersuchungsgebiete zu den Sammelpunkten und die Entfernung zwischen Sammelgebieten und den Biogasanlagen des jeweiligen Untersuchungsgebietes mit dem beschriebenen Softwareprogramm. Als Bezugspunkt für die Entfernungsberechnungen wurden die Sammelpunkte der Sammelgebiete der Städte gewählt. Beim Umschlag der Abfälle wurden die Anteile der Primärtransporte von den Sammelgebieten der Städte zu den Umladestationen und die Anteile der Primärtransporte von den Umladestationen zu den Biogasanlagen addiert.

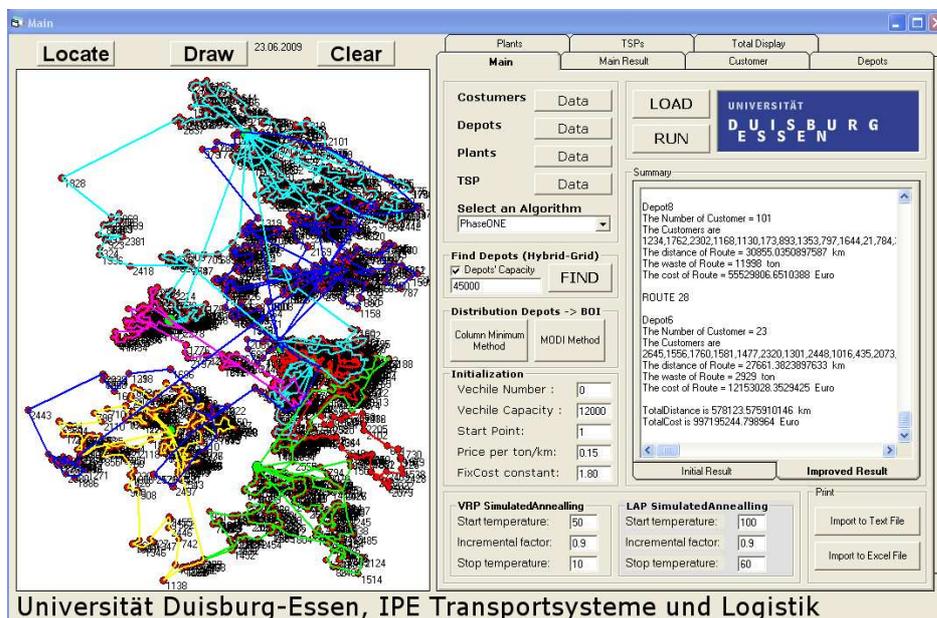


Abbildung 5.23: Das Programm zur Tourenplanung

5.5.4 Auswertung der knotenorientierten Simulationsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Simulation mithilfe des Tourenplanungstools ausgewertet. Die Zahl der benötigten Touren wird in Verbindung mit den festgelegten Sammelpunkten bei einem 14-tägigen Sammelzyklus berechnet. Die untersuchten drei Städte sind in 71 Touren aufgeteilt. Die Abbildung 5.24 zeigt die unterschiedlichen Sammelgebiete der drei Städte und die Tourenanzahl.

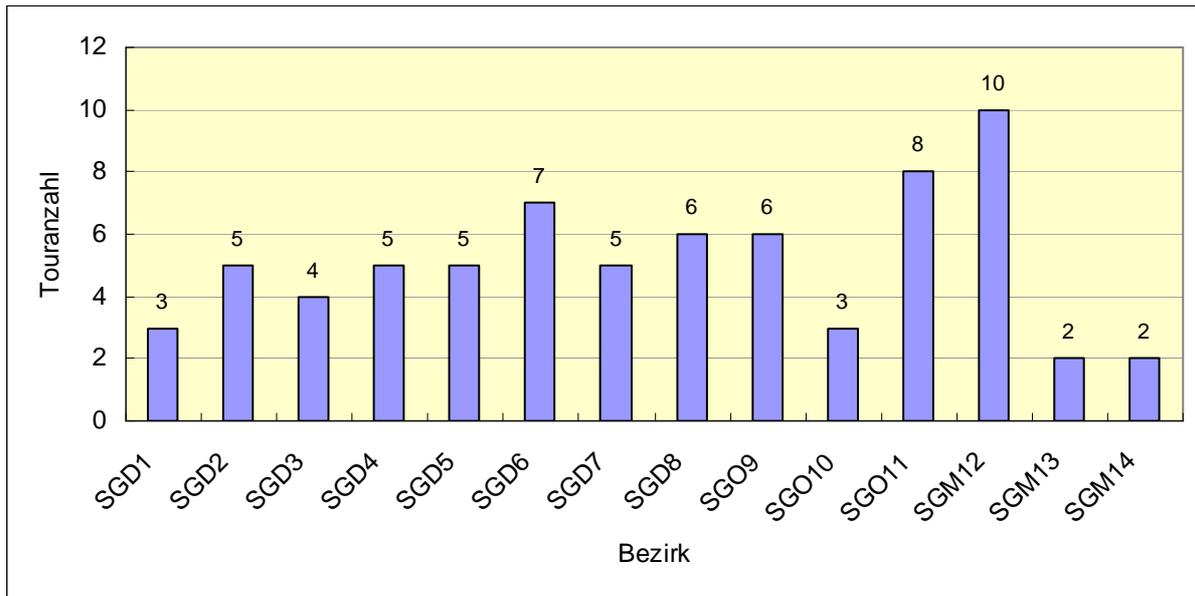
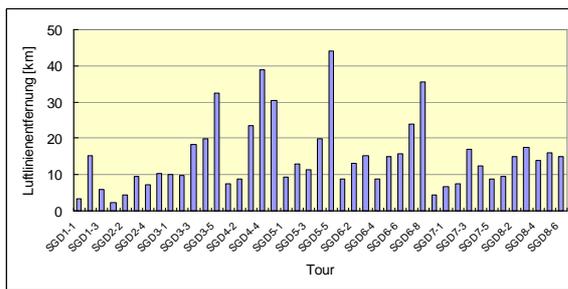
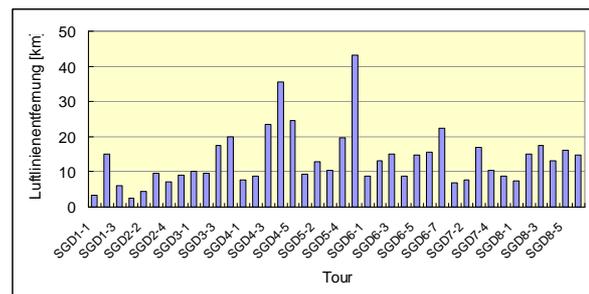


Abbildung 5.24: Tourenanzahl der Sammelbezirke

Von Abbildung 5.25 bis Abbildung 5.27 ist die Luftlinienentfernung jeder Tour berechnet und die initiale und die beste Lösung sind zum Vergleich gegenübergestellt. Um die Luftlinienentfernung im Vergleich zur realen Entfernung zu berechnen, wird hier der Faktor 1,34 angenommen und mit den jeweiligen Routenentfernungen multipliziert.



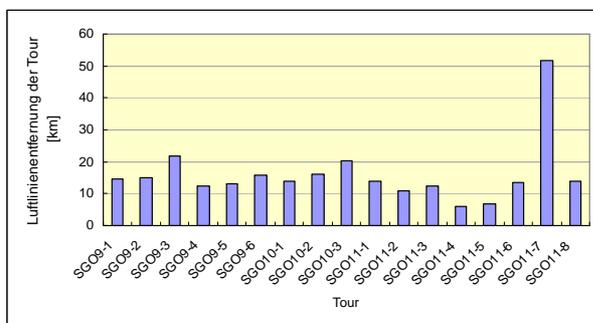
Initiärlösung



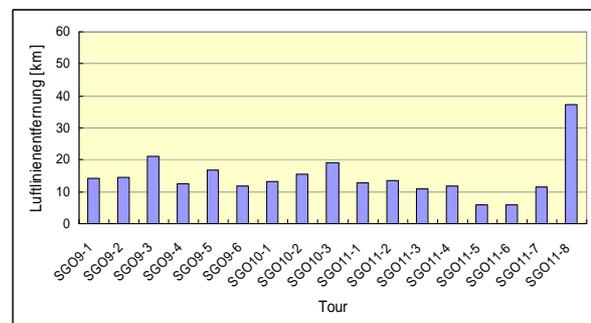
Beste Lösung

Duisburg

Abbildung 5.25: Initiale und beste Lösungen der Routen in Duisburg



Initiärlösung



Beste Lösung

Oberhausen

Abbildung 5.26: Initiale und beste Lösungen der Routen in Oberhausen

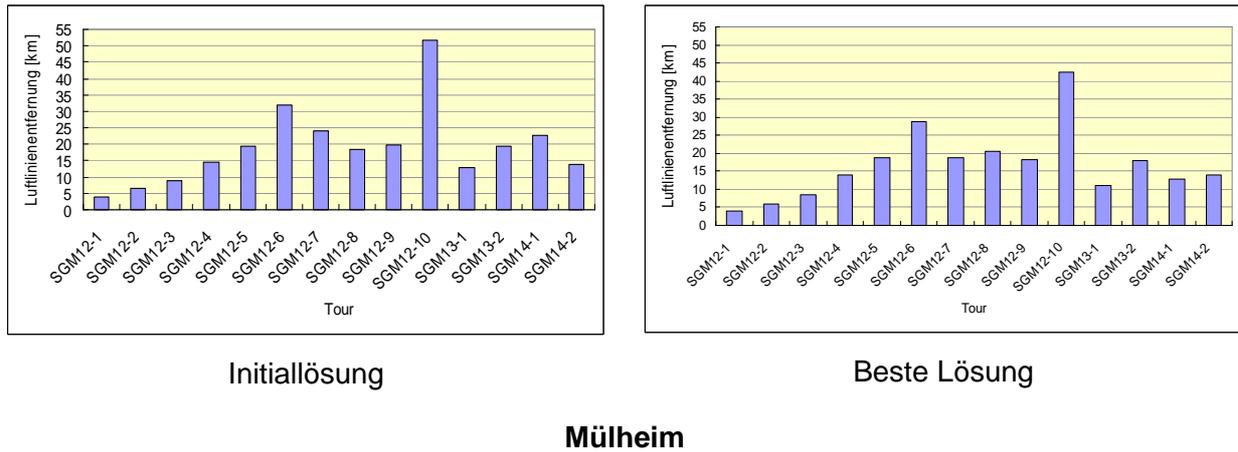


Abbildung 5.27: Initiale und beste Lösungen der Routen in Mülheim

In Abbildung 5.28 lassen sich die Simulationsergebnisse zwischen den Initial- und Bestlösungen der drei Städte vergleichen. Nach der Tabu Search-Heuristik kann die gesamte reale Fahrstrecke um 124,36 km in Duisburg, 32,76 km in Oberhausen und 43 km in Mülheim reduziert werden.

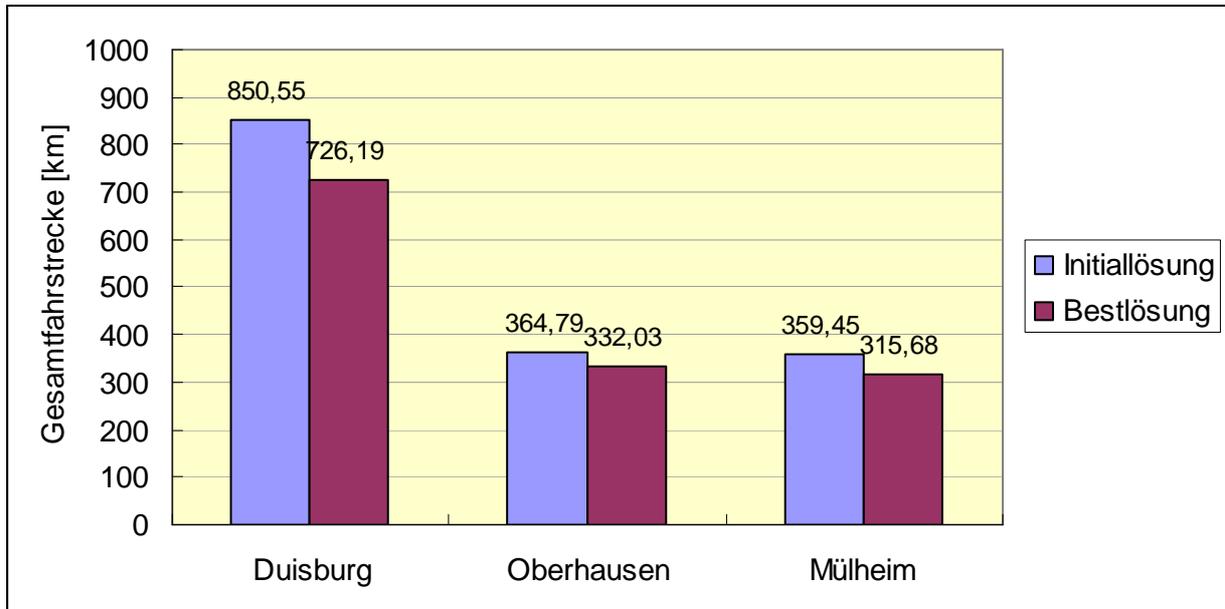


Abbildung 5.28 Gesamttourlänge der drei Städte

In Abbildung 5.29 bis Abbildung 5.31 sind die Tourlänge und das Sammelgewicht der einzelnen Touren für Duisburg, Oberhausen und Mülheim gegenübergestellt.

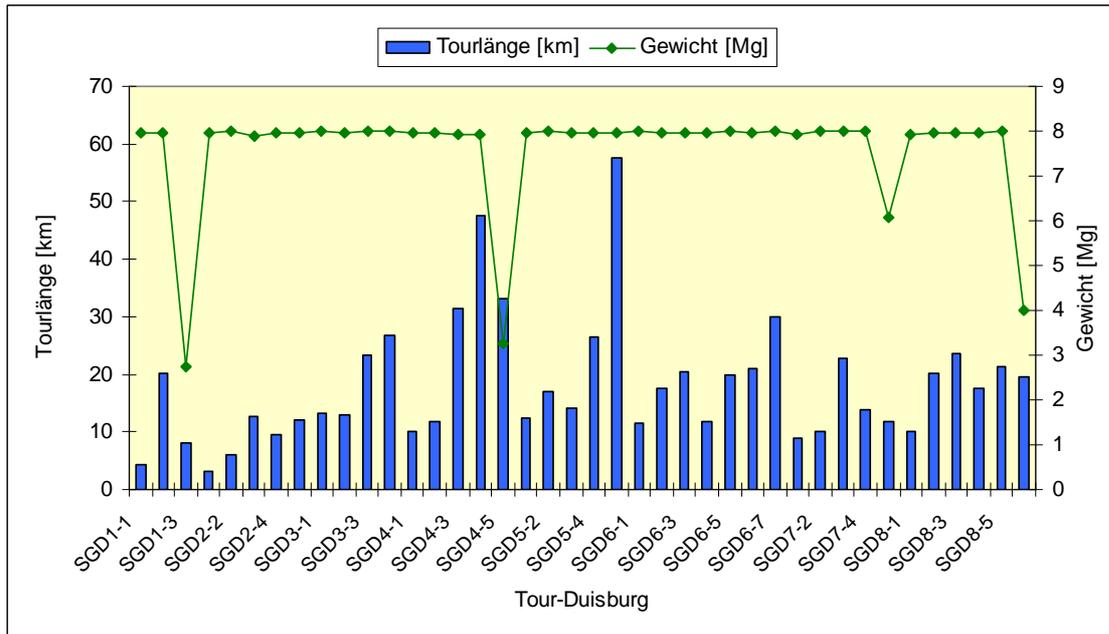


Abbildung 5.29: Tourlänge und Sammelgewichte pro Tour in Duisburg

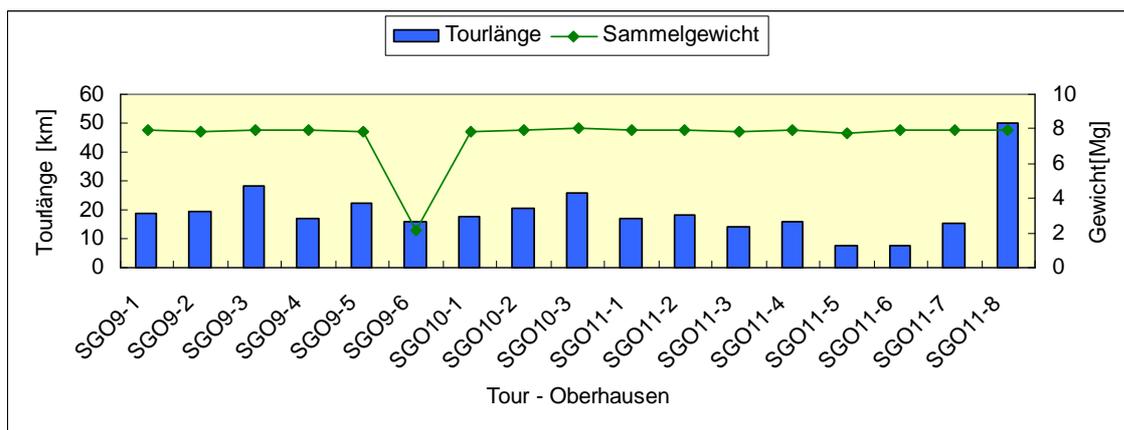


Abbildung 5.30: Tourlänge und Sammelgewichte pro Tour in Oberhausen

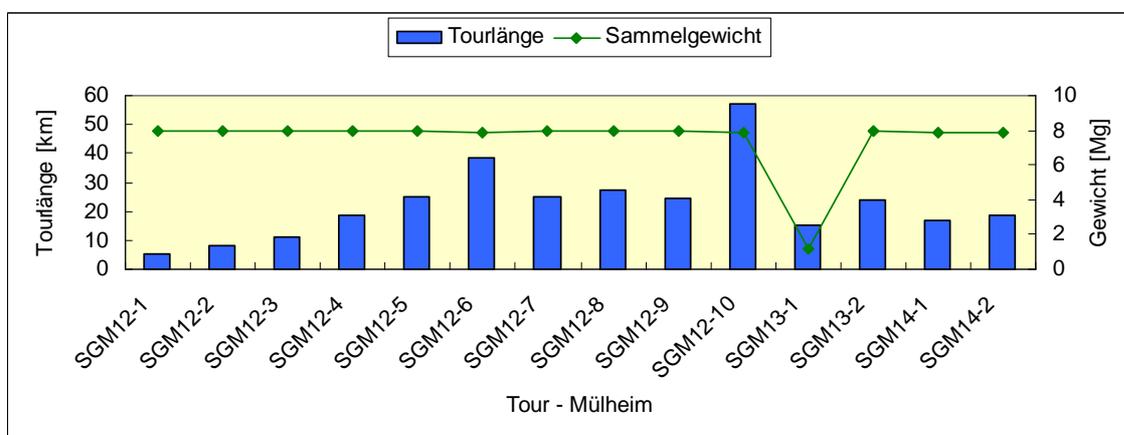


Abbildung 5.31: Tourlänge und Sammelgewichte pro Tour in Mülheim

In diesen drei Abbildungen wird ersichtlich, dass die Sammelmenge einer Tour deutlich niedriger ist als die Fahrzeugkapazität. In Kapitel 7 wird eine ökonomische Bewertung

anhand der Sammelmenge durchgeführt und ein abfallmengenbezogener Kostensatz je nach Fahrstrecke bestimmt. Eine zu niedrige Sammelmenge für eine Tour kann zur Unwirtschaftlichkeit führen. In Mülheim z. B. beträgt die Abfallmenge der Tour 14 1,17 Mg. Für solche Fälle ist eine Transportkostenberechnung mit dem Kostensatz €/Mg nicht geeignet. Für die Anwendung des Kostensatzes €/Mg für ein (WC-) Sammelfahrzeug muss die Sammelmenge größer sein als ein Grenzwert, der bei der Definition des Kostensatzes benutzt wird. Die Mindestabfallmenge 7 Mg wird in Kapitel 7 verwendet, um den Kostensatz zu ermitteln. Für eine kleinere Abfallmenge ist dieser Kostensatz ungültig.

In Abbildung 5.33 ist der Gesamtzeitaufwand jeder Stadt gegenübergestellt. Mit dem Hecklader 1+2 ist er für jede Stadt am kürzesten.

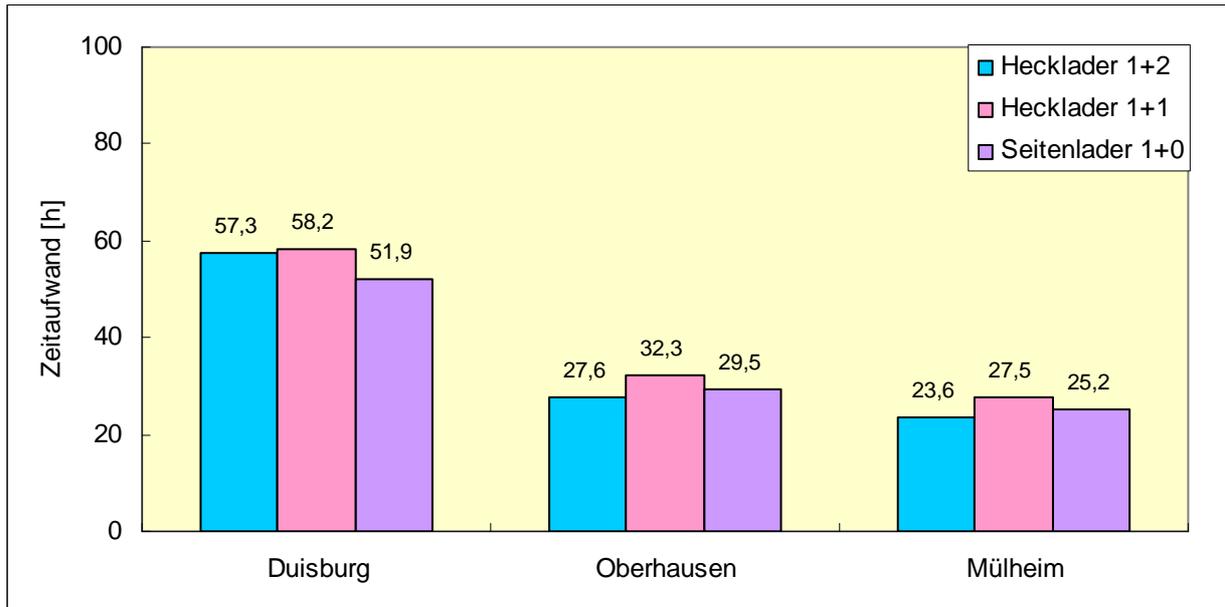


Abbildung 5.32: Gesamtzeitaufwand für verschiedene Szenarien

Abbildung 5.33 zeigt die Zeitaufwände der einzelnen Touren mit dem Hecklader 1+2 in drei Städten. Die durchschnittliche Zeitdauer pro Tour lag bei 1,43 Stunden in Duisburg, 1,62 Stunden in Oberhausen und 1,68 Stunden in Mülheim (alle weiteren Informationen befinden sich im Anhang).



Abbildung 5.33: Zeitaufwand der einzelnen Touren in drei Städten

5.6 Kantenorientierte Methode und Ansätze

Tourenprobleme bei der Hausmüllsammmlung lassen sich in die Reihe der Lieferplanprobleme einordnen. Für die Hausmüllsammmlung in Siedlungsgebieten ist also ein kantenorientierter Ansatz zu wählen. Die kantenorientierten Tourenplanungsprobleme zielen auf das Finden einer kürzesten Tour durch eine Kantenuntermenge eines Graphen mit oder ohne Restriktionen. Typische Anwendungen finden sich z. B. bei der Abholung von Haushaltsmüll, der Postzustellung oder der Schneeräumung. Die Bedingungen für die Existenz eines solchen Weges wurden von Euler selbst aufgestellt. Einen Graphen, in dem eine Tour existiert die jede Kante genau einmal enthält, bezeichnet man als Eulergraphen. Wenn nicht alle Kanten eines Graphen bedient werden müssen, spricht man von einem Rural Postman-Problem (RPP). Die Namensgebung erfolgte aufgrund der Tatsache, dass in ländlichen Gebieten weniger Bedienpunkte vorhanden sind und diese damit nicht die komplette Kantenmenge abdecken[94].

Als eine weitere Generalisierung des RPP wurde das Capacitated Arc Routing-Problem (CARP) von Gold und Wong (1981) eingeführt. Im CARP ist jede Kante einer nicht negativen Bewertung zugeordnet. Alle Kanten mit einer Bewertung müssen von einer Flotte von identischen Fahrzeugen mit Kapazitätsbeschränkung von einem gemeinsamen Start- und Endpunkt (Depot) entsorgt werden.

5.6.1 Mathematisches Modell der kantenorientierte Methode

Es erfolgt zunächst eine formale Beschreibung eines bestehenden Tourenplans mit dem Ziel einer mathematischen Formulierung des Entsorgungsprozesses. Das Modell kann u. a. dazu genutzt werden, den ökonomischen Gesamtaufwand eines Tourenplans zu berechnen.

Das Ziel ist es, die Transportkosten der Touren für die Periode P zu minimieren.

$$\text{Min} \left(\sum_{p=1}^P \sum_{[i,j] \in E} \sum_{v=1}^V C_{ij} \cdot x_{ijvp} \right) \quad (5-34)$$

$$C = \sum_{[i,j] \in E} \sum_{v=1}^V C_{ij} x_{ijv} = C_{\text{fix}} + C_t + C_s \quad (5-35)$$

$$C_{\text{fix}} = \frac{C_{\text{fix}}^a}{P_a} \quad (5-36)$$

$$C_t = \alpha_{\text{time}} \cdot \sum_{v=1}^V \left(t_v^{\text{Lade}} + t_v^{\text{Zwischenfahrt}} + t_v^{\text{Umfahrt}} + t_v^{\text{Entleer}} + t_v^{\text{Sonder}} \right) \quad (5-37)$$

$$C_s = \alpha_{\text{kilo}} \cdot \sum_{v=1}^V \left(\text{Dis}_v^{\text{zf}} + \text{Dis}_v^{\text{uf}} \right) \quad (5-38)$$

$$\text{Dis}_v^{\text{zf}} = \beta \cdot (\text{Dis}_v - \text{Dis}_v^{\text{uf}}) \quad (5-39)$$

$$\beta = \begin{cases} 1,7 & \text{für Hecklader} \\ 2,2 & \text{für Seitenlader} \end{cases} \quad (5-40)$$

$$t_v^{\text{time}} = t_v^{\text{Lade}} + t_v^{\text{Zwischenfahrt}} + t_v^{\text{Umfahrt}} + t_v^{\text{Entleer}} + t_v^{\text{Sonder}} \quad (5-41)$$

$$t_v^{\text{Lade}} = \begin{cases} 7 \cdot \text{MGB}_v + 12 \cdot \text{LP}_v & (\text{Hecklader1+1}) \\ 16,5 \cdot \text{MGB}_v + 13,3 \cdot \text{LP}_v & (\text{Hecklader1+2}) \\ 16 \cdot \text{MGB}_v & (\text{Seitenlader1+0}) \end{cases} \quad (5-42)$$

$$t_v^{\text{Umfahrt}} = \frac{\text{DIS}_v^{\text{uf}}}{v^{\text{Umfahrt}}} \quad (5-43)$$

Bebauungsstruktur 1 und 2 (BS 1-2):

$$t_v^{\text{Zwischenfahrt}} = 132,4 \cdot \left(\frac{\text{DIS}_v^{\text{zf}}}{\text{LP}_v} \right)^{0,5} \cdot \text{LP}_v \quad (5-44)$$

Bebauungsstruktur 3 bis 5 (BS 3-5):

$$t_v^{\text{Zwischenfahrt}} = \left(14,1 \cdot \text{LN} \left(\frac{\text{DIS}_v^{\text{zf}}}{\text{LP}_v} \right) + 61,6 \right) \cdot \text{LP}_v \quad (5-45)$$

$[i, j]$	eine Kante $[i, j]$ (Straße)
p	Anzahl der Sammeltournusse
P	Gesamtanzahl der Sammeltournusse
v	Anzahl der Touren
V	gesamte Tourenanzahl
$[i, j] \in E$	alle Kanten in Graph G werden berücksichtigt für die Minimierung der Gesamtkosten der Touren
C_{ij}	Transportkosten der Kanten $[i, j]$
x_{ijvp}	1, wenn die Kanten $[i, j]$ über die Tour v im Sammeltournus p durchquert werden, sonst 0
C	gesamte Transportkosten für einen Sammeltournus/Tourenplan
C_{fix}	Fixkosten des Fahrzeuges
C_t	zeitabhängige Sammel- und Transportkosten
C_s	kilometerabhängige Transportkosten
P_a	Anzahl der Sammeltournusse pro Jahr (z. B. $P_a = 26$, dann ist Sammeltournus 2 wöchentlich)
C_{fix}^a	jährliche Fixkosten des Fahrzeuges
α_{time}	zeitabhängiger Kostensatz (€/h)
α_{kilo}	kilometerabhängiger Kostensatz (€/km)
t_v^{time}	Zeitdauer einer Tour (h/Tour)
t_v^{Lade}	Ladezeit der Tour v
t_v^{Umfahrt}	Umfahrtzeit der Tour v
$t_v^{\text{Zwischenfahrt}}$	Zwischenfahrzeit der Tour v
t_v^{Entleer}	Entleerzeit der Tour v

t_v^{Sonder}	Sonderzeit der Tour v
v^{Umfahrt}	Geschwindigkeit der Umfahrt
Dis_v^{uf}	Umfahrtstrecke der Tour v
Dis_v^{zf}	Zwischenfahrtstrecke der Tour v
β	Umrechnungsfaktor zwischen Straßenlänge und Zwischenfahrtstrecke
LP_v	Ladepunktanzahl der Tour v
MGB_v	Behälteranzahl der Tour v

Allgemeines mathematisches Modell der kantenorientierten Tourenplanung:

$$\begin{aligned}
 C = \sum_{[i,j] \in E} \sum_{v=1}^V C_{ij} x_{ijv} &= C_{\text{fix}} + C_t + C_s = \frac{C_{\text{fix}}^a}{P_a} + \\
 \alpha_{\text{time}} \cdot \sum_{v=1}^V (t_v^{\text{Lade}} + t_v^{\text{Zwischenfahrt}} + t_v^{\text{Umfahrt}} + t_v^{\text{Entleer}} + t_v^{\text{Sonder}}) & \\
 + \alpha_{\text{kilo}} \cdot \sum_{v=1}^V (\text{Dis}_v^{\text{zf}} + \text{Dis}_v^{\text{uf}}) &
 \end{aligned} \tag{5-46}$$

Nebenbedingungen:

$$\forall i \in X, \forall v = 1, \dots, V : \sum_{[i,j] \in E} x_{ijv} = \sum_{[j,i] \in E} x_{jiv} \tag{1}$$

$$\forall [i,j] \in R, \forall v = 1, \dots, V : x_{ijv} \geq \sum_{[i,j] \in R} l_{ijv} \tag{2}$$

$$\forall v = 1, \dots, V : \sum_{[i,j] \in R} Q_{ijv} \cdot l_{ijv} \leq W \tag{3}$$

$$\forall S \subseteq \{2, \dots, n\}, \forall [r,s] \in E_R(S), \forall v = 1, \dots, V : \sum_{i \in S} \sum_{j \notin S} x_{ijv} \geq l_{rsv} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 \forall [i,j] \in R, \forall p = 1, \dots, P, \\
 \forall v = 1 : x_{ijvp}, x_{jivp}, z_{ijk}, l_{ijvkp}, l_{jivp} \in \{0, 1\}
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\sum_{u=1}^U a_{vu}^t \leq T \tag{6}$$

Nebenbedingung (1) bestimmt die Kontinuität der Tour. Die Nebenbedingung (2) beinhaltet, dass eine Kante nicht bedient werden kann, wenn sie nicht von einem Fahrzeug durchquert wird. Nebenbedingung (3) legt fest, dass für jede Tour die Abfallmenge die Fahrzeugkapazität nicht überschreiten darf. Nebenbedingung (4) besagt, dass beide Endknoten der benötigten Kanten $[r,s]$ eine Teilmenge S der gesamten Knotenmenge sind. Tour v beinhaltet zumindest einmal den Schritt $(S, X/S)$. $E_R(S)$ ist eine Menge von benötigten Kanten, deren Endknoten zur Teilmenge der Knoten S gehören. Nebenbedingung (5) garantiert, dass alle Variablen binäre sind. Nebenbedingung (6) begrenzt die Gesamtdauer einer Tour, die die Länge einer Arbeitsschicht nicht überschreiten darf.

5.6.2 Lösungsverfahren für CARP mittels heuristischer Algorithmen

Aufgrund der Komplexität dieser Problemstellung ist eine exakte algorithmische Lösung bislang jedoch nicht mit polynomialem Rechenaufwand zu bewältigen. In diesem Abschnitt

werden die heuristischen Verfahren zur Lösung des CARP erläutert, für den Hertz et al. einen Tabu Search-Algorithmus entwickelt haben. Im Mittelpunkt der Betrachtungen dieses Abschnitts steht die Vorgehensweise für den CARPET-Algorithmus. Der CARPET-Algorithmus basiert auf Verfahren wie dem CUT-Verfahren, dem SHORTEN-, ADD-, DROP- und SWITCH-Verfahren.

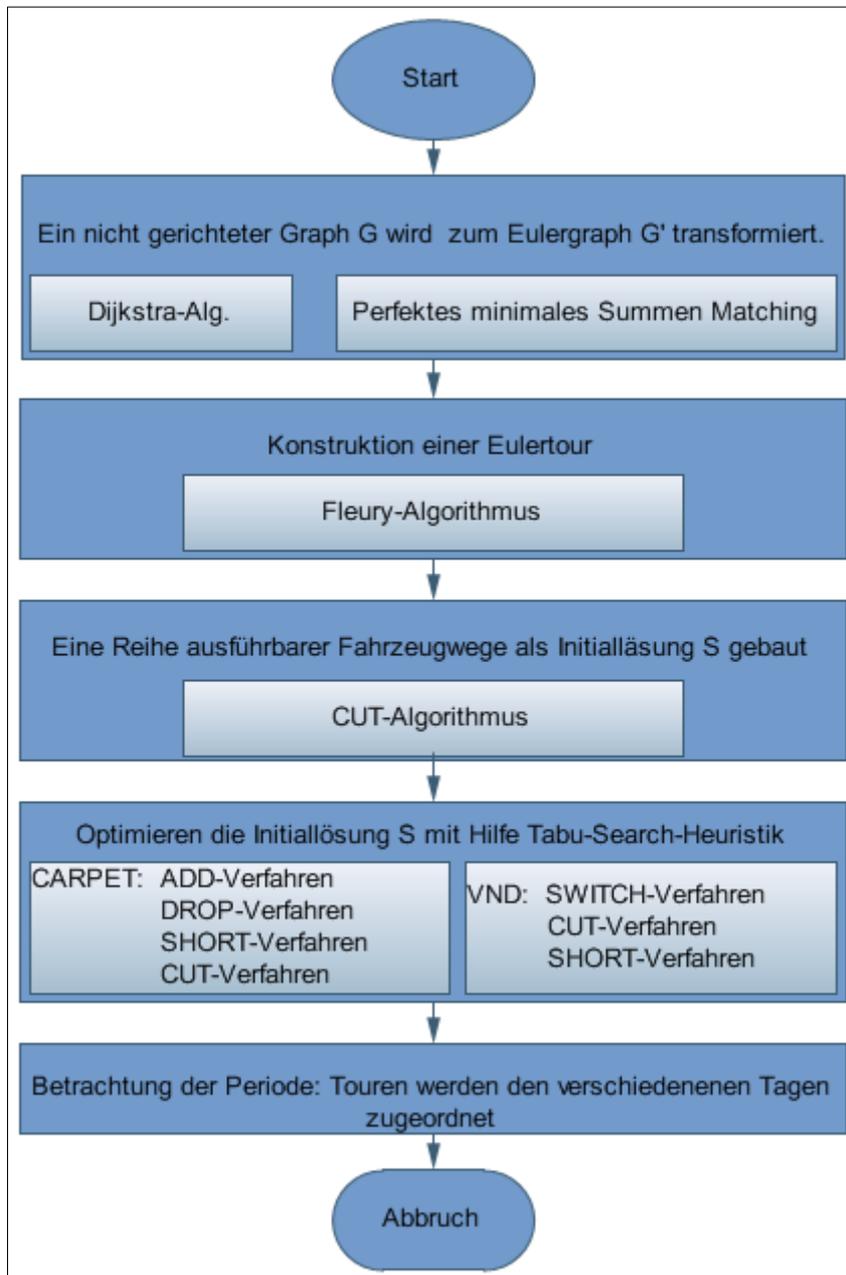


Abbildung 5.34: Flussdiagramm für PCARP

o Optimierung einer Briefträgertour in Graphen

Es ist bei einem gegebenen Graphen zu bestimmen, ob eine Eulertour vorliegt oder nicht. Das kann mithilfe des Begriffes „Grad eines jeden Knotens“ elegant ermittelt werden. Die Anzahl der Kantenenden an einem Knoten sind der Grad des Knotens[95].

„Gibt es eine Eulertour, so haben alle Knoten einen geraden Grad. Und umgekehrt: ist ein Graph zusammenhängend und haben alle Knoten geraden Grad, so ist der Graph ein

Eulergraph“. Die optimale Eulersche Vergrößerung wird durch Hinzufügen von Kanten E' in den nicht Eulerschen Graphen G erzeugt. Dieser soll zu einem Eulergraph werden, d. h., es werden nach der Vergrößerung keine Knoten mit ungeradem Grad in G vorhanden sein. Optimal ist die Vergrößerung dann, wenn die Summe der Kosten bzw. der Längen der hinzugefügten Kanten minimal ist. Die Vorgehensweise stellt sich wie folgt dar (siehe Abbildung 5.35):

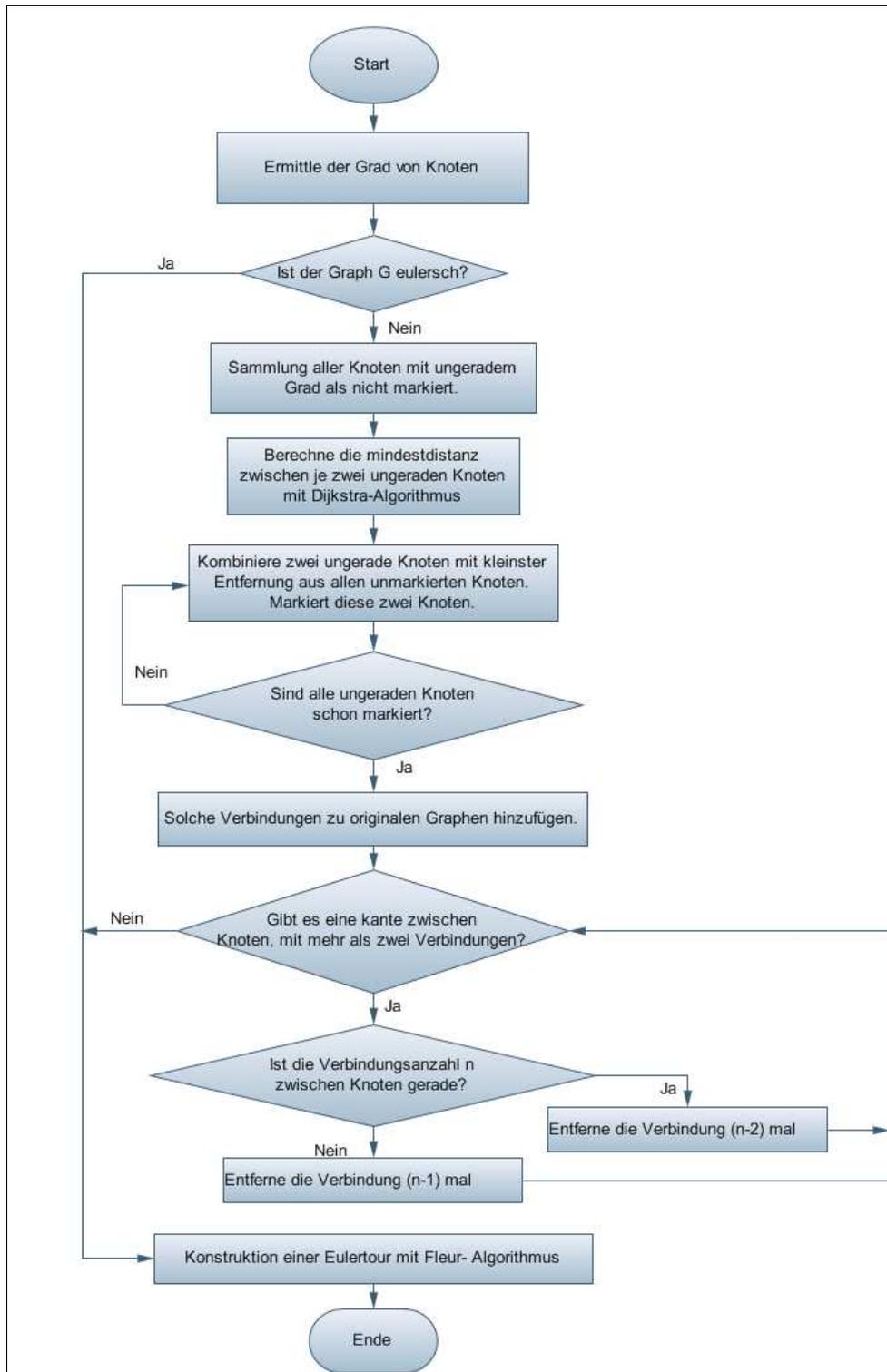


Abbildung 5.35: Flussdiagramm für die Erstellung eines Eulergraph und einer Eulertour

Schritt 1: Ermittlung des Grades der Knoten. Bestimmung, ob der originale Graph G ein Eulerscher Graph ist. Falls der Graph G ein Eulerscher Graph ist, weiter zu Schritt 2. Wenn nicht, wird ein optimaler Eulergraph konstruiert (Schritt 1.1 bis Schritt 1.4).

Schritt 1.1: Es wird ein Untergraph G' von G erstellt. Der Graph G' umfasst alle Knoten V_u mit ungeradem Grad.

Schritt 1.2: Berechnung der kürzesten Ketten K_{ij} und der Entfernungen d_{ij} in G für alle $i, j \in V_u$ mit $i < j$ mit dem Verfahren von Dijkstra.

Verfahren von Dijkstra:

1. Initialisierung aller Knoten mit der Distanz "unendlich", die des Startknotens mit 0.
2. Markierung der Distanz des Startknotens als permanent, aller anderen Distanzen als temporär.
3. Setzen des Startknotens als aktiv.
4. Berechnung der temporären Distanzen aller Nachbarknoten des aktiven Knotens durch Addition von dessen Distanz mit den Kantengewichten.
5. Wenn eine solche berechnete Distanz für einen Knoten kleiner ist als die aktuelle, Aktualisierung der Distanz und Setzen des aktuellen Knotens als Vorgänger. Dieser Schritt wird auch als Update bezeichnet und ist die zentrale Idee von *Dijkstra*.
6. Wahl eines Knotens mit minimaler temporärer Distanz als aktiv. Markierung seiner Distanz als permanent.
7. Wiederholung von 4 bis 7, bis es keinen Knoten mit permanenter Distanz gibt, deren Nachbarn noch temporäre Distanzen haben.

Schritt 1.3: Bestimmung eines perfekten minimalen Summenmatchings X^* im Untergraphen.

Perfektes minimales Summenmatching:

Wenn die Anzahl der ungeraden Knoten ≤ 6 ist, dann erfolgt das Auflisten aller möglichen Kombinationen und die Wahl des optimalen Matchings mit minimalen Kosten.

Wenn die Anzahl der ungeraden Knoten > 6 , dann

1. Stellen aller ungeraden Knoten als nicht markiert,
2. Kombination zweier Knoten mit der kleinsten Entfernung und Markierung dieser Knoten,
3. Wiederholung von Schritt 2, bis alle ungerade Knoten markiert ist.

Schritt 1.4: Hinzufügen der Ketten K_{ij} , die den Kanten $[i, j] \in X^*$ entsprechen, zum Graphen G .

Schritt 1.5 Wenn Kante E_{ij} n -mal verbindet und $n > 2$.

Falls n eine gerade Zahl ist, Löschen der Kante E_{ij} $n-2$ -mal,

sonst Löschen der Kante E_{ij} $n-1$ -mal.

Schritt 2. Konstruktion einer Eulertour T mit dem

Algorithmus von Fleury:

Schritt 2.1: Beginn mit einer beliebigen Kante.

Schritt 2.2: Wahl der jeweils nächsten Kante so, dass sie in dem Restgraphen, der entsteht, wenn man die bereits der Tour angehörenden Kanten weglässt, keine Brücke bildet.

Schritt 2.3: Wenn der Restgraph keine Kanten mehr hat, STOPP.

Schritt 3: Diese Eulertour $T=(V_0, V_1, V_2, \dots, V_t = V_0)$ mit der Gesamtnachfrage D (V_0 ist das Depot) unterteilt einige kleine Touren mit dem **CUT-Algorithmus**, der wie folgt beschrieben wird:

Dieses Verfahren wurde von Hertz et al. vorgeschlagen [96]. Eine Tour $T = (V_0, V_1, V_2, \dots, V_t = V_0)$ wird mit der gesamten Nachfrage D betrachtet, die größer als die Fahrzeugkapazität Q ist. Um diese Tour in einige mögliche Subtours zu teilen, bestimmen Hertz et al. zunächst einen Knoten V_r so, dass die gesamte Nachfrage an den Ketten $(V_0, V_1, V_2, \dots, V_r)$ die Fahrzeugkapazität Q nicht überschreitet und an den Ketten $(V_r, \dots, V_t = V_0)$ nicht größer als $Q(\lceil D/Q \rceil - 1)$ ist. Wenn V_r festgelegt wird, ist eine mögliche Subtour zu konstruieren. Die detaillierte Vorgehensweise stellt sich wie folgt dar:

Annahme: Wenn eine Kante viele Male benutzt wird, wird diese Kante auch als letzte angefahren.

Schritt 3.0: Falls die Gesamtnachfrage nicht größer ist als die Fahrzeugkapazität Q , weiter zu Schritt 4. Die Eulertour T ist die Vehicle Route. Falls die Gesamtnachfrage D größer ist als die Fahrzeugkapazität Q ist, dann zu Schritt 3.1.

Schritt 3.1: Wahl eines Knotens V_s mit größtem Index s und Versorgung der Kante (V_{s-1}, V_s) . Die Gesamtnachfrage der Tour $(V_0, V_1, V_2, \dots, V_s)$ ist nicht größer als die Fahrzeugkapazität Q .

Schritt 3.2: Ermittlung eines Knotens mit kleinstem Index s' so, dass an der Kante $(V_{s-1}, V_{s'})$ bedient wird, und die Gesamtnachfrage der Tour $(V_{s'}, \dots, V_t)$ nicht größer als $Q(\lceil D/Q \rceil - 1)$ ist.

Schritt 3.3: Falls $s' \geq s$, dann $r=s$, dann weiter zu Schritt 3.4. Falls $s' < s$: für jedes r in $[s', s]$ so, dass die Kante (V_{r-1}, V_r) bedient ist, dann weiter zu folgenden Schritten:

Ermittlung des kleinsten Index $r' \geq r$ so, dass die Kante $(V_{r'}, V_{r'+1})$ versorgt wird.

Ermittlung des Pfades $P_r = SP_{r0} + SP_{0r'}$ (SP_{ij} zeigt die kürzeste Kette zwischen V_i und V_j).

Berechnung des Unterschiedes δ_r zwischen der Länge von P_r und der Länge des Pfades $(V_r, \dots, V_{r'})$. Wahl des Index r in $[s', s]$ mit kleinstem Wert δ_r .

Schritt 3.4: Erstellung einer erreichbaren Fahrzeugroute $(V_0, V_1, V_2, \dots, V_r) + SP_{r0}$. Ermittlung des kleinsten Index $r' \geq r$ so, dass $(V_{r'}, V_{r'+1})$ eine bediente Kante ist.

