

Prognosemodell zur Ermittlung von Auswirkungen des demografischen Wandels und der erweiterten Wertstofffassung auf die Abfallströme und Behandlungskapazitäten

vorgelegt von
Dipl.-Ing. (FH) M.Sc.
Jasmin Kornau-Pitzer
geb. in Bremen

von der Fakultät III - Prozesswissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktors der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Sven-Uwe Geißen
Gutachterin:	Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Henning Albers
Gutachterin:	Prof. Dr.-Ing. Sabine Flamme

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 13. Juli 2018

Berlin 2018

Danksagung

Die vorliegende Dissertation wurde im Rahmen eines Promotionsverfahrens zwischen der Technischen Universität Berlin und der Hochschule Bremen erstellt. Mein ausdrücklicher Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter, die mir den Zugang zur Promotion an der Fakultät III Prozesswissenschaften im Fachgebiet Kreislaufwirtschaft und Recyclingtechnologie ermöglicht und die gutachterlichen Tätigkeiten übernommen hat.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Henning Albers, der mich für die Abfallwirtschaft begeistert und mich bei allen Vorhaben stets gefördert und gefordert hat. In vielen konstruktiven Gesprächen stand er mir mit Rat und Tat immer zur Seite und vermittelte Zuversicht in schwierigen Zeiten.

Frau Prof. Dr.-Ing. Sabine Flamme danke ich für ihre Tätigkeit als Gutachterin.

Bei den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen des Fachgebietes Kreislaufwirtschaft und Recyclingtechnologie der TU Berlin möchte ich mich für den fachlichen Austausch und die administrative Unterstützung vor Ort bedanken.

Meinem Vater danke ich zum einen für die materielle Unterstützung, die mir einen hohen gestalterischen Freiheitsgrad während meiner Ausbildung ermöglicht hat. Vielmehr möchte ich mich jedoch für die ideellen Werte bedanken, die er mir mit auf den Weg gegeben hat, mit Ehrgeiz und Fleiß, viel im Leben erreichen zu können.

Mein allergrößter Dank gilt jedoch meinem Mann. Seine unendliche Geduld und seine liebevolle Unterstützung und Motivation waren eine große Hilfe, die maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat. Danke Christof!

Zusammenfassung

Der demografische Wandel und der Ausbau der Wertstoff- und Biotonne haben einen grundlegenden Einfluss auf die Abfallmenge und Zusammensetzung und somit auch auf die quantitative und qualitative Auslastung der behandelnden Anlagen.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde ein Prognosemodell entwickelt mit dem die Auswirkungen der genannten Steuerungsgrößen auf die Abfallströme und behandelnden Anlagen ermittelt werden können. Das Ziel der Modellierung bestand darin, ein komplexes abfallwirtschaftliches System auf ein Modellsystem zu abstrahieren ohne die Verhaltenstreue gegenüber dem realweltlichen Abbild zu verlieren. Weiterhin sollte der Detaillierungsgrad eine Darstellung auf Stoffgruppenebene erlauben und das Modell durch die freie Parametrisierbarkeit dahingehend flexibel sein, beliebige Bilanzräume und Szenarien untersuchen zu können. Die Ergebnisse sollen als Impulsgeber für die Ausgestaltung von Erfassungssystemen, das Stoffstrommanagement und die Sicherstellung der Entsorgungssicherheit agieren. In verschiedenen Szenarien könnte unter anderem der Nutzen und die Ausgestaltung einzelner Erfassungssysteme bewertet oder der Bedarf neuer bzw. die Stilllegung alter Anlagen formuliert werden. Darüber hinaus können die Prognosen Handlungsdruck, beispielsweise zur ökologischen Verbesserung des Systems durch Abfallvermeidungsstrategien, signalisieren.

Das Modell wurde anhand von Status quo-Daten des Bilanzraums Deutschland verifiziert und im weiteren Verlauf der Arbeit mit Prognosedaten bis 2035 gespeist. Die Prognosen deuten darauf hin, dass das Gesamtabfallaufkommen in Deutschland aufgrund der demografischen Entwicklung steigt. Innerhalb der Abfallströme wird die größte Dynamik durch den Ausbau der getrennten Erfassung von Bioabfällen durch die Biotonne erwartet. Die Entsorgungssicherheit der Abfallströme ist durch ausreichende Behandlungskapazitäten im Prognosezeitraum bis 2035 gewährleistet. Einen Hinweis auf langfristige Überkapazitäten der Behandlungsanlagen gibt es nicht.

Aus wissenschaftlicher Sicht erfüllt das Modell alle vorab definierten Anforderungen. Aus praktischer Sicht erweist es sich als wichtiges Planungsinstrument und bietet einen nachhaltigen Nutzen und einen großen Mehrwert für die zukünftige Abfallwirtschaft.

Abstract

It is supposed that the demographic developments influence the waste mass and its composition. Furthermore, the broadening of the organic waste bin and the recycling bin will increasingly shift fractions between the waste flows. As a result the waste treatment plants will continuously have to deal with varying inputs, possibly affecting the treatment capacities.

In this thesis a prognosis model has been developed in order to predict the impacts of both, the demographic change and the extended collection of recyclables, on waste flows and treatment capacities.

One major requirement was the abstraction of a complex waste management system into a model, while retaining the real-world behavior. Furthermore the degree of detail should be on material group level. The model should be flexible in order to be able to evaluate various balance scopes and scenarios. Practically, it should act as a managing tool for the operation and optimization of collection systems, waste flows and treatment capacities.

The model has been verified on basis of status quo data. Afterwards, a prognosis until 2035 has been carried out for the balance scope Germany. The results show, the overall waste mass will increase due to the demographic change. Despite a population decrease, the increase of small households or purchase power leads to a larger waste mass. The broadening of the organic waste bin has been confirmed to have the highest impact on the composition of the waste flows. The disposal safety is assured until 2035 due to sufficient treatment capacities. There is no sign for long-term overcapacities of the treatment plants.

From the scientific perspective, all requirements towards the model have been met. From the practical perspective, the model has turned out to be an important planning tool and provides a sustainable value for the future waste management industry.

I. Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2	GRUNDLAGEN	3
2.1	Einfluss des demografischen Wandels auf das Abfallaufkommen.....	3
2.2	Einfluss von Wertstofffassungssystemen auf die Menge und Zusammensetzung von Abfallströmen.....	4
2.2.1	Wertstofftonne	4
2.2.2	Biotonne	6
2.3	Vorüberlegungen zur Modellbildung	7
2.4	Darstellung des abzubildenden Realitätsausschnittes	8
3	METHODISCHE ANSÄTZE ZUR MODELLIERUNG	11
3.1	Multivariate Analyseverfahren	11
3.2	Stoffstromanalyse	13
3.3	Softwareauswahl	15
3.4	Darstellung und Beschreibung des Objektsystems	16
4	ENTWICKLUNG DES MODELLSYSTEMS	20
4.1	Stoffgruppenauswahl	20
4.2	Anlegen des demografischen Regressionsmodells	23
4.3	Integration der Erfassungssysteme	34
4.4	Modellierung der Abfallbehandlungsanlagen.....	39
4.4.1	Müllverbrennungsanlagen.....	41
4.4.2	EBS-Kraftwerke	48
4.4.3	Zement- und Kohlekraftwerke	48
4.4.4	Leichtverpackungssortieranlagen.....	49
4.4.5	Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen.....	51
4.4.6	Kompostierungsanlagen	55
4.4.7	Vergärungsanlagen	57
4.4.8	Deponien.....	58
4.5	Darstellung des Modellsystems	59
5	MODELLANWENDUNG	63
5.1	Datenbasis und -unsicherheit	64
5.2	Modellverifikation und Status quo	65
5.2.1	Personenspezifisches Stoffgruppenaufkommen	65

5.2.2	Demografische Randbedingungen	66
5.2.3	Anschluss- und Erfassungsquoten	67
5.2.4	Abfallbehandlungsanlagen	75
5.3	Prognosen für den Bilanzraum Deutschland.....	89
5.3.1	Modellvariablen bis 2035	89
5.3.2	Prognose der Abfallströme und Behandlungskapazitäten bis 2035	95
5.3.3	Sensitivitätsbetrachtung der Einflussfaktoren	102
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK.....	111
7	QUELLENVERZEICHNIS	114
7.1	Literatur	114
7.2	Gesetze / Verordnungen / Richtlinien	127
ANHÄNGE	129

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Korrelation zwischen Einwohnerzahl und Abfallaufkommen [Destatis, 2017a/Statista, 2017; eigene Darstellung].....	4
Abbildung 2.2:	Vorgehen bei der Modellbildung [Rautenstrauch/Schulze, 2002; modifiziert]	7
Abbildung 2.3:	Schematische Darstellung des abzubildenden Realitätsausschnittes	9
Abbildung 2.4:	Erweiterungsoptionen der Diskurswelt	10
Abbildung 3.1:	Lineare Regressionsfunktion [Backhaus <i>et al.</i> , 2016]	12
Abbildung 3.2:	Schematische Darstellung eines Systems mit Systemgrenze, Prozessen und Flüssen [Kranert, 2010]	14
Abbildung 3.3:	Transferfunktionen zur Verteilung eines Inputguts X [Brunner <i>et al.</i> , 2003].....	14
Abbildung 3.4:	Elemente des Objektsystems	16
Abbildung 3.5:	Beispielhafte Darstellung einer Kapazitätsüberschreitung im Objektsystem	17
Abbildung 3.6:	Auszüge der Diskurswelt, dargestellt im Objektsystem.....	18
Abbildung 3.7:	Excelverknüpfungen zwischen Eingabemaske und Stoffstrommodell	19
Abbildung 3.8:	Sankeydarstellung des Stoffgruppenverlaufs	19
Abbildung 4.1:	Vorgehen bei der Entwicklung des Modellsystems.....	20
Abbildung 4.2:	Ausschnitt der Eingabemaske für das Stoffgruppenaufkommen.....	23
Abbildung 4.3:	Demografische Einflussfaktoren auf das Abfallaufkommen	24
Abbildung 4.4:	Eingrenzung der demografischen Einflussfaktoren.....	25
Abbildung 4.5:	Demografische Einflussfaktoren mit statistisch fundierter Datenlage	26
Abbildung 4.6:	Korrelation von Kaufkraft und Gesamtabfallaufkommen pro Person [Hoffmeister, 2007].....	26
Abbildung 4.7:	Korrelation von Siedlungsdichte und Restabfallaufkommen [nach Hauser, 2007; eigene Darstellung]	27
Abbildung 4.8:	Korrelation von Siedlungsdichte und Restabfallaufkommen [nach Faulstich <i>et al.</i> , 2016; eigene Darstellung].....	27
Abbildung 4.9:	Korrelation von Haushaltsgröße und Abfallaufkommen [Huber, 1984; eigene Darstellung].....	28
Abbildung 4.10:	Kaufkraft nach Altersklassen in Deutschland [GfK in ProAgeMedia, 2008]	29
Abbildung 4.11:	Korrelation Abfallaufkommen und Anteil Altersklasse 60+ [Hoffmeister, 2007].....	29
Abbildung 4.12:	Finale Auswahl der Einflussfaktoren	30
Abbildung 4.13:	Übertrag des Regressionstrends an den Status quo	32
Abbildung 4.14:	Multifaktorielle Regressionen zur Ermittlung des Organikaufkommens.....	33
Abbildung 4.15:	Anpassung der Regression an neue Gegebenheiten	34
Abbildung 4.16:	Ausschnitt der Eingabemaske zur Erfassung von Abfällen für die Biotonne.....	36
Abbildung 4.17:	Spezifische Variablen zur Verwendung im Algorithmus Wertstofffassung.....	36
Abbildung 4.18:	Grundfließbild der Erfassungssysteme und Abfallströme.....	38
Abbildung 4.19:	Grundfließbild der Anlagenauswahl	40
Abbildung 4.20:	Vereinfachtes Verfahrenfließbild der MVA.....	41
Abbildung 4.21:	Feuerungsleistungsdiagramm einer MVA [Kaimer/Schade, 1998]	42
Abbildung 4.22:	Korrosionsursachen und deren Zusammenhänge im Kessel [Schirmer, 2007]	43
Abbildung 4.23:	Mögliche Reaktionen der in Rauchgasen enthaltener Verbindungen von Alkali- und Schwermetallen [Schroer/Konys, 2002]	43
Abbildung 4.24:	Ausschnitt der Eingabemaske zur Eingabe von Anlagenparametern	46
Abbildung 4.25:	Spezifische Variablen zur Verwendung im Algorithmus der MVA	47

Abbildung 4.26:	Vereinfachtes Verfahrensfliessbild einer LVP-Sortieranlage [Dehoust, 2012].....	49
Abbildung 4.27:	Vereinfachtes Verfahrensfliessbild einer MBA [Kranert, 2010]	52
Abbildung 4.28:	Output deutscher MBA im Mittel für alle Anlagentypen [Ketelsen/Nelles, 2015; eigene Darstellung]	54
Abbildung 4.29:	Vereinfachtes Verfahrensfliessbild einer Bioabfallkompostierungsanlage [Kranert, 2010].....	56
Abbildung 4.30:	Vereinfachtes Verfahrensfliessbild eines Vergärungsverfahrens [Kranert, 2010].....	57
Abbildung 4.31:	Grundfliessbild des Modellsystems	60
Abbildung 4.32:	Prognosemodell Teil 1 –Demografisches Regressionsmodell und Eingabemaske für die Variablen der Steuerungsgrößen	61
Abbildung 4.33:	Prognosemodell Teil 2 - Stoffstrommodell.....	62
Abbildung 5.1:	Übersichtliche Darstellung der Datenbasis und Prognosetechnik	64
Abbildung 5.2:	Vorgehen bei der Approximation von Anschluss- und Erfassungsquoten	67
Abbildung 5.3:	Ausschnitt der Eingabemaske zur Erfassung von LVP und StNVP-Wertstoffen.....	68
Abbildung 5.4:	Änderung der Restabfall- und Wertstoffzusammensetzung bei zunehmendem Etablierungsgrad der Wertstofftonne.....	72
Abbildung 5.5:	Ausschnitt der Eingabemaske zur Erfassung von Abfällen für die Biotonne.....	73
Abbildung 5.6:	Ausschnitt der Eingabemaske zur Erfassung von Glas	73
Abbildung 5.7:	Ausschnitt der Eingabemaske zur Erfassung von PPK.....	74
Abbildung 5.8:	Restabfallzusammensetzung im Status quo.....	74
Abbildung 5.9:	Stofffluss einer MBA.....	81
Abbildung 5.10:	Stofffluss LVP-Sortieranlage.....	83
Abbildung 5.11:	Stoffgruppenverlauf im Status quo	88
Abbildung 5.12:	Bevölkerungsentwicklung bis 2035 bei BEV-VARIANTE-02 mit Kontinuität bei stärkerer Zuwanderung [Destatis, 2015; eigene Darstellung]	90
Abbildung 5.13:	Entwicklung der Haushalte bis 2035 [Destatis, 2017; eigene Darstellung]	90
Abbildung 5.14:	Entwicklung des verfügbaren Einkommens von 1991-2015 [Destatis, 2017b; eigene Darstellung].....	91
Abbildung 5.15:	Entwicklung der Siedlungsdichte von 2005-2015 [Destatis, 2018; eigene Darstellung].....	92
Abbildung 5.16:	Prognose der Gesamtabfallmenge bis 2035	96
Abbildung 5.17:	Prognose der Wertstoffmengen bis 2035	96
Abbildung 5.18:	Veränderung der Zusammensetzung der LVP/StNVP-Sammelmenge bis 2022	97
Abbildung 5.19:	Prognose der Restabfallmenge bis 2035	97
Abbildung 5.20:	Veränderung der Restabfallzusammensetzung bis 2022.....	98
Abbildung 5.21:	Prognose der prozentualen Mengenveränderung der Abfallströme Bio, Rest, LVP/StNVP und Gesamt bis 2035	99
Abbildung 5.22:	Auslastung der Anlagen bis 2035	100
Abbildung 5.23:	Prognose der Abfallmenge für die Biotonne bei der Sensitivitätsbetrachtung - Faktor BT	103
Abbildung 5.24:	Prognose der prozentualen Veränderung von Restabfallmenge und Abfallmenge für die Biotonne bei der Sensitivitätsbetrachtung - Faktor BT	103
Abbildung 5.25:	Veränderung des Organikanteils im Restabfall bei der Sensitivitätsbetrachtung - Faktor BT	104
Abbildung 5.26:	Prognose der LVP/StNVP-Sammelmenge bei der Sensitivitätsbetrachtung - Faktor WST.....	104

Abbildung 5.27: Prognose der prozentualen Veränderung von Restabfallmenge und LVP/StNVP-Sammelmenge bei der Sensitivitätsbetrachtung - Faktor WST	105
Abbildung 5.28: Veränderung des LVP/StNVP-Anteils im Restabfall bei der Sensitivitätsbetrachtung - Faktor WST	105
Abbildung 5.29: Prognose der Wertstoffsammelungen bei der Sensitivitätsbetrachtung - Faktor DW	106
Abbildung 5.30: Prognose der Restabfallmenge bei der Sensitivitätsbetrachtung - Faktor DW	106
Abbildung 5.31: Prozentuale Veränderung von Restabfall bei den Faktoren WST, BT und DW	109

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1:	Stoffgruppen nach Differenzierungsebenen gemäß Sächsischer Sortierrichtlinie [LfULG, 2016 modifiziert].....	21
Tabelle 4.2:	Demografisch bedingte Einflussfaktoren auf das Abfallaufkommen	23
Tabelle 4.3:	Untersuchungen im Feststoff für Rohschlacke nach LAGA M19.....	44
Tabelle 4.4:	Prozessparameterauswahl der MVA.....	46
Tabelle 4.5:	Prozessparameterauswahl der Mitverbrennung	48
Tabelle 4.6:	Prozessparameterauswahl der LVP-Sortieranlagen	51
Tabelle 4.7:	Emissionsgrenzwerte für MBA in Deutschland [30. BImSchV, §6]	53
Tabelle 4.8:	Prozessparameterauswahl der MBA.....	54
Tabelle 5.1:	Stoffgruppenaufkommen 2014	65
Tabelle 5.2:	Demografische Randbedingungen 2014	66
Tabelle 5.3:	Absolutes Stoffgruppenaufkommen im Status quo-Jahr 2014	66
Tabelle 5.4:	Stoffgruppenbezogene Sammelmengen aus Gelbem Sack und Wertstofftonne [Bünemann <i>et al.</i> , 2011; modifiziert].....	69
Tabelle 5.5:	Erfassungsquoten und Störstoffanteile der Sammelsysteme Gelber Sack und Wertstofftonne.....	70
Tabelle 5.6:	Vergleich der Erfassungsquoten der Wertstofftonne aus Literatur und eigener Herleitung.....	70
Tabelle 5.7:	Abfallimportmengen 2014 [Spohn, 2016]	75
Tabelle 5.8:	Inputzusammensetzung und Teilkapazität der MVA 2014	76
Tabelle 5.9:	Inputzusammensetzung der MVA; SOLL/IST 2014	77
Tabelle 5.10:	Inputzusammensetzung und Teilkapazität der EBS-Kraftwerke 2014	78
Tabelle 5.11:	Inputzusammensetzung der EBS-Kraftwerke; SOLL/IST 2014	79
Tabelle 5.12:	Inputzusammensetzung und Teilkapazität der MBAs 2014	80
Tabelle 5.13:	Inputzusammensetzung der MBAs; SOLL/IST 2014	80
Tabelle 5.14:	Outputs der MBAs 2014; SOLL/IST 2014	81
Tabelle 5.15:	Outputs der LVP-Sortieranlage; SOLL/IST 2014	83
Tabelle 5.16:	Inputzusammensetzung der Kompostierungsanlagen; SOLL/IST 2014	84
Tabelle 5.17:	Inputzusammensetzung und Teilkapazität der Deponien DK I und DK II	86
Tabelle 5.18:	Inputzusammensetzung der Deponien DK I und DK II; SOLL/IST	87
Tabelle 5.19:	Verbleibendes Deponievolumen 2014-2025.....	101

IV. Abkürzungsverzeichnis

Abs.	Absatz
a.n.g.	Anderweitig nicht genannt
AQ	Anschlussquote
AVV	Abfallverzeichnis Verordnung
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BHKW	Blockheizkraftwerk
BT	Biotonne
Cl	Chlor
DepV	Deponieverordnung
Destatis	Statistisches Bundesamt
DW	Demografischer Wandel
EBS	Ersatzbrennstoff(e)
Et al.	Etalii
etc.	Et cetera
EQ	Erfassungsquote
EW	Einwohner
Fe	Eisen-Metall
FWL	Feuerungswärmeleistung
getr.ges.	getrennt gesammelt
Gew.-%	Gewichtsanteil in Prozent
GS	Gelber Sack
GV	Glühverlust
HH	Haushalte
HRF	Heizwertreiche Fraktion
ITAD	Interessensgemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V.
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KW	Kraftwerk
LAGA	Länder Arbeitsgemeinschaft Abfall
LVP	Leichtverpackungen

MBA	Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlage
MHKW	Müllheizkraftwerk
MVA	Müllverbrennungsanlage
NE	Nichteisen-Metall
NIR	Nahinfrarotspektrometer
NStNVP	Nichtstoffgleiche Nichtverpackungen
örE	öffentlich rechtliche Entsorgungsträger
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PO	Polyolefin
PP	Polypropylen
PPK	Papier, Pappe, Karton
PS	Polystyrol
PVC	Polyvenylchlorid
S	Schwefel
SBS	Sekundärbrennstoff
SR	Sortierreste
StNVP	Stoffgleiche Nichtverpackungen
TASi	Technische Anleitung Siedlungsabfall
TF	Transferfaktor
TS	Trockensubstanz
UBA	Umweltbundesamt
vgl.	vergleiche
VKU	Verband kommunaler Unternehmen e.V.
VP	Verpackung
WST	Wertstofftonne

1 Einleitung und Zielsetzung

Das abfallwirtschaftliche System unterliegt einer fortwährenden Dynamik. Durch gesetzliche, sozioökonomische und weitere Steuerungsgrößen verändern sich Abfallströme in Menge und Zusammensetzung. Das hat wiederum einen Einfluss auf die quantitative und qualitative Auslastung von Abfallbehandlungsanlagen.

So führte zunächst das Abfallbeseitigungsgesetz von 1972 zu einer deutlichen Reduzierung unkontrollierter Müllkippen in den 80er und 90er Jahren. Zeitgleich stiegen die Müllmengen aufgrund der starken Wirtschaftsleistung Deutschlands und dem daraus resultierenden vermehrten Konsum der Bevölkerung [vgl. SUBV, 2018]. Die Zahl der Verbrennungsanlagen wurde nach und nach stark erhöht [BMU, 2011]. In Folge der Verpackungsverordnung führte der Gelbe Sack zu einem neuen Abfallstrom aus Leichtverpackungen und letztendlich zum Bau von entsprechenden Sortieranlagen. Die Einführung der Biotonne führte zum Bau biologischer Abfallbehandlungsanlagen. Das in der Technischen Anleitung für Siedlungsabfall (TASi) verankerte Deponierungsverbot für unvorbehandelte Siedlungsabfälle ab 2005 förderte den Zubau mechanisch-biologischer Abfallbehandlungsanlagen (MBA). Trotz des MBA-Ausbaus prognostizierte das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit - bundesweit hochgerechnet - eine Behandlungslücke von mehreren Millionen Tonnen an Siedlungsabfällen für 2005 [Schnurer, 2004]. Ausgeglichen wurden diese Entsorgungsengpässe teilweise durch Zwischenlagerung [Radde, 2006]. Als Folge geringer Energiepreise in der Vergangenheit und des Brennstoffangebots aus den MBA entwickelte sich ein Markt für Ersatzbrennstoffkraftwerke [Richers, 2010]. Weiter veränderte sich die Dynamik in der thermischen Abfallbehandlung durch das Inkrafttreten des neuen Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) am 1. Juni 2012. Mit der Neuregelung der Verwertung von Abfällen gemäß § 8 des KrWG wurden neue Verwertungsoptionen eröffnet, womit eine verschärfte Konkurrenzsituation um Verbrennungsmengen erschaffen wurde [von Bechtolsheim, 2010]. Eine weitere Erhöhung der Verbrennungskapazität durch den Bau von Neuanlagen ist laut des Umweltbundesamtes (2012) zukünftig nicht zu erwarten. Die Ertüchtigung bestehender Anlagen ist jedoch möglich. Tendenziell wurde von einer Reduzierung der vorhandenen Verbrennungskapazitäten an einzelnen Standorten ausgegangen. So deuteten unter anderem Szenarien des Hamburgischen Weltwirtschaftsinstitutes (HWWI) auf einen Rückgang der im Inland zur Verfügung stehenden Abfallmenge zur thermischen Beseitigung oder energetischen Verwertung hin (Schulze/Schlitte, 2012). Alwast (2011) prognostizierte ähnlich und benannte den für die thermischen Anlagen nicht mehr zur Verfügung stehenden kommunalen Restmüll bis zum Jahr 2020 mit bis zu 4,8 Mio. Mg. Das Defizit für MBAs bezifferte er mit bis zu 2,1 Mio. Mg. Der Begriff „Überkapazitäten“ gewann in Fachkreisen zunehmend an Bedeutung und führte zu Spekulationen über die Nachfrage zusätzlicher Abfallimporte oder der Reduzierung thermischer Anlagenkapazitäten. Bei Sortieranlagen und biologischen Abfallbehandlungsanlagen gestaltet sich die Situation hingegen anders. Das HWWI ging durch die im neuen KrWG verankerte erweiterte Wertstofffassung von einem künftig vermehrten Bedarf an Behandlungskapazitäten aus (Schulze/Schlitte, 2012).

Einige Jahre später wurde den Prognosen zur Auslastung thermischer Abfallbehandlungsanlagen unter anderem von Faulstich *et al.* (2016) widersprochen. Sie kamen zu der Aussage, dass die thermischen Anlagen seit 2013 wieder sehr gut ausgelastet seien. Zudem prognostizierten sie eine Volllast thermischer Anlagen bis 2025. Gleiches bestätigt Spohn (2017), der die bundesdurchschnittliche Auslastung mit 100 % beziffert, dies jedoch nicht auf vermehrte Abfallimporte zurückführt. Als Ursache sehen Faulstich *et al.* vielmehr die europäische und deutsche Gesetzgebung außerhalb der Abfallwirtschaft, aber auch die gesellschaftliche Veränderung.

Die Zusammenstellung verdeutlicht die Dynamik, welcher das abfallwirtschaftliche System unterliegt, sehr deutlich. Während einige Entwicklungen absehbar sind, sind andere schlecht vorherzusagen, woraus sich Unsicherheiten beim Betrieb und der zukünftigen Ausgestaltung des abfallwirtschaftlichen Systems ergeben. Die frühzeitige Kenntnis über mögliche Veränderungen erlaubt jedoch ein rechtzeitiges Eingreifen und die Planung zielgerichteter Maßnahmen, so dass sich ein Bedarf an planerischen Instrumenten ergibt. Für Abfallwirtschaftsprognosen gibt es bereits eine Reihe von Ansätzen. Hauptakteure sind unter anderem die Prognos AG, die Arbeitsgemeinschaft aus Prognos und INFA sowie die von Prof. Dr.-Ing. M. Faulstich, das Hamburgische Weltwirtschaftsinstitut, das Witzenhausen-Institut und das Deutsche Institut für Urbanistik in Kooperation mit dem UBA und dem Öko-Institut e.V. Häufig beschränken sich die Ansätze jedoch nur auf eine Steuerungsgröße oder nur einen Abfallstrom und die dazugehörige Behandlungsoption. Eine Verknüpfung unterschiedlicher Steuerungsgrößen zur Ermittlung der Auswirkungen auf mehrere Abfallströme und die Kapazitäten der Anlagen ist dabei selten, eine Modellbildung gar nicht fokussiert worden.

Im Rahmen dieser Dissertation soll ein Prognosemodell entwickelt werden mit dem die Auswirkungen diverser, einflussnehmender Faktoren auf haushaltsnahe Abfallströme und auf die Kapazitäten der behandelnden Anlagen kenntlich gemacht werden können. Bedingt durch ihre Aktualität werden die folgenden Steuerungsgrößen in die Betrachtung einbezogen:

- die erweiterte Wertstoffeffassung mittels Wertstofftonne
- der flächendeckende Ausbau der Biotonne
- die gesellschaftlichen Einflussfaktoren des demografischen Wandels

An die Modellbildung ergeben sich aus wissenschaftlicher Sicht die folgenden Anforderungen:

- Abstrahierung eines komplexen abfallwirtschaftlichen Systems auf ein Modellsystem
- Verhaltenstreue gegenüber des realweltlichen Abbildes
- Modellierung auf dem Detaillierungsgrad der Stoffgruppenebene
- flexible Funktionsweise zur Abbildung beliebiger Bilanzräume und Szenarien

Der praktische Mehrwert des Modells besteht in seiner Funktion als Planungsinstrument, dessen Ergebnisse als Impulsgeber für die Ausgestaltung von Erfassungssystemen, das Stoffstrommanagement und die Sicherstellung der Entsorgungssicherheit agieren können. Darüber hinaus können die Prognosen Handlungsdruck, beispielsweise für die ökologische Verbesserung des Systems durch Abfallvermeidungsstrategien, signalisieren.

2 Grundlagen

Im Grundlagenkapitel werden zunächst die adressierten Faktoren und ihr möglicher Einfluss auf die Abfallwirtschaft kurz erläutert. Daran schließen sich erste Vorüberlegungen zur Modellbildung an, die einen Einblick über den geplanten Entwicklungsprozess des Modells und den abzubildenden Realitätsausschnitt, die konzeptionelle Basis des späteren Prognosemodells, geben.

2.1 Einfluss des demografischen Wandels auf das Abfallaufkommen

Als Demografie [griech. Volksbeschreibung] ist die Wissenschaft von der Bevölkerung zu verstehen. Sie beschreibt den gegenwärtigen Zustand der Bevölkerung (Größe, Altersaufbau, Geburtenhäufigkeit, Zuwanderung usw.) [Thurich, 2011]. Die Verschiebung dieser Merkmale, der demografische Wandel, führt zu einer nachhaltigen Veränderung der Bevölkerungsstruktur. In Deutschland ist aktuell von einem Bevölkerungsrückgang auszugehen, da die Sterberate die Geburtenrate immer mehr übersteigt. Die Nettozuwanderung kann das dadurch wachsende Geburtendefizit auf lange Sicht nicht kompensieren. Bei der Fortsetzung der langfristigen demografischen Trends (BEV-VARIANTE-02/G1-L1-W2, Kontinuität bei stärkerer Zuwanderung, [Destatis, 2015]) wird die Einwohnerzahl von 81,058 Mio. (Stichtag 31.12.2014) auf 73,079 Mio. im Jahr 2060 abnehmen. Deutlich bemerkbar macht sich der Rückgang der Bevölkerung bei den Unter-20-Jährigen. Ebenso rückläufig sind die Zahlen der einkommensstarken Gruppe der 20-65-Jährigen. Die Zahl der Älteren ab 65 steigt hingegen [Destatis, 2015]. Die hier für Deutschland insgesamt dargestellte Entwicklung wird in den einzelnen Bundesländern unterschiedlich stark ausfallen. So findet beispielsweise in weiten Teilen der ostdeutschen Bundesländer eine große Abwanderung statt (Landflucht), während München, die Region Nordwest oder der Großraum Hamburg großen Zuwachs verzeichnen [vgl. Prognos, 2017]. Neben einer höheren Siedlungsdichte begünstigt diese so genannte Urbanisierung auch den Trend zu kleineren Haushalten, wonach Prognosen zufolge die Zahl privater Haushalte steigt [Destatis, 2017]. Zwischenzeitliche Änderungen sind durch fortlaufende Prognosen jedoch nicht auszuschließen.

Relevant für die Abfallwirtschaft ist der Wandel dahingehend, dass er einen Einfluss auf das Abfallaufkommen und dessen Zusammensetzung hat. Zunächst könnte vereinfacht davon ausgegangen werden, dass das Aufkommen als abhängige Variable über die Einwohnerzahl, in ihrer Funktion als unabhängige Variable, erklärt werden kann.

Als erste vereinfachte Annahme könnte das Abfallaufkommen in direkte Abhängigkeit zur variablen Größe der Einwohnerzahl gesetzt werden. Das würde bedeuten, dass weniger Einwohner auch weniger Abfall und mehr Einwohner entsprechend mehr Abfall produzieren. Dazu werden die Menge der haushaltsnahen Abfallströme (Σ Hausmüll, Abfälle für die Biotonne und getrennt erfasste Wertstoffe) und die Einwohnerzahl gegenübergestellt. Abbildung 2.1 zeigt das absolute Abfallaufkommen der genannten Abfallströme für die Jahre 2004-2014 in Korrelation mit den für das jeweilige Jahr geltenden Einwohnerzahlen.

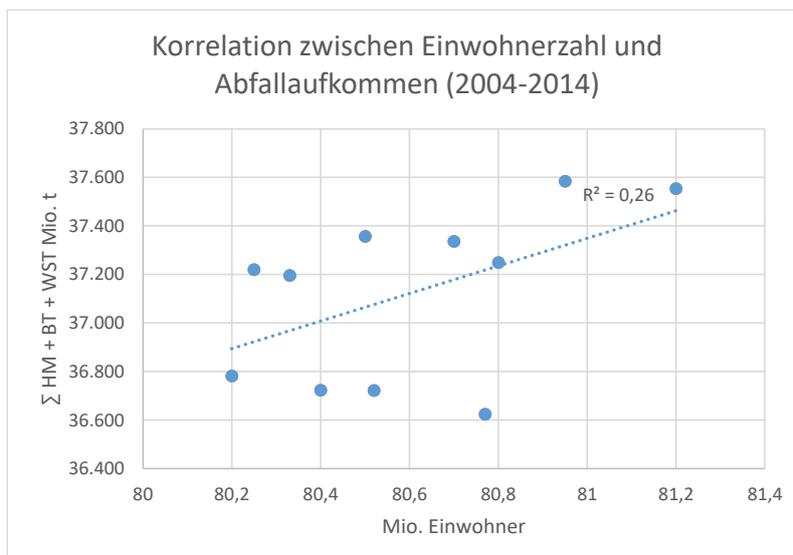


Abbildung 2.1: Korrelation zwischen Einwohnerzahl und Abfallaufkommen [Destatis, 2017a/Statista, 2017; eigene Darstellung]

Im Ergebnis hat die Einwohnerzahl mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,26 jedoch nur einen erklärenden Anteil von 26 % an der absoluten Abfallmenge. Sie ist infolgedessen kein ausschließlicher Grund für das Abfallaufkommen, sondern muss als Indikator verstanden werden, in dem andere erklärende bzw. unabhängige Variablen repräsentiert sind. So könnte die variierende Kaufkraft der einzelnen Personengruppen zu unterschiedlichen Pro-Kopf-Aufkommen führen und kleinere Haushaltsgrößen aufgrund mangelnder gemeinsamer Nutzungsmöglichkeiten von großen Gebindegrößen ein erhöhtes Abfallaufkommen zur Folge haben. Darüber hinaus werden soziale Gesichtspunkte wie das Bildungsniveau, der Ausländeranteil und die Integration in den Arbeitsmarkt in Zusammenhang mit der Höhe des Abfallaufkommens gebracht und müssen im weiteren Verlauf der Modellbildung gegebenenfalls berücksichtigt werden. Weiterhin können sich demografische Aspekte auf die Abfallzusammensetzung auswirken. So führe der Zuwachs der Über-65-Jährigen zum Beispiel zu einem Anstieg der Inkontinenzabfälle im Restabfall.

2.2 Einfluss von Wertstofffassungssystemen auf die Menge und Zusammensetzung von Abfallströmen

Aus diversen Erfassungsmaßnahmen resultieren unterschiedliche Abfallströme. Diese variieren je nach Ausgestaltung in Menge und Zusammensetzung. Die Wertstofffassung zielt darauf ab, ausgewählte Materialien separat zu erfassen, um sie einer hochwertigen Verwertung zuzuführen. Während sich zum Beispiel die Glas- und Papiersammlung sehr gut etabliert hat, sollen mit Einführung der Wertstofftonne und dem flächendeckenden Ausbau der Biotonne zukünftig noch mehr entsprechende Wertstoffe erfasst und verwertet werden. Daher wird im Folgenden detaillierter auf diese Systeme eingegangen.

2.2.1 Wertstofftonne

Der Begriff *Wertstofftonne* umfasst nach Definition des Umweltbundesamtes (2011b) alle Gefäßsysteme zur getrennten Erfassung der jeweiligen trockenen Wertstoffe (ohne Glas und

Papier) unter Integration von LVP. Sie ist eine Ergänzung oder Erweiterung der bestehenden Systeme *Gelber Sack* oder *Gelbe Tonne*, durch welche Verpackungsabfälle aus Metallen und Kunststoffen gesammelt und anschließend verwertet werden. Andere Abfälle aus den gleichen Materialien wurden bisher hingegen mit dem übrigen Hausmüll in der grauen Restmülltonne gesammelt und entsorgt, sofern sie nicht als *intelligente Fehlwürfe* bereits im Gelben Sack entsorgt wurden. Nach Vorgabe des Kreislaufwirtschaftsgesetzes sollen Haushalte diese *stoffgleichen Nichtverpackungen* (StNVP) aus Kunststoff und Metall legal in einer einheitlichen Wertstofftonne entsorgen können:

§ 14 Förderung des Recyclings und der sonstigen stofflichen Verwertung

(1) Zum Zweck des ordnungsgemäßen, schadlosen und hochwertigen Recyclings sind Papier-, Metall-, Kunststoff- und Glasabfälle spätestens ab dem 1. Januar 2015 getrennt zu sammeln, soweit dies technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist. [KrWG, § 14, Abs. 1]

Genau genommen werden unter dem Begriff *Stoffgleiche Nichtverpackungen* nach Angabe von Bünemann *et al.* (2011) diejenigen Wertstoffe zusammengefasst, die keine bzw. nur geringfügige Änderungen der bisher für Verpackungsabfälle eingesetzten Sortier- und Verwertungstechniken erforderlich machen (Metalle, Kunststoffe). Entscheidend bei der Einstufung ist daher also nicht die wortwörtliche Stoffgleichheit, sondern ausschließlich die Kompatibilität zur vorhandenen Verwertungsstruktur. Diese Wertstoffe sind aktuell nicht systemzugelassen, was bedeutet, dass sie offiziell nicht für die Sammlung über ein duales System bestimmt sind [Bünemann *et al.*, 2011]. Beispiele für stoffgleiche Nichtverpackungen sind:

- Spielzeuge aus Kunststoff (z. B. Bobbycar®, Quietscheente)
- Kunststoffgegenstände (z. B. Wäschekorb, Eimer, Blumenkasten, Gartenstuhl)
- Metalle (z. B. Werkzeug, Backblech)
- Haushaltsverpackungen oder im Privatbereich genutzte Verpackungen (z. B. Einweggeschirr und -bestecke, Haushaltsfolien, Geschenkpapier)
- Langlebige Verpackungen mit Aufbewahrungsfunktion (z. B. Hartkunststoffboxen).

Die vorliegende Arbeit orientiert sich bei der Modellierung des Systems an der im *Planspiel zur Fortentwicklung der Verpackungsverordnung* ermittelten Idealzusammensetzung der Wertstofftonne [vgl. Bünemann *et al.*, 2011]. Dort wurden die verschiedenen Stoffgruppen durch Bewertungskriterien auf ihre Eignung zur Miterfassung in der Wertstofftonne untersucht. Das Planspiel wird als Stand der Forschung gewertet und umfasst neben den LVPs ausschließlich die StNVP. Andere trockene Wertstoffe, die so genannten *Nichtstoffgleichen Nichtverpackungen* (NStNVP), wie Holz, Gummi, Textilien, Batterien oder Elektrokleingeräte, sind hingegen Störstoffe in der Wertstofftonne. Nach Einschätzung von Bünemann *et al.* (2011) würden sie funktionierende Parallelsysteme gefährden oder es ist keine oder nur sehr aufwendige Sortierfähigkeit gegeben. Die Erwartungen liegen bei einer Mehrmenge von etwa 7 kg/EW*a.

Rechtliche Regelungen über die verpflichtende Einführung und die konkrete Ausgestaltung der Wertstofftonne sollten in Gestalt einer Rechtsverordnung oder eines eigenständigen

Gesetzes, dem Wertstoffgesetz, verabschiedet werden. Mit Stand vom Dezember 2016 hat die Bundesregierung jedoch Abstand von dem Wertstoffgesetz genommen und indes ein Verpackungsgesetz auf den Weg gebracht, dass zum 01.01.2019 in Kraft tritt. Darin werden unter anderem höhere Recycling-Quoten für die dualen Systeme (z. B. 63 % statt 36 % für Kunststoffverpackung bis 2022) und eine flexiblere Lizenzentgeltgestaltung zugunsten ökologischer Aspekte fokussiert. Eine verpflichtende Einführung der Wertstofftonne ist hingegen nicht mehr Gegenstand dieses Gesetzes. Vielmehr obliegt die Entscheidung den einzelnen Kommunen, ob sie weitere Abfälle aus Kunststoff und Metall gemeinsam mit den dualen Systemen in einer Wertstofftonne sammeln wollen.

2.2.2 Biotonne

In Deutschland wurde vor etwa 25 Jahren mit der getrennten Sammlung und Verwertung von organischen Abfällen begonnen. Bis 2004 ist die Menge der behandelten Bioabfälle kontinuierlich angestiegen. Danach stieg sie nur noch leicht an [UBA, 2013]. Mit etwa 30 % [Hoffmann *et al.*, 2010] ist das organische Potential im Hausmüll jedoch nach wie vor sehr hoch.

Zwar bieten viele der entsorgungspflichtigen Körperschaften bereits eine Tonne zur Getrenntsammlung von Bioabfällen an, oft sind die Angebote aber wenig attraktiv und geben dem Bürger zu wenig Anreiz, seine Bioabfälle tatsächlich einer gezielten Verwertung zuzuführen. So kommt es, dass 2010 gerade einmal etwas mehr als 50 % der Haushalte überhaupt über eine Biotonne verfügten [Kehres, 2010]. Nach Angaben von Bechtolsheim/Charlier/Wagner (2011) wurde 2010 rund 17 Mio. Einwohnern in Deutschland keine Biotonne durch die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger angeboten. Darüber hinaus liegt die Anschlussquote in den Regionen mit Biotonne lediglich bei 65 %. Insgesamt werden nach Krause/Oetjen-Dehne (2015) Bioabfälle von rund 40 Mio. Einwohnern, also etwa der Hälfte der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland, nicht getrennt entsorgt - und dass, obwohl biologisch abbaubare Abfälle bis vor wenigen Jahren auf den Deponien der wesentliche Faktor bei der Entstehung klimarelevanter Gase in der Abfallwirtschaft waren. Diese Umweltbelastung lässt sich durch die getrennte Sammlung und Verwertung von Bioabfällen deutlich reduzieren [UBA, 2013]. Mit dem ausdrücklichen Gebot zur Getrenntsammlung will der Gesetzgeber den Anteil separat erfasster Bioabfälle deutlich erhöhen:

§ 11 Anforderungen an die Kreislaufwirtschaft für Bioabfälle und Klärschlämme

(1) Soweit dies zur Erfüllung der Anforderungen nach § 7 Grundpflichten der Kreislaufwirtschaft Absatz 2 und 3 sowie § 8 Rangfolge und Hochwertigkeit der Verwertungsmaßnahmen Absatz 1 erforderlich ist, sind Bioabfälle, die einer Überlassungspflicht nach § 17 Absatz 1 unterliegen, spätestens ab dem 1. Januar 2015 getrennt zu sammeln. [KrWG, § 11, Abs. 1]

Laut Krause/Oetjen-Dehne (2015) kamen bis 2015 zehn neue Landkreise hinzu, bei weiteren acht Landkreisen stand die Einführung bevor. Es ist also davon auszugehen, dass sich die Anschlussquote zwischenzeitlich nach oben korrigiert hat. Langfristig soll die Anschlussquote

auf 100 % gesteigert werden. Kern (2016) geht jedoch davon aus, dass lediglich eine Quote von 80 % erreicht wird. Außerdem prognostiziert er einen steigenden Störstoffanteil.

2.3 Vorüberlegungen zur Modellbildung

Das abfallwirtschaftliche System kann aufgrund seiner Vielzahl an Stoffströmen, Anlagen und Wechselbeziehungen als komplex und kompliziert angesehen werden. Durch eine Modellbildung ist es möglich, einen Realitätsausschnitt zu abstrahieren und den Fokus auf bestimmte Aspekte des Systems zu legen, wodurch es handhabbar wird. Nach Rautenstrauch/Schulze (2002) macht es keinen Sinn, gleich alle Aspekte und Details in Betracht zu ziehen, da je nach Entwicklungsstadium verschiedene Aspekte von besonderer Relevanz sind. Sie werden durch *Abstraktion* herauskristallisiert. „Diese Abstraktion wird durch einen Prozess, der *Modellierung* genannt wird und dessen Ergebnis ein Modell ist, vollzogen. Ein *Modell* ist ein abstraktes, immaterielles Abbild realer Strukturen bzw. eines realen Verhaltens für Zwecke des Subjektes“ [Rautenstrauch/Schulze, 2002]. Der im Modell darzustellende Realitätsausschnitt wird als *Diskurswelt* bezeichnet. Sie wird durch subjektive Interpretation auf ein *Objektsystem* abgebildet. Darin werden realweltliche Objekte als abstrakte Repräsentanten abgebildet. In diesem Schritt findet noch keine Reduktion der Komplexität statt. Alle zuvor ausgewählten Materialien und die daraus resultierenden Prozesse in Form von Erfassungssystemen und Anlagen werden angelegt. Eine Minimierung der Komplexität erfolgt beim Übergang des Objektsystems zum *Modellsystem*. Hier kann der Modellierer entscheiden, wie detailliert das tatsächliche Modell gestaltet werden soll, indem irrelevante Sachverhalte eliminiert und relevante Sachverhalte fokussiert werden [Rautenstrauch/Schulze, 2002]. Der zweckmäßige Detaillierungsgrad hängt vom Verwendungszweck ab, aber auch von der Erfahrung des Verwenders und den verfügbaren Daten [Backhaus *et al.*, 2016].

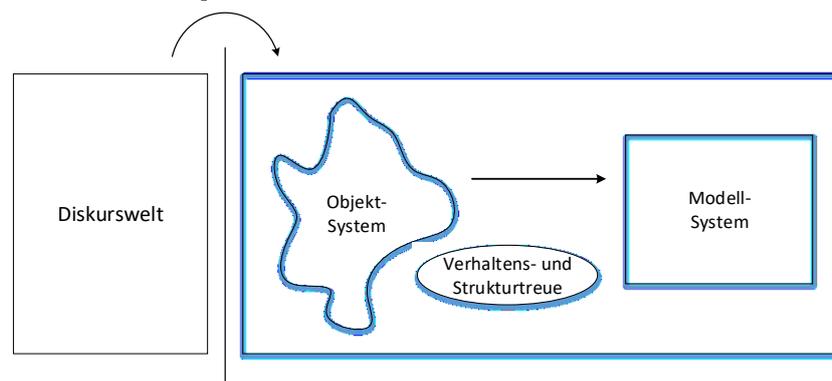


Abbildung 2.2: Vorgehen bei der Modellbildung [Rautenstrauch/Schulze, 2002; modifiziert]

Die Modellierung folgt dem Prinzip der Verhaltens- und Strukturtreue. Mit der Hilfe verhaltenstreuer Modelle wird gezeigt, wie das Original auf bestimmte Einflüsse reagieren würde, während strukturtreue Modelle den Aufbau des Originals abbilden.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird zunächst die Diskurswelt hergeleitet und dargestellt, ehe ihre Überführung in ein Objektsystem methodisch und praktisch beschrieben wird. Anschließend erfolgt die eigentliche Modellierung. Abgeschlossen wird die Modellbildung mit der Verifikation bzw. Überprüfung der Verhaltens- und Strukturtreue.

2.4 Darstellung des abzubildenden Realitätsausschnittes

Der Grundgedanke des Modells beruht auf dem Prinzip von Ursache und Wirkung, welches besagt, dass eine Steuerungsgröße einen Einfluss auf ein von ihr adressiertes Element ausübt. In diesem Modell soll eine Abfolge unterschiedlicher Steuerungsmodule, welche die Steuerungsgrößen enthalten, integriert werden.

Basis des Modells bilden Stoffgruppen, deren Bestandteile im Regelfall die gleichen Eigenschaften besitzen. Sie sind für viele abfallwirtschaftliche Fragestellungen relevant. Mit der Kenntnis über die Menge einzelner Stoffgruppen in einem Abfallstrom lässt sich anhand fraktionsspezifischer Kennzahlen auf die Eigenschaften des Abfallstroms schließen. Diese können unter anderem bei der Ausgestaltung eines Sammelsystems, der Wahl der geeigneten Behandlungsmethode oder der Anlagenauslegung eine Rolle spielen.

Am Anfang der Wirkungskette steht das Stoffgruppenaufkommen pro Person und das Steuerungsmodul *Demografischer Wandel*. Aus personenspezifischen Abfallverhaltensmustern und den durch den demografischen Wandel bedingten veränderlichen Bevölkerungsmerkmalen resultiert das absolute Stoffgruppenaufkommen. Über verschiedene Sammelsysteme werden diese Stoffgruppen in Abfallströme überführt. Die Menge und Zusammensetzung ergibt sich durch Anschluss- und Erfassungsvorgaben - der zweiten Steuerungsgröße des Modells. Je nach Beschaffenheit und Behandlungsziel der erhaltenen Abfallströme werden unterschiedliche Behandlungsanlagen adressiert. Über das Modul *Distribution* können die Ströme beliebig auf die Anlagen verteilt werden. Das Steuerungsmodul für den Anlagenpark umfasst die parametergekoppelten Anlagenkapazitäten (z. B. Mg/a, MWh/a) und die Transferfaktoren. Je nach Menge und Eigenschaften der Inputs werden die Kapazitäten der Anlagen unterschiedlich stark ausgeschöpft. Die Transferfaktoren bestimmen über die Menge und Qualität der Sekundärabfälle. Eine Veränderung des absoluten Stoffgruppenaufkommens, der Menge und Zusammensetzung der Abfallströme sowie der Auslastung der Anlagen ergibt sich ausschließlich durch die Variierung der Parameter in den Steuerungsmodulen. Abbildung 2.3 zeigt die Diskurswelt. Sie dient als Grundgerüst für die weitere Modellbildung.

Die letztendlichen Prognosen werden vom personenbezogenen Stoffgruppenaufkommen eines Status quo-Jahres fortgeschrieben. Auf die Erweiterung um die Grundeinheit *Produkte* und den Einbezug weiterer Steuerungsmodule (z. B. Abfallvermeidung, Lebensdauer; siehe Abbildung 2.4) wird vorerst verzichtet, um den Umfang der Arbeit in einem vertretbaren Rahmen zu halten.

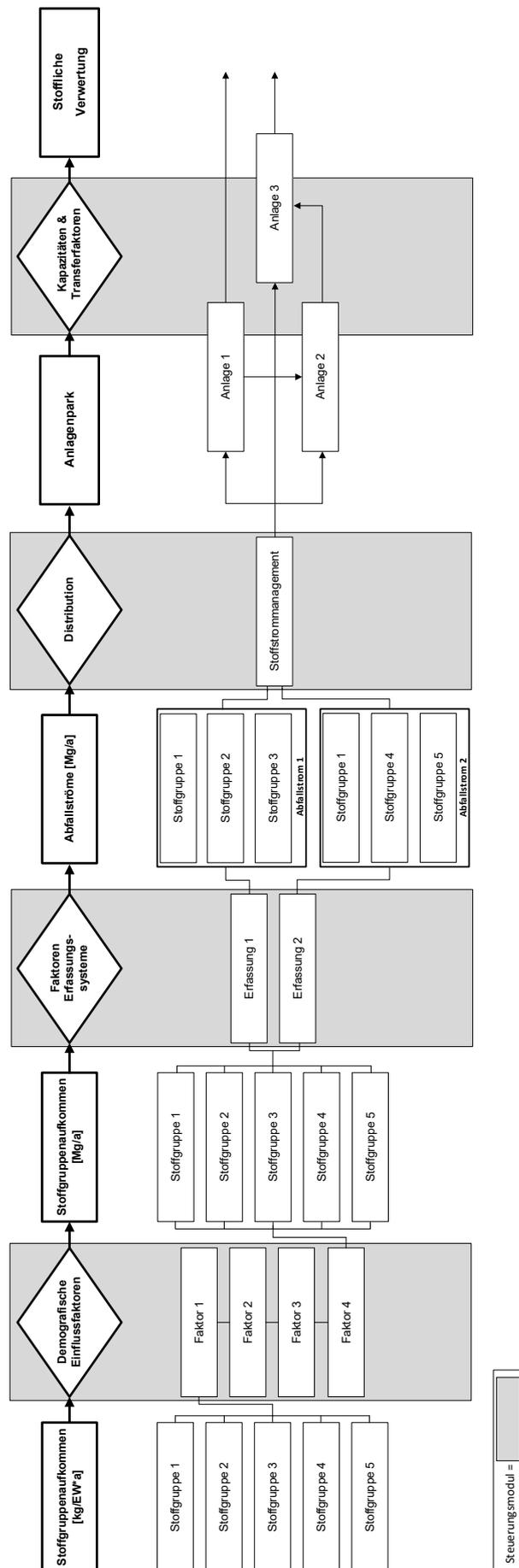


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des abzubildenden Realitätsausschnittes

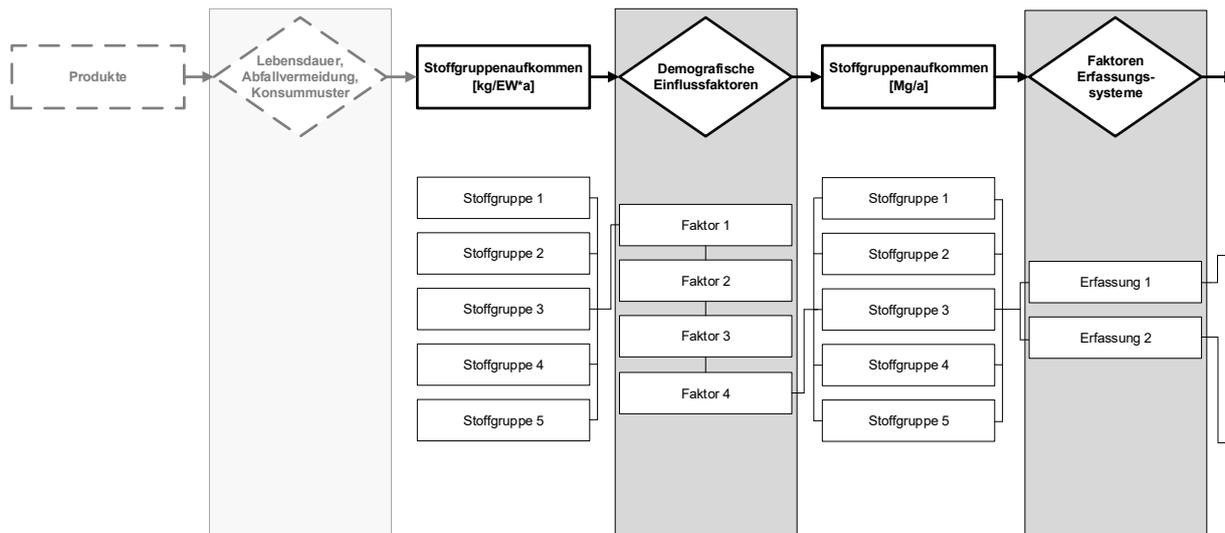


Abbildung 2.4: Erweiterungsoptionen der Diskurswelt

3 Methodische Ansätze zur Modellierung

Auf Grundlage der Diskurswelt kann die Auswahl der Methode(n) vorgenommen werden. Es ergibt sich zunächst der Bedarf, die Auswirkungen des demografischen Wandels auf das absolute Stoffgruppenaufkommen in eine Methode einzubetten. Ferner müssen die gewonnenen Stoffströme gelenkt, in Prozessen verarbeitet und später bilanziert und visualisiert werden. Im Folgenden werden die gewählten Methoden kurz erläutert. Unter Einbezug entsprechender Software wird die Diskurswelt in das Objektsystem übertragen.

3.1 Multivariate Analyseverfahren

Beim demografischen Wandel haben unabhängige Variablen (Regressoren/Ursachen), wie die Wohnform oder das Einkommen, einen Einfluss auf die abhängige Variable *Abfallaufkommen* (Regressanden/Wirkung). Eine Veränderung der abhängigen Variable (Reaktion) kann nur durch die Veränderung der unabhängigen Variablen herbeigeführt werden. Diese Veränderung ist der Beweis dafür, dass die unabhängigen Variablen einen Einfluss auf die abhängige Variable haben.

Eine Methode zur mathematischen Beschreibung dieser Zusammenhänge sind multivariate Analyseverfahren, bei denen mehrere Variablen simultan betrachtet werden und deren Zusammenhang quantitativ analysiert wird, sei es, diesen zu beschreiben oder zukünftige Entwicklungen zu prognostizieren [Backhaus *et al.*, 2016].

Ein außerordentlich vielseitiges und flexibles Analyseverfahren ist die Regressionsanalyse. Sie besitzt sowohl für die Beschreibung und Erklärung von Zusammenhängen als auch für die Durchführung von Prognosen große Bedeutung und ist nach Aussagen von Backhaus *et al.* (2016) sicherlich das wichtigste und am häufigsten angewendete multivariate Analyseverfahren. Ein besonders hoher Stellenwert kommt dabei der linearen Regression zu. In der Praxis haben sich lineare Gleichungen als gute Approximation selbst für komplexe Beziehungen erwiesen. Auch in Datensituation, in denen eigentlich nicht vermutet wird, dass dort lineare Beziehungen zwischen Variablen bestehen, können häufig präzise Vorhersage eines Kriteriums getroffen werden.

Ziel der linearen Regression ist es, unabhängige Variablen mit Hilfe einer möglichst einfachen mathematischen Regel so miteinander zu verbinden, dass eine möglichst gute Vorhersage einer abhängigen Variable erreicht wird. Ist die mathematische Regel entwickelt, können Aussagen für einen größeren Umfang genauso getroffen werden, wie sie für eine Stichprobe gelten. Das spart Zeit und Mittel für ressourcenaufwendige Erhebungen.

Das lineare Regressionsmodell als theoretischer Unterbau für die Regressionsanalyse ist Formel 1 zu entnehmen. Dabei gibt b_0 den Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der Y-Achse an (vgl. Abbildung 3.1). Inhaltlich steht b_0 für den Wert, der zu erwarten ist, wenn die unabhängige Variable gleich Null ist. b_0 wird als konstantes Glied der Regressionsfunktion bezeichnet [Backhaus *et al.*, 2016].

$$Y = b_0 + b_1 * X \quad (\text{Formel 1})$$

b_1 ist der Koeffizient der unabhängigen Variablen von X. Er wird als Regressionskoeffizient bezeichnet und ist ein Maß für die Stärke der Wirkung von X auf Y (Formel 2). Geometrisch gesehen gibt er die Steigung oder Neigung der Regressionsgeraden an, bzw. gibt an, um wie viele Einheiten sich Y vermutlich ändern wird, wenn sich X um eine Einheit ändert (vgl. Abbildung 3.1) [Backhaus *et al.*, 2016].

$$b_1 = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (\text{Formel 2})$$

mit:

Y = abhängige Variable

b_0 = Schnittpunkt mit der Y-Achse der jeweiligen Regression (konstantes Glied)

b = Steigung der jeweiligen Regression (Regressionskoeffizient)

X = unabhängige Variable

Es gilt:

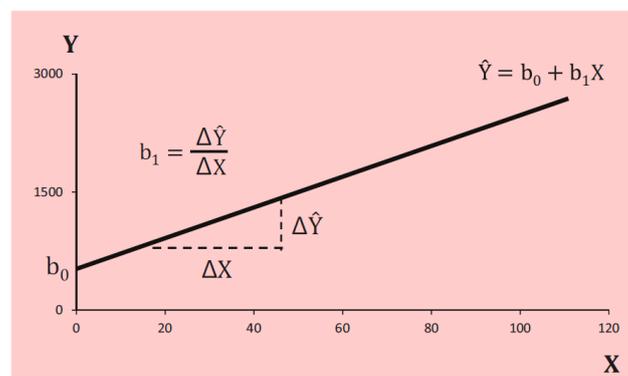


Abbildung 3.1: Lineare Regressionsfunktion [Backhaus *et al.*, 2016]

Sind neben einer unabhängigen Variable noch weitere Einflussfaktoren Gegenstand der Betrachtung, kann die multiple Regression angewandt werden. Es gilt:

$$Y = b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + \dots + b_j * X_j \quad (\text{Formel 3})$$

Limitation der Methode:

Für die Anwendung der Methode müssen die Daten einem linearen Trend folgen. Nicht-lineare Regressionen sind zwar möglich, erhöhen den Aufwand und mindern die Genauigkeit der Aussage aber ungemein. Entscheidend ist zudem die Datenbasis, die möglichst gänzlich abgebildet sein sollte, um Extrembereiche, die dem linearen Trend möglicherweise nicht mehr unterliegen, zu vermeiden [Wosniok, 2017]. Backhaus *et al.* (2016) geben zu bedenken, dass die jeweilige Bezeichnung *abhängige* und *unabhängige* Variable nicht darüber hinwegtäuschen darf, dass es sich bei der in einer Regressionsanalyse unterstellten Kausalbeziehung oft nur um eine Hypothese, also eine Vermutung des Untersuchers, handelt. Die Autoren weisen eindringlich darauf hin, dass eine derartige Hypothese immer auf ihre Plausibilität geprüft werden muss. Dazu bedarf es außerstatistischen Wissens, d. h. theoretischer und sachlogischer Überlegungen oder auch der Durchführung von Experimenten. Denn weder mittels Regressionsanalyse noch sonstiger statistischer Verfahren können Kausalitäten zweifelsfrei nachgewiesen werden. Vielmehr vermag die Regressionsanalyse nur Korrelationen zwischen Variablen nachzuweisen. Dies ist zwar eine notwendige, aber noch keine hinreichende Bedingung für Kausalität. [Backhaus *et al.*, 2016; Engelhardt, 2014]

3.2 Stoffstromanalyse

Die Stoffstromanalyse, welche auch als Stoffflussanalyse (SFA) oder Materialflussanalyse (MFA) bezeichnet wird, ist eine detaillierte Untersuchung der Stoff- und Energieflüsse in einem zeitlich und räumlich definierten System [Brunner/Rechberger, 2004]. Stoffe, Güter und Prozesse werden dabei quantitativ und qualitativ erfasst, beschrieben und interpretiert. Sie eignen sich zu dem Zweck, komplexe Systeme auf die für eine Fragestellung relevanten Materialien und Prozesse zu reduzieren. Auf dieser Basis können zielgerichtete Maßnahmen abgeleitet oder Szenarien zur Optimierung verglichen werden [Brunner *et al.*, 2003]. Der Umfang einer solchen Analyse wird dabei maßgeblich durch den gewählten Bilanzraum und ihre Bilanztiefe bestimmt.

Heute findet die Stoffstromanalyse vielfach Verwendung in abfallwirtschaftlichen Fragestellungen. Der Ursprung der Stoffstromanalyse liegt jedoch in den frühen 20er Jahren. Lange bevor ihre umfassende Methodik entwickelt und sie zu einem Werkzeug für die Bilanzierung von z. B. Abfällen und Ressourcen verwendet wurde, nutzten Wissenschaftler der chemischen Verfahrenstechnik das Prinzip der Prozessbilanzierung, um Stoff- und Energieflüsse zu analysieren und bilanzieren. Maßgeblich weiterentwickelt wurde die Methode der Stoffstromanalyse von Baccini/Brunner in den 80er Jahren. Sie führten in ihrem Buch *The Metabolism of the Anthroposphere* [Baccini/Brunner, 1991] eine systematische und umfangreiche Definition der Methode der Stoffstromanalyse und seiner Begriffe ein:

Ein **Stoff** ist darin definiert als ein chemisches Element oder eine chemische Verbindung.

Güter sind definiert als Stoffe und Stoffgemische, die vom Menschen bewertete Funktionen erfüllen. Dies sind z. B. Trinkwasser, Abfall, Klärschlamm etc. oder auch Produkte.

Ein **Material** kann sowohl einen Stoff als auch ein Gut bezeichnen. Der Begriff wird zumeist verwendet, wenn Stoffe und Güter betrachtet werden.

Als **Prozess** werden der Transport, die Transformation und die Lagerung von Stoffen und Gütern bezeichnet. Bei dem Transport von Gütern und Stoffen, die von außerhalb der Systemgrenze in das System gelangen, spricht man von Importen, bei Stoffen und Gütern, die das System verlassen, spricht man von Exporten. Transporte von Gütern und Stoffen zwischen Prozessen innerhalb des Systems werden als Flüsse oder Ströme bezeichnet. In ein Prozess eingehende Stoffe werden als Input, ausgehende Stoffe als Output bezeichnet.

Ein **System** charakterisiert die Menge an Prozessen und Flüssen und deren Beziehungen untereinander. Durch die Bezeichnung der Elemente im System werden diejenigen, die nicht zum System gehören, ausgegrenzt und somit die Systemgrenzen definiert. Systemgrenzen definieren so die räumliche und auch zeitliche Abgrenzung des zu untersuchenden Systems.

Abbildung 3.2 zeigt die schematische Darstellung eines Systems.

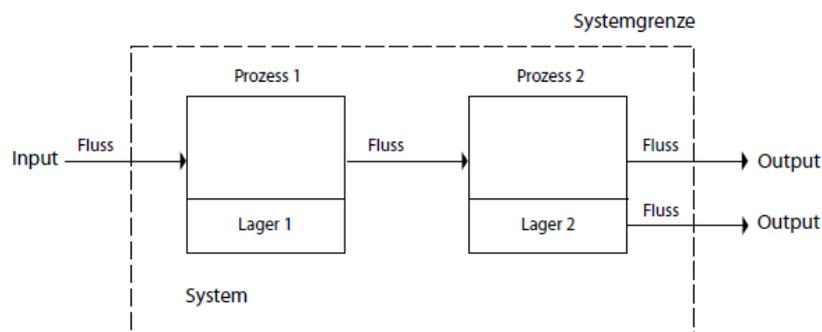


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung eines Systems mit Systemgrenze, Prozessen und Flüssen [Kranert, 2010]

Eine besondere Bedeutung kommt den Transferfunktionen zu. Sie beschreiben die Verteilung eines Stoffes innerhalb eines Prozesses auf verschiedene Produkte (Abbildung 3.3). Das Inputgut X_E wird in einem Prozess auf drei verschiedene Outputgüter verteilt. Der Quotient aus Output X_n und Input X_E bezeichnet den Transferkoeffizienten. Die Summe des Transferkoeffizienten muss in Summe 100 % betragen, sofern keine Umwandlung in einen anderen Stoff erfolgt.

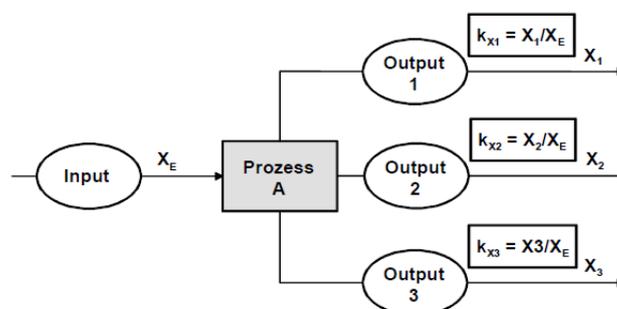


Abbildung 3.3: Transferfunktionen zur Verteilung eines Inputguts X [Brunner et al., 2003]

3.3 Softwareauswahl

Idealerweise ließen sich sowohl die multivariate Analyseverfahren als auch die Stoffstromanalyse in einer Software umsetzen. Die Integration umfassender, multivariater Regressionsanalysen in einem Stoffstromtool ist jedoch nur bedingt möglich und sollte besser mit einer dafür konzipierten Software durchgeführt werden [Stock, 2017]. In Fachkreisen wird dazu häufig das Statistikprogramm SPSS verwendet. Für die in der Arbeit erforderliche Detailtiefe ist jedoch auch das Tabellenkalkulationsprogramm MS Excel geeignet. Es beinhaltet die gewünschten Datenanalysewerkzeuge und ermöglicht eine übersichtliche und gut nachvollziehbare Dateneingabe. Zudem erlaubt es durch seine weite Verbreitung die potenzielle Erschließung eines großen Anwenderkreises.

Für die Modellierung und Abbildung der in der Diskurswelt dargestellten Materialflüsse und Prozesse (u. a. Erfassungssysteme, Behandlungsanlagen) bedarf es einer Software zur Stoffstromanalyse. Die Modellierung mit MS Excel oder Matlab wäre denkbar. MFA-spezifische Software sind STAN, UMBERTO® oder GaBi. Weitere Softwareprogramme mit denen abfallwirtschaftliche Systeme abgebildet werden können sind, EASETECH, SimaPro oder Sim Dynamics¹. Letztere legen jedoch einen verstärkten Fokus auf die Life-Cycle-Assessment-Methode (LCA), in der auch Vor- und Nachketten untersucht werden. Da die Forschungsarbeit nicht den Anspruch einer umfassenden Ökobilanz erhebt, werden diese Programme nicht weiter auf ihre Eignung überprüft.

MS Excel/Matlab: Diese Programme sind, insbesondere im akademischen Bereich, leicht verfügbar. Eine Stoffstromanalyse ist grundsätzlich denkbar, aufgrund mangelnder Übersichtlichkeit komplexer Modelle und vielschichtiger Zellenbezüge jedoch weniger geeignet als MFA-fokussierte Software. In der Literatur sind daher auch nur wenige Anwendungsfälle für MFA zu finden.

STAN: In diesem, als Freeware erhältlichen, Tool ist nur eine eingeschränkte Prozessabbildung möglich. So können zum Beispiel weder Prozesslimitationen noch nichtlineare Spezifikationen integriert werden.

UMBERTO®: UMBERTO® ist ein lizenzpflichtiges Tool zur Modellierung, Berechnung und Visualisierung von Material- und Energieflüssen. Es erlaubt Grundoperationen wie das Einpflegen frei definierbarer Materialien und Materialeigenschaften. Der grafische Modellaufbau ermöglicht den anschaulichen und strukturierten Aufbau komplexer Abfallsysteme. Die Prozessspezifikationen reichen von der Eingabe einfacher linearer Koeffizienten bis hin zu leistungsfähigen, parametrisierten, ggf. nicht linearen Prozessbeschreibungen. Ein großer Vorteil der Software, insbesondere im Hinblick auf das Gesamt-Prognosemodell, ist die Möglichkeit, das Stoffstrommodell mit Excel zu verknüpfen. So kann das Stoffgruppenaufkommen des Regressionsmodells direkt über so genannte *LiveLinks* in das UMBERTO®-Modell übertragen werden.

¹ Quellen: Matlab [The MathWorks, 2018]; STAN [IWR, 2012], UMBERTO® [ifu, 2018]; GaBi [Thinkstep, 2018]; EASETECH [DTU]; SimaPro [PRé Sustainability, 2015]; Sim Dynamics [Simdynamics, 2016]

GaBi: Grundsätzlich können mit dem lizenzpflichtigen Produkt Stoffstrommodelle modelliert und bilanziert werden. Seine Funktionsweise kommt dem der Software UMBERTO® sehr nahe.

Bewertung

Die Stoffstromanalyse mit MS Excel und STAN ist generell möglich, wird aber durch die Bedienerfreundlichkeit oder die eingeschränkten Möglichkeiten zur Prozessspezifikation limitiert. GaBi und UMBERTO® eignen sich für die Modellierung gleichermaßen. Aufgrund der umfassenden Modellierungsoptionen, der Verknüpfung zu Excel und der aktuell vorliegenden Softwareverfügbarkeit wird das geplante Stoffstrommodell mit UMBERTO® (Version UMBERTO® NEXT Efficiency 7.1) erstellt. Die Regressionsanalyse zum demografischen Wandel wird in einer separaten Excelmappe durchgeführt. Die Werte aus Excel werden via LiveLink direkt an das Stoffstrommodell übertragen. Die gleiche Schnittstelle wird für die Parametrisierung des Modells verwendet, etwa, um etwaige andere Variablen wie Kapazitäten der Anlagen und Abfalleigenschaften in das UMBERTO®-Modell zu speisen. So kann die Excelmappe gewissermaßen als Eingabemaske für Variablen des Stoffstrommodells genutzt werden. Wird das Modell später ggf. für externe Anwender geöffnet, hat dies den Vorteil, dass der Anwender die für seinen Bilanzraum zutreffenden Variablen der Steuerungsgrößen in die einzelnen Exceltabellen eintragen kann, ohne in die komplexen Modellstrukturen und -algorithmen des Stoffstrommodells eingreifen zu müssen.

3.4 Darstellung und Beschreibung des Objektsystems

Im nächsten Schritt der Modellbildung wird die Diskurswelt durch subjektive Interpretation auf ein Objektsystem übertragen. Die in Abbildung 2.3 schematisch abgebildeten realweltlichen Objekte wie Erfassungssysteme und Behandlungsanlagen sollen als abstrakte Repräsentanten dargestellt und das realweltliche Verhalten durch das Einbetten von Algorithmen wiedergegeben werden.

Bei der Erstellung von Stoffstrommodellen mittels UMBERTO® werden Material- und Energieströme eines Systems sowie deren Umwandlung in Prozesse als *Netz* modelliert. Dieses Netz besteht aus drei Grundelementen: den Transitionen, Stellen und Verbindungen:

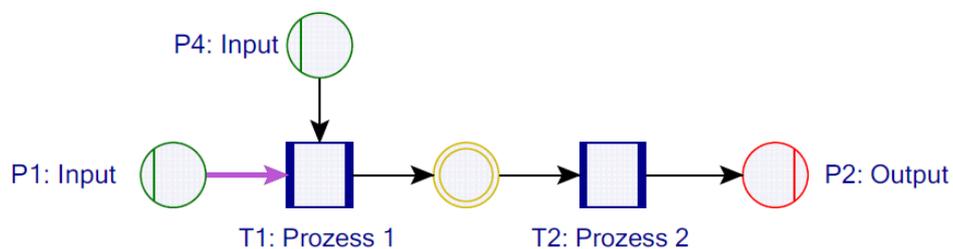


Abbildung 3.4: Elemente des Objektsystems

Transitionen stehen stellvertretend für Prozesse oder Anlagen, in denen die Energie- und Stoffumwandlung und/oder der Stoffstromtransfer stattfinden/stattfindet (mittels linearer und/oder nichtlinearer Spezifikation). Stoffumwandlungen/-transfers der linearen Spezifikation

werden über Koeffizienten definiert. In der nichtlinearen Spezifikation werden X-Variablen (Inputs) und Y-Variablen (Outputs) unter Einbezug beliebig wählbarer Variablen (z. B. Materialeigenschaften, Transferfaktoren) in frei definierbare Algorithmen eingebunden. Formel 4 und 5 zeigen beispielhaft die Umsetzung anhand eines Prozesses bei Müllverbrennungsanlagen:

$$Y00=X00*HEIZWERT_STOFFGRUPPE \quad (\text{Formel 4})$$

Energiegehalt Stoffgruppe [MJ] = Stoffgruppe [Mg] * Heizwert Stoffgruppe [MJ/Mg]

$$Y01=X01*ANTEIL_MVA \quad (\text{Formel 5})$$

Stoffgruppe [Mg] = Stoffgruppe [Mg] * Anteil dieser Stoffgruppe in die MVA [%]

Darüber hinaus können IF-Abfragen in die Algorithmen integriert (Formel 6) und das Einhalten von Prozessparametern visualisiert werden (Abbildung 3.5):

$$IF(>(ENERGIE_AM*0.0002778,MAX_FWL_MVA),ENERGIE_AM*0.0002778-MAX_FWL_MVA,0) \quad (\text{Formel 6})$$

Formel 6 besagt, wenn die Energie der Abfallmischung [MWh] größer ist als die maximale Feuerungswärmeleistung [MWh] dann zeige den Differenzwert an. Ist die Energie der Abfallmischung kleiner als die maximale Feuerungswärmeleistung zeige 0.