Schritt 3.5. Ersetzen von $(V_0, \dots, V_{r'})$ durch $SP_{0r'}$ an der Tour T . Zurück zu Schritt 1.

Schritt 4: Wahl einer zulässigen Startlösung X_s mittels der Tabu Search-Metaheuristik, um die Startlösung zu verbessern.

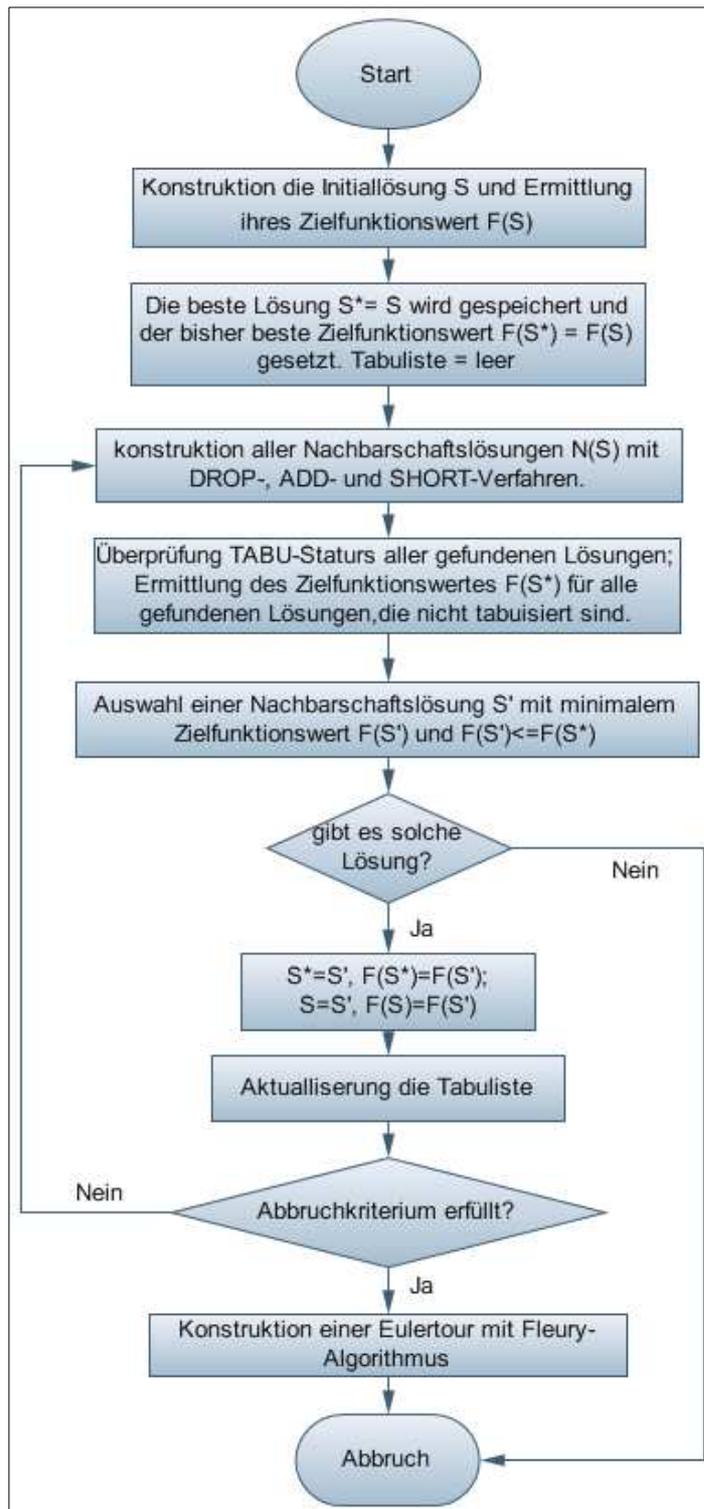


Abbildung 5.36: Flussdiagramm des Tabu Search-Algorithmus (CARPET)

CARPET-Algorithmus:

Schritt 4.1: Definition der Initiallösung S , Bewertung des Zielfunktionswertes $F(S)$.
Setzen der Tabuliste: $\text{Tabu} = \text{Leer}$. Setzen der besten Lösung $S^* = S$, $F(S^*) = F(S)$.
Definition der Iteration $r = 1$, Definition der maximalen Iteration Max_r .

Schritt 4.2: Ermittlung der Nachbarschaft $N(S)$ von S :

Betrachtung jeder bedienten Kante. Entfernung einer bedienten Kante E_{ij} von einer Tour mit DROP-Algorithmus und dann Einfügung dieser Kante E_{ij} in eine andere Tour mit dem ADD-Verfahren.

Schritt 4.3: Wahl einer Nachbarschaftslösung S' aus $N(S)$, mit minimalem Zielfunktionswert $F(S')$, die nicht in der Tabuliste enthalten ist. Falls $F(S') \leq F(S)$, Setzen von $S^* = S'$ und $F(S^*) = F(S')$, weiter zum nächsten Schritt. Falls keine solche Lösung vorhanden ist, STOPP.

Schritt 4.4: Setzen der in Schritt 4.3. gefundenen Lösung auf die Tabuliste. Wahl der in Schritt 4.3 gefundenen Lösung als neue Startlösung. Wenn kein Abbruchkriterium gesetzt ist weiter zu Schritt 4.2, sonst STOPP.

DROP-Verfahren:

Eingabe: Eine Tour T deckt die bediente Kantenmenge R und die Kante $E_{ij} \in R$.

Ausgabe: Eine Tour T' deckt die bediente Kantenmenge R und Kante $E_{ij} \notin R$.

Entfernen einer bedienten Kante E_{ij} aus der Tour T mit dem SHORTEN-Verfahren verkürzt die Restkanten der Tour T .

ADD-Verfahren:

Eingabe: Eine Tour T deckt die bedienten Kantenmengen R und $E_{ij} \notin R$.

Ausgabe: Eine Tour T' deckt die bedienten Kantenmengen R und $E_{ij} \in R$.

Falls weder V_i noch V_j in der Tour T ist, dann Identifikation eines Knotens V_k in der Tour. Es gibt eine minimale Kettenlänge von $L_{ki} + L_{jk}$ und Addition des Kreises $SP_{ki} \cup \{(v_i, v_j)\} \cup SP_{jk}$ an der Tour T . Wenn keine Addition des fortlaufenden Kreises (v_i, v_j, v_i) mit SHORTEN-Verfahren, wird die Tour T verkürzt.

SHORTEN-Verfahren:

Wenn eine Route nicht bediente Kanten enthält, kann sie eventuell durch das sogenannte SHORTEN-Verfahren reduziert werden. Diese einfache Idee wurde von Hertz et al. entwickelt. Die detaillierte Vorgehensweise stellt sich wie folgt dar, die Abbildung 5.37 illustriert das SHORTEN-Verfahren.

Eingabe: Eine Rural Postman-Tour T an dem nicht gerichteten Graphen $G = (V, E)$.

Ausgabe: Eine mögliche bessere Rural Postman-Tour T' an G .

Auswahl einer Orientierung für T und eines Knotens V_i an der Tour T .

Bestimmung eines Knotens V_j an T so, dass die Länge der Kette von V_i nach V_j so lang wie möglich ist, während die Kette von V_j nach V_i alle bedienten Kanten deckt. Der Pfad von V_i nach V_j wird markiert als P und der Pfad von V_j nach V_i als P' .

Wenn alle Kanten an P' mit Knoten V_j bediente Kanten sind, weiter zu Schritt 4. Die Kanten an P' bis (V_k, V_j) induzieren einen Kreis $C = (V_j, \dots, V_k, V_j)$. Umkehrung der Orientierung von C und weiter zu Schritt 2.

Falls die Länge der kürzesten Kette SP_{ij} , die V_i und V_j in G verbindet, kürzer ist als die Länge von P , dann wird P durch SP_{ij} ersetzt.

Wiederholung der Schritte 2 bis 4. Betrachtung der zwei möglichen Orientierungen von T und aller möglichen Startknoten V_i an T bis keine weitere Besserung möglich ist.

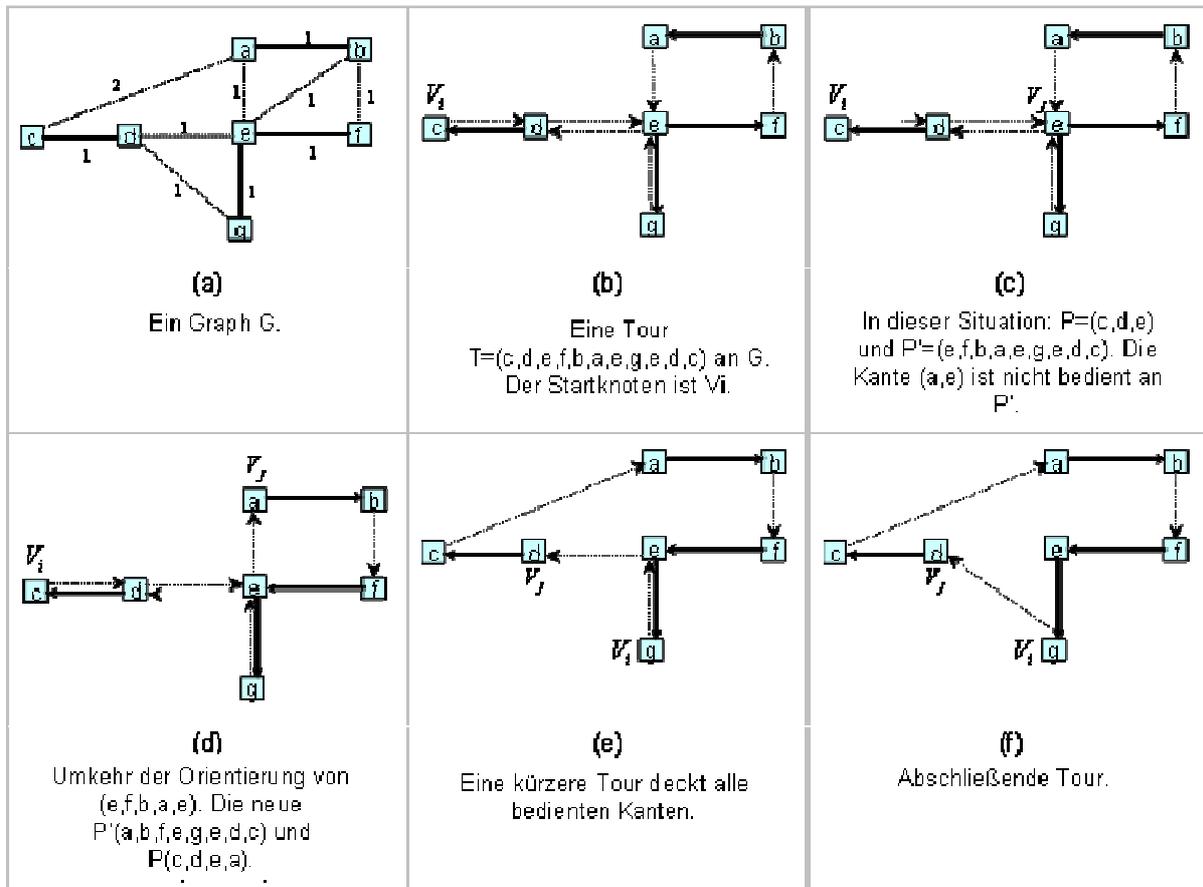


Abbildung 5.37: Erklärung des SHORTEN-Algorithmus [95]

Alternativ: Algorithmus Variable Neighborhood Descent (VND) -CARP

Schritt 4.1: Erzeugen der Initiallösung S , Bewerten des Zielfunktionswertes $F(S)$.

Schritt 4.2: Setzen von $i := \lceil D/Q \rceil$ und $s_{\text{best}} := s$.

Schritt 4.3: Konstruktionen einer Nachbarlösung:

- a) Setzen von $c := 1$. Setzen von $f_{\text{best}} = f(s)$.
- b) Wahl von i Routen in s und Zusammenlegen zu einer einzigen Tour.
Anwenden des SWITCH- und dann des CUT-Algorithmus auf dieser Tour.
Anwenden des SHORTEN-Algorithmus auf jeder neuen Tour.
- c) Falls $f(s') < f(s_{\text{best}})$, dann Setzen von $s_{\text{best}} := s$ und $f(s_{\text{best}}) := f(s')$.
Setzen von $c := c + 1$, falls $c \leq M_i$, dann weiter zu Schritt 4.3.b).

Schritt 4.4: Falls $f(s_{\text{best}}) < f(s)$, dann $s := s_{\text{best}}$ und weiter zu Schritt 4.3. Setzen von $i = i - 1$.
Falls $i \geq 1$ weiter zu Schritt 4.3.

SWITCH-Algorithmus:

Eingabe: Eine Tour T , die alle bedienten Kanten R deckt.

Ausgabe: Eine andere Tour T' für R .

Wahl eines Knotens v in T , der mehrmals durchfahren wird.

Umdrehen aller minimalen Zyklen, die bei v starten und enden.

Schritt 5: Betrachtung der Periodenteile. Falls die Gesamtnachfrage D_G im Graph $G >$ Sammlungskapazität pro Tag Q_d , dann sollte die Entsorgung der Abfälle in verschiedene Tage unterteilt werden.

Schritt 5.1: Berechnen der gesamten Nachfrage D im Graph (z. B. Anzahl der Haushalte n), der gesamten Länge der Touren L und der Anzahl der Touren n_t .

Schritt 5.2: Berechnen der gesamten Zeitdauer für dieses Gebiet.

$$T = \underbrace{n_{\text{haus}} \cdot t_{\text{auf}}}_{\text{Aufladzeit}} + \underbrace{L/v}_{\text{Fahrzeit}} + \underbrace{n_{\text{tour}} \cdot t_{\text{ab}}}_{\text{Abladzeit}} \quad (5-47)$$

Schritt 5.3: Falls $\left\lceil \frac{T}{8} \right\rceil = 1,0$ heißt das, dass ein Arbeiter die gesamten Abfälle im Graph G

bewältigen kann. Das wird alle 14 Tage einmal wiederholt. Falls $\left\lceil \frac{T}{8} \right\rceil = N > 1,0$, heißt das, dass die gesamten Abfälle in N Tage aufgeteilt werden müssen und an jedem Tag innerhalb von 8 Stunden abtransportiert werden müssen.

5.6.3 Kantenorientierte Modellbildung und Simulation

In diesem Abschnitt wird der Bioabfalltransport in ausgewählten Ortsteilen mithilfe des Algorithmus untersucht (siehe Abbildung 5.38). Die Untersuchungsgebiete sind Duisern, Hochfeld und Buchholz in Duisburg. Die Stadt Duisburg hatte im Jahr 2008 492.870 Einwohner. Seit 1975 sank die Anzahl der Einwohner auf etwa 100.000. Die Einwohnerdichte beträgt jetzt 2.124 EW/km². Die Gesamtfläche beträgt 232 km². Davon beträgt die landwirtschaftliche Ackerfläche ohne Grünland etwa 21 km². Auf dieser Fläche wird überwiegend Getreide angebaut [97]. In vier Ortsteilen im Bezirk Duisburg-Süd wird eine getrennte Abfallsammlung durchgeführt. Es wurde im Jahr 2006 447,94 Mg Abfall gesammelt [98]. Als Alternative für eine Biogasanlage kann die Kläranlage für die Biogasproduktion genutzt werden. Obwohl die Produktionskosten bei der Kläranlage höher als die der Biogasanlagen sind, gibt es Sparmöglichkeiten bei den Transportkosten.

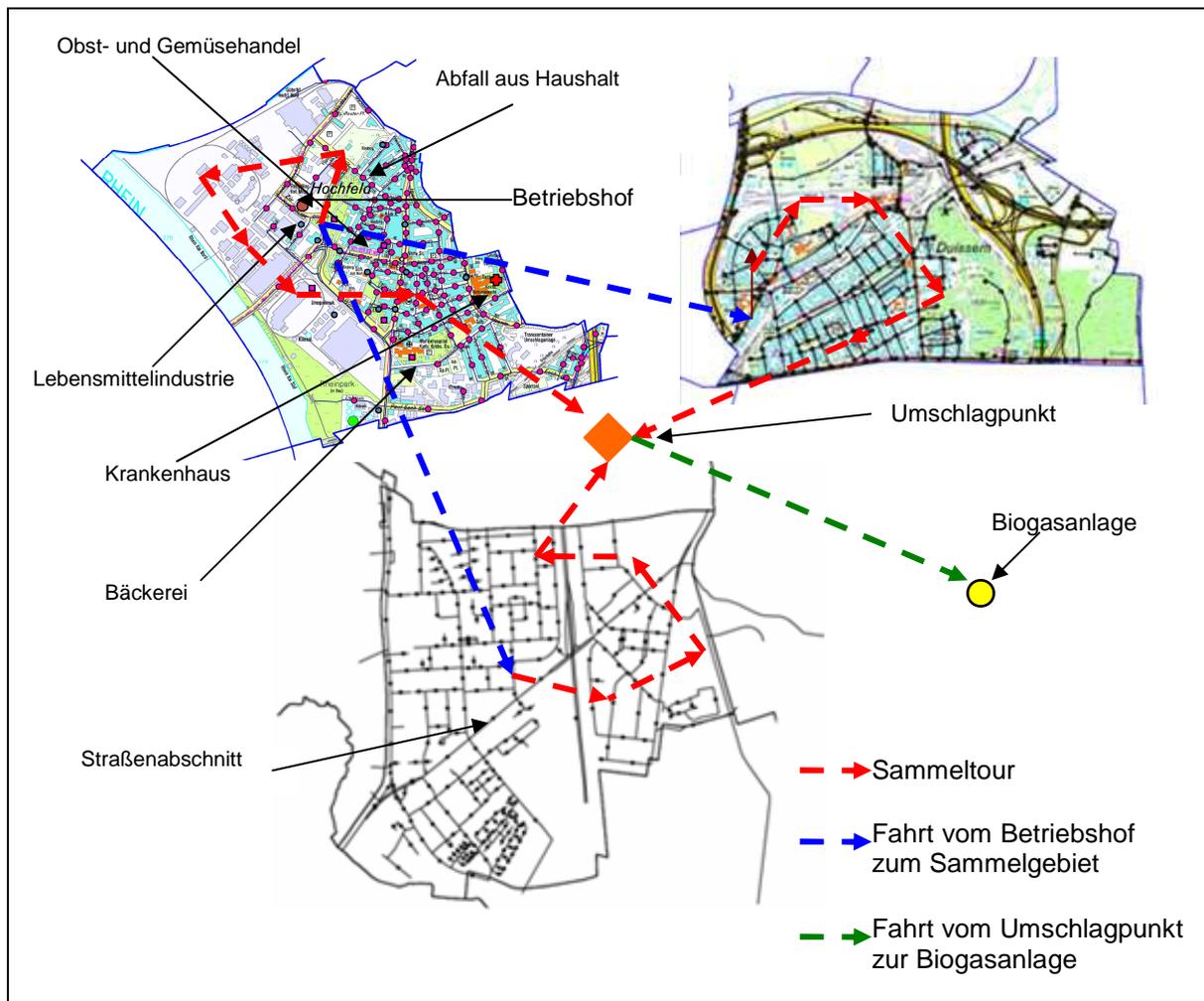


Abbildung 5.38: Bioabfall-Sammelkonzept von drei Ortsteilen

In den untersuchten Gebieten wird alle 14 Tage eine Bioabfallsammlung in den Haushalten geplant. Das Sammelfahrzeug soll alle zwei Wochen alle Quellen entlang der Kanten (Straßen) mindestens einmal besuchen und anschließend die gesammelten Rohstoffe zum Umschlagpunkt bringen. Aufgrund der Position der Quellen, die in unmittelbarer räumlicher Nähe zueinander liegen, werden kantenorientierte Verfahren angewendet, um eine bessere Erfassung, Modellierung und Berechnung der Daten zu schaffen. Um eine Tour zu bestimmen, werden folgende Kriterien berücksichtigt:

- Kapazität des Umschlagpunktes oder der Kläranlage,
- Kapazität des Sammelfahrzeugs,
- Arbeitszeiten von Fahrer und Sammlungspersonal,
- Entladezeit pro biogener Abfallquelle (Wohnhäuser),
- Rüstzeit und Umfahrt.

Mit der entwickelten Software werden die Touren geplant. Angefangen vom Umschlagpunkt wird immer der nächstliegende Kunde besucht. Wenn die Kapazitäts- oder Zeitgrenze erreicht ist, kehrt das Fahrzeug zurück zum Umschlagpunkt. Danach wird die nächste Tour geplant. Nachdem alle Touren geplant sind, werden mithilfe des Verbesserungsverfahrens die Touren und anschließend die Route optimiert.

- Quellendaten (Kantendaten)

Wie im Kapitel 4 „Datenbasis und Diskussion“ erwähnt, werden die Daten der Bioabfälle aus den Haushalten erfasst und bei der kantenorientierten Simulation als grundlegende Inputdaten verwendet.

Nach der Bearbeitung ergibt sich die Abbildung 5.39.

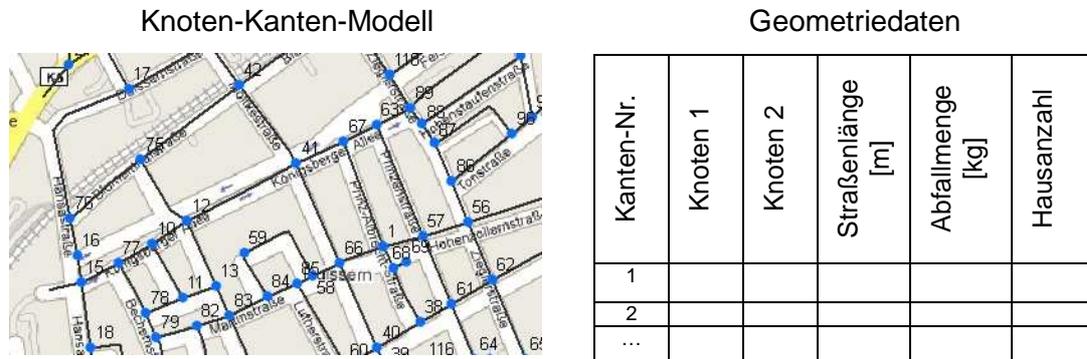


Abbildung 5.39: Knoten-Kanten-Modell und Dateien

- Unterteilung einer Tour in Zeitintervalle

Der zeitliche Verlauf einer Tour wird in verschiedene Vorgänge unterteilt.

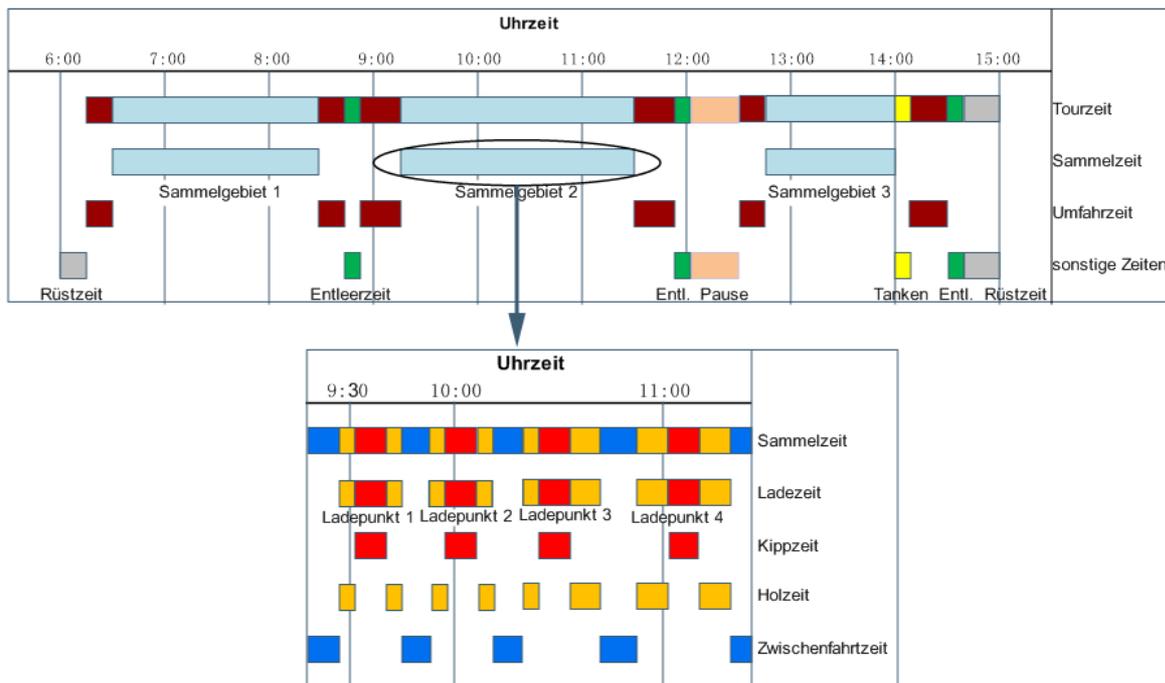


Abbildung 5.40: Unterteilung einer Beispielsammeltour in Zeitintervalle

Die Tourzeit ergibt sich folgendermaßen:

$$\text{Tourzeit} = \text{Ladezeiten} + \text{Zwischenfahrtzeiten} + \text{Entleerzeiten} + \text{Umfahrtzeiten} + \text{Sonderzeiten}$$

Die Rüstzeit gehört nicht mit zur Tourzeit. Die Beispielsammeltour erfolgt in drei verschiedenen Sammelgebieten.

Umfahrtzeit:

Als Ergebnis der Optimierung ergeben sich die Zeiten der Umfahrten auf Basis der Straßenklassen und des eingesetzten Fahrzeugtyps. Zur Berechnung der Fahrt vom Depot ins Sammelgebiet wird der kürzeste Weg zu einer Sammelstrecke des zu entsorgenden

Distriktes bestimmt. Wenn das Fahrzeug seine Kapazität erreicht hat, wird der kürzeste Weg zum Depot berechnet.

Bei der Umfahrt sind die zurückgelegten Strecken lang genug, um Einzelwerte anzugeben und um bei der Betrachtung die Beschleunigungsphase vernachlässigen zu können. Zum Vergleich der aufgenommenen Werte für die Umfahrtzeit und -strecke wird die Geschwindigkeit ermittelt. Mit dieser kann man für eine bestimmte Strecke die benötigte Umfahrtzeit errechnen.

Die Geschwindigkeit bei der Umfahrt ist durch die zulässige Höchstgeschwindigkeit und der des Sammelfahrzeuges begrenzt. Wenn die ermittelte Umfahrtgeschwindigkeit aufgrund von Geschwindigkeitsüberschreitungen einzelner Fahrer über der jeweiligen zulässigen Höchstgeschwindigkeit lag, wurde diese anstatt der ermittelten eingesetzt, um zu vermeiden, dass bei der Ermittlung von Standards von gesetzeswidrigen Geschwindigkeitsüberschreitungen ausgegangen wird.

Bei der Analyse der ermittelten Umfahrtgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Strecke wurde deutlich, dass hierfür eine Gruppierung nach Straßentypen, auf denen die jeweilige Umfahrt vorrangig stattfand, sinnvoll ist. Gallenkemper [99] gibt als durchschnittliche Umfahrtgeschwindigkeiten an:

Stadtstraße: 44 km/h

Landstraße: 43 km/h

Schnellstraße: 70 km/h

Diese Angaben liegen im Bereich der ermittelten Werte, aber bei städtischen Gebieten über den ermittelten Durchschnittswerten.

Sammelzeit:

Die Sammelzeit kann man weiter in die Ladezeit und Zwischenfahrtzeit unterteilen, wobei die Ladezeit sich aus der Holzeit und Kippzeit ergibt. Dies ist in Abbildung 5.41 dargestellt: 1. Holzeit, 2. Kippzeit und 3. Zwischenfahrtzeit.

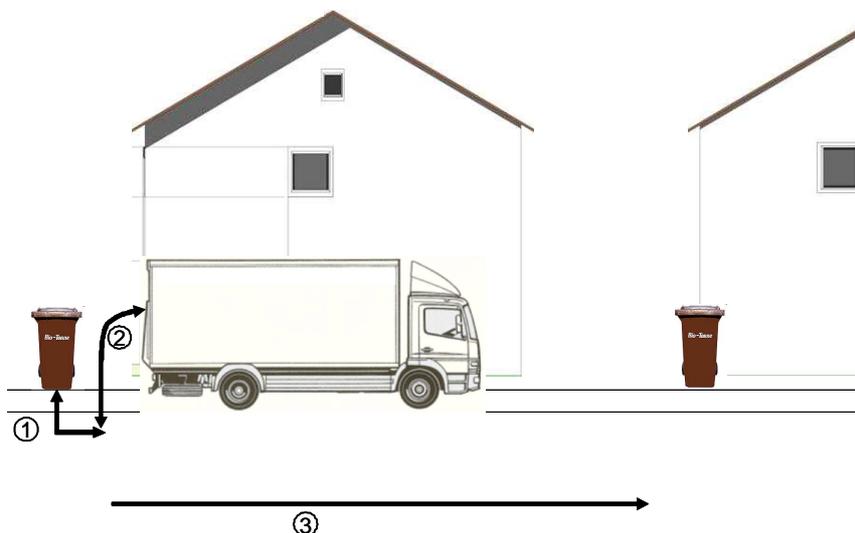


Abbildung 5.41: Unterteilung der Sammelzeit

Bei der Ladezeit steht das Sammelfahrzeug am Ladepunkt zum Zwecke des Ladens. Die ermittelten Ladezeiten werden als Ladezeit pro Ladepunkt bzw. LZ/LP nach Anzahl der Behälter am Ladepunkt – MGB/LP angegeben. Unterschiede bei den Ladezeiten von Bioabfall MGB 60-240 bei sonst gleichen Rahmenbedingungen konnten nicht erkannt werden. Sie werden deshalb gemeinsam ausgewertet. In der Tabelle 5.7 sind alle ermittelten

Ladezeiten für MGB 60-240, Hecklader und Seitenlader mit dem dazugehörigen Ausgleichsfaktor dargestellt.

Tabelle 5.7: Festlegung der Ladezeiten je Ladepunkt

	LZ/LP [s]
Hecklader 1+2	$7,0 \cdot \text{MGB}/\text{LP} + 12$
Hecklader 1+1	$16,5 \cdot \text{MGB}/\text{LP} + 13,3$
Seitenlader 1+0	$16 \cdot \text{MGB}/\text{LP}$

Zwischenfahrtzeit ist die Fahrtzeit zwischen den einzelnen Ladepunkten. Die Zwischenfahrtstrecken sind nicht als Einzel-, sondern nur als Mittelwert einer großen Anzahl von Messwerten möglich. Zur Festlegung von Standards bei der Zwischenfahrtzeit wurde die Angabe als Zeit-Weg-Funktion gewählt. Dazu wurde eine Regressionsanalyse der ermittelten durchschnittlichen Zwischenfahrtzeiten der jeweiligen Bebauungsstrukturen einer Tour und den dazugehörigen Strecken durchgeführt. Für eine Bestimmung von sinnvollen Ausgleichsfaktoren zur Standardregressionsfunktion müssen mehrere Werte unter gleichen Bedingungen vorliegen, aus denen man eine Regressionsfunktion bilden kann. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.8 dargestellt. Zu beachten ist, dass die Regressionsfunktionen nur innerhalb des Bereiches der ihnen zugrunde liegenden Messwerte gültig sind.

Tabelle 5.8: Regressionsfunktionen der Zwischenfahrtzeit.

Bebauungsstruktur	Regressionsfunktion ZZ - Zwischenfahrtzeit [s] ZS - Zwischenfahrtstrecke [km]	Wertbereich [km]
1/2	$ZZ = 132,4 \cdot ZS^{0,5}$	0,052 – 0,188
3-5	$ZZ = 14,1 \cdot \text{LN}(ZS) + 61,6$	0,027 – 0,354

Entleerungs- und Sonderzeit

Entleerzeit ist die Zeit von der Ankunft am Entleerungsort bis zur Abfahrt. Die Entleerzeit beginnt mit der Ankunft und endet mit der Abfahrt des Fahrzeuges am Eingang, i.d.R. der Waage der Entleerungsanlage. Während der Entleerzeit muss das Fahrzeug im vollen Zustand gewogen werden, um dann zur Entleerestelle der Anlage zu fahren und abzuladen.

Zu der benötigten Zeit zum Wiegen und Entleeren kommen noch Wartezeiten, wenn die Anlage durch viele Fahrzeuge gleichzeitig angefahren wird. Die Wartezeiten sind meist von der Tageszeit abhängig und können durch Umgehen der Spitzenzeiten vermieden werden. Pausenzeit, welche die Fahrzeugbesatzung auf der Entleerungsanlage verbracht hat, wurde nicht in die Entleerzeit aufgenommen. Die Entleerzeiten lagen durchschnittlich bei 11 Minuten (min. 5 und max. 26).

Um den theoretischen Gesamtzeitaufwand pro Tour berechnen zu können, müssen noch die Zeiten für die übrigen Aktivitäten (z. B. bei Baustellen, technischen Defekte am Fahrzeug, Wartezeit, usw.) während der Tour bestimmt werden. Die Wartezeiten an Kreuzungen konnten aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit nicht geschätzt werden. Für die Rüst- und Wartezeiten werden durchschnittliche Werte als Konstanten gesetzt. Die Sonderzeit beträgt durchschnittlich ca. 10 Minuten pro Tour.

● Tourenplanung

Mit dem heuristischen Algorithmus (Kapitel 5.6.2) für die Tourenplanung wird folgendes Programm entwickelt (siehe Abbildung 5.42):

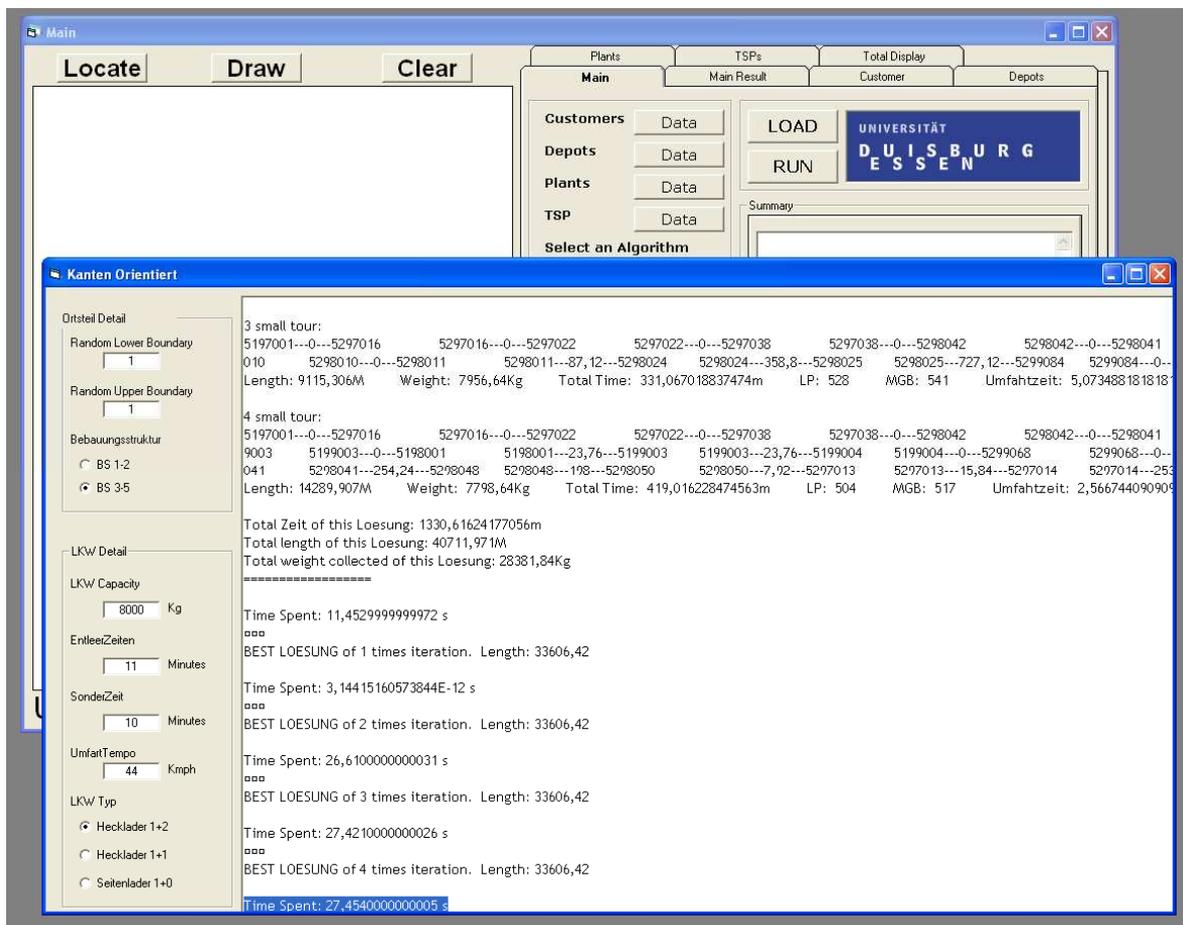


Abbildung 5.42: Das Programm zur kantenorientierten Tourenplanung

5.6.4 Auswertung der Kantenroutenoptimierung

Unter Anwendung der in Abschnitt 5.6.2 beschriebenen Softwarelösung wurde das betrachtete Entsorgungsgebiet Duisburg abgebildet.

Szenarium 1: Durchschnittliche Bioabfallmenge 50kg/Ew.a

Die drei untersuchten Ortsteile sind derzeit in 12 Touren aufgeteilt. Ein Fahrzeug ist an fünf Tagen pro Woche unterwegs. Die durchschnittliche Sammellänge pro Tour lag im untersuchten Fallbeispiel bei 11,11 km bei der Optimallösung, das Minimum und Maximum jeweils bei 6,70 km und 16,79 km (siehe Abbildung 5.43):

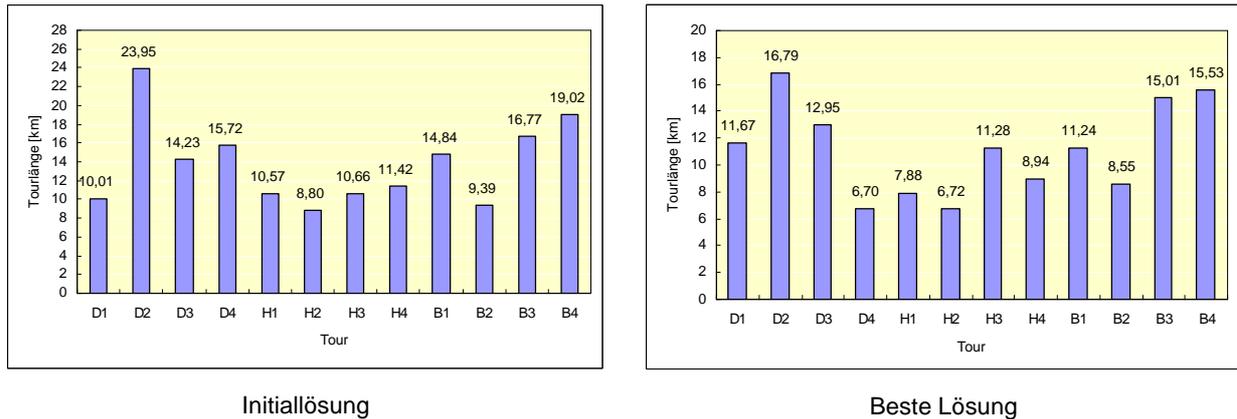


Abbildung 5.43: Sammelstrecke der einzelnen Touren

Abbildung 5.44 zeigt die Initialsammellänge und Optimalsammellänge von drei Ortsteilen. Mithilfe des Optimierungsverfahrens (Tabu Search-Heuristik) könnte die Gesamtfahrlänge um 15,79 km in Duissern, 6,61 km in Hochfeld und 9,69 km in Buchholz reduziert werden.

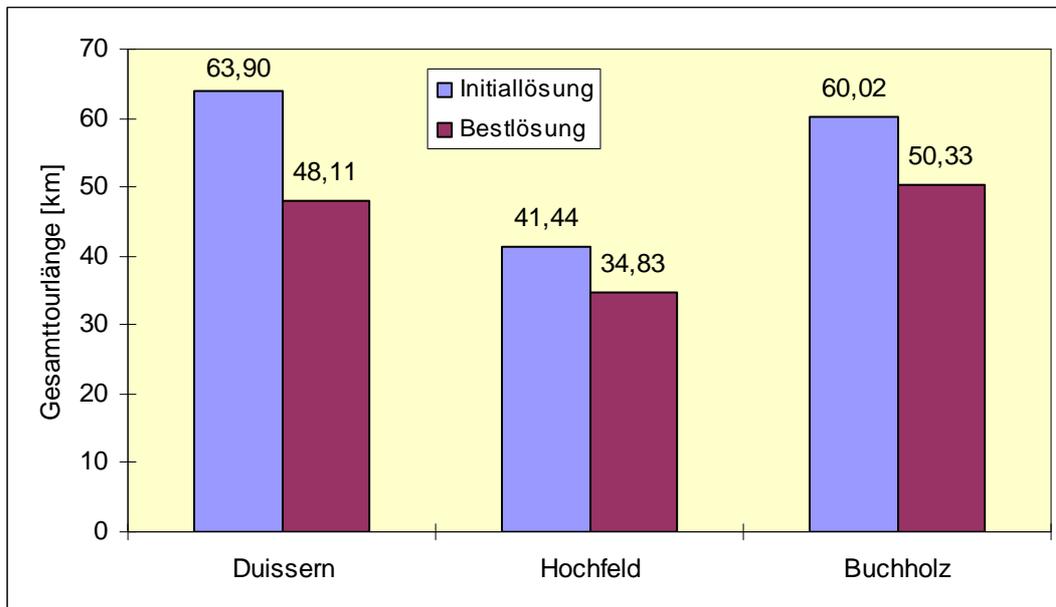


Abbildung 5.44: Gesamttourlänge von drei Ortsteilen

In Abbildung 5.45 sind die zu entsorgenden Sammelgewichte und Sammelstrecken der einzelnen Touren gegenübergestellt. In dieser Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass die beiden Größen „Sammelgewicht“ und „Tourlänge“ nicht in einem direkt proportionalen Zusammenhang stehen. Eine im Vergleich zur entsorgten Abfallmenge hohe Sammelänge liegt im Wesentlichen in der dünnen Besiedlung und den damit verbundenen längeren Sammelzeiten im betreffenden Sammelgebiet begründet.

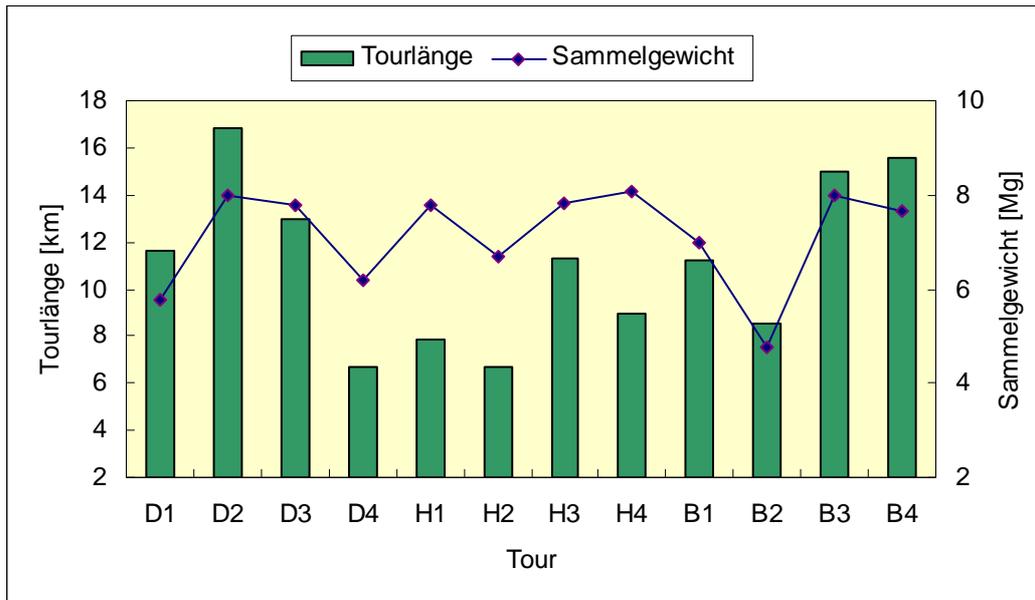


Abbildung 5.45: Sammelgewichte und Sammelstrecke pro Tour

Abbildung 5.46 zeigt den Zeitaufwand der einzelnen Tour mit Seitenlader 1+0. Die durchschnittliche Tourzeit lag im untersuchten Fallbeispiel bei 5,54 h, das Minimum und Maximum jeweils bei 2,91 h und 8,49 h (weitere Informationen befinden sich im Anhang).

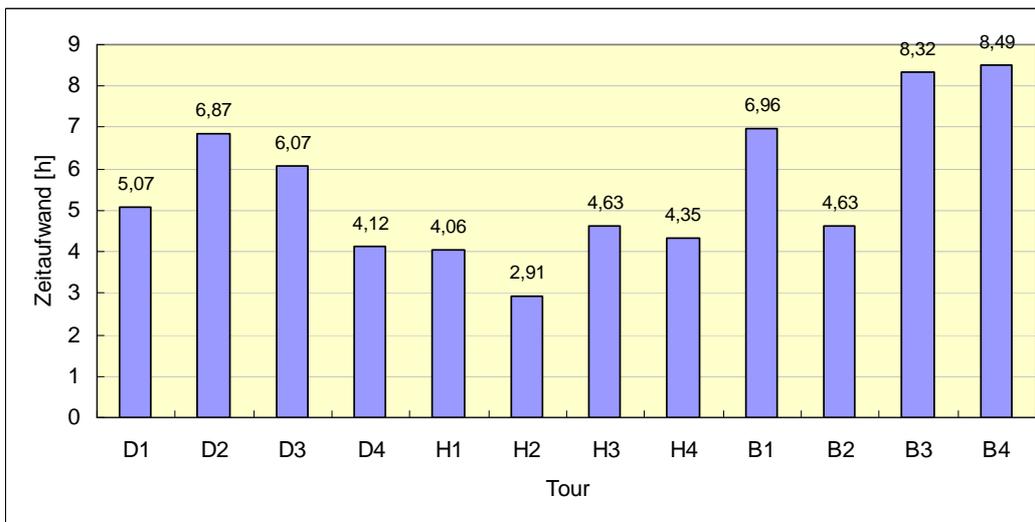


Abbildung 5.46: Gesamtzeit der einzelnen Touren

Die besonderen Eigenschaften der einzelnen Touren stehen im direkten Zusammenhang mit den Anteilen der verschiedenen Aktivitäten am gesamten zeitlichen Aufwand einer Tour. Abbildung 5.47 gibt Aufschluss über den berechneten zeitlichen Anteil, den die verschiedenen Aktivitäten einer Tour beanspruchen.

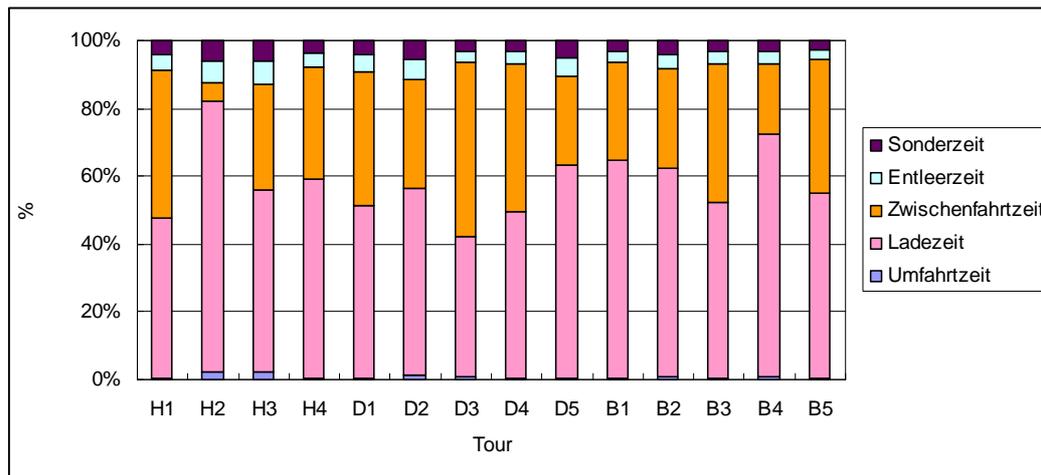


Abbildung 5.47: Theoretisch berechneter relativer Anteil der Aktivitäten an der Gesamtzeit

Eine Beobachtung kann in Bezug auf die Auswirkungen der Lage des Depots gemacht werden: Der zeitliche Anteil für die Fahrten vom Depot in das Sammelgebiet und zurück fällt für die Tour H1 wesentlich geringer aus als für die Touren H2 und H3.