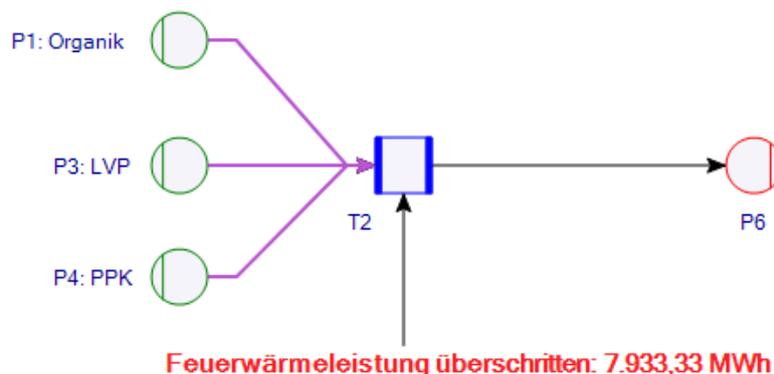


Abbildung 3.5: Beispielhafte Darstellung einer Kapazitätsüberschreitung im Objektsystem

Stellen repräsentieren die Input- und Outputs, wobei eine Stelle stets mehrere Materialien enthalten kann. Die Verbindungsstellen bilden die Übergabepunkte zwischen den Transitionen. Sie verteilen die Ströme, können aber nicht als Lager wirken. Eine direkte Verbindung von Transition zu Transition ist nicht möglich.

Verbindungen zeigen den Materialfluss im Netz an. Schwarze Pfeile enthalten berechnete Flüsse, während der rosafarbene Pfeil einen *manuellen Fluss* anzeigt. Dieser dient als Referenzwert für die Berechnung des im Prozess hinterlegten Algorithmus.

Beispiel: Enthält ein manueller Fluss den Wert 1 für das Material Wasser [L], so kann der Algorithmus, welcher pro 1L Wasser unter Einbezug weiterer Inputs 1,3L Suspension herstellt,

auch nur 1,3L Suspension herstellen. Wird der manuelle Wert jedoch auf 5 erhöht, errechnet der Algorithmus eine Menge von 6,5L Suspension.

Auf Grundlage der Diskurswelt ergibt sich die Objektwelt, die im Folgenden auszugsweise dargestellt wird:

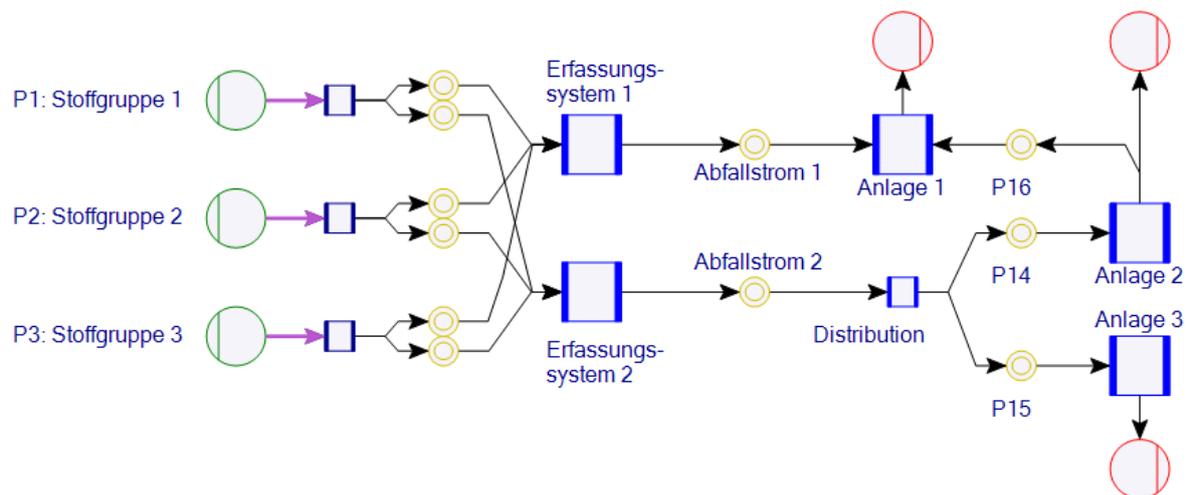


Abbildung 3.6: Auszüge der Diskurswelt, dargestellt im Objektsystem

Diverse Stoffgruppeninputs werden über Erfassungssysteme in Stoffströme überführt, ehe sie in eine Anlage oder über die Transition *Distribution* auf die verschiedenen Anlagen verteilt werden. Dort werden sie behandelt und verlassen als Output den Bilanzraum oder werden als Sekundärabfall in eine andere Anlage gelenkt.

Die Übergabepunkte mit der Exceltabelle sind in Abbildung 3.7 gekennzeichnet. Das absolute Stoffgruppenaufkommen, als Ergebnis der in Excel durchgeführten Regressionsanalyse, wird in die manuellen Stoffflüsse eingetragen. Aus weiteren Tabellenblättern der Mappe können die Eingabevariablen der Erfassungssysteme, der Distributionen sowie der Anlagenparameter übergeben werden; ihre Eingabefelder sind farblich gekennzeichnet. Übertragen werden jeweils die Werte des Zieljahres, welches über ein Dropdownmenü festgelegt werden kann.

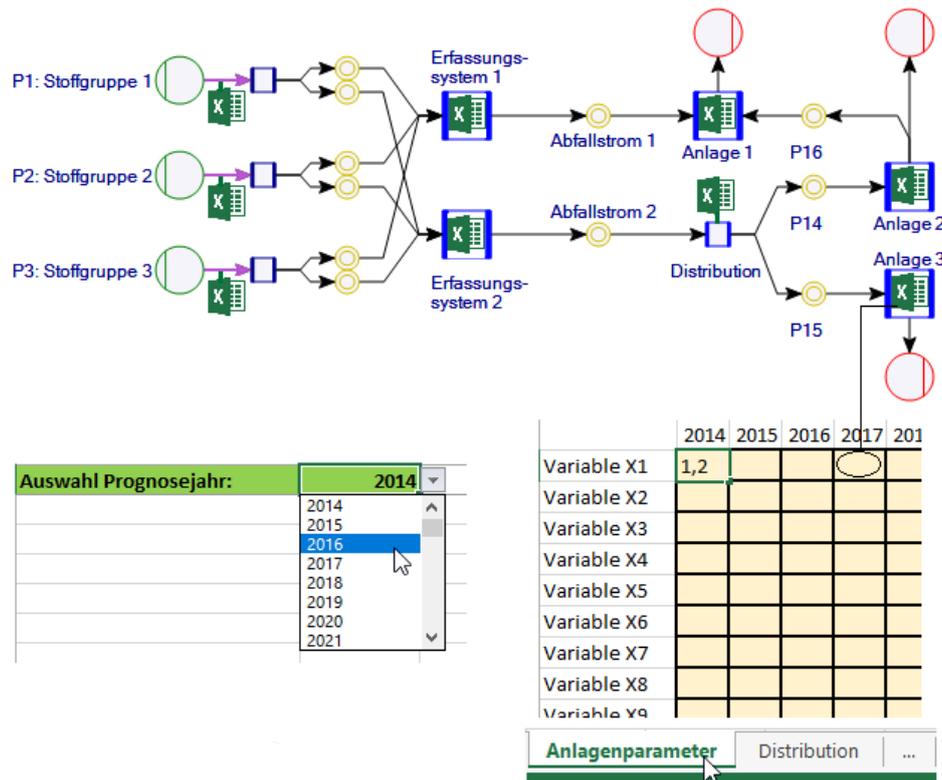


Abbildung 3.7: Excelverknüpfungen zwischen Eingabemaske und Stoffstrommodell

Über die Sankey-Option lassen sich die einzelnen Materialflüsse, bzw. der Fluss der für das spätere Modell relevanten Stoffgruppen, über das gesamte Netz nachvollziehen²:

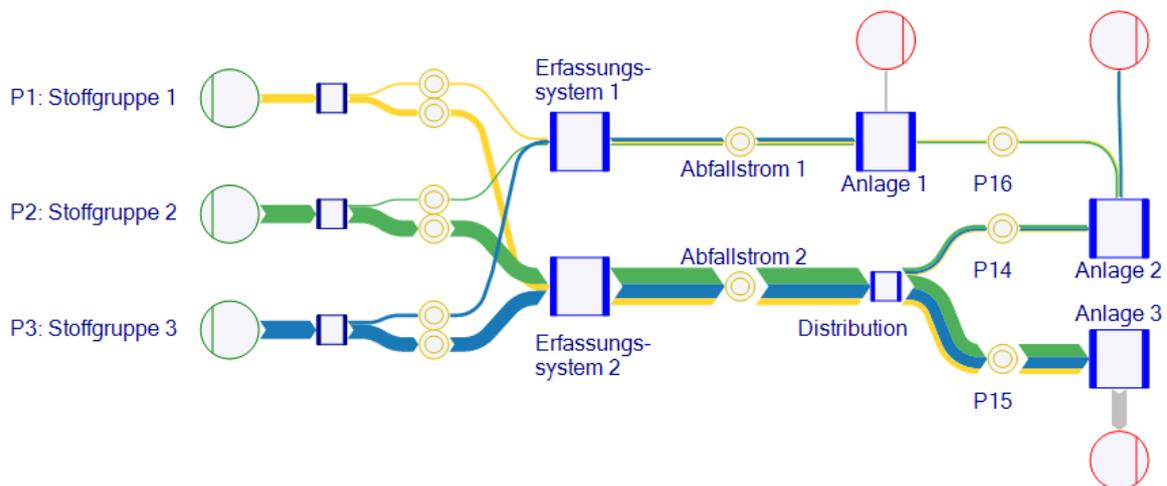


Abbildung 3.8: Sankeydarstellung des Stoffgruppenverlaufs

Die Outputbilanzen können in Form einer Excelmappe ausgegeben oder Werte direkt im Stoffstrommodell angezeigt werden. Sollen die Bilanzen mehrerer Jahre verglichen werden, bedarf es jeweils der Arbeitsschritte *Wahl des Zieljahres*, *Update der Livelinks in UMBERTO®* und *Berechnung der Stoffstromnetze*. Die so gewonnenen Bilanzen müssen anschließend zu einer Vergleichstabelle zusammengeführt werden.

² Die Anzeige ausgewählter Stoffgruppen ist mit UMBERTO® NXT Efficiency nicht möglich. Diese Funktion böte UMBERTO® NXT Universal, bei der einzelne Materialien als Impact-Sankey dargestellt werden können [ifu, 2017].

4 Entwicklung des Modellsystems

In diesem Kapitel wird der Übergang von Diskurswelt und Objektsystem in das Modellsystem vollzogen. Dabei kann eine Minimierung der Komplexität erfolgen. Der Modellierer entscheidet, wie detailliert das tatsächliche Modell werden soll, indem irrelevante Sachverhalte eliminiert und relevante Sachverhalte fokussiert werden. Diese Maßnahmen hängen im Wesentlichen vom Verwendungszweck ab, aber auch eine unzureichende Datenlage kann darüber entscheiden, welche Aspekte mit in das Modell aufgenommen werden.

Zu Beginn werden die Stoffgruppen ausgewählt. Für die Modellierung des ersten Steuerungsmoduls werden demografische Faktoren im Hinblick auf ihren Einfluss auf die Abfallwirtschaft untersucht, auf eine sinnvolle Auswahl eingegrenzt und das entsprechende Regressionsmodell in MS Excel angelegt. Die Erstellung des UMBERTO®-Stoffstrommodells beginnt mit der Modellierung des Steuerungsmoduls *Erfassungssysteme*, in dem alle für relevant erachteten Erfassungssysteme hinterlegt werden. Das Ergebnis sind Abfallströme, für dessen späteres Stoffstrommanagement das Steuerungsmodul *Distribution* angelegt wird. Abschließend folgt die Anlagenauswahl und -modellierung. Steuerbar wird der Anlagenpark durch das Modul *Kapazitäten und Transferfaktoren*, wobei sich die Auswahl der kapazitätslimitierenden Parameter und Transferfaktoren zum Stoffübergang auf ein für den Umfang der vorliegenden Arbeit sinnvolles Minimum beschränkt. Das Modellsystem enthält zu dieser Zeit noch keine Daten. Die Eingabe erfolgt erst im Kapitel 5 Modellanwendung. Zum besseren Verständnis der Modellierungsabfolge zeigt Abbildung 4.1 noch einmal die Diskurswelt:

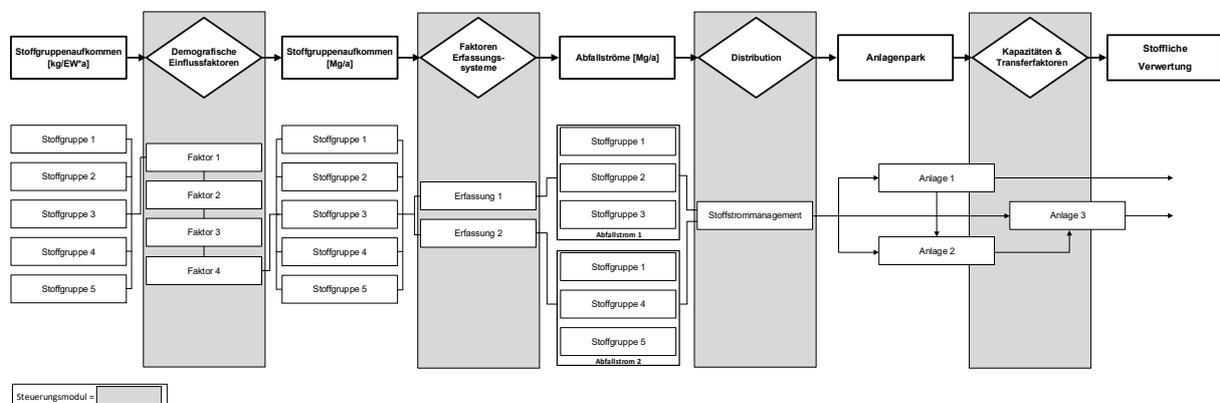


Abbildung 4.1: Vorgehen bei der Entwicklung des Modellsystems

4.1 Stoffgruppenauswahl

Die Stoffgruppenauswahl, wie sie für diese Arbeit getroffen wurde, orientiert sich an der sächsischen Sortierrichtlinie [LfULG, 2016], die sich zur Aufgabe gemacht hat, Sortieranalysen zu vereinheitlichen. Sie wird seit 1998 genutzt und wurde in einer Fortschreibung 2014 aktualisiert. Sie findet auch über das Bundesland Sachsen hinaus Anwendung und ist in drei Differenzierungsebenen gegliedert (siehe Tabelle 4.1). In der Arbeit wird der Detailgrad der 1. Differenzierungsebene als Basis verwendet. Mögliche Alternativen, wie die Systematik des Statistischen Bundesamtes, sind hier nicht zielführend, da die dortige Differenzierung lediglich auf Abfallstrom-, nicht jedoch auf Stoffgruppenebene erfolgt.

Tabelle 4.1: Stoffgruppen nach Differenzierungsebenen gemäß Sächsischer Sortierrichtlinie [LfULG, 2016 modifiziert]

1. Differenzierungsebene	2. Differenzierungsebene	3. Differenzierungsebene
Metalle*	Fe-Verpackungen	Getränkedosen, Konservendosen, Fe-Aerosoldosen, Umreifungsbänder, sonstige Fe-Verpackungen
	Sonstige Fe-Metalle (keine Verpackungen)	Sonstige Fe-Metalle
	NE-Verpackungen	Aluminium-Dosen, Aluminium-Aerosoldosen, NE-Verschlüsse
	Sonstige NE-Metalle (keine Verpackungen)	Sonstige NE-Verpackungen, sonstige NE-Metalle
Papier, Pappe, Kartonagen	PPK-Verpackungen	Papier, Pappe, Kartonagen, Einweggeschirr, sonstige PPK-Verpackungen
	PPK-Druckerzeugnisse und Administrationspapiere	Zeitungen, Zeitschriften/Illustrierte, Bücher, Administrationspapiere, sonstige PPK-Druckerzeugnisse und Administrationspapiere
	Sonstige PPK (keine Verpackungen)	Pappmöbel, Papiertapeten, sonstige PPK
	Hygienepapiere	Taschentücher Küchenkrepp, Servietten Sonstige Hygienepapiere
Glas	Glas-Verpackungen	Weißglas, Braunglas, Grünglas, sonstige Glas-Verpackungen
	Hohlglas	Röhrenglas, Trinkgläser, Medizinische Gläser, sonstige Hohlgläser (keine Verpackungen)
	Sonstiges Glas (keine Verpackungen)	Flachglas, sonstige Gläser
Kunststoffe LVP*	Kunststoff-Verpackungen	Becher, Blister, Folien > DIN A4, Folien < DIN A4, Schaumstoffe, Hohlkörper, Einweggeschirr, Umreifungsbänder, Polystyrol, sonstige Kunststoff-Verpackungen
Kunststoffe StNVP*	Sonstige Kunststoffe (keine Verpackungen)	Folien, Fensterrahmen, Rohre, Dämmmaterial, Kunststoffmöbel, sonstige Kunststoffe
Organik (soweit nicht einer anderen Stoffgruppe zugeordnet)	Küchenabfälle	Fleisch, Fisch, Knochen, gekochte Speisereste, sonstige Küchenabfälle
	Gartenabfälle	Laub, Strauchwerk und Baumschnitt, Rasenschnitt, Schnitt- und Topfblumen, sonstige Gartenabfälle
	Sonstige Organik	Biologisch abbaubare Verpackungen Sonstige nicht genannte Organik
Holz	Holz-Verpackungen	Holz-Verpackungen
	Sonstiges Holz (soweit nicht einer anderen Stoffgruppe zugeordnet)	Holzmöbel, sonstige Hölzer
Textilien	Bekleidungstextilien	Bekleidungstextilien
	Sonstige Textilien	Haustextilien (Decken, Handtücher etc.), Heimtextilien (Gardinen, Teppiche etc.), Produktionsspezifische Textilien
	Altschuhe	Altschuhe

1. Differenzierungsebene	2. Differenzierungsebene	3. Differenzierungsebene
Mineralstoffe (kein Glas)	Keramik/Porzellan Sonstige Mineralstoffe	Keramik/Porzellan-Verpackungen, sonstige Keramik/Porzellan Sonstige Mineralstoffe
Verpackungsverbunde*	Verbundverpackungen	Papier-Kunststoff-Verbunde, Kunststoff-Metall-Verbunde, Papier-Metall-Verbunde, Getränkekartons, sonstige Verbundverpackungen
Verbunde (komplexe Produkte)*	Elektro- und Elektronik-Altgeräte Verbund-Möbel Fahrzeugteile Sonstige Verbunde	Gasentladungslampen, sonstige Leuchtmittel, sonstige Elektro- und Elektronik-Altgeräte Polstermöbel, Matratzen, sonstige Verbundmöbel Fahrzeugteile Holz-Metall-Verbunde, Kunststoff-Metall-Verbunde, Holz-Metall-Textilien-Verbunde, sonstige Verbunde
Schadstoffe (Problemabfälle)	Batterien Akkumulatoren Altmedikamente Altchemikalien Altöhlhaltige Materialien Sonstige schadstoffbelastete Stoffe	Batterien Akkumulatoren Altmedikamente Altchemikalien Altöhlhaltige Materialien Sonstige schadstoffbelastete Stoffe
Stoffe a.n.g. (Windeln)*	Hygieneprodukte	Windeln, sonstige Hygieneprodukte
Stoffe, a.n.g. (ohne Windeln)*	Leder Gummi Kork Gefüllte Verpackungen/nicht restentleerte Verpackungen Sonstige Stoffe, a.n.g.	Leder-Verpackungen, sonstiges Leder Gummi-Verpackungen, sonstiges Gummi Kork-Verpackungen, sonstiges Kork Organik, sonstige Füllungen, Verpackungen Sonstige Stoffe, a.n.g.
Fraktion < 10 mm	Fraktion < 10 mm	Fraktion < 10 mm

*Im Zuge der Arbeit wurde die Stoffgruppeneinteilung der 1.Differenzierungsebene dahingehend erweitert, dass die Gruppen Kunststoffe, Verbunde und Stoffe a.n.g. noch ein weiteres Mal unterteilt wurden. Kunststoffe wurden in *Kunststoffe LVP* und *Kunststoffe StNVP* und Verbunde in *Verpackungsverbunde* und *Verbunde* unterteilt, da die Unterscheidung für die spätere Untersuchung der Wertstofftonne von Relevanz ist. Die Stoffe a.n.g. wurden in *Stoffe a.n.g. (Windeln)* und *Stoffe a.n.g. (ohne Windeln)* unterteilt, da der Stoffgruppe Windeln für den Faktor demografische Wandel eine bedeutende Rolle zugesprochen wird. Im Gegenzug wurde zur Reduktion der Komplexität Hygienepapier der Fraktion PPK zugeordnet und Fe/NE-Metalle zu einer Gruppe zusammengefasst.

Die Eingabe der Stoffgruppenaufkommen erfolgt in der MS Excel-Eingabemaske, Tabellenblatt *Stoffgruppenaufkommen* in vordefinierten Zellen:

Stoffgruppenaufkommen	
Aufkommen [kg/EW*a]	2014
Metalle	9,8
PPK	89,4
Glas	31,9
Kunststoffe LVP	22,3
Kunststoffe StNVP	8,7
Organik	108,2
Holz	3,1
Textilien	8,1
Mineralstoffe	8,0
Verpackungsverbunde	5,8
Verbunde sonstige	5,3
Schadstoffe	0,8
Windeln	17,2
Stoffe a.n.g. (ohne Windeln)	1,8
Fraktion < 10 mm	24,0

Abbildung 4.2: Ausschnitt der Eingabemaske für das Stoffgruppenaufkommen

4.2 Anlegen des demografischen Regressionsmodells

Dass die Bevölkerungszahl als alleinige erklärende Variable nicht ausreicht, hat Abbildung 2.1 gezeigt. Sie muss als Indikator verstanden werden, in dem andere erklärende Variablen repräsentiert sind. Tabelle 4.2 zeigt demografische Merkmale aus verschiedenen Quellen, die für die weitere Berücksichtigung zu Einflussfaktoren zusammengefasst werden:

Tabelle 4.2: Demografisch bedingte Einflussfaktoren auf das Abfallaufkommen

Quelle	Demografische Merkmale	Einflussfaktor
Zwisele/Nogueira	Bevölkerung	Bevölkerung
Hoffmeister	absolute Bevölkerung	
Bilitewski/Härdtle	Personenzahl eines entsorgten Gebäudes	Haushaltsgröße
Zwisele/Nogueira	Haushaltsgröße	
Kranert	Haushaltsgröße	
Hoffmeister	Haushaltsgröße	Altersstruktur
Zwisele/Nogueira	Altersstruktur	
Kranert	Alter	
Hoffmeister	Altersstruktur	Siedlungsdichte
Bilitewski/Härdtle	Größe der entsorgten Gemeinde, Fläche, EW	
Zwisele/Nogueira	Wohnlage, Siedlungsstruktur, Einwohnerdichte	
Kranert	Bebauungsstruktur (städtisch/ländlich)	
Hoffmeister	Einwohnerdichte (Stadt/Land)	Soziales
Faulstich	Siedlungsdichte	
Bilitewski/Härdtle	Örtliche/regionale Unterschiede hinsichtlich der Sozialstruktur	
Zwisele/Nogueira	Ausländeranteil, Bildung Sozialindex I (soziale/gesundheitliche Belastungen) Sozialindex II (Erwerbsleben, Bildung, Migration)	Wirtschaftliches
Kranert	Bildung	
Bilitewski/Härdtle	örtliche und regionale Unterschiede hinsichtlich der Wirtschaftskraft	Kaufkraft
Zwisele/Nogueira	Wirtschaftsentwicklung (Bruttowertschöpfung)	
Kranert	Wirtschaftsstruktur	
Hoffmeister	Allgemeine Wirtschaftsentwicklung	Erwerbstätigkeit
Zwisele/Nogueira	Kaufkraft/ Konsum (Haushaltsnettoeinkommen)	
Kranert	Einkommen	Erwerbstätigkeit
Hoffmeister	Kaufkraft/Konsum	
Zwisele/Nogueira	Erwerbstätigkeit (soz.vers.pfl. Beschäftigte)	

Quelle	Demografische Merkmale	Einflussfaktor
Hoffmeister	Entwicklung der Erwerbstätigen	
Bilitewski/Härdtle	Konsum- und Lebensgewohnheiten, Lebensstandard	
Kranert	Lebensstandard, Konsumverhalten, Mode	divers
Kranert	Umweltbewusstsein	

[Quellen: Kranert (2010), Hoffmeister (2007), Zwisele/Nogueira (2014), Bilitewski/Härdtle (2013), Faulstich *et al.* (2016)]

Untermauert werden die Nennungen durch Angaben/Daten (teils empirisch erhoben) von Sammet/Wachter (1976), Huber (1984), Lösch (1984), Döppenschmidt (1993), Seidel (1998; zitiert in Dörffel, 2006) und Tietz (2006).

Daraus ergibt sich die folgende Zusammenstellung der Einflussfaktoren:

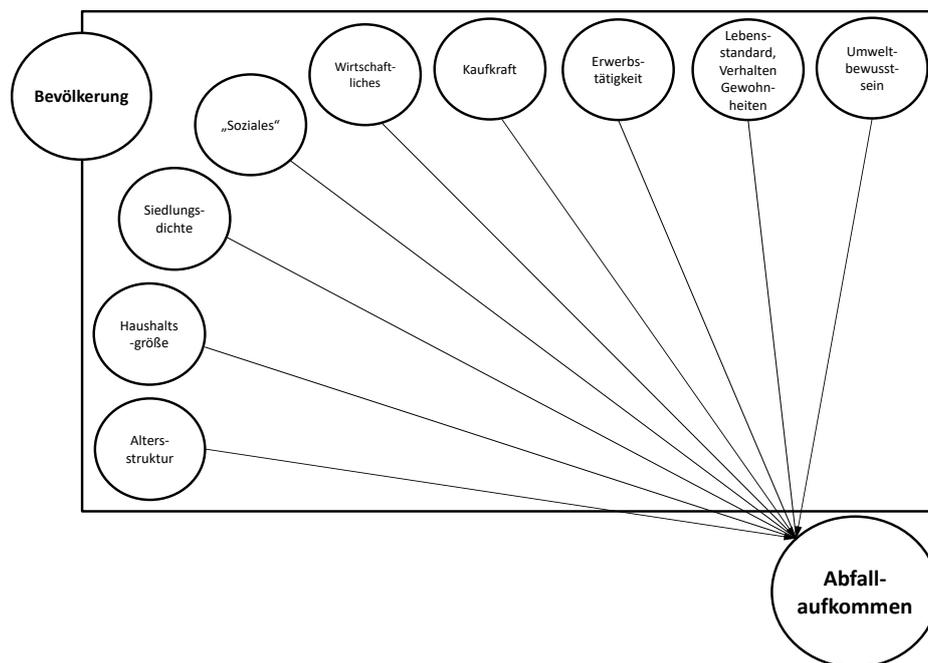


Abbildung 4.3: Demografische Einflussfaktoren auf das Abfallaufkommen

Bei einer Vielzahl der Einflüsse ist jedoch davon auszugehen, dass sich deren abfallspezifische Muster bereits in anderen Faktoren wiederfinden (siehe Abbildung 4.4). So wird davon ausgegangen, dass das *Umweltbewusstsein* sehr stark vom *Alter* und dem Punkt *Soziales* (Bildungsstand, Ausländeranteil etc.) abhängt. Im Resultat ist das Umweltbewusstsein durch den Einbezug dieser Faktoren bereits ausreichend abgedeckt. Der Aspekt *Lebensstandard/Verhalten/Gewohnheiten* spiegelt sich ebenfalls in der Altersstruktur wider, aber auch in den Punkten *Erwerbstätigkeit* bzw. *Kaufkraft*. Die Kaufkraft ist definiert als das verfügbare Nettoeinkommen unter Berücksichtigung der Inflationsrate. In der Kaufkraft findet sich demnach die Erwerbstätigkeit, von der das Einkommen maßgeblich abhängt, bereits wieder. Der Punkt *Wirtschaftliches* ist sekundär zu betrachten. Er wirkt sich in der Regel verstärkt auf Produktions- oder Gewerbeabfälle aus, weniger auf die Siedlungsabfälle. Ein Einfluss auf die Einwohner wäre zu erwarten, führe eine schwache wirtschaftliche Lage zu Kürzungen von Weihnachts-/Urlaubsgeld oder zu Kurzarbeit. Das sind Fakten, die sich letztendlich auf die Kaufkraft auswirken, welche bereits in die Auswahl mit einbezogen wurde.

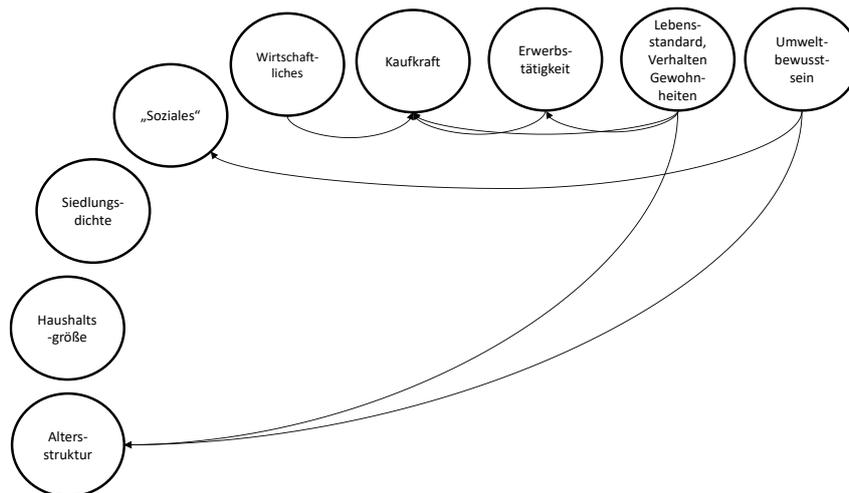


Abbildung 4.4: Eingrenzung der demografischen Einflussfaktoren

Die Auswahl möglicher Einflussfaktoren auf das Abfallaufkommen reduziert sich folglich auf die Aspekte Bevölkerung, Kaufkraft, Haushaltsgröße, Siedlungsdichte, Soziales und Altersstruktur. Für den Einbezug in das Modell ist im nächsten Schritt zu klären, für welchen der Aspekte statistisch abgesicherte Daten vorliegen. Umfassende Prognosen zur Bevölkerungsentwicklung inklusive der Altersstruktur und Wohnform werden in regelmäßigen Abständen vom Statistischen Bundesamt für den Bilanzraum Deutschland veröffentlicht. Darüber hinaus können landes- oder kreisweite Bevölkerungsstatistiken abgerufen werden (siehe www.destatis.de). Aus der Einwohnerzahl und der Flächenangabe der Landkreise und kreisfreien Städte lässt sich die durchschnittliche Siedlungsdichte pro Person ermitteln. Schwierig gestaltet sich die Datenlage hingegen bei dem Punkt Soziales. Ein möglicher Ansatz wäre der *Sozialindex*. Er misst die soziale Belastung von Schulaufsichtsbezirken und basiert auf einer Reihe soziodemografischer Faktoren (z. B. Arbeitslosen- oder Sozialhilfequote) in einem Kreis oder einer kreisfreien Stadt [Frein *et al.*, 2006]. Daten dazu sind jedoch gar nicht oder nur mit sehr großem Aufwand zu erhalten. Zudem basiert der Index nur in drei Punkten auf Informationen statistischer Ämter. Die restlichen 21 Kriterien werden anhand von Eltern/Schülerbefragungen ermittelt [BSB, 2017]. Der Index unterliegt daher einer Unschärfe, so dass für die vorliegende Arbeit vereinfacht angenommen wird, dass sich der Punkt Soziales ebenfalls in der Kaufkraft widerspiegelt. Bei geringer Bildung, geringer Erwerbstätigkeit und hoher sozialer Belastung ist zwangsläufig von einer geringeren Kaufkraft auszugehen. Abbildung 4.5 veranschaulicht die weitere Eingrenzung der Faktoren:

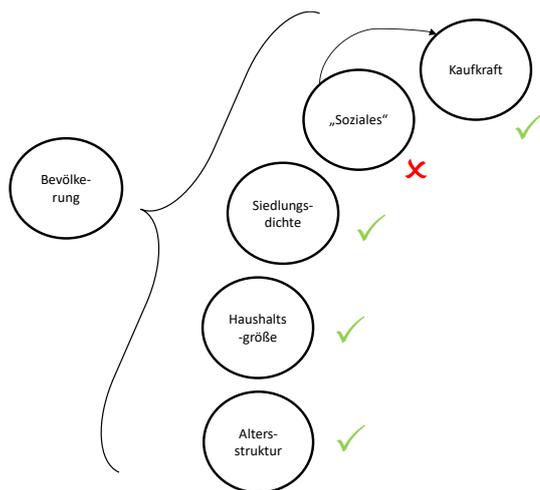


Abbildung 4.5: Demografische Einflussfaktoren mit statistisch fundierter Datenlage

Neben den allgemeinen statistischen Daten ist die Kenntnis über die spezifischen Abfallverhaltensmuster der Faktoren unabdingbar. Im Idealfall werden diese durch gezielte Sortieranalysen ermittelt. Da derartige Erhebungen im Rahmen dieser Arbeit nicht leistbar sind, kann ausschließlich auf bereits bestehende Auswertungen zurückgegriffen werden.

Für die vorhandenen Daten ist im weiteren Schritt zu überprüfen, ob der Regressor tatsächlich eine erklärende Variable darstellt und ob er eine signifikante Wirkung auf den Regressand ausübt. Damit wird sichergestellt, dass ausschließlich einflussnehmende Variablen bei der Modellbildung berücksichtigt werden.

Kaufkraft

Den Einfluss der Kaufkraft auf das Abfallaufkommen hat Hoffmeister (2007) untersucht. Dafür wurden die Abfallbilanzen von 439 Kreisen und kreisfreien Städten mit den demografischen Randbedingungen gegenübergestellt. Abbildung 4.6 zeigt die Korrelation aus Kaufkraft und Abfallaufkommen. Überträgt man die Steigung auf das Restabfallaufkommen, so kann verallgemeinert gesagt werden, dass mit steigenden Kaufkraft auch das Abfallaufkommen ansteigt.

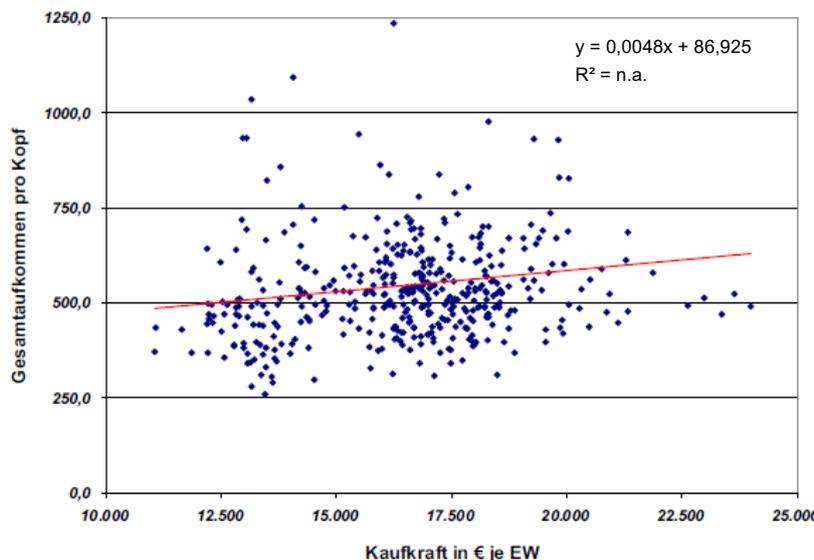


Abbildung 4.6: Korrelation von Kaufkraft und Gesamtabfallaufkommen pro Person [Hoffmeister, 2007]

Ähnliche Beobachtungen, jedoch auf internationaler Ebene, bestätigen die Erhebungen der Worldbank, bei denen die Kaufkraft Erklärungswerte von R^2 0,92 und 0,95 auf das Abfallaufkommen haben [vgl. Worldbank In: Kranert 2010/ Worldbank, 2012]. Diese Variable muss daher im Modell berücksichtigt werden. Sie wird gebildet aus dem verfügbaren Nettoeinkommen und der Inflationsrate.

Siedlungsdichte

Bereits Lösch wies 1984 auf den Effekt hin, dass das Pro-Kopf-Abfallaufkommen mit zunehmender Siedlungsdichte ansteigt und beruft sich dabei auf VDI (1968), Pöpel (1969), Shin (1969), Tabasaran (1972) und Straub (1978) [Lösch, 1984]. Neuere Erhebungen vom VKS (2004; In: Hauser, 2007) und Faulstich *et al.* (2016) bestätigen diesen Trend. Hauser beruft sich auf eine vom VKS veröffentlichte Betriebsdatenauswertung aus 2004, während Faulstich *et al.* das Abfallaufkommen von 127 kommunalen Abfallbilanzen den dort geltenden Siedlungsdichten gegenübergestellt haben. Dabei folgt zwar nicht jede Region der Regel „je dichter besiedelt, desto mehr Abfall“, aber ein eindeutiger Trend ist zu erkennen (siehe Abbildung 4.7 und Abbildung 4.8). Das mag unter anderem durch einen erhöhten Anteil an unverpackten Waren (z. B. Marktgut) im ländlichen oder der zunehmenden *To-Go*-Kultur im städtischen Raum begründet sein.

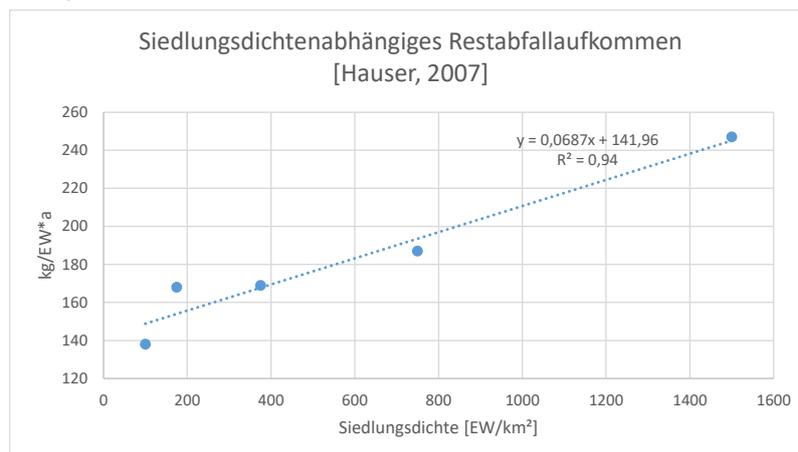


Abbildung 4.7: Korrelation von Siedlungsdichte und Restabfallaufkommen [nach Hauser, 2007; eigene Darstellung]

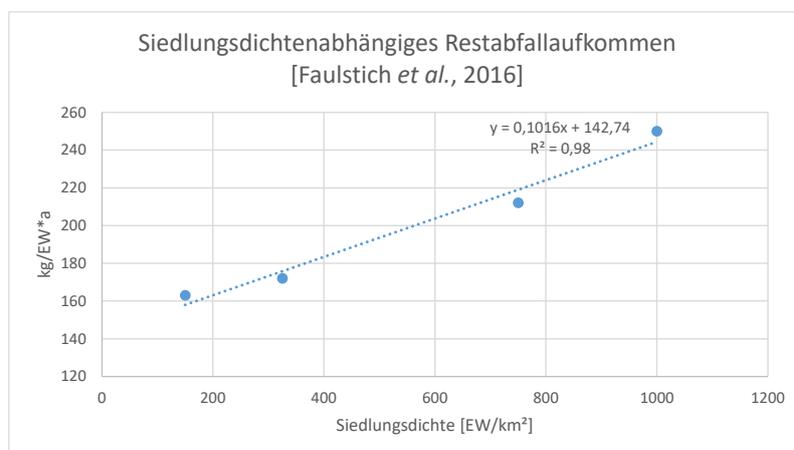


Abbildung 4.8: Korrelation von Siedlungsdichte und Restabfallaufkommen [nach Faulstich *et al.*, 2016; eigene Darstellung]

Mit Erklärungswerten von $R^2 = 0,94$ und $0,98$ ist die Siedlungsdichte als relevanter Einflussfaktor auf das Abfallaufkommen einzustufen und infolgedessen in das Modell mit einzubeziehen.

Haushaltsgröße

Ein weiterer Einflussfaktor für die Abfallmengenentwicklung ist die Haushaltsgröße. Bereits 1976 stellten Sammet/Wachter (1976; in Döppenschmidt 1993) fest, dass mit steigender Haushaltsgröße das spezifische Müllaufkommen pro Kopf der Bevölkerung zurückgeht. Gleiches bestätigen Lösch (1984) und Huber (1984). Diese Einschätzungen und Angaben werden durch jüngere Literaturangaben bestätigt. Unter anderem verweist Dörfel (2006) auf eine Ausarbeitung von Seidel (1998), wonach die von Ein-Personen-Haushalten produzierte Abfallmenge pro Kopf höher liegt als die von Mehrpersonen-Haushalten. Noch detaillierter benennt Tietz (2006) den Zusammenhang, wonach die einwohnerspezifische Abfallmenge bei zunehmender Haushaltsgröße aufgrund des Konsumverhaltens, der Mehrfachnutzung und Abfallverhaltens sinkt. Untersuchungen von Hoffmeister (2007) und Zwisele/Nogueira (2014) belegen die genannten Thesen ebenfalls.

Während zum Beispiel Hoffmeister, Zwisele/Nogueira und Lösch lediglich das in Bilanzen dokumentierte Abfallaufkommen mit demografischen Randbedingungen gegenübergestellt haben, hat Huber (1984) experimentell Daten zum Abfallaufkommen nach Haushaltsgrößen erhoben, wie die folgende Grafik zeigt:

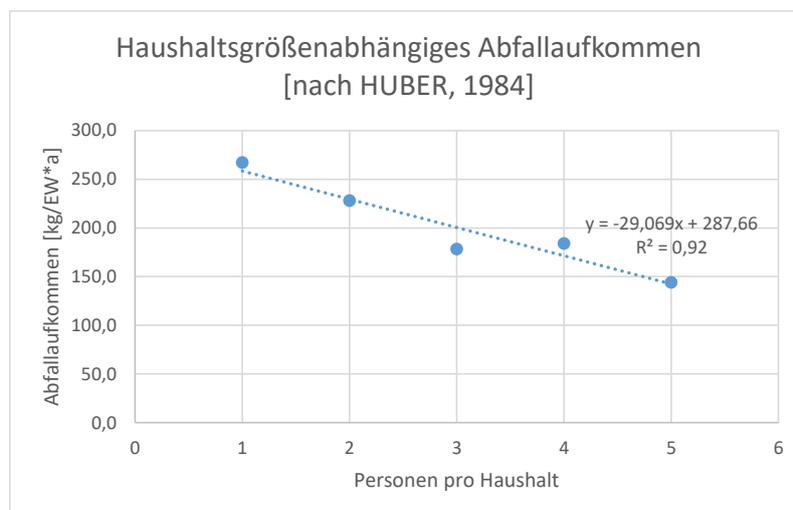


Abbildung 4.9: Korrelation von Haushaltsgröße und Abfallaufkommen [Huber, 1984; eigene Darstellung]

Ein Erklärungswert von 92 % ($R^2=0,92$) begründet die Aufnahme dieser unabhängigen Variable in das Prognosemodell.

Altersstruktur

Der Einfluss des Alters wurde bisher deutlich weniger untersucht als das Abfallaufkommen nach Haushaltsgrößen oder der Siedlungsdichte. Untersuchungen gibt es von Lösch, Döppenschmidt, Hoffmeister und Zwisele/Nogueira. Lösch (1984) hat sich auf die Abhängigkeit der Hausmüllmenge vom Anteil der Einwohner unter 15 Jahren konzentriert. Dabei zeigt sich, dass das Abfallaufkommen geringer wird, je größer der Anteil der Unter-15-

Jährigen ist. Dies wird auch durch eine Einschätzung von Hoffmeister (2016) widerspiegelt, welche besagt, dass das Abfallaufkommen im Wesentlichen von der Kaufkraft abhängt, die für die einzelnen Altersgruppen unterschiedlich stark ausfällt. Diese Aussage wird im Rahmen dieser Arbeit nur bedingt bestätigt. In Anlehnung an Abbildung 4.10, weist die Altersgruppe 15-19 Jahre mit Abstand die geringste Kaufkraft auf. Bei der Altersgruppe <15 Jahre (nicht abgebildet) fällt sie noch geringer aus. Würde man die Kaufkraft mit dem altersspezifischen Abfallmuster gleichsetzen, würde das Abfallaufkommen in der Altersgruppe <20 Jahre gegen Null gehen und in den Altersgruppen bis 64 Jahre deutlich steigen. Ab 65 Jahren würde das Abfallaufkommen wieder sinken, obwohl Hoffmeister im Jahr 2007 noch die Vermutung aufstellte, dass das Abfallaufkommen bei steigendem Anteil der Personen über 60 Jahre zunimmt. Eine Verknüpfung von Alter und Kaufkraft ist daher als kritisch zu betrachten, da die Zuordenbarkeit von Konsum und Abfallaufkommen innerhalb der Altersklassen nicht zweifelsfrei auseinandergehalten werden kann. So konsumiert die Altersgruppe 20-60 Jahre zum Beispiel Windeln für die Kategorie <20 Jahre, als Abfall sind diese aber der Gruppe <20 Jahre zuzuordnen.

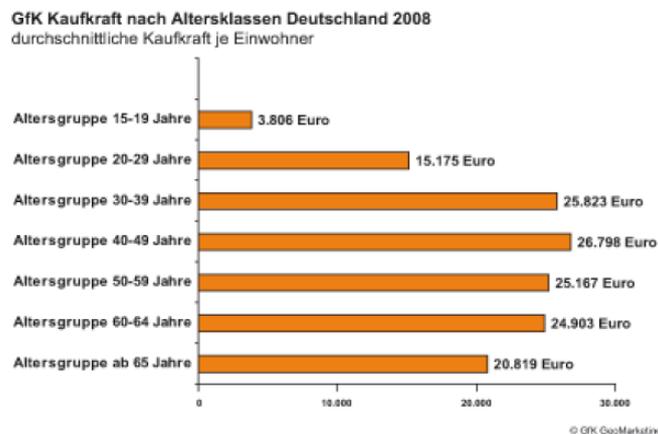


Abbildung 4.10: Kaufkraft nach Altersklassen in Deutschland [GfK in ProAgeMedia, 2008]

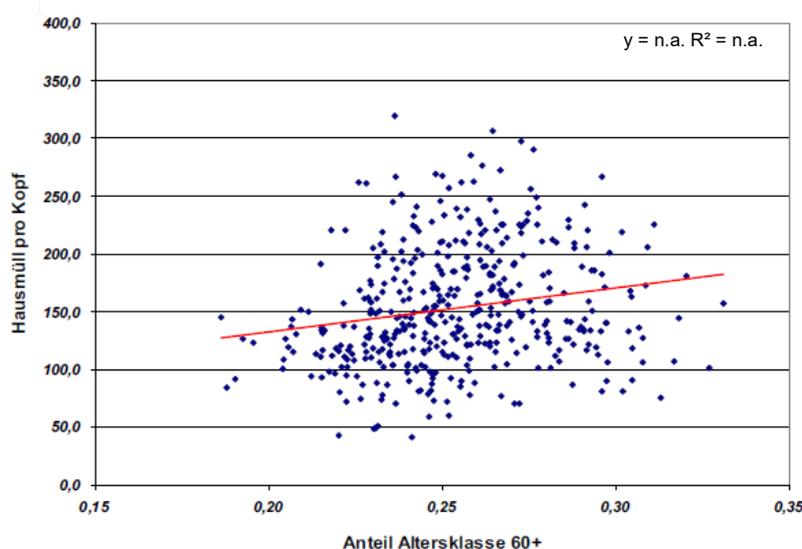


Abbildung 4.11: Korrelation Abfallaufkommen und Anteil Altersklasse 60+ [Hoffmeister, 2007]

Im Gegenzug kam Döppenschmidt (1993) zu dem Ergebnis, dass es zwischen dem Müllaufkommen verschiedener Altersgruppen keine signifikanten Unterschiede gibt.

Der Einfluss des Alters auf das Abfallaufkommen kann an dieser Stelle nicht eindeutig geklärt werden. Von einer Berücksichtigung im Modell wird daher abgesehen.

Zusammenfassende Darstellung und Bewertung der Faktorenauswahl

Die finale Auswahl der Einflussfaktoren beschränkt sich im weiteren Vorgehen auf die Aspekte Kaufkraft, Siedlungsdichte, Haushaltsgröße und Bevölkerung:

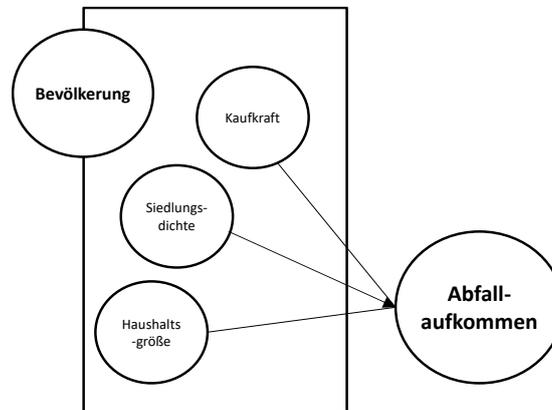


Abbildung 4.12: Finale Auswahl der Einflussfaktoren

Zu bedenken sei bei der Auswahl, dass die Kausalität zwischen den unabhängigen Variablen und dem Abfallaufkommen nicht zweifelsfrei nachgewiesen ist. Mit Ausnahme der Haushaltsgröße, für die Huber (1984) experimentell Daten erhoben hat, wurden die Indikatoren Siedlungsdichte und Kaufkraft nicht auf Basis einer kausalen Beziehung zur Prognosevariablen ausgewählt, sondern auf Basis ihrer Korrelation mit der Prognosevariablen. Bei nichtexperimentellen Studien (Beobachtungsstudien), wie sie von Faulstich *et al.* (2016) und Hoffmeister (2007) getätigt wurden, ist der Schluss von statistischen Zusammenhängen auf kausale Wirkungsbeziehungen immer mit einem Irrtumsrisiko verbunden.

Im bestmöglichen Fall werden Daten zum Abfallaufkommen für unterschiedliche demografische Randbedingungen empirisch erhoben und in das Regressionsmodell eingepflegt. Die statistische Auswertung von Abfallbilanzen und den dazu geltenden demografischen Randbedingungen ist möglich, bietet aber keine hinreichende Kausalitätsprüfung.

Einbindung in das Modell

Bevor eine Prognose anhand multipler Regression durchgeführt werden kann, bedarf es zunächst einer Prüfung, welche der unabhängigen Variablen tatsächlich einen signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable hat. Mittels schrittweiser Regression wird eine nützliche Teilmenge von Regressoren bestimmt, die in der Modellbildung berücksichtigt werden (Variableneinschluss). Bei jedem Schritt des Verfahrens kann systematisch die signifikanteste Variable hinzugefügt oder die am wenigsten signifikante Variable entfernt werden, so dass die Zielfunktion einen möglichst hohen Erklärungswert bzw. ein möglichst hohes Gesamtbestimmtheitsmaß R^2 annimmt (UZH, 2017).

Des Weiteren ist der Ausschluss der Multikollinearität, d.h. Korrelation unabhängiger Variablen untereinander, mittels partieller Korrelation erforderlich. Es ist nicht davon auszugehen, dass sich alle Faktoren isoliert auf das Abfallaufkommen auswirken. Als Beispiel sei die Vermischung des altersspezifischen Abfallmusters mit dem wohnformspezifischen Abfallaufkommen zu nennen. Zudem ist aktuell nicht nachzuweisen, dass das erhöhte Abfallaufkommen dicht besiedelter Regionen letztendlich aus dem erhöhten Anteil an Singlehaushalten, denen ebenfalls ein erhöhtes Pro-Kopf-Abfallaufkommen nachgesagt wird, resultiert. Hypothetisch betrachtet, könnte sich der Sachverhalt auch wie folgt widerspiegeln:

Je dichter besiedelt eine Region ist, desto höher ist das Abfallaufkommen. Heißt das nun, dass die hohe Siedlungsdichte zum erhöhten Abfallaufkommen führt? Nicht unbedingt. Möglicherweise bedeutet eine hohe Korrelation nicht automatisch eine hohe Kausalität. In diesem Fall könnte eine dritte Variable, die Haushaltsgröße, für diesen scheinbaren Zusammenhang verantwortlich sein. Die Regionen mit einer hohen Siedlungsdichte weisen in der Regel eine erhöhte Anzahl an kleinen Haushaltsgrößen auf. Aus dem gleichen Grund haben sie auch ein höheres Abfallaufkommen, da kleinen Haushaltsgrößen ein erhöhtes Abfallaufkommen zugeschrieben wird. Berechnet man die partielle Korrelation der Siedlungsdichte und des Abfallaufkommens und kontrolliert dabei die Variable Haushaltsgröße, kann es unter Umständen sein, dass keine signifikante Korrelation mehr festzustellen ist. Dies würde bedeuten, dass der eigentliche Zusammenhang zwischen der Haushaltsgröße und des Abfallaufkommens und zwischen der Haushaltsgröße und der Siedlungsdichte besteht und nicht zwischen dem Abfallaufkommen und der Siedlungsdichte. (vgl. Keller, 2013)

Im Ergebnis würde eine der Variablen von der Berechnung ausgeschlossen werden.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation liegen weder eigens empirisch erhobene Daten noch eine fundierte Datenbasis gleichen Ursprungs vor. Dies führt dazu, dass die multiple Regression nicht zur Anwendung kommen kann, da die Kombination unterschiedlicher Datensätze in einem Regressionsmodell unzweckmäßig und die Daten der unabhängigen Variablen zudem nicht einheitlich intervallskaliert sind.

Aufgrund dieser Tatsachen wird die Methode in vereinfachter Form angewandt (Reduktion der Kompliziertheit). Dazu wird die einfache Regression der Faktoren Haushaltsgröße, Kaufkraft und Siedlungsdichte herangezogen, um ihre jeweiligen spezifischen Pro-Kopf-Abfallaufkommen zu ermitteln. Aus ihnen wird ein Mittelwert gebildet, der anschließend mit der Einwohnerzahl multipliziert wird (Formel 7).

$$Y = (((b_0 + b_1 * x_1) + (b_0 + b_2 * x_2) + (b_0 + b_3 * x_3))/3)*EW \quad (\text{Formel 7})$$

mit:

Y = abhängige Variable

b₀ = Schnittpunkt mit der Y-Achse der jeweiligen Regression

b = Steigung der jeweiligen Regression

x = unabhängige Variable

Die Regressionsgleichungen orientieren sich dabei an Trends aus vorherigen Forschungsarbeiten (u. a. Huber, Faulstich, Hoffmeister), wurden aber an Realwerte des Status quo angeglichen. Dabei bleibt das prozentuale Steigungsverhältnis der Ursprungstrendlinie erhalten. Abbildung 4.13 zeigt beispielhaft, wie das Steigungsverhältnis aus der Erhebung von Huber (1984) auf den Status quo übertragen wurde. 2014 betrug die durchschnittliche HH-Größe 1,99 EW/HH und wies ein durchschnittliches Restabfallaufkommen von 162 kg/EW*a auf. Gemäß des Trends von Huber (1984) sinkt oder steigt das Restabfallaufkommen um 10 % je dazukommendem oder wegfallendem Einwohner:

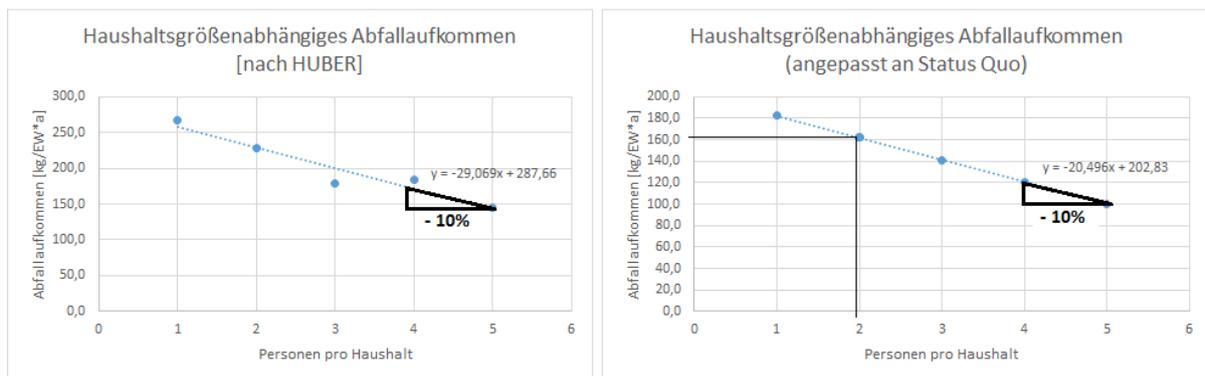


Abbildung 4.13: Übertrag des Regressionstrends an den Status quo

Es ergibt sich eine neue Regression, welche zur Prognosefunktion herangezogen werden kann, indem für die Prognosejahre der x-Wert (Haushaltsgröße) variiert wird.

Diese Methodik wurde auf alle Stoffgruppen und alle Faktoren übertragen. Die folgenden Graphen zeigen die Regression am Beispiel der Stoffgruppe Organik:

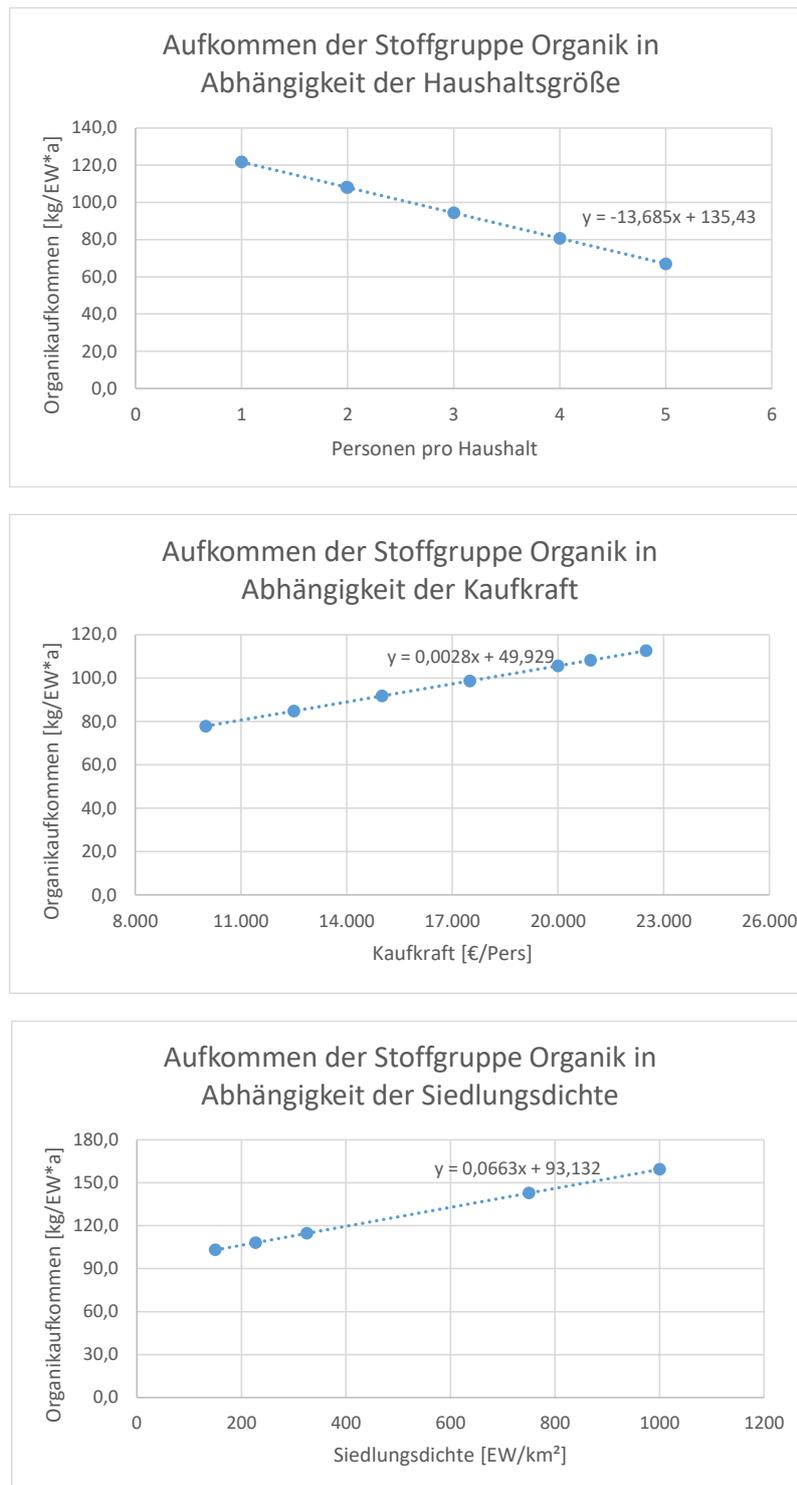


Abbildung 4.14: Multifaktorielle Regressionen zur Ermittlung des Organikaufkommens

Im aktuellen Stand des Modells nutzen die Regressionen aller Stoffgruppen die Trends vorheriger Forschungsarbeiten, um das Verhalten der Einflussfaktoren auf das Abfallaufkommen zu beschreiben. Bei Kenntniszuwachs und/oder Szenarienbildung kann jede Regression, insbesondere im Hinblick auf das individuelle Stoffgruppenverhalten, angepasst werden. So könnte das Organikaufkommen weniger an die Kaufkraft gebunden sein als andere Stoffgruppen oder in ländlichen Regionen aufgrund der stärkeren Gartendichte zunehmen, obgleich dünn besiedelte Regionen zu geringerem Abfallaufkommen tendieren.

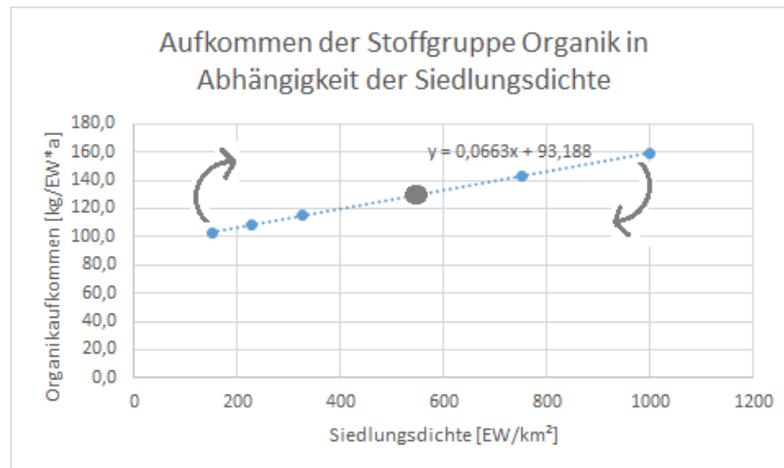


Abbildung 4.15: Anpassung der Regression an neue Gegebenheiten

4.3 Integration der Erfassungssysteme

Primär sollen die in der Arbeit adressierten Erfassungssysteme Wertstofftonne und Biotonne modelliert werden. Da der Ausbau der Wertstofftonne nur schrittweise erfolgt, bedarf es zur Erfassung von Leichtverpackungen nach wie vor eines Parallelsystems (Gelber Sack/Gelbe Tonne). Um das Portfolio der Wertstofffassung abzurunden, wird das Modell noch um die Papier- und Glassammlung ergänzt. Da sich mit Etablierung der (neuen) Systeme auch der *Restabfall* in seiner Menge und Zusammensetzung ändern wird, was im Ergebnis einen Einfluss auf die behandelnden Anlagen hat, wird dieser ebenso in die Betrachtung einbezogen. Somit ergibt sich die folgende Auswahl an Erfassungssystemen:

- Wertstofftonne
- Gelber Sack/Gelbe Tonne
- Papiersammlung
- Glassammlung
- Biotonne
- Restabfall

Die Zuweisung der einzelnen Stoffgruppenanteile zu den Wertstofffassungssystemen erfolgt durch Algorithmen unter Einbezug der in der Praxis gängigen Variablen:

- **Anschlussquote** als Maß der Verbreitung eines Sammelsystems [vgl. Krause/Oetjen-Dehne/Dehne, 2014]
- **Erfassungsquote** als Maß des Erfassungserfolges eines Wertstoffs aus dem spezifischem Wertstoffanteil in Restmüll und Wertstoffsammlung [vgl. Bünemann *et al.*, 2011 und Dehoust/Christiani, 2012]
- **Störstoffanteil** als Maß für nicht zuweisungsgemäß im Sammelgemisch oder in Sorten enthaltene Abfälle [Dehoust/Christiani, 2012].

Im Detail beschreibt die Anschlussquote das Verhältnis zwischen Einwohnern mit einem Tonnensystem X zu Einwohnern gesamt:

$$\text{Anschlussquote} = \frac{\text{Einwohner mit Sammelsystem}}{\text{Einwohner gesamt}}$$

Sie hängt vom Etablierungsgrad des Systems, örtlichen Gegebenheiten (Vorbehalt der technischen und wirtschaftlichen Zumutbarkeit) und gesetzlichen Schlupflöchern ab. Eine hohe Anschlussquote bedeutet jedoch nicht automatisch eine hohe Erfassungsquote. Fühlen sich die Bürger möglicherweise zu einem neuen Sammelsystem genötigt, ist nicht nur von einer geringeren Erfassungsquote auszugehen, ebenso steigt auch der Anteil an Störstoffen.

Die Erfassungsquote beschreibt das Verhältnis der erfassten Wertstoffgruppenmenge zum Wertstoffgruppenpotential (Wertstoffgruppenaufkommen + Wertstoffgruppenanteil im Restabfall):

$$\text{Erfassungsquote} = \frac{\text{Wertstoffgruppe}}{\text{Wertstoffgruppe} + \text{Wertstoffgruppenanteil im Restabfall}}$$

Wertstofffassungssysteme, die mehrere Stoffgruppen adressieren (Beispiel Wertstofftonne, u. a. Kunststoffe und Metalle), enthalten eine Erfassungsquote für jede Wertstoffgruppe.

Der Störstoffanteil beschreibt die Gesamtheit an Störstoffen und deren Verhältnis zur Gesamtmenge aus Wertstoff und Störstoffen³.

$$\text{Störstoffanteil} = \frac{\text{Störstoffe}}{\text{Wertstoff} + \text{Störstoffe}}$$

Realistisch kann nicht von einer 100%igen Anschlussquote bei gleichzeitigem Vorliegen einer 100%igen Erfassungsquote ausgegangen werden, so dass nach wie vor Wertstoffanteile den Weg in den Restabfall finden (Wertstoffverlust). Auch alle weiteren Stoffgruppenanteile, die nicht einer Wertstofffassung zugeführt werden, werden in den Restabfall transferiert.

Die Variablen für die Wertstofffassungssysteme können in der Eingabemaske für den gewünschten Prognosezeitraum und -bilanzraum eingegeben werden (siehe Abbildung 4.16). Dabei können sich die Anschlussquote, die Erfassungsquote und der Störstoffanteil inkl. der Störstoffzusammensetzung über die Jahre ändern. Dies wäre beispielsweise bei einem geplanten Ausbau des Erfassungssystems erforderlich.

³ Während ein Fremdstoff nicht zwangsläufig als Störstoff agiert, zum Beispiel der *intelligente Fehlwurf*, ist ein Störstoff als prozessbehindernder Stoff im Sammelgemisch zu verstehen.

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Flächendeckende Biotonne						
(Geschätzte) Anschlussquote [%]	64,5	69,5	74,5	76,5	78,5	80,5
(Geschätzte) Erfassungsquote gesamt [%]	81,5	79,5	77,5	75,5	73,5	71,5
(Geschätzter) Störstoffanteil in 100 % [%]	3	3,5	4	4,5	5	5,5
davon:						
Metalle [%]	7	7	7	7	7	7
Glas [%]	10	10	10	10	10	10
Kunststoff LVP [%]	15	15	15	15	15	15
Kunststoff StNVP [%]	30	30	30	30	30	30
Mineralien [%]	30	30	30	30	30	30
Windeln [%]	8	8	8	8	8	8

Abbildung 4.16: Ausschnitt der Eingabemaske zur Erfassung von Abfällen für die Biotonne

Die Eingabeoptionen in der Maske variieren je nach Wertstofffassungssystem.

Für die Anwendung im Algorithmus werden die Eingabevariablen in spezifische Variablen umgewandelt. Dadurch können die Algorithmen im Stoffstrommodell kompakter und übersichtlicher gestaltet werden. Abbildung 4.17 zeigt unter anderem die absolute Erfassungsquote, in die die Anschlussquote integriert wurde:

ÜBERTRAG UMBERTO BIOTONNE:						
ERFASSUNGSQUOTE_BIO_GESAMT	52,5675	55,2525	57,7375	57,7575	57,6975	59,1175
STOER_METALLE_IN_BIO	0,1104	0,1354	0,1617	0,1819	0,2019	0,2219
STOER_GLAS_IN_BIO	0,1577	0,1934	0,2310	0,2599	0,2885	0,3174
STOER_LVP_IN_BIO	0,2366	0,2901	0,3464	0,3899	0,4327	0,4755
STOER_STNVP_IN_BIO	0,4731	0,5802	0,6929	0,7797	0,8655	0,9523
STOER_MINERALIEN_IN_BIO	0,4731	0,5802	0,6929	0,7797	0,8655	0,9523
STOER_WINDELN_IN_BIO	0,1262	0,1547	0,1848	0,2079	0,2308	0,2537
ERFASSUNGSQUOTE_BIO_OHNE STOER	50,9905	53,3187	55,4280	55,1584	54,8126	56,9376

Abbildung 4.17: Spezifische Variablen zur Verwendung im Algorithmus Wertstofffassung

Die spezifischen Variablen werden über die *Livellink*-Verknüpfung an das Stoffstrommodell übertragen. Die letztendliche Zuweisung der Stoffgruppen zu den Erfassungssystemen folgt der nachstehenden Logik, dargestellt am Beispiel der Stoffgruppen *Organik* (Formeln 8 - 11) und *Metalle* (Formeln 12 - 17) (die mit Semikolon und grün dargestellten Zeilen stellen Kommentarzeilen ohne rechnerische Funktion dar):

Verteilung der Stoffgruppe Organik:

;Störstoff Organik in GS

$$Y02 = \text{INF_GESAMTAUFKOMMEN_GS} * \text{STOER_ORGANIK_IN_GS} \quad (\text{Formel 8})$$

;Störstoff Organik in WST

$$Y03 = \text{INF_GESAMTAUFKOMMEN_WST} * \text{STOER_ORGANIK_IN_WST} \quad (\text{Formel 9})$$

;Organik in die Biotonne

$$Y00 = X00 * \text{ERFASSUNGSQUOTE_BIO_OHNE_STOER} \quad (\text{Formel 10})$$

;Organik in die Restmülltonne

$$Y01 = X00 - (Y00 + Y02 + Y03) \quad (\text{Formel 11})$$

Verteilung der Stoffgruppe Metall:

;Störstoff Metall in die Biotonne

$$Y00 = \text{ORGANIK_AUFKOMMEN} * \text{STOER_METALLE_IN_BIO} \quad (\text{Formel 12})$$

;Störstoff Metall in die PPK-Sammlung

$$Y02 = \text{PPK_AUFKOMMEN} * \text{STOER_METALLE_IN_PPK} \quad (\text{Formel 13})$$

;Störstoff Metall in die Glas-Sammlung

$$Y01 = \text{GLAS_AUFKOMMEN} * \text{STOER_METALLE_IN_GLAS} \quad (\text{Formel 14})$$

;Metalle in GS

$$Y04 = X00 * \text{ERFASSUNGSQUOTE_METALLE_GS} \quad (\text{Formel 15})$$

;Metalle in WST

$$Y05 = X00 * \text{ERFASSUNGSQUOTE_METALLE_WST} \quad (\text{Formel 16})$$

;Metall in die Restmülltonne

$$Y03 = X00 - (Y00 + Y01 + Y02 + Y04 + Y05) \quad (\text{Formel 17})$$

mit:

Y= Ausgangsvariable

X= Eingangsvariable

Abfallströme

Mit den genannten Erfassungssystemen werden die Abfallströme *Wertstoffe aus WST/GS, PPK, Glas* und *Abfälle für die Biotonne* jeweils inkl. Störstoffe sowie *Hausmüll/hausmüllähnlicher Gewerbeabfall gemeinsam gesammelt* erhalten.

Darüber hinaus soll dem Modell die Flexibilität eingeräumt werden, weitere Abfälle in die Betrachtungen mit einbeziehen zu können. Dafür wurden entsprechende Platzhalter geschaffen, die mit Daten eines beliebigen Abfallstroms gefüllt werden können. Beispielhaft wurden im Rahmen der Arbeit *Garten- und Parkabfälle* mit einbezogen. Sie spielen für die spätere Betrachtung der Kompostierungsanlagen eine Rolle, da besonders bei Kombianlagen keine klare Trennung möglich ist. Zudem wird *Sperrmüll* integriert, um die Bandbreite der häuslichen Abfälle möglichst breit aufzustellen. Auf den Einbezug von Textilien, E-Schrott und Batterien wurde aufgrund der schwer abgrenzbaren Datenlage und thematisch anderer Schwerpunktsetzung verzichtet. Als nicht häuslicher Abfälle wurden *getrennt gesammelte, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle* und *Abfallimporte* mit aufgenommen. Die Aufnahme weiterer Abfallströme kann zum Beispiel für zukünftige Stoffstrommanagementstrategien von Interesse sein. Um die Arbeit thematisch fokussiert zu halten und aus Mangel an Daten wird für die letztgenannten Abfälle auf die Detailebene der Stoffgruppenbetrachtung und die Überführung in Abfallströme mittels Erfassungssystem verzichtet. Sie werden als separate Abfallströme inkl. ihrer dazugehörigen Eigenschaften in das Modell gespeist.