Insgesamt wird nach den Berechnungen bei wenigen Touren mehr als die Hälfte der Zeit im Sammelgebiet (Sammelfahrten und Umfahrten) verbracht. Dies ist auf die Struktur des Entsorgungsgebietes zurückzuführen.

Szenarium 2: Unterschiedliche Bioabfallmenge

Das Bioabfallaufkommen ist keine konstante Größe. Neben jahreszeitlichen Schwankungen hängen die Mengen des Bioabfalls von

- der Siedlungsstruktur,
- dem angebotenen getrennten Sammelsystem,
- den angebotenen Gefäßvolumina,
- der Ausgestaltung des Gebührensystems sowie
- dem Konsumverhalten der Bevölkerung ab.

In den Jahreszeiten Sommer und Herbst ist mit einem hohen Aufkommen an Bioabfall (z. B. Gartenabfälle und Restmüll von Früchten) zu rechnen. Es wird angenommen, dass das Bioabfallaufkommen im Vergleich zum Winter und Frühling höher ist (siehe Tabelle 5.9).

Tabelle 5.9: Bioabfallmenge für alle Jahreszeiten

Jahreszeiten	Abfall pro Person [kg/Ew.a]	Duissern [kg/14Tage.Haus]	Hochfeld [kg/14Tage.Haus]	Buchholz [kg/14Tage.Haus]
Frühling	40	9,99	14,48	6,336
Sommer	70	17,49	25,34	11,088
Herbst	60	14,99	21,72	9,504
Winter	30	7,49	10,86	4,752

In der Abbildung 5.48 ist die gesamte Tourlänge und Tourzeit der drei Ortsteile gegenübergestellt. Da die Anzahl und die Standorte der Ladepunkte konstant sind, hängt die Gesamttourzeit nur von der Gesamtabfallmenge ab. Es wird erkannt, dass, je höher die Gesamtabfallmenge ist desto mehr Gesamttourzeit gebraucht wird.

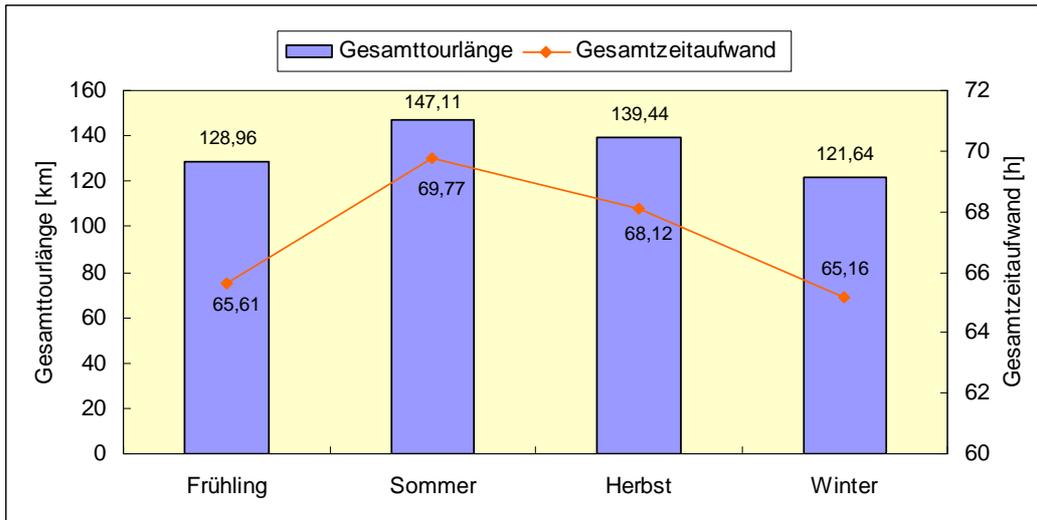


Abbildung 5.48: Gesamttourlänge und -zeitaufwand der drei Ortsteile

In Abbildung 5.49 wird die durchschnittliche Tourlänge und Tourzeit dargestellt. Im Sommer und im Herbst werden mehr Bioabfälle je Wohnhaus produziert [100]. Da die Kapazität des Sammelfahrzeugs konstant ist, wird es im Sommer weniger Wohnhäuser pro Route bedienen. Das ist der Hauptgrund, warum die durchschnittliche Tourlänge und Tourzeit in Sommer kürzer ist.

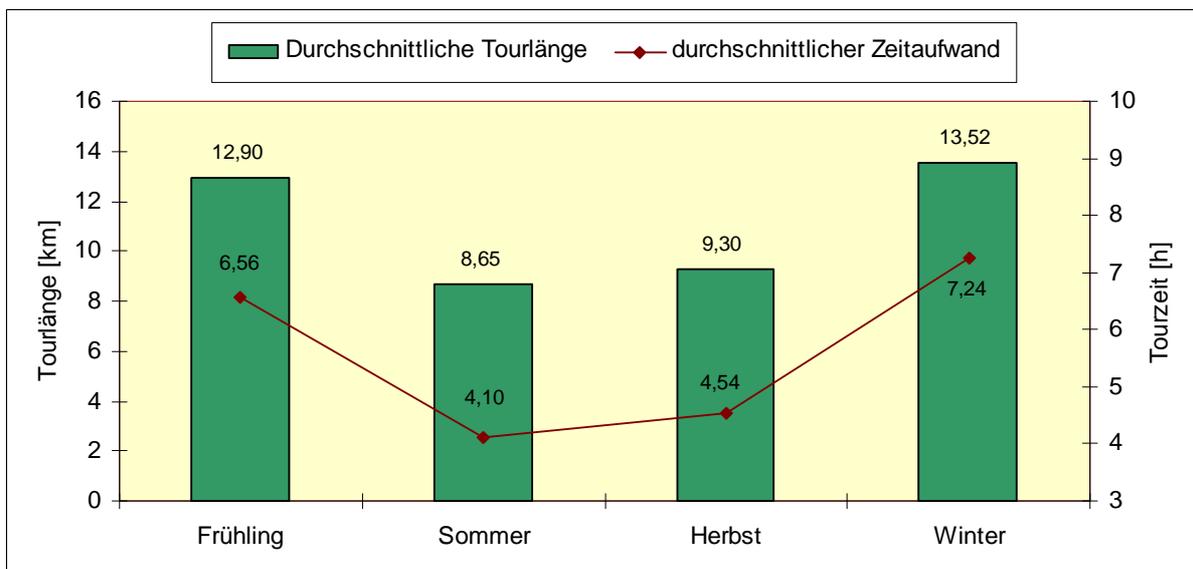


Abbildung 5.49: Durchschnittliche Tourlänge und Zeitaufwand der drei Ortsteile

In Abbildung 5.50 und Abbildung 5.51 ist die Einzeltourlänge und die Tourzeit für alle Jahreszeiten deutlich zu erkennen. Die Anzahl der Touren liegt bei 10 im Frühling, 17 im Sommer, 15 im Herbst und 9 im Winter.

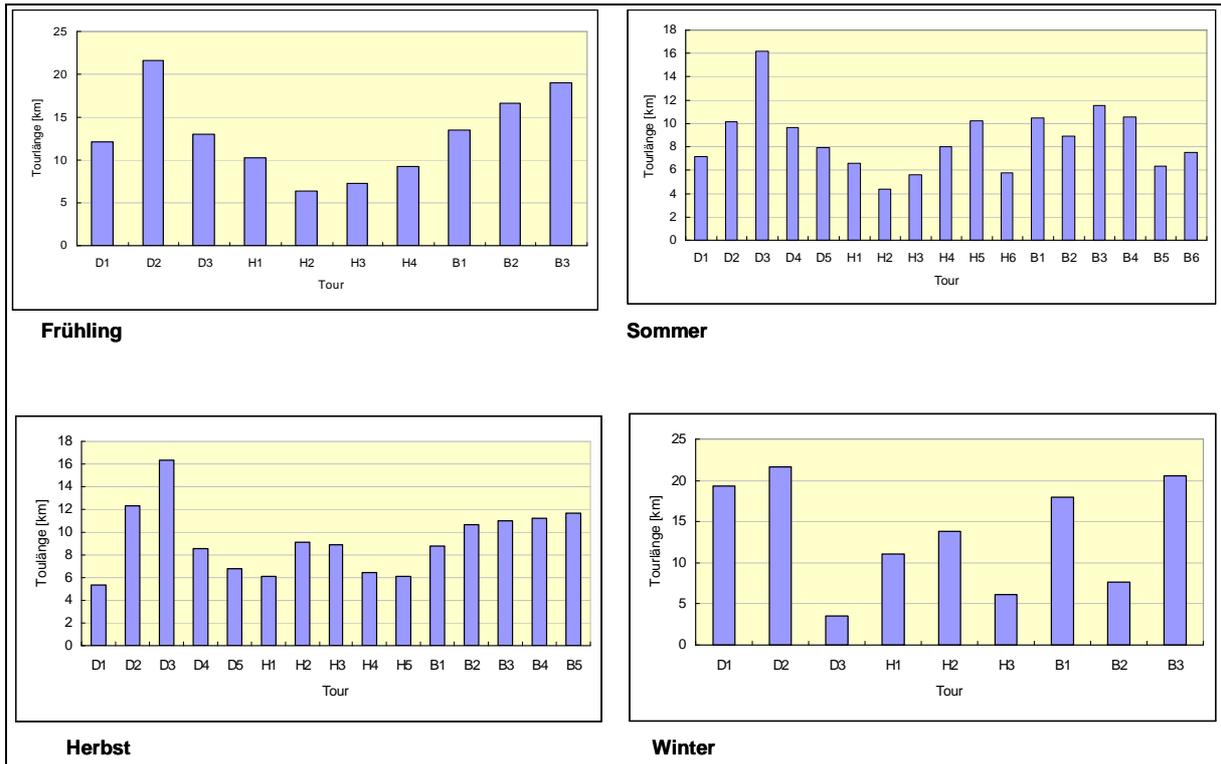


Abbildung 5.50: Einzeltourlänge für alle Jahreszeiten

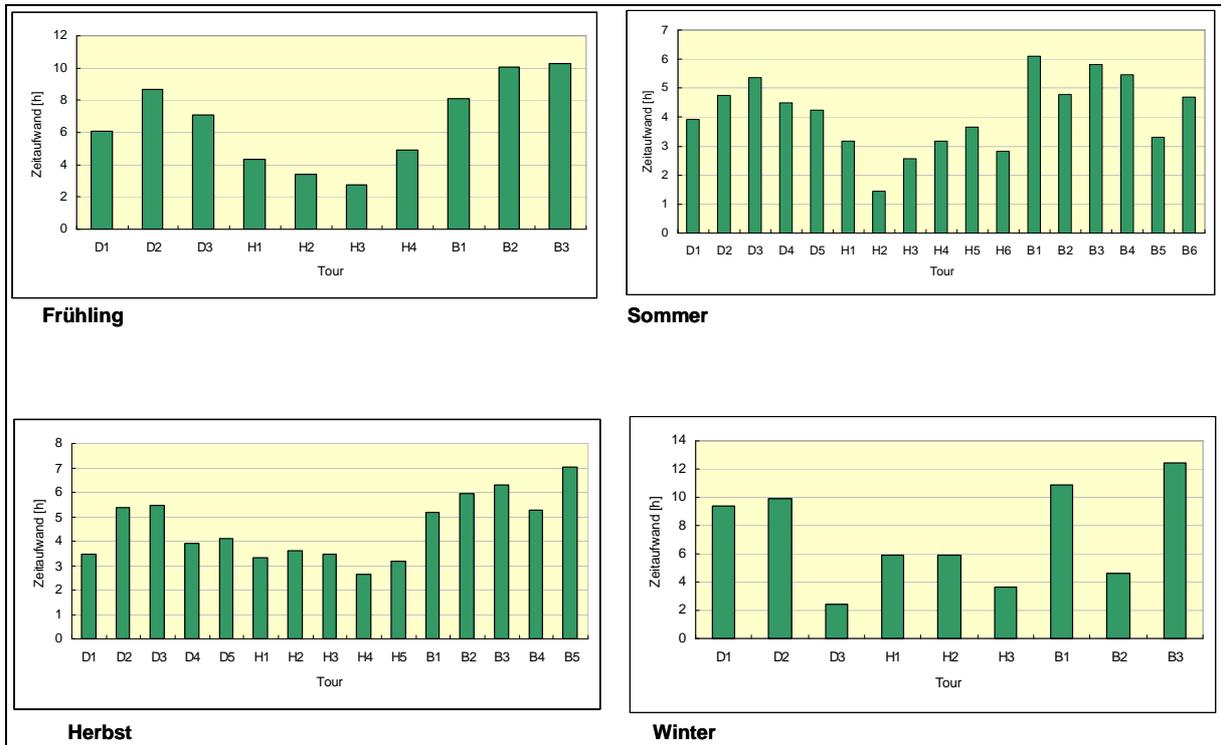


Abbildung 5.51: Die Tourzeiten für alle Jahreszeiten

Die Modellrechnungen liegen im Wesentlichen in dem damit verbundenen praktischen Aufwand begründet. Die in den Modellrechnungen erzielten absoluten Werte für den Zeitaufwand liegen unter den real benötigten Zeiten. Das war zu erwarten, da Daten über die Wartezeiten an Kreuzungen aufgrund von Ampeln oder Vorfahrtsregelungen weder erhoben noch automatisch generiert wurden.

6 Analyse der Bioabfall-Sammel-Logistik

Aus logistischer Sicht sind Bahn und Binnenschiff Massentransportmittel. Bei eingeschränkter Verfügbarkeit und häufig nur in Kombination mit dem Straßengüterverkehr bieten sie die Möglichkeit, größere Massen zu transportieren (wie Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2 zeigen). Die Transportgüter liegen in Transportbehältern, als Schüttgut oder als einfach zu be- und entladene Massen (größere Stückgüter oder greifertransportfähig) vor. Die folgenden Abfälle eignen sich, ab größeren Frachtmengen, zum Transport mit der Bahn oder dem Binnenschiff:

- Schrott und Metallabfälle,
- flüssige Abfälle (sofern sie transportiert werden dürfen) und
- Abfälle in transportfähigen Behältern (Wechselbehälter in Containermaßstäben).

Die zum Erreichen der erforderlichen Abfallmengen häufig notwendige Zwischenlagerung scheitert in der Praxis oft an gesetzlichen Einschränkungen. Ist eine gute Anbindung (direkte Be- und Entladung) am Herkunfts- und Zielort gegeben, ist der Transport mit Güterwagen besonders geeignet. Abhängig von der Art der verwendeten Güterwagen können zwischen 20 Mg und 80 Mg Nutzlast transportiert werden. Eine Zugmaschine kann maximal 40 dieser Wagen befördern. Damit ergibt sich eine maximale Nutzlast von 3.200 Mg. Moderne Binnenschiffe (Schubschleicher) transportieren Ladungen von 1.240 bis 2.800 Tonnen. Im Koppelverband werden Tragfähigkeiten von 2.530 bis 5.000 Mg erreicht. Der Transport mit Binnenschiffen besteht in der Regel aus einer mehrgliedrigen Transportkette mit Vor- und/oder Nachlauf, für die weitere Transportmittel (z. B. Lkw) erforderlich sind.

Tabelle 6.1: Bestand und Transportwege der Landverkehrsträger 2003

Landverkehrsträger	Bestand [Stück]	Transportweg [km]
Bahn (Triebfahrzeuge)	14.463	43.800
Bahn (Güterwagen)	164.138	43.800
Binnenschiff (Güterschiffe)	2.347	7.500
Lkw	2.619.300	231.600

Tabelle 6.2: Nutzlasten und Transportleistungen der Landverkehrsträger

Landverkehrsträger	Nutzlast (max) [Mg]	Transportleistung 2003 in Mio. Mg/a	Transportleistung 2004 in Mio. Mg/a
Bahn	3200	303,8	310,3
Binnenschiff	5000	220	235,9
Lkw	26	2743,9	2767,2

LKWs zeichnen sich durch ihre hohe Flexibilität aus. Sie bieten eine Vielzahl von Beladungsmöglichkeiten und können eine weiterreichende Infrastruktur nutzen. Die Abhängigkeit von Wasserwegen oder Gleisen liegt hier in der Regel nicht vor. LKWs sind besonders im Nahverkehr nicht ersetzbar. Das zulässige Gesamtgewicht pro Lkw ist auf 40 Mg begrenzt. Moderne LKWs bieten derzeit eine maximale Nutzlast von ca. 26 Mg. Das maximal mögliche Nettovolumen liegt bei ca. 106 m³.

Tabelle 6.3 zeigt Vor- und Nachteile der Landverkehrsträger. Der besondere Vorteil beim LKW-Transport ist, dass das sehr gute Streckennetz zu viel kürzeren Transportzeiten führt und sich im Vergleich zu Bahn und Binnenschiff meistens kürzere Transportwege ergeben.

Die Unterteilung deutscher LKWs nach Last- und Leerkilometern zeigt, dass der Lastkilometeranteil in den Jahren 2001 bis 2003 von 76,4 % auf 78,1 % stieg (siehe Tabelle 6.4). Die durchschnittliche Transportentfernung lag im Jahr 2003 bei rund 106 km. Im

Nahbereich (bis 50 km) wurden 2,1 Mrd. Lastkilometer zurückgelegt. Dies ist durch die kürzeren Transportweiten im Nahverkehr begründet. Der Anteil der im Straßengüterverkehr zurückgelegten Lastkilometer beträgt 9,9 %. Der Lastfahrtanteil der gefahrenen Gesamtkilometer im Nahbereich beträgt 55,7 % bei einer mittleren Transportweite von rund 16 km. Beim Regionalverkehr (51 bis 150 km) liegen der Lastfahrtanteil im Straßengüterverkehr bei 17,5 % und die mittlere Transportweite bei rund 91 km. Auf den Fernbereich (ab 151 km) entfielen 72,5 % der im Straßengüterverkehr gefahrenen Gesamtkilometer bei einer mittleren Transportweite von 379 km.

Tabelle 6.3: Vor- und Nachteile der Landverkehrsträger

Verkehrsträger	Vorteile	Nachteile
Bahn	-hohe max. Nutzlast -geringer Kraftstoffverbrauch	-eingeschränkte Verfügbarkeit (Streckennetz) -überwiegend für Massengüter -gebrochene Transportkette
Binnenschiff	-sehr hohe max. Nutzlast -geringer Kraftstoffverbrauch	-eingeschränkte Verfügbarkeit (Streckennetz) -nur für Massengüter -gebrochene Transportkette -niedrige Transportgeschwindigkeit
Lkw	-für alle Transportentfernungen -individuelle Fahrzeugaufbauarten -sehr gutes Streckennetz -kurze Transportzeit -schnelle Be- und Entladung	-geringe max. Nutzlast -hoher Kraftstoffverbrauch

Tabelle 6.4: Last- und Leerkilometern von deutschen Lkw

Jahr	2001	2002	2003
Lastkilometer [Mio. km]	21.981	21.456	21.579
Leerkilometer [Mio. km]	6.777	6.289	6.060
Gesamtkilometer [Mio. km]	28.758	27.745	27.639
Lastkilometeranteil [%]	76,4	77,3	78,1

Die technischen Daten der Fahrzeugarten für Abfalltransporte sind tabellarisch dargestellt. Die Lade- und Entladezeiten beinhalten Aufwände für Wägung, Reinigung der Ladefläche und Fahrten auf dem Gelände [33].

Tabelle 6.5: Technische Daten der Fahrzeuge für Abfalltransporte nach [33]

Fahrzeug	Technische Daten	
Sammelfahrzeug	Frachtleistung 8,1 Mg/Tour Behältervolumen 27 m ³	Entladezeit: 5 Min
Containergliederzug	Frachtleistung 19,3 Mg/Tour Behältervolumen 2 x 36 m ³	Beladezeit: 33 Min Entladezeit: 32 Min
Wechselcontainergliederzug	Frachtleistung 16,2 Mg/Tour Behältervolumen 2 x 27 m ³	Entladezeit: 32 Min
Schubbodensattelaufleger	Frachtleistung 24,5 Mg/Tour Behältervolumen 90 m ³	Beladezeit: 34 Min Entladezeit: 32 Min

In diesem Unterkapitel werden Standort-, Stoffstrom- und Transportmodelle beschrieben und dargestellt, die beim Abfalltransport eingesetzt werden. Wie in [33] wird für die Modellbildung auf einen hohen Detaillierungsgrad verzichtet. Die Modelle werden so einfach wie möglich und so komplex wie nötig aufgestellt. Durch den Verzicht auf unnötige Komplexität soll die

Zahl der möglichen Fehlerquellen so gering wie möglich gehalten werden. Die Modelle betrachten Sammelfahrten und Transportfahrten zwischen den Abfallquellen und den Abfallsenken.

Die Topografie wird bei allen Modellen, Simulationen und Berechnungen nicht detailliert berücksichtigt, da sie für die Zielsetzung dieser Arbeit nicht zweckdienlich ist.

6.1 Standortmodelle

Unter der Annahme, dass die Standorte der Abfallquellen (Gemeinden, Städte, Stadtteile) und der Abfallsenken (Biogasanlagen) unverändert bleiben, hängt die Größe und Form eines Einzugsgebietes einer Biogasanlage in erster Linie von folgenden Parametern ab:

- Standort- und Vergärungskapazität der Biogasanlage,
- Entsorgungs- und Transportkosten,
- topografische Lage und Grenzen der Landkreise und kreisfreien Städte, die Abfälle in der Abfallbehandlungsanlage anliefern und
- Einwohnerzahl (Einwohnerdichte) und Abfallmenge des Einzugsgebietes.

Weiterhin beeinflussen die gewählten Fahrzeugarten und ein eventueller Umschlag der Abfälle (Standort der Umladestation, Umladekapazität, Einzugsgebiet etc.) das Einzugsgebiet der Abfallbehandlungsanlage.

6.2 Stoffstrommodelle

Stoffstrommodelle untersuchen den Einfluss ökologischer und ökonomischer Parameter auf die Ressourcen- und Materialeffizienz. Ziel ist, unter Anderem, das Schaffen nachhaltiger Kreisläufe. Hier wird ein Stoffstrommodell für gleiche Abfälle betrachtet. Gleiche Abfälle sind nach dieser Definition Abfälle mit der gleichen Abfallschlüsselnummer nach der Abfallverzeichnis-Verordnung.

○ Abfalltausch mit gleichen Abfällen

Ein Modell für den Abfalltausch mit gleichen Abfällen wird in diesem Kapitel dargestellt. Hierbei werden nicht die Abfälle getauscht, sondern vielmehr die Routen der Sammelfahrzeuge durch einen Austausch der angefahrenen Abfallquellen oder -senken optimiert.

Bei gegebenen Standorten und Kapazitäten der Abfallquellen und Abfallsenken werden die Abfallströme beim Abfalltausch mit gleichen Abfällen so angepasst, dass die zu den Abfallsenken gelieferten Abfallmengen gleich bleiben.

In Abbildung 6.1 werden die ungünstigen Touren zwischen Abfallquelle 1 und -senke 1 (bzw. Abfallquelle 2 und -senke 2) durch die günstigeren zwischen der Quelle 1 und Senke 2 (bzw. zwischen Senke 1 und Quelle 2) ersetzt, indem die Abfallströme zu der jeweils anderen Abfallsenke umgelenkt werden. Es wird vereinfachend angenommen, dass die Fahrzeuge von dort unbeladen wieder zu der Abfallquelle fahren. Der Leerfahrtenanteil liegt in diesem Modell bei 50 %. In der Realität können die Fahrzeuge zum Betriebshof des Transporteurs fahren oder eine andere Abfallquelle ansteuern.

Dieser Austausch kann in Betracht gezogen werden, wenn sich die Fahrleistungen bzw. die Transportentfernungen für die betrachteten Abfallströme in Summe erheblich reduzieren.

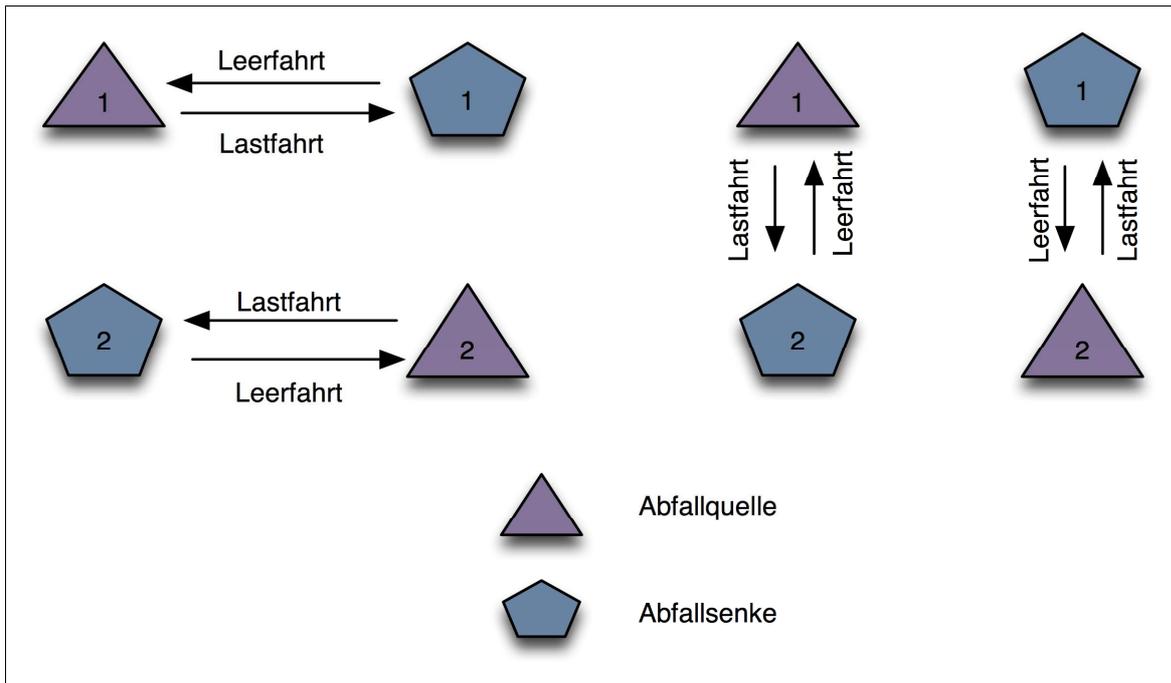


Abbildung 6.1: Stoffstrommodell mit Abfalltausch [33]

6.3 Biogasmodelle und Containerkonzepte

Zur Modellierung der Güterströme in der Supply Chain kann das Transportmodell angewendet werden. Das Ziel dieses Modells ist es, die Gesamtkosten der Transporte zu minimieren. Die Anbieter (Quellen) und Nachfrager (Produktionsstandorte) werden gegenübergestellt und auf günstige Transportmöglichkeiten untersucht. Als Hauptelemente des Transportmodells können Quellen, Umschlagpunkte (Recyclinghöfe), Produktionsstandorte und Entfernungen berücksichtigt werden.

In diesem Kapitel werden die Transportmodelle durch Darstellungen ausführlicher erläutert, die auf den Stoffstrommodellen aufbauen. Da die Transportmodelle mit den unterschiedlichen Fahrzeugarten aufgebaut werden, sind die Fahrzeugarten der wichtigste Parameter. In den ersten vier Modellen werden die Strecken berücksichtigt. In den Berechnungen werden die Sammelstrecken innerhalb des Sammelgebiets und die Transportstrecken von Sammelgebieten zu Biogasanlagen, von Sammelgebieten zu Umladestation oder Containertauschplätzen und von Umladestation oder Containertauschplätzen zu Biogas- oder Kläranlagen in Betracht gezogen.

6.3.1 Transportkonzepte

6.3.1.1 Transport mit Sammelfahrzeug

In diesem Modell kommen nur die Sammelfahrzeuge zum Einsatz, die auch bereits zur Sammlung eingesetzt wurden. Der Transport zur Biogasanlage erfolgt direkt nach der Abfallsammlung. Dieses Vorgehen bietet sich an, wenn die Distanzen zwischen Sammelgebieten und Biogasanlage klein sind. Abbildung 6.2 zeigt die Fahrstrecken (Leerfahrten) der Sammelfahrzeuge vom Betriebshof des Transporteurs zu den Sammelgebieten, die Transportstrecke von den Sammelgebieten zu den Biogasanlagen (Lastfahrten) und die Fahrstrecke (Leerfahrt) zum Betriebshof. Nach der Entladung können die Sammelfahrzeuge das gleiche oder ein anderes Sammelgebiet anfahren.

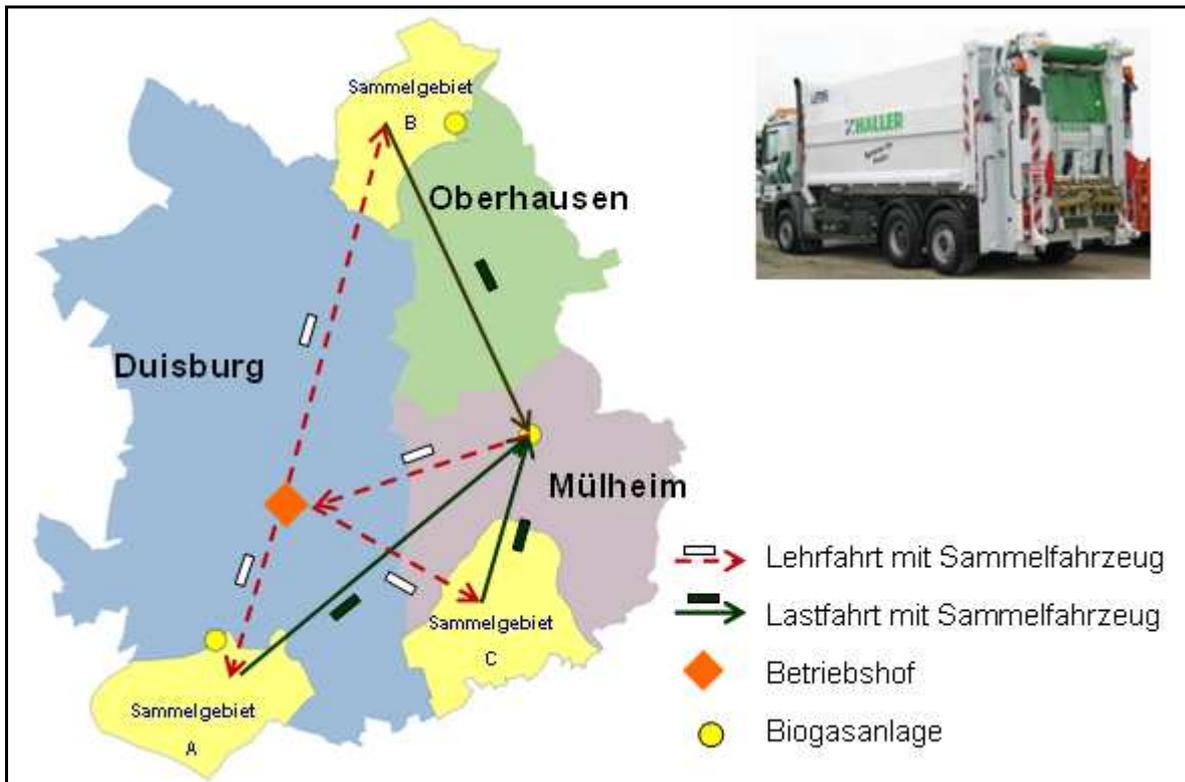


Abbildung 6.2: Direkttransporte mit Sammelfahrzeugen

6.3.1.2 Transport mit Wechselcontainer und Gliederzug über Sammelplatz

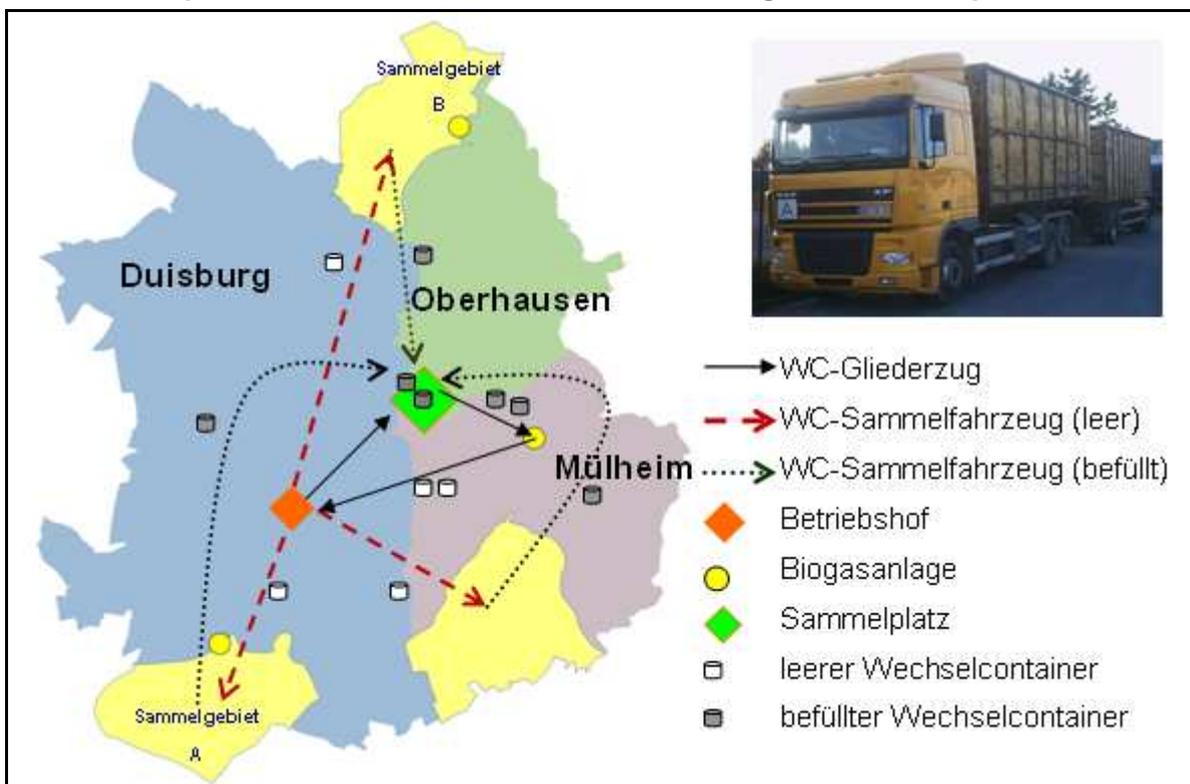


Abbildung 6.3: Wechselcontainer auf einem Sammelplatz

Hier werden spezielle Sammelfahrzeuge und herkömmliche Containergliederzüge für die Sammlung und den Transport von Bioabfällen in Wechselcontainern eingesetzt. In Abbildung 6.3 fahren die Sammelfahrzeuge mit den leeren Wechselcontainern vom Betriebshof des Transporteurs in die Sammelgebiete. Dort werden die leeren Behälter abgesetzt und die

vollen aufgeladen. Nach Beendigung der Abfallsammlung wird entweder ein Sammelplatz für die Wechselcontainer angefahren, oder der Wechselcontainer wird an einer geeigneten Stelle im Sammelgebiet abgesetzt (siehe Abbildung 6.4).

6.3.1.3 Transport mit Wechselcontainer und Gliederzug im Sammelgebiet

In diesem Modell wird der Wechselcontainer an einer geeigneten Stelle im Sammelgebiet abgesetzt (Abbildung 6.4). Die abgestellten Wechselcontainer werden von einem Wechselcontainergliederzug aufgeladen und zu einer Abfallbehandlungsanlage transportiert. Fahren die Sammelfahrzeuge eine weitere Tour, können sie auf dem Sammelplatz oder an einer anderen geeigneten Stelle von den Wechselcontainergliederzügen abgestellte leere Wechselcontainer aufnehmen. Bei diesem Modell sind Umladestationen nicht notwendig.

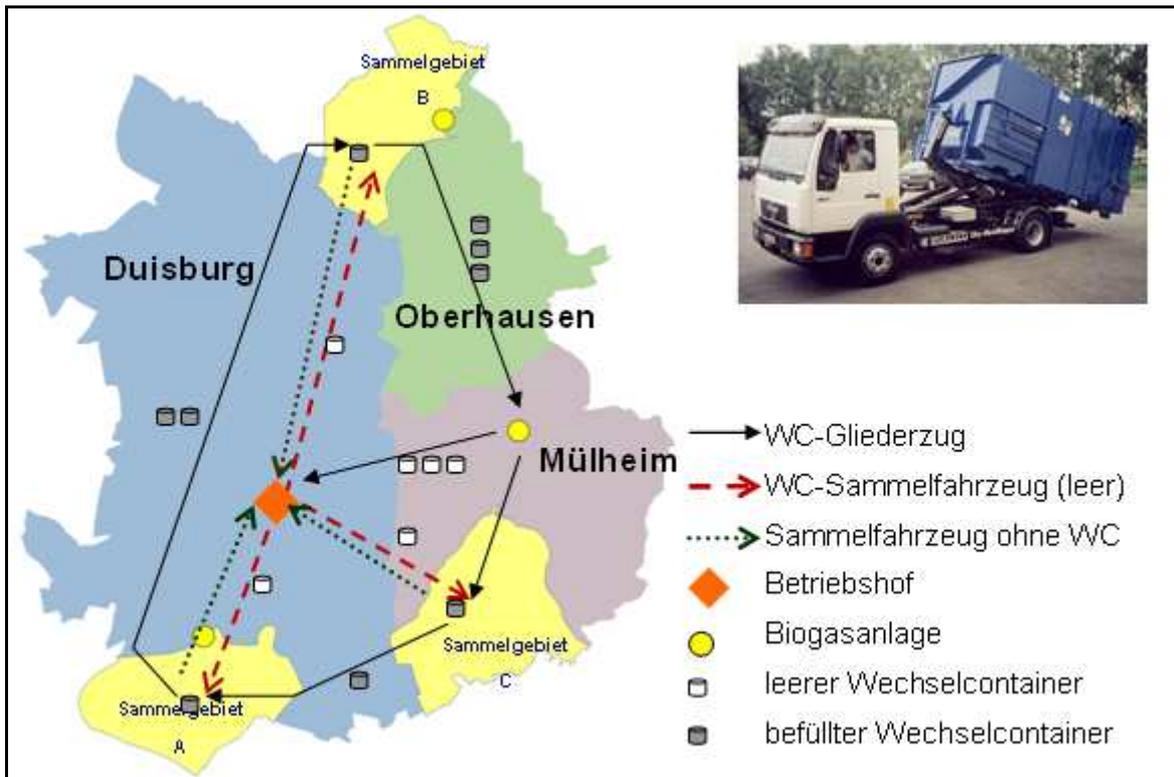


Abbildung 6.4: Wechselcontainer im Sammelgebiet

6.3.1.4 Transport mit Umladestation

In diesem Modell transportieren Sammelfahrzeuge die Abfälle zu einer Umladestation. Dort werden die Fahrzeuge entleert. Wie in Abbildung 6.5 dargestellt, werden die Bioabfälle anschließend mit Großraumfahrzeugen (Schubbodensattelaufleger, Containergliederzüge) zu einer Biogasanlage transportiert. Der Einsatz von Umladestation und Großraumfahrzeugen erlaubt den Transport großer Abfallmengen.

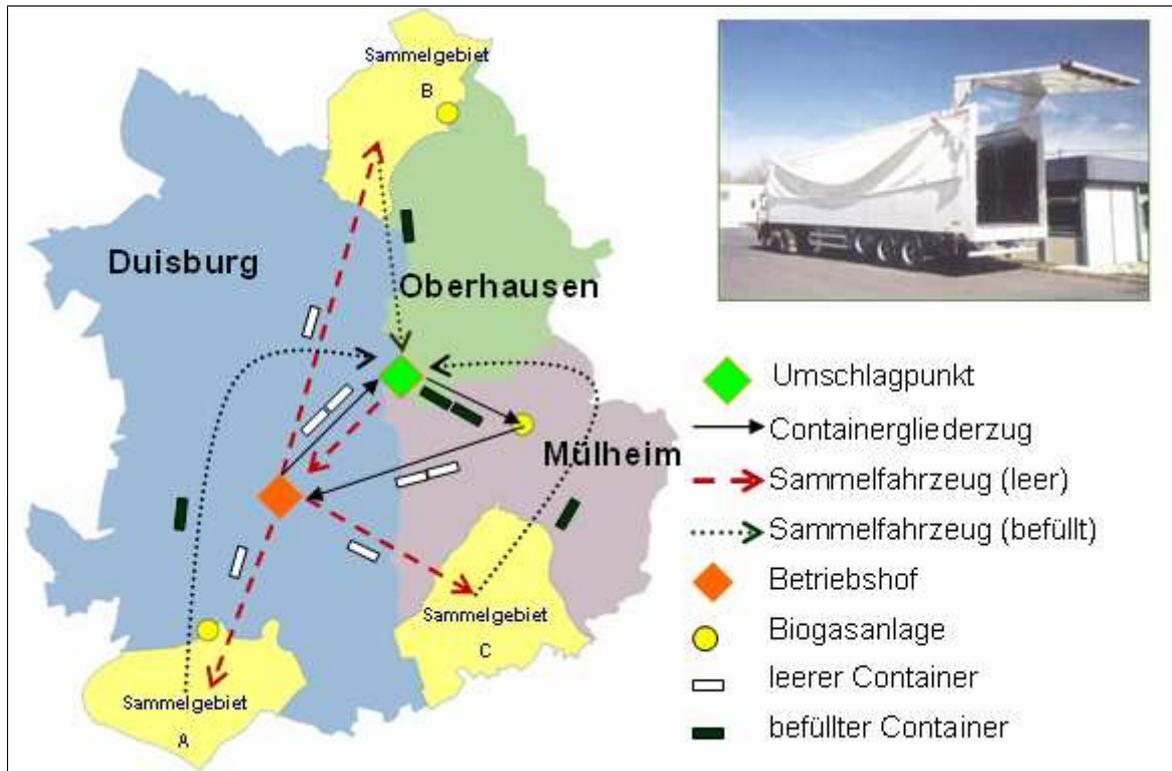


Abbildung 6.5: Transport mit Umladestation

6.4 Biogasmodell in Duisburg

Die landwirtschaftlichen Flächen liegen zum Großteil in Duisburg-Süd, der landwirtschaftliche Rohstoff ist vorhanden. Aufgrund der Gebietsstruktur ist das Bioabfallpotenzial sehr wahrscheinlich höher und die Biotonne enthält weniger Störstoffe; das macht eine landwirtschaftliche Biogasanlage sinnvoller. 1999 wurde eine getrennte Sammlung in den Ortsteilen Huckingen, Hüttenheim, Ungelsheim und Mündelheim eingeführt. Hier wohnen insgesamt 22.362 Einwohner, die sich auf rund 10.800 Haushalte verteilen. Eine mögliche Anlage soll nicht nur mit nachwachsenden Rohstoffen, sondern auch mit biogenen Abfällen bis zu 49 % betrieben werden. Neben der Verwertung des Gases als Wärme und Strom kann auch eine Einspeisung in das örtliche Gasnetz in Betracht gezogen werden [58].

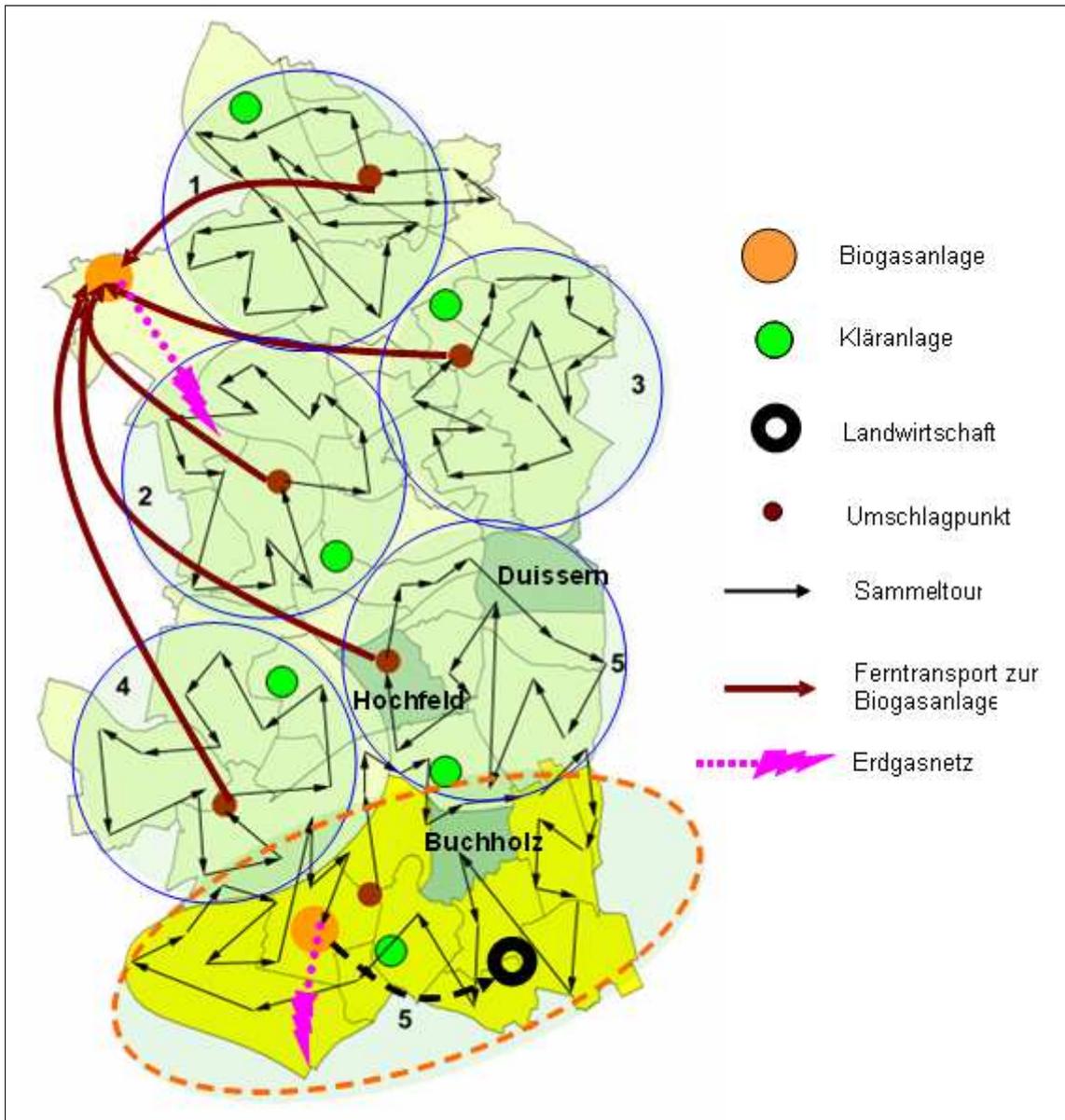


Abbildung 6.6: Vorgeschlagenes Modell für die Stadt Duisburg [30]



Abbildung 6.7: Übersicht über den Bezirk Duisburg-Süd [30]

Für die landwirtschaftliche Biogasanlage steht eine Anbaufläche von ca. 801,5 ha für die Energiepflanzen Mais, Grassilage und Roggen mit einem jährlichen Ertrag von etwa 22.133 t/a zur Verfügung. Der spezifische Biogasertrag liegt bei der ausgewählten Substratmischung bei 186 m³/t FM. Es kann ein Brutto-Biogasertrag von insgesamt

4.116.000 m³ erwirtschaftet werden. In der Tabelle 6.6 werden der Feldertrag und dessen Biogasertrag ausführlich dargestellt.