Eine zusammenfassende Übersicht ist Abbildung 4.18 zu entnehmen:

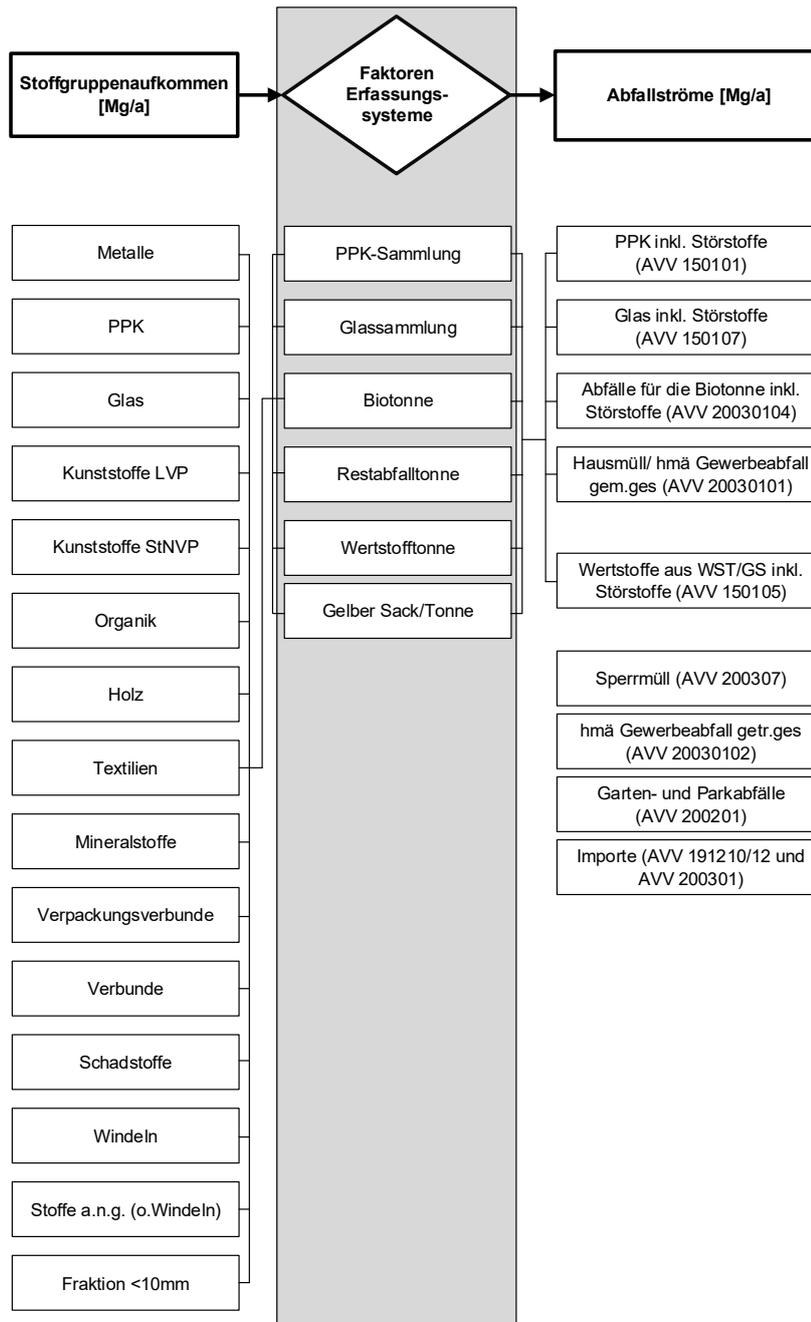


Abbildung 4.18: Grundfließbild der Erfassungssysteme und Abfallströme

4.4 Modellierung der Abfallbehandlungsanlagen

Seit dem Ablagerungsverbot für nicht vorbehandelte Siedlungsabfälle im Jahr 2005 bilden Müllverbrennungsanlagen und Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen die Hauptsäulen möglicher Beseitigungswege für Hausmüll, wobei Erstere die größere Rolle einnimmt. Abfälle aus dem Gelben Sack/der Wertstofftonne werden in Leichtverpackungssortieranlagen mit dem Ziel der werkstofflichen Verwertung sortiert. Sortierreste werden in MVAs, EBS-Kraftwerken, Zementwerken und Kohlekraftwerken eingesetzt. Die Behandlung von biologisch abbaubaren Abfällen findet in Kompostierungs- (aerobe Behandlung) und Vergärungsanlagen (anaerobe Behandlung) statt. Die energetische Verwertung mittels Biomassekraftwerk findet nur bei holzhaltigen Organikabfällen Anwendung [UBA, 2013] und spielt nur eine untergeordnete Rolle. Die Deponie dient als Empfänger von Rottegut, aber auch von Verbrennungsschlacken, sofern anderweitige Verwertungswege erschöpft sind. Sperrmüll und getrennt gesammelte hausmüllähnliche Gewerbeabfälle werden anteilig in MBA, MVAs oder den EBS-Kraftwerken behandelt. Zur Reduktion der Komplexität des Modells wurden u. a. Biomassekraftwerke oder Gewerbeabfallsortieranlagen nicht mit in den abzubildenden Realitätsabschnitt aufgenommen. Teilströme in diese Anlagen sowie Rotteverluste verlassen den Bilanzraum als *sonstige Verwertung und Verluste* oder *stoffliche Verwertung*. Da somit auch keine Sekundärabfälle aus den genannten Sortier- und Verwertungsanlagen erhalten werden, sind die Kapazitäten der nachbehandelnden Anlagen aus der Diskurswelt später um diese Teilströme zu reduzieren. Abbildung 4.19 gibt einen Überblick über die Anlagenauswahl⁴:

⁴ Die Auflistung der Abfallströme gem. Abbildung 4.18 wurde zu Zwecken der Übersichtlichkeit in ihrer Reihenfolge geändert

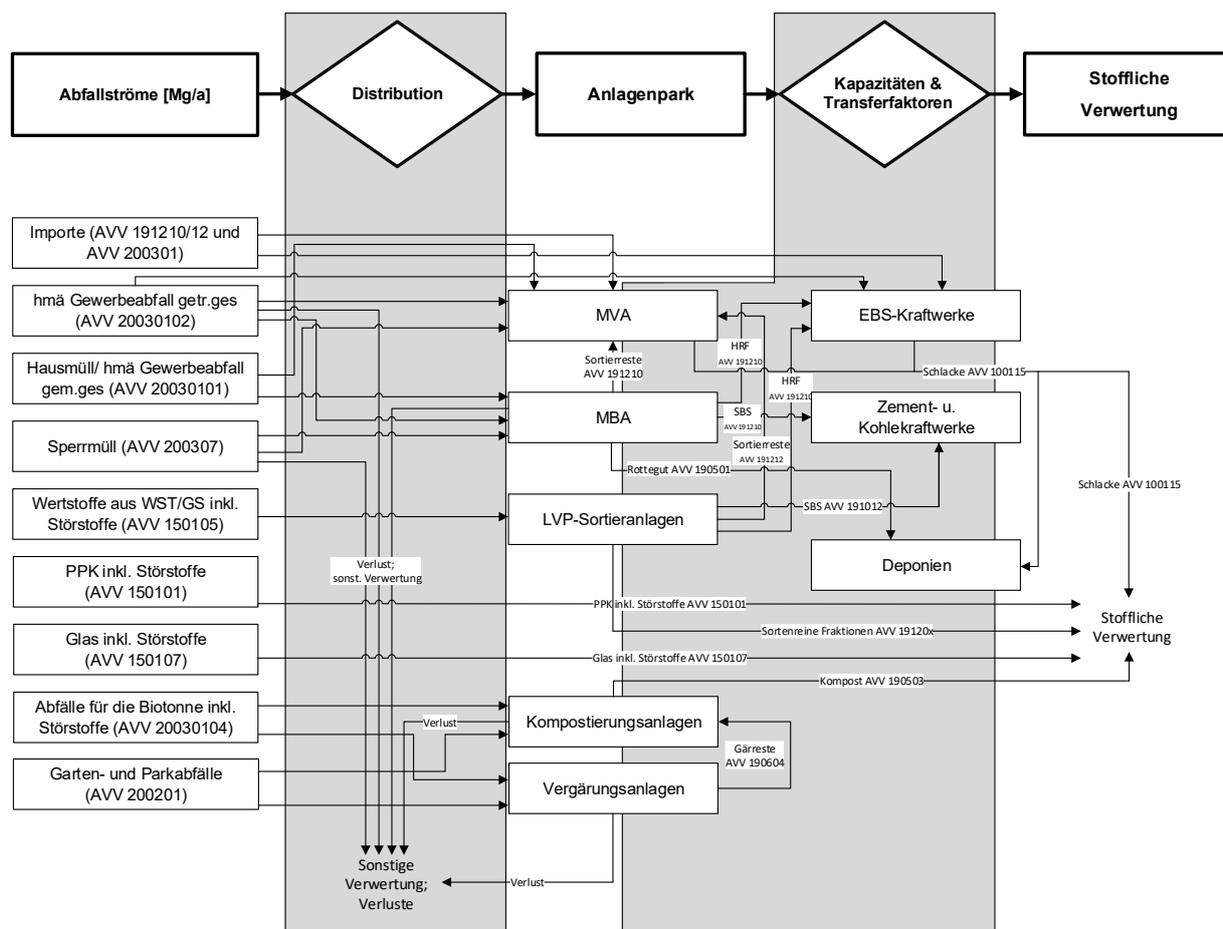


Abbildung 4.19: Grundfließbild der Anlagenauswahl

Zur Ermittlung der Prozessvariablen bedarf es einer Prozessanalyse, der systematischen Untersuchung von Prozessen. Dabei wird jeder Verfahrensschritt einer Anlage auf kapazitätslimitierende Parameter und relevante Transferfaktoren hin untersucht. Da es im Rahmen der Arbeit nicht leistbar ist, die Anlagen im Detail zu modellieren, wird die Komplexität reduziert, indem die Prozessvariablen zunächst selektiert und aggregiert werden und die Anlage als vereinfachter Prozess (Blackbox) dargestellt wird.

Oft bestimmen mehrere Faktoren, wie die Bau- und Funktionsweise, das Alter und die Betriebsparameter, über die Kapazität einer Anlage. In der Literatur werden die Kapazitäten jedoch häufig anhand von einigen wenigen Schlüsselparametern festgemacht. Mittels der Prozessanalyse wird versucht, kapazitätslimitierende Parameter auf einigermaßen verallgemeinerbare Kriterien zu reduzieren. Die Anlagenkapazitäten sind dabei nicht ausschließlich von den Inputmengen abhängig, sondern auch von der Inputzusammensetzung und deren Eigenschaften (z. B. kalorische Fracht).

Die Transferfaktoren zum Stoffübergang wurden auf ein nötiges Minimum reduziert, indem sie sich auf die zur Bildung von Sekundärabfällen relevanten Transferfaktoren beschränken. Sie wurden aus den Stoffbilanzen bestehender Behandlungsanlagen ermittelt und zunächst als konstant angenommen. Da sich die Stoffverteilung, insbesondere bei mechanischen Aufbereitungsanlagen, durch die Modifikation der Anlagenkonfiguration ändern kann, werden diesen Prozessen stoffgruppenspezifische Transferfaktoren hinterlegt. Agiert jede Stoffgruppe

nach ihrem individuellen Transferfaktor, passt sich der Output, bei beliebiger Änderung der Inputmischung, automatisch an. Über die Eingabemaske können die Transferfaktoren jederzeit variiert werden, um möglichen Systemveränderungen zukünftiger Prognosen Rechnung zu tragen.

Zusammenfassend sei jedoch zu sagen, dass die erforderliche Genauigkeit für große komplexe Systeme für eine vergleichende Aussage sehr viel niedriger als für Einzelverfahren [Löschau, 2012]. Für den erforderlichen Detaillierungsgrad und Zweck der Arbeit wird dieses Vorgehen für jedoch als geeignet erachtet.

4.4.1 Müllverbrennungsanlagen

Eine Müllverbrennungsanlage besteht im Wesentlichen aus den in Abbildung 4.20 gezeigten Hauptkomponenten. Der generelle Ablauf der Verbrennung und der Materialfluss bei MVAs verschiedener Hersteller unterscheiden sich dabei nach Aussage von Bilitewski/Härdtle/Marek (2000) nur geringfügig voneinander.

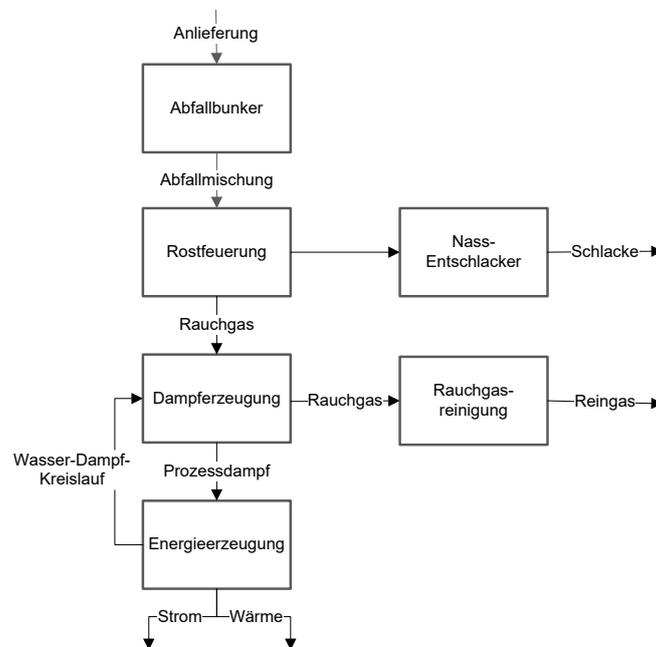


Abbildung 4.20: Vereinfachtes Verfahrensfliessbild der MVA

Bunker

Mögliche Überkapazitäten des Bunkers können unter Umständen durch Zwischenlagerung ausgeglichen werden. Sie stellen keine mengenseitige Kapazitätslimitierung dar.

Verbrennungsraum

Der Verbrennungsraum ist das Kernelement jeder Verbrennungsanlage. Hier erfolgt die thermische Umsetzung der Abfallinhaltsstoffe und die Freisetzung von Energie. Er kann jedoch nicht mit jeder beliebigen Abfallmischung gespeist werden. Großtechnische Abfallverbrennungsanlagen werden für eine vorher festgelegte Verbrennungskapazität errichtet, die von der zu verbrennenden Abfallmenge und dessen Heizwert bestimmt wird [Richers, 2010]. Ausgedrückt wird dieser Zusammenhang durch die Feuerungswärmeleistung, die gemäß 1. BImSchV (2010) wie folgt definiert wird: „der auf den unteren Heizwert bezogene

Wärmeinhalt des Brennstoffs, der einer Feuerungsanlage im Dauerbetrieb je Zeiteinheit zugeführt werden kann“ [1. BImSchV, § 2 Abs. 6]. Die entsprechenden Zusammenhänge zwischen Heizwert, Wärmeleistung des Kessels und Abfalldurchsatz werden im Feuerleistungsdiagramm deutlich [Richers, 2010]. Die Wärmeleistung und der Abfalldurchsatz begrenzen zusammen mit dem Heizwert des Abfalls den Wirkungsbereich des Ofens nach oben (A-B; B-C) sowie nach unten (E-D; F-E).

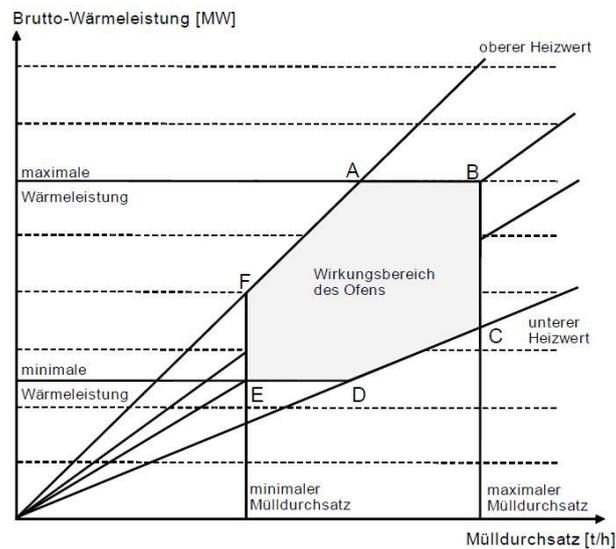


Abbildung 4.21: Feuerleistungsdiagramm einer MVA [Kaimer/Schade, 1998]

Folglich gilt die Feuerungswärmeleistung als kapazitätslimitierender Faktor beim Betrieb von Abfallverbrennungsanlagen. Damit einhergehend ist auch der Einbezug eines minimalen und maximalen Heizwertes erforderlich. Somit wird ausgeschlossen, dass der Feuerungswärmeleistungsbereich nicht mit unrealistisch hohen Abfallmengen bei gleichzeitig sehr niedrigem Heizwert erfüllt werden kann und andersherum. Dem stünden mechanische und thermische Belastungsgrenzen des Kessels entgegen. Weiterhin ist eine Limitierung nach unten erforderlich, um eine mögliche Unterschreitung des Wärmeleistungsbereiches anzuzeigen. Die minimale Wärmeleistung ist abhängig vom Rosttyp [Alešio, 2012], wobei etwa 60 % als gängig angesehen werden.

Weitere Limitationen können durch den Input von korrosionsfördernden Stoffen wie Chlor und Schwefel, den Alkalien Natrium und Kalium sowie den Schwermetallen Blei und Zink gegeben sein [Spiegel *et al.*, 2010], [Schirmer, 2007].

Das in Abfällen enthaltene Chlor führt besonders bei hohen Temperaturen zu der so genannten Hochtemperaturchlorkorrosion, was die Lebensdauer der Anlagen einschränkt. Chlor ist insbesondere auf Chloride (z. B. Speisesalz in Essensabfällen) in der Fein- und Organikfraktion, aber auch auf Kunststoffe, insbesondere PVC, zurückzuführen. Born (2002) merkt jedoch an, dass das Korrosionspotential nicht einzig durch den Chlorgehalt beschrieben werden kann. Vielmehr ist das Potential als Summenparameter zu verstehen, der durch chemische, mechanische und kalorische Eigenschaften beeinflusst wird. Schirmer (2007) nennt als Einflussfaktoren auf das Chlorverhalten unter anderem die Bindungsform, die parallele Anwesenheit von Schwefel sowie das Verbrennungssystem, dessen Bauweise sich

auf Turbulenzen und Strömungsverhältnisse auswirkt. Das hat wiederum Einfluss auf die Verweilzeit und damit auf das Chlorverhalten in der Anlage.

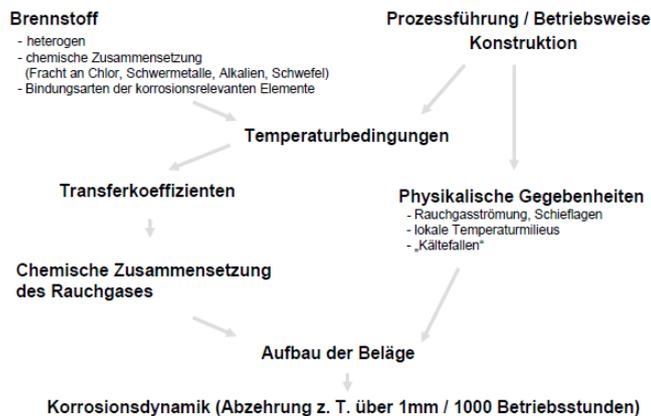


Abbildung 4.22: Korrosionsursachen und deren Zusammenhänge im Kessel [Schirmer, 2007]

Ähnlich komplex ist das Verhalten von Schwefel und weiteren korrosionsfördernden Stoffen. Je nach Temperatur, Sauerstoffgehalt und zeitgleiche Anwesenheit der Stoffe entstehen unterschiedliche Korrosionsprodukte, wie die folgende Abbildung von Schroer/Konys (2002) zeigt:

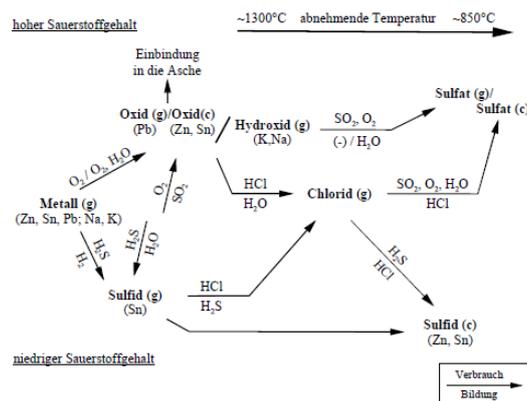


Abbildung 4.23: Mögliche Reaktionen der in Rauchgasen enthaltener Verbindungen von Alkali- und Schwermetallen [Schroer/Konys, 2002]

Die detaillierte Beschreibung des Korrosionsverhaltens im Verbrennungsraum ist sehr komplex und kann im Rahmen dieser Arbeit nicht derart detailliert untersucht werden. Auch wenn Schirmer (2007) die Angabe von singulären Grenzwerten in der gängigen Praxis für unzureichend hält und eher für eine Ergänzung um Korrosionskennzahlen plädiert, kann die vorliegende Arbeit diesen Detaillierungsgrad nicht leisten. Es müssen für die Inputlimitierung der relevanten Elemente daher singuläre Grenzwerte angenommen werden, von denen im Falle einer Überschreitung von einer Kapazitätslimitierung auszugehen ist, um Korrosionen zu vermeiden. So werden die über Schlagworte wie Chlorkorrosion und Sulfatierung bekannt gewordenen Korrosionsstoffe Chlor und Schwefel, die in Lieferverträgen des Anlagenbaus oder von Brennstofflieferanten mit maximalen Gehalten (im Brennstoff) begrenzt werden, [Spiegel *et al.*, 2010] auch im Rahmen dieser Arbeit als singuläre Grenzwerte angenommen.

Nassentschlacker

Es wird davon ausgegangen, dass der Entschlacker dem Verbrennungsraum entsprechend dimensioniert worden ist. Relevant sind unter Umständen die für Schlacke geltenden Qualitätsanforderungen, sofern diese verwertet werden sollen. Für die Verwertung von Schlacken (z. B. im Straßen-, Deponie- oder Landschaftsbau) gelten in vielen Bundesländern die LAGA Merkblätter 19 bzw. 20, wobei Ersteres zunächst die generelle Eignungsfeststellung der Verwertung regelt, während die LAGA M20 konkrete Verwertungsanforderungen für die Verwertung von mineralischen Abfällen beinhaltet. Anhang 6 des Merkblatts M19 enthält Vergleichswerte für die Untersuchung von Schadstoffparametern im Feststoff der Rohschlacke (Tabelle 4.3).

Tabelle 4.3: Untersuchungen im Feststoff für Rohschlacke nach LAGA M19

Parameter	Dimension	Vorgabe
PCDD/PCDF	ng I-TE/kg	0,6-30
Blei	mg/kg	6000
Cadmium	mg/kg	20
Chrom	mg/kg	2000
Kupfer	mg/kg	7000
Nickel	mg/kg	500
Zink	mg/kg	10000
Glühverlust	Masse-%	<3

Anhand dieser Werte muss nachgewiesen werden, ob die Schlacke nach der Aufbereitung für eine Verwertung überhaupt geeignet ist [Meinfelder/Richers, 2008]. Allerdings sind diese Regeln nicht verbindlich⁵ und gelten nicht mehr als Stand der Technik. Eine anerkannte, vollständige Fortschreibung dieses Regelwerkes erfolgt nicht [Tauw, 2013]. Im Zuge aktueller Verordnungsvorhaben zur bundeseinheitlichen Regelung der Verwertung mineralischer Abfälle (Ersatzbaustoffverordnung) ist jedoch eine Fortschreibung geplant, die auch die Anforderungen an die Qualität von MVA-Schlacken regeln soll [Alwast/Riemann, 2010]. Diese ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch noch nicht in Kraft getreten. Rechtlich bindend hingegen sind die für den organisch gebundenen Kohlenstoff (TOC) und den Glühverlust toleranteren Grenzwerte der 17. BImSchV:

§ 5 Betriebsbedingungen

- (1) Eine Abfallverbrennungsanlage ist so zu errichten und zu betreiben, dass
2. in der Schlacke und in der Rostasche ein Gehalt an organisch gebundenem Gesamtkohlenstoff von weniger als 3 Prozent oder ein Glühverlust von weniger als 5 Prozent des Trockengewichtes eingehalten wird. [17. BImSchV, § 5, Abs. 1 Satz 2]

Eine Studie von Meinfelder/Richers (2008) zeigt, dass die Werte zur Beurteilung der Verwertungseignung und nach 17. BImSchV, § 5, Abs. 1 Satz 2 bis auf wenige Ausnahmen eingehalten werden. Die Schlackeeigenschaften stellen somit kein kapazitätslimitierendes

⁵ Richtwerte haben im Gegenzug zu Grenzwerten einen orientierenden Charakter und sind weniger verbindlich

Kriterium dar. Für mögliche Ausreißer bestünde immer noch die Möglichkeit, die Schlacken zu deponieren. Hierfür gelten nach Deponieverordnung wesentlich geringere Grenzwerte.

Da die Verwertungs- und ggf. auch die Deponiekapazitäten in ihrer Aufnahmefähigkeit begrenzt sein können, ist der mengenmäßige Verbleib der Schlacke von Relevanz, so dass an dieser Stelle des Modells ein Transferfaktor für den Anfall von Schlacke erforderlich ist. Über den Verbleib der Schlacke bestimmt letztendlich die *Distribution Schlacke*.

Rauchgasreinigung

Die Dimension der Rauchgasreinigung muss auf die entstehenden Rauchgasmengen abgestimmt sein. Die Rauchgasmenge ergibt sich aus dem für die Verbrennung stöchiometrisch benötigten Mindestsauerstoffbedarf. Um einen guten Ausbrand der inhomogenen Abfälle zu gewährleisten, werden die Anlagen in der Praxis generell deutlich überstöchiometrisch betrieben. In der Praxis liegt die Luftüberschusszahl bei etwa 1,5-2. Die Rauchgasreinigung muss dementsprechend groß sein. Da Abfälle als inhomogene Inputs zu betrachten sind und daher mit entsprechend hohen Luftzahlen gearbeitet wird, wird im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen, dass die Rauchreinigungsanlagen der thermischen Anlagen ausreichend groß dimensioniert worden sind. Daher sollte es aus technischer Seite zu keiner Kapazitätslimitierung kommen.

Limitierungen durch die Überschreitung von Emissionsgrenzwerten richten sich nach den Vorgaben der 17. BImSchV für Reingas:

§ 8 Emissionsgrenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen

(1) *Abfallverbrennungsanlagen sind so zu errichten und zu betreiben, dass*

1. kein Tagesmittelwert die folgenden Emissionsgrenzwerte überschreitet:

- a) Gesamtstaub 5 mg/m³*
- b) organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff, 10 mg/m³ (5mg/m³ ab 2016)*
- c) gasförmige anorganische Chlorverbindungen, angegeben als Chlorwasserstoff, 10 mg/m³*
- d) gasförmige anorganische Fluorverbindungen, angegeben als Fluorwasserstoff, 1 mg/m³*
- e) Schwefeldioxid und Schwefeltrioxid, angegeben als Schwefeldioxid, 50 mg/m³*
- f) Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid, angegeben als Stickstoffdioxid, 200 mg/m³ (150mg/m³ ab 2016)*
- g) Quecksilber und seine Verbindungen, angegeben als Quecksilber, 0,03 mg/m³*
- h) Kohlenmonoxid 50 mg/m³*
- i) Ammoniak, sofern zur Minderung der Emissionen von Stickstoffoxiden ein Verfahren zur selektiven katalytischen oder nichtkatalytischen Reduktion eingesetzt wird 10 mg/m³*

[17. BImSchV, § 8 Abs.1 Satz 1]

Fehrenbach/Giegrich/Mahmood (2007) haben in Form eines Screenings die *Erfüllungsgrade* für Staub, NO_x als NO₂, SO₂, Cd/Tl, Hg, die Gruppe der weiteren 10 Metalle von Antimon bis Zinn (Sb-Sn) sowie Dioxine/Furane 70 deutscher MVAs analysiert. Dabei konnte eine durchgehend sichere Einhaltung belegt werden. Lediglich der Parameter NO₂ wird in vergleichsweise hohem Maße ausgeschöpft. Etwa ein Viertel der Anlagen bewegt sich im Bereich über 120 mg/m³ (60 % des Grenzwerts bzw. 80 % des Grenzwertes ab 2016), die überwiegende Mehrzahl in einem Bereich zwischen 60 und 100 mg/m³. Bei Staub und

Cadmium/Thallium liegen alle MVAs unter 20 % des Grenzwerts. Diese Marke wird auch bei den anderen Parametern jeweils nur von einer kleinen Zahl an Anlagen überschritten [Fehrenbach/Giegrich/Mahmood, 2007]. Auch wenn die Parameter Chlorwasserstoff, Kohlenstoffmonoxid und Fluorwasserstoff nicht explizit erwähnt wurden, sprechen Fehrenbach/Giegrich/Mahmood (2007) den MVAs in Deutschland insgesamt eine sehr hohe Erfüllung des Kriteriums der Minimierung von Schadstoffemissionen zu.

Die Einhaltung des Parameters Stickoxide könnte, insbesondere durch die Novellierung der 17. BImSchV und der Absenkung des Grenzwertes auf 150 mg/m³, problematisch werden. Da dieser Wert aber nicht ausschließlich vom Input, sondern vielmehr von der Fahr- und Betriebsweise abhängt, ist hier eine gezielte Einflussnahme auf die Prozesssteuerung möglich. Generell wird von keiner Kapazitätslimitierung durch Emissionsgrenzwerte ausgegangen.

Wasser-Dampf-Kreislauf und Energieerzeugung

Auch hier wird angenommen, dass diese Verfahrensschritte dem Verbrennungsraum angepasst wurden und keine mengenseitige Kapazitätslimitierung darstellen.

Bewertung

Zusammenfassend ergibt sich für die Modellierung der folgende Bedarf an Prozessparametern:

Tabelle 4.4: Prozessparameterauswahl der MVA

Parameter	Kennung	Einheit
minimale Feuerungswärmeleistung	MIN_FWL_MVA	MWh
maximale Feuerungswärmeleistung	MAX_FWL_MVA	MWh
minimaler Heizwert der Inputmischung	MIN_HEIZWERT_MVA	MJ/Mg
maximaler Heizwert der Inputmischung	MAX_HEIZWERT_MVA	MJ/Mg
maximale Chlorkonzentration der Inputmischung	MAX_CI_MVA	kg/kgTS
maximale Schwefelkonzentration der Inputmischung	MAX_S_MVA	kg/kgTS
Transferfaktor Schlacke	TF_SCHLACKE	%

Diese werden in der Eingabemaske eingegeben:

Kapazitätslimitierende Anlagenparameter (Prozessparameter)		2014	2015	2016	2017
MVA	max. FWL [MW]	5.516	5.516	5.516	5.516
	min. FWL (60 %)	3.310	3.310	3.310	3.310
	max. Chlorgrenzwert [kg/kg]	0,04	0,04	0,04	0,04
	max. Schwefelgrenzwert [kg/kg]	0,03	0,03	0,03	0,03
	min. Heizwert [MJ/kg]	6,5	6,5	6,5	6,5
	max. Heizwert [MJ/kg]	14	14	14	14
	Verfügbarkeit [%]	96	96	96	96

Abbildung 4.24: Ausschnitt der Eingabemaske zur Eingabe von Anlagenparametern

Für die Anwendung im Algorithmus werden die Eingabevariablen in spezifische Variablen umgewandelt:

	ÜBERTRAG UMBERTO				
	INF_BETRIEBSSTUNDEN bei 100 %	8736			
MVA	MAX_FWL_MVA	46.260.265	46.260.265	46.260.265	46.260.265
	MIN_FWL_MVA	28.912.666	28.912.666	28.912.666	28.912.666
	MAX_C_MVA	0,04	0,04	0,04	0
	MAX_S_MVA	0,03	0,03	0,03	0
	MIN_H_MVA	6500	6500	6500	6500
	MAX_H_MVA	14000	14000	14000	14000

Abbildung 4.25: Spezifische Variablen zur Verwendung im Algorithmus der MVA

Die tatsächliche Feuerungswärmeleistung [MWh] ergibt sich aus der Multiplikation von FWL [MW] * Betriebsstunden [h] * Verfügbarkeit.

Die Chlor- und Schwefelkonzentrationen sowie der Heizwert der Abfallmischung ergeben sich aus der Materialzusammensetzung unter Berücksichtigung fraktionspezifischer Kennzahlen. Diese Kennzahlen, ebenso wie der Transferfaktor für den Anfall von Schlacke, kann in separaten Reitern der Eingabemaske platziert werden.

Unter Einbezug der Variablen ergeben sich die folgenden Algorithmen:

;Limitierung der Feuerungswärmeleistung in [MWh] und des Heizwertes in [MJ/Mg] (Formeln 18-23)

;Energiegehalt Abfallmischung [MJ] - ergibt sich aus den Abfallinputs und deren Heizwerten

ENERGIE_AM=(X00*HEIZWERT_STOFFGRUPPE1)+(X01*HEIZWERT_STOFFGRUPPE2)+n

;Warnmeldung "FWL überschritten" [MWh]

IF(>(ENERGIE_AM*0.0002778,MAX_FWL_MVA),ENERGIE_AM*0.0002778-MAX_FWL_MVA,0)

;Warnmeldung "FWL unterschritten" [MWh]

IF(>(MIN_FWL_MVA,ENERGIE_AM**0.0002778),MIN_FWL_MVA-ENERGIE_AM*0.0002778,0)

;Heizwert Abfallmischung [MJ/kg]

HEIZWERT_AM=(ENERGIE_AM/(X00+Xxx)/1000)

;Warnmeldung als Dummy Material "Mindestheizwert" [MJ/Mg]

IF(<(HEIZWERT_AM,MIN_HEIZWERT_MVA),HEIZWERT_AM-MIN_HEIZWERT_MVA,0)

;Warnmeldung als Dummy Material "Maximalheizwert" [MJ/Mg]

IF(>(HEIZWERT_AM,MAX_HEIZWERT_MVA),HEIZWERT_AM-MAX_HEIZWERT_MVA,0)

;Limitierung der Chlorkonzentration [kg/kgTS]

;Chlorgehalt Abfallmischung [kg] - ergibt sich aus den Abfallinputs (TS) und deren Chlorkonzentrationen [kg/kgTS]

CHLORGEHALT_AM=(X00*((100-WG_STOFFGRUPPE1)/100)*CI_STOFFGRUPPE1)+(X01*((100-WG_STOFFGRUPPE2)/100)*CI_STOFFGRUPPE2)+n (Formel 24)

;Chlorkonzentration Abfallmischung [kg/kgTS]

CHLORKONZ_AM=CHLORGEHALT_AM/((X00*((100-WG_STOFFGRUPPE1)/100)+(X01*((100-WG_STOFFGRUPPE2)/100))+n)*1000 (Formel 25)

;Warnmeldung „Chlorkonzentration überschritten“

IF(>(CHLORKONZ_AM,MAX_C_MVA),CHLORKONZ_AM-MAX_C_MVA,0) (Formel 26)

;Limitierung der Schwefelkonzentration [kg/kgTS]

;Schwefelgehalt Abfallmischung [kg] - ergibt sich aus den Abfallinputs (TS) und deren Schwefelkonzentrationen [kg/kgTS].

SCHWEFELGEHALT_AM=(X00*((100-WG_STOFFGRUPPE1)/100)*S_STOFFGRUPPE1)+(X01*((100-WG_STOFFGRUPPE2)/100)*S_STOFFGRUPPE2)+n (Formel 27)

;Schwefelkonzentration Abfallmischung [kg/kgTS]

$$\text{SCHWEFELKONZ_AM} = \text{SCHWEFELGEHALT_AM} / ((X00 * ((100 - \text{WG_STOFFGRUPPE1}) / 100) + (X01 * ((100 - \text{WG_STOFFGRUPPE2}) / 100)) + n) * 1000) \quad (\text{Formel 28})$$

;Warnmeldung „Schwefelkonzentration überschritten“

$$\text{IF}(>(\text{SCHWEFELKONZ_AM}, \text{MAX_S_MVA}), \text{SCHWEFELKONZ_AM} - \text{MAX_S_MVA}, 0) \quad (\text{Formel 29})$$

;Schlackeoutput entspricht dem Input aller Stoffe multipliziert mit dem Transferfaktor Schlacke

$$\text{Y00} = (\text{X00} + \text{Xxx}) * \text{TF_SCHLACKE} \quad (\text{Formel 30})$$

4.4.2 EBS-Kraftwerke

Neben den klassischen Abfallverbrennungsanlagen sind in Deutschland die sogenannten Ersatzbrennstoff-Kraftwerke am Markt. In ihnen werden mittel- bis hochkalorische Abfallfraktionen energetisch verwertet, die in vorgeschalteten Aufbereitungsanlagen (z. B. MBA) behandelt wurden. Rein technisch unterscheiden sie sich kaum von MVAs. Ein Unterschied der Kraftwerke liegt jedoch in den dampfseitig höheren Parametern für Druck und Temperatur in EBS-Kraftwerken, weswegen sie weniger tolerant gegenüber Chlor im Abfall sind [UBA, 2012]. Die Modellierung erfolgt analog zur MVA. Lediglich die Werte der Prozessvariablen sind in der Eingabemaske anzupassen.

4.4.3 Zement- und Kohlekraftwerke

Anders als in reinen Monoverbrennungsanlagen werden Abfälle in Zement- und Kraftwerken unter Teilsubstitution von Regelbrennstoffen, wie z. B. Kohle, mitverbrannt. Heizwertreiche Stoffe als emissionsarme Energieträger können hochwertig verwertet werden, sodass sich die Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen in Industriefeuerungsanlagen und Zementwerken als feste Säule einer modernen Kreislaufwirtschaft etabliert hat [Oerter, 2017]. Trotz des steigenden Sekundärbrennstoffeinsatzes in den vergangenen Jahren [Oeter, 2012], kann durch die Mitverbrennung keine Entsorgungssicherheit geschaffen werden. Die Anlagen benötigen qualitativ sehr hochwertige, das heißt schwefel- und chlorarme, hoch aufbereitete Brennstoffe [Schu, 2006]. Folglich lassen sich die Kapazitäten nicht mengenmäßig, sondern ausschließlich an Qualitätskriterien, fest machen. Auf eine ausführliche Prozessanalyse wird daher verzichtet. Vielmehr wird mit einer variablen Mengenkapazität [Mg/a] unter Einbezug maximaler Chlor- und Schwefelkonzentrationen gearbeitet. Die Prozessparameter ergeben sich dadurch wie folgt:

Tabelle 4.5: Prozessparameterauswahl der Mitverbrennung

Parameter	Kenntung	Einheit
Verbrennungskapazität	KAPA_KRAFTWERK	Mg
minimaler Heizwert der Inputmischung	MIN_HEIZWERT_KRAFTWERK	MJ/Mg
maximale Chlorkonzentration der Inputmischung	MAX_CI_KRAFTWERK	kg/kgTS
maximale Schwefelkonzentration der Inputmischung	MAX_S_KRAFTWERK	kg/kgTS

Die Algorithmen zur Anforderung an einen Mindestheizwert sowie die Limitierung von Chlor und Schwefel sind analog der MVA, die Limitierung der Mitverbrennungskapazität ergibt sich aus der folgenden Logik:

nur noch einen kleinen Anteil bei. Die Siebtrommel agiert daher als der für die Kapazitätsbemessung einer Sortieranlage ausschlaggebende Schlüsselverfahrensschritt. Durch überlastbedingte Fehlausträge und der damit verbundenen Einschränkung der Sortierfähigkeit nachgeschalteter Trennschritte können geforderte Produktqualitäten nicht erreicht werden. Die Kapazitätseinschränkung findet bereits sehr früh in der Prozesskette statt, so dass auf den weiteren Verlauf der Prozessanalyse verzichtet wird.

Die Leistungsfähigkeit einer Siebmaschine wird durch die Parameter Siebdurchsatz und Siebgütegrad (auch Trennschärfe genannt) gekennzeichnet. Der Siebgütegrad gibt wieder, wie viel von dem im Aufgabegut enthaltenen Feingut tatsächlich durch den Siebbelag in den Durchgang gelangt [UBA, 2004]. Im Idealfall lassen sich die Fehlgut-/Fehlkornquoten in den Siebtrommeloutputs durch die Integration von Sieblinien und Siebgütegraden ermitteln. Steigt das Fehlkorn überlastbedingt zu stark an, so dass keine Vereinzelnung und damit Sortierfähigkeit der Materialien mehr gegeben ist, ist die Kapazität der Anlage erreicht.

Da die Siebauslegungen für jede Anlage sehr individuell sind, kann die Siebspezifikation nicht ohne weiteres aggregiert werden. Auch eine pauschale Aussage wie: „mit jedem % Überbelastung steigt die Fehlgutquote im Output um xx % an“ entspricht nicht dem Stand der Forschung und darf/kann nicht angenommen werden [Kaufeld, 2016]. Infolgedessen kann im Zuge dieser Arbeit nur auf die technisch angegebene Gesamtkapazität [Mg] zurückgegriffen werden⁶. Sie wird der Kapazität der Siebtrommel gleichgesetzt.

Die Outputs ergeben sich je nach Ausgestaltung der Transferfaktoren. Anders als bei den Verbrennungsanlagen findet hier keine Stoffumwandlung, sondern ein Stoffstromsplitting statt. Metalle (Alu, Weißblech), Kunststoffe (PE, PET, PO, PP, PS und PVC) und Getränkekartons werden sortenrein differenziert. Die Qualitätsanforderungen werden über die vertraglichen Vorgaben der dualen Systeme definiert [Dehoust, Christiani, 2012]. In der Regel liegen diese zwischen 70-90 % Sortenreinheit [Nehlsen, 2015; LfU Bayern, 2005]. Der Rest geht als Wertstoffverlust in die Fraktionen zur energetischen Verwertung über. Folien, nicht recycelbare Kunststoffanteile, Wertstoffverluste der sortenreinen Fraktionen und Fremdstoffe wie Windeln, PPK, Glas, Feinfraktion, Organik, Schadstoffe, Stoffe a.n.g. (ohne Windeln) finden den Weg als EBS-Fraktion oder Sortierreste in die thermischen Anlagen.

Zusammenfassend ergibt sich für die Modellierung der folgende Bedarf an Prozessparametern:

⁶ Der Ansatz, dass Sortierkapazitäten ausschließlich über die technisch angegebenen Kapazitäten in Mg definiert werden, ist durchaus gängig. So findet die Vorgehensweise unter anderem im Planspiel zur Fortentwicklung der Verpackungsverordnung Anwendung (vgl. Bünemann *et al.*, 2011).

Tabelle 4.6: Prozessparameterauswahl der LVP-Sortieranlagen

Parameter	Kennung	Einheit
Siebtrommelkapazität	KAPA_SIEBTROMMEL	Mg
TF_stoffliche Verwertung (je Stoffgruppe)	TF_SV	%
TF_Sortierreste (je Stoffgruppe)	TF_SR	%
TF_EBS (je Stoffgruppe)	TF_EBS	%

Die Modellierung der Kapazitätslimitierung verhält sich folglich analog zur Limitierung der Mitverbrennungsmengen in Zement- und Kohlekraftwerken (Formel 33 und 34). Der Transfer der Stoffgruppen wird beispielhaft für den Fall „Metalle in die stoffliche Verwertung“ gezeigt (Formel 35):

;Gesamtinput

$$\text{INPUT}=\text{X00}+\text{X01}+\text{Xxx} \quad (\text{Formel 33})$$

;Warnmeldung „Siebtrommelkapazität überschritten“

$$\text{IF}(>(\text{INPUT},\text{KAPA_SIEBTROMMEL}),\text{INPUT}-\text{KAPA_SIEBTROMMEL},0) \quad (\text{Formel 34})$$

;Metalle in die stoffliche Verwertung

$$\text{Y03}=\text{X04}*\text{TF_METALLE_SV} \quad (\text{Formel 35})$$

Für die brennbaren Sekundärabfälle gelten Qualitätsanforderungen der nachbehandelnden thermischen Anlagen (vgl. Kapitel 4.4.1, 4.4.2 und 4.4.3.). Die Mengen werden infolgedessen um Chlor- und Schwefelfrachten sowie den Heizwert ergänzt. Die Materialeigenschaften ergeben sich aus ihrer Zusammensetzung unter Berücksichtigung fraktionsspezifischer Kennzahlen (Anhang A).

Mit Ausblick auf den Ausbau der Wertstofftonne wird davon ausgegangen, dass die Sortierfähigkeit einer Anlage durch die Zuweisung von StNVP nicht beeinträchtigt wird. Diese Annahme stützt sich auf die Aussagen von Bünemann *et al.* (2011), wonach sich die Idealzusammensetzung einer Wertstofftonne maßgeblich an der Systemverträglichkeit orientiert. Für die sich in den Produkteigenschaften ähnelnden Materialien werden keine Probleme bei der Sortierung gesehen.

4.4.5 Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen

Die MBA-Technologie basiert auf der Idee, den Müll zuerst mechanisch zu trennen, um verwertbare Stoffe auszusortieren und den biologischen Rest unter kontrollierten Bedingungen weitestgehend abzubauen und somit die Bildung von Deponiegasen und -sickerwasser zu unterbinden. Die biologische Behandlung erfolgt in den meisten Fällen über eine aerobe Behandlung mittels verschiedener Rotteverfahren. Diese Stoffstromtrennungsanlagen, die den Großteil der angewandten Technologien ausmachen, werden durch einige MBS-Anlagen (mechanisch-biologische Stabilisierung) ergänzt. Hier wird der gesamte Abfallstrom vor der mechanischen Aufbereitung biologisch (unter Nutzung der Selbsterhitzung) getrocknet und um organische Anteile reduziert. Zudem sind wenige Anlagen zur mechanisch-physikalischen Stabilisierung (MPS) vertreten, in denen eine mechanische Aufbereitung mit anschließender Trocknung (z. B. Trommeltrockner) betrieben wird. Für die Trocknung werden fossile

Brennstoffe genutzt [Grundmann/Balhar, 2009; UBA 2012a]. Abbildung 4.27 zeigt einen vereinfachten Verfahrensablauf:

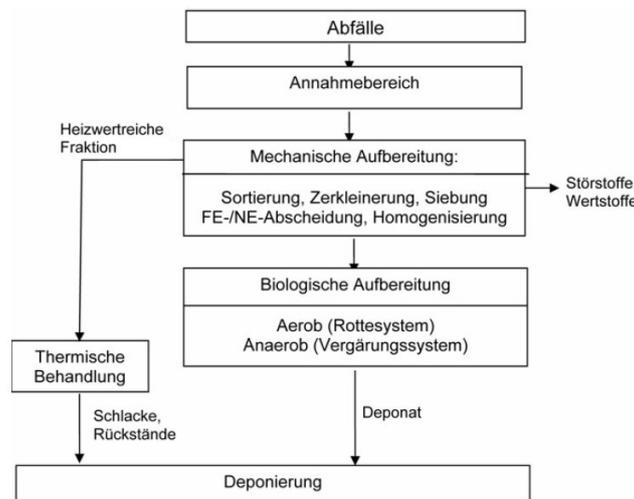


Abbildung 4.27: Vereinfachtes Verfahrensfließbild einer MBA [Kranert, 2010]

Bei der MBA ist von keiner Kapazitätslimitierung durch die Verfahrensschritte der mechanischen Stufe auszugehen. Nach Ketelsen/Nelles (2015) erreichen die Anlagen aufgrund fehlender bzw. umgelenkter Abfallströme ihre ursprünglich geplanten Durchsatzmengen bei gleichzeitig hohen genehmigten Anlagenkapazitäten (insbesondere der MA-Stufe) ohnehin nicht. Bei Engpässen könnten die Durchsätze der mechanischen Stufen, die meist für den Zweischicht-Betrieb ausgelegt sind und deren Verfügbarkeiten sich laut Thiel/Thomé-Kozmiensky (2008) auf etwa 80-90 % belaufen, durch die Ergänzung weiterer Betriebszeiten erhöht werden.

Vielmehr ist die Mengenlimitierung der biologischen Stufe von Bedeutung. Eine zu starke Auslastung führt zur Beeinträchtigung der biologischen Aktivität, wonach die Outputqualitäten unter Umständen nicht eingehalten werden können.

In der biologischen Stufe setzen Mikroorganismen die Fraktionen soweit um, dass sie den Vorgaben der zutreffenden Gesetze und Verordnungen entsprechen. Vorgaben zur Deponierfähigkeit definiert die Deponieverordnung (DepV). Kriterien zur Bewertung der biologischen Stabilität sind die Atmungsaktivität AT_4 , Gasbildung GB_{21} und TOC im Eluat sowie der TOC im Feststoff. Eine Erhebung von Doedens/Gallenkemper/Ketelsen (2006)⁷ belegt, dass die Ablagerungswerte im Regelfall eingehalten werden können, Ausnahme ist der TOC_{Eluat} , bei dem die Grenzwerte nur knapp eingehalten werden. Wobei kritisiert wird, dass die Parameter nicht nach einem Stand der Technik oder der BREF festgelegt wurden, sondern nach politisch/strategischen Gesichtspunkten und mit hohen Hürden für die Anwendbarkeit. Zudem waren erhöhte Werte auch auf Anfangsschwierigkeiten in der Inbetriebnahmephase zurückzuführen. Eine nachträgliche Korrektur des Grenzwertes TOC_{Eluat} auf 300mg/l sowie

⁷ Die Erhebung wurde 6/2005 bis 3/2006 von Prof. Doedens/IBA/INFA im Auftrag der ASA durchgeführt. Die Daten von 10 Anlagen wurden im Hinblick auf die Verfahrenstechnik, den Betrieb und den Abfallinput anlagenspezifisch erhoben und ausgewertet.

eine von Gesetzes wegen zulässige Abweichung⁸ entschärft die Situation. Daher kann von einer durchgehend hohen Einhaltung der Ablagerungskriterien der biologischen Stufe gesprochen werden, solange die Befüllung in adäquater Menge erfolgt.

Die Abluft der biologischen Stufe wird in der Regel durch eine Kombination aus saurem Wäscher und der regenerativ thermischen Oxidation (RTO) behandelt. Teilströme mit geringen Kohlenstoffgehalten, wie zum Beispiel der Hallenluft, werden in einigen Anlagen über kostengünstigere Biofilter gereinigt. Ein Kamin führt die unterschiedlichen Abluftströme zusammen, wobei in der Summe die Grenzwerte der 30. BImSchV (Tabelle 4.7) unterschritten werden müssen. Die Grenzwerte für Konzentration und Fracht an Kohlenstoff sind dabei als wesentliche Randbedingungen anzusehen [Wallmann *et al.*, 2006].

Tabelle 4.7: Emissionsgrenzwerte für MBA in Deutschland [30. BImSchV, § 6]

Parameter	Einheit	30. BImSchV
Gesamtkohlenstoff (TOC)	mg/Nm ³ ¹⁾	20/40
Gesamtkohlenstoff (TOC)	g/Mg MBA-Input	55
Lachgas (N ₂ O)	g/Mg MBA-Input	100
Staub	mg/Nm ³ ¹⁾	30/10
Dioxine/Furane (PCDD/F)	ng/Nm ³ (TEQ)	0,1
Geruch	GE/Nm ³	500

¹⁾ Tagesmittelwert/Halbstundenmittelwert

Wallmann *et al.* (2006) stellen fest, dass die geforderten Abluftgrenzwerte durch ausreichend dimensionierte Einzelkomponenten (saure Wäsche und RTO, ggf. Biofilter für gering belastete Teilströme) eingehalten und zum Teil sehr deutlich unterschritten werden. Das gilt sowohl für die gemäß 30. BImSchV kontinuierlich zu überwachenden Emissionsparameter Gesamtkohlenstoff (TOC; Konzentration und Fracht), Lachgas (N₂O) und Staub sowie für die diskontinuierlich zu messenden Parameter Geruch und Dioxine/Furane (PCDD/F). In Einzelfällen auftretende Überschreitungen werden durch eine Nachrüstung kontrollierbar. Daher wird von keiner auf die Abluftreinigung zurückzuführende Kapazitätslimitierung der MBA ausgegangen.

Die mengenbezogene Kapazität der biologischen Stufe ergibt sich aus der technisch angegebenen Gesamtkapazität abzüglich dem Anteil von 50,4 %, der zur thermischen Verwertung abgeführt wird⁹ sowie 8,9 % der Stoffströme zur stofflichen Verwertung inklusive Biogaserzeugung, die der Anlage bereits in der mechanischen Stufe entzogen werden. Demnach stünden 40,7 % als Rottekapazität zur Verfügung (20,9 % Deponiematerial zzgl. 19,8 % Rotteverlust bzw. 51,53 % Deponiematerial und 48,64 % Rotteverlust), wie in Abbildung 4.28 gezeigt. Diese Verteilung könnte jedoch über die Anpassung der Eingabevariablen jederzeit variiert werden.

⁸ „...wenn ein Parameter den nachfolgend aufgeführten jeweiligen Zuordnungswert zwar überschreitet, aber dieser Zuordnungswert vom Perzentilwert P₉₀ aller Messwerte nicht überschritten wurde und der Median aller Messwerte der letzten 24 Monate den entsprechenden Zuordnungswert eingehalten hat, gilt die Einhaltung als noch gegeben....“, [DepV, Anhang 4, Abs.4]

⁹ 50,4 % des gesamten Anlagenoutputs gehen in die energetische Verwertung; davon entfallen auf EBS-Kraftwerke 48 %, MVA 18 %, Kohlekraftwerke 17 %, Zementkraftwerke 12 % und Sonstige 5 % [Ketelsen/Nelles, 2012].

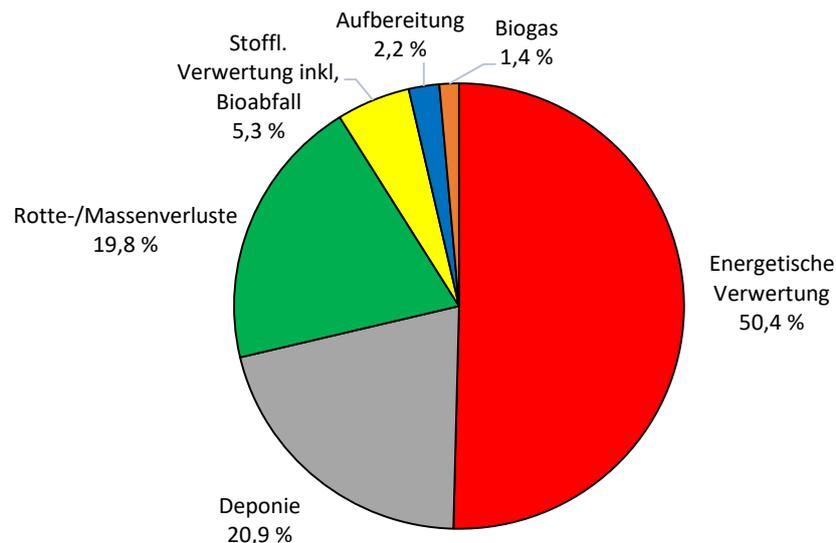


Abbildung 4.28: Output deutscher MBA im Mittel für alle Anlagentypen [Ketelsen/Nelles, 2015; eigene Darstellung]

Bestätigt werden die Werte von Thiel/Thomé-Kozmiensky (2008), deren biologisches Volumen mit 39 % (22 % Deponiematerial zzgl. 17 % Rotteverluste) nur knapp darunterliegt.

Die Stoffgruppenverteilung wird durch Transferfaktoren gesteuert, die die Materialien nach *Rotte*, *brennbare Materialien (EBS)* und *stoffliche Verwertung* separieren. Innerhalb der mechanischen Stufe erfolgt eine weitere Separierung des *EBS* in Anteile für die MVA sowie die EBS-Kraftwerke und die Mitverbrennung. In der biologischen Stufe erfolgt die Trennung nach *Deponiematerial* und *Rotteverlust*. Die Kapazität der biologischen Stufe wird über eine Mengenangabe definiert. Es ergeben sich die folgenden Prozessparameter:

Tabelle 4.8: Prozessparameterauswahl der MBA

Parameter	Kennung	Einheit
Rottekapazität	KAPA_ROTTE	Mg
1. Schritt (M-Stufe; Splitting Rotte & Brennbares)		
TF_Rotte (je Stoffgruppe)	TF_ROTTE	%
TF_Brennbares (je Stoffgruppe)	TF_EBS	%
TF_Sonstige (je Stoffgruppe)	TF_SONSTIGE	%
2. Schritt (M-Stufe; Splitting EBS)		
TF_HRF/SBS (je Stoffgruppe)	TF_HRF/SBS	%
TF_SR (je Stoffgruppe)	TF_SR	%
3. Rotte		
TF_Deponie	TF_DEPONIE	%
TF_Rotteverlust	TF_VERLUST	%

Der Algorithmus des Stoffgruppentransfers wird beispielhaft am Material *Organik* dargestellt (Formel 36). Die Modellierung *Kapazitätslimitierung* verhält sich analog zur Mengenlimitierung der Mitverbrennung und LVP-Sortieranlagen, beschränkt sich jedoch ausschließlich auf die biologische Stufe (Formel 37 und 38):

;Stoffe in die Rotte

$$Y00=X00*ORGANIK_ROTTE \quad (\text{Formel 36})$$

;Gesamtinput in die Rotte

$$\text{INPUT_ROTTE}=X00+X01+Xxx \quad (\text{Formel 37})$$

;Warnmeldung „Rottekapazität überschritten“

$$\text{IF}(>(\text{INPUT},\text{KAPA_ROTTE}),\text{INPUT}-\text{KAPA_ROTTE},0) \quad (\text{Formel 38})$$

Die Anforderungen an die Sekundärabfälle zur Verbrennung werden von den thermischen Behandlungsanlagen gestellt (vgl. Kapitel 4.4.1, 4.4.2 & 4.4.3). Die Mengen werden infolgedessen um Chlor- und Schwefelfrachten sowie den Heizwert ergänzt. Die Eigenschaften der Outputs ergeben sich aus der Materialzusammensetzung unter Berücksichtigung fraktionsspezifischer Kennzahlen.

Für den Anteil zur MVA gelten weniger strenge Qualitäten als für den Einsatz in einem EBS-Kraftwerk. Nach Aussage von Ketelsen/Nelles (2015) ist die Qualitätssicherung der EBS in den vergangenen Jahren wesentlich verbessert worden, so dass inzwischen konstante und an das jeweilige EBS-Kraftwerk angepasste Brennstoffqualitäten geliefert werden können.

4.4.6 Kompostierungsanlagen

Die Kompostierung ist, neben der Vergärung und der energetischen Verwertung im Biomassekraftwerk, nach wie vor die gängigste Variante zur Behandlung von Abfällen aus der Biotonne sowie Garten- und Parkabfällen. Den eingesetzten Abfällen werden über Abscheider Metalle und über Siebschritte Störstoffanteile entzogen. Das organische Material wird unter Sauerstoffanwesenheit verrottet und das Endprodukt unter anderem als Kompost in der Landwirtschaft verwertet. Bei diesem Verfahren findet keine Nutzung des Energieinhaltes der Bioabfälle statt. Es gibt Kompostierungsanlagen, die auf die Behandlung von Abfällen für die Biotonne oder Garten- und Parkabfällen, aber auch Kombianlagen, die für die Behandlung beider Abfallströme ausgelegt sind. Abbildung 4.29 zeigt das prinzipielle Verfahrensbild einer Bioabfallkompostierungsanlage. Reine Grünabfallkompostierungsanlagen sind noch einfacher gestaltet. In der weiteren Betrachtung und Modellierung werden die Anlagentypen zur Überkategorie *Kompostierungsanlagen* zusammengefasst.

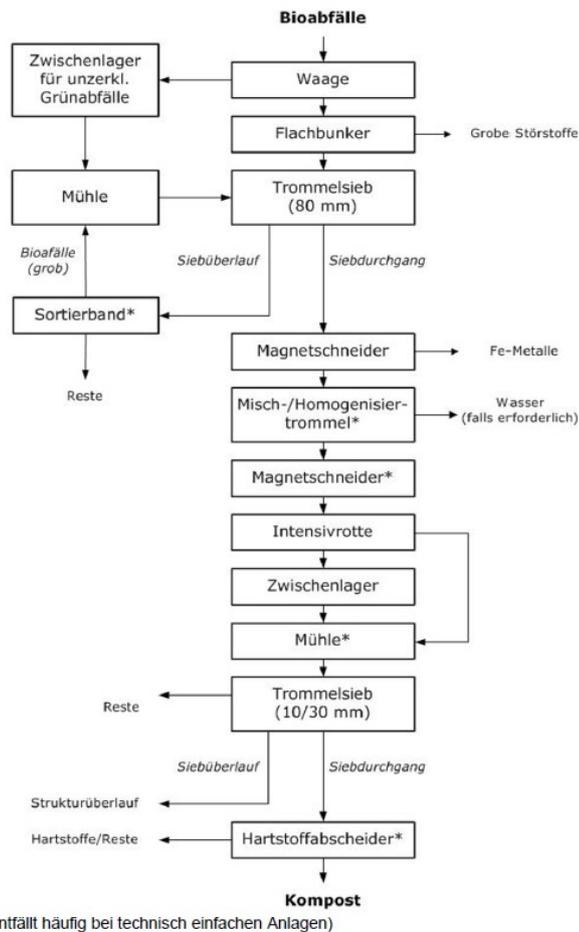


Abbildung 4.29: Vereinfachtes Verfahrensfliessbild einer Bioabfallkompostierungsanlage [Kranert, 2010]

Mit dem Ausbau des Biotonnenangebotes ist von einer Mehrmenge der zu behandelnden Abfälle auszugehen. Die Zusammensetzung und die damit einhergehenden Eigenschaften (Wassergehalt, C/N-Verhältnisse, pH-Wert, etc.) des Anlageninputs bleiben, abgesehen von einem etwas erhöhten Störstoffanteil, weitestgehend konstant (vgl. Kapitel 2.2.2). Als Störstoffe sind in diesem Falle die biologisch nicht abbaubaren Stoffgruppen, also alle außer der Stoffgruppe *Organik*, zu verstehen. Da nicht von einer grundlegenden Veränderung der Zusammensetzung ausgegangen wird, was Auswirkungen auf den biologischen Prozess haben könnte, wird im Zuge dieser Arbeit nur auf die technisch angegebene Gesamtkapazität [Mg] zurückgegriffen und diese als limitierende Größe im Prozess verankert. Zu hohe Störstoffanteile sollen als informativer Warnhinweis angezeigt, aber nicht als hartes Kapazitätskriterium in das Modell eingebunden werden.

Limitationen aufgrund von Abluftqualitäten und deren Einhaltung im Hinblick auf die Emissionsgrenzwerte nach der TA Luft werden bei konstanter Zusammensetzung der Inputs nicht gesehen.

Die für die Modellierung notwendigen Parameter beschränken sich auf die Gesamtkapazität [Mg] und den Störstoffanteil [%]. Über Transferfaktoren können die Menge an Kompost und der Rotteverlust bestimmt werden. Der Algorithmus verhält sich analog zur Mengenlimitierung der Rottestufe der MBA und wird um den Warnhinweis des Störstoffanteils ergänzt:

;Inputmenge

$$\text{INPUT} = X00 + X01 + X02 + X03 + X06 \quad (\text{Formel 39})$$

;Warnmeldung ‚Kompostierungskapazität überschritten‘

$$\text{If}(>(\text{INPUT}, \text{MAX_MENGE_KOMPOSTIERUNG}), \text{INPUT} - \text{MAX_MENGE_KOMPOSTIERUNG}, 0) \quad (\text{Formel 40})$$

;Störstoffkonzentration [Mg/Mg]

$$\text{STOERANTEIL} = (X02 + X06) / \text{INPUT} \quad (\text{Formel 41})$$

;Warnmeldung ‚Störstoffanteil überschritten‘ [Ausgabe in %]

$$X05 = \text{STOERANTEIL} * 100 \quad (\text{Formel 42})$$

;Output Rotteverlust entspricht xx% (Prozessparameter) vom Input

$$Y01 = \text{INPUT} * \text{TF_ROTTEVERLUST} * 0.01 \quad (\text{Formel 43})$$

;Output Kompost ist die Differenz aus Input abzüglich Verlust

$$Y00 = \text{INPUT} - Y01 \quad (\text{Formel 44})$$

4.4.7 Vergärungsanlagen

Die Vergärung von organischen Abfällen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Nach der mechanischen Aufbereitung werden organische Bestandteile unter Sauerstoffausschluss vergoren. Das gewonnene Biogas wird in BHKWs in Strom und in Wärme umgewandelt. Es wird nach Nass- und Trockenfermentation im kontinuierlichen und/oder diskontinuierlichen Verfahren unterschieden. Abbildung 4.30 zeigt den prinzipiellen Ablauf eines Vergärungsprozesses. In der weiteren Betrachtung und Modellierung werden die Anlagentypen zur Überkategorie *Vergärungsanlagen* zusammengefasst.

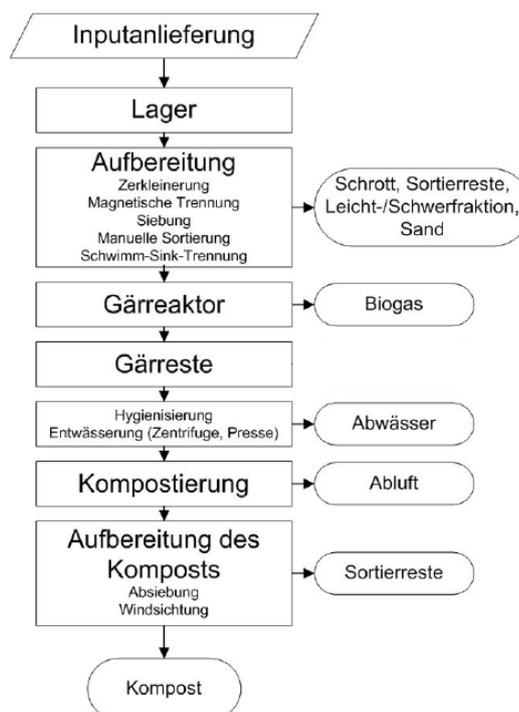


Abbildung 4.30: Vereinfachtes Verfahrensfliessbild eines Vergärungsverfahrens [Kranert, 2010]

Die Kapazitätslimitierung beschränkt sich, aus den bereits in 4.4.6 genannten Gründen, auf die technisch angegebenen Kapazitäten sowie auf eine Warnmeldung für Störstoffe. Anstelle von

Kompost entsteht Gärrest, der als Sekundärabfall in die Kompostierungsanlagen überführt und dort als zusätzlicher Input-Stoffstrom berücksichtigt wird.

4.4.8 Deponien

Die Deponie stellt keine Behandlungsoption dar. Sie dient der Ablagerung von Abfällen. Seit 2005 dürfen Siedlungsabfälle nur noch nach einer thermischen oder mechanisch-biologischen Vorbehandlung abgelagert werden. Schlacken aus Verbrennungsanlagen (AVV 190112 - Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken, mit Ausnahme derjenigen, die unter 190111 fallen) werden auf Deponien der Klassen I und II entsorgt, sofern sie nicht stofflich zum Beispiel im Straßenbau oder im Deponiebau verwertet werden. Das Rottegut aus mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen (AVV 190501 - nicht kompostierte Fraktion von Siedlungs- und ähnlichen Abfällen) wird nur auf der Klasse II Deponie entsorgt. Vorgaben regelt die Deponieverordnung (DepV).

Die Kapazitäten der Deponien sind nur bedingt technisch, vielmehr flächenmäßig begrenzt. Ihre Limitierung ergibt sich aus dem Restvolumen der jeweiligen Deponieklasse [m³].

4.5 Darstellung des Modellsystems

Schritt für Schritt wurde die Diskurswelt in das Modellsystem übertragen. Zunächst wurden Stoffgruppen, demografische Einflussfaktoren, Erfassungssysteme und behandelnde Anlagen selektiert und spezifiziert. Eine Übersicht ist Abbildung 4.31 zu entnehmen. Das demografische Regressionsmodell sowie die Eingabemaske für Modellvariablen wurden in MS Excel angelegt (Abbildung 4.32). Die dort ermittelten, absoluten Stoffgruppenaufkommen werden per *Livelink* an das Stoffstrommodell übertragen. In dem UMBERTO®-Modell wurden die verschiedenen Erfassungssysteme, der Materialfluss und die Abfallbehandlungsanlagen als abstrakte Repräsentanten modelliert (Abbildung 4.33). Anzeigefelder geben Hinweise auf mögliche Kapazitätsüberschreitungen der Anlagen. Der Stoffgruppenfluss innerhalb des Bilanzraums lässt sich zahlenmäßig anhand der Pfeile und visuell in der Sankeyansicht nachvollziehen. Bilanzen können in Exceltabellen exportiert werden.

Um den Modellumfang handhabbar zu machen, beschränkte sich die Modellierung auf Inhalte, die zur Beantwortung der Fragestellung der Arbeit als ausreichend erachtet wurden.

Das Modell ist generisch und beliebig parametrisierbar. So hängt der tatsächliche Einsatz der modellierten Elemente vom Bilanzraum und Zielstellung der jeweiligen Untersuchung ab. Nicht zwangsläufig müssen alle Elemente miteinbezogen werden. Zum Beispiel können MBA-Kapazitäten auf null gesetzt oder Abfälle, wie Importe, ausgeblendet werden, wenn diese Aspekte für den Bilanzraum oder das Szenario irrelevant sind.

Mit der Anwendung des Modells können Einflüsse demografischer Faktoren auf das zukünftige Stoffgruppenaufkommen vorausgesagt werden. Diese Kenntnis dient als Impulsgeber für die zukünftige Gestaltung von Erfassungssystemen. Durch die Ausgestaltung der Erfassungssysteme kann auf die Menge und Zusammensetzung von Abfallströmen geschlossen werden. Dies ermöglicht die Entwicklung optimaler Stoffstrommanagementstrategien. Damit kann die, aus material- und energieeffizienter Sicht, vorteilhafteste Behandlungsoption gewählt und die verlässliche Auslastung der Anlagen sichergestellt werden. Die langfristige Prognose der Behandlungskapazitäten ermöglicht frühzeitiges Handeln, um Entsorgungsengpässen durch Unterkapazitäten vorzubeugen oder Überkapazitäten zu vermeiden.

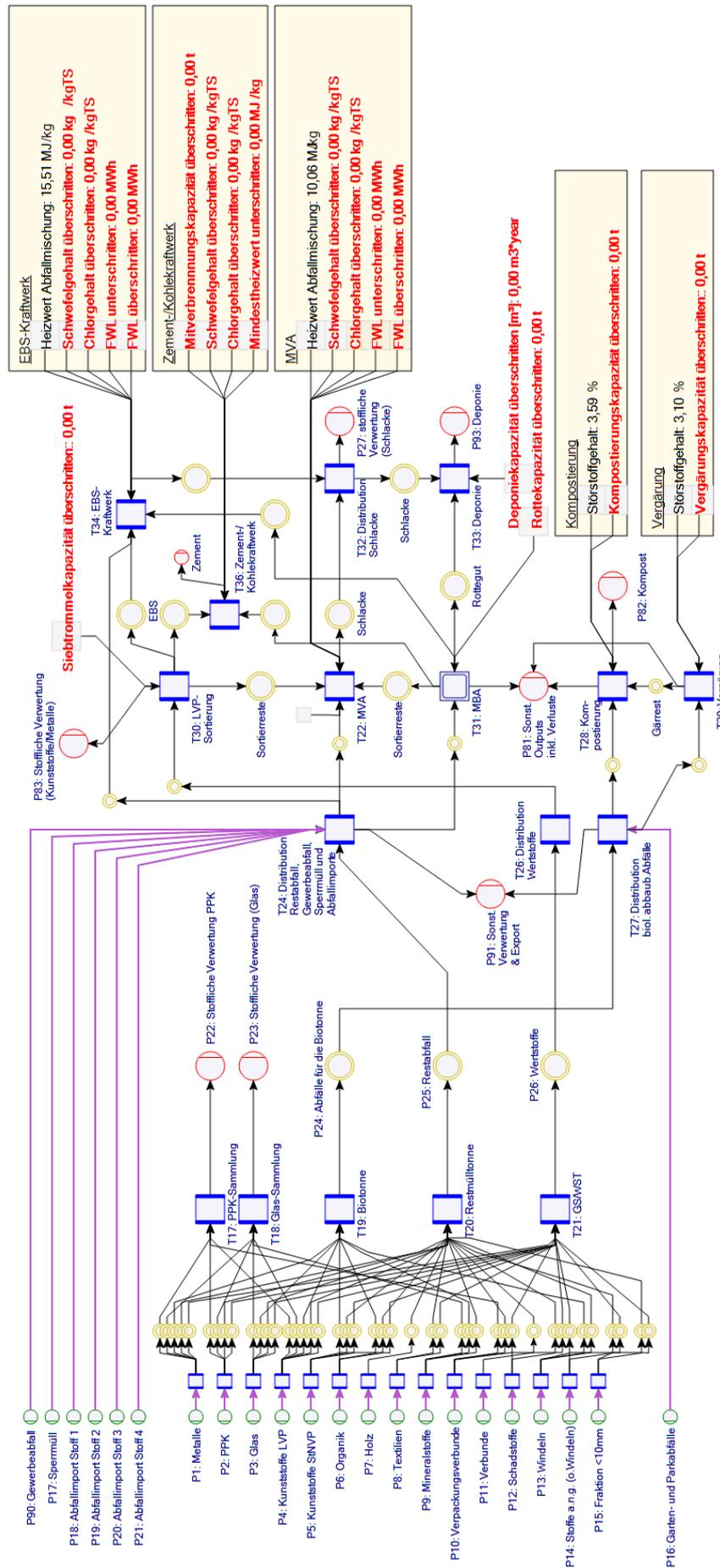
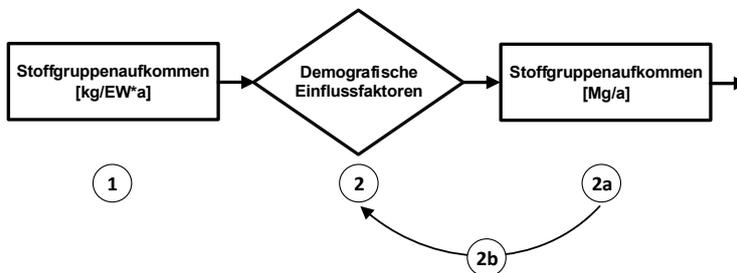


Abbildung 4.33: Prognosemodell Teil 2 - Stoffstrommodell

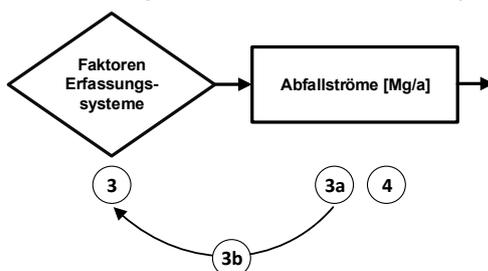
5 Modellanwendung

Bevor mit den eigentlichen Prognosen begonnen werden kann, bedarf es der Überprüfung der Verhaltens- und Strukturtreue. Dafür werden die für das Status quo-Jahr geltenden Variablenwerte in das Modell integriert. Die Funktionsweise des Modells wird verifiziert, indem SOLL-Werte aus 2014 mit den IST-Werten des Modells abgeglichen werden, so dass Abweichungen analysiert und geringfügige Anpassungen der Variablen und Algorithmen vorgenommen werden können. Zur Ermittlung der Jahreswerte für 2014 ergeben sich die folgenden Arbeitsschritte:

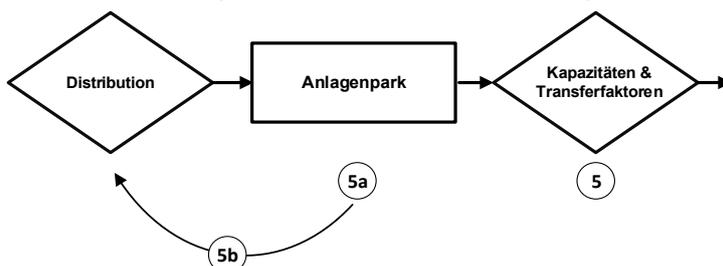
1. Ermittlung des personenspezifischen Stoffgruppenaufkommens [kg/EW*a]
2. Ermittlung der demografischen Randbedingungen
 - a. Verifikation der IST- und SOLL-Stoffgruppenaufkommen [Mg/a]
 - b. Ggf. Rückkopplung an das demografische Regressionsmodell



3. Ermittlung der Anschluss- und Erfassungsquoten der Wertstoffsammelsysteme [%]
 - a. Verifikation der IST- und SOLL- Abfallströmmen (Zusammensetzung sofern zutreffend)
 - b. Ggf. Rückkopplung an die Erfassungssysteme und Approximation der Variablen
4. Ermittlung externer Abfallströme (u. a. Gewerbeabfall, Sperrmüll und Importe) [Mg/a]



5. Ermittlung der Zahlenwerte der kapazitätslimitierenden Parameter und Transferfaktoren sowie Bestimmung der Teilkapazität für die adressierten Abfälle
 - a. Verifikation der IST- und SOLL-In- und Outputs (Eigenschaften sofern zutreffend)
 - b. Rückkopplung an die Distribution und mögliche Approximation der Transferfaktoren



In Kapitel 5.2 werden die finalen Parameter dargestellt.