Tabelle 6.6: Übersicht über Feldertrag und Biogasertrag

Mögliche Lieferung von Landwirten		
Anbaufläche	802	Ha
mittlerer Ertrag pro Hektar	28	t/ha
nutzbares Potenzial	22.133	t/a
Biogasanlage		
spezifischer Biogasertrag für Energiepflanzen	186	m ³ /t FM
Biogasertrag für Energiepflanzen	4.116.000	m ³
Heizwert	5,40	kWh/m ³
Energieertrag	22.229	MWh/a

Die Vergärung wäre eine Möglichkeit, die in Duisburg potenziell zu sammelnden Bioabfälle zu verwenden. Durch die Vergärung in einer Biogasanlage kann dabei entstehendes Methan verstromt und unter günstigen Bedingungen auch zur Wärmeerzeugung genutzt werden. Der durchschnittliche Biogasertrag von Bioabfällen liegt laut einer Studie bei 120 m³/Mg [97]. Eine mögliche industrielle Biogasanlage kann in Duisburg-Baerl geplant werden. Hier ist die Siedlungsdichte geringer als die in den anderen Stadtbezirken und das Erdgasnetz ist in der Nähe, also könnte das produzierte Biogas direkt ins Erdgasnetz eingespeist werden.

6.4.1 Industrielle Biogasanlage (CO-Fermentation) - Modell

Im ersten Modell für die gesamte Stadt Duisburg werden zwei Biogasanlagen vorgeschlagen, eine im Süden (landwirtschaftlich) und eine im Nordwesten (industriell). Zur landwirtschaftlichen Biogasanlage wird, neben den nachwachsenden Rohstoffen, auch der biogene Abfall des Stadtbezirks Duisburg-Süd transportiert und dort verwertet. Um die Transportkosten zu reduzieren, soll der bestehende Umschlagpunkt benutzt oder es sollen, nach einer Kostenanalyse, zusätzliche Umschlagpunkte eröffnet werden.

6.4.2 Biogas-Kläranlage - Modell

In der zweiten Variante wird Duisburg in sechs Bereiche geteilt, weil sechs Kläranlagen vorhanden sind. Im Süden wird, wie bei dem ersten Modell, eine landwirtschaftliche Biogasanlage platziert und alle biogenen Abfälle werden in dieser Anlage verwertet. Anschließend werden die biogenen Abfälle von anderen Bezirken auf fünf Klärwerke verteilt. Es wird angenommen, dass die Kläranlage für die Biogasproduktion (Klärgasproduktion) geeignet ist. Bei Kapazitätsmangel kann die Kläranlage 6 als Ersatzentsorgungsoption in Betracht gezogen werden. In dieser Arbeit wird mit zwei verschiedenen Szenarien gearbeitet. Zum einen sollen umliegende Biogasanlagen als Produktionsstandorte verwendet werden und zum anderen sind die Duisburger Kläranlagen als Produktionsstandorte vorgesehen (siehe Abbildung 6.8).

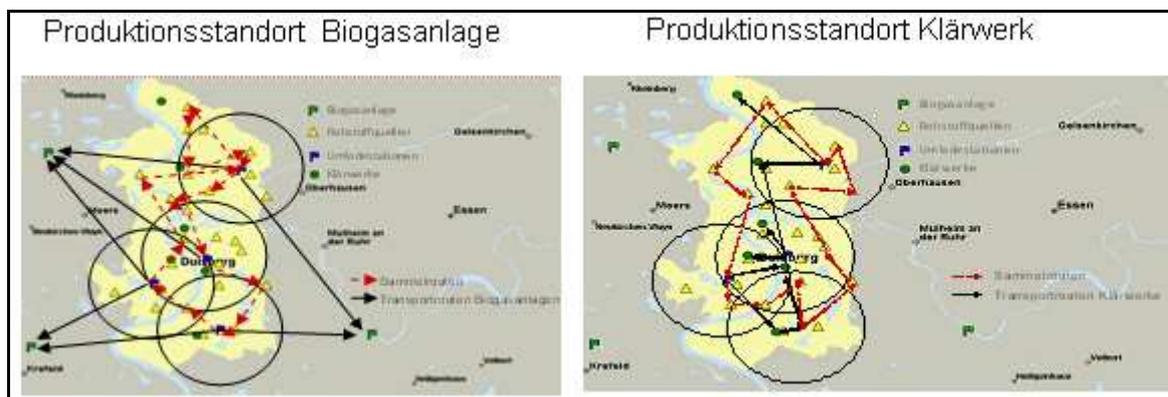


Abbildung 6.8: Standortkonzepte mit Biogas- und Kläranlagen [30]

6.5 Transportmodelle

Die Stoffstrommodelle werden in diesem Kapitel konkretisiert. Das führt zu der Betrachtung von Transportmodellen, in denen verschiedene Fahrzeugarten und Fahrzeugaufbauten zum Einsatz kommen. Diese beeinflussen oder bestimmen den Transportweg, eventuell auch den Aufbau und Ablauf der Transportkette. Es werden folgende Transportwege betrachtet:

- von Sammelgebieten zu Abfallbehandlungsanlagen,
- von Sammelgebieten zu Umladestation oder Containertauschplätzen und
- von Umladestation oder Containertauschplätzen zu Abfallbehandlungsanlagen.

Logistikkonzepte der Bioabfallsammlung

In diesem Unterkapitel werden konkrete Logistikkonzepte der Bioabfallsammlung für Duisburg, Oberhausen und Mülheim vorgestellt. Die Transportmodelle mit den verschiedenen Fahrzeugarten werden unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten verglichen.

Fahrleistungsalgorithmus

Der Algorithmus der Fahrleistungen wird für die Bioabfallsammlung und -transporte beispielhaft erläutert. Die vorgestellten Gleichungen können auch auf andere Abfallarten übertragen werden. Die folgenden Punkte bilden die Basis für den Algorithmus:

- die topografische Lage der Gemeinde-, Stadt- und Stadtteilmittelpunkte,
- die topografischen Standorte der Abfallbehandlungsanlagen (Abfallsenken) und der Umladestationen (Abfallquellen und -senken),
- die Entfernungsberechnungen,
- die Abfallbilanzen der Städte,
- die Einwohnerzahlen der Gemeinden und Städte und
- die Transportmengen der verschiedenen Lkw-Fahrzeugarten.

Weiterhin werden die folgenden Parameter berücksichtigt:

- Transportkettenart und
- Lkw-Fahrzeugart.

In den Abfallbilanzen der Städte werden die Bioabfallmengen pro Jahr und Einwohner (Bioabfall aus Haushalt) jeweils gruppiert nach den Stadtbezirken aufgeführt. Mit der Bioabfallmenge m einer Quelle pro Jahr in Tonnen, der Anzahl der Einwohner E dieser Quelle und der spezifischen Bioabfallmenge $m_{\text{spez.}}$ pro Einwohner und Jahr ergibt sich für das Transportaufkommen der Stadt die Gleichung:

$$\begin{aligned} TA &= m \\ &= E \cdot m_{\text{spez.}} \end{aligned} \quad (6-1)$$

Es wird angenommen, dass alle Einwohner der drei Städte die Biotonne nutzen (Das entspricht einem Anschlussgrad von 100 %.). Die Anzahl der Fahrten wird in Abhängigkeit von der gewählten Lkw-Fahrzeugart und der jeweiligen Frachtleistung und Bioabfallmenge der Abfallquelle berechnet. Es wird angenommen, dass die Bioabfallsammlung in einem 14-tägigen Rhythmus erfolgt.

Die Sammelfahrzeuge fahren pro Jahr mindestens 26 Mal (365 Tage/14 Tage) in die Sammelgebiete. Die Anzahl der Abfallsammelfahrten wird nach Gleichung (6-2) berechnet. Dabei ist m die Bioabfallmenge einer Quelle pro Jahr, m_{LKW} die Frachtleistung eines LKWs pro Tour, m_{US} die jährliche Bioabfallumschlagmenge der Umladestation, n_{US} die Fahrtenan-

zahl von Umladestation zu Abfallbehandlungsanlage pro Jahr und n_{14d} die Anzahl der Abfallfahrten in 14 Tagen.

$$n_{14d} = \frac{m}{26 \cdot m_{LKW}} \quad (6-2)$$

$$n_{US} = \frac{m_{US}}{m_{LKW}} \quad (6-3)$$

Sammelfahrzeuge transportieren den Bioabfall in eine Umladestation (*US*). Dort werden die Abfälle in Containergliederzüge oder Schubbodensattelaufleger umgeladen und zu einer Abfallbehandlungsanlage transportiert. Die Anzahl der Fahrten berechnet sich nach Gleichung (6-3). Sie wird durch die Frachtleistung des Transportmittels und die Abfallumschlagmenge bestimmt. Die Anzahl n_{WC} der Wechselcontainerzugfahrten pro Jahr für Sammlung und Transporte werden analog zur Gleichung (6-4) berechnet.

$$n_{WC} = \frac{n_{14d}}{WC} \quad (6-4)$$

Nach Gleichung (6-5) wird die jährliche Fahrleistung FL_{eg} von den Sammelgebieten zu den Umladestationen oder direkt zu den Abfallbehandlungsanlagen errechnet. Diese Gleichung gilt für eingliedrige (*eg*) Transportketten.

$$FL_{eg} = n \cdot (s_{Last} + s_{Leer}) \quad (6-5)$$

Dabei ist n die Anzahl der Fahrten pro Jahr, s_{Last} bzw. s_{Leer} sind die Last- bzw. Leerfahrkilometer von einer Quelle zu einer Senke bzw. von einer Senke zu einer Quelle pro Tour. Erfolgt der Transport in einer mehrgliedrigen (*mg*) Transportkette, können die Fahrleistungen der einzelnen eingliedrigen Teilketten addiert werden.

$$FL_{mg} = (FL_{eg,1} + FL_{eg,2} + \dots + FL_{eg,k}) \quad (6-6)$$

$$= n_1 \cdot (s_{Last,1} + s_{Leer,1}) + \dots + n_k (s_{Last,k} + s_{Leer,k}) \quad (6-7)$$

k entspricht der Anzahl der eingliedrigen Teilketten. Mit $s_i = s_{Last} + s_{Leer}$:

$$FL_{mg} = \sum_{i=1}^k (n_i \cdot s_i) \quad (6-8)$$

Beispielberechnung

In diesem Abschnitt wird der Bioabfalltransport von ausgewählten Städten und Bezirken mithilfe des Algorithmus untersucht. In der Abbildung 6.9 sind die Abfallquellen und -senken eingezeichnet. Bei der Lagewahl dieser Punkte werden topografische Aspekte weniger berücksichtigt. Es werden drei Fälle betrachtet, die sich jeweils in der Platzierung der Biogasanlage unterscheiden:

- Biogasanlage in Duisburg: Düsseldorfer Landstraße 196, 47249 Duisburg
- Biogasanlage in Oberhausen: Starenweg 1, 46147 Oberhausen
- Biogasanlage in Mülheim an der Ruhr: Pilgerstraße 25, 45473 Mülheim

Die Umladestation wird im Zentrum (Emmericher Straße 282, 47138 Duisburg) der drei betrachteten Städte platziert. Sie wird mithilfe der Simulations-Software ermittelt.

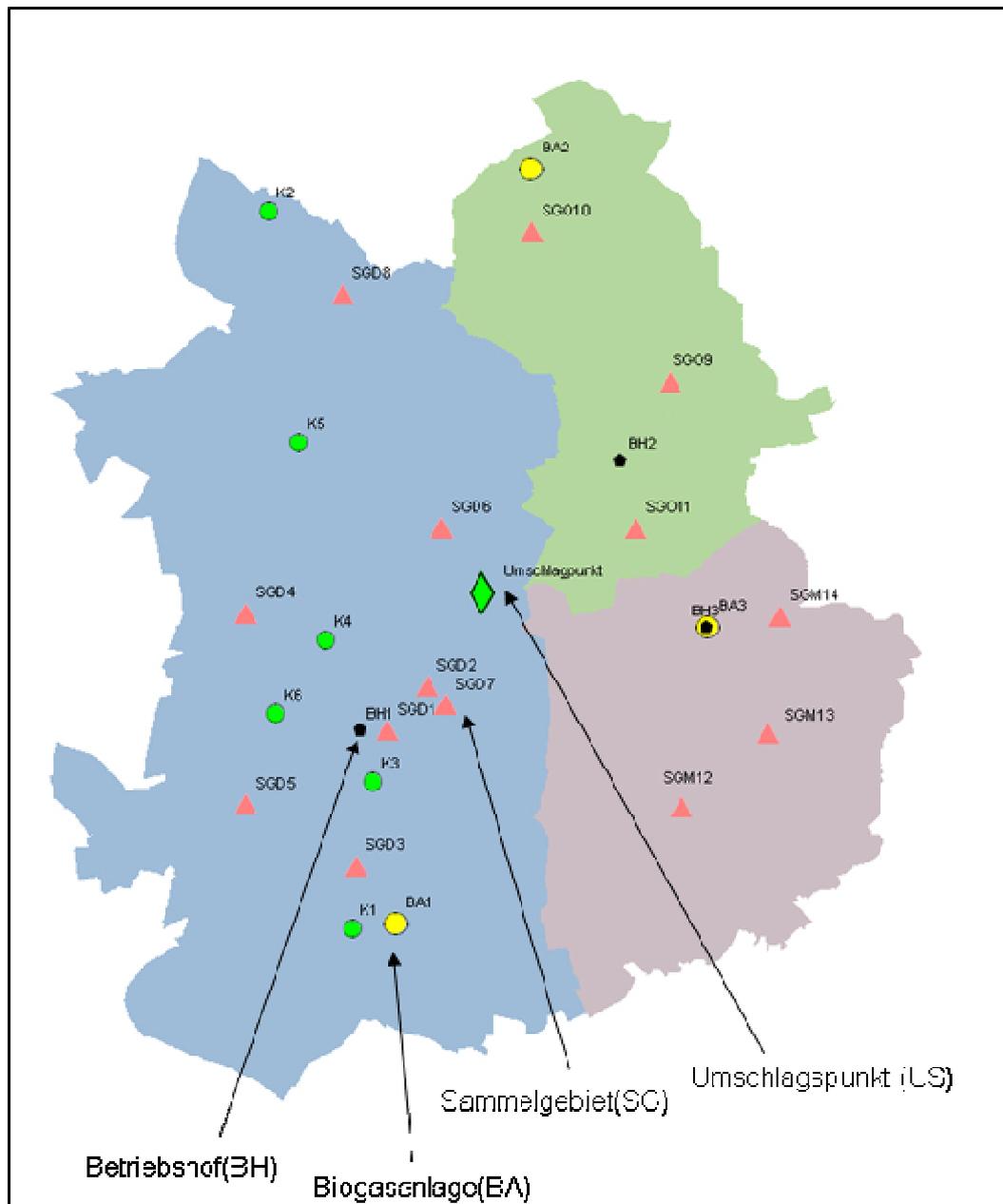


Abbildung 6.9: Topografische Lage

Die anfallende Fahrleistung wird für jede Variante berechnet. Die Ergebnisse werden miteinander verglichen. In den Tabelle 6.7 bis Tabelle 5.9 sind Einwohnerzahlen, spezifische Abfallmenge und Gesamtabfallmenge pro Jahr erfasst. Duisburg ist in sieben Bezirke unterteilt, Oberhausen und Mülheim in jeweils drei. Analog zu [97] wird eine Menge von 50 Kilogramm Bioabfall pro Einwohner und Jahr für Duisburg, 33,45 Kilogramm Bioabfall pro Einwohner und Jahr für Oberhausen [101] und 32,26 Kilogramm Bioabfall pro Einwohner und Jahr für Mülheim angenommen [102].

Tabelle 6.7: Bioabfallaufkommen in Duisburg

Duisburg				
Sammelgebiet	Einwohner [5]	spez. Bioabfallmenge [kg/(E · a)]	Bioabfallmenge aus Haushalt [Mg/a]	Bioabfallmenge aus Gastronomie und Gewerbe [Mg/a]
SGD1	24.420	50	1.221	485
SGD2	35.748	50	1.787	1035
SGD3	73.087	50	3.654	831
SGD4	40.671	50	2.034	911
SGD5	77.595	50	3.880	1037
SGD6	73.253	50	3.663	1452
SGD7	45.361	50	2.268	988
SGD8	122.735	50	6.137	1139
Summe	492.870	-	24.644	7878

Tabelle 6.8: Bioabfallaufkommen in Oberhausen

Oberhausen				
Sammelgebiet	Einwohner [5]	spez. Bioabfallmenge [kg/(E · a)]	Bioabfallmenge aus Haushalt [Mg/a]	Bioabfallmenge aus Gastronomie und Gewerbe [Mg/a]
SGO9	56.490	33,45	1.890	1.264
SGO10	76.701	33,45	2.566	792
SGO11	84.898	33,45	2.840	1.299
Summe	218.089	-	7.295	3.356

Tabelle 6.9: Bioabfallaufkommen in Mülheim

Mülheim				
Sammelgebiet	Einwohner [5]	spez. Bioabfallmenge [kg/(E · a)]	Bioabfallmenge aus Haushalt [Mg/a]	Bioabfallmenge aus Gastronomie und Gewerbe [Mg/a]
SGM12	55.713	32,26	1.797	1.899
SGM13	34.366	32,26	1.109	354
SGM14	79.513	32,26	2.565	467
Summe	169.592	-	5.471	2.720

Berechnung der Entfernungen

Die Entfernungen von den Abfallquellen (Bezirk, Sammelgebiet) zu den Abfallsenken (Biogasanlagen) und die entsprechenden Fahrzeiten wurden mithilfe eines Routenplaners berechnet. Im Allgemeinen stehen für eine Fahrstrecke mehrere Alternativen zur Auswahl. In allen Tabellen werden nur die jeweils schnellsten Möglichkeiten zusammengefasst und dargestellt. Die Umladestation (US) liegt in Duisburg-Mitte. Die Entfernung zur jeweiligen Biogasanlage (BGA) und die entsprechenden Fahrzeiten sind:

Tabelle 6.10: Entfernungen und Fahrzeiten von der Umladestation bis zu den Abfallsenken

Umladestation	zur Biogasanlage Duisburg		zur Biogasanlage Oberhausen		zur Biogasanlage Mülheim	
	Entfernung [Km]	Fahrzeit [min]	Entfernung [Km]	Fahrzeit [min]	Entfernung [Km]	Fahrzeit [min]
	12	16	12,2	14	10,7	15

Umladestation	zum Betriebshof Duisburg		zum Betriebshof Oberhausen		zum Betriebshof Mülheim	
	Entfernung [Km]	Fahrzeit [min]	Entfernung [Km]	Fahrzeit [min]	Entfernung [Km]	Fahrzeit [min]
	7,2	12	6	10	10,7	15

Für die Berechnung der Distanz zwischen Abfallquellen und Umladestation wird für die Abfallquelle ein Punkt angenommen, der jeweils in der Mitte der betrachteten Sammelgebiete liegt (Tabelle 6.11).

Tabelle 6.13: Entfernungen beim Direkttransport mit Sammelfahrzeug

Stadt/ Sammelgebiet	Sammelfahrzeug					Summe	
	Be --> Sa	Sammlung		Sa-->BGA	BGA-->Be	Haushalt	Gewerbe
		Haushalt	Gewerbe			[km / Tour]	[km / Tour]
	S Leer	S Last	S Last	S Last	S Leer		
Biogasanlage in Duisburg							
SGD1	1,2	12	10,9	6,4	6,5	26,1	25,0
SGD2	3,2	12	8,7	7,7	6,5	29,4	26,1
SGD3	4,4	12	19,1	3,2	6,5	26,1	33,2
SGD4	4,4	12	26,8	15,1	6,5	38,0	52,8
SGD5	4,2	12	25,5	10	6,5	32,7	46,2
SGD6	9,6	12	18,9	12,9	6,5	41,0	47,9
SGD7	3,8	12	13,5	7,8	6,5	30,1	31,6
SGD8	16,7	12	18,7	20	6,5	55,2	61,9
SGO9	3,9	12	20,3	21,8	19,1	56,8	65,1
SGO10	7,4	12	21,3	24,3	19,1	62,8	72,1
SGO11	3	12	18,3	17,5	19,1	51,6	57,9
SGM12	9	12	24,1	19,2	19,4	59,6	71,7
SGM13	7,9	12	19,5	23,3	19,4	62,6	70,1
SGM14	3,7	12	17,8	20,1	19,4	55,2	61,0
Biogasanlage in Oberhausen							
SGD1	1,2	12	10,9	23,1	23,6	59,9	58,8
SGD2	3,2	12	8,7	21,8	23,6	60,6	57,3
SGD3	4,4	12	19,1	26,8	23,6	66,8	73,9
SGD4	4,4	12	26,8	15,8	23,6	55,8	70,6
SGD5	4,2	12	25,5	29,8	23,6	69,6	83,1
SGD6	9,6	12	18,9	15,1	23,6	60,3	67,2
SGD7	3,8	12	13,5	22,3	23,6	61,7	63,2
SGD8	16,7	12	18,7	8,5	23,6	60,8	67,5
SGO9	3,9	12	20,3	11,0	12,9	39,8	48,1
SGO10	7,4	12	21,3	2,3	12,9	34,6	43,9
SGO11	3	12	18,3	13,7	12,9	41,6	47,9
SGM12	9	12	24,1	24,5	24,6	70,1	82,2
SGM13	7,9	12	19,5	28,5	24,6	73,0	80,5
SGM14	3,7	12	17,8	25,3	24,6	65,6	71,4
Biogasanlage in Mülheim							
SGD1	1,2	12	10,9	14,0	14,5	41,7	40,6
SGD2	3,2	12	8,7	12,8	14,5	42,5	39,2
SGD3	4,4	12	19,1	18,0	14,5	48,9	56,0
SGD4	4,4	12	26,8	16,0	14,5	46,9	61,7
SGD5	4,2	12	25,5	20,7	14,5	51,4	64,9
SGD6	9,6	12	18,9	13,1	14,5	49,2	56,1
SGD7	3,8	12	13,5	13,3	14,5	43,6	45,1
SGD8	16,7	12	18,7	20,2	14,5	63,4	70,1
SGO9	3,9	12	20,3	7,5	7,1	30,5	38,8
SGO10	7,4	12	21,3	20,6	7,1	47,1	56,4
SGO11	3	12	18,3	5,6	7,1	27,7	34,0
SGM12	9	12	24,1	3,5	1,5	24,5	36,6
SGM13	7,9	12	19,5	7,9	1,5	27,8	35,3
SGM14	3,7	12	17,8	3,3	1,5	19,0	24,8

Tourenanzahl

Die erläuterten Transportmodelle werden in diesem Beispiel für die folgenden Varianten der Bioabfalltransporte betrachtet:

- Direkter Transport von den Abfallquellen zu den Abfallsenken mit Sammelfahrzeugen.
- Transport mit Wechselcontainersammelfahrzeugen und Wechselcontainergliederzügen.
- Transport mit Wechselcontainersammelfahrzeugen und Wechselcontainergliederzügen über Sammelplatz.
- Transport mit Sammelfahrzeugen zu einer Umladestation und Umschlag der Abfälle in Containergliederzüge.
- Transport mit Sammelfahrzeugen zu einer Umladestation und Umschlag der Abfälle in Schubbodensattelaufleger.

Die folgenden Tabelle 6.14 und 6.15 zeigen die Anzahlen der benötigten Touren in dem betrachteten Gebiet bei einem 14-tägigen Sammelzyklus. Die Zahlen sind nach Gleichung (6-9) berechnet und auf ganze Zahlen aufgerundet. Als Beispiel sei eine Berechnung der Sammeltouren für Duisburg, Sammelgebiet 1, gezeigt:

$$\begin{aligned}
 n_{14d} &= \frac{m}{26 \cdot m_{Lkw}} \\
 &= \frac{1.221\text{Mg}}{26 \cdot 8,1\text{Mg/Tour}} \quad (6-9) \\
 &= 5,79
 \end{aligned}$$

Für 1.221 Mg Bioabfall werden 6 Touren benötigt (bei einem 14-tägigen Sammelzyklus). Dies ergibt 156 Touren (Tabelle 6.14) pro Jahr. Für den Transport der 24.644 Mg/a Bioabfall aus ganz Duisburg benötigen die Wechselcontainersammelfahrzeuge 3.146 Touren/a. Bei doppelter Frachtleistung (16,2 Mg/Tour nach Tabelle 6.5) benötigen die Wechselcontainergliederzüge nur 1.573 Touren/a.

Tabelle 6.14: Sammel- und Transporttourenanzahl

Stadt/ Sammelgebiet	Fall 1				Fall 2			
	Abfallsammlung mit (WC-) Sammelfahrzeug				Abfallsammlung mit (WC-) Gliederzug			
	[Touren / 14d]		[Touren / a]		[Touren / 14d]		[Touren / a]	
	Haushalt	Gewerbe	Haushalt	Gewerbe	Haushalt	Gewerbe	Haushalt	Gewerbe
Duisburg								
SGD1	6	3	156	78	3	2	78	52
SGD2	9	5	234	130	5	3	130	78
SGD3	18	4	468	104	9	2	234	52
SGD4	10	5	260	130	5	3	130	78
SGD5	19	5	494	130	10	3	260	78
SGD6	18	7	468	182	9	4	234	104
SGD7	11	5	286	130	6	3	156	78
SGD8	30	6	780	156	15	3	390	78
Oberhausen								
SGO9	10	6	260	156	5	3	130	78
SGO10	13	3	338	78	7	2	182	52
SGO11	14	8	364	208	7	4	182	104
Mülheim								
SGM12	9	10	234	260	5	5	130	130
SGM13	6	2	156	52	3	1	78	26
SGM14	13	2	338	52	7	1	182	26

In Tabelle 6.14 werden die Werte für Fall 1 und Fall 2 und die Tourenanzahlen von WC-Sammelfahrzeugen und WC-Gliederzügen dargestellt. Sammelfahrzeuge und Wechselcontainersammelfahrzeuge benötigen aufgrund der gleichen Transportkapazität die gleiche Tourenanzahl. In Fall 1 fahren nur die WC-Sammelfahrzeuge. In Fall 2 sind sowohl die WC-Sammelfahrzeuge als auch die WC-Gliederzüge im Einsatz. Durch den Einsatz der zusätzlichen Fahrzeuge ändert sich die Tourenanzahl nicht; durch die zusätzlichen Fahrzeuge ändern sich die Strecken, welche die jeweiligen Fahrzeuge zurücklegen.

Im Fall 3 und 4 werden die Bioabfälle in einer Umladestation in Containergliederzüge oder Schubbodensattelaufleger umgeladen. Die notwendigen Transporte können nach Gleichung und mit den Daten aus Tabelle 6.5 berechnet werden (z. B. für Duisburg).

$$n_{14} = \frac{m_{14d}}{m_{LKW}} \quad (6-10)$$

$$= \frac{1221\text{Mg}}{26 \cdot 19,3\text{Mg/Tour}}$$

$$= 2,43 \approx 3$$

Für den Transport der 46,96 Mg Bioabfall aus Sammelgebiet SGD1 benötigen die Containergliederzüge (Frachtleistung 19,3 t/Tour) 3 Touren pro 14 Tage und die Schubbodensattelaufleger (Frachtleistung 24,5 t/Tour) 2 Touren. Wegen der höheren Frachtleistung benötigen diese Fahrzeuge weniger Touren als die Wechselcontainersammelfahrzeuge und Wechselcontainergliederzüge. Tabelle 6.15 zeigt die Ergebnisse pro Jahr.

Tabelle 6.15: Tourenanzahl für Fall 3 bis 5

Stadt/ Sammelgebiet	Fall 3				Fall 4				Fall 5			
	WC-Gliederzug				Containergliederzug				Schubbodensattelaufleger			
	[Touren / 14d]		[Touren / a]		[Touren / 14d]		[Touren / a]		[Touren / 14d]		[Touren / a]	
	H	G	H	G	H	G	H	G	H	G	H	G
Duisburg												
	H: [Haushalt]				G: [Gewerbe]							
SGD1	3	2	78	52	3	1	78	26	2	1	52	26
SGD2	5	3	130	78	4	3	104	78	3	2	78	52
SGD3	9	2	234	52	8	2	208	52	6	2	156	52
SGD4	5	3	130	78	5	2	130	52	4	2	104	52
SGD5	10	3	260	78	8	3	208	78	7	2	182	52
SGD6	9	4	234	104	8	3	208	78	6	3	156	78
SGD7	6	3	156	78	5	2	130	52	4	2	104	52
SGD8	15	3	390	78	13	3	338	78	10	2	260	52
Oberhausen												
SGO9	5	3	130	78	4	3	104	78	3	3	78	78
SGO10	7	2	182	52	6	5	156	130	5	1	130	26
SGO11	7	4	182	104	6	5	156	130	5	2	130	52
Mülheim												
SGM12	5	5	130	130	4	3	104	78	3	4	78	104
SGM13	3	1	78	26	3	2	78	52	2	1	52	26
SGM14	7	1	182	26	6	5	156	130	5	1	130	26

Fahrleistungsberechnung

In diesem Abschnitt werden die Fahrleistungen der verschiedenen Fahrzeuge pro Tour mit und ohne Umschlag berechnet. Der Containerwechsel sollte an einem geeigneten Standort durchgeführt werden. Diese Standorte können jeweils in den einzelnen Sammelgebieten (SG) liegen. Alternativ wird ein Übergabepunkt gemeinsam von mehreren Sammelgebieten genutzt. Dieser gemeinsame Übergabepunkt wird so gewählt, dass er aus allen beteiligten Sammelgebieten gleich gut erreichbar ist. Die vollen WC-Sammelfahrzeuge fahren zu diesem Übergabepunkt und stellen dort den Abfall für die Wechselcontainergliederzüge bereit. Die Fahrleistungen der Wechselcontainersammelfahrzeuge (zu den Übergabepunkten) und der Wechselcontainergliederzüge (vom Treffpunkt zur Biogasanlage) sind in den folgenden drei Tabelle 6.16 bis Tabelle 6.18 zusammengefasst.

Tabelle 6.16: Containerholssystem für die Biogasanlage über Sammelgebiet in Duisburg

Sammelgebiet	WC-Sammelfahrzeug				WC-Gliederzug			Summe	Summe
	Be --> Sa	Sammlung [km]		Sa --> Be	Be-->Sa	Sa-->BGA	BGA-->Be	Haushalt	Gewerbe
	[km]	Haushalt	Gewerbe	[km]	[km]	[km]	[km]		
	S Leer	S Last	S Last	S Leer	S Leer	S Last	S Leer	[km]	[km]
Biogasanlage in Duisburg									
SGD1	1,2	12	10,9	1,2	1,2	6,4	6,5	28,5	27,4
SGD2	3,2	12	8,7	3,2	3,2	7,7	6,5	35,8	32,5
SGD3	4,4	12	19,1	4,4	4,4	3,2	6,5	34,9	42,0
SGD4	4,4	12	26,8	4,4	4,4	15,1	6,5	46,8	61,6
SGD5	4,2	12	25,5	4,2	4,2	10	6,5	41,1	54,6
SGD6	9,6	12	18,9	9,6	9,6	12,9	6,5	60,2	67,1
SGD7	3,8	12	13,5	3,8	3,8	7,8	6,5	37,7	39,2
SGD8	16,7	12	18,7	16,7	16,7	20	6,5	88,6	95,3
SGO9	3,9	12	20,3	3,9	3,9	21,8	19,1	64,6	72,9
SGO10	7,4	12	21,3	7,4	7,4	24,3	19,1	77,6	86,9
SGO11	3	12	18,3	3	3	17,5	19,1	57,6	63,9
SGM12	9	12	24,1	9	9	19,2	19,4	77,6	89,7
SGM13	7,9	12	19,5	7,9	7,9	23,3	19,4	78,4	85,9
SGM14	3,7	12	17,8	3,7	3,7	20,1	19,4	62,6	68,4

Tabelle 6.17: Containerholssystem für die Biogasanlage über Sammelgebiet in Oberhausen

Sammelgebiet	WC-Sammelfahrzeug				WC-Gliederzug			Summe	Summe
	Be --> Sa	Sammlung [km]		Sa --> Be	Be-->Sa	Sa-->BGA	BGA-->Be	Haushalt	Gewerbe
	[km]	Haushalt	Gewerbe	[km]	[km]	[km]	[km]		
	S Leer	S Last	S Last	S Leer	S Leer	S Last	S Leer	[km]	[km]
Biogasanlage in Oberhausen									
SGD1	1,2	12	10,9	1,2	1,2	23,1	23,6	62,3	61,2
SGD2	3,2	12	8,7	3,2	3,2	21,8	23,6	67,0	63,7
SGD3	4,4	12	19,1	4,4	4,4	26,8	23,6	75,6	82,7
SGD4	4,4	12	26,8	4,4	4,4	15,8	23,6	64,6	79,4
SGD5	4,2	12	25,5	4,2	4,2	29,8	23,6	78,0	91,5
SGD6	9,6	12	18,9	9,6	9,6	15,1	23,6	79,5	86,4
SGD7	3,8	12	13,5	3,8	3,8	22,3	23,6	69,3	70,8
SGD8	16,7	12	18,7	16,7	16,7	8,5	23,6	94,2	100,9
SGO9	3,9	12	20,3	3,9	3,9	11,0	12,9	47,6	55,9
SGO10	7,4	12	21,3	7,4	7,4	2,3	12,9	49,4	58,7
SGO11	3	12	18,3	3,0	3,0	13,7	12,9	47,6	53,9
SGM12	9	12	24,1	9,0	9,0	24,5	24,6	88,1	100,2
SGM13	7,9	12	19,5	7,9	7,9	28,5	24,6	88,8	96,3
SGM14	3,7	12	17,8	3,7	3,7	25,3	24,6	73,0	78,8

Tabelle 6.18: Containerholssystem für die Biogasanlage über Sammelgebiet in Mülheim

Sammelgebiet	WC-Sammelfahrzeug				WC-Gliederzug			Summe	Summe
	Be --> Sa	Sammlung [km]		Sa --> Be	Be-->Sa	Sa-->BGA	BGA-->Be	Haushalt	Gewerbe
	[km]	Haushalt	Gewerbe	[km]	[km]	[km]	[km]		
S Leer	S Last	S Last	S Leer	S Leer	S Last	S Leer	[km]	[km]	
Biogasanlage in Mülheim									
SGD1	1,2	12	10,9	1,2	1,2	14,0	14,5	44,1	43,0
SGD2	3,2	12	8,7	3,2	3,2	12,8	14,5	48,9	45,6
SGD3	4,4	12	19,1	4,4	4,4	18,0	14,5	57,7	64,8
SGD4	4,4	12	26,8	4,4	4,4	16,0	14,5	55,7	70,5
SGD5	4,2	12	25,5	4,2	4,2	20,7	14,5	59,8	73,3
SGD6	9,6	12	18,9	9,6	9,6	13,1	14,5	68,4	75,3
SGD7	3,8	12	13,5	3,8	3,8	13,3	14,5	51,2	52,7
SGD8	16,7	12	18,7	16,7	16,7	20,2	14,5	96,8	103,5
SGO9	3,9	12	20,3	3,9	3,9	7,5	7,1	38,3	46,6
SGO10	7,4	12	21,3	7,4	7,4	20,6	7,1	61,9	71,2
SGO11	3	12	18,3	3,0	3,0	5,6	7,1	33,7	40,0
SGM12	9	12	24,1	9,0	9,0	3,5	0,0	42,5	54,6
SGM13	7,9	12	19,5	7,9	7,9	7,9	0,0	43,6	51,1
SGM14	3,7	12	17,8	3,7	3,7	3,3	0,0	26,4	32,2

Die Fahrleistungen der Wechselcontainersammelfahrzeuge zu den Übergabepunkten SP (Sammelplatz) und der Wechselcontainergliederzüge von dort zur Biogasanlage BGA sind in den folgenden drei Tabellen (Tabelle 6.19 bis Tabelle 6.21) zusammengefasst.

Tabelle 6.19: Containerholssystem für die Biogasanlage über Sammelplatz in Duisburg

Sammelgebiet	WC-Sammelfahrzeug					WC-Gliederzug			Summe	Summe
	Be --> Sa	Sammlung [km]		Sa-->SP	SP-->Be	Be-->SP	SP-->BGA	BGA-->Be	Haushalt	Gewerbe
	[km]	Haushalt	Gewerbe	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]		
S Leer	S Last	S Last	S Last	S Leer	S Leer	S Last	S Leer	[km]	[km]	
Biogasanlage in Duisburg										
SGD1	1,2	12	10,9	5,6	7,2	7,2	12	6,5	51,7	50,6
SGD2	3,2	12	8,7	3,9	7,2	7,2	12	6,5	52,0	48,7
SGD3	4,4	12	19,1	9,5	7,2	7,2	12	6,5	58,8	65,9
SGD4	4,4	12	26,8	6,6	7,2	7,2	12	6,5	55,9	70,7
SGD5	4,2	12	25,5	10,8	7,2	7,2	12	6,5	59,9	73,4
SGD6	9,6	12	18,9	3,1	7,2	7,2	12	6,5	57,6	64,5
SGD7	3,8	12	13,5	4,7	7,2	7,2	12	6,5	53,4	54,9
SGD8	16,7	12	18,7	11,7	7,2	7,2	12	6,5	73,3	80,0
SGO9	3,9	12	20,3	7,2	6,0	6,0	12	19,1	66,2	74,5
SGO10	7,4	12	21,3	12,7	6,0	6,0	12	19,1	75,2	84,5
SGO11	3	12	18,3	5,7	6,0	6,0	12	19,1	63,8	70,1
SGM12	9	12	24,1	8,1	10,7	10,7	12	19,4	81,9	94,0
SGM13	7,9	12	19,5	14,6	10,7	10,7	12	19,4	87,3	94,8
SGM14	3,7	12	17,8	11,4	10,7	10,7	12	19,4	79,9	85,7

Tabelle 6.20: Containerholssystem für die Biogasanlage über Sammelplatz in Oberhausen

Sammelgebiet	WC-Sammelfahrzeug					WC-Gliederzug			Summe	Summe
	Be --> Sa	Sammlung [km]		Sa-->SP	SP-->Be	Be-->SP	SP-->BGA	BGA-->Be	Haushalt	Gewerbe
	[km]	Haushalt	Gewerbe	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]
	S Leer	S Last	S Last	S Last	S Leer	S Leer	S Last	S Leer	[km]	[km]
SGD1	1,2	12	10,9	5,6	7,2	7,2	12	23,6	69,0	67,9
SGD2	3,2	12	8,7	3,9	7,2	7,2	12	23,6	69,3	66,0
SGD3	4,4	12	19,1	9,5	7,2	7,2	12	23,6	76,1	83,2
SGD4	4,4	12	26,8	6,6	7,2	7,2	12	23,6	73,2	88,0
SGD5	4,2	12	25,5	10,8	7,2	7,2	12	23,6	77,2	90,7
SGD6	9,6	12	18,9	3,1	7,2	7,2	12	23,6	74,9	81,8
SGD7	3,8	12	13,5	4,7	7,2	7,2	12	23,6	70,7	72,2
SGD8	16,7	12	18,7	11,7	7,2	7,2	12	23,6	90,6	97,3
SGO9	3,9	12	20,3	7,2	6,0	6,0	12	12,9	60,2	68,5
SGO10	7,4	12	21,3	12,7	6,0	6,0	12	12,9	69,2	78,5
SGO11	3	12	18,3	5,7	6,0	6,0	12	12,9	57,8	64,1
SGM12	9	12	24,1	8,1	10,7	10,7	12	24,6	87,3	99,4
SGM13	7,9	12	19,5	14,6	10,7	10,7	12	24,6	92,7	100,2
SGM14	3,7	12	17,8	11,4	10,7	10,7	12	24,6	85,3	91,1

Tabelle 6.21: Containerholssystem für die Biogasanlage über Sammelplatz in Mülheim

Sammelgebiet	WC-Sammelfahrzeug					WC-Gliederzug			Summe	Summe
	Be --> Sa	Sammlung [km]		Sa-->SP	SP-->Be	Be-->SP	SP-->BGA	BGA-->Be	Haushalt	Gewerbe
	[km]	Haushalt	Gewerbe	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]
	S Leer	S Last	S Last	S Last	S Leer	S Leer	S Last	S Leer	[km]	[km]
SGD1	1,2	12	10,9	5,6	7,2	7,2	11	14,5	58,4	57,3
SGD2	3,2	12	8,7	3,9	7,2	7,2	11	14,5	58,7	55,4
SGD3	4,4	12	19,1	9,5	7,2	7,2	11	14,5	65,5	72,6
SGD4	4,4	12	26,8	6,6	7,2	7,2	11	14,5	62,6	77,4
SGD5	4,2	12	25,5	10,8	7,2	7,2	11	14,5	66,6	80,1
SGD6	9,6	12	18,9	3,1	7,2	7,2	11	14,5	64,3	71,2
SGD7	3,8	12	13,5	4,7	7,2	7,2	11	14,5	60,1	61,6
SGD8	16,7	12	18,7	11,7	7,2	7,2	11	14,5	80,0	86,7
SGO9	3,9	12	20,3	7,2	6,0	6,0	11	7,1	52,9	61,2
SGO10	7,4	12	21,3	12,7	6,0	6,0	11	7,1	61,9	71,2
SGO11	3	12	18,3	5,7	6,0	6,0	11	7,1	50,5	56,8
SGM12	9	12	24,1	8,1	10,7	10,7	11	0,0	61,2	73,3
SGM13	7,9	12	19,5	14,6	10,7	10,7	11	0,0	66,6	74,1
SGM14	3,7	12	17,8	11,4	10,7	10,7	11	0,0	59,2	65,0

In den folgenden Tabelle 6.22 und Tabelle 6.23 sind Fahrleistungen beim Einsatz von Großraumfahrzeugen (Schubbodensattelfahrzeuge, Containergliederzüge) mit Umschlag erfasst. Dies entspricht dem Modell aus Kapitel 6.3.1.4.

Tabelle 6.22: Mit Umschlag für die Biogasanlage in Duisburg

Sammel- gebiet	WC-Sammelfahrzeug					Großraumfahrzeug			Summe	
	Be --> Sa	Sammlung [km]		Sa-->SP	SP-->Be	Be-->SP	SP-->BGA	BGA-->Be	Haushalt	Gewerbe
	[km]	Haushalt	Gewerbe	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]
	S Leer	S Last	S Last	S Last	S Leer	S Leer	S Last	S Leer		
Biogasanlage in Duisburg										
SGD1	1,2	12	10,9	5,6	7,2	7,2	12	6,5	51,7	50,6
SGD2	3,2	12	8,7	3,9	7,2	7,2	12	6,5	52,0	48,7
SGD3	4,4	12	19,1	9,5	7,2	7,2	12	6,5	58,8	65,9
SGD4	4,4	12	26,8	6,6	7,2	7,2	12	6,5	55,9	70,7
SGD5	4,2	12	25,5	10,8	7,2	7,2	12	6,5	59,9	73,4
SGD6	9,6	12	18,9	3,1	7,2	7,2	12	6,5	57,6	64,5
SGD7	3,8	12	13,5	4,7	7,2	7,2	12	6,5	53,4	54,9
SGD8	16,7	12	18,7	11,7	7,2	7,2	12	6,5	73,3	80,0
SGO9	3,9	12	20,3	7,2	6,0	6,0	12	19,1	66,2	74,5
SGO10	7,4	12	21,3	12,7	6,0	6,0	12	19,1	75,2	84,5
SGO11	3	12	18,3	5,7	6,0	6,0	12	19,1	63,8	70,1
SGM12	9	12	24,1	8,1	10,7	10,7	12	19,4	81,9	94,0
SGM13	7,9	12	19,5	14,6	10,7	10,7	12	19,4	87,3	94,8
SGM14	3,7	12	17,8	11,4	10,7	10,7	12	19,4	79,9	85,7

Tabelle 6.23: Mit Umschlag für die Biogasanlage in Oberhausen

Sammel- gebiet	WC-Sammelfahrzeug					Großraumfahrzeug			Summe	
	Be --> Sa	Sammlung [km]		Sa-->SP	SP-->Be	Be-->SP	SP-->BGA	BGA-->Be	Haushalt	Gewerbe
	[km]	Haushalt	Gewerbe	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]
	S Leer	S Last	S Last	S Last	S Leer	S Leer	S Last	S Leer	[km]	[km]
SGD1	1,2	12	10,9	5,6	7,2	7,2	12	23,6	69,0	67,9
SGD2	3,2	12	8,7	3,9	7,2	7,2	12	23,6	69,3	66,0
SGD3	4,4	12	19,1	9,5	7,2	7,2	12	23,6	76,1	83,2
SGD4	4,4	12	26,8	6,6	7,2	7,2	12	23,6	73,2	88,0
SGD5	4,2	12	25,5	10,8	7,2	7,2	12	23,6	77,2	90,7
SGD6	9,6	12	18,9	3,1	7,2	7,2	12	23,6	74,9	81,8
SGD7	3,8	12	13,5	4,7	7,2	7,2	12	23,6	70,7	72,2
SGD8	16,7	12	18,7	11,7	7,2	7,2	12	23,6	90,6	97,3
SGO9	3,9	12	20,3	7,2	6	6	12	12,9	60,2	68,5
SGO10	7,4	12	21,3	12,7	6	6	12	12,9	69,2	78,5
SGO11	3	12	18,3	5,7	6	6	12	12,9	57,8	64,1
SGM12	9	12	24,1	8,1	10,7	10,7	12	24,6	87,3	99,4
SGM13	7,9	12	19,5	14,6	10,7	10,7	12	24,6	92,7	100,2
SGM14	3,7	12	17,8	11,4	10,7	10,7	12	24,6	85,3	91,1

Tabelle 6.24: Mit Umschlag für die Biogasanlage in Mülheim

Sammelgebiet	WC-Sammelfahrzeug				Großraumfahrzeug				Summe	Summe
	Be --> Sa	Sammlung [km]		Sa-->SP	SP-->Be	Be-->SP	SP-->BGA	BGA-->Be	Haushalt	Gewerbe
	[km]	Haushalt	Gewerbe	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]		
S Leer	S Last	S Last	S Last	S Leer	S Leer	S Last	S Leer	[km]	[km]	
SGD1	1,2	12	10,9	5,6	7,2	7,2	10,7	14,5	58,4	57,3
SGD2	3,2	12	8,7	3,9	7,2	7,2	10,7	14,5	58,7	55,4
SGD3	4,4	12	19,1	9,5	7,2	7,2	10,7	14,5	65,5	72,6
SGD4	4,4	12	26,8	6,6	7,2	7,2	10,7	14,5	62,6	77,4
SGD5	4,2	12	25,5	10,8	7,2	7,2	10,7	14,5	66,6	80,1
SGD6	9,6	12	18,9	3,1	7,2	7,2	10,7	14,5	64,3	71,2
SGD7	3,8	12	13,5	4,7	7,2	7,2	10,7	14,5	60,1	61,6
SGD8	16,7	12	18,7	11,7	7,2	7,2	10,7	14,5	80,0	86,7
SGO9	3,9	12	20,3	7,2	6	6	10,7	7,1	52,9	61,2
SGO10	7,4	12	21,3	12,7	6	6	10,7	7,1	61,9	71,2
SGO11	3	12	18,3	5,7	6	6	10,7	7,1	50,5	56,8
SGM12	9	12	24,1	8,1	10,7	10,7	10,7	0	61,2	73,3
SGM13	7,9	12	19,5	14,6	10,7	10,7	10,7	0	66,6	74,1
SGM14	3,7	12	17,8	11,4	10,7	10,7	10,7	0	59,2	65,0

Berechnung der Jahresfahrleistung

Für die Jahresfahrleistung spielen sowohl die Frachtleistung als auch die des Fahrzeuges und selbstverständlich auch die Transportaufkommen pro Jahr eine große Rolle. Die Jahresfahrleistung der Sammelfahrzeuge beim Direkttransport wird nach Gleichung (6-11) berechnet.

$$FL_{a,SF} = n \cdot (s_{Last} + s_{Leer}) \quad (6-11)$$

Die Anzahl der Touren pro Jahr n kann aus der Menge des anfallenden Abfalls (Transportaufkommen TA) pro Jahr bestimmt werden: $n = TA / m_{SF}$. Dabei ist m_{SF} die Transportkapazität des jeweiligen Fahrzeuges. Für ein Sammelfahrzeug liegt diese bei 8 Mg. Damit ergibt sich folgende Gleichung:

$$FL_{a,SF} = \frac{TA}{m_{SF}} \cdot (s_{Last} + s_{Leer}) \quad (6-12)$$

Als Beispiel sei eine Berechnung der Jahresfahrleistung für Duisburg, Sammelgebiet 1, gezeigt. Die zurückgelegte Strecke eines Sammelfahrzeuges $s_{Last} + s_{Leer}$ pro Tour sind 26,1 km (aus Tabelle 6.13). Das Transportaufkommen TA beträgt 46,9 Mg pro 14 Tage (aus Tabelle 6.15) und die Frachtkapazität eines Sammelfahrzeuges liegt bei 8,1 Mg (aus Tabelle 6.5). Daraus ergibt sich für Jahresfahrleistung $FL_{a,SF}$ 4071,6 km/a.

$$FL_{a,SF} = \frac{TA}{m_{SF}} \cdot (s_{Last} + s_{Leer})$$

$$\frac{TA}{m_{SF}} = \frac{46,9Mg/14d}{8,1Mg} = 5,8 \approx 6 \quad (6-13)$$

$$FL_{a,SF} = 6 \text{ Touren} \cdot 26,1 \text{ km/Tour} \cdot 26 \approx 4071,6 \frac{\text{km}}{\text{a}}$$

Die Tabelle 6.25 zeigt die Jahresfahrleistungen der drei Städte. Der Direkttransport führt jeweils von den Sammelgebieten zu den Biogasanlagen. Dabei kommen nur Sammelfahrzeuge zum Einsatz.