5.1 Datenbasis und -unsicherheit

Während das Modell durchgängig variablenbasiert ist und demnach mit beliebigen Daten gespeist werden kann, bedarf es zur Abbildung des gewählten realweltlichen Ausschnittes (Status quo, Bilanzraum Deutschland) entsprechender Daten. Gleichzeitig kann die Funktionalität des Modells durch die Eingabe von Realdaten überprüft werden. Anschließend können Prognosewerte eingesetzt werden, um Auswirkungen auf die Abfallströme und Behandlungskapazitäten für unterschiedliche Szenarien abzuleiten.

Für die Realdaten im Status quo-Jahr kann überwiegend auf Literaturangaben zurückgegriffen werden. Nur einige Datenlücken sind durch eigene Annahmen abzudecken. Für die Szenarien werden Daten aus quantitativen und qualitativen Prognosen verwendet. Bei der quantitativen Prognose wird auf strukturierte Daten bestehender Prognosen zurückgegriffen. Bei der qualitativen Prognose müssen Informationen unterschiedlicher Herkunft mit eigenen Einschätzungen gepaart und aufbereitet werden.

Abbildung 5.1 veranschaulicht, welche Daten benötigt werden, welche Prognosetechnik ihnen zugrunde liegt und welcher Quelle sie entnommen werden können.

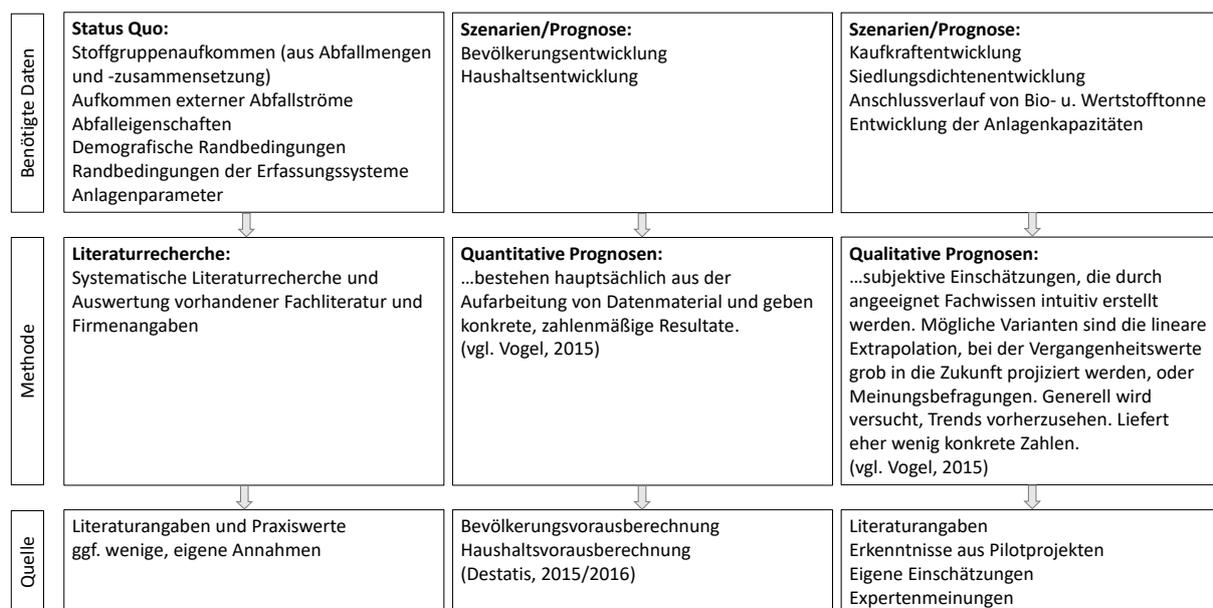


Abbildung 5.1: Übersichtliche Darstellung der Datenbasis und Prognosetechnik

Alle verwendeten Prognosedaten sind mit Unsicherheiten verbunden. Das gilt für strukturierte Daten aus den Vorausberechnungen des Destatis ebenso wie für die eigens in Anlehnung an die Literatur hergeleiteten Daten.

Zu seinen Prognosen schreibt das Destatis: „*die angebenen Werte sind als langjährige Durchschnitte zu interpretieren; die tatsächlichen Wanderungssalden werden aller Voraussicht nach starken Schwankungen unterliegen. Es wird gezeigt, wie sich die Bevölkerungszahl und die Bevölkerungsstruktur unter getroffenen Annahmen entwickeln würden. Die Annahmen zu Geburtenhäufigkeit, Sterblichkeit und Wanderungen beruhen auf Untersuchungen der Verläufe dieser Komponenten im Zeit- und Ländervergleich sowie auf Hypothesen über die aus heutiger Sicht erkennbaren Entwicklungstrends. Es wird kein Anspruch erhoben, die Zukunft bis 2060 vorherzusagen. Da der Verlauf der maßgeblichen Einflussgrößen mit*

zunehmender Vorausberechnungsdauer immer schwerer vorhersehbar ist, haben solche langfristigen Rechnungen Modellcharakter“. [Destatis, 2009]

Bei den qualitativen Prognosen wird durch sorgfältige Literaturrecherche und Datenaufbereitung (z. B. Fortschreibung linearer Trends) versucht, eine möglichst plausible und aussagekräftige Datenlage zu schaffen. Eine statistisch gesicherte Genauigkeit ist aufgrund des gravierenden Datendefizites (insbesondere im Hinblick auf Abfallverhaltensmuster beim demografischen Wandel) vom Prinzip her ausgeschlossen.

Die Qualität und Aussagekraft der Prognosen hängt also maßgeblich von den eingesetzten Daten ab. Aufgrund etwaiger Datenunsicherheiten sind die Ergebnisse der Arbeit als Richtwerte zu verstehen.

5.2 Modellverifikation und Status quo

5.2.1 Personenspezifisches Stoffgruppenaufkommen

Für die Ermittlung des Stoffgruppenaufkommens wurden keine eigenen Sortieranalysen durchgeführt. Es basiert auf Grundlage der Mengen aus der GENESIS-online Datenbank des Statistischen Bundesamtes (im Folgenden GENESIS-online) unter Einbezug der aus der Literatur hervorgehenden Abfallzusammensetzungen (Anhang A). Einzig die Tonnagen für LVP wurden Bothe (2015) entnommen, da GENESIS-online eine Mischform aus LVP, gemischten Wertstoffen und Verbunden angibt, wonach die eindeutige Menge an LVP nicht identifizierbar ist. Bothe hingegen hat umfangreiche Auswertungen der Mengenstromnachweise der Dualen Systeme durchgeführt. Durch die Division mit der Einwohnerzahl aus 2014 werden die folgenden einwohnerspezifischen Stoffgruppenaufkommen erhalten:

Tabelle 5.1: Stoffgruppenaufkommen 2014

Stoffgruppe	Aufkommen [kg/EW*a]¹⁾
Metalle	9,8
PPK	89,4
Glas	31,9
Kunststoffe LVP	22,3
Kunststoffe StNVP	8,7
Organik	108,2
Holz	3,1
Textilien	8,1
Mineralstoffe	8,0
Verpackungsverbunde	5,8
Verbunde sonstige	5,3
Schadstoffe	0,8
Stoffe a.n.g. (Windeln)	17,2
Stoffe a.n.g. (ohne Windeln)	1,8
Fraktion < 10 mm	24,0

1) Quellen für die Herleitung: GENESIS-online; Bothe, 2015; Hoffmann et al., 2010; Destatis, 2009

5.2.2 Demografische Randbedingungen

Tabelle 5.2 zeigt die demografischen Randbedingungen für 2014:

Tabelle 5.2: Demografische Randbedingungen 2014

Merkmal	Wert
Einwohner	81.058.000 ¹⁾
Haushalte	40.223.000 ²⁾
Ø HH-Größe [Pers/HH]	2,02
Ø verfügbares Nettoeinkommen [€/Pers]	21.117 ³⁾
Inflationsrate [%]	0,9 ⁴⁾
Ø Kaufkraft [€/Pers] (Verfügb. Nettoeinkommen um Inflationsrate bereinigt)	20.927
Durchschnittliche Siedlungsdichte [EW/km ²]	909 ⁵⁾

1) Quelle: Destatis, 2015; „13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung“; BEV-VARINATE-02 - Kontinuität bei stärkerer Zuwanderung (G1-L1-W2) – berücksichtigt EU-Arbeitnehmerfreizügigkeit (geltend seit 2010) und Zuzug von Flüchtlingen.

2) Quelle: Destatis, 2017: „Haushaltsvorausberechnung – Entwicklung der Privathaushalte bis 2035“

3) Quelle: Destatis, 2017b: „Verfügbares Einkommen privater Haushalte je Einwohner Deutschland bis 2015“

4) Quelle: Statista, 2017a: „Inflationsrate in Deutschland“

5) Quelle: Destatis, 2018: „Daten aus dem Gemeindeverzeichnis Kreisfreie Städte und Landkreise nach Fläche und Bevölkerung 2005-2015“; eigene Auswertung

Die Variablen wurden für die Verifikation in die Regressionsgleichungen eingefügt, die nach der in Abbildung 4.13 vorgestellten Methode erstellt wurden. Alle Regressionsgleichungen je Stoffgruppe und demografischem Einflussfaktor sind Anhang A zu entnehmen. Als Ergebnis wurden die folgenden Stoffgruppenaufkommen vom Modell errechnet:

Tabelle 5.3: Absolutes Stoffgruppenaufkommen im Status quo-Jahr 2014

Stoffgruppe	Aufkommen 2014 [Mg/a]
Metalle	790.500
PPK	7.246.600
Glas	2.588.700
Kunststoffe LVP	1.807.000
Kunststoffe StNVP	708.900
Organik	8.767.800
Holz	250.200
Textilien	652.700
Mineralstoffe	648.000
Verpackungsverbunde	469.200
Verbunde sonstige	427.100
Schadstoffe	65.900
Stoffe a.n.g. (Windeln)	1.393.600
Stoffe a.n.g. (ohne Windeln)	146.900
Fraktion < 10 mm	1.946.800
SUMME	27.909.800

Bei GENESIS-online und Bothe (2015; für LVP) beträgt die Summe aus Hausmüll und hausmüllähnlichem Gewerbeabfall, Abfällen für die Biotonne, Glas, PPK und LVP 27.848.400 Mg. Damit liegt eine rundungsbedingte Abweichung von <1 % von der durch das Modell errechneten Masse von 27.909.800 Mg vor. Gleiches gilt auf Stoffgruppenebene. Die Funktionalität des Regressionsmodells gilt damit als bestätigt.

5.2.3 Anschluss- und Erfassungsquoten

Die Anschluss- und Erfassungsquoten der einzelnen Sammelsysteme wurden zunächst auf Grundlage von Literaturdaten angenommen. Durch den Abgleich von IST- und SOLL-Mengen der Abfallströme wurden sie jedoch weiter approximiert, da den statistisch erhobenen Daten der SOLL-Mengen eine größere Verlässlichkeit zugesprochen wird als den teils stark variierenden Quotenangaben aus der Literatur. Abbildung 5.2 illustriert das Vorgehen. Die Quoten wurden dabei soweit approximiert, dass die IST-Mengen der Abfallströme mit den SOLL-Werten der GENESIS-online Datenbank nahezu übereinstimmen und die Zusammensetzung der Abfallströme der Darstellung in Anhang A entspricht.

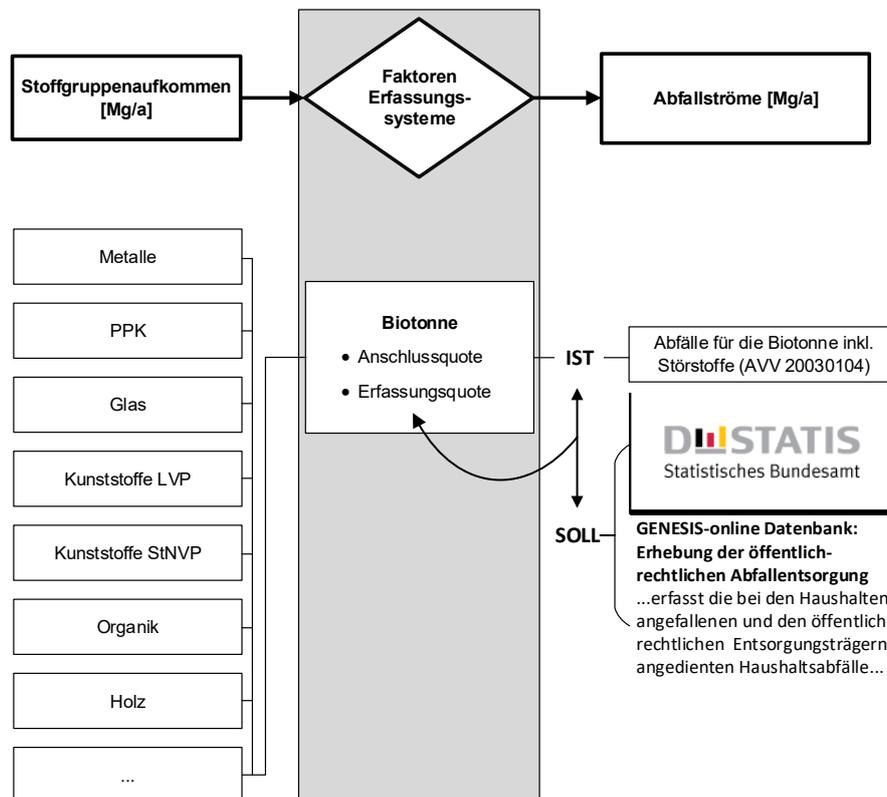


Abbildung 5.2: Vorgehen bei der Approximation von Anschluss- und Erfassungsquoten

Anschluss- und Erfassungsquote Gelber Sack und Wertstofftonne

Der Zielmenge (SOLL) von 2.434.000 Mg Wertstoffmenge aus dem Gelben Sack und der Wertstofftonne steht eine IST-Menge von 2.455.000 Mg (Abweichung +0,9 %) gegenüber.

Solange die Wertstofftonne nicht flächendeckend ausgebaut ist, bedarf es neben der Tonne nach wie vor des Gelben Sacks/der Gelben Tonne zur Erfassung von Leichtverpackungen,

ehe dieses System nach und nach von der Wertstofftonne abgelöst wird¹⁰. Die Erfassung der LVP und stoffgleichen Nichtverpackungen ergibt sich demgemäß aus Anschluss- und Erfassungsquoten beider Systeme.

2014 waren 12,4 Mio. Einwohner an eine Wertstofftonne angeschlossen (Bühnemann/Löhle, 2015), was einer Anschlussquote von 15,2 % entspricht. Die Anschlussquote des Gelben Sacks hängt von der Anschlussquote der Wertstofftonne ab und verringert sich um so viel Prozentpunkte, wie sich die Anschlussquote der Wertstofftonne erhöht. Anders als bei Erfassungssystemen, die ausschließlich auf die Erfassung einer Stoffgruppe ausgerichtet sind (z. B. Glas, PPK und Biotonnenabfälle), sind für die Erfassung im Gelben Sack und/oder der Wertstofftonne die Erfassungsquoten mehrerer Wertstoffarten relevant (Kunststoffe LVP, Kunststoffe StNVP, Metalle und Verpackungsverbunde). Ergänzt werden die Sammelmengen durch Störstoffe, wie Abbildung 5.3 zu entnehmen ist:

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	20
Wertstofferrfassung							
Anschlussquote Gelber Sack [%]	84,76	83,19	81,62	71,62	61,62	51,62	50
<i>*ASQ abzüglich der ASQ WST</i>							
Durchschnittliche Erfassungsquoten Gelber Sack:							
Erfassungsquote Kunststoffe LVP [%]	51,9	51,9	51,9	51,9	51,9	51,9	5
Erfassungsquote Kunststoffe StNVP [%]	33,1	33,1	33,1	33,1	33,1	33,1	3
Erfassungsquote Metalle [%]	51,3	51,3	51,3	51,3	51,3	51,3	5
Erfassungsquote Verpackungsverbunde [%]	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	3
Geschätzter Störstoffanteil in 100 % [%]	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	2
davon:							
PPK [%]	29,00	29,00	29,00	29,00	29,00	29,00	29
Batterien [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
Textilien [%]	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1
Stoffe an.g. (Gummi&E-Schrott) [%]	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1
Glas (REST) [%]	10,01	10,01	10,01	10,01	10,01	10,01	10
Organik (REST) [%]	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37
Windeln (REST) [%]	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20
Feinfraktion <10mm (REST) [%]	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1
(Geschätzte) Anschlussquote Wertstofftonne [%]	15,24	16,808	18,38	28,38	38,38	48,38	49
Durchschnittliche Erfassungsquoten Wertstofftonne:							
Erfassungsquote Kunststoffe LVP [%]	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	5
Erfassungsquote Kunststoffe StNVP [%]	62,2	62,2	62,2	62,2	62,2	62,2	6
Erfassungsquote Metalle [%]	70,4	70,4	70,4	70,4	70,4	70,4	7
Erfassungsquote Verpackungsverbunde	39,8	39,8	39,8	39,8	39,8	39,8	3
Geschätzter Störstoffanteil in 100 % [%]	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	2
davon:							

Abbildung 5.3: Ausschnitt der Eingabemaske zur Erfassung von LVP und StNVP-Wertstoffen

Die farblich hinterlegten Zellen markieren die Felder für die Eingabe, weiße Felder (hier die Anschlussquote des gelben Sacks) werden automatisch berechnet.

Die ermittelten Erfassungsquoten orientieren sich an den im Planspiel zur Verpackungsverordnung angenommenen Wertstoffmengen. Bei einem 100%igen Anschluss der Wertstofftonne gehen die Autoren Bühnemann *et al.* (2011) von einer Wertstoffsammelmenge

¹⁰ In der Modelllogik ersetzt die Wertstofftonne das bisherige Sammelsystem, da LVP in die Wertstofftonne integriert wird; ein gleichzeitiger, paralleler Anschluss eines Haushalts an beide Systeme ist in der Modellierung nicht vorgesehen.

von 34,7 kg/EW*a aus. Bei ausschließlicher Sammlung mittels Gelben Sackes sind es 27,7 kg/EW*a. Die Mehrmenge belief sich folglich auf 7 kg/EW*a (Tabelle 5.4). Sie enthält nicht nur stoffgleiche Nichtverpackungen, auch der Anteil an LVP steigt leicht, was Bünemann *et al.* (2011) durch eine höhere Systemakzeptanz erklären.

Tabelle 5.4: Stoffgruppenbezogene Sammelmengen aus Gelbem Sack und Wertstofftonne [Bünemann *et al.*, 2011; modifiziert]

	Sammelmenge Gelber Sack [kg/EW*a] (0 % AQ WST)	Sammelmenge Wertstofftonne [kg/EW*a] (100 % AQ WST)	Mehrmenge n. Bünemann <i>et al.</i> (2011)
Kunststoffe LVP ¹⁾	11,0	11,7	0,7
Kunststoffe StNVP ¹⁾	2,8	5,2	2,4
Metalle ²⁾	4,7	6,5	1,8
Verpackungsverbunde	2,1	2,2	0,1
PPK VP	0,9	0,9	0
Textilien	0,1	0,1	0
Stoffe a.n.g. ³⁾	0,1	0,1	0
PPK (NVP)+Rest, davon:	4,9	6,8	1,9
<i>PPK</i> ⁴⁾	1,2	1,2	0
<i>Organik</i> ⁴⁾	2,7	3,7	1
<i>Windeln</i> ⁴⁾	1,4	2,0	0,5
<i>Glas</i> ⁴⁾	0,7	1,0	0,3
<i>Fraktion <10mm</i> ⁴⁾	0,1	0,2	0
SUMME	27,7	34,7	7

*geringe Abweichungen sind rundungsbedingt.

1) Kunststoffe LVP/StNVP enthalten je Standardverpackungspolymere (LVP/StNVP), Folien (LVP/StNVP) und sonstige Kunststoffe (LVP/StNVP)

2) Metalle enthalten Weißblech und Aluminium

3) enthält Gummi und E-Schrott

4) der von Bünemann *et al.* (2011) als „Rest“ ausgewiesene Anteil wurde weiter differenziert in Windeln, Organik (im Wesentlichen auf nicht restentleerte Verpackungen zurückzuführen), Glas und Feinfraktion

Aus dem Abgleich von IST- und SOLL der einzelnen Stoffgruppen wurden die Erfassungsquoten approximiert.

Da die Pro-Kopf-Mengen des Planspiels nicht den von Bothe (2015) genannten realen Wertstoffmengen für 2014 entsprechen (29,2 kg/EW*a bei 0 % Anschlussquote und 36,5 kg/EW*a bei 100 % Anschlussquote der Wertstofftonne¹¹⁾), wurden die Erfassungsquoten nach oben korrigiert. Die prozentuale Zusammensetzung des Wertstoffgemisches, ebenso wie die Wertstoffmehrmenge zwischen einer Anschlussquote von 0 und 100 % der Wertstofftonne bleiben dabei annähernd erhalten. Deutlich steigen gemäß Tabelle 5.5 die Erfassungsquoten für die von der Wertstofftonne primär adressierten Nichtverpackungskunststoffe und Metalle:

¹¹ Bei einer Annahme von 81,058 Mio. EW im Jahr 2014

Tabelle 5.5: Erfassungsquoten und Störstoffanteile der Sammelsysteme Gelber Sack und Wertstofftonne

	Gelber Sack	Wertstofftonne
Erfassungsquote Kunststoffe LVP [%]	51,9	55,5
Erfassungsquote Kunststoffe StNVP [%]	33,1	62,2
Erfassungsquote Metalle [%]	51,3	70,4
Erfassungsquote Verpackungsverbunde	37,6	39,8
<hr/>		
Geschätzter Störstoffanteil in 100 % [%]	25,8	26,2
davon:		
PPK [%]	29,0	23,1
Batterien [%] (Schadstoffe)	0,0	0,0
Textilien [%]	1,1	1,1
Stoffe a.n.g. (Gummi&E-Schrott) [%]	1,1	1,1
Glas (REST) [%]	10,0	10,9
Organik (REST) [%]	37,0	40,3
Windeln (REST) [%]	20,0	21,7
Feinfraktion <10mm (REST) [%]	1,7	1,8

Die ermittelten Erfassungsquoten für die Wertstofftonne entsprechen letztendlich nicht denen des Planspiels (siehe Tabelle 5.6). Zurückzuführen ist das unter Umständen auf ein unterschiedliches Ursprungspotential an Wertstoffen (bei abweichender Restabfallzusammensetzung) oder auf abweichende Stoffgruppenzuweisungen. Während das Planspiel eine Erfassungsquote für ausschließlich Flüssigkeitskartons angibt, werden sie im Rahmen dieser Arbeit der 1. Differenzierungsebene Verbunde zugeordnet. Darüber hinaus wurden Metalle zu einer Stoffgruppe zusammengefasst und Kunststoffe in LVP und StNVP differenziert. Die Quoten weichen daher teils deutlich ab, sind letztendlich aber auch nicht vergleichbar.

Tabelle 5.6: Vergleich der Erfassungsquoten der Wertstofftonne aus Literatur und eigener Herleitung

Stoffgruppe	Erwartete Erfassungsquoten [%] nach Bünemann <i>et al.</i> (2011)		Approximierte Erfassungsquoten	
Aluminium	VP	55,0	60 (gemittelt)	
	StNVP	50,0		
Weißblech	VP	65,0		70,4
	StNVP	70,0		
Folie	VP	60,0	61,66 für VP 56,66 für StNVP (gemittelt)	
	StNVP	55,0		
Verpackungs- -polymere	VP	65,0		55,5 für VP
	StNVP	55,0		62,2 für StNVP
Mischkunst- stoffe	VP	60,0		
	StNVP	60,0		
Getränke- kartons	VP	70,0	70	
			39,8	

Möglicherweise ist auch die vom Planspiel auf Grundlage von Pilotprojekten angenommene Mehrmenge in Höhe von 7 kg/EW*a zukünftig anzupassen. So weist Schneider (2013) auf den für die Abfallwirtschaft nicht neuen Effekt hin, wonach im Rahmen der flächendeckenden Realisierung die erzielten Werte deutlich unter denen von Pilotversuchen oder Testgebieten liegen. Kern/Siepenkothen (2013) sowie Schulze/Schlitte (2012) gehen ebenfalls von einer geringeren Mehrmenge aus. Erfassungsquoten der Wertstofftonne müssten nach unten korrigiert werden, bestätigt sich eine dauerhaft niedrigere Mehrmenge.

Abbildung 5.4 zeigt die vom Modell berechnete Zusammensetzung und Menge von Restabfall und LVP bzw. des Sammelgemisches aus Gelbem Sack und Wertstofftonne für die Anschlussquoten:

- 0 % - vor der Einführung der Wertstofftonne,
- 15,2 % - Stand 2014,
- 100 % - theoretischer Vollanschluss,

jeweils mit den Daten des Status quo-Jahres.

Restabfall wird von Stoffgruppenanteilen entfrachtet, die durch das neue Sammelsystem erfasst werden. Dabei handelt es sich insbesondere um stoffgleiche Nichtverpackungen und Metalle. Aber auch der Anstieg von LVP und Störstoffen im Wertstoffsammelgemisch ist laut Bünemann *et al.* (2011) in Pilotprojekten beobachten worden, so dass sich im Modell nicht nur die Absolutmengen von StNVP und Metallen ändern, sondern auch die der anderen Stoffgruppen.

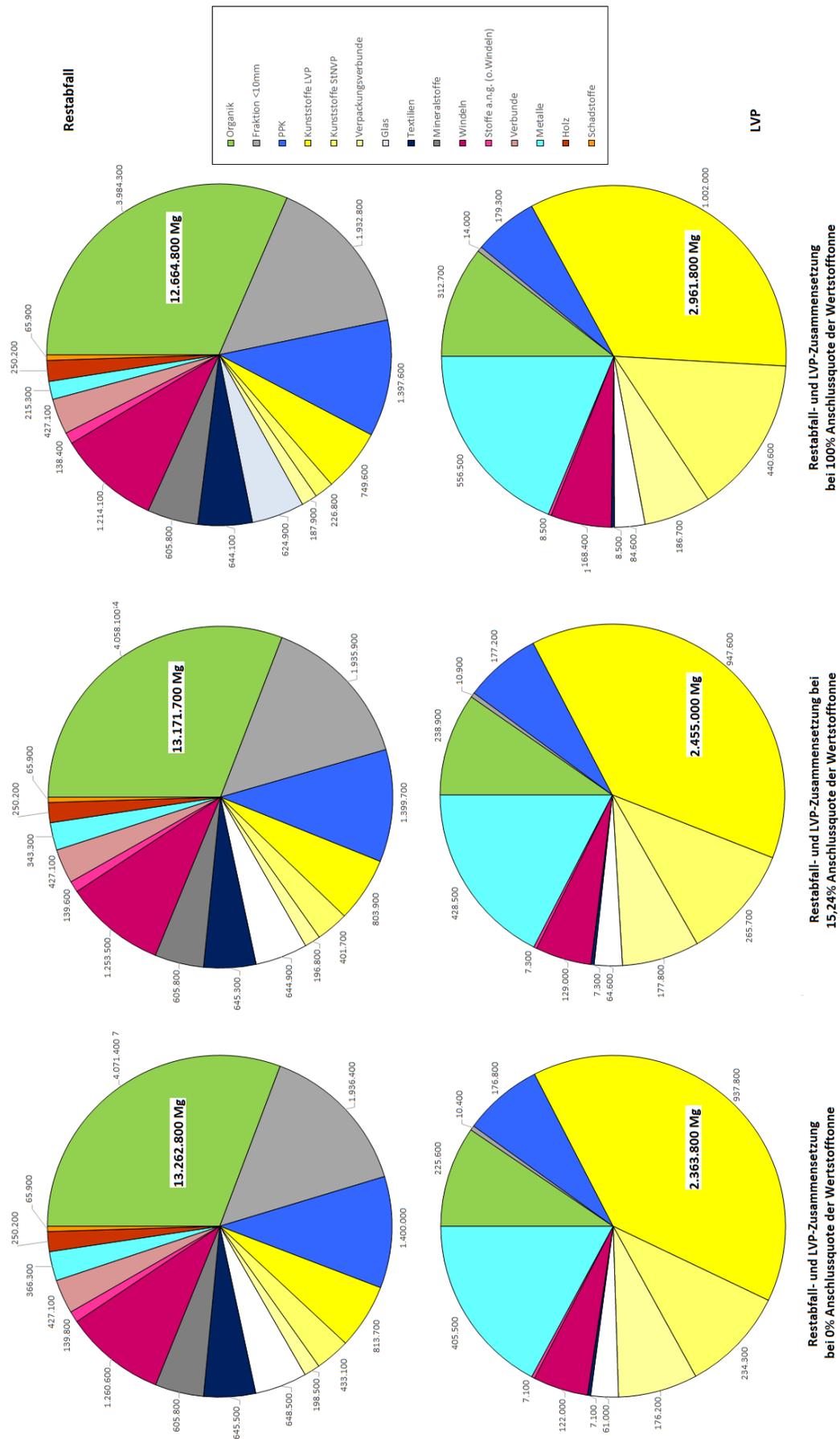


Abbildung 5.4: Änderung der Restabfall- und Wertstoffzusammensetzung bei zunehmendem Etablierungsgrad der Wertstofftonne

Anschluss- und Erfassungsquote Biotonne

Die Zielmenge (SOLL) von 4.602.900 Mg Abfällen für die Biotonne wird erreicht (IST 4.609.000 Mg; Abweichung +0,1 %), wenn eine Anschlussquote von 64,5 % und eine Erfassungsquote von 81,5 % angenommen wird. Enthalten sind nach eigenen Annahmen 3 % Störstoffe, die auf Metalle, Glas, Kunststoffe LVP/StNVP, Mineralien und Glas zurückzuführen sind. Bei Ausbau der Anschlussquote rechnen Experten mit einer Stagnierung der Erfassungsquote und einem Anstieg des Störstoffanteils [vgl. Kern, 2016].

Flächendeckende Biotonne	
(Geschätzte) Anschlussquote [%]	64,5
(Geschätzte) Erfassungsquote gesamt [%]	81,5
(Geschätzter) Störstoffanteil in 100 % [%]	3
davon:	
Metalle [%]	7
Glas [%]	10
Kunststoff LVP [%]	15
Kunststoff StNVP [%]	30
Mineralien [%]	30
Windeln [%]	8

Abbildung 5.5: Ausschnitt der Eingabemaske zur Erfassung von Abfällen für die Biotonne

Damit ist die gewählte Anschlussquote etwas höher veranschlagt, als ursprünglich vermutet. Letzte konkrete Zahlen gab es 2010, als der Anschlussgrad mit 50 % beziffert wurde (vgl. Kapitel 2.2.2.). Der zwischenzeitliche Ausbau der Tonne ist zahlenmäßig schlecht dokumentiert und nur bedingt nachvollziehbar, führt aber dazu, dass der für 2014 geltende Anschlussgrad bereits deutlich höher ist.

Anschluss- und Erfassungsquote Glassammlung

Die Zielmenge (SOLL) von 1.877.900 Mg Glas wird bei einer Erfassungsquote von 72,5 % erreicht (IST 1.876.800 Mg; Abweichung -0,1 %). Theoretisch ist jeder Bürger an eine Glassammlung angeschlossen, wonach eine Anschlussquote von 100 % anzusetzen ist. Enthalten sind nach Bilitewski/Härdtle (2013) 0,61 % Störstoffe, die auf Metalle, Kunststoffe, Papier und Mineralien zurückzuführen sind.

Glassammlung*	
(Geschätzte) Erfassungsquote gesamt [%]	72,5
(Geschätzter) Störstoffanteil in 100 % [%]	0,61
davon:	
Metalle [%]	19,67
PPK [%]	65,57
Kunststoff LVP [%]	8,20
Mineralien [%]	6,56
<i>*es wird ein Anschlussgrad von 100 % angenommen</i>	

Abbildung 5.6: Ausschnitt der Eingabemaske zur Erfassung von Glas

Scheffold/Oetjen-Dehne (2014) benennen die Erfassungsquoten für Hohlglas in sechs Regionen. Sie schwanken zwischen 54,5 und 92 % (Stand 2011). Im Mittel liegt sie bei 81 % und demnach etwas über der im Modell angenommenen Quote. Aufgrund starker Schwankungen und Mittel-Annahmen wird der angenommene Wert von 72,5 % als zweckmäßig erachtet.

Anschluss- und Erfassungsquote PPK-Sammlung

Die Zielmenge (SOLL) von 5.809.000 Mg wird bei einer Erfassungsquote von 80 % erreicht (IST 5.797.300 Mg; Abweichung -0,2 %). Theoretisch ist jeder Bürger an eine PPK-Sammlung angeschlossen, wonach eine Anschlussquote von 100 % anzusetzen ist. Enthalten sind laut Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung (bvse, 2016) ca. 2,3 % Störstoffe, die auf Metalle, Verpackungsverbunde und Kunststoffe zurückzuführen sind.

PPK-Sammlung*	
(Geschätzte) Erfassungsquote gesamt [%]	80
(Geschätzter) Störstoffanteil in 100 % [%]	2,3
davon:	
Metalle [%]	5
Verpackungsverbunde [%]	70
Kunststoffe LVP [%]	25
<i>*es wird ein Anschlussgrad von 100 % angenommen</i>	

Abbildung 5.7: Ausschnitt der Eingabemaske zur Erfassung von PPK

Eine Erhebung von Fricke/Bahr (2010) zeigt, dass die PPK-Erfassung, ähnlich wie bei Glas, großen Schwankungen unterliegt. Für Großstädte geben sie für das Jahr 2010 eine Schwankungsbreite der Erfassungsquote von 49-92 % an. Im Mittel liegt sie bei ca. 75 % und kommt der im Modell approximierten Quote recht nahe.

Restabfallmenge und -zusammensetzung

Alle übrigen Stoffgruppenanteile, die nicht über eine Wertstoffsammlung erfasst werden, werden in den Restmüll transferiert. Dabei steht dem SOLL von 13.170.600 Mg ein IST von 13.171.700 Mg gegenüber (Abweichung +0,01 %). Die Zusammensetzung weist den für Restabfall charakteristischen hohen Anteil an Organik, Feinfraktion und Windeln auf (siehe Abbildung 5.8). Ebenfalls wird deutlich, dass ein Kunststoff-Potential von 9 % in Summe für die getrennte Wertstofferrfassung vorhanden ist.

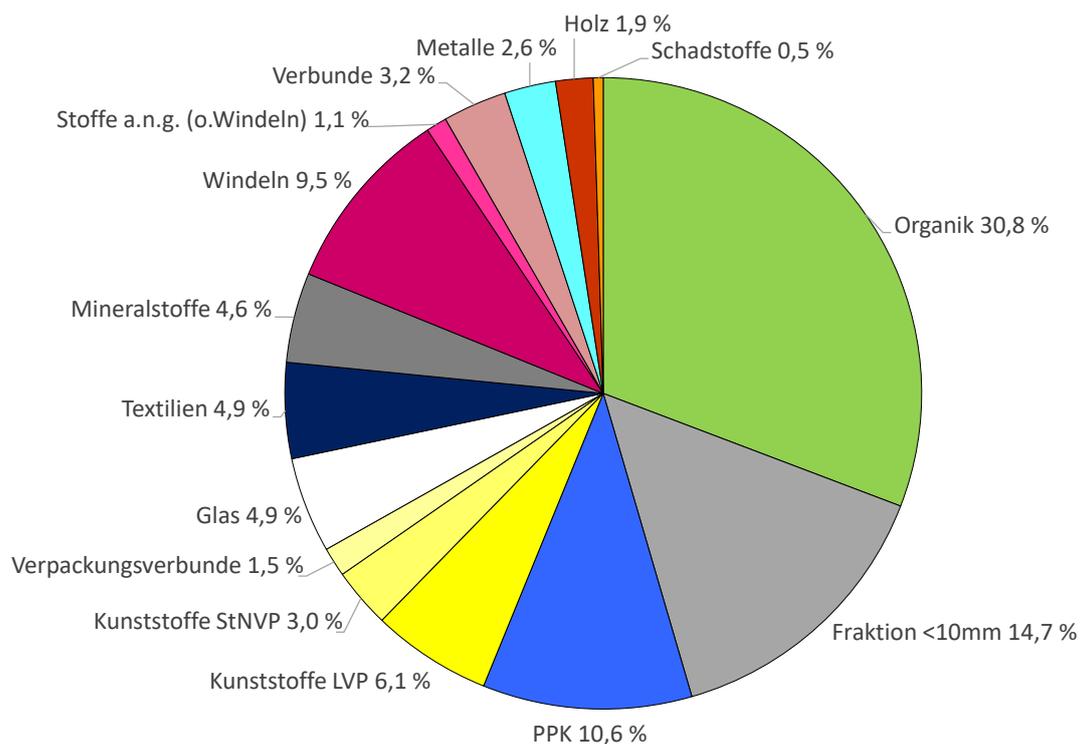


Abbildung 5.8: Restabfallzusammensetzung im Status quo

Externe Abfallströme

Bei den Abfallimporten handelt es sich in der Regel um brennbare Abfälle (AVV 191210/191212) sowie gemischte Siedlungsabfälle (AVV 200301) [EUWID, 2016]. Die für 2014 geltenden Abfallimporte wurden Spohn (2016) entnommen und belaufen sich auf:

Tabelle 5.7: Abfallimportmengen 2014 [Spohn, 2016]

Herkunft	Menge [Mg]
UK & Irland	731.900
Benelux	416.600
Frankreich	50.700
Italien & Sonstige	101.300
SUMME	1.300.500
davon	
AVV 191210/12 (Import 1)	1.050.800
AVV 200301 (Import 2)	249.700
davon	
MVA	1.039.100
davon	
AVV 191210/12	789.400
AVV 200301	249.700
EBS-Kraftwerk	261.400
davon	
AVV 191210	261.400

Mit 81 % machen die brennbaren Abfälle (Import 1) einen großen Anteil der Importe zur energetischen Verwertung aus. Die Menge importierter gemischter Siedlungsabfälle (Import 2) beläuft sich auf 19 % [EUWID, 2016]. Nach Angaben der ITAD werden 79,9 % der Importe in MVAs und 20,1 % in EBS-Kraftwerken eingesetzt [ITAD, 2016]. Die exakten Transferfaktoren der Distribution können Anhang A entnommen werden.