Tabelle 6.25: Jahresfahrleistung mit Sammelfahrzeugen beim Direkttransport von Haushaltsabfällen, Gewerbeabfällen und Speiseresten

Betriebshof-->Sammelgebiet -->Biogasanlage-->Betriebshof							
Stadt/ Sammelgebiet	[Tour /a]	Duisburg		Oberhausen		Mülheim	
		Sammelfahrzeug	Sammelfahrzeug	Sammelfahrzeug	Sammelfahrzeug	Sammelfahrzeug	Sammelfahrzeug
		[km / Tour]	[km /a]	[km / Tour]	[km /a]	[km / Tour]	[km /a]
Abfälle aus Haushalt							
SGD1	156	26,1	4.072	59,9	9.344	41,7	6.505
SGD2	234	29,4	6.880	60,6	14.180	42,5	9.945
SGD3	468	26,1	12.215	66,8	31.262	48,9	22.885
SGD4	260	38	9.880	55,8	14.508	46,9	12.194
SGD5	494	32,7	16.154	69,6	34.382	51,4	25.392
SGD6	468	41	19.188	60,3	28.220	49,2	23.026
SGD7	286	30,1	8.609	61,7	17.646	43,6	12.470
SGD8	780	55,2	43.056	60,8	47.424	63,4	49.452
SGO9	260	56,8	14.768	39,8	10.348	30,5	7.930
SGO10	338	62,8	21.226	34,6	11.695	47,1	15.920
SGO11	364	51,6	18.782	41,6	15.142	27,7	10.083
SGM12	234	59,6	13.946	70,1	16.403	24,5	5.733
SGM13	156	62,6	9.766	73	11.388	27,8	4.337
SGM14	338	55,2	18.658	65,6	22.173	19	6.422
Summe			217.199		284.118		212.293
Abfälle aus Gewerbe und Lebensmittelindustrie							
SGD1	78	25,0	1.948	58,78	4.585	40,6	3.165
SGD2	130	26,1	3.395	57,32	7.451	39,2	5.098
SGD3	104	33,2	3.452	73,89	7.684	56,0	5.823
SGD4	130	52,8	6.866	70,62	9.180	61,7	8.023
SGD5	130	46,2	6.012	83,15	10.809	64,9	8.443
SGD6	182	47,9	8.715	67,18	12.228	56,1	10.207
SGD7	130	31,6	4.105	63,18	8.213	45,1	5.860
SGD8	156	61,9	9.656	67,50	10.530	70,1	10.935
SGO9	156	65,1	10.163	48,15	7.511	38,8	6.060
SGO10	78	72,1	5.624	43,91	3.425	56,4	4.400
SGO11	208	57,9	12.048	47,92	9.968	34,0	7.077
SGM12	260	71,7	18.637	82,18	21.367	36,6	9.511
SGM13	52	70,1	3.645	80,50	4.186	35,3	1.835
SGM14	52	61,0	3.173	71,42	3.714	24,8	1.291
Summe			97.440		120.850		87.729
Haushalt und Gewerbe							
			314.639		404.968		300.022

Für die Jahresfahrleistungen der WC-Fahrzeuge (WC-Sammelfahrzeuge und WC-Gliederzüge) berechnet man nach Gleichung:

$$FL_{a,wc} = \frac{TA}{m_{WCS}} \cdot (s_{Last} + s_{Leer}) + \frac{TA}{m_{WCG}} \cdot (s_{Last} + s_{Leer}) \quad (6-14)$$

Mithilfe der Tabelle 6.16 bis

Tabelle 6.18 sei eine Berechnung als Beispiel der Jahresfahrleistung mit Wechselcontainerfahrzeugen $FL_{a,WC}$ für Duisburg, Sammelgebiet 1, gezeigt. Die Frachtleistung eines WC-Sammelfahrzeuges m_{WCS} ist die gleiche wie bei dem Sammelfahrzeug (8,1 Mg /Tour), die Frachtleistung eines WC-Gliederzuges m_{WCG} ist 16,2 Mg/Tour (aus Tabelle 6.5). Die zurückgelegte Strecke eines WC-Sammelfahrzeuges $s_{Last} + s_{Leer}$ pro Tour ist 14,4 km (1,2+1,2+12), die eines WC-Gliederzuges pro Tour ist 14,1 km. Daraus ergibt sich:

$$\begin{aligned}
 FL_{a,WC} &= \frac{TA}{m_{WCS}} \cdot (s_{Last} + s_{Leer}) + \frac{TA}{m_{WCG}} \cdot (s_{Last} + s_{Leer}) \\
 \frac{TA}{m_{WCS}} &= \frac{46,9Mg/14d}{8,1Mg} = 5,8 \approx 6 \\
 \frac{TA}{m_{WCG}} &= \frac{46,9Mg/14d}{16,2Mg} = 2,89 \approx 3 \\
 FL_{a,WC} &= 6 \cdot 14,4km \cdot 26 + 3 \cdot 14,1km \cdot 26 \\
 &= 2246,4 \frac{km}{a} + 1099,8 \frac{km}{a} \\
 &= 3346,2 \frac{km}{a}
 \end{aligned} \tag{6-15}$$

Die Tabelle 6.26 zeigt die Jahresfahrleistungen der drei Städte. Die Strecken führen von den Sammelgebieten zu den Biogasanlagen. Beim Direkttransport kommen WC-Sammelfahrzeuge und WC-Gliederzüge zum Einsatz, wie in Tabelle 6.4 gezeigt wird.

Tabelle 6.26: Jahresfahrleistung mit Wechselcontainer über Sammelgebiet

Stadt/ Sammelgebiet	WC-Sammelfahrzeug					WC-Gliederzug					Summe
	[Tour /a]		[km / Tour]		[km /a]	[Tour /a]		[km / Tour]		[km /a]	[km / a]
	H	G	H	G	Gesamt	H	G	H	G	Gesamt	
Sammelgebiet -->Duisburg Biogasanlage											
SGD1	156	78	14,4	13,3	3.282	78	39	14,1	14,1	1.650	4.932
SGD2	234	130	18,4	15,1	6.271	117	65	17,4	17,4	3.167	9.438
SGD3	468	104	20,8	27,9	12.635	234	52	14,1	14,1	4.033	16.667
SGD4	260	130	20,8	35,6	10.038	130	65	26,0	26,0	5.070	15.108
SGD5	494	130	20,4	33,9	14.491	247	65	20,7	20,7	6.458	20.949
SGD6	468	182	31,2	38,1	21.533	234	91	29,0	29,0	9.425	30.958
SGD7	286	130	19,6	21,1	8.346	143	65	18,1	18,1	3.765	12.111
SGD8	780	156	45,4	52,1	43.539	390	78	43,2	43,2	20.218	63.757
SGO9	260	156	19,8	28,1	9.539	130	78	44,8	44,8	9.318	18.857
SGO10	338	78	26,8	36,1	11.875	169	39	50,8	50,8	10.566	22.441
SGO11	364	208	18,0	24,3	11.611	182	104	39,6	39,6	11.326	22.937
SGM12	234	260	30,0	42,1	17.961	117	130	47,6	47,6	11.757	29.718
SGM13	156	52	27,8	35,3	6.172	78	26	50,6	50,6	5.262	11.435
SGM14	338	52	19,4	25,2	7.869	169	26	43,2	43,2	8.424	16.293
Summe											295.600
Sammelgebiet -->Oberhausen Biogasanlage											
SGD1	156	78	14,4	13,3	3.282	78	39	47,9	47,9	5.604	8.887
SGD2	234	130	18,4	15,1	6.271	130	65	48,6	48,6	9.477	15.748
SGD3	468	104	20,8	27,9	12.635	234	52	54,8	54,8	15.673	28.308
SGD4	260	130	20,8	35,6	10.038	130	65	43,8	43,8	8.541	18.579
SGD5	494	130	20,4	33,9	14.491	260	65	57,6	57,6	18.720	33.211
SGD6	468	182	31,2	38,1	21.533	234	91	48,3	48,3	15.698	37.230
SGD7	286	130	19,6	21,1	8.346	156	65	49,7	49,7	10.984	19.329
SGD8	780	156	45,4	52,1	43.539	390	78	48,8	48,8	22.838	66.378
SGO9	260	156	19,8	28,1	9.539	130	78	27,8	27,8	5.782	15.321
SGO10	338	78	26,8	36,1	11.875	182	39	22,6	22,6	4.995	16.869
SGO11	364	208	18,0	24,3	11.611	182	104	29,6	29,6	8.466	20.077
SGM12	234	260	30,0	42,1	17.961	130	130	58,1	58,1	15.106	33.067
SGM13	156	52	27,8	35,3	6.172	78	26	61	61,0	6.344	12.516
SGM14	338	52	19,4	25,2	7.869	182	26	53,6	53,6	11.149	19.018
Summe											344.538
Sammelgebiet --Mülheim Biogasanlage											
SGD1	156	78	14,4	13,3	3.282	78	39	29,7	29,7	2.317	5.599
SGD2	234	130	18,4	15,1	6.271	130	65	30,5	30,5	3.965	10.236
SGD3	468	104	20,8	27,9	12.635	234	52	36,9	36,9	8.635	21.269
SGD4	260	130	20,8	35,6	10.038	130	65	34,9	34,9	4.537	14.575
SGD5	494	130	20,4	33,9	14.491	260	65	39,4	39,4	10.244	24.735
SGD6	468	182	31,2	38,1	21.533	234	91	37,2	37,2	8.705	30.238
SGD7	286	130	19,6	21,1	8.346	156	65	31,6	31,6	4.930	13.275
SGD8	780	156	45,4	52,1	43.539	390	78	51,4	51,4	20.046	63.585
SGO9	260	156	19,8	28,1	9.539	130	78	18,5	18,5	2.405	11.944
SGO10	338	78	26,8	36,1	11.875	182	39	35,1	35,1	6.388	18.263
SGO11	364	208	18,0	24,3	11.611	182	104	15,7	15,7	2.857	14.469
SGM12	234	260	30,0	42,1	17.961	130	130	12,5	12,5	1.625	19.586
SGM13	156	52	27,8	35,3	6.172	78	26	15,8	15,8	1.232	7.405
SGM14	338	52	19,4	25,2	7.869	182	26	7,0	7,0	1.274	9.143
Summe											264.321

Wie in Tabelle 6.5 dargestellt, erfolgt beim Einsatz von Containern nach der Sammlung ein Umschlag der Abfälle in einer Umladestation. Dort werden die Abfälle entladen und anschließend in Containergliederzüge verladen. Diese transportieren die Abfälle dann weiter zu einer Abfallbehandlungsanlage.

Die Tabelle 6.27 enthält die Jahresfahrleistungen beim Einsatz von Sammelfahrzeugen und WC-Gliederzügen über die Umladestation Duisburg-Mitte. Die entsprechenden Jahresfahrleistungen werden nach Gleichung (6-16) berechnet.

$$FL_{a,C} = \frac{TA}{m_{SF}} \cdot (s_{Last} + s_{Leer}) + \frac{TA}{m_{WCG}} \cdot (s_{Last} + s_{Leer}) \quad (6-16)$$

Die zurückgelegte Strecke eines WC-Gliederzuges $(s)_{Last} + (s)_{Leer}$ pro Tour ist 44,3 km, die Frachtleistung eines WC-Gliederzuges m_{CG} liegt bei 16 Mg (aus Tabelle 6.5). Mithilfe der Tabelle 6.22 und 6.23 sei eine Berechnung am Beispiel der Jahresfahrleistung mit WC-Gliederzug $FL_{a,C}$ für Duisburg, Sammelgebiet 1, gezeigt:

$$\begin{aligned} FL_{a,C} &= \frac{TA}{m_{SF}} \cdot (s_{Last} + s_{Leer}) + \frac{TA}{m_{WCG}} \cdot (s_{Last} + s_{Leer}) \\ \frac{TA}{m_{SF}} &= \frac{46,9Mg/14d}{8,1Mg} = 5,8 \approx 6 \\ \frac{TA}{m_{WCG}} &= \frac{46,9Mg/14d}{16,2Mg} = 2,89 \approx 3 \\ FL_{a,C} &= 6 \cdot 26km \cdot 26 + 3 \cdot 25,7km \cdot 26 \\ &= 4056 \frac{km}{a} + 2004 \frac{km}{a} = 6060 \frac{km}{a} \end{aligned} \quad (6-17)$$

Der Abfalltransport mit Schubbodensattelaufleger muss, wie beim Einsatz von Containergliederzügen, ebenfalls in der Umladestation umgeschlagen werden. Im Unterschied dazu werden die Abfälle nach dem Umschlag in Schubbodensattelauflegern statt Containergliederzügen weiter zu den Abfallsenken transportiert. Die Jahresfahrleistung dieses kombinierten Transports (Sammelfahrzeug und Schubbodensattelaufleger) wird nach Gleichung (6-18) berechnet. Analog zur Gleichung (6-16) werden die Fahrleistung $FL_{Tour,SS}$ und Frachtleistung m_{SS} eines Schubbodensattelauflegers (24,5 Mg/Tour aus Tabelle 6.5) wegen der unterschiedlichen Frachtleistung hier neu berechnet.

$$FL_{a,SS} = \frac{TA}{m_{SF}} \cdot (s_{Last} + s_{Leer}) + \frac{TA}{m_{SS}} \cdot (s_{Last} + s_{Leer}) \quad (6-18)$$

Als Beispiel ist hier die Berechnung der Jahresfahrleistung mit Schubbodensattelaufleger $FL_{a,SS}$ für die Biogasanlage Duisburg gezeigt:

$$\begin{aligned} FL_{a,SS} &= \frac{TA}{m_{SF}} \cdot (s_{Last} + s_{Leer}) + \frac{TA}{m_{SS}} \cdot (s_{Last} + s_{Leer}) \\ \frac{TA}{m_{SF}} &= \frac{46,9Mg/14d}{8,1Mg} = 5,8 \approx 6 \\ \frac{TA}{m_{WCG}} &= \frac{46,9Mg/14d}{24,5Mg} = 1,92 \approx 2 \\ FL_{a,SS} &= 6 \cdot 26km \cdot 26 + 3 \cdot 25,7km \cdot 26 \\ &= 4056 \frac{km}{a} + 1336,4 \frac{km}{a} = 5392,4 \frac{km}{a} \end{aligned} \quad (6-19)$$

Wenn man die Jahresfahrleistungen von allen vier Fahrzeugarten (Sammelfahrzeug, WC-Fahrzeug, Containergliederzug und Schubbodensattelaufleger) vergleicht ist zu erkennen, dass die Jahresfahrleistungen bei den WC-Fahrzeugen relativ niedrig sind. In der Tabelle 6.30 ist die Jahresfahrleistung nach Fahrzeugart noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 6.27: Jahresfahrleistung mit WC-Gliederzug über Sammelplatz

Stadt/ Sammelgebiet	WC-Sammelfahrzeug					WC-Gliederzug					Summe
	[Tour /a]		[km / Tour]		[km /a]	[Tour /a]		[km / Tour]		[km /a]	[km / a]
	H	G	H	G	Gesamt	H	G	H	G	Gesamt	
Sammelgebiet -->Duisburg Biogasanlage											
SGD1	156	78	26,0	24,9	5.997	78	39	25,7	25,7	3.007	9.004
SGD2	234	130	26,3	23,0	9.147	117	65	25,7	25,7	4.677	13.824
SGD3	468	104	33,1	40,2	19.670	234	52	25,7	25,7	7.350	27.021
SGD4	260	130	30,2	45,0	13.704	130	65	25,7	25,7	5.012	18.716
SGD5	494	130	34,2	47,7	23.102	247	65	25,7	25,7	8.018	31.120
SGD6	468	182	31,9	38,8	21.988	234	91	25,7	25,7	8.353	30.340
SGD7	286	130	27,7	29,2	11.715	143	65	25,7	25,7	5.346	17.061
SGD8	780	156	47,6	54,3	45.599	390	78	25,7	25,7	12.028	57.626
SGO9	260	156	29,1	37,4	13.408	130	78	37,1	37,1	7.717	21.124
SGO10	338	78	38,1	47,4	16.575	169	39	37,1	37,1	7.717	24.292
SGO11	364	208	26,7	33,0	16.588	182	104	37,1	37,1	10.611	27.198
SGM12	234	260	39,8	51,9	22.802	117	130	42,1	42,1	10.399	33.201
SGM13	156	52	45,2	52,7	9.791	78	26	42,1	42,1	4.378	14.170
SGM14	338	52	37,8	43,6	15.045	169	26	42,1	42,1	8.210	23.254
Summe											347.951
Sammelgebiet -->Oberhausen Biogasanlage											
SGD1	156	78	26,0	24,9	5.997	78	39	43,0	43,0	5.031	11.028
SGD2	234	130	26,3	23,0	9.147	117	65	43,0	43,0	7.826	16.973
SGD3	468	104	33,1	40,2	19.670	234	52	43,0	43,0	12.298	31.968
SGD4	260	130	30,2	45,0	13.704	130	65	43,0	43,0	8.385	22.089
SGD5	494	130	34,2	47,7	23.102	247	65	43,0	43,0	13.416	36.518
SGD6	468	182	31,9	38,8	21.988	234	91	43,0	43,0	13.975	35.963
SGD7	286	130	27,7	29,2	11.715	143	65	43,0	43,0	8.944	20.659
SGD8	780	156	47,6	54,3	45.599	390	78	43,0	43,0	20.124	65.723
SGO9	260	156	29,1	37,4	13.408	130	78	31,1	31,1	6.469	19.876
SGO10	338	78	38,1	47,4	16.575	169	39	31,1	31,1	6.469	23.044
SGO11	364	208	26,7	33,0	16.588	182	104	31,1	31,1	8.895	25.482
SGM12	234	260	39,8	51,9	22.802	117	130	47,5	47,5	11.733	34.534
SGM13	156	52	45,2	52,7	9.791	78	26	47,5	47,5	4.940	14.731
SGM14	338	52	37,8	43,6	15.045	169	26	47,5	47,5	9.263	24.307
Summe											382.897
Sammelgebiet --Mülheim Biogasanlage											
SGD1	156	78	26,0	24,9	5.997	78	39	32,4	32,4	3.791	9.787
SGD2	234	130	26,3	23,0	9.147	117	65	32,4	32,4	5.897	15.043
SGD3	468	104	33,1	40,2	19.670	234	52	32,4	32,4	9.266	28.937
SGD4	260	130	30,2	45,0	13.704	130	65	32,4	32,4	6.318	20.022
SGD5	494	130	34,2	47,7	23.102	247	65	32,4	32,4	10.109	33.211
SGD6	468	182	31,9	38,8	21.988	234	91	32,4	32,4	10.530	32.518
SGD7	286	130	27,7	29,2	11.715	143	65	32,4	32,4	6.739	18.455
SGD8	780	156	47,6	54,3	45.599	390	78	32,4	32,4	15.163	60.762
SGO9	260	156	29,1	37,4	13.408	130	78	23,8	23,8	4.950	18.358
SGO10	338	78	38,1	47,4	16.575	169	39	23,8	23,8	4.950	21.526
SGO11	364	208	26,7	33,0	16.588	182	104	23,8	23,8	6.807	23.395
SGM12	234	260	39,8	51,9	22.802	117	130	21,4	21,4	5.286	28.088
SGM13	156	52	45,2	52,7	9.791	78	26	21,4	21,4	2.226	12.017
SGM14	338	52	37,8	43,6	15.045	169	26	21,4	21,4	4.173	19.218
Summe											341.336

Tabelle 6.28: Jahresfahrleistung mit Containergliederzug über Umschlagpunkt

Stadt/ Sammelgebiet	Sammelfahrzeug					Containergliederzug					Summe
	[Tour /a]		[km / Tour]		[km /a]	[Tour /a]		[km / Tour]		[km /a]	[km / a]
	H	G	H	G	Gesamt	H	G	H	G	Gesamt	
Sammelgebiet -->Duisburg Biogasanlage											
SGD1	156	78	26,0	24,9	5.997	78	26	25,7	25,7	2.673	8.669
SGD2	234	130	26,3	23,0	9.147	104	78	25,7	25,7	4.677	13.824
SGD3	468	104	33,1	40,2	19.670	208	52	25,7	25,7	6.682	26.352
SGD4	260	130	30,2	45,0	13.704	130	52	25,7	25,7	4.677	18.381
SGD5	494	130	34,2	47,7	23.102	208	78	25,7	25,7	7.350	30.452
SGD6	468	182	31,9	38,8	21.988	208	78	25,7	25,7	7.350	29.338
SGD7	286	130	27,7	29,2	11.715	130	52	25,7	25,7	4.677	16.393
SGD8	780	156	47,6	54,3	45.599	338	78	25,7	25,7	10.691	56.290
SGO9	260	156	29,1	37,4	13.408	104	78	37,1	37,1	6.752	20.160
SGO10	338	78	38,1	47,4	16.575	156	130	37,1	37,1	10.611	27.186
SGO11	364	208	26,7	33,0	16.588	156	130	37,1	37,1	10.611	27.198
SGM12	234	260	39,8	51,9	22.802	104	78	42,1	42,1	7.662	30.464
SGM13	156	52	45,2	52,7	9.791	78	52	42,1	42,1	5.473	15.264
SGM14	338	52	37,8	43,6	15.045	156	130	42,1	42,1	12.041	27.085
Summe											347.058
Sammelgebiet -->Oberhausen Biogasanlage											
SGD1	156	78	26,0	24,9	5.997	78	26	43,0	43,0	4.472	10.469
SGD2	234	130	26,0	23,0	9.076	104	78	43,0	43,0	7.826	16.902
SGD3	468	104	26,3	40,2	16.488	208	52	43,0	43,0	11.180	27.668
SGD4	260	130	33,1	45,0	14.458	130	52	43,0	43,0	7.826	22.284
SGD5	494	130	30,2	47,7	21.126	208	78	43,0	43,0	12.298	33.424
SGD6	468	182	34,2	38,8	23.064	208	78	43,0	43,0	12.298	35.362
SGD7	286	130	31,9	29,2	12.917	130	52	43,0	43,0	7.826	20.743
SGD8	780	156	27,7	54,3	30.077	338	78	43,0	43,0	17.888	47.965
SGO9	260	156	47,6	37,4	18.218	104	78	31,1	31,1	5.660	23.878
SGO10	338	78	29,1	47,4	13.533	156	130	31,1	31,1	8.895	22.428
SGO11	364	208	38,1	33,0	20.737	156	130	31,1	31,1	8.895	29.632
SGM12	234	260	26,7	51,9	19.737	104	78	47,5	47,5	8.645	28.382
SGM13	156	52	39,8	52,7	8.949	78	52	47,5	47,5	6.175	15.124
SGM14	338	52	45,2	43,6	17.546	156	130	47,5	47,5	13.585	31.131
Summe											365.391
Sammelgebiet --Mülheim Biogasanlage											
SGD1	156	78	26	25	1.941	78	26	32,4	32,4	3.370	5.310
SGD2	234	130	26	23	9.076	104	78	32,4	32,4	5.897	14.973
SGD3	468	104	26	40	16.488	208	52	32,4	32,4	8.424	24.912
SGD4	260	130	33	45	14.458	130	52	32,4	32,4	5.897	20.355
SGD5	494	130	30	48	21.126	208	78	32,4	32,4	9.266	30.392
SGD6	468	182	34	39	23.064	208	78	32,4	32,4	9.266	32.331
SGD7	286	130	32	29	12.917	130	52	32,4	32,4	5.897	18.813
SGD8	780	156	28	54	30.077	338	78	32,4	32,4	13.478	43.555
SGO9	260	156	48	37	18.218	104	78	23,8	23,8	4.332	22.549
SGO10	338	78	29	47	13.533	156	130	23,8	23,8	6.807	20.340
SGO11	364	208	38	33	20.737	156	130	23,8	23,8	6.807	27.544
SGM12	234	260	27	52	19.737	104	78	21,4	21,4	3.895	23.631
SGM13	156	52	40	53	8.949	78	52	21,4	21,4	2.782	11.731
SGM14	338	52	45	44	17.546	156	130	21,4	21,4	6.120	23.666
Summe											320.104

Tabelle 6.29: Jahresfahrleistung mit Schubbodenaufleger über Umschlagpunkt

Stadt/ Sammelgebiet	Sammelfahrzeug					Schubbodenaufleger					Summe
	[Tour /a]		[km / Tour]		[km /a]	[Tour /a]		[km / Tour]		[km /a]	[km / a]
	H	G	H	G	Gesamt	H	G	H	G	Gesamt	
Sammelgebiet -->Duisburg Biogasanlage											
SGD1	156	78	26,0	24,9	5.997	52	26	25,7	25,7	2.005	8.001
SGD2	234	130	26,3	23,0	9.147	78	52	25,7	25,7	3.341	12.488
SGD3	468	104	33,1	40,2	19.670	156	52	25,7	25,7	5.346	25.016
SGD4	260	130	30,2	45,0	13.704	104	52	25,7	25,7	4.009	17.713
SGD5	494	130	34,2	47,7	23.102	182	52	25,7	25,7	6.014	29.116
SGD6	468	182	31,9	38,8	21.988	156	78	25,7	25,7	6.014	28.002
SGD7	286	130	27,7	29,2	11.715	104	52	25,7	25,7	4.009	15.725
SGD8	780	156	47,6	54,3	45.599	260	52	25,7	25,7	8.018	53.617
SGO9	260	156	29,1	37,4	13.408	78	78	37,1	37,1	5.788	19.195
SGO10	338	78	38,1	47,4	16.575	130	26	37,1	37,1	5.788	22.363
SGO11	364	208	26,7	33,0	16.588	130	52	37,1	37,1	6.752	23.340
SGM12	234	260	39,8	51,9	22.802	78	104	42,1	42,1	7.662	30.464
SGM13	156	52	45,2	52,7	9.791	52	26	42,1	42,1	3.284	13.075
SGM14	338	52	37,8	43,6	15.045	130	26	42,1	42,1	6.568	21.612
Summe											319.727
Sammelgebiet -->Oberhausen Biogasanlage											
SGD1	156	78	26,0	24,9	5.997	52	26	43,0	43,0	3.354	9.351
SGD2	234	130	26,3	23,0	9.147	78	52	43,0	43,0	5.590	14.737
SGD3	468	104	33,1	40,2	19.670	156	52	43,0	43,0	8.944	28.614
SGD4	260	130	30,2	45,0	13.704	104	52	43,0	43,0	6.708	20.412
SGD5	494	130	34,2	47,7	23.102	182	52	43,0	43,0	10.062	33.164
SGD6	468	182	31,9	38,8	21.988	156	78	43,0	43,0	10.062	32.050
SGD7	286	130	27,7	29,2	11.715	104	52	43,0	43,0	6.708	18.423
SGD8	780	156	47,6	54,3	45.599	260	52	43,0	43,0	13.416	59.015
SGO9	260	156	29,1	37,4	13.408	78	78	31,1	31,1	4.852	18.259
SGO10	338	78	38,1	47,4	16.575	130	26	31,1	31,1	4.852	21.427
SGO11	364	208	26,7	33,0	16.588	130	52	31,1	31,1	5.660	22.248
SGM12	234	260	39,8	51,9	22.802	78	104	47,5	47,5	8.645	31.447
SGM13	156	52	45,2	52,7	9.791	52	26	47,5	47,5	3.705	13.496
SGM14	338	52	37,8	43,6	15.045	130	26	47,5	47,5	7.410	22.455
Summe											345.098
Sammelgebiet --Mülheim Biogasanlage											
SGD1	156	78	26,0	24,9	5.997	52	26	32,4	32,4	2.527	8.524
SGD2	234	130	26,3	23,0	9.147	78	52	32,4	32,4	4.212	13.359
SGD3	468	104	33,1	40,2	19.670	156	52	32,4	32,4	6.739	26.410
SGD4	260	130	30,2	45,0	13.704	104	52	32,4	32,4	5.054	18.758
SGD5	494	130	34,2	47,7	23.102	182	52	32,4	32,4	7.582	30.684
SGD6	468	182	31,9	38,8	21.988	156	78	32,4	32,4	7.582	29.570
SGD7	286	130	27,7	29,2	11.715	104	52	32,4	32,4	5.054	16.770
SGD8	780	156	47,6	54,3	45.599	260	52	32,4	32,4	10.109	55.707
SGO9	260	156	29,1	37,4	13.408	78	78	23,8	23,8	3.713	17.120
SGO10	338	78	38,1	47,4	16.575	130	26	23,8	23,8	3.713	20.288
SGO11	364	208	26,7	33,0	16.588	130	52	23,8	23,8	4.332	20.919
SGM12	234	260	39,8	51,9	22.802	78	104	21,4	21,4	3.895	26.697
SGM13	156	52	45,2	52,7	9.791	52	26	21,4	21,4	1.669	11.461
SGM14	338	52	37,8	43,6	15.045	130	26	21,4	21,4	3.338	18.383
Summe											314.649

Tabelle 6.30: Vergleich der Jahresfahrleistung nach Fahrzeugtypen

Sammelgebiet	Modell 1 Sammelfahrzeug	Modell 2 WC-Gliederzug ohne Sammelpunkt	Modell 3 WC-Gliederzug mit Sammelpunkt	Modell 4 Containergliederzug mit Umladestation	Modell 5 Schubbodensattelauf- mit Umladestation
Biogasanlage in Duisburg					
	[km/a]	[km/a]	[km/a]	[km/a]	[km/a]
SGD1	6.020	4.932	9.004	8.669	8.001
SGD2	10.275	9.438	13.824	13.824	12.488
SGD3	15.666	16.667	27.021	26.352	25.016
SGD4	16.746	15.108	18.716	18.381	17.713
SGD5	22.166	20.949	31.120	30.452	29.116
SGD6	27.903	30.958	30.340	29.338	28.002
SGD7	12.714	12.111	17.061	16.393	15.725
SGD8	52.712	63.757	57.626	56.290	53.617
SGO9	24.931	18.857	21.124	20.160	19.195
SGO10	26.851	22.441	24.292	27.186	22.363
SGO11	30.831	22.937	27.198	27.198	23.340
SGM12	32.583	29.718	33.201	30.464	30.464
SGM13	13.411	11.435	14.170	15.264	13.075
SGM14	21.831	16.293	23.254	27.085	21.612
Biogasanlage in Oberhausen					
SGD1	13.929	8.887	11.028	10.469	9.351
SGD2	21.632	15.748	16.973	16.902	14.737
SGD3	38.947	28.308	31.968	27.668	28.614
SGD4	23.688	18.579	22.089	22.284	20.412
SGD5	45.192	33.211	36.518	33.424	33.164
SGD6	40.448	37.230	35.963	35.362	32.050
SGD7	25.859	19.329	20.659	20.743	18.423
SGD8	57.954	66.378	65.723	47.965	59.015
SGO9	17.859	15.321	19.876	23.878	18.259
SGO10	15.119	16.869	23.044	22.428	21.427
SGO11	25.111	20.077	25.482	29.632	22.248
SGM12	37.770	33.067	34.534	28.382	31.447
SGM13	15.574	12.516	14.731	15.124	13.496
SGM14	25.887	19.018	24.307	31.131	22.455
Biogasanlage in Mülheim					
SGD1	9.670	5.599	9.787	5.310	8.524
SGD2	15.043	10.236	15.043	14.973	13.359
SGD3	28.708	21.269	28.937	24.912	26.410
SGD4	20.217	14.575	20.022	20.355	18.758
SGD5	33.835	24.735	33.211	30.392	30.684
SGD6	33.233	30.238	32.518	32.331	29.570
SGD7	18.330	13.275	18.455	18.813	16.770
SGD8	60.387	63.585	60.762	43.555	55.707
SGO9	13.990	11.944	18.358	22.549	17.120
SGO10	20.319	18.263	21.526	20.340	20.288
SGO11	17.160	14.469	23.395	27.544	20.919
SGM12	15.244	19.586	28.088	23.631	26.697
SGM13	6.172	7.405	12.017	11.731	11.461
SGM14	7.713	9.143	19.218	23.666	18.383

Tabelle 6.31: Vergleich der Jahresfahrleistung nach Modellen

Biogasanlage	Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4	Modell 5
	Sammelfahrzeug	von Sammelgebiet WC-Fahrzeuge	von Sammelplatz WC-Fahrzeuge	Container- gliederzug	Schubboden- sattelaufleger
	[km/a]	[km/a]	[km/a]	[km/a]	[km/a]
in Duisburg	314.639	295.600	347.951	347.058	319.727
in Oberhausen	404.968	344.538	382.897	365.391	345.098
in Mülheim	300.022	264.321	341.336	320.104	314.649

Der Vergleich der Jahresfahrleistungen aller fünf Transportmodelle für den Transport zu den verschiedenen Biogasanlagen ergibt, dass die Jahresfahrleistung im ersten und im zweiten Modell niedriger ist als in den anderen Transportmodellen.

Nach dem Jahresfahrleistungsvergleich ergibt sich die Tabelle 6.32. In dieser ist die Routenoptimierung nach dem Abfalltausch und nach der Fahrzeugart neu aufgelistet.

Beispielhaft könnten die Bioabfälle von Sammelgebiet 3 weiterhin mit Sammelfahrzeugen zur Biogasanlage Duisburg transportiert werden und die Bioabfälle von Sammelgebiet 10 nach Oberhausen. Jedoch müssten die Abfälle von Mitte, SG1 und SG2 mit WC-Sammelfahrzeugen zur Biogasanlage Duisburg transportiert werden. Die Abfälle von SGD8 würden dann nach dem Abfalltausch mit dem Containergliederzug transportiert, da die Jahresfahrleistung des Containergliederzuges die niedrigste ist.

Tabelle 6.32: Optimierter Routenplan nach dem Abfalltausch

zur Biogasanlage Duisburg	zur Biogasanlage Oberhausen	zur Biogasanlage Mülheim
SGD1 (Modell 2)	SGO10 (Modell 1)	SGD4 (Modell 2)
SGD2 (Modell 2)		SGD8 (Modell 4)
SGD3 (Modell 1)		SGO9 (Modell 2)
SGD5 (Modell 2)		SGO11 (Modell 2)
SGD6 (Modell 1)		SGM12 (Modell 1)
SGD7 (Modell 2)		SGM13 (Modell 1)
		SGM14 (Modell 1)

7 Ökologische und ökonomische Bewertung

In diesem Kapitel werden einerseits die CO₂-Emissionen, die durch Fahrzeuge erzeugt werden, berechnet und mit der Anfangssituation (vor dem Abfalltausch) unter ökologischen Aspekten verglichen und bewertet und andererseits wird die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen abfalllogistischen Konzepte unter ökonomischen Aspekten bewertet.

7.1 Ökologische Bewertung

Mithilfe des Handbuches „Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA), Version 1.2./Jan. 1999“ können die spezifischen CO₂-Emissionen der Fahrzeuge für die ökologische Bewertung der Abfalltransporte berechnet werden. Die

Tabelle 7.1 stellt den gemittelten Wert (e_{Lkw}) nach HBEFA für die Fahrzeugschichtzusammensetzung im Jahr 2002 dar. Diese Werte werden für die CO₂-Emissionsberechnungen aller Varianten zugrunde gelegt.

Für den Gesamtemissionswert CO₂ werden die mittleren CO₂-Emissionen eines Lkws e_{Lkw} mit den Fahrleistungen FL (die Daten aus Tabelle 6.30) nach der Gleichung(7-1) multipliziert.

$$e = e_{Lkw} \cdot FL \quad (7-1)$$

Tabelle 7.1: CO₂-Emissionen von verschiedenen Fahrzeugen

Straßenart	CO ₂ -Emissionen	
	Sammelfahrzeug beladen [g/km]	Sammelfahrzeug unbeladen [g/km]
Autobahn	652	554
Außerortsstraßen	623	499
Innerortsstraßen	705	535
Mittelwert	660	529
	Lastzug beladen	Lastzug unbeladen
Autobahn	1174	730
Außerortsstraßen	1137	705
Innerortsstraßen	1360	829
Mittelwert	1224	755
	Sattelzug beladen	Sattelzug unbeladen
Autobahn	1361	815
Außerortsstraßen	1355	815
Innerortsstraßen	1622	963
Mittelwert	1446	864

Tabelle 7.2 zeigt die Co₂-Emissionen für die dezentralen Transportmodelle von Modell 1 bis Modell 5 mit der Einschränkung, dass die Abfälle jeweils zu der Biogaslage in der gleichen Stadt verbracht werden (kein Abfalltausch). Verglichen werden diese Emissionen mit den Co₂-Emissionen des optimierten Modells (nach Abfalltausch). Die Abfälle werden zu den Biogasanlagen gebracht, die gemäß Tabelle 6.32 zugeordnet sind.

Dabei kommen die ebenfalls in Tabelle 6.32 angegebenen Transportketten zum Einsatz. Die sechste Spalte (Modell*) in Tabelle 7.2 zeigt die Co₂-Emissionen für die Zuordnung der Abfallquellen zu den Abfallsenken gemäß Tabelle 6.32. Die Tabelle 7.2 enthält die CO₂-Emissionen vor dem Abfalltausch bzw. die Anfangssituation und nach dem Abfalltausch mit Sammelfahrzeugen. Da die WC-Fahrzeuge die geringsten Fahrleistungen haben (siehe

Ergebnisse aus Kapitel 6), werden hier zusätzlich die CO₂-Emissionen nach dem Abfalltausch, aber mit WC-Fahrzeugen, miteinander verglichen.

Tabelle 7.2: CO₂-Emissionen-Vergleich

Sammelgebiet	Dezentral					
	Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4	Modell 5	Modell*
	[Mg/a]	[Mg/a]	[Mg/a]	[Mg/a]	[Mg/a]	[Mg/a]
SGD1	3,58	3,58	6,54	6,21	5,88	3,58
SGD2	6,11	6,86	10,07	10,07	9,30	6,86
SGD3	9,31	11,50	18,97	18,31	17,87	9,31
SGD4	9,96	10,98	13,11	12,78	12,78	10,46
SGD5	13,18	15,01	21,67	21,01	20,68	15,01
SGD6	16,59	22,13	21,34	20,34	20,02	16,59
SGD7	7,56	8,69	12,25	11,59	11,60	8,69
SGD8	31,34	45,89	39,01	37,69	36,37	42,68
SGO9	10,62	11,39	14,37	13,57	13,57	8,05
SGO10	8,99	12,00	16,25	18,66	15,46	8,99
SGO11	14,93	15,28	18,66	18,66	16,40	9,73
SGM12	9,06	12,29	18,79	17,41	18,05	9,06
SGM13	3,67	4,89	8,02	8,57	7,75	3,67
SGM14	4,59	5,94	13,07	15,00	12,80	4,59
Summe	149,47	186,43	232,12	229,86	218,52	157,26

Durch den Abfalltausch erhöhen sich die Co₂-Emissionen für die dezentralen Bioabfalltransporte, weil das Transportmodell mit Abfalltausch nur ökologisch ist, wenn die Transportentfernung nach dem Abfalltausch viel kleiner ist als vor dem Abfalltausch. Bei den zentralen Transportmodellen gibt es die ökologischere Möglichkeit mit Abfalltausch.

Durch den Abfalltausch könnten die Co₂-Emissionen für die Bioabfalltransporte von SGO11 (Siedlungsgebiet 11 in Oberhausen) von 14,93 Mg/a um ca. 50 % auf 9,73 Mg/a gesenkt werden. Der Einsatz von Containergliederzügen führt zwar zu geringeren Fahrleistungen für SGM12 (Siedlungsgebiet 12 in Mülheim), jedoch erhöhen sich die Co₂-Emissionen gegenüber denen der Sammelfahrzeuge von 9,06 Mg/a auf 18,05 Mg/a, da die Lastzüge (siehe Tabelle 7.1) höhere Co₂-Emissionen beim Transport erzeugen.

Die spezifische CO₂-Emission e_{spez} wird nach Gleichung (Tabelle 7.2) berechnet und beschreibt die Emissionen pro transportierter Tonne. Tabelle 7.3 zeigt die Werte für die betrachteten Fälle, abhängig von den Transportaufkommen TA.

$$e_{\text{spez}} = \frac{e}{\text{TA}} \quad (7-2)$$

Tabelle 7.3: Spezifischer CO₂-Emissionen-Vergleich

Sammelgebiet	Dezentral					
	Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4	Modell 5	
	[g/Mg]	[g/Mg]	[g/Mg]	[g/Mg]	[g/Mg]	[g/Mg]
SGD1	2097,2	2100,0	3832,6	3638,9	3445,8	2100,0
SGD2	2164,1	2431,0	3566,2	3566,2	3293,6	2431,0
SGD3	2076,5	2564,4	4228,8	4081,4	3983,8	2076,5
SGD4	3380,5	3729,9	4450,3	4338,0	4338,8	3550,8
SGD5	2680,2	3052,0	4407,1	4272,7	4206,1	3052,0
SGD6	3243,4	4326,5	4171,8	3977,9	3914,0	3243,4
SGD7	2321,5	2668,1	3763,8	3560,8	3561,5	2668,1
SGD8	4307,2	6307,3	5361,7	5179,9	4998,8	5865,6
SGO9	4699,8	4722,0	4948,8	4646,2	4647,2	2552,8
SGO10	4754,1	5216,4	5209,0	6061,8	4925,7	2677,0
SGO11	4428,5	4375,6	4919,4	4919,4	4267,0	2351,0
SGM12	5240,6	6036,1	6451,1	5718,6	6061,6	2451,8
SGM13	5450,8	6068,8	6941,8	7682,3	6572,9	2508,7
SGM14	4280,3	4291,9	5628,9	6879,2	5451,6	1512,2
Summe	51124,9	57889,9	67881,4	68523,2	63668,4	39040,9

7.2 Ökonomische Bewertung

7.2.1 Transportkosten

Unter ökonomischen Aspekten werden die Gesamtkosten, bestehend aus Transportkosten und Umschlagkosten, berechnet und bewertet. Sie setzen sich aus den Kosten für Transportleistungen, Fahrzeuge und der notwendigen technischen Infrastruktur (Umladestation, Be- und Entladevorrichtungen) zusammen. Die Minimalisierung dieser Kosten ist die Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit eines abfalllogistischen Konzeptes. Unter Transportkosten werden die folgenden Parameter zusammengefasst:

o Fahrzeugkosten

▪ Fixkosten

Die Anschaffungskosten (AK) des Fahrzeuges schwanken sehr stark, abhängig von der Ausstattung (Leistung, Allradantrieb etc.). Die Fixkosten (FK) setzen sich aus kalkulatorischen Zinsen für die Anschaffungskosten der Fahrzeuge in Höhe von 5 %, Kfz-Steuer, Kfz-Versicherung, Abschreibung und Kosten für Park- und Stellflächen zusammen. Wie Tabelle 7.4 aus [33] zeigt, werden für die Kfz-Steuer 2.000 €/a, Kfz-Versicherung 3.500 €/a und für die Park- und Stellflächen 1.500 €/a veranschlagt. Für eine Nutzungsdauer (ND) von 9 Jahren werden die Annuitäten berechnet. Es wird hier angenommen, dass der Restwert (RW) der Fahrzeuge 0 ist.

▪ Instandhaltungskosten

Inspektions- und Reparaturkosten, TÜV-, ASU- und Bremsenprüfungskosten etc. Hier wird mit 5 % der Anschaffungskosten des Fahrzeuges gerechnet.

▪ Betriebskosten

Die Betriebskosten der Fahrzeuge werden für eine Fahrleistung von 60.000 km/a berechnet, da ein Reifensatz pro Fahrzeug 60.000 km hält [103]. Aus [33] werden 330 €/Reifen angesetzt, dazu berücksichtigt man, dass 10 Reifen für Sammelfahrzeuge und WC-Sammelfahrzeuge, 16 Reifen für WC-Gliederzüge und Containergliederzüge und 18 Reifen für Schubbodensattelaufleger notwendig sind.

Die Kraftstoffkosten werden hier für alle Fahrzeuge mit 0,9 €/L bei einem mittleren Kraftstoffverbrauch von 50 L/100 km angesetzt [104]. Die Motoröl- und Hydraulikölkosten gehören ebenfalls zu den Betriebskosten. In dieser Berechnung wird für Motoröl ein Verbrauch von 2 L/1000 km bei 3 €/L und für Hydrauliköl ein Verbrauch von 1,5 L/1000 km bei 5 €/L bei jedem Fahrzeug angesetzt.

Tabelle 7.4: Anschaffungskosten und fixe Kosten

Kostenart	Sammelfahrzeug	WC-Sammelfahrzeug	WC-Gliederzug	Containergliederzug	Schubbodensattelaufleger
Anschaffungskosten					
Anschaffungskosten[€]	177000	262000	154000	144000	179000
Fixkosten					
Annuität [€/a]	24900	36860	27 290	23070	21380
Park/Stellflächen [€/a]	1500	1500	1500	1500	1500
Kfz-Steuer [€/a]	2000	2000	2000	2000	2000
Kfz-Versicherung [€/a]	3500	3500	3500	3500	3500
Summe [€/a]	31900	43860	34290	30070	28380

o **Personalkosten**

Nach [30] werden die Personalkosten (PK) eines Fahrers mit 26.648 €/a brutto und eines Laders mit 25.139,20 €/a brutto angenommen. Für die Sammelfahrzeuge benötigt man einen Fahrer und zwei Lader, das gilt auch für WC-Sammelfahrzeuge. Die Transporte mit anderen Fahrzeugen (WC- und Containergliederzüge und Schubbodensattelaufleger) werden nur mit einem Fahrer durchgeführt. Durchschnittlich werden 250 Arbeitstage (AT) und 8 Stunden (Ah) pro Arbeitstag in den Berechnungen angenommen.

o **Verwaltungskosten, Umlagen, Wagnis und Gewinn**

Die Verwaltungskosten (VK) werden mit 20 % und Wagnis und Gewinn (WG) mit 10 % von der Summe aus Fahrzeug-, Personal-, Instandhaltung- und Betriebskosten berechnet. 10 % der Personalkosten werden für die Umlagen (UK) angesetzt [103].

o **Gesamttransportkosten**

Die Gesamttransportkosten setzen sich aus den oben beschriebenen Parametern (Fixkosten, Instandhaltungskosten, Betriebskosten, Personalkosten, Verwaltungskosten, Umlagen, Wagnis und Gewinn) zusammen. Dies wird als Basisrechnung für die Wiederbeschaffungskosten (WBK), die Grundkosten (GK) und die Betriebskosten (BK) nach den Gleichungen (7-3) bis (7-5) kalkuliert. Die Zahlen sind in Tabelle 7.5 zusammengefasst.

$$WBK = \frac{AK - RW}{ND \cdot JK} \quad (7-3)$$

$$GK = \frac{K_{(a)}}{AT \cdot Ah} \quad (7-4)$$

$$BK = BK_{Motor} + BK_{Hydrauliköl} + K_{Reifen} \quad (7-5)$$

Im Folgenden wird eine Beispielberechnung für Sammelfahrzeuge gezeigt:

Die Anschaffungskosten AK des Sammelfahrzeuges liegen bei 177.000 €, der Restwert RW ist 0 €, es wird eine Nutzungsdauer ND von 9 Jahren angenommen und es werden 60.000 Jahreskilometer JK zugrunde gelegt.

$$\begin{aligned} \text{WBK} &= \frac{\text{AK} - \text{RW}}{\text{ND} \cdot \text{JK}} & (7-6) \\ &= \frac{177000 - 0}{9 \cdot 60000} \\ &= 0,33 \end{aligned}$$

Zur Ermittlung der Grundkosten GK werden die Gesamtkosten pro Jahr $K_{(a)}$ zu den Fixkosten (31.900 €), den Personalkosten (ca. 76.926,40 €), den Instandhaltungskosten (8.850 €), den Verwaltungskosten, Umlagen, Wagnis und Gewinn (ca. 76.499 €) und den Kraftstoffkosten (27.000 €) addiert.

$$\begin{aligned} \text{GK} &= \frac{K_{(a)}}{\text{AT} \cdot \text{Ah}} & (7-7) \\ &= \frac{221175,4}{250,8} \\ &\approx 110,52 \end{aligned}$$

Tabelle 7.5: Wiederbeschaffungs-, Grund- und Betriebskosten

Kostenart	Sammelfahrzeug	WC-Sammelfahrzeug	WC-Gliederzug	Container-gliederzug	Schubboden-sattelaufleger
WBK [€/km]	0,33	0,49	0,36	0,3	0,38
GK [€/h]	110,52	121,06	61,49	57,77	56,19
BK [€/km]	0,52	40,52	0,56	0,56	0,55

Zur Ermittlung der Transportkosten werden zusätzliche Informationen wie die Fahrleistung einer Tour (eines Tages, eines Jahres etc.), die Fahrzeugart und die Frachtmenge pro Tour benötigt (Tabelle 6.5). Dies sollte von dem Kalkulationsprogramm (Frachtrechner) berechnet werden. Dieses Programm stand jedoch nicht zu Verfügung. Die Werte wurden daher aus den Diagrammen in [33] abgelesen. Um Ablesefehler zu minimieren, wurde für die abgelesenen Wertepaare eine lineare Regression berechnet. Für das Beispiel „Schubbodenaufleger“ war das nicht möglich, da hier kein linearer Verlauf vorliegt. Es ergeben sich die folgenden Gleichungen für die Regressionsgeraden:

- Transportkosten $K_{\text{Sammelfahrzeug}}$ bei Direktfahrt mit Sammelfahrzeug in Abhängigkeit von der zurückgelegten Strecke s .

$$K_{\text{Sammelfahrzeug}}(s) = 0,39 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s + 5,6 \frac{\text{€}}{\text{Mg}} \quad (7-8)$$

- Transportkosten für ein Wechselcontainersammelfahrzeug (WC-Fahrzeug)

$$K_{\text{WC-Sammelfahrzeug}}(s) = 0,45 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s + 6,52 \frac{\text{€}}{\text{Mg}} \quad (7-9)$$

- Transportkosten für einen Containergliederzug mit Umschlag

$$K_{\text{Gliederzug}}(s) = 0,19 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s + 2,66 \frac{\text{€}}{\text{Mg}} \quad (7-10)$$

- Transportkosten für einen Wechselcontainergliederzug

$$K_{\text{Sammelfahrzeug}}(s) = 0,25 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s + 3,31 \frac{\text{€}}{\text{Mg}} \quad (7-11)$$

- Transportkosten für einen Schubbodensattelaufleger

$$K_{\text{Schubboden}}(s) = 0,16 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s + 2,66 \frac{\text{€}}{\text{Mg}} \quad (7-12)$$

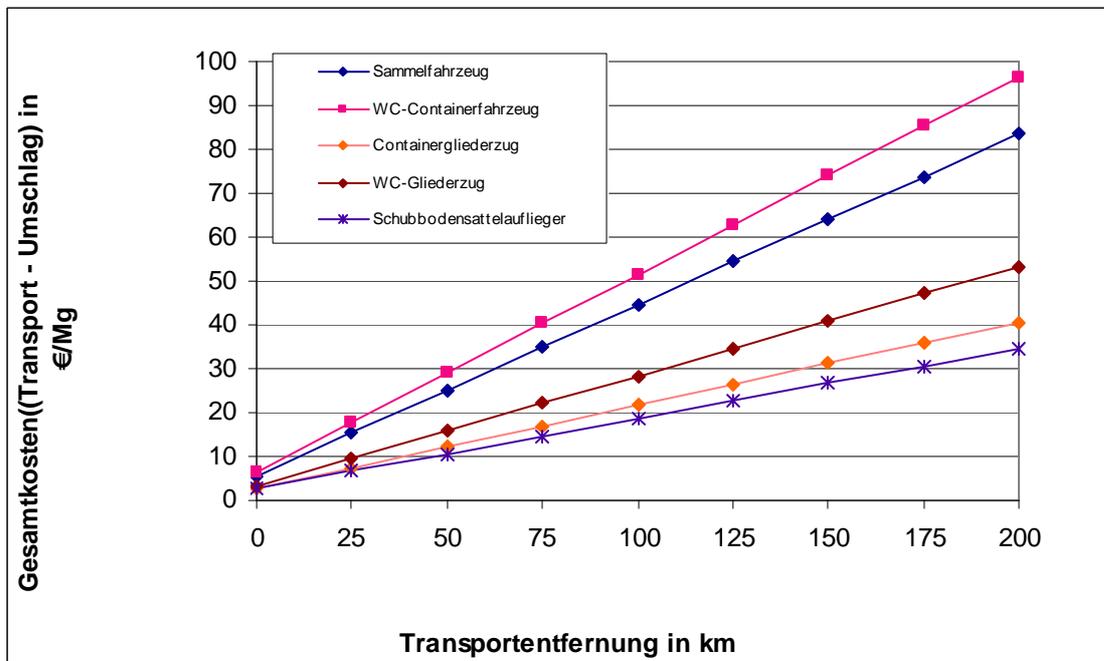


Abbildung 7.1: Transportkosten in Abhängigkeit von der Entfernung [33]

Die Transportkosten sind bei den Sammelfahrzeug und WC-Sammelfahrzeugen höher als bei den WC-Gliederzügen, Containergliederzügen und Schubbodensattelauflegern. Ab 65 km sind die Transportkosten der Schubbodensattelaufleger durchgängig die niedrigsten. Da die Entladevorgänge bei niedrigeren Transportentfernungen häufiger durchgeführt werden, werden die Schubböden schnell abgenutzt und müssen ersetzt werden. Aus diesem Grund ergeben sich 3 Abstufungen (40 km, 75 km und 100 km) in Abhängigkeit von der Entfernung. Ab Entfernungen von 100 km sind Schubbodensattelaufleger am wirtschaftlichsten.

7.2.2 Umschlagkosten

Der Umschlag erfolgt in Umladestationen für die Transporte mit Containergliederzügen und Schubbodensattelauflegern. Analog zu den Transportkosten werden folgende Parameter zusammengefasst:

o Umladestation

- Kosten für Vermögensgegenstände:

Die Vermögensgegenstände unterscheiden sich in nicht abnutzbare (wie das Grundstück der Umladestation) und abnutzbare Anlagevermögen (Tabelle 7.6). Hier werden für das Grundstück monatliche Pachtkosten von 3.000 € (36.000 €/a) angenommen.

Tabelle 7.6: Abnutzbare Anlagevermögen

abnutzbare Anlagevermögen	Anschaffungskosten	Abschreibungszeitraum	Zinssatz	Annuität
	[€]	[a]	[%]	[€/a]
Verwaltungsgebäude	60000	14	5	6061
Fahrzeugwaage	30000	20	5	2407
Lagerhalle	55000	14	5	5556
Anlagentechnik Umschlag	65000	14	5	12806
Bagger mit Greifer	180000	9	5	25324
Platzbefestigung, Wege	55000	19	5	4550
Summe	445000	-	-	56706

Die jährlich Annuitätsschuld (mit 5 % Zinssatz auf die Anschaffungskosten berechnet) beträgt in der Summe 56.706,37 € bei Anschaffungskosten von insgesamt 445.000 €.

- Steuern und Versicherungen

Analog zu den Transportkosten werden 2.000 €/a für Steuern und 3.500 €/a für Versicherungen angenommen.

- Personalkosten

Analog zu den Transportkosten werden 26.648 €/a brutto pro Arbeiter angenommen. Die Umladestation kann mit 2 Arbeitern betrieben werden. Eine Reserve von 25 % der Personalkosten wird für Urlaubs- und Krankheitstage zugrunde gelegt. Der Arbeitgeberanteil wird ebenfalls mit 25% (ca. 6.660) vorgegeben. Die gesamten Personalkosten liegen bei ca. 79.940 €/a.

- Instandhaltungskosten

Für die Instandhaltungskosten (wie Inspektions- und Reparaturkosten für Umladestation und Bagger) werden 5 % der Anschaffungskosten der Umladestation und des Baggers berechnet. Sie liegen bei ca. 25.250 €/a.

- Betriebskosten

Kraftstoff-, Motoröl- und Hydraulikölkosten werden für den Bagger bei Betrieb berechnet. Mit 0,9 €/L bei einem mittleren Kraftstoffverbrauch von 20 L/h werden für die Kraftstoffkosten ein Verbrauch von 2 L/1000 h bei 3 €/h für Motoröl, und ein Verbrauch von 1,5 L/1000 h bei 5 €/h für Hydrauliköl angenommen. Dies zusammen sind dann ca. 36.110 €.

- Verwaltungskosten, Umlagen, Wagnis und Gewinn

Die Verwaltungskosten werden analog zu Transportkosten mit 20 % (ca. 50.770 €/a) angesetzt. Wagnis und Gewinn werden aus der Summe aus Fahrzeug-, Personal-, Instandhaltungs- und Betriebskosten mit 10 % berechnet. Insgesamt belaufen sich diese Kosten auf ca. 81.480 €/a.

○ **Gesamtumschlagkosten**

In der Summe betragen die Gesamtkosten für Umschlag pro Jahr ca. 288.990 €. Nach [105] ergeben sich die Umschlagkosten in Abhängigkeit von der Umschlagmenge (siehe Abbildung 7.2). Je größer die Umschlagmengen sind, desto günstiger werden die Umschlagkosten.

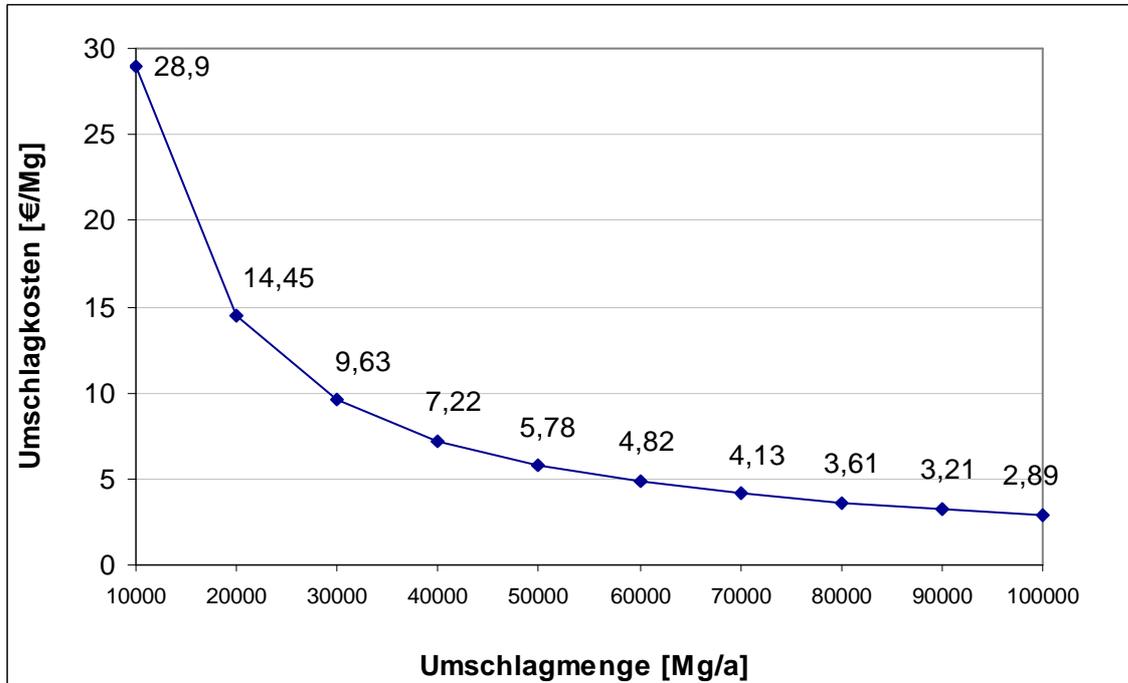


Abbildung 7.2: Umschlagkosten in Abhängigkeit von der Umschlagmenge

7.2.3 Berechnung des Kostenansatzes für Transport und Umschlag

○ **Kosten für den Transport mit Sammelfahrzeugen**

Beim Direkttransport mit Sammelfahrzeugen von den Sammelgebieten zu den Biogasanlagen fallen nur die Transportkosten an (Abbildung 7.3). Aufgrund der hohen Personalkosten (ein Fahrer, zwei Lader) und der geringen Frachtmenge sind diese Kosten stark von der Transportentfernung abhängig. Da beim Direkttransport kein Umschlag und keine weiteren Fahrzeuge benötigt werden, entstehen auch keine weiteren Kosten.

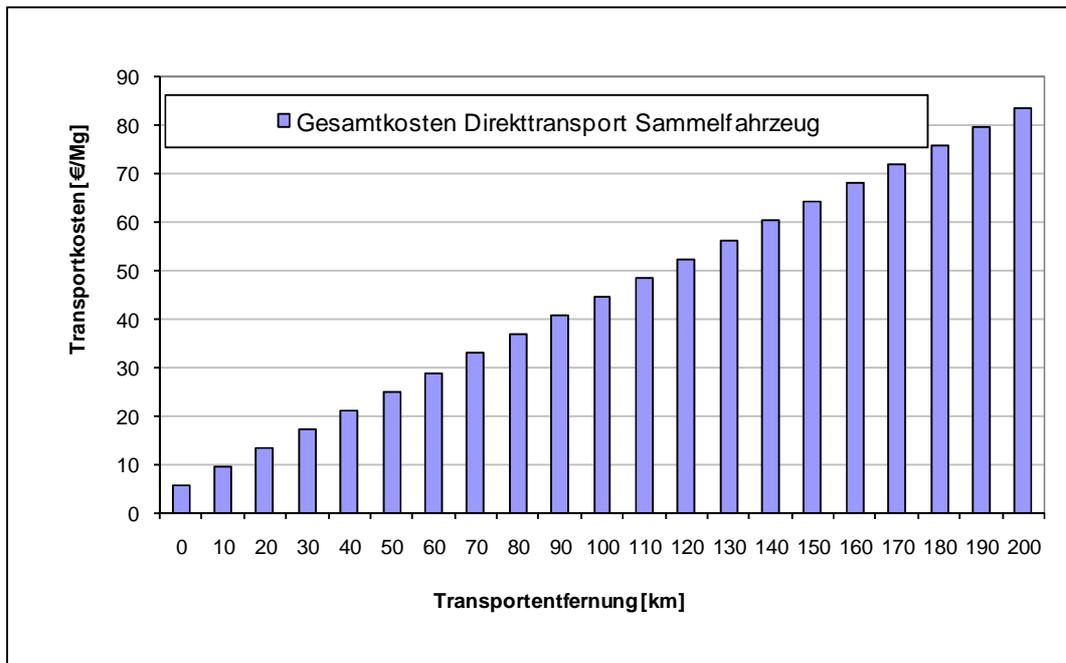


Abbildung 7.3: Transportkosten mit Sammelfahrzeug

○ **Kosten für den Transport mit WC-Gliederzügen**

Die Bioabfälle werden mit WC-Sammelfahrzeugen gesammelt, anschließend kommen die WC-Gliederzüge zum Einsatz. Die Gesamttransportkosten der WC-Fahrzeuge $K_{WC}(s)$ müssen in der Transportkostenkalkulation nach Gleichung (7-13) berücksichtigt werden. Diese Kosten werden auf die Transportkosten für WC-Sammelfahrzeuge $K_{WCS}(s)$ und die Transportkosten für WC-Gliederzüge $K_{WCG}(s)$ aufaddiert.

Die Transportkosten der WC-Sammelfahrzeuge sind abhängig von der Transportentfernung (s). Es wird von einer mittleren Transportentfernung von 20 km ($s_{WCS} = 20\text{km}$) ausgegangen. Damit ergibt sich für den Kostensatz folgende Gleichung.

$$\begin{aligned}
 K_{WC}(S) &= K_{WCS}(S) + K_{WCG}(S) \\
 &= 0,45 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s_{WCS} + 6,52 \frac{\text{€}}{\text{Mg}} + 0,25 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s_{WCG} + 3,31 \frac{\text{€}}{\text{Mg}} \\
 &= 0,45 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s_{WCS} + 0,25 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s_{WCG} + 9,83 \frac{\text{€}}{\text{Mg}} \qquad (7-13) \\
 K_{WC}(S) &= 0,25 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s_{WCG} + 18,83 \frac{\text{€}}{\text{Mg}}
 \end{aligned}$$

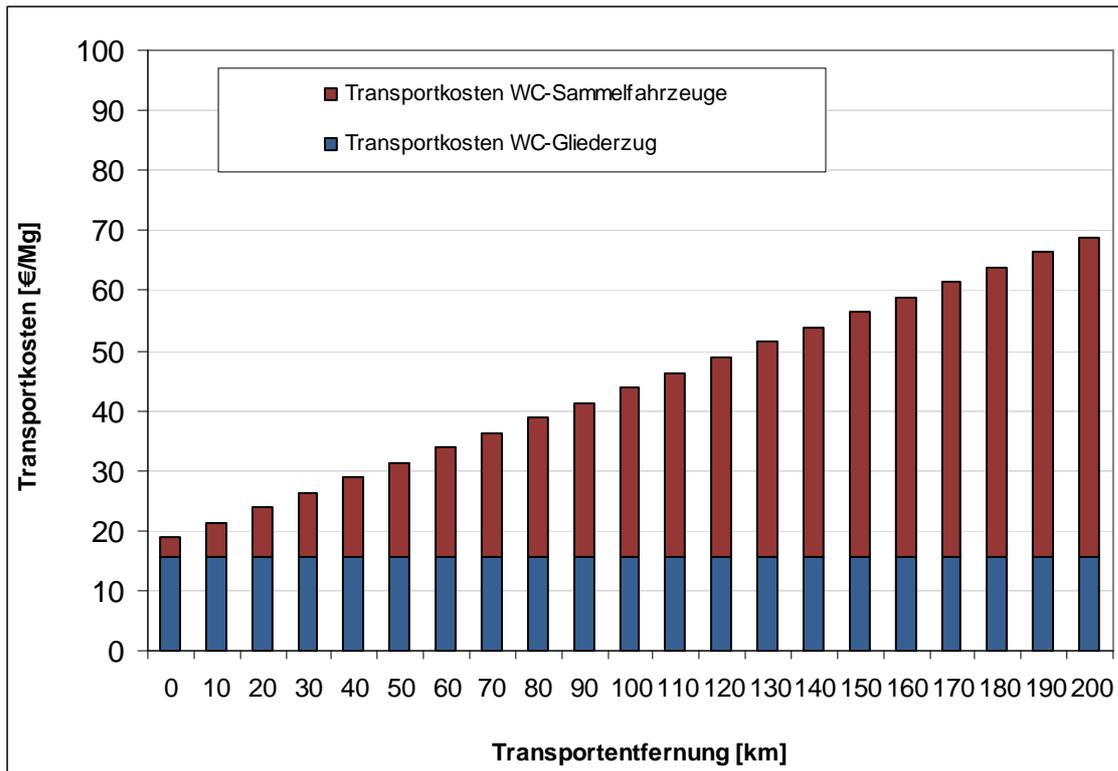


Abbildung 7.4: Transportkosten mit WC-Fahrzeug

o **Kosten für den Transport mit Containergliederzügen**

Zur Berechnung der Transportkosten mit Containergliederzügen kommen die Umschlagkosten $K_{US}(m)$ hinzu. Da die Abfälle in einer Umladestation in Containergliederzüge verladen werden, müssen die Transportkosten für die Sammelfahrzeuge $K_S(s)$ und für die Containergliederzüge $K_C(s)$ bei der Kalkulation nach Gleichung (7-14) berücksichtigt werden.

Für die Transportkosten mit Sammelfahrzeugen werden 13,5 €/Mg für eine Entfernung von 20 km angenommen, für die Umschlagkosten 7,22 €/Mg bei einer Umschlagmenge von ca. 40.000 Mg/a. Zur Ermittlung der Gesamtkosten für Transport und Umschlag $K_{SUC}(s,m)$ mit Containergliederzügen spielt nicht nur die Entfernung (s) eine große Rolle, sondern auch die umzuschlagende Abfallmenge (m).

$$\begin{aligned}
 K_{SUC}(s,m) &= K_S(s) + K_{US}(m) + K_C(s) & (7-14) \\
 &= 0,39 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s_s + 5,6 \frac{\text{€}}{\text{Mg}} + 7,22 \frac{\text{€}}{\text{Mg}} + 0,19 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s_c + 2,66 \frac{\text{€}}{\text{Mg}} \\
 &= 0,39 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s_s + 0,19 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s_c + 15,48 \frac{\text{€}}{\text{Mg}} \\
 K_{SUC}(s,m) &= 0,19 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s_c + 23,28 \frac{\text{€}}{\text{Mg}}
 \end{aligned}$$

Die Abbildung 7.5 stellt die Gesamtkosten für Transport und Umschlag mit Sammelfahrzeugen und Containergliederzügen in Abhängigkeit von der Entfernung dar.

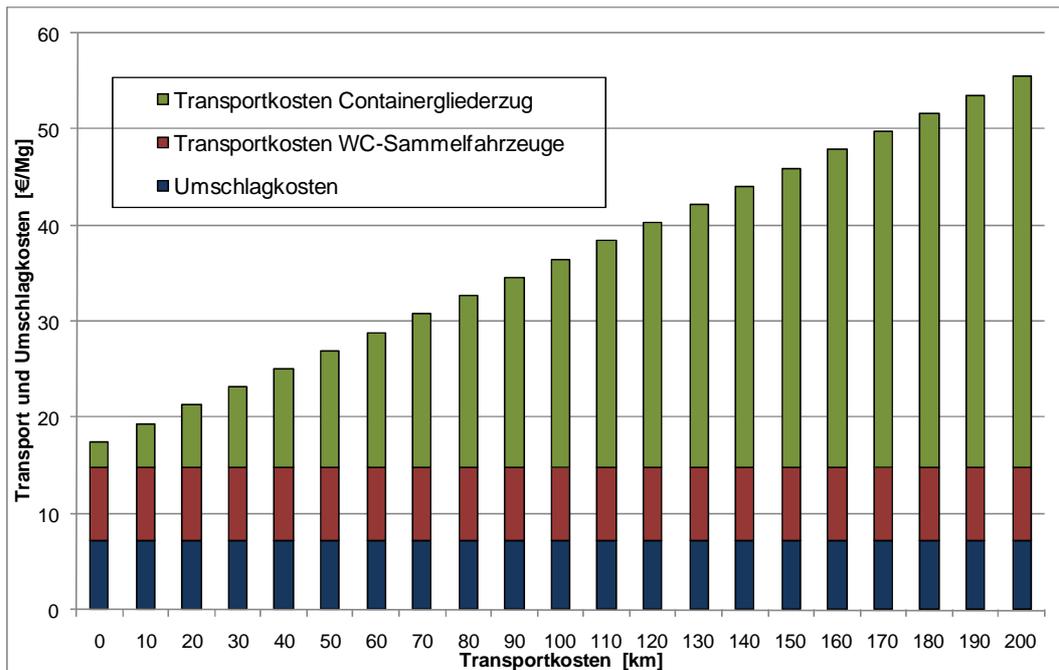


Abbildung 7.5: Transportkosten mit Sammelfahrzeugen und Containergliederzügen

Unter 25 km liegen die Transportkosten für den Containerzug günstiger als die Umschlagkosten und unter 55 km sind diese Kosten günstiger als die Transportkosten für die Sammelfahrzeuge. Der Anteil der Umschlagkosten an den Gesamtkosten reduziert sich nicht nur bei einer steigenden Umschlagmenge, sondern auch bei steigenden Entfernungen.

o **Kosten für den Transport mit Schubbodensattelauflegern**

Die Kalkulation der Gesamtkosten für Transport und Umschlag $K_{SUSS}(s,m)$ werden analog zu Gleichung (7-14) berücksichtigt. Statt $K_C(s)$ werden Transportkosten für Schubbodensattelaufleger $K_{SS}(s)$ nach Gleichung (7-15) berechnet. Dies wird in Abbildung 7.6 dargestellt

$$\begin{aligned}
 K_{SUSS}(s,m) &= K_s(s) + K_{US}(m) + K_{SS}(s) && (7-15) \\
 &= 0,39 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s_s + 5,6 \frac{\text{€}}{\text{Mg}} + 7,22 \frac{\text{€}}{\text{Mg}} + 0,16 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s_{SS} + 2,66 \frac{\text{€}}{\text{Mg}} \\
 &= 0,39 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s_s + 0,16 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s_{SS} + 15,48 \frac{\text{€}}{\text{Mg}} \\
 K_{SUSS}(s,m) &= 0,16 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s_{SS} + 23,28 \frac{\text{€}}{\text{Mg}}
 \end{aligned}$$

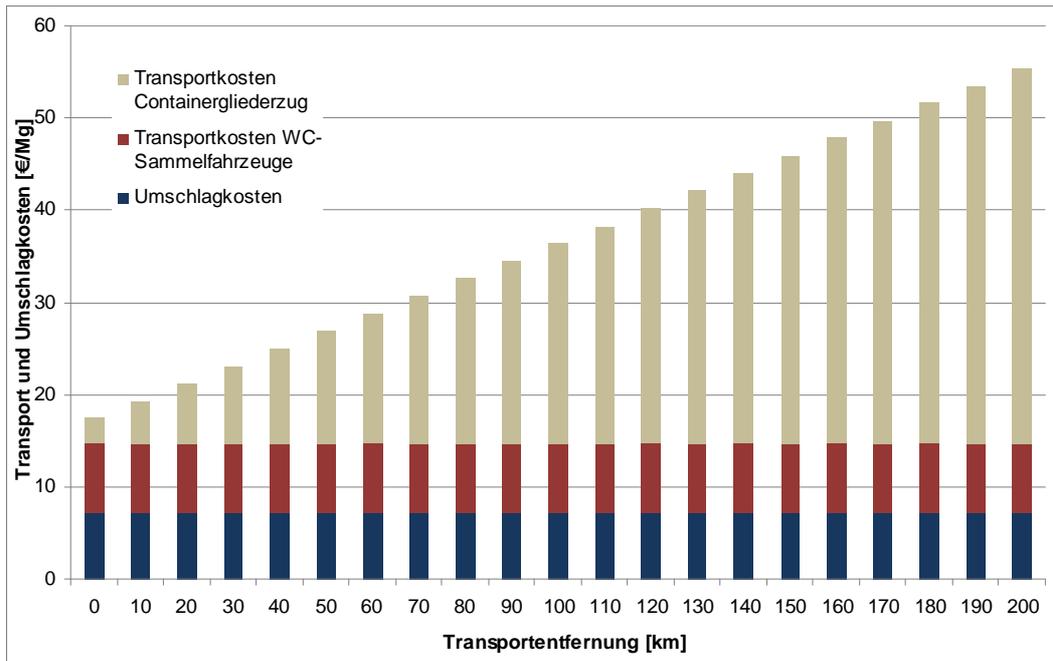


Abbildung 7.6: Kosten mit Sammelfahrzeugen und Schubbodensattelaufiegern

Die Situation stellt sich ähnlich der beim Transport mit Containergliederzügen dar.

o **Gesamtkosten des Bioabfalltransports in Duisburg, Oberhausen und Mülheim**

In diesem Abschnitt sind die Gesamtkosten für Transport und Umschlag, die oben durchgerechnet wurden, zusammenfassend dargestellt. Da die Quelldaten aus [33] leider nicht zugänglich waren, wurden die Daten aus einem Diagramm abgelesen. Um Ablesefehler zu minimieren, wurde für die abgelesenen Werte mithilfe der linearen Regression eine Ausgleichsgerade berechnet. Es ergeben sich die folgenden Gleichungen:

- Gesamtkosten $K_{G,Sammelfahrzeug}$ bei Direktfahrt mit Sammelfahrzeug in Abhängigkeit von der zurückgelegten Strecke s .

$$K_{G,Sammelfahrzeug}(s) = \left(0,39 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s + 5,6 \frac{\text{€}}{\text{Mg}}\right) \cdot T \quad (7-16)$$

- Gesamtkosten für Transport mit Wechselcontainersammelfahrzeug und Wechselcontainergliederzug

$$K_{G,WC-Fahrzeug} = \left(0,45 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s_{WC} + 0,25 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot s_{WCG} + 9,83 \frac{\text{€}}{\text{Mg}}\right) \cdot T \quad (7-17)$$

- Gesamtkosten für Transport mit Sammelfahrzeug und Containergliederzug mit Umschlag

$$K_{G,(Gliederzug)} = \left(0,39 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot S_s + 0,19 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot S_G + 15,48 \frac{\text{€}}{\text{Mg}}\right) \cdot T \quad (7-18)$$

- Gesamtkosten für Transport mit Sammelfahrzeug und Schubbodensattelaufleger mit Umschlag. Die Berechnung der Entfernung entspricht dem Verlauf von Gleichung (7-18).

$$K_{G,Schubboden} = \left(0,39 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot S_s + 0,16 \frac{\text{€}}{\text{km} \cdot \text{Mg}} \cdot S_G + 15,48 \frac{\text{€}}{\text{Mg}}\right) \cdot T \quad (7-19)$$

Innerhalb von etwa 30 km ist der Direkttransport mit Sammelfahrzeugen mit ca. 17,41 €/Mg am preiswertesten. Zwischen 35 km bis 135 km sind WC-Fahrzeuge die kostengünstigsten, die Kosten liegen zwischen 18,74 €/Mg bis 43,72 €/Mg. Ab 135 km wird der Transport mit dem Schubbodensattelaufleger am wirtschaftlichsten durchgeführt. Der Containergliederzug ist zu keinem Zeitpunkt das günstigste Transportfahrzeug. Daher ergeben sich aus

ökonomischen Aspekten die in Abbildung 7.8 dargestellten Einsatzradien für den Bioabfalltransport mit verschiedenen Fahrzeugarten (eventuell Umschlag). Damit können die verwendeten Fahrzeuge bei folgenden Transportentfernungen wirtschaftlich eingesetzt werden:

- Sammelfahrzeuge bis 25 km
- WC-Fahrzeuge 25 bis 150 km
- Schubbodensattelaufleger 140 bis 225 km

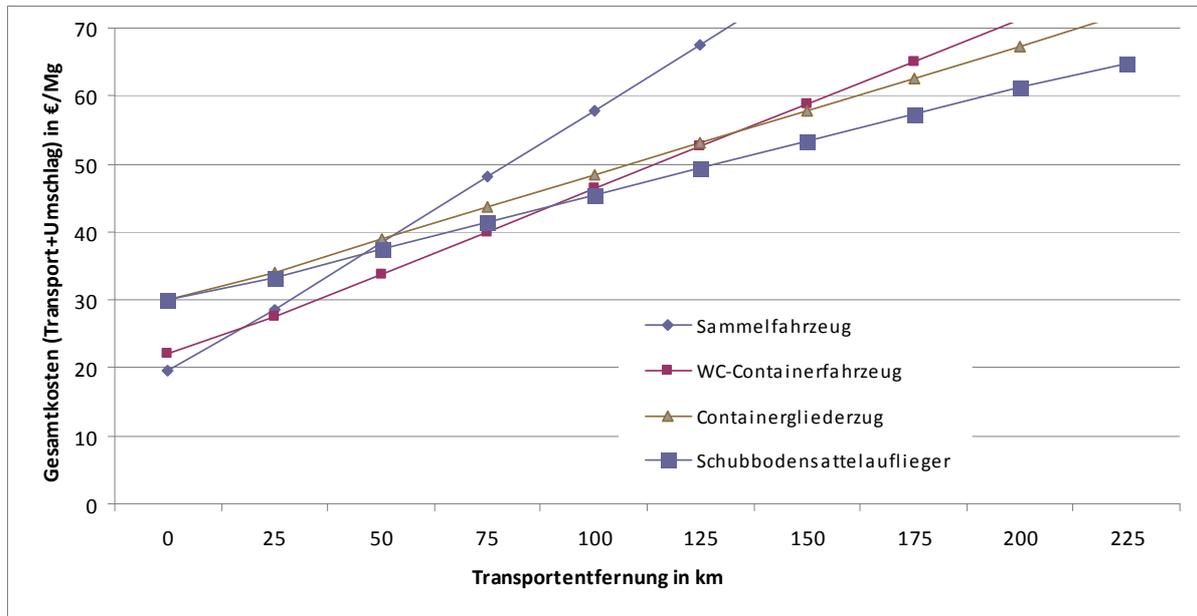


Abbildung 7.7 Gesamtkostenvergleich mit verschiedenen Fahrzeugarten

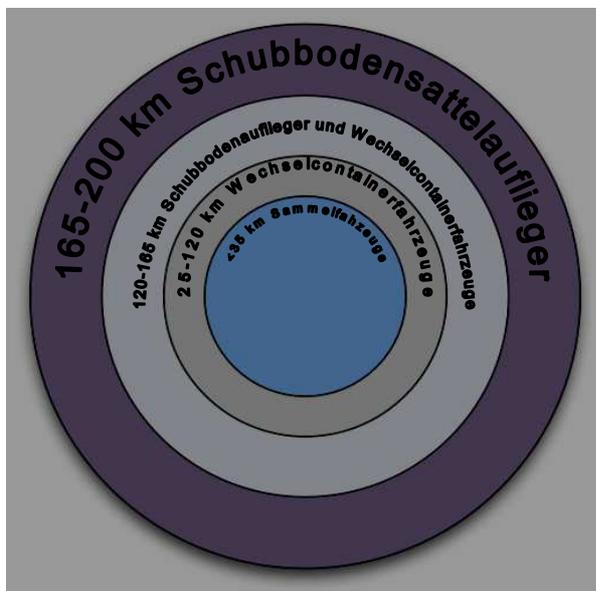


Abbildung 7.8: Wirtschaftlichkeit für Einsatzradien der verschiedenen Fahrzeuge [33]

Mit den Gleichungen aus den letzten Abschnitten können nur die jährlichen Gesamtkosten der drei Transportmodelle für Duisburg, Oberhausen und Mülheim berechnet werden. Dazu werden die Gleichungen (7-16) bis (7-19) mit dem jährlichen Transportaufkommen T multipliziert. Die Kombination aus Sammelfahrzeug und Container-Gliederzug wird betrachtet, da der Schubbodensattelaufleger in jedem Fall günstiger ist. In diesem Abschnitt werden auch die Leerfahrten berücksichtigt. Last- und Leerfahrten werden anhand der gleichen Kostenfunktion bestimmt. Die Kosten setzen sich aus so vielen Komponenten

zusammen, dass der Unterschied im Kraftstoffverbrauch zwischen Leer- und Lastfahrt nicht ins Gewicht fällt.

Tabelle 7.7 vergleicht die Kosten für alle drei Transportmodelle. Im Modell 1 wird der Bioabfall zu einer Biogasanlage in der gleichen Stadt gebracht. Die Modelle 2 bis 5 sind bezüglich der Fahrleistung optimiert (Kap. 6.5): Die letzte Spalte (Modell*) zeigt die Transportkosten für die Zuordnung der Abfallquellen zu den Abfallsenken gemäß Tabelle 6.32.

Tabelle 7.7: Gesamtkostenvergleich

Sammelgebiet	Dezentral					Modell ***
	Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4	Modell 5	
	[€/a]	[€/a]	[€/a]	[€/a]	[€/a]	[€/a]
SGD1	26.715	33.604	47.460	51.841	50.526	33.604
SGD2	46.845	61.866	77.758	85.103	82.926	61.866
SGD3	73.068	104.531	142.363	151.527	148.069	25.117
SGD4	65.403	81.733	93.970	99.921	97.650	81.733
SGD5	95.714	125.231	161.909	171.175	167.384	125.231
SGD6	114.319	163.659	161.050	171.672	167.729	167.729
SGD7	57.021	76.110	94.163	102.039	99.529	76.110
SGD8	200.349	302.171	277.543	286.195	280.585	288.385
SGO9	70.724	85.763	101.562	107.356	104.414	78.431
SGO10	66.985	95.786	119.995	124.582	121.450	66.985
SGO11	93.530	108.534	126.289	134.827	130.966	94.151
SGM12	64.964	108.108	132.633	138.568	136.195	64.964
SGM13	25.084	39.647	53.147	55.407	54.468	25.084
SGM14	40.508	62.805	98.826	105.025	103.078	40.508
Summe(€/a)	1.041.230	1.449.549	1.688.671	1.785.240	1.744.970	1.229.897

Durch den Einsatz des Schubbodensattelauflegers könnte zwar die Fahrleistung beträchtlich reduziert werden, die Transportkette aus Sammelfahrzeug und Schubbodensattelaufleger ist aber bei allen hier betrachteten Fällen teurer als der Direkttransport mit Sammelfahrzeugen. Die Umschlagkosten fallen bei der relativ kurzen Transportstrecke zu stark ins Gewicht. Auch der Transport mit Wechselcontainerfahrzeugen ist trotz teilweise besserer Fahrleistung zu teuer.

8 Standort- und Substratauswahl der Biogasanlage

8.1 Standort Duisburg mit verschiedenen Substraten

In diesem Abschnitt wird eine Biogasanlage betrachtet, die mit verschiedenen Substraten oder Kombinationen von Substraten betrieben wird:

1. Substrate aus nachwachsenden Rohstoffen

In Duisburg stehen 22.133 Mg an nachwachsenden Rohstoffen (Mais und Roggen) zur Verfügung [97]. Daraus entstehen 4.116.738 Kubikmeter Biogas pro Jahr. Das entstehende Biogas hat einen etwas geringeren Methangehalt (<60 %), sodass hier von einem Heizwert von 5,4 Kilowattstunden pro Kubikmeter ausgegangen wird. Aus einer Tonne dieses Substrats entstehen 186 Kubikmeter Biogas [97]. Damit ergibt sich ein Gesamtenergiepotenzial von 22,23 Gigawattstunden pro Jahr. In einem Blockheizkraftwerk (BHKW) mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 30 % und einem thermischen Wirkungsgrad von 55 % entstehen daraus 6.669 Megawattstunden elektrische und 12.226 Megawattstunden thermische Energie pro Jahr.

2. Substrate aus nachwachsenden Rohstoffen und Bioabfällen aus Duisburg

In diesem Fall wird die gleiche Menge an nachwachsenden (NawaRo) Rohstoffen wie im ersten Fall genutzt. Zusätzlich werden die Bioabfälle aus Duisburg in diese Anlage gebracht. Analog zu [92] wird eine Menge von 50 Kilogramm Bioabfall pro Einwohner und Jahr angenommen. Dass 2/3 der Einwohner Duisburgs an der Abfalltrennung über die gelbe Biotonne teilnehmen (entspricht einem Anschlussgrad 67 %), ist ebenfalls eine Annahme nach [92]. Die Einwohnerzahl von Duisburg beträgt knapp 500.000. Damit ergibt sich eine Abfallmenge von 16.750 Mg. Aus Bioabfall entsteht bei der Vergärung ca. 120 m³ Gas pro Mg Abfall. Der Methangehalt dieses Biogases liegt bei 60 % und der Heizwert bei 6 kWh/m³.

3. NawaRo, Bioabfall und Klärschlamm

Hier wird zusätzlich der Klärschlamm aus den 7 Klärwerken von Duisburg verwendet. Dies sind 11.623 Mg [102] (2382 Mg Rückstände aus der Kanalisation und 9240 Mg Schlämme aus der Abwasserbehandlung). Mit einem spezifischen Biogasertrag von 198 m³/Mg [105] ergeben sich 2.301.354 m³ Biogas aus Klärschlamm pro Jahr.

4. Substrate aus Bioabfall und Klärschlamm aus Duisburg

In diesem Fall wird die gleiche Menge an Bioabfall und Klärschlamm wie in Fall 3 genutzt. Auf den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen wird verzichtet. Tabelle 8.1 fasst die Kennzahlen für Fall 1 bis Fall 4 zusammen. Der Biogasertrag (Zeilen 7 bis 9) wird durch Multiplikation der Substratmengen (Zeilen 1 bis 3) mit der Biogasausbeute (Zeilen 4 bis 5) berechnet. Der jeweilige Energieertrag (Zeilen 14 bis 15) ergibt sich aus dem Biogasertrag (Zeilen 7 bis 9) multipliziert mit dem entsprechenden Heizwert (Zeilen 11 bis 13). Der erzeugte Strom (Zeile 19 bis 22) und die erzeugte Wärmemenge (Zeile 26 bis 29) werden aus dem Energieertrag (Zeile 14 bis 17) und dem jeweiligen Wirkungsgrad (Zeile 18 und 23 bis 25) berechnet.

Tabelle 8.1: Energievergleich in Biogasanlagen

Biogasanlagen		1.Fall	2.Fall	3.Fall	4.Fall
Substrate					
1	NawaRo [Mg/a]	22133	22133	22133	-
2	Bioabfall [Mg/a]	-	16750	16750	16750
3	Klärschlamm [t/a]	-	-	11623	11623
Biogasausbeute					
4	NawaRo [m ³ /Mg]	186	186	186	-
5	Bioabfall [m ³ /Mg]	-	120	120	120
6	Klärschlamm [m ³ /Mg]	-	-	198	198
Biogasertrag					
7	NawaRo [m ³ /a]	4116738	4116738	4116738	-
8	Bioabfall [m ³ /a]	-	2010000	2010000	2010000
9	Klärschlamm [m ³ /a]	-	-	2301354	2301354
10	Summe [m ³ /a]	4116738	6126738	8428092	4311354
Heizwert					
11	NawaRo [kWh/m ³]	5,4	5,4	5,4	-
12	Bioabfall [kWh/m ³]	-	6	6	6
13	Klärschlamm [kWh/m ³]	-	-	6	6
Energieertrag					
14	NawaRo [kWh/a]	22230385	22230385	22230385	-
15	Bioabfall [kWh/a]	-	12060000	12060000	12060000
16	Klärschlamm [kWh/a]	-	-	13808124	13808124
17	Summe [kWh/a]	22230385	34290385	48098509	25868124
Stromerzeugung					
18	elektrischer Wirkungsgrad [%]	30	30	30	30
19	NawaRo [kWh/a]	6669116	6669116	6669116	-
20	Bioabfall [kWh/a]	-	3618000	3618000	3618000
21	Klärschlamm [kWh/a]	-	-	4142437	4142437
22	Summe [kWh/a]	6669116	10287116	14429553	7760437
Wärmeerzeugung					
23	NawaRo _(Wirkungsgrad) [%]	55	55	55	-
24	Bioabfall _(Wirkungsgrad) [%]	-	53	53	53
25	Klärschlamm _(Wirkungsgrad) [%]	-	-	55	55
26	NawaRo [kWh/a]	12226711	12226711	12226711	-
27	Bioabfall [kWh/a]	-	639800	639800	6391800
28	Klärschlamm [kWh/a]	-	-	7594468	7594468
29	Summe [kWh/a]	12226711	18618511	26212979	13986268

Die BHKW-Anlage läuft in allen vier Fällen mit einer Leistung von 7.000 Volllaststunden pro Jahr. Dies entspricht ungefähr 19,2 Stunden pro Tag. Die elektrische Leistung der Biogasanlage ist der Quotient aus dem Wert in Zeile 22 und den 7.000 Volllaststunden. Daraus ergibt sich im ersten Fall (NawaRo) knapp 1 MW elektrische Leistung (6.669.116 kWh/7.000 h = 953 kW) und im dritten Fall (NawaRo kombiniert mit Bioabfall und Klärschlamm) schon 2 MW elektrische Leistung. Biogasanlagen werden nach EEG 2009 §8 (Vergütung für Strom aus Biomasse) vergütet. Je nach Größe der Biogasanlage, die Einstufung erfolgt nach der elektrischen Leistung, ergeben sich die verschiedenen Vergütungssätze [106]. Die bezahlten Boni richten sich nach der Art der eingesetzten Biomasse. Tabelle 8.2 gibt eine Übersicht über die Vergütungssätze und Boni.

Tabelle 8.2: Vergütung nach EEG 2009

Leistungsanteil	Grundvergütung	NawaRo-Bonus
	[ct/kWh]	[ct/kWh]
bis 150 kW _{el}	11,67	7
150 kW _{el} bis 500 kW _{el}	9,18	7
500 kW _{el} bis 5 MW _{el}	8,25	-
5 MW _{el} bis 20 MW _{el}	8,25	-

Nach dem EEG wird eine jährliche Degression von 1 % durchgeführt. Diese Degression gilt für Anlagen, die nach 2009 in Betrieb gehen. Für eine Anlage die 2009 in Betrieb geht wird die Degression noch nicht wirksam. Grundvergütung und Bonus verringern sich jedes Jahr um 1 %. Diese Vergütung gilt jeweils für eine Dauer von 20 Jahren und wird zum Zeitpunkt der ersten Stromlieferung der Anlage mit der jeweiligen Degression festgesetzt. Für die Vergütung (V) mit Degression (d) gilt:

$$V = V_{2009} \cdot (1 - d)^n \quad (8-1)$$

Für eine Anlage bis 150 kW_{el}, die 2011 in Betrieb geht, ergibt sich zum Beispiel eine Grundvergütung von

$$\begin{aligned} V &= 11,67 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}} \cdot (1 - 0,01)^{2011-2009} \\ &= 11,44 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}} \end{aligned} \quad (8-2)$$

Hinzu kommt die anfallende Wärme, die zur Deckung des Prozesswärmebedarfs und/oder zur Wärmeversorgung von Gebäuden prozentual (mit 41 %) durch das KWK-Gesetz mit max. 3 ct/kWh gefördert wird. Dies entspricht 1,23 ct/kWh.

Die Berechnung der Grundvergütung und Boni erfolgt gestaffelt und hängt von der elektrischen Leistung P_{Anl} der jeweiligen Anlage ab. Da hier alle Anlagen unter 20 MW liegen, ergibt sich für die Vergütung die folgende Gleichung:

$$\begin{aligned} V &= 11,67 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}} \cdot \frac{150 \text{ kW}_{\text{el}}}{P_{\text{Anl}}} \\ &+ 9,18 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}} \cdot \frac{(500 - 150) \text{ kW}_{\text{el}}}{P_{\text{Anl}}} \\ &+ 8,25 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}} \cdot \frac{(P_{\text{Anl}} - 550) \text{ kW}_{\text{el}}}{P_{\text{Anl}}} \end{aligned} \quad (8-3)$$

Mit dieser Formel ergeben sich in Zeile 10 Gesamteinnahmen von 816.674 € (Tabelle 8.3). Der NawaRo-Bonus B_{NawaRo} wird nach der folgenden Gleichung berechnet. Die Ergebnisse stehen in Zeile 11. Der NawaRo-Bonus wird nur im ersten Fall gezahlt. Bei Verwendung von Bioabfall entfällt der Bonus.

$$\begin{aligned} B_{\text{Nawaro}} &= 7 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}} \cdot \frac{150 \text{ kW}_{\text{el}}}{P_{\text{Anl}}} \\ &+ 7 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}} \cdot \frac{(500 - 150) \text{ kW}_{\text{el}}}{P_{\text{Anl}}} \\ &+ 0 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}} \cdot \frac{(P_{\text{Anl}} - 550) \text{ kW}_{\text{el}}}{P_{\text{Anl}}} \end{aligned} \quad (8-4)$$

Um eine zusätzliche Vergütung zu erzielen, wird ein Abnehmer für die KWK-Wärme in der Nähe der Biogasanlage angenommen. Dadurch kann ein zusätzlicher Wärmeerlös von 25 €/MWh bei Einspeisung in ein Wärmenetz erzielt werden [92]. Für den ersten Fall ergibt sich z. B. ein Wärmeerlös von ca. 125.000 €/Jahr (12.226 MWh/a x 41 % x 25 €/MWh), und Gesamteinnahmen von 1.061.431€/a

Tabelle 8.3: Vergleich der Einnahmen

elektrische Leistung	1.Fall	2.Fall	3.Fall	4.Fall
Volllaststunden (BHKW) [h]	7000	7000	7000	7000
NawaRo [kWel]	953	953	953	-
Bioabfall [kWel]	-	517	517	517
Klärschlamm [kWel]	-	-	592	592
Summe [kWel]				
thermische Leistung	953	1470	2062	1109
NawaRo [kWth]	1747	1747	1747	-
Bioabfall [kWth]	-	913	913	913
Klärschlamm [kWth]	-	-	1085	1085
Summe [kWth]	1747	2660	3745	1998
Einnahme				
Grundvergütung [ct/kW]	9,14	8,82	8,65	8,99
NawaRo-Bonus [ct/kW]	3,67	-	-	-
KWK-Bonus 2 ct anteilig 41%[ct/kW]	1,23	1,23	1,23	1,23
Wärmepreis Netzeinspeisung [e/MWh]	25	25	25	25
Stromerlöse [€/a]	936431	1033361	1425279	793287
Wärmeerlöse [€/a]	125000	190518	268662	143357
Erlöse Gesamt [€/a]	1.061.431	1.223.879	1.693.941	936.644

Bei einer Untersuchung in Österreich wurde ein linearer Zusammenhang zwischen der Leistung P_{el} einer Biogasanlage und den Investitionskosten K_{invest} gefunden. Da die Daten aus Österreich nicht auf Deutschland übertragbar sind, wurden hier die Kosten und die elektrische Leistung von 16 Biogasanlagen ermittelt [107], [108], [109], [110], [111], [112], [113]. Tabelle 8.1 zeigt die Investitionskosten der Anlagen in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung.

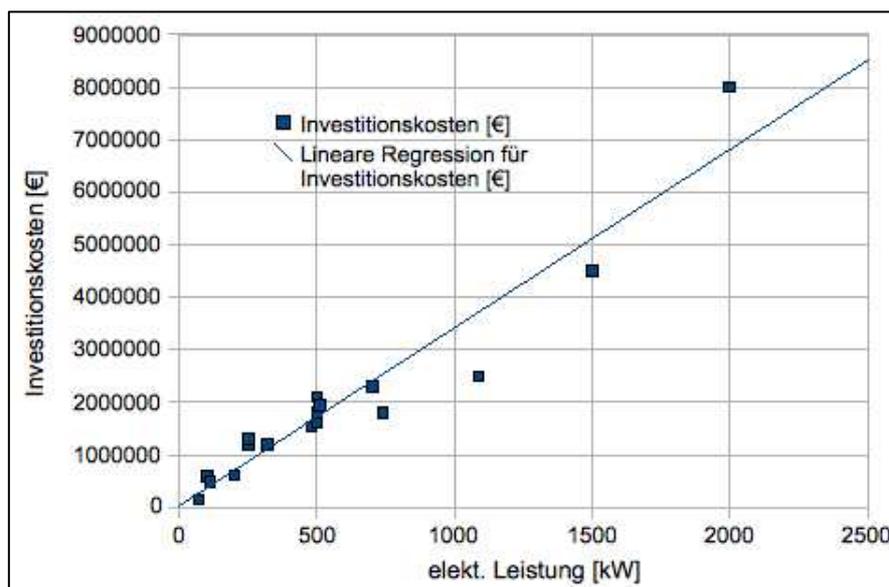


Abbildung 8.1: Investitionskosten

Für diese 16 Wertepaare wurde eine lineare Regressionsgerade, Gleichung (8-5) berechnet.

$$K_{\text{Invest}} = 3395,64 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \cdot P_{\text{el}} + 16832,1 \text{ €} \quad (8-5)$$

Wie auch in der Untersuchung in Österreich schwanken die Preise erheblich. Die Gleichung stellt aber eine realistische Abschätzung der Kosten dar. Die spezifischen Kosten in Tabelle 8.4, in Zeile 7, werden nach Gleichung (8-5) berechnet. Zum Vergleich: Die Untersuchung aus Österreich kommt zu der folgenden Gleichung:

$$K_{\text{Invest}} = 3069,3 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \cdot P_{\text{el}} + 271835 \text{ €} \quad (8-6)$$

Ausgehend von einem vergünstigten KfW-Kapitalzins p von 4,5 % und einer Nutzungsdauer n von 10 Jahren ergeben sich die folgenden Gleichungen für Annuität A , Annuitätenfaktor $a_{p,n}$ und Investitionskosten K :

$$a_{p,n} = \frac{(1+p)^n \cdot p}{(1+p)^n - 1} \quad (8-7)$$

$$A = K \cdot a_{p,n} \quad (8-8)$$

Aus Gleichung (8-7) ergibt sich für die hier betrachteten Anlagen Zeile 9 in Tabelle 8.4. Zeile 8 in Tabelle 8.4 wird aus Gleichung (8-8) berechnet. Es zeigt die Kosten der vier Biogasanlagen:

Tabelle 8.4: Kostenvergleich

	1. Fall	2. Fall	3. Fall	4. Fall
Rohstoffkosten 26 €/Mg				
1 NawaRo [€/a]	575.000	575.000	575.000	-
2 Bioabfall [€/a]	-	-	-	-
3 Klärschlamm [€/a]	-	-	-	-
4 Summe [€/a]	575.000	575.000	575.000	-
5 kapitalgebundene Kosten				
6 Investitionskosten K [Mio. €]	4	6	8	4
7 Nutzungsdauer [t]	20	20	20	20
8 Annuitätenfaktor a_p, n [%]	8	8	8	8
9 Annuität A [€]	273.718	428.589	605.926	320.448
10 betriebsgebundene Kosten				
11 Instandhaltung + Wartung [€/a]	71.095	111.322	157.383	83.233
12 Vollwartung BHKW 1,2 ct/kWh [€/a]	80.000	123.445	173.154	93.125
13 Sonstige Kosten [€/a]	35.548	55.661	78.692	41.617
14 Summe [€/a]	186.643	290.428	409.229	217.975
15 Gesamtkosten [€/a]	1.035.361	1.294.017	1.590.155	538.423
16 Gewinn (+)/Verlust (-)[€/a]	26.070	-70.138	103.786	398.221

Im Gegensatz zu [92] ist hier das Ergebnis für den ersten Fall positiv. Dies liegt in der höheren Grundvergütung (z. B. keine Degression für Anlagen die 2009 in Betrieb gehen) und der Erhöhung des NawaRo-Bonus.

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Verlust im zweiten Fall sehr hoch ist. Dieses Modul ist eine typische landwirtschaftliche Anlage, die mindestens mit 51 % nachwachsenden Rohstoffen betrieben wird. Da Bioabfälle als Kofermentation eingesetzt werden, entfällt der NawaRo-Zuschlag (7 ct). Weiterhin müssen die verwendeten Rohstoffe finanziert werden.

Die zweite Anlage könnte nur bei Rohstoffkosten von weniger als 22 €/Mg wirtschaftlich arbeiten. Es zeigt sich, dass die Kombination aus Bioabfall und Klärschlamm (Fall 4) am wirtschaftlichsten ist. Bei Klärschlamm sind, wegen des geringen Biogasgehalts nur kurze Transportstrecken wirtschaftlich. Daher werden im folgenden Kapitel drei dezentrale Anlagen betrachtet, die nur mit Bioabfall betrieben werden. Die drei Anlagen stehen in Duisburg, Oberhausen und Mülheim.

8.2 Drei dezentrale Anlagen für Bioabfall

In diesem Kapitel werden drei Biogasanlagen in Mülheim, Oberhausen und Duisburg betrachtet, die ausschließlich Bioabfälle verwenden. Die Berechnungen erfolgen analog zur Berechnung in Tabelle 8.4. Hier wird für Duisburg ein Anschlussgrad von 100 % angenommen, wie für Oberhausen und Mülheim auch.

Tabelle 8.5: Biogasanlagen Duisburg/Oberhausen/Mülheim

	Duisburg	Oberhausen	Mülheim
technische Daten			
Bioabfall [Mg] (analog Tab. 13 bis 15)	33.410	10.620	8.227
Biogasausbeute [m3/t]	120	120	120
Biogasertrag [m3/a]	4.009.200	1.274.400	987.240
Heizwert [kWh/m3]	6	6	6
Energieertrag [kWh]	24.055.200	7.646.400	5.923.440
Stromerzeugung			
bei 30% Wirkungsgrad [kWh/a]	7.216.560	2.293.920	1.777.032
elektrische Leistung			
bei 7000 h Volllast (BHKW) [kWei]	1.031	328	254
Wärmeerzeugung			
bei 53% Wirkungsgrad [kWh/a]	12.749.256	4.052.592	3.139.423
Co2-Ausstoß [Mg/a]	98	35	17
thermische Leistung			
bei 7000 h Volllast (BHKW) [kWth]	1.821	579	448
Einnahmen			
Grundvergütung [ct/kWh]	8,25	8,25	8,25
KWK-Bonus (analog Tab. 43)	1,23	1,23	1,23
Wärmepreis Netzeinspeisung [€ /MWh]	25	25	25
Stromerlöse [€ /a]	684.143	217.477	168.476
Wärmeerlöse [€ /a]	130.672	41.536	32.177
Entsorgungseinnahme	4.953.344	2.191.794	1.704.400
Erlöse Gesamt [€ /a]	5.768.159	2.450.807	1.905.053
Kosten			
Investitionskosten K [Mio. €]	3,5	1,1	0,9
Nutzungsdauer [a]	10	10	10
Annuitätenfaktor $ap>n$ [%]	12,6	12,6	12,6
Annuität A [€]	442.326	139.017	113.741
Instandhaltung + Wartung [€/a]	56.468	14.452	10.095
Vollwartung BHKW 1,2 ct/kWh [€/a]	86.599	27.527	21.324
Transportkosten (€/a)	679.435	231.240	130.556
Sonstige Kosten [€/a]	28.234	7.226	5.047
Gesamtkosten [€/a]	1.293.061	419.461	280.763
Gewinn (+)/Verlust (-) [€/a]	4.475.097	2.031.346	1.624.290

Alle drei Anlagen arbeiten wirtschaftlich. Die Ein Vergleich der Gesamtkosten pro Energieertrag zeigt, dass die kleine Anlage den Energieertrag zu günstigeren Kosten produziert (Abbildung 8.2, links) (Duisburg 1,84 ct/kWh, Oberhausen 1,78 ct/kWh und Mülheim 1,76 ct/kWh). Der Preis pro kWh Strom verhält sich umgekehrt proportional zur Anlagengröße (Abbildung 8.2, Mitte). Das ist eine Auswirkung des EEG, da kleinere Anlagen stärker gefördert werden (Tabelle 8.2). Der Wärmeerlös ist in allen drei Fällen konstant bei 1,02 ct/kWh (Tabelle 8.2, rechts).

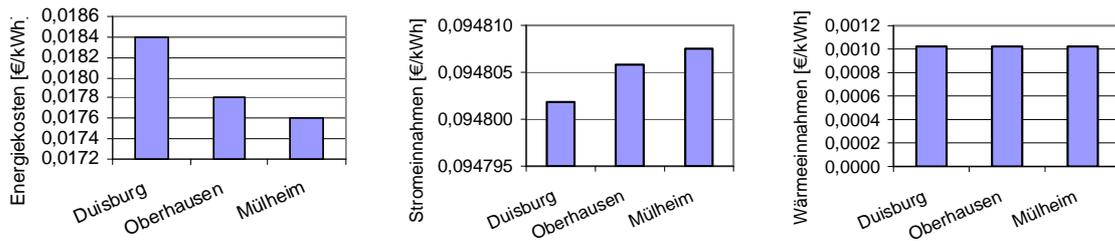


Abbildung 8.2: Wirtschaftlichkeitsanalyse der drei Anlagen

Setzt man den erzeugten Energiebetrag in Beziehung zum Gesamtgewinn, ergibt sich die folgende Tabelle:

Tabelle 8.6: Wirtschaftlichkeitsanalyse der drei Anlagen

Biogasanlage	Gewinn pro erz. Energiebetrag [ct/kWh]
Duisburg	1,55
Oberhausen	1,61
Mülheim	1,63

Obwohl die Kosten für die Energiegewinnung in den größeren Anlagen geringer sind (Abb. 45, links), ist der Gewinn pro kWh Energie in der kleineren Anlage größer.

8.2.1 Fahrleistung, Transportkosten und CO₂-Emission

Tabelle 8.7 vergleicht die in Kapitel 7 ermittelten Jahresfahrleistungen (F) der Sammel- und Wechselcontainerfahrzeuge und die bei diesen Jahresfahrleistungen anfallenden CO₂-Emissionen. Die Sammelfahrzeuge und Wechselcontainerfahrzeuge bieten unter den hier gegebenen Parametern die kostengünstigste Variante mit den geringsten CO₂-Emissionen.

Tabelle 8.7: Jahresfahrleistung bei dezentralen Biogasanlagen

Stadt/ Sammelgebiet	Sammelfahrzeug [km/a]	Transport- kosten[€/a]	CO ₂ - Emissionen	WC- Fahrzeug [km/a]	Transport- kosten [€/a]	CO ₂ - Emissionen
SGD1	6.020	26.715	3,58	4.932	33.604	3,58
SGD2	10.275	46.845	6,11	9.438	61.866	6,86
SGD3	15.666	73.068	9,31	16.667	104.531	11,50
SGD4	16.746	65.403	9,96	15.108	81.733	10,98
SGD5	22.166	95.714	13,18	20.949	125.231	15,01
SGD6	27.903	114.319	16,59	30.958	163.659	22,13
SGD7	12.714	57.021	7,56	12.111	76.110	8,69
SGD8	52.712	200.349	31,34	63.757	302.171	45,89
SGO9	17.859	70.724	10,62	15.321	85.763	11,39
SGO10	15.119	66.985	8,99	16.869	95.786	12,00
SGO11	25.111	93.530	14,93	20.077	108.534	15,28
SGM12	15.244	64.964	9,06	19.586	108.108	12,29
SGM13	6.172	25.084	3,67	7.405	39.647	4,89
SGM14	7.713	40.508	4,59	9.143	62.805	5,94
Summe	251.420	1.041.230	149,47	262.320	1.449.549	186,43

8.3 Zentrale Biogasanlage

In diesem Kapitel wird der Einsatz einer zentralen Biogasanlage betrachtet, die von den Städten Duisburg, Oberhausen und Mülheim gemeinsam genutzt wird. Diese Anlage muss eine Kapazität aufweisen, die der Summe der Kapazitäten der drei einzelnen Anlagen entspricht. Durch die größere Kapazität steigt die Wirtschaftlichkeit der Anlage.

Für den Einsatz einer zentralen Anlage gibt es ein weiteres Argument: Die Betrachtung der ökologischen und ökonomischen Aspekte des Abfalltauses hat gezeigt, dass es günstiger ist Bioabfälle von Mülheim nach Duisburg zu transportieren. Es ist aus logistischer Sicht wirtschaftlicher.

8.3.1 Standortwahl

Für eine zentrale Anlage ist der Standort der Biogasanlage Mülheim nicht optimal. Die Anlage liegt von den Sammelgebieten in Duisburg und Oberhausen weit entfernt. Eine bessere Lage hat der ausgewählte Standort auf der Düsseldorfer Landstraße 196, 47249 Duisburg. Bei der Standortplanung müssen weitere Punkte berücksichtigt werden:

- Das Grundstück der Biogasanlage liegt mindestens 400 m von der nächsten Wohnbebauung entfernt.
- Die Lage des Grundstückes ist in unmittelbarer Nähe einer Erdgasleitung (höchstens 1 km bis 1,5 km Entfernung).
- Es besteht eine günstige Verkehrsanbindung zur Anlieferung der Rohstoffe.
- Das Grundstück liegt höchstens 1,5 km vom nächsten Wärmeabnehmer entfernt.

Diese Punkte werden von dem Standort auf der Düsseldorfer Landstraße in Duisburg erfüllt. Die folgende Tabelle (Tabelle 8.8) fasst die Daten dieser zentralen Biogasanlage zusammen.

Tabelle 8.8: Zentrale Biogasanlage Mülheim/Duisburg

Technische Daten (Biogasanlagen)	Mülheim	Duisburg
Bioabfall [t] (analog Tab. 13 bis 15)	52.257	52.257
Biogasausbeute [m ³ /t]	120	120
Biogasertrag [m ³ /a]	6.270.840	6.270.840
Heizwert [kWh/m ³]	6	6
Energieertrag [kWh]	37.625.040	37.625.040
Stromerzeugung		
bei 30 % Wirkungsgrad [kWh/a]	11.287.512	11.287.512
elektrische Leistung		
bei 7.000 h Volllast (BHKW) [kWei]	1.613	1.613
CO ₂ -Ausstoß [Mg/a]	178	126
Wärmeerzeugung		
bei 53 % Wirkungsgrad [kWh/a]	19.941.271	19.941.271
thermische Leistung		
bei 7.000 h Volllast (BHKW) [kWth]	2.849	2.849
Einnahmen		
Grundvergütung [ct/kWh]	8	8
KWK-Bonus (analog Tab. 43)	1	1
Wärmepreis Netzeinspeisung [€ /MWh]	25	25
Stromerlöse [€ /a]	1.070.059	1.070.059
Wärmeerlöse [€ /a]	204.398	204.398
Entsorgungseinnahme	8.849.538	8.849.538
Erlöse Gesamt [€ /a]	10.123.994	10.123.994
Kosten		
Investitionskosten K [Mio. €]	5	5
Nutzungsdauer [a]	10	10
Annuitätenfaktor $ap > n$ [%]	12,6	12,6
Annuität A [€]	694.111	694.111
Instandhaltung + Wartung [€/a]	109.846	109.846
Vollwartung BHKW 1,2 ct/kWh [€/a]	135.450	135.450
Transportkosten [€/a]	1.191.253	920.606
Sonstige Kosten [€/a]	54.923	54.923
Gesamtkosten [€/a]	2.185.584	1.914.937
Gewinn (+)/Verlust (-) [€/a]	7.938.410	8.209.057

Der Wärmetransport über größere Entfernungen ist nur mit großen Verlusten möglich. Er ist nur bis zu einer Entfernung von ca. 2 km sinnvoll. Um Biogas über größere Entfernungen zum Heizen zu nutzen, gibt es zwei Möglichkeiten:

- Das Biogas wird auf Erdgasqualität veredelt. Dieses kann in die normale Erdgasleitung eingespeist und wie Erdgas zur Wärmeabgabe genutzt werden. Nachteile sind der zusätzliche Aufwand und die Kosten für die Veredelung und Verdichtung.
- Es wird ein weiteres Blockheizkraftwerk in der Nähe des Wärmeabnehmers errichtet. Das Biogas kann über eine Leitung verlustfrei dorthin transportiert werden. Nachteile sind hier die Aufwände und die Kosten für die Gastrocknung und die Rohrleitung.

Abbildung 8.3 zeigt ein Modell für den zweiten Fall: Ein zweites Blockheizkraftwerk wird in der Nähe einer Wohnsiedlung oder eines anderen Wärmeabnehmers errichtet.

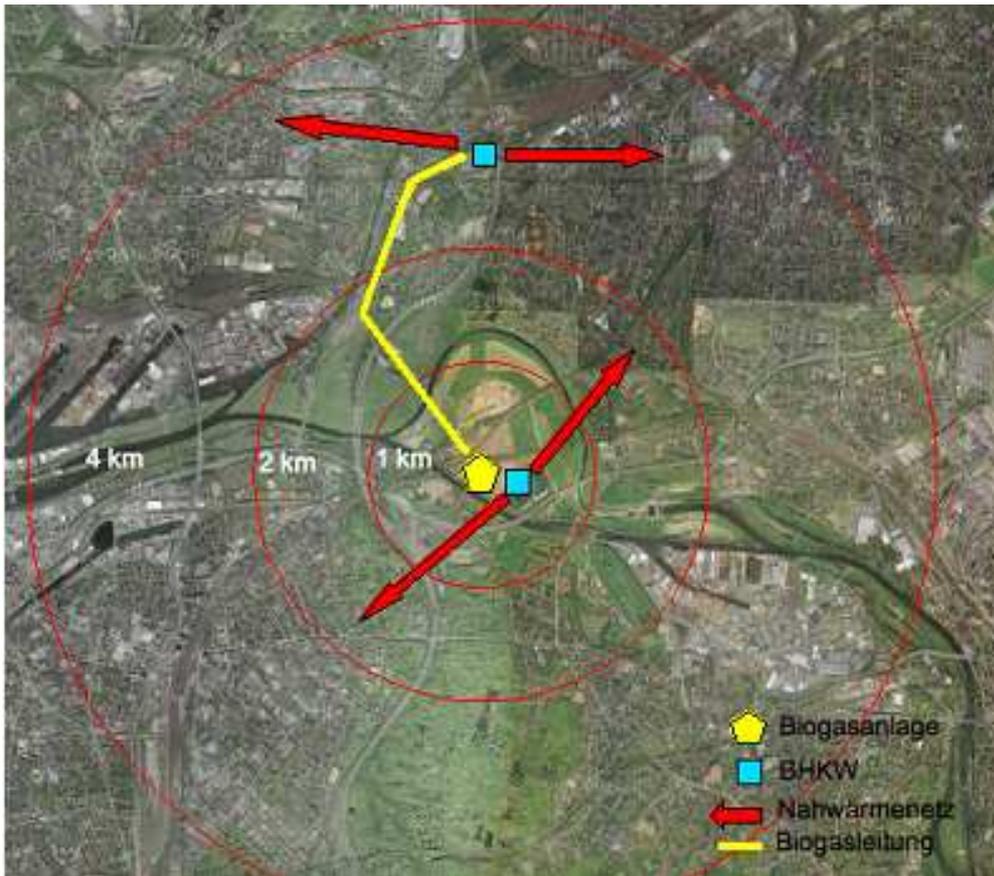


Abbildung 8.3 Zentrale Biogasanlage mit zusätzlichem BHKW

8.3.2 Fahrleistung, Transportkosten und CO₂-Emission

In diesem Fall werden nur Sammel- und Wechselcontainersammelfahrzeuge betrachtet. Schubbodenaufleger und Containergliederzüge sind bei diesen Transportentfernungen nicht wirtschaftlich. In der folgenden Tabelle sind die Fahrten von den Betriebshöfen (Zur Kupferhütte 10, Duisburg, Buschhausenstraße 149, Oberhausen und Pilgerstraße 25, Mülheim) zum jeweiligen Sammelgebiet, von dort zur Biogasanlage (Pilgerstraße 25, Mülheim oder Emmericher Straße 282, Duisburg) und wieder zurück zum Betriebshof erfasst. Für die Sammelgebiete wurden die gleichen Punkte im Zentrum der jeweiligen Sammelgebiete genutzt. Die Strecken wurden mit Google-Maps bestimmt. Die Transportkosten können durch Einsatz beider Fahrzeugtypen (je nach Sammelgebiet) bei der zentralen Anlage in Mülheim um 29,76 % und bei der zentralen Anlage in Duisburg um 43,37 % verringert werden

Tabelle 8.9: Jahresfahrleistung bei zentraler Biogasanlage in Mülheim

Jahresfahrleistung der Biogasanlage Mülheim						
Stadt/	Sammelfahrzeug	Transportkosten	CO ₂ - Emissionen	WC- Fahrzeug	Transportkosten	CO ₂ - Emissionen
Sammelgebiet	[km/a]	[€/a]	[Mg/a]	[km/a]	[€/a]	[Mg/a]
SGD1	9.670	37.097	5,7	5.599	40.259	4,2
SGD2	15.043	61.266	8,9	10.236	71.110	7,7
SGD3	28.708	112.950	17,1	21.269	130.096	16,1
SGD4	20.217	75.625	12,0	14.575	88.286	10,5
SGD5	33.835	131.571	20,1	24.735	148.216	18,8
SGD6	33.233	130.675	19,8	30.238	174.143	21,4
SGD7	18.330	74.163	10,9	13.275	87.098	9,8
SGD8	60.387	223.617	35,9	63.585	317.086	45,7
SGO9	13.990	59.286	8,3	11.944	78.431	8,1
SGO10	20.319	83.354	12,1	18.263	106.279	13,4
SGO11	17.160	71.093	10,2	14.469	94.151	9,7
SGM12	15.244	64.964	9,1	19.586	108.108	12,3
SGM13	6.172	25.084	3,7	7.405	39.647	4,9
SGM14	7.713	40.508	4,6	9.143	62.805	5,9
Summe	300.022	1.191.253	178,4	264.321	1.545.718	188,4

Tabelle 8.10: Jahresfahrleistung bei zentraler Biogasanlage in Duisburg

Jahresfahrleistung der Biogasanlage Duisburg						
Stadt/	Sammelfahrzeug	Transportkosten	CO ₂ - Emissionen	WC- Fahrzeug	Transportkosten	CO ₂ - Emissionen
Sammelgebiet	[km/a]	[€/a]	[Mg/a]	[km/a]	[€/a]	[Mg/a]
SGD1	4.905	23.315	2,9	3.828	29.715	2,9
SGD2	7.509	38.553	4,5	7.236	54.049	5,3
SGD3	16.394	75.336	9,7	15.393	100.869	11,5
SGD4	11.884	50.893	7,1	11.767	69.585	8,4
SGD5	19.644	87.999	11,7	17.959	114.853	13,4
SGD6	18.712	86.168	11,1	24.724	140.486	17,3
SGD7	9.713	47.782	5,8	9.609	67.012	7,0
SGD8	40.139	162.031	23,9	54.740	269.017	39,1
SGO9	11.588	52.406	6,9	11.276	71.375	8,1
SGO10	14.209	64.564	8,4	14.937	90.642	11,0
SGO11	14.040	61.727	8,3	13.268	84.171	9,5
SGM12	21.164	82.113	12,6	23.189	116.585	16,5
SGM13	8.699	31.983	5,2	8.533	42.518	6,4
SGM14	12.679	55.736	7,5	10.534	68.976	8,2
Summe	211.278	920.606	125,6	226.994	1.319.852	164,8

Der CO₂-Ausstoß liegt wieder zwischen den Emissionen der Modelle, die nur einen Fahrzeugtyp einsetzen.

8.4 Vergleich der zentralen und dezentralen Biogasanlage

Für den ökologischen und ökonomischen Vergleich der zentralen und der dezentralen Anlagen werden nur die kostenoptimierten Transportmodelle herangezogen. Tabelle 8.11 fasst die wichtigsten Daten zusammen.

Tabelle 8.11: Vergleich der zentralen und dezentralen Biogasanlage

	dezentral			zentral	
	Duisburg	Oberhausen	Mülheim	Duisburg	Mülheim
Energieertrag[kWh/a]	24.055.200	7.646.400	5.923.440	37.625.040	37.625.040
Stromerzeugung[kWh/a]	7.216.560	2.293.920	1.777.032	11.287.512	11.287.512
Stromerlös[€/a]	684.143	217.477	168.476	1.070.096	1.070.096
Wärmeerzeugung[kWh/a]	12.749.256	4.052.592	3.139.423	19.941.271	19.941.271
Wärmeerlös[€/a]	130.672	41.536	32.177	204.398	204.398
Entsorgungskosten	4.953.344	2.191.794	1.704.400	8.849.538	8.849.538
Gesamtkosten[€/a]	613.627	188.222	150.207	723.127	723.127
Gewinn[€/a]	5.768.159	2.450.807	1.905.053	10.123.994	10.123.994
Fahrleistung[km/a]	97.761	30.451	11.396	93.778	98.378
CO2-Ausstoß[Mg/a]	98	35	17	104	139
Investitionskosten K [Mio. €]	3,50	1,10	0,90	5,40	5,40
Annuität A [€]	442.326	139.017	113.741	694.111	694.111
Instandhaltung + Wartung [€/a]	56.468	14.452	10.095	109.846	109.846
Vollwartung BHKW 1,2 ct/kWh [€/a]	86.599	27.527	21.324	135.450	135.450
Transportkosten [€/a]	679.435	231.240	130.556	920.606	1.191.253
Sonstige Kosten [€/a]	28.234	7.226	5.047	54.923	54.923
Gesamtkosten [€/a]	1.293.061	419.461	280.763	1.914.937	2.185.584
Gewinn (+)/Verlust (-)[€/a]	4.475.097	2.031.346	1.624.290	8.209.057	7.938.410

Bei der zentralen Anlage setzt sich der beobachtete Trend aus Unterkapitel 8.3 fort (Tabelle 8.11). Die Gesamtkosten pro kWh Energie steigen auf 1,92 ct noch über den Wert von Duisburg (1,84 ct). Die Produktion von Energie ist in der zentralen Anlage noch günstiger. Die Einnahme für Strom (11,29 ct) steigt allerdings über die von Duisburg (10,59 ct). Der Erlös pro kWh Wärme bleibt konstant.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit werden nicht nur heuristische Methoden für die Biogas Supply Chain vorgeschlagen, sondern auch unterschiedliche Biogas-Modelle miteinander verglichen, um die ökonomisch und ökologisch beste Alternative zu finden. Die Umweltverträglichkeit der Entsorgungsoption spielt eine besondere Rolle. Aus diesem Grund werden für die Biogasproduktion Abfälle aus Haushalt und Gewerbe, Speisereste sowie Klärschlamm als Rohstoffe betrachtet.

Mithilfe von Simulationen werden unterschiedliche Szenarien mit unterschiedlichen Fahrzeugtypen und Transportkonzepten modelliert. Untersucht werden die Städte Duisburg, hier die drei Ortsteile Duissern, Buchholz und Hochfeld, Oberhausen und Mülheim. Es werden knotenorientierte heuristische Methoden für die Gewerbeabfälle und Speisereste und kantenorientierte heuristische Methoden für die Bioabfälle aus dem Haushalt vorgeschlagen. Diese heuristischen Methoden bestehen aus zwei Phasen: Einem Eröffnungsverfahren, welches zulässige aber nicht unbedingt optimale Lösungen liefert, und einem Verbesserungsverfahren, mithilfe dessen auf iterative Weise versucht wird, die von der ersten Phase gelieferte Lösung zu verbessern. Das geschieht unter Einsatz von Verfahren wie dem Tabu Search und dem Simulated Annealing.

Die meisten Untersuchungen zeigen, dass innerhalb der Phase „Logistikbeschaffung“ wesentliche Kosten anfallen. Um die Klarheit und Transparenz der Darstellung zu gewährleisten, wurden mit den Entsorgungsunternehmen Gespräche geführt und Informationen über die aktuelle Situation der Wiederbeschaffung und Aufwertung von Bioabfall eingeholt. Mithilfe der GIS-Software wurde eine Datenbank aufgestellt. Dadurch konnten die genauen geografischen Informationen der Rohstoffquellen, ihre Koordinaten und die anfallenden Mengen ermittelt werden.

Die zu untersuchenden Sammelgebiete befinden sich in Duisburg, Oberhausen und Mülheim. Die Daten, die teilweise von der Stadt Duisburg zur Verfügung gestellt wurden, waren weder für umfassende Untersuchungen geeignet noch vollständig. Daher mussten diese erneut bearbeitet und ergänzt werden. Da die Überarbeitung sehr umfangreich war, wurden lediglich die Daten aus der Gewerbe- und Speiseresteabfallsammlung in den jeweiligen Städten in zwölf Sammelgebiete aufgeteilt. Die getrennte Sammlung in den drei Städten ist sehr umfangreich. Die Angaben über Abfallaufkommen sind daher teilweise eingeschränkt und die Daten aus den Haushalten wurden aus Sekundärdaten berechnet; es können also Abweichungen auftreten. Aufgrund des von der Gebietsstruktur abhängenden Bioabfallaufkommens, der rasanten technologischen Entwicklungen in der Biogasproduktion und der wechselnden Treibstoffpreise wurde mit möglichst aktueller Literatur gearbeitet.

In einer weiterführenden Analyse wird die Produktion und Distribution von Biogas und den entsprechenden Investitionskosten untersucht, die hinsichtlich der CO₂-Emissionen analysiert und bei Bedarf optimiert wird. Biologische Abfallstoffe, zu denen auch Klärschlamm zählt, dürfen zum Schutz des Bodens nicht mehr auf landwirtschaftlichen Ackerböden eingesetzt werden. Es ist daher erforderlich, neue Entsorgungsmöglichkeiten für diese Stoffe zu suchen. Durch veränderte Marktgegebenheiten, neue politische Vorgaben und infolge von technologischem Fortschritt ist es wichtig, für die Zukunft strategische Investitionen vorzunehmen. Eine ökologische und wirtschaftliche Entsorgung biogener Rohstoffe kann durch angemessene Simulationen, welche jegliche Komponenten von neuen Supply Chains, einschließlich neuer Technologien, einbeziehen und neue Verwertungswege durch neue Kooperationen betrachten, gefördert werden. Um eine potenzielle Ersparnis z. B. an CO₂-Emissionen darzustellen und eine erfolgreiche und aussagekräftige Simulation abzubilden, werden aus logistischer Sicht Ökobilanzen erstellt und ausführlich analysiert. Eine ökologische Verwertung der Abfälle ist nur dann gegeben, wenn die durch Verwendung von regenerativen Energien eingesparte CO₂-Emission höher ist als die durch die Logistik hervorgerufene CO₂-Emission.

Die getrennte Erfassung von biogenen Abfällen schneidet in der Wirkungskategorie Rohstoffverbrauch am besten ab. Die Einführung der getrennten Erfassung kann andere Wirkungskategorien negativ beeinflussen, durch die Vergärung jedoch können wiederum Wirkungskategorien verbessert werden. Zuerst können Schadstoffe vom biogenen Abfall getrennt und somit kann der Gärrest nach der Störstoffbeseitigung als Düngemittel verwendet werden. Um die Kostenuntersuchungen zu verallgemeinern, können zukünftig die Distributionsbereiche des Simulationstools weiterentwickelt werden. Aus ökologischer Sicht können Untersuchungen der gesamten Supply Chains durchgeführt und detaillierte Ökobilanzen aufgestellt werden. Dadurch würden alle Wirkungskategorien betrachtet und die Aussagekraft der Arbeit erhöht. Die Ökobilanz dient zudem dazu, ökologische Schwachstellen im gesamten System aufzudecken. Die Belastungen in den Wirkungskategorien zeigen den Anteil von Umweltauswirkungen der Biogas Supply Chain. Obwohl die Biogasproduktion und Verwertung von biogenen Abfällen vom Staat gefördert wird, wird das umweltfreundliche Potenzial der Stadt Duisburg nicht vollständig ausgenutzt.

Die Betrachtungen in Kapitel 8 zeigen, dass der Einsatz von Biogas und Klärschlamm wirtschaftlicher ist als die Verwertung von nachwachsenden Rohstoffen, da die Kosten für die Rohstoffe zu hoch liegen. Wegen des geringen Energiegehalts des Klärschlammes lohnt sich der Transport nicht über längere Entfernungen. Damit qualifiziert sich der Einsatz von Bioabfall. Eventuell müssen noch zusätzlichen Annahmen durch die Entsorgung von Abfall berücksichtigt werden. Der Wirkungsgrad und die Wirtschaftlichkeit der Anlage könnten durch die Verwertung von Bioabfällen aus der Industrie und durch den Einsatz von energiehaltigen Abfällen wesentlich gesteigert werden.

Beim Einsatz der drei dezentralen Biogasanlagen in Duisburg, Müllheim und Oberhausen im Vergleich mit der zentralen Biogasanlage in Duisburg wurde gezeigt, dass die Stromerzeugung mit dem teuersten Satz vergütet wird. Der entscheidende Unterschied zwischen den beiden Nutzungspfaden liegt jedoch in der tatsächlichen Nutzung der erzeugten Wärme. Im Regelfall wird bei dezentralen Biogasanlagen nur etwa 35 % der erzeugten Wärme genutzt. Die in zentralen Erdgas-BHKW erzeugte Wärme wird in der Regel zu 70 % genutzt. Auf den gesamten Nutzungspfad umgerechnet erreichen dezentrale Kraftwerke meist rund 45 % Nutzungsgrad, wohingegen bei zentralen BHKW meist etwa 55 % der ursprünglich im Biogas enthaltenen Energie genutzt wird. Der Vorteil zentraler Anlagen liegt darin, dass man sie in der Nähe von Wärmeabnehmern errichten kann. Dezentrale Biogasanlagen sind dann sinnvoll, wenn am Standort ein Großteil der Wärme genutzt werden kann, zum Beispiel in benachbarten Pflanzenbaubetrieben. Gibt es vor Ort keinen Abnehmer für die Wärme, weisen Projekte zur Aufbereitung und Einspeisung von Biogas die energetisch bessere Bilanz auf. Des Weiteren dienen kleine und mittlere Anlagen eher der lokalen, große Anlagen dagegen eher der überregionalen Energieversorgung.

Biogas ist als Kraftstoff sehr viel umweltfreundlicher als die fossilen Energieträger (Benzin und Diesel). Daher soll nun betrachtet werden, wie sich die Verwendung des Biogases als Kraftstoff für die Sammelfahrzeuge auf die ökologische und ökonomische Bilanz der zentralen Anlage auswirkt. Die Fahrzeuge verbrauchen im Mittel 50 l auf 100 km. Nach den Kraftstoffäquivalenten aus Kapitel 3.4, Tabelle 3.5, enthält 1 kg Biogas die gleiche Energiemenge wie 1,3 l Diesel. Unter der Annahme, dass ein Biogasmotor den gleichen Wirkungsgrad wie ein Dieselmotor besitzt, würden die Sammelfahrzeuge statt 50 l Diesel 38,5 kg Biogas auf 100 km verbrauchen. Dabei ist zu beachten, dass es sich in diesem Fall um veredeltes Biogas handelt. Beim Veredelungsprozess aus 10 m³ Rohbiogas entstehen 6 m³ Biogas in Erdgasqualität [114]. Aus den 6.270.840 m³ Rohbiogas (aus Tab.8.8) werden danach 3.762.504 m³ veredeltes Biogas. Da nach der Veredelung das Biogas den gleichen Methangehalt wie Erdgas besitzt, nähert sich auch die Dichte des veredelten Biogases der des Erdgases. Für die Jahresfahrleistung der Sammelfahrzeuge (aus Tab. 8.11) würden 62.979,5 l Diesel pro Jahr benötigt. Dies entspricht einer Menge von 48.446 kg veredeltem Biogas bzw. 80.743 kg Rohbiogas. Mit der Dichte von 0,7 kg/m³ ergibt sich daraus ein Volumen von 115.347 m³ Rohbiogas. Vom gesamten Biogasertrag aus der zentralen Biogasanlage würden dann noch 6.155.493 m³ übrig bleiben. Es werden also nur 1,6 % des erzeugten Biogases zur Deckung des Kraftstoffbedarfs aller Sammelfahrzeuge benötigt.

97,4 % des Biogases können weiterhin in dem Blockheizkraftwerk verstromt werden. Durch die geringere Menge Biogas, die für das BHKW zur Verfügung steht, ändern sich Einnahmen, Kosten und Gewinn der Anlage. Der Gewinn reduziert sich von 454.251 € auf 431.667 € pro Jahr. Der durchschnittliche Nutzwärmeverbrauch für Raumwärme und Warmwasser liegt zwischen 8 bis 9 MWh pro Einwohner pro Jahr. Das nicht veredelte Biogas (4.390.773 m³) könnte 776 bis 8.722 Haushalte versorgen.

10 Literaturverzeichnis

- [1] KrW-/AbfG § 4 Grundsätze der Kreislaufwirtschaft
- [2] Gethmann, C. F.; Streffer, C.; Heinloth, K.; Witt, A.; Rump, K. (2005): Ethische Probleme einer langfristigen globalen Energieversorgung, de Gruyter Verlag, Berlin / Germany
- [3] Leuthard, W. (2003): Wärme, Strom und Treibstoff aus organischen Abfällen. In: Umwelt Aargau, S. 19-22.
- [4] BMU (2006): Abfallwirtschaft in Deutschland, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- [5] H & K (2008): Potenzial zum Ausbau der getrennten Sammlung und Verwertung von Bioabfällen, http://www.kompost.de/fileadmin/docs/Archiv/Abfallwirtschaft/2_2007_119.pdf (Recherche: 06.08.2009, 12:30).
- [6] UBA (2007): Stoffstrommanagement von Biomasseabfällen mit dem Ziel der Optimierung der Verwertung organischer Abfälle, Umweltbundesamt.
- [7] Bidlingmaier, W. (2008): Manuskripte Biotechnologie in der Abfallwirtschaft, Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, Bauhaus-Universität Weimar 2008.
- [8] Bousonville, T. (2001): Tourenplanung für die Siedlungsabfallentsorgung mit einem hybriden evolutionären Ansatz, Universität Bremen.
- [9] BMU (2000): Nationales Klimaschutzprogramm. Beschluss der Bundesregierung vom 18. Oktober 2000. Fünfter Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe „CO₂ – Reduktion“. In: Umwelt, Sonderteil Nationales Klimaschutzprogramm, Berlin, 11, 2000, S. 16.
- [10] TASI (1993): Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (TA Siedlungsabfall, TASI). Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, vom 14.Mai 1993. Bundesanzeiger, S. 4967ff.
- [11] Dieter, M.; Englert, H.; und Klein, M. (2001): Abschätzung des Rohholzpotenzials für die energetische Nutzung in der Bundesrepublik Deutschland. Arbeitsbericht 2001/11 des Instituts für Ökonomie der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH), Hamburg, S 40.
- [12] Toonen, W. (2001): Klärschlamm Entsorgung in den Niederlanden, Manuskript. In: BEW (Hrsg.), Kongress „Klärschlamm Entsorgung in Europa“ am 19./30.08.01 in Köln, Kongressunterlagen.
- [13] Maschinen- und Betriebshilfsring Merseburgerland e.V.: Vorstellung der verschiedenen Biokraftstoffe: http://www.mr-merseburgerland.de/biofuel/Biokraftstoff_Intro.pdf (Recherche: 23.07.2009, 15:00).
- [14] BMU (2000): Umweltdaten Deutschland KOMAG Berlin-Brandenburg, S 57.
- [15] Traube, K. (2000): Nutzung erneuerbare Energien durch die Elektrizitätswirtschaft, Stand 1999, in: Elektrizitätswirtschaft, Jg. 99, H. 24, S. 10-24.
- [16] Geitmann, S. (2005): Erneuerbare Energien und alternative Kraftstoffe : Mit neuer Energie in die Zukunft, 2. Auflage, Hydrogeit Verlag, Himmelkron.
- [17] Eichelbrönner, M. (2000): Erneuerbare Energien in der Stromversorgung: Errichtung, Anlagenbetrieb und Kosten auf Basis einer empirischen Situationsanalyse Berlin.

-
- [18] Buchholz, P.; Kemper, P. (2002): Efficient Computation and Representation of Large Reachability Sets for Composed Automata. In: Journal of Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications, Kluwer Academic Publishers, USA, S. 265-286.
- [19] Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) (2009): Endenergiebereitstellung 2008: http://www.nachwachsenderohstoffe.de/fileadmin/fnr/images/daten-und-fakten/2009/Abb06_2009_cmyk_300dpi.zip (Recherche: 23.08.2009, 9:00).
- [20] VDI-Richtlinie 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Blatt 1 bis 8, 11, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [21] Arns, M.; Bause, F.; Kemper, P. u. a. (2000): Gestaltung von Beschaffungsnetzwerken auf Basis einer prozesskettenorientierten Modellierung. In: Industrie Management 16 (2000) 3, Dortmund S. 33-36.
- [22] Hellmann, A.; Jessen, U. (2003): Optimization of Logistic Systems through Simulation – Simulation Based Value-added-services – Analysis and Evaluation of „Predictive Alteration, Planning“. In: Proceedings of the Summer Simulation Multiconference (SCSC'03). Montreal, Canada, SCS Verlag, 20.-25. Juli, S. 484-489.
- [23] Kuhn, A.; Laakmann, F. (2001): Beherrschung großer Logistiknetze - Fragestellungen und Lösungskonzepte. In: Industrie Management, Schwerpunktausgabe Unternehmensnetzwerke, Berlin, S. 37-40.
- [24] Sennheiser, A.; Schnetzler, M. (2008): Wertorientiertes Supply Chain Management: Strategien zur Mehrung und Messung des Unternehmenswertes durch SCM, Springer Verlag, Schweiz.
- [25] Westhaus, M. (2007): Supply Chain Controlling: Definition, Forschungsstand, Konzeption, DVI Verlag, Universität Kassel.
- [26] Werner, H. (2008): Supply Chain Management: Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling, Springer Verlag, München.
- [27] Vahrenkamp, R. (2005): Logistik: Management und Strategien, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München.
- [28] Dyckhoff, H.; Lackes, R.; Reese, J. (2004): Supply Chain Management and Reverse Logistics, Springer Verlag, Berlin
- [29] Leible, L.; Arlt, A.; Fürniß, B. u. a. (2003): Bereitstellung und energetische Nutzung organischer Rest- und Abfallstoffe sowie Nebenprodukte als Einkommensalternative für die Land- und Forstwirtschaft - Möglichkeiten, Chancen und Ziele, Tagungsbericht, Hamburg.
- [30] Noche, B.; Al Mansi, A.; Karakaya, A. u. a. (2009): Vergleich von Prozessketten zur Herstellung von Biogas aus biogenen Abfällen am Beispiel der Gegebenheiten einer Kommune, Magdeburger Logistiktagung, Magdeburg.
- [31] Arlt, A. (2003): Systemanalytischer Vergleich zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen aus biogenen Abfällen, am Beispiel von kommunalem Klärschlamm, Bioabfall und Grünabfall, Karlsruhe.
- [32] Martin, H. (2008): Transport- und Lagerlogistik: Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- [33] Weber, M. (2008): Abfalltausch: Reduzierung von Siedlungsabfalltransporten mit Lkw unter ökologischen und ökonomischen Aspekten, kassel university press GmbH, Kassel.
- [34] Rinschede, A.; Wehking, K.-H. ; Jünemann, R. (1995): Entsorgungslogistik III – Kreislaufwirtschaft“, E.” Schmidt Verlag, Düsseldorf.

-
- [35] Biogasanlagen in NRW www.landwirtschaftskammer.de/fachangebot/technik/biogas/pdf/karte-biogasanlagen.pdf (Recherche: 12.06.2009, 11:00).
- [36] FNR (2008): Biogas Basisdaten Deutschland, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow.
- [37] Gesellschaft für Biogas und Umwelttechnik mbH (BMU) (2002): Biogasanlage zur Verwertung von Speiseresten, GBU mgH, Bensheim.
- [38] VDI (2001): Biogas als regenerative Energie - Stand und Perspektiven, Tagung Hannover, 19. und 20. Juni 2001, VDI Verlag GmbH.
- [39] Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.(2006): Vermarktungswege von Kompost in Deutschland, <http://www.bgkev.de/news/news.htm>. (Recherche: 07.09.2009, 14:00).
- [40] Entsorgungsgemeinschaft der Deutschen Entsorgungswirtschaft e.V. (2005): Brennstoffgewinnung aus Kompostrohstoffen?, Aachen.
- [41] Fischer, P.; Schmitz, H.-J.; Jauch, M. (1997): Verwertung fester Rückstände aus der Vergärung von Bioabfällen, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben des Instituts für Bodenkunde und Pflanzenernährung, Staatliche Versuchsanstalt für Gartenbau der FH Weihenstephan.
- [42] Weiland, P.(2001): Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und -erzeugung in Deutschland. In: Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Weimar.
- [43] Dichtel N. (2005): Abfallstoffe und Ressourcenschutz- mit besonderer Betrachtung der Ressource Phosphor. In: Frick, K. et al. (Hg): Von der Entsorgungswirtschaft zur Ressourcenwirtschaft, Braunschweig, S. 457.
- [44] Statistisches Bundesamt (2005a),: Milchkühe nach Stallhaltungsverfahren und Bestandsgrößenklassen. Repräsentative Erhebung vom November 2004, Reihe 91, Wiesbaden.
- [45] Raussen,K. (2005) Chancen für die Verwertung biogener Abfälle nach EEG und TEHG, in: Müll und Abfall 2/2005, S. 66- 72
- [46] Ministerium für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg,Abfallbilanz 2003, Stuttgart 2004
- [47] Leible, L.; Arlt, A.; Seifert, H. u.a. (2002): Stand und Perspektiven in Deutschland, Tagungsbericht, Hamburg.
- [48] Knappe, F. u. a.(2007): Stoffstrommanagement von Biomasseabfällen mit dem Ziel der Optimierung der Verwertung organischer Abfälle, Öko-Institut für angewandte Ökologie, Darmstadt.
- [49] Vogt, R. u. a. (2002): Ökobilanz Bioabfallverwertung. Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit von Systemen zur Verwertung von biologisch-organischen Abfällen, DBU- Schriftenreihe Initiativen zum Umweltschutz, Bd. 52, Berlin.
- [50] Stadt Duisburg (2008): Einwohnerstatistik.
- [51] Wikipedia Erdgasfahrzeug <http://de.wikipedia.org/wiki/Erdgasfahrzeug> (Recherche: 11.06.2009, 18:00).
- [52] Amtsblatt der Europäischen Union. Stellungnahme des Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschusses zu dem Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Förderung sauberer Straßenfahrzeuge, 18.8.2006.

-
- [53] Energie-Umweltbetriebe Bozen AG (SEAB) (2004): Umweltbericht, SEAB Energie-Umweltbetriebe Bozen AG, Fotolito Varesco, Auer.
- [54] UFO-Plan-Vorhaben, FZK 206 31 303 des Umweltbundesamtes (2007): Potentialanalyse der deutschen Entsorgungswirtschaft, Heidelberg.
- [55] Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V.(2009): Dieselpreis-Information.
- [56] swissinf.ch: Grünes Benzin wird steuerlich begünstigt, <http://www.swissinfo.org/ger>. (Recherche: 19.09.2009, 15:00)
- [57] www.schlau-fahren.ch :Glossar <http://www.schlau-fahren.ch/Glossar.155.0.html> (Recherche: 13.08.2009, 9:00).
- [58] Silvan, E. (2008) "Strategien der Hersteller von Entsorgungsfahrzeugen zur Verringerung derLärm- und NO2-Emissionen" Berlin.
- [59] Informationsdrehscheibe Erdgasfahrzeuge Berlin e.V. 2005: Erdgasbusse im ÖPNV sind wirtschaftlich.
- [60] Daimler AG 080911 econic kompetenzhb RZ D.pdf www.mercedes-benz.de/econice. (Recherche: 07.09.2009, 09:00)
- [61] Bundesumweltsamt (1998): Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm), Dessau-Roßlau.
- [62] Zumkeller, M. A. (2005): Kosteneffiziente Kreislaufführung von Kunststoffen, DUV, Wiesbaden.
- [63] Arnold, D. (2004): Handbuch Logistik, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- [64] Ministerium für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg (2003): Abfallbilanz, Stuttgart, 2004.
- [65] Drexl, A. (1990): Logistik Standorte, München.
- [66] Cord-Landwehr, K. (2002): Einführung in die Abfallwirtschaft: Mit zahlreichen Beispielen, Springer Verlag, Stuttgart.
- [67] VDI (2005): VDI Norm Organisatorische Grundfunktionen im Lager, VDI Verlag, Düsseldorf
- [68] Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A. u. a. (2008): Handbuch Logistik, Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- [69] Würz, W. (1999): Software für Tourenplanung und Behälterverwaltung, Müll-Handbuch, V.06.99, Berlin.
- [70] Schmidt, S. (2006): Ökobilanz Bioabfallentsorgung, Ibidem Verlag, Osnabrück.
- [71] Sterr, T.; Liesegang, D. G. (2003): Industrielle Stoffkreislaufwirtschaft im regionalen Kontext, Springer Verlag, Berlin.
- [72] Pepels, W. (2001): Einführung in das Distributionsmanagement, 2. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München.
- [73] Domschke, W. (1982): Logistik – Rundreisen und Touren, Band 2, (Oldenbourg, München)
- [74] Statistisches Bundesamt, Fachserie 19, Reihe 1, 2003 (Umrechnung für NRW anhand Einwohnerzahlen).
- [75] Siedlungsabfallbilanzen Bund und NRW 2003, Verfasser oder Herausgeber, Düsseldorf

-
- [76] Bidlingmaier, W. (2008): Manuskripte Biotechnologie in der Abfallwirtschaft, Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, Bauhaus-Universität Weimar 2008.
- [77] AIDA - Informationsplattform Abfall in NRW, <http://www.abfall-nrw.de/aida/> (Recherche: 04.09.2009, 13:00)
- [78] Grundinformationen – Kläranlagen, [http://members.aon.at/heideco/pics/grund info.pdf](http://members.aon.at/heideco/pics/grund%20info.pdf) (Recherche: 14:07:2009, 12:40).
- [79] Kern, M. (2006): Ausweitung der Bioabfallererfassung als Maßnahme zur Lösung von Kapazitätsengpässen bei der Restabfallbehandlung, Witzenhausen.
- [80] Liu, S.C.; Lin, C.C. (2005): A heuristic method for the combined location routing and inventory problem, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, V.26, Nr.4, S.
- [81] Liu, S. C.; Lee, S. B. (2003): A two-phase heuristic method for the multi-depot location routing problem taking inventory control decisions into consideration, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, V.22, Nr.11-12, S. 941-950
- [82] Noche, B.; Al Mansi, A.; Rhoma, F. (2008): Design of an Environmental Supply Chain Network: A Biosolids Waste Case Study "Hamburg International Conference of Logistics" Hamburg/ Germany, September 4-5
- [83] Noche, B.; Rhoma, F.; Al Mansi, A. (2008): Biogas Logistics Supply Chain Network Design: A Framework Model, "Hamburg International Conference of Logistics" Hamburg/ Germany, September 4-5
- [84] Feige, D.; Klaus P. (2008): Modellbasierte Entscheidungsunterstützung in der Logistik, DVV Media Group I, Deutscher Verkehrs-Verlag
- [85] Feige EUS/ SS 2004 : Entscheidungsunterstützungssysteme. IV. Modelle und Verfahren zur Unterstützung der Gestaltung logistischer Netze
- [86] Zimmermann H. (2008): Operations Research: Methoden und Modelle: Für Wirtschaftsingenieure, Betriebswirte und Informatiker, Vieweg Verlag
- [87] Domschke, W; Drexl A. (2006): Einführung in Operations Research, Springer Verlag
- [88] Hillier, F.; Lieberman, G. (1997) Operations Research, Einführung, München.
- [89] Pietruszka, W.-D. (2005): MATLAB in der Ingenieurpraxis—Modellbildung, Berechnung und Simulation. B.G.Teubner, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden.
- [90] Kose, A. (2001): Standortplanung in distributiven Systemen-Modelle, Methoden, Anwendungen. Physica-Verlag, Heidelberg.
- [91] Reith-Ahlemeier, G. (2002): Ressourcenorientierte Bestellmengenplanung und Lieferantenauswahl: Modelle und Algorithmen für Supply Chain Optimierung und E-Commerce, BOD Verlag, Leichlingen.
- [92] Zäpfel, G.; Braune, R. (2005): Moderne Heuristiken der Produktionsplanung: am Beispiel der Maschinenbelegung, Vahlen Verlag, München.
- [93] Mayer, G. (2001): Strategische Logistikplanung von Hub-&-Spoke-Systemen, DUV-Verlag, Wiesbaden.
- [94] Gendreau, M.; Laporte, G. (1995): Arc routing Problems II: The rural postman problem in Operations Research, 1995, 43(3): S. 399-414
- [95] Lutz-Westphal, B. (2007): Mathematik für die Müllabfuhr: Das Chinesische Postbotenproblem
- [96] Herzt, A., Laporte, G. and Mittaz, M. (2000): A Tabu Search Heuristic for The Capacitated Arc Routing Problem. Operations Research. 48(A), USA.

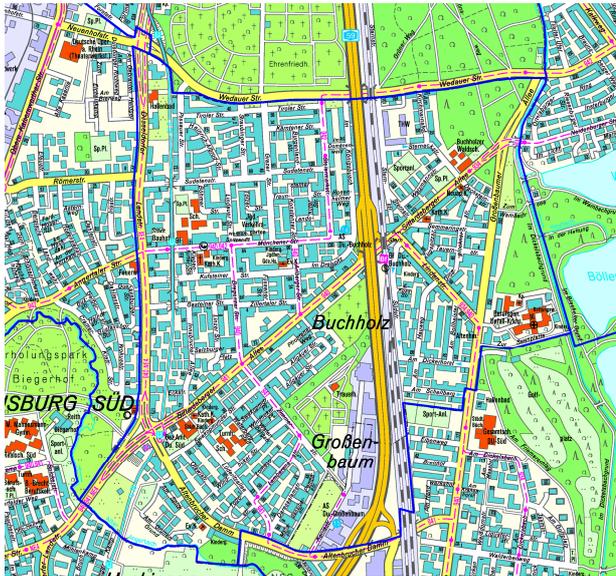
-
- [97] Gertec GmbH (2008): Potentialanalyse regenerativer Energiequellen in Duisburg, Endbericht März 2008.
- [98] Stadt Duisburg (2008): Abfallwirtschaftskonzept der Stadt Duisburg.
- [99] Gallenkemper, Bernhard: Vergleichende Untersuchung zur Müllabfuhr beim Einsatz verschiedener Behältersysteme unter besonderer Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten. Hannover, 1997.
- [100] http://www.gartenakademie.info/pdf/Leitfaden_Kompostierung_FGW.pdf
(Recherche: 25.06.2009, 13:30).
- [101] Amt für Wasser- und Kreislaufwirtschaft Duisburg: Abfallreport 2007. Dezernat für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz.
- [102] SIS aktuell: Abfallwirtschaft in Mülheim an der Ruhr Statistisches Informationssystem, Kurzinfo August 2003.
- [103] Amt für Wasser- und Kreislaufwirtschaft Duisburg: Abfallreport 2005. Dezernat für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz.
- [104] Domschke, W. (2007): Logistik: Transport, Grundlagen, lineare Transport- und Umladeprobleme; Oldenbourg Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Band 1, Oldenbourg Verlag, München.
- [105] DIN 30781 (1989): Transportkette – Grundbegriffe, Deutsche Institut für Normung
- [106] BMU Übersicht über die EEG-Vergütungsregeln für 2009 gemäß Bundestagsbeschluss zum EEG Vergütung ct/kWh, BMU, 2009.
- [107] Goethe-Institut: Energie für die Zukunft.
www.goethe.de/umw/doc/ene/bio/de1593254.ht (Recherche: 08.08.2009, 16:00).
- [108] www.windjournal.de/bioenergie, (Recherche: 09.12.2009, 18:00).
- [109] Dederer, Dr. M. (2006): LSZ Forchheim, Biogas aktuell in Baden-Württemberg Schwerpunktthema Bioenergie Landinfo 2/2006.
- [110] Möller, D.; Anspach, V. (2008): Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen im ökologischen Landbau, Universität Kassel.
- [111] Neue Impulse für Biogas, www.consentis.de/Bilder/pdf/Impulse-Biogas.pdf
(Recherche: 25.09.2009, 17:30).
- [112] EUtech Energie & Management GmbH: kfw-Investitionsmehrkostenrechner Bioenergieanlagen-Berechnungsbeispiel 1, www.Investitionsmehrkosten.de/download/Beispiel_1_Bioenergie.pdf, (Recherche: 24.09.2009, 8:30).
- [113] BASE Technologies Kenndaten zu drei typischen Anlagengrößen, www.ee.hm.edu/studierende/Me/se/biogas_2pdf (Recherche: 30.08.2009, 8:00).
- [114] Chemiereport at Biogas im Erdgasnetz: Die Qualität stimmt, 19. Mai 2006 <http://alsa.at/chemiereport/stories/3523> (Recherche: 11.06.2009, 17:00).

11. Anhang

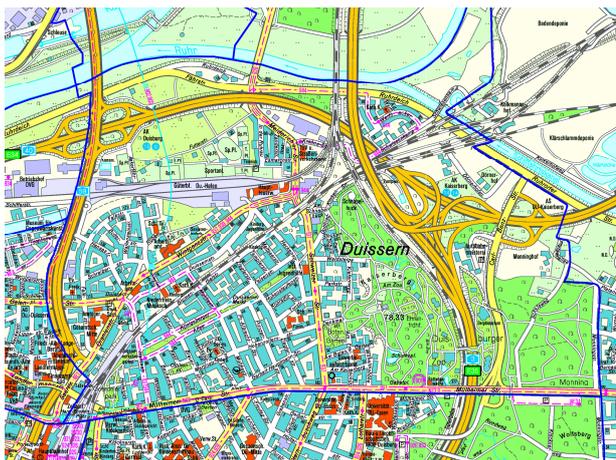
Einwohnerzahl nach Ortsteilen und Stadtbezirken am 31.12.2008 (Einwohnerstatistik der Stadt Duisburg)

	Ortsteil/ Stadtbezirk	insgesamt	männlich	weiblich
101	Vierlinden	12810	6129	6681
102	Overbruch	5206	2517	2689
103	Alt-Walsum	4375	2159	2216
104	Aldenrade	14148	6720	7428
105	Wehofen	7276	3547	3729
106	Fahrn	7591	3740	3851
100	WALSUM	51406	24812	26594
201	Röttgersbach	12051	5672	6379
202	Marxloh	17494	9016	8478
203	Obermarxloh	13514	6554	6960
204	Neumühl	17181	8170	9011
205	Alt-Hamborn	11089	5338	5751
200	HAMBORN	71329	34750	36579
301	Bruckhausen	5958	3180	2778
302	Beeck	11123	5491	5632
303	Beeckerwerth	3744	1835	1909
304	Laar	6262	3153	3109
305	Untermeiderich	10365	5176	5189
306	Mittelveiderich	17749	8491	9258
307	Obermeiderich	18052	8776	9276
300	MEIDERICH-BEECK	73253	36102	37151
401	Ruhrort	5279	2760	2519
402	Alt-Homberg	15098	7296	7802
403	Hochheide	15287	7583	7704
404	Baerl	5007	2441	2566
400	HOMBERG-RUHRORT-BAERL	40671	20080	20591
501	Altstadt	7704	3793	3911
502	Neuenkamp	5149	2526	2623
503	Kaßlerfeld	3483	1803	1680
504	Duisern	14428	6879	7549
505	Neudorf-Nord	13616	6607	7009
506	Neudorf-Süd	12962	6277	6685
507	Dellviertel	13990	6892	7098
508	Hochfeld	15788	8243	7545
509	Wanheimerort	18409	8783	9626
500	MITTE	105529	51803	53726
601	Rheinhausen-Mitte	8557	3923	4634
602	Hochemmerich	17394	8663	8731
603	Bergheim	21192	10217	10975
604	Friemersheim	12873	6601	6272
605	Rumeln-Kaldenhausen	17579	8358	9221
600	RHEINHAUSEN	77595	37762	39833
701	Bissingheim	3270	1555	1715
702	Wedau	5249	2523	2726
703	Buchholz	14243	6700	7543
704	Wanheim-Angerhause	11934	5746	6188
705	Großenbaum	10072	4708	5364
706	Rahm	5957	2861	3096
707	Huckingen	9451	4540	4911
708	Hüttenheim	3642	1878	1764
709	Ungelsheim	3116	1462	1654
710	Mündelheim	6153	3012	3141

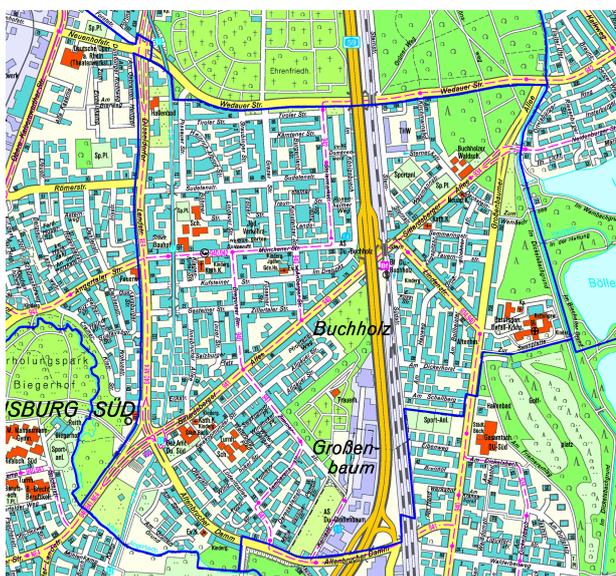
Ortsteil Buchholz



Ortsteil Duissem



Ortsteil Hochfeld



Gewerbliche Standorte in Duisburg

Nr.	X	Y	Menge [kg]	Ort	Straße	Tätigkeit
1	2553640	5700028	88	Duisburg	Königstr.	Bäckerei
2	2552839	5700278	91	Duisburg	Münzstr.	Bäckerei
3	2555060	5698385	77	Duisburg	Mozartstr.	Bäckerei
4	2553571	5703911	97	Duisburg	Von-der-Mark-Str.	Bäckerei
5	2552839	5700278	88	Duisburg	Münzstr.	Bäckerei
6	2551040	5704989	93	Duisburg	Friedrich-Ebert-Str.	Bäckerei
7	2554463	5698986	73	Duisburg	Neudorfer Str.	Bäckerei
8	2552449	5710526	95	Duisburg	Sonnenstr.	Bäckerei
9	2553855	5699822	77	Duisburg	Mercatorstr.	Bäckerei
10	2552221	5708189	77	Duisburg	Weseler Str.	Bäckerei
11	2551522	5706356	85	Duisburg	Reinerstr.	Bäckerei
12	2550839	5699992	70	Duisburg	Essenberger Str.	Bäckerei
13	2551088	5702474	86	Duisburg	Harmoniestr.	Bäckerei
14	2553022	5699994	91	Duisburg	Sonnenwall	Bäckerei
15	2553786	5693283	71	Duisburg	Keniastr.	Bäckerei
:	...	...	...	...	...	Bäckerei
246	...	...	...	...	...	Bäckerei
247	2554180	5706471	151	Duisburg	Alleestr.	Pizza
248	2555357	5698427	158	Duisburg	Lotharstr.	Pizza
249	2550429	5697130	172	Duisburg	Barbarastr.	Pizza
250	2552846	5708019	143	Duisburg	Kaiser-Friedrich-Str.	Pizza
251	2553492	5708352	153	Duisburg	Kaiser-Friedrich-Str.	Pizza
252	2552743	5696687	170	Duisburg	Fischerstr.	Pizza
253	2552275	5708125	168	Duisburg	Weseler Str.	Pizza
254	2550436	5692724	155	Duisburg	An der Steinkaul	Pizza
255	2552140	5708352	176	Duisburg	Warbruckstr.	Pizza
256	2553084	5696642	146	Duisburg	Fischerstr.	Pizza
:	...	...	...	...	...	Pizza
269	...	...	...	...	...	Pizza
270	2550900	5705028	64	Duisburg	Weststr.	Lebensmittel
271	2549303	5698553	79	Duisburg	Asterlager Str.	Lebensmittel
272	2552101	5708521	91	Duisburg	Katharinenstr.	Lebensmittel
273	2553682	5706094	74	Duisburg	Kolpingstr.	Lebensmittel
274	2552759	5700255	77	Duisburg	Peterstal	Lebensmittel
275	2554869	5700783	61	Duisburg	Blumenthalstr.	Lebensmittel
276	2552910	5700006	82	Duisburg	Steinsche Gasse	Lebensmittel
277	2553433	5699886	60	Duisburg	Friedrich-Wilhelm-Str.	Lebensmittel
278	2552151	5702841	74	Duisburg	Im Freihafen	Lebensmittel
279	2556113	5708468	84	Duisburg	Kaiser-Friedrich-Str.	Lebensmittel
280	2552575	5700939	97	Duisburg	Auf der Höhe	Lebensmittel
281	2556584	5704509	90	Duisburg	Niebuhrstr.	Lebensmittel
282	2552818	5699899	64	Duisburg	Sonnenwall	Lebensmittel
283	2554342	5707412	77	Duisburg	Goetheplatz	Lebensmittel
284	2553716	5706661	70	Duisburg	Schreckerstr.	Lebensmittel
:	...	...	...	...	...	Lebensmittel
1184	...	...	...	...	...	Lebensmittel

Nr.	X	Y	Menge [kg]	Ort	Straße	Tätigkeit
1185	2554438	5707168	163	Duisburg	Freiligrathstr.	Speisewirtschaft
1186	2546429	5704982	198	Duisburg	Grafschafter Str.	Speisewirtschaft
1187	2551313	5702206	172	Duisburg	Hafenstr.	Speisewirtschaft
1188	2553460	5700054	176	Duisburg	Claubergstr.	Speisewirtschaft
1189	2553698	5700939	198	Duisburg	Philosophenweg	Speisewirtschaft
1190	2553828	5700141	186	Duisburg	Landfermannstr.	Speisewirtschaft
1191	2550086	5711867	189	Duisburg	Franz-Lenze-Platz	Speisewirtschaft
1192	2553616	5700077	181	Duisburg	Königstr.	Speisewirtschaft
1193	2556139	5704457	171	Duisburg	Gartroper Str.	Speisewirtschaft
1194	2553025	5710981	178	Duisburg	Unter Den Ulmen	Speisewirtschaft
1195	2551106	5705231	176	Duisburg	Karl-Albert-Str.	Speisewirtschaft
1196	2549182	5702087	173	Duisburg	Friedenstr.	Speisewirtschaft
1197	2552906	5700204	178	Duisburg	Beekstr.	Speisewirtschaft
1198	2549691	5697964	185	Duisburg	Friedrich-Alfred-Str.	Speisewirtschaft
1199	2549628	5697998	187	Duisburg	Friedrich-Alfred-Str.	Speisewirtschaft
:	...	...	...	...	...	Speisewirtschaft
1883	...	...	...	...	...	Speisewirtschaft
1884	2547711	5694152	168	Duisburg	Martinistr.	Imbiss
1885	2552495	5698401	158	Duisburg	Wanheimer Str.	Imbiss
1886	2555224	5700131	147	Duisburg	Mülheimer Str.	Imbiss
1887	2551058	5709604	144	Duisburg	Römerstr.	Imbiss
1888	2554234	5704125	165	Duisburg	Augustastr.	Imbiss
1889	2552810	5696573	176	Duisburg	Erlenstr.	Imbiss
1890	2552449	5698238	151	Duisburg	Wanheimer Str.	Imbiss
1891	2551959	5694259	147	Duisburg	Molbergstr.	Imbiss
1892	2551723	5694940	168	Duisburg	Wanheimer Str.	Imbiss
1893	2555788	5707157	144	Duisburg	Lehrerstr.	Imbiss
1894	2550854	5703895	172	Duisburg	Thomasstr.	Imbiss
1895	2552867	5696488	162	Duisburg	Gärtnerstr.	Imbiss
1896	2552456	5698285	172	Duisburg	Wanheimer Str.	Imbiss
1897	2554039	5703953	159	Duisburg	Von-der-Mark-Str.	Imbiss
1898	2554850	5707601	158	Duisburg	Halfmannstr.	Imbiss
:	...	...	...	...	...	Imbiss
2376	...	...	...	...	...	Imbiss
2377	2552413	5698304	63	Duisburg	Tersteegenstr.	Obst und Gemüse
2378	2552347	5699195	61	Duisburg	Immendal	Obst und Gemüse
2379	2554664	5706448	97	Duisburg	Bernhardstr.	Obst und Gemüse
2380	2554636	5699491	98	Duisburg	Bismarckstr.	Obst und Gemüse
2381	2555576	5695794	70	Duisburg	Rüsternstr.	Obst und Gemüse
2382	2554199	5700385	73	Duisburg	Oranienstr.	Obst und Gemüse
2383	2551448	5705416	81	Duisburg	Am Beeckbach	Obst und Gemüse
2384	2550806	5711590	75	Duisburg	Oswaldstr.	Obst und Gemüse
2385	2555561	5704309	100	Duisburg	Bügelstr.	Obst und Gemüse
2386	2554803	5704771	95	Duisburg	Brückelstr.	Obst und Gemüse
2387	2554704	5691067	65	Duisburg	Am Rahmer Bach	Obst und Gemüse
2388	2554321	5699454	92	Duisburg	Blumenstr.	Obst und Gemüse
2389	2552284	5698658	95	Duisburg	Eigenstr.	Obst und Gemüse
2390	2553559	5707427	88	Duisburg	August-Thyssen-Str.	Obst und Gemüse
2391	2550869	5703830	73	Duisburg	Werthstr.	Obst und Gemüse
:	...	...	...	...	...	Obst und Gemüse
2638	...	...	...	...	...	Obst und Gemüse

Gewerbliche Standorte in Oberhausen

Nr.	X	Y	Menge [kg]	Ort	Straße	Tätigkeit
1	2560504	5709867	87	Oberhausen	Hasenstraße	Bäckerei
2	2557775	5703490	85	Oberhausen	Bebelstraße	Bäckerei
3	2556579	5712464	82	Oberhausen	Dudelerstraße	Bäckerei
4	2558902	5713212	81	Oberhausen	Höhenweg	Bäckerei
5	2561274	5709820	82	Oberhausen	Teutoburger Straße	Bäckerei
6	2556479	5712561	90	Oberhausen	Dudelerstraße	Bäckerei
7	2559728	5705845	76	Oberhausen	Mülheimer Straße	Bäckerei
8	2557766	5703639	85	Oberhausen	Flockenfeld	Bäckerei
9	2559092	5709602	84	Oberhausen	Bahnhofstraße	Bäckerei
10	2561092	5707948	96	Oberhausen	Greenstraße	Bäckerei
11	2558225	5711245	79	Oberhausen	Luchsstraße	Bäckerei
12	2559029	5709630	86	Oberhausen	Bahnhofstraße	Bäckerei
13	2559092	5704323	74	Oberhausen	Marktstraße	Bäckerei
14	2559776	5709407	99	Oberhausen	Teutoburger Straße	Bäckerei
⋮
82	...	...	...	...	...	...
83	2558051	5713760	94	Oberhausen	Im Steinhaidchen	Obst und Gemüse
84	2554576	5710519	76	Oberhausen	Bahnstraße	Obst und Gemüse
85	2559542	5703862	85	Oberhausen	Grenzstraße	Obst und Gemüse
86	2557122	5714174	99	Oberhausen	Zum Ravenhorst	Obst und Gemüse
87	2559867	5711069	87	Oberhausen	Sperberstraße	Obst und Gemüse
88	2559875	5704061	89	Oberhausen	Mülheimer Straße	Obst und Gemüse
89	2559775	5710846	83	Oberhausen	Beethovenstraße	Obst und Gemüse
90	2560521	5711038	97	Oberhausen	Wasgenwaldstraße	Obst und Gemüse
91	2560439	5705338	68	Oberhausen	Körnerstraße	Obst und Gemüse
92	2557699	5703820	64	Oberhausen	Franzenkamp	Obst und Gemüse
93	2557080	5707578	95	Oberhausen	Bachstraße	Obst und Gemüse
94	2556783	5712755	75	Oberhausen	Kiesweg	Obst und Gemüse
95	2560340	5704408	72	Oberhausen	Johann-Schäfer-Straße	Obst und Gemüse
96	2559463	5709644	63	Oberhausen	Bronkhorststraße	Obst und Gemüse
⋮
183	...	...	...	...	...	...
184	2558613	5710348	224	Oberhausen	Inselstraße	Hotel
185	2558440	5709240	197	Oberhausen	Bahnhofstraße	Hotel
186	2559375	5704142	195	Oberhausen	Nohlstraße	Hotel
187	2559691	5704933	222	Oberhausen	Freiherr-vom-Stein-Straße	Hotel
188	2559400	5704275	180	Oberhausen	Nohlstraße	Hotel
189	2558928	5704113	200	Oberhausen	Hermann-Albertz-Straße	Hotel
190	2558506	5705847	209	Oberhausen	Zum Eisenhammer	Hotel
191	2560842	5706848	162	Oberhausen	Promenade	Imbiss
192	2560518	5705027	147	Oberhausen	Falkensteinstraße	Imbiss
193	2557674	5708012	177	Oberhausen	Friesenstraße	Imbiss
194	2558710	5705619	176	Oberhausen	Duisburger Straße	Imbiss
195	2559617	5711747	152	Oberhausen	Kirchhellener Straße	Imbiss
196	2561406	5707896	148	Oberhausen	Vikariestraße	Imbiss
197	2557723	5713682	155	Oberhausen	Im Quellgrund	Imbiss
198	2557723	5713682	150	Oberhausen	Teutoburger Straße	Imbiss
199	2560306	5705462	142	Oberhausen	Liebknechtstraße	Imbiss
200	2557578	5710930	145	Oberhausen	Weseler Straße	Imbiss
201	2558050	5710728	178	Oberhausen	Weseler Straße	Imbiss
202	2560469	5704762	140	Oberhausen	Straßburger Straße	Imbiss
⋮
466	...	...	...	...	...	...

Nr.	X	Y	Menge [kg]	Ort	Straße	Tätigkeit
467	2559182	5703535	318	Oberhausen	Josefstraße	Krankenhaus
468	2559999	5704907	304	Oberhausen	Virchowstr	Krankenhaus
469	2559788	5705270	299	Oberhausen	Mülheimer Str	Krankenhaus
470	2561518	5708045	304	Oberhausen	Nürnberger Str.	Krankenhaus
471	2559152	5710442	67	Oberhausen	Flensburger Straße	Lebensmittel
472	2557255	5705197	67	Oberhausen	Weilerstraße	Lebensmittel
473	2560075	5709497	86	Oberhausen	Teutoburger Straße	Lebensmittel
474	2557754	5705734	83	Oberhausen	Wilmsstraße	Lebensmittel
475	2560601	5703592	87	Oberhausen	Rolanddamm	Lebensmittel
476	2560075	5709497	77	Oberhausen	Teutoburger Straße	Lebensmittel
477	2559607	5709056	88	Oberhausen	Vestische Straße	Lebensmittel
478	2557366	5705297	63	Oberhausen	Wunderstraße	Lebensmittel
479	2557433	5713851	90	Oberhausen	Neukölner Straße	Lebensmittel
480	2561061	5704763	76	Oberhausen	Eichstraße	Lebensmittel
481	2557082	5709347	93	Oberhausen	Biefangstraße	Lebensmittel
482	2558494	5706821	66	Oberhausen	Lindnerstraße	Lebensmittel
483	2558812	5704186	80	Oberhausen	Gutenbergstraße	Lebensmittel
484	2558890	5708995	71	Oberhausen	Steinbrinkstraße	Lebensmittel
485	2559771	5710358	80	Oberhausen	Dorstener Straße	Lebensmittel
⋮	...	...	...	...	...	Lebensmittel
770	...	...	...	...	...	Lebensmittel
771	2561308	5705891	172	Oberhausen	Essener Straße	Speisewirtschaft
772	2559102	5704322	183	Oberhausen	Marktstraße	Speisewirtschaft
773	2560242	5704606	172	Oberhausen	Straßburger Straße	Speisewirtschaft
774	2559591	5705095	161	Oberhausen	Ebertstraße	Speisewirtschaft
775	2559156	5704487	184	Oberhausen	Elsässer Straße	Speisewirtschaft
776	2558251	5703951	189	Oberhausen	Zimmerstraße	Speisewirtschaft
777	2560651	5704731	164	Oberhausen	Dieckerstraße	Speisewirtschaft
778	2558573	5709932	183	Oberhausen	Steinbrinkstraße	Speisewirtschaft
779	2557489	5707524	179	Oberhausen	Brinkstraße	Speisewirtschaft
780	2557875	5705569	192	Oberhausen	Wilmsstraße	Speisewirtschaft
781	2560940	5709651	195	Oberhausen	Kapellenstraße	Speisewirtschaft
782	2559094	5704065	163	Oberhausen	Lothringer Straße	Speisewirtschaft
783	2560588	5706432	193	Oberhausen	Centroallee	Speisewirtschaft
784	2561432	5704894	167	Oberhausen	Mellinghofer Straße	Speisewirtschaft
785	2560325	5705064	184	Oberhausen	Falkensteinstraße	Speisewirtschaft
⋮	...	...	...	...	...	Speisewirtschaft
1011	...	...	...	...	...	Speisewirtschaft

Gewerbliche Standorte in Mülheim

Nr.	X	Y	Menge [kg]	Ort	Straße	Tätigkeit
1	2561764	5699885	146	Mülheim	Dickswall	Pizza
2	2557274	5700495	79	Mülheim	Parkstr.	Lebensmittel
3	2559532	5697062	72	Mülheim	Nachbarsweg	Lebensmittel
4	2565582	5700726	68	Mülheim	Geibelstr.	Lebensmittel
5	2562142	5698962	82	Mülheim	Werdener Weg	Lebensmittel
6	2561807	5700270	88	Mülheim	Uhlandstr.	Lebensmittel
7	2562361	5699752	98	Mülheim	Essener Str.	Lebensmittel
8	2558879	5702294	64	Mülheim	Heidestr.	Lebensmittel
9	2561282	5703295	65	Mülheim	Heifeskamp	Lebensmittel
10	2560279	5697938	63	Mülheim	Düsseldorfer Str.	Lebensmittel
11	2563611	5700607	98	Mülheim	Wiescher Weg	Lebensmittel
12	2558563	5699977	99	Mülheim	Hansastr.	Lebensmittel
13	2560958	5699651	73	Mülheim	Leineweberstr.	Lebensmittel
14	2561613	5700670	97	Mülheim	Eppinghofer Str.	Lebensmittel
15	2560164	5696189	69	Mülheim	Luxemburger Allee	Lebensmittel
⋮	...	...	...	...	...	Lebensmittel
282	...	...	...	...	...	Lebensmittel
283	2564379	5701248	298	Mülheim	Geitlingstr.	Krankenhaus
284	2563719	5700534	317	Mülheim	Hingbergstr.	Krankenhaus
285	2561229	5699721	180	Mülheim	Bachstr.	Imbiss
286	2562765	5701621	149	Mülheim	Aktienstr.	Imbiss
287	2561411	5699833	147	Mülheim	Hans-Böckler-Platz	Imbiss
288	2561015	5703040	180	Mülheim	Mannesmannallee	Imbiss
289	2559511	5702242	165	Mülheim	Oberhausener Str.	Imbiss
290	2563583	5700892	165	Mülheim	Geitlingstr.	Imbiss
291	2560441	5696489	180	Mülheim	Ernst-Tommies-Str.	Imbiss
292	2564624	5697707	141	Mülheim	Kamperhofweg	Imbiss
293	2566335	5700454	148	Mülheim	Waterloostr.	Imbiss
294	2562695	5702208	171	Mülheim	Nordstr.	Imbiss
295	2558684	5699755	178	Mülheim	Duisburger Str.	Imbiss
296	2560376	5702216	151	Mülheim	Dümptener Str.	Imbiss
297	2558984	5702487	159	Mülheim	Schwerinstr.	Imbiss
298	2563530	5700341	175	Mülheim	Auf der Wegscheid	Imbiss
299	2561015	5700496	162	Mülheim	Aktienstr.	Imbiss
⋮	...	...	...	...	...	Imbiss
497	...	...	...	...	...	Imbiss
498	2561402	5700398	87	Mülheim	Charlottenstr.	Obst und Gemüse
499	2561846	5701046	67	Mülheim	Aktienstr.	Obst und Gemüse
500	2562916	5702964	72	Mülheim	Frintroper Str.	Obst und Gemüse
501	2561422	5700412	88	Mülheim	Charlottenstr.	Obst und Gemüse
502	2566060	5701403	62	Mülheim	Wrangelstr.	Obst und Gemüse
503	2561689	5700335	60	Mülheim	Vereinstr.	Obst und Gemüse
504	2562785	5695832	99	Mülheim	Mendener Str.	Obst und Gemüse
505	2563143	5701979	92	Mülheim	Aktienstr.	Obst und Gemüse
506	2559329	5702266	84	Mülheim	Marktplatz	Obst und Gemüse
507	2562749	5703619	66	Mülheim	Borbecker Str.	Obst und Gemüse
508	2562392	5698746	73	Mülheim	Zeppelinstr.	Obst und Gemüse
509	2561813	5699837	72	Mülheim	Muhrenkamp	Obst und Gemüse
510	2560142	5699094	81	Mülheim	Holzstr.	Obst und Gemüse
511	2562037	5702505	81	Mülheim	Zehntweg	Obst und Gemüse
512	2561556	5699916	76	Mülheim	Hans-Böckler-Platz	Obst und Gemüse
⋮	...	...	...	...	...	Obst und Gemüse
589	...	...	...	...	...	Obst und Gemüse

Nr.	X	Y	Menge [kg]	Ort	Straße	Tätigkeit
590	2561355	5699655	97	Mülheim	Hans-Böckler-Platz	bäckerei
591	2561531	5699689	61	Mülheim	Hingbergstr.	bäckerei
592	2559618	5698657	70	Mülheim	Saarner Str.	bäckerei
593	2559618	5698657	79	Mülheim	Prinzeß-Luise-Str.	bäckerei
594	2562390	5701415	84	Mülheim	Aktienstr.	bäckerei
595	2559618	5698657	91	Mülheim	Prinzeß-Luise-Str.	bäckerei
596	2562906	5698454	98	Mülheim	Zeppelinstr.	bäckerei
597	2558673	5699406	66	Mülheim	Wissollstr.	bäckerei
598	2559838	5699381	79	Mülheim	Bülowstr.	bäckerei
599	2561154	5699779	60	Mülheim	Schloßstr.	bäckerei
600	2558617	5701883	76	Mülheim	Steinkampstr.	bäckerei
601	2560216	5697538	90	Mülheim	Alte Str.	bäckerei
602	2558038	5698954	60	Mülheim	Friedhofstr.	bäckerei
603	2559992	5700137	67	Mülheim	Steineshoffweg	bäckerei
604	2563669	5700602	72	Mülheim	Wiescher Weg	bäckerei
⋮
692	...	...	...	...	...	...
693	2558904	5702360	170	Mülheim	Heidestr.	Speisewirtschaft
694	2560670	5700778	192	Mülheim	Sandstr.	Speisewirtschaft
695	2558712	5699783	199	Mülheim	Duisburger Str.	Speisewirtschaft
696	2561209	5699480	178	Mülheim	Teinerstr.	Speisewirtschaft
697	2566138	5700875	194	Mülheim	Humboldtring	Speisewirtschaft
698	2559119	5697711	185	Mülheim	Uhlenhorstweg	Speisewirtschaft
699	2561422	5698365	167	Mülheim	Jahnstr.	Speisewirtschaft
700	2561039	5699620	163	Mülheim	Leineweberstr.	Speisewirtschaft
701	2561562	5698886	163	Mülheim	Dimbeck	Speisewirtschaft
702	2562265	5702546	173	Mülheim	Zehntweg	Speisewirtschaft
703	2562711	5701586	195	Mülheim	Aktienstr.	Speisewirtschaft
704	2561852	5701056	171	Mülheim	Aktienstr.	Speisewirtschaft
705	2558610	5699764	199	Mülheim	Duisburger Str.	Speisewirtschaft
706	2561529	5703170	176	Mülheim	Mellinghofer Str.	Speisewirtschaft
707	2559824	5699562	179	Mülheim	Prinzeß-Luise-Str.	Speisewirtschaft
⋮
869	...	...	...	...	...	...

Simulationsergebnisse der Kantenorientierung (mit Fahrzeugtyp Seitenlader 1+0)

Ortsteil	Tour	Tourlänge [km]	Gewicht [Mg]	Ladepunkt	Totalzeit [h]	Umfahrzeit [min]	Ladezeit [min]	Zwischenzeit [min]	Entleerzeit [min]	Sonderzeit [min]
Duissern	D1	11,67	5,77	462	5,07	0,93	123,20	158,89	11	10
	D2	16,79	7,97	638	6,87	2,27	170,13	218,85	11	10
	D3	12,95	7,79	624	6,07	2,29	166,40	174,23	11	10
	D4	6,70	6,21	497	4,12	0,88	132,53	92,68	11	10
Hochfeld	H1	7,88	7,76	429	4,06	1,44	114,40	107,02	11	10
	H2	6,72	6,68	369	2,91	4,17	98,40	51,18	11	10
	H3	11,28	7,84	433	4,63	2,71	115,47	138,39	11	10
	H4	8,94	8,07	446	4,35	1,76	118,93	119,16	11	10
Buchholz	B1	11,24	7,00	884	6,96	0,99	235,73	159,85	11	10
	B2	8,55	4,76	601	4,63	2,90	160,27	93,62	11	10
	B3	15,01	7,99	1009	8,32	2,34	269,07	206,80	11	10
	B4	15,53	7,65	966	8,49	1,27	257,60	229,24	11	10

Simulationsergebnisse der Knotenorientierung in Duisburg (Hecklader 1+2)

Stadt	Tour	Tourlänge [km]	Gewicht [Mg]	Totalzeit [min]	Umfahrtzeit [min]	Ladezeit [min]	Zwischenzeit [min]	Entleerzeit [min]	Sonderzeit [min]
Duisburg	SGD2-1	3,15	7,978	54,712	0,82	23,291	10,6	10	10
	SGD1-1	4,33	7,979	60,5	2,09	26,209	12,2	10	10
	SGD7-1	8,98	7,942	76,714	4,72	38,392	13,6	10	10
	SGD6-1	11,61	7,995	80,618	3,67	44,152	12,8	10	10
	SGD6-2	17,46	7,962	90,802	11,55	45,857	13,4	10	10
	SGD8-1	9,97	7,937	77,944	2,80	42,344	12,8	10	10
	SGD2-2	5,93	7,996	64,01	1,95	31,064	11	10	10
	SGD8-2	20,04	7,952	95,836	8,56	53,475	13,8	10	10
	SGD6-3	20,32	7,965	100,513	13,08	52,438	15	10	10
	SGD1-2	20,26	7,968	88,316	10,94	45,772	11,6	10	10
	SGD1-3	8,05	2,726	46,553	8,16	13,79	4,6	10	10
	SGD3-1	13,37	7,994	81,812	5,80	43,609	12,4	10	10
	SGD8-3	23,58	7,959	100,476	12,02	54,661	13,8	10	10
	SGD6-4	11,84	7,969	85,574	3,58	47,797	14,2	10	10
	SGD3-2	12,97	7,967	86,482	7,92	44,162	14,4	10	10
	SGD8-4	17,55	7,959	88,923	6,69	49,429	12,8	10	10
	SGD7-2	10,08	7,991	78,381	6,61	37,973	13,8	10	10
	SGD7-3	22,85	7,997	91,166	11,74	47,83	11,6	10	10
	SGD5-1	12,32	7,967	80,395	6,61	41,188	12,6	10	10
	SGD2-3	12,75	7,885	88,448	5,58	48,072	14,8	10	10
	SGD4-1	10,17	7,964	75,863	4,33	39,331	12,2	10	10
	SGD5-2	17,13	7,993	94,691	4,38	55,713	14,6	10	10
	SGD4-2	11,87	7,955	76,89	4,78	40,509	11,6	10	10
	SGD2-4	9,60	7,98	79,572	2,99	42,985	13,6	10	10
	SGD5-3	14,08	7,975	85,605	2,32	50,086	13,2	10	10
	SGD8-5	21,42	7,996	99,107	16,26	48,651	14,2	10	10
	SGD2-5	12,16	7,976	82,995	2,26	47,537	13,2	10	10
	SGD7-4	13,79	7,99	83,119	2,86	47,657	12,6	10	10
	SGD3-3	23,31	7,996	100,357	4,91	61,05	14,4	10	10
	SGD7-5	11,69	6,07	70,498	4,80	35,903	9,8	10	10
	SGD6-5	19,89	7,987	101,387	11,50	54,489	15,4	10	10
	SGD3-4	26,70	7,998	97,698	13,66	51,843	12,2	10	10
	SGD6-6	21,05	7,97	97,028	8,84	54,392	13,8	10	10
	SGD8-6	19,63	4,001	72,199	13,80	31	7,4	10	10
SGD5-4	26,53	7,969	97,07	8,71	55,761	12,6	10	10	
SGD4-3	31,38	7,944	102,859	16,99	53,669	12,2	10	10	
SGD4-4	47,63	7,93	113,682	17,09	63,994	12,6	10	10	
SGD6-7	30,02	7,99	104,17	11,14	59,631	13,4	10	10	
SGD4-5	33,03	3,262	67,427	11,48	30,55	5,4	10	10	
SGD5-5	57,68	7,977	114,683	20,35	62,731	11,6	10	10	
	Summe	726,19	303,01	3435,08	318,29	1818,99	497,80	400	400

Simulationsergebnisse der Knotenorientierung in Oberhausen (Hecklader 1+2)

Stadt	Tour	Tourlänge [km]	Gewicht [Mg]	Totalzeit [min]	Umfahrtzeit [min]	Ladezeit [min]	Zwischenzeit [min]	Entleerzeit [min]	Sonderzeit [min]
Oberhausen	SGO9-1	18,83	7,914	103,51	10,62	48,00	24,90	10	10
	SGO9-2	19,55	7,841	102,89	13,11	45,52	24,27	10	10
	SGO9-3	28,45	7,985	112,19	9,24	58,17	24,78	10	10
	SGO9-4	16,80	7,951	94,49	6,52	44,90	23,07	10	10
	SGO9-5	22,40	7,847	103,76	6,87	52,95	23,95	10	10
	SGO9-6	15,96	2,191	56,08	12,47	16,75	6,87	10	10
	SGO10-1	17,49	7,867	98,18	11,61	43,06	23,52	10	10
	SGO10-2	20,66	7,939	100,76	5,65	50,98	24,13	10	10
	SGO10-3	25,69	7,993	110,59	8,14	57,36	25,10	10	10
	SGO11-1	17,06	7,932	99,65	9,55	45,59	24,50	10	10
	SGO11-2	18,09	7,962	100,39	6,92	49,32	24,15	10	10
	SGO11-3	14,39	7,834	91,63	6,17	42,78	22,68	10	10
	SGO11-4	15,88	7,988	95,90	5,02	47,25	23,63	10	10
	SGO11-5	7,81	7,736	84,42	1,65	38,82	23,95	10	10
	SGO11-6	7,92	7,911	84,30	1,13	39,43	23,75	10	10
	SGO11-7	15,29	7,955	92,62	4,17	45,65	22,80	10	10
SGO11-8	49,75	7,985	125,17	8,12	71,31	25,73	10	10	
Summe		332,03	128,83	1656,54	126,93	797,83	391,78	170	170

Simulationsergebnisse der Knotenorientierung in Mülheim (Hecklader 1+2)

Stadt	Tour	Tourlänge [km]	Gewicht [Mg]	Totalzeit [min]	Umfahrtzeit [min]	Ladezeit [min]	Zwischenzeit [min]	Entleerzeit [min]	Sonderzeit [min]
Mülheim	SGM12-1	5,19	7,98	77,54	1,86	31,18	24,50	10	10
	SGM12-2	8,00	7,92	87,95	1,32	41,30	25,33	10	10
	SGM12-3	11,28	7,93	93,88	4,35	44,00	25,53	10	10
	SGM12-4	18,55	7,93	102,19	11,54	46,18	24,47	10	10
	SGM12-5	25,15	7,97	108,97	13,15	51,40	24,42	10	10
	SGM12-6	38,65	7,86	117,14	8,96	63,37	24,82	10	10
	SGM12-7	25,10	7,97	117,89	7,72	62,07	28,10	10	10
	SGM12-8	27,66	7,96	116,58	7,98	62,15	26,45	10	10
	SGM12-9	24,40	8	115,44	12,85	56,02	26,57	10	10
	SGM12-10	57,00	7,82	126,63	11,82	70,37	24,43	10	10
	SGM13-1	15,01	1,17	44,39	9,61	11,02	3,75	10	10
	SGM13-2	24,04	7,94	110,13	4,88	59,17	26,08	10	10
	SGM14-1	17,13	7,87	98,32	3,33	50,45	24,53	10	10
	SGM14-2	18,53	7,89	100,12	6,40	49,65	24,07	10	10
	Summe		315,68	104,21	1417,15	105,77	698,33	333,05	140	140