Die Mengen von Sperrmüll, Garten- und Parkabfälle belaufen sich nach GENENIS-online auf 2.347.500 Mg für Sperrmüll und 5.228.600 Mg für Garten- und Parkabfälle. Die Destatis-Abfallbilanz weist für 2014 3.585.000 Mg hausmüllähnliche Gewerbeabfälle (getrennt gesammelt) auf [Destatis, 2016].

5.2.4 Abfallbehandlungsanlagen

Im Folgenden werden die für 2014 geltenden Kapazitäten und Transferfaktoren ermittelt. Die erhaltenen In- und Outputs werden mit Praxiswerten verifiziert.

MVA

Die Feuerungswärmeleistung, als maßgebliches, kapazitätslimitierendes Kriterium, der deutschen Müllverbrennungsanlagen beträgt ca. 7.098 MW [vgl. ITAD, 2017]. Bei einer angenommenen Verfügbarkeit von 96 % und damit einhergehenden 8.387 Betriebsstunden pro Jahr ergibt sich eine Feuerungswärmeleistung in Höhe von etwa 59.534.000 MWh.

Da die MVA neben den in der Arbeit betrachteten und für diesen Anlagentyp relevanten Abfällen

- AVV 200301xx (Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle gem. gesammelt/getr.gesammelt),
- AVV 200307 (Sperrmüll),
- AVV 191210 (Sortierfraktionen aus anderen Anlagen bzw. Brennstoffe aus Abfällen)
- sowie Abfallimporten

auch Abfälle anderer Abfallschlüsselnummern behandelt, ist es erforderlich, die Teilkapazitäten, die für die Behandlung der genannten AVV-Abfälle vorgehalten werden, zu ermitteln.

Die Angaben zur Abfallinputzusammensetzung variieren sehr stark aufgrund unterschiedlicher Bezüge und Zuweisungen¹². In Tabelle 5.8 wird versucht, aus diversen Inputbandbreiten Teilkapazitäten zu ermitteln:

Tabelle 5.8: Inputzusammensetzung und Teilkapazität der MVA 2014

Input	VKU	ITAD	%	
			Destatis	Vorhaltekapazität
Hausmüll und hausmüllähnlicher Gewerbeabfall (gem.gesammelt); auch Restabfall AVV 200301xx	60	52,6	43,1	50-60
hausmüllähnli. Gewerbeabfall (getr.ges.) AVV 20030102			4,6	5-10
Sortierreste AVV 191210	30	30,9	4,3	4,3-7,5
Sortierreste AVV 191212*			17,1	*
Sperrmüll			3,8	4
Sonstige AVV	10	16,5	28	5,3
Teilkapazität				68,6 – 86,8

*AVV 191212 werden bei der Ermittlung der Teilkapazität (mit Ausnahme der in Importen enthaltene Anteil) nicht mit berücksichtigt. Ihre Darstellung dient nur zur Differenzierung des Anteils AVV 191210 aus der beim VKU und der ITAD genannten Summe für Sortierreste)

Der VKU und die ITAD fassen Hausmüll sowie gemeinsam und getrennt gesammelte hausmüllähnliche Gewerbeabfälle zusammen. Beim VKU sind Importe in *Sonstiges* enthalten, bei der ITAD in Hausmüll und gemeinsam und getrennt gesammelten hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen. Beim Destatis wird deutlich, dass die AVV 20031xx und AVV 191210/12 geringer ausfallen, die Anteile Sonstige hingegen sehr hoch. Der Umstand könnte auf die detaillierte Differenzierung zurückgeführt werden, wonach Restabfälle möglicherweise in weitere AVV klassifiziert wurden. Das Mischungsverhältnis von AVV 191210 zu AVV 191212 wurde nach Oetjen-Dehne (2012) mit ca. 25/75 beziffert. Bei einer Summe von 30 % (VKU) entspräche das 7,5 % für AVV 191210. [vgl. Spohn, 2016; VKU, 2017; Destatis, 2015]

¹² Eine genauere Differenzierung erwies sich als schwierig, da sowohl die ITAD als auch das Destatis (2015; 19. Fachserie) ihre Inputs nicht nach Anlagentypen differenzieren, sondern thermische Anlagen u. a. in MVA und EBS-Kraftwerke zusammenfassen.

Die Teilkapazität für Hausmüll kann bis zu 60 % betragen, wobei rund 5-10 % getrennt gesammelte hausmüllähnliche Gewerbeabfälle enthalten sind. Sortierreste aus MBA und LVP-Sortieranlage variieren zwischen 4,3-7,5 %. Sperrmüll macht nach Destatis 3,8 % aus, die Vorhaltekapazität wird auf 4 % aufgerundet. Importe betragen 2014 1.039.100 Mg (vgl. Absatz Abfallimportmengen), was bei einem Gesamtinput von 19,6 Mio Mg rund 5,3 % der Kapazität einnimmt.

Die Vorhaltekapazität beläuft sich auf eine Bandbreite von 68,6 % bis 86,8 % bzw. von 4.870 MW bis 6.160 MW. Die Entwicklung der Vorhaltekapazität wird stark von Faktoren wie zum Beispiel der Marktsituation und der Ausgestaltung der neuen Gewerbeabfallverordnung beeinflusst werden. Das entstandene Modell trägt dieser Ungewissheit Rechnung, indem es die flexible Anpassung der Variablenwerte erlaubt.

Bei Vollauslastung der Anlagen (vgl. Faulstich *et al.* (2016) und Spohn (2017)) entfielen auf einen Input von 19,6 Mio. Mg die folgenden SOLL-Mengenanteile der relevanten Abfälle:

Tabelle 5.9: Inputzusammensetzung der MVA; SOLL/IST 2014

Input	SOLL		IST	
	%	Mio. Mg	%	Mg
Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle (AVV 200301xx)				
davon AVV 20030101	50-60	9,8 - 11,76	53,4	10.471.500
davon AVV 20030102	5-10	0,98 - 1,96	5,9	1.147.200
Sortierreste (AVV 191210/191212)				
davon AVV 191210	4,3-7,5	0,843 - 1,47	4,6	901.800
Sperrmüll 200307	4	0,784	3,8	752.200
Sonstige Abfälle einschl. KS				
davon Importe	5,3	1,04	5,3	1.037.800
Summe	68,6-86,8	13,4-17,0	74,4	14.310.500

Aus dem Input von 14.310.500 Mg ergibt sich bei einem durchschnittlichen Heizwert von 10,06 MJ/kg eine Energiemenge in Höhe von 143.955.638.600 MJ bzw. 39.987.700 MWh. Werden die Aussagen von Faulstich *et al.* (2016) und Spohn (2017), die Anlagen seien derzeit zu 100% ausgelastet, auch auf die angenommenen Teilkapazitäten übertragen, so wären diese, bei Annahme der minimalen Feuerungswärmeleistung von 4.870 MW bzw. 40.844.690 MWh, mit 97,9 % ebenfalls sehr gut ausgelastet. Für den Status quo wird somit die minimale Feuerungswärmeleistung als Eingabewert zugrunde gelegt.

Als weitere kapazitätslimitierende Parameter werden ein Chlorgrenzwert von 0,04 kg/kg TS (4 Gew.-%) und ein Schwefelgrenzwert von 0,03 kg/kg TS (3 Gew.-%) veranschlagt [ITAD, 2017]. Für den Output Schlacke, der unter anderem bei der Bemessung der Deponiekapazität eine Rolle spielt, wurde ein Transferfaktor von 0,25 angenommen und spiegelt damit die Aussage von Meinfelder/Richers (2008) wider, wonach aus einem Mg Abfall rund 250 kg Schlacke entstehen. Zur ähnlichen Aussage kamen schon Reimann/ Hämmerli-Wirth (1992), die die Bandbreite mit 200-300 kg angaben.

EBS-Kraftwerke

Analog zu den Müllverbrennungsanlagen gilt die Feuerungswärmeleistung als maßgebliches kapazitätslimitierendes Kriterium eines EBS-Kraftwerkes. Sie beträgt 2.761 MW (Thiel, 2012). Bei einer angenommenen Verfügbarkeit von 96 % und damit einhergehenden 8.387 Betriebsstunden pro Jahr ergibt sich daraus eine Feuerungswärmeleistung in Höhe von 23.156.500 MWh.

EBS-Kraftwerke verbrennen, neben den in der Arbeit adressierten und für diesen Anlagentyp relevanten Abfällen,

- heizwertreiche Abfälle AVV 20030102 (hausmüllähnlicher Gewerbeabfälle getr.gesammelt),
- AVV 191210 (Sortierfraktionen aus anderen Anlagen bzw. Brennstoffe aus Abfällen),
- und Importe

auch Abfälle anderer Abfallschlüsselnummern. Das sind unter anderem AVV 191212 (sonstige Abfälle aus der mechanischen Behandlung von Abfällen), Produktionsabfälle und Baustellenabfälle. Tabelle 5.10 zeigt die im Modell anzunehmende Teilkapazität sowie die Abfallinputzusammensetzung:

Tabelle 5.10: Inputzusammensetzung und Teilkapazität der EBS-Kraftwerke 2014

Input	SOLL
	Mg
Kapazität/Nennleistung	5.400.000 ¹⁾
Input, davon*:	4.456.800 ²⁾
hausmüllähn. Gewerbeabfall (getr.ges.) AVV 20030102	530.000 - 1.510.000
Sortierreste AVV (191210/191212)	
davon AVV 191210	340.000 – 960.000
Sonstige Abfälle	
davon Importe	261.407
freie Kapazität	943.200
Teilkapazität	2.074.600 – 3.674.600

1) Quelle: Spohn, 2015

2) Quelle: Destatis, 2015a

*eine genauere Differenzierung der Inputzusammensetzung erwies sich als schwierig, da sowohl die ITAD als auch das Destatis (19. Fachserie) ihre Inputs nicht nach einzelnen Anlagentypen aufschlüsseln sondern in z. B. *thermische Anlagen* zusammenfassen, welche sowohl MVAs als auch EBS-Kraftwerke beinhalten. Geschätzt wurden die Werte anhand der Inputangaben von Spohn (2015) für die Gesamtheit aus MVA/EBS-Kraftwerken unter Berücksichtigung der MVA-Anteile (vgl. Tabelle 5.9).

Die Teilkapazität kann zwischen 1.059 MW (bei 2.074.600 Mg Input) und 1.877 MW (bei 3.674.600 Mg Input) bzw. 38,4 % und 68,0 % betragen. Wie auch bei der MVA, gibt es für diese Annahme großen Spielraum, weshalb der Wert für die Szenarienbildung jederzeit angepasst werden kann.

Auf die mögliche Inputzusammensetzung kommen laut Modell die folgenden Mengen:

Tabelle 5.11: Inputzusammensetzung der EBS-Kraftwerke; SOLL/IST 2014

Input	SOLL (KANN)	IST
	Mg	Mg
Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle (getr.ges.) AVV 20030102	530.000 - 1.510.000	717.000
Sortierreste (AVV 191210/191212) davon AVV 191210	340.000 – 960.000	1.059.500
Sonstige Abfälle davon Importe	261.400	262.700
Summe	1.131.400-2.731.400	2.039.200

Aus dem Input von 2.039.200 Mg ergibt sich bei einem durchschnittlichen Heizwert von 15,51 MJ/kg eine Energiemenge in Höhe von 31.622.989.700 MJ bzw. 8.784.200 MWh. Die Teilkapazität ist zu 98,9 % ausgelastet. Daher wird auch hier die minimale Feuerungswärmeleistung (1.059 MW bzw. 8.881.800 MWh) als Eingabewert für den Status quo angenommen.

Als weitere kapazitätslimitierende Parameter werden ein Chlorgrenzwert von 0,01 kg/kg TS (1 Gew.-%) [Mielke/Sparmann/Kappa, 2008] und ein Schwefelgrenzwert von 0,005 kg/kg TS (0,5 Gew.-%) veranschlagt [BGS, 2016].

Der Schlackeanfall wird mit 20 % der Ursprungsmasse kalkuliert, da der Ascheanteil von EBS geringer ist als der von Hausmüll und folglich auch zu weniger Schlacke führt als bei konventionellen Müllverbrennungsanlagen [MUNLV.NRW, 2007].

Zement- und Kohlekraftwerke

Wie in Kapitel 4.4.3 bereits genannt, spielt die Verbrennung von Abfällen bei der Auslastung einer Mitverbrennungsanlage nach Schu (2006) weniger eine Rolle als die Qualität der eingesetzten Ersatzbrennstoffe. Demnach wird an dieser Stelle keine Teilkapazität oder Kapazitätsobergrenze für die Menge festgelegt. Als kapazitätslimitierende Parameter werden festgelegt: je 0,01 kg/kg TS (1 Gew.-%) für Chlor- und Schwefelgehalte sowie 20 MJ/kg beim Mindestheizwert [Schmidt/Pomberger/Heigl, 2007].

Mechanisch biologische Abfallbehandlungsanlagen

Da die MBA neben den in der Arbeit betrachteten und für diesen Anlagentyp relevanten Abfällen AVV 200301xx und AVV 200307 auch Abfälle anderer Abfallschlüsselnummern behandelt, ist es erforderlich, die Teilkapazitäten, die für die Behandlung der genannten Abfälle vorgehalten wird, zu ermitteln. Tabelle 5.12 zeigt die Inputzusammensetzung und die daraus resultierende Teilkapazität der MBAs:

Tabelle 5.12: Inputzusammensetzung und Teilkapazität der MBAs 2014

Input	SOLL
	Mg
Kapazität/Nennleistung	5.545.000 ¹⁾
Input, davon:	4.158.500 ²⁾
Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle (AVV 200301xx)	
davon AVV 20030101	2.692.400
davon AVV 20030102	137.100
Sperrmüll AVV 200307	180.700
andere AVV 200xx	36.900
andere AVV	1.111.400 ¹⁾
freie Kapazität	1.386.500
Teilkapazität	4.045.500

1) Quelle: Destatis, 2015a 19. Fachserie

2) Quelle: Destatis, 2015a 19. Fachserie (korrigiert), aufaddierte Summe des Gesamtinputs und der der AVV 20xxx-Nummern stimmte nicht mit der Summe der einzelnen Positionen überein

Die Teilkapazität der Gesamtanlage für die betrachteten Abfälle beläuft sich auf 4.045.500 Mg bzw. 73 % der Nennleistung. Sie ergibt sich aus dem Input der AVV-Nummern 200301xx und 200307 sowie der freien Kapazität, welche für die Behandlung der adressierten Abfallschlüsselnummern genutzt werden kann. Die Kapazität der biologischen Stufe, als maßgeblicher, kapazitätslimitierender Verfahrensschritt der MBA beträgt 40,7 % (vgl. Kapitel 4.4.5). Unter Berücksichtigung der Teilkapazität von 4.045.500 Mg ergibt sich ein möglicher Input in die biologische Stufe von 1.646.500 Mg.

Bestünde der Anteil *andere* AVV ausschließlich aus heizwertreichen Bestandteilen, ohne die Kapazität der Rotte in Anspruch zu nehmen, fiel die Teilkapazität bzw. die Behandlungskapazität der Rotte für die Behandlung von AVV 200301xx und AVV 200307 entsprechend höher aus. Ebenso ergäben sich andere Outputströme als die in Tabelle 5.14 dargestellt. Eine detaillierte Ausarbeitung der Zusammensetzung und Eigenschaften der *anderen* AVV ist an dieser Stelle nicht leistbar, so dass vereinfacht davon ausgegangen werden muss, dass sich die Mischung sonstiger Abfälle derer aus AVV 200301xx und AVV 200307 ähnelt.

Tabelle 5.13: Inputzusammensetzung der MBAs; SOLL/IST 2014

Input	SOLL	IST
	Mg	Mg
Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle (AVV 200301xx)		
davon AVV 20030101	2.692.400	2.700.200
davon AVV 20030102	137.100	139.800
Sperrmüll AVV 200307	180.700	181.000

Die für die Stoffverteilung geltenden Transferfaktoren wurden so gewählt, dass die Outputs denen durchschnittlicher MBAs möglichst nahekommen (vgl. Ketelsen/Nelles, 2015). Abbildung 5.9 zeigt die Stoffverteilung für 2014.

Stofffluss MBA

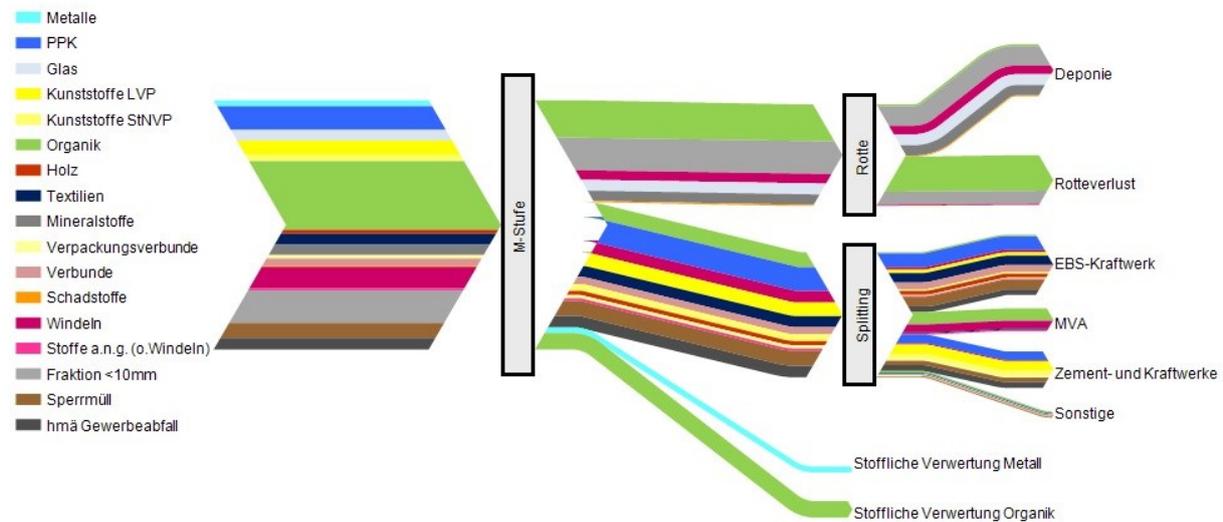


Abbildung 5.9: Stofffluss einer MBA

In der mechanischen Stufe werden die Stoffgruppen in heizwertreiche und heizwertarme Fraktionen überführt. Dies geschieht im Wesentlichen durch Klassieren nach Korngröße. Große Teile der Organik, der Feinfraktion und der Mineralstoffe, aber auch geringere Mengen der anderen Fraktionen finden den Weg in die biologische Stufe. Während organische Anteile verrotten, gelangen inerte und nicht verrottete Reste auf die Deponie. Metalle und eine Organik-Teilfraktion gehen als Outputs in die stoffliche Verwertung (vgl. Abbildung 4.28). Die übrigen Fraktionen, in der Regel großflächige Materialien wie PPK, Kunststoffe und Inhalte aus Gewerbe- und Sperrmüll, bilden die brennbare Fraktion (EBS). Diese wird im darauf folgenden Sortierschritt nochmals in die heizwertreiche Fraktion für EBS-Kraftwerke, Sekundärbrennstoffe für die Mitverbrennung in Zement- und Kohlekraftwerken, minderwertigere Sortierreste für die MVA und Sonstige separiert. Die Eigenschaften der Outputs ergeben sich aus der Materialzusammensetzung unter Berücksichtigung fraktionsspezifischer Kennzahlen (siehe Anhang A).

Tabelle 5.14 zeigt den SOLL und IST der Outputs:

Tabelle 5.14: Outputs der MBAs 2014; SOLL/IST 2014

Output		SOLL	IST
Rottegut	[Mg]	629.100 (20,9 %) ¹⁾	632.400
Rotteverlust	[Mg]	596.000 (19,8 %) ¹⁾	599.200
Stoffliche u. sonstige Verwertung	[Mg]	267.900 (8,9 %) ¹⁾	270.000
Energetische Verwertung, davon:			
Sortierreste – MVA	[Mg]	273.600 (9,1 %) ¹⁾	272.900
Heizwert	[MJ/kg]	-	7,6
Chlorgehalt	[Gew.-%]	-	0,84
Schwefelgehalt	[Gew.-%]	-	0,26
HRF – EBS-Kraftwerk	[Mg]	729.700 (24,2 %) ¹⁾	728.900
Heizwert	[MJ/kg]	-	15,5
Chlorgehalt	[Gew.-%]	-	0,45

Output		SOLL	IST
Schwefelgehalt	[Gew.-%]	-	0,14
SBS – Kohle-/ Zementkraftwerke	[Mg]	440.800 (14,6 %) ¹⁾	440.500
Heizwert	[MJ/kg]	-	20,2
Chlorgehalt	[Gew.-%]	-	0,76
Schwefelgehalt	[Gew.-%]	-	0,14
Sonstige	[Mg]	76.000 (2,5 %) ¹⁾	77.100

1) Quelle: Ketelsen/Nelles, 2015

Die Abweichungen der SOLL- und IST-Mengen liegen bei weniger als 1,5 %. Die Fraktionen werden aktuell so konditioniert, dass die Anforderungen an die weitere Behandlung in einer thermischen Anlage erfüllt werden.

Dem Input in die Rotte von 1.231.600 Mg stand 2014 eine Rottekapazität von 1.646.500 Mg gegenüber.

LVP-Sortieranlagen

Bedingt durch Baugrößen von Schlüsselaggregaten lassen sich die derzeit operativ tätigen Sortieranlagen relativ genau in einzelne Kapazitätsklassen gruppieren. In Summe beträgt ihre Gesamtkapazität (im 3-Schicht-Betrieb) etwa 3,1 Mio. Mg/a. Zusätzliche Kapazitätsreserven wären durch längere Betriebszeiten sowie durch kapazitive Ertüchtigung einzelner Anlagen zu erschließen [Bünemann *et al.*, 2011]. Da eine LVP-Sortieranlage aufgrund ihrer spezifischen Konzeption nur bedingt zur Sortierung anderer Abfälle einsetzbar ist, wird die Kapazität gänzlich der Sortierung von LVP zugeschrieben [Schug *et al.*, 2007].

Der Input in die Anlagen beträgt 2.455.000 Mg (IST; 2014) und entspricht der Menge der über den Gelben Sack/Tonne und der Wertstofftonne erfasster Fraktionen (vgl. Absatz Anschluss- und Erfassungsquoten Wertstofffassung).

Aufgrund der vielfältigen Konfigurationsmöglichkeiten jeder einzelnen Sortieranlage ist es im Rahmen dieser Arbeit unmöglich, den Output zu spezifizieren. Für die Modellierung wurden die für die Stoffverteilung geltenden Transferfaktoren so gewählt, dass die Outputs denen durchschnittlicher LVP-Sortieranlagen möglichst nahekommen. Sie orientieren sich an diversen Angaben der Literatur (für Anteile brennbarer Outputs vgl. Heibeck *et al.* (2012) 64,7 %, Dehne *et al.* (2014) 32 %; Bünemann *et al.* (2011) 64 %, Harant/Kröger (2005) 27-34 %). Für den Status quo im Modell wurde ein Mittel brennbarer Abfälle als Output von 42,4 % angenommen. Abbildung 5.10 zeigt die Stoffverteilung für 2014, in welcher StNVP, verursacht durch Fehlwürfe und Teilanschlüsse der Wertstofftonne, bereits in geringem Maße enthalten sind. In Zukunft ist davon auszugehen, dass dieser Anteil steigen wird.

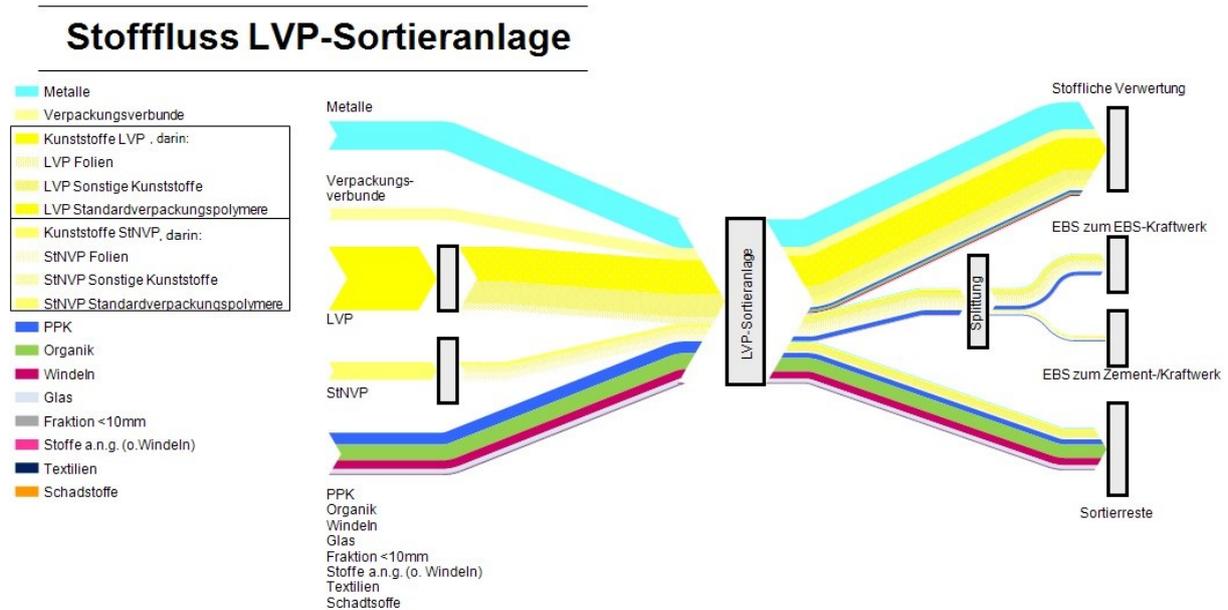


Abbildung 5.10: Stofffluss LVP-Sortieranlage

Ein großer Teil der hochwertigen Kunststoffe, wie Standardverpackungspolymere, gehen in die stoffliche Verwertung, ebenso Metalle und Verpackungsverbunde. Sie werden durch einen Störstoffanteil ergänzt, der sich aus den restlichen Fraktionen zusammensetzt. Die EBS-Fractionen enthalten überwiegend Folien und PPK sowie einen signifikanten Anteil sonstiger Kunststoffe der LVP-Fraktion. Handelt es sich bei den sonstigen Kunststoffen der StNVP-Fraktion überwiegend um hochwertige, materialgleiche Kunststoffe, die den Weg in die stoffliche Verwertung finden, handelt es sich bei den sonstigen Kunststoffen der LVP-Fraktion überwiegend um verschmutzte, nicht restentleerte Verpackungen, die weniger für die stoffliche als vielmehr für die energetische Verwertung geeignet sind. Die EBS-Fraktion wird zudem um Störanteile anderer Fraktionen ergänzt.

Die Sortierreste bestehen hauptsächlich aus stofflich nicht verwertbarem und kalorisch minderem Material wie Organik, Windeln und Glas. Wie auch die HRF- und SBS-Fractionen enthalten sie einen geringen Anteil an Wertstoffverlusten der sortenreinen Fraktionen. Die Eigenschaften der Outputs ergeben sich aus der Materialzusammensetzung unter Berücksichtigung fraktionsspezifischer Kennzahlen (Anhang A).

Tabelle 5.15 zeigt den SOLL und IST der Outputs:

Tabelle 5.15: Outputs der LVP-Sortieranlage; SOLL/IST 2014

Output		SOLL	IST
Stoffliche Verwertung (inkl. Störstoffe)	[Mg]	1.412.800 Mg inkl. 95.500 Mg Störstoffe (57,6%)	1.412.800 inkl. 95.400 Mg Störstoffe
HRF/SBS	[Mg]	413.400 (16,8%)	413.400
Heizwert	[MJ/kg]	-	26,48
Chlorgehalt	[Gew.-%]	-	1,1 Gew.-%
Schwefelgehalt	[Gew.-%]	-	0,12 Gew.-%
Sortierreste	[Mg]	628.800 (25,6%)	628.700
Heizwert	[MJ/kg]		12,03

Output	SOLL	IST
Chlorgehalt [Gew.-%]		0,53 Gew.-%
Schwefelgehalt [Gew.-%]		0,16 Gew.-%

Die Abweichungen der SOLL- und IST-Mengen liegen bei <1 %. Die sortenreinen Fraktionen machen mit 57,6 % den größten Anteil vom Anlagenoutput aus. Mit einem Störstoffanteil von 6,8 % beträgt ihre Reinheit 93,2 % im Mittel. Die HRF und SBS belaufen sich auf 16,8 % und Sortierreste 25,6 % vom Anlagenoutput und damit entsprechend dem SOLL-Output durchschnittlicher LVP-Sortieranlagen.

Mit 0,12 Gew.-% Schwefel im EBS (HRF/SBS) werden die Anforderungen an die Verwertung in EBS-Kraftwerk, Zement- und Kohlekraftwerk erfüllt. Der Grenzwert für Chlor wird mit 1,1 Gew.-% minimal überschritten. Dieser Überhang von 0,1 Gew.-% ist tolerierbar, wird berücksichtigt, dass die Kraftwerke unter Umständen auch mit weniger chlorbelasteten Fraktionen (Sperrmüll, Produktionsabfälle) gespeist werden.

Die Werte der Sortierfraktion liegen mit 0,53 Gew.-% für Chlor und 0,16 Gew.-% für Schwefel deutlich unter den Anforderungen der MVAs (vgl. Kapitel 4.4.1).

Einem Input von 2.455.000 Mg stand 2014 eine Behandlungskapazität von 3.100.000 Mg gegenüber.

Kompostierungsanlagen

2014 betrug die Gesamtkapazität der Bioabfall-, Grüngut- und Kombikompostierungsanlagen 9.774.000 Mg [Destatis, 2015a]. Ihr Input in Höhe von 7.457.000 Mg [Destatis, 2015a] setzte sich nach Rettenberger *et al.* (2012) aus 56 % Abfällen für die Biotonne (AVV 20030104), 36 % Garten- und Parkabfällen (AVV 2002), sowie 8 % anderen AVV, die unter anderem Gärreste aus Bioabfallvergärungsanlagen (AVV 190604) beinhalten, zusammen.

Tabelle 5.16: Inputzusammensetzung der Kompostierungsanlagen; SOLL/IST 2014

Input	SOLL	IST
	Mg	Mg
Abfälle für die Biotonne AVV 20030104	4.176.000 (56 %)	4.171.100
Garten- und Parkabfälle AVV 2002	2.685.000 (36 %)	2.671.700
andere AVV inkl. Gärreste*	597.000 (8 %)	394.100 (ausschließlich Gärrest)
Summe	7.457.000	7.236.900

*keine weitere Differenzierung möglich; die genaue SOLL-Menge des Gärrestinputs ist Folge dessen nicht zu ermitteln

Mit einem Transferfaktor von 0,5 für die Stoffwandlung zu Kompost¹³ wird ein Output von 3.618.500 Mg erzeugt. Einem Input von 7.236.900 Mg stand 2014 eine Behandlungskapazität von 9.774.000 Mg gegenüber.

¹³ Schätzwert in Anlehnung an die Transferfaktoren 0,35 - 0,45 für Bioabfälle und 0,7 - 0,8 für Garten- und Parkabfälle [Amlinger *et al.*, 2005].

Vergärungsanlagen

Eine eindeutige Bewertung der Bioabfallvergärungsanlagen ist nicht oder nur eingeschränkt möglich. Zu dem Ergebnis kamen auch Schüch *et al.* (2014). Sie stufen die Datenlage zu Biogasanlagen, in denen Bio- und Grünabfälle und/oder andere organische Abfälle eingesetzt werden, als statistisch nicht eindeutig und somit unsicher ein. Als problematisch bewerten sie, dass die Definition des Begriffes „Bioabfall“ nicht einheitlich ist. Demnach wird die Zuordnung der „Bioabfallvergärungsanlagen“ unterschiedlich gehandhabt¹⁴. So ist zu beobachten, dass sich die Nennleistung der Biogas- und Vergärungsanlagen (einschließlich kombinierte Kompostierungs- und Vergärungsanlagen) nach Angaben des Destatis (2015) bei einem Input von 6.136.000 Mg auf 13.165.000 Mg belief. Der Biogasatlas von Kern/Rausen (2015) benennt die Vergärungskapazität für kommunal anfallende Bio- und Grünabfälle hingegen mit 1,9 Mio. Mg. Hinzu kommen mögliche Teilkapazitäten in gewerblichen Anlagen, da einige sowohl technisch als auch genehmigungsrechtlich in der Lage sind, mehr oder weniger als 50 % an Bio- und Grüngut einzusetzen. Bei einer Vergärungskapazität von 1,9 Mio. Mg gewerblicher Anlagen belief sich die Teilkapazität für den Einsatz von Bioabfällen sowie Garten- und Parkabfällen bei einem Mittel von 50 % auf 0,95 Mio. Mg. In Summe bedeutet das eine Teilkapazität für die Behandlung von Bio-, Garten- und Parkabfällen bei kommunal und gewerblich geprägten Vergärungsanlagen von 2,85 Mio. Mg.

Eine für 2014 geltende klare Inputdifferenzierung ist nicht zu ermitteln. Nach Kern/Rausen (2015) setzt sich der Input bei „kommunalen“ Anlagen aus 83,5 % Bioabfällen und 11,5 % Grüngut zusammen. Andere Substrate machen 5 % aus. Bei den Anlagen zur Vergärung gewerblicher Abfälle spielen Bio- und Grüngut mit 5 % nur eine ungeordnete Rolle. Primär werden Gewerbe- und Speisereste, *Sonstige* und ein Teil Gülle eingesetzt.

Bei einem theoretischen Eintrag (Vollauslastung angenommen) von Bio- und Grünabfällen in Höhe von 1,81 Mio. Mg (95 % der Nennleistung kommunal geprägter Anlagen) und 0,1 Mio. Mg (5 % der Nennleistung gewerblich geprägter Anlagen) betrüge der Input der in der Arbeit adressierten und für diese Anlagentyp relevanten Abfälle AVV 20030104 (Abfälle für die Biotonne) und AVV 2002 (Garten- und Parkabfälle) 1,91 Mio. Mg. Praktisch wurden nach Schüch *et al.* (2014) jedoch nur 1,10 Mio. Mg pro Jahr an Bioabfällen aus der Biotonnensammlung und 0,05 Mio. Mg jährlich aus Grünabfällen in die Anlagen eingetragen (Verhältnis 95%/5%). Je nach Situation kann dieses Verhältnis variieren. Für das Modell wird zunächst das Verhältnis nach Schüch *et al.* (2014) von 95/5 angenommen. Damit kommen im Modell auf 437.900 Mg Abfälle aus der Biotonne 22.800 Mg Garten- und Parkabfälle. Der Summe von 460.700 Mg stand 2014 eine Vergärungskapazität von 2,85 Mio. Mg gegenüber. Diese Inputmengen weichen deutlich von denen in Schüch *et al.* (2014) genannten Inputmengen ab. Da bereits große Mengen an Biotonnenabfällen in die Kompostierung distribuiert worden sind (die Datenlage ist hier eindeutiger), verbleibt nur eine kleine

¹⁴ Gemäß § 27a EEG 2012 umfasst der Begriff *Bioabfallvergärung* alle Anlagen, die überwiegend (massebezogen mindestens 90 Prozent) Reststoffe der kommunalen Abfallentsorgung einsetzen. Dies umfasst unter anderem Garten-/Parkabfälle, Landschaftspflegematerial, Bioabfälle aus getrennter Sammlung (Biotonne) und Marktabfälle. Dem gegenüber wird in der Bioabfallverordnung der Begriff Bioabfall weiter gefasst, so dass unter Bioabfälle auch organische industrielle Reststoffe, Lebensmittelreste, industrielle Schlämme etc. gezählt werden [Schüch *et al.*, 2014].

Restmenge für die Vergärung. Diese Ungereimtheiten sind aufgrund der undurchsichtigen Datenlage nicht auszuschließen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Teilkapazität für die Vergärung der in der Arbeit adressierten und für diesen Anlagentyp relevanten Abfälle AVV 20030104 (Abfälle für die Biotonne) und AVV 2002 (Garten- und Parkabfälle) 2,85 Mio. Mg beträgt. Eine exakte Inputbestimmung kann jedoch nicht hergeleitet werden.

Der Output der Anlagen besteht nach Rettenberger *et al.* (2012) aus etwa 80 % Gärresten. Dieser wird als Sekundärabfall (AVV 190604) in die Kompostierungsanlagen überführt und dort als zusätzlicher Input-Stoffstrom berücksichtigt.

Deponien

Schlacken aus Verbrennungsanlagen (AVV 190112 - Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken mit Ausnahme derjenigen, die unter 190111 fallen) werden auf Deponien der Klassen I und II entsorgt, sofern sie nicht stofflich, z. B. im Straßenbau, verwertet werden. Das Rottegut aus mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen (AVV 190501 - nicht kompostierte Fraktion von Siedlungs- und ähnlichen Abfällen) wird nur auf der Klasse II Deponie entsorgt:

Tabelle 5.17: Inputzusammensetzung und Teilkapazität der Deponien DK I und DK II

Input	SOLL(KANN)	SOLL (KANN)	SOLL (KANN) Gesamt
	DK I	DK II	
	Mg	Mg	Mg
Input ¹⁾ , davon:	16.780.100	7.037.800	23.817.900
Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken AVV 190112	507.300	684.200	1.191.500
nicht kompostierte Fraktion von Siedlungs- und ähnlichen Abfällen AVV 190501	-	152.200	152.200
andere AVV	16.272.800	6.201.400	22.474.200
Teilkapazität	507.300 (3,0 %)	836.400 (11,9 %)	1.343.700 (14,9 %)

1) Quelle: Destatis (2015a) 19. Fachserie

Der Klasse-I-Input adressierter AVV in Höhe von 507.300 Mg entspricht 3,0 % vom Gesamtinput. Beim Klasse-II-Input entsprechen 836.400 Mg/a 11,9 % vom Gesamtinput. In der Summe können neben MVA/EBS-Kraftwerksschlacken auch Schlacken aus z. B. anderen Verbrennungsanlagen enthalten sein. Ebenso variiert der Deponieinput je nach Anfall der Reststoffe und, die Schlacke betreffend, den Bedarfen der stofflichen Verwertung. Der SOLL-Input ist daher als Orientierung zu verstehen, muss in diesem Status quo aber nicht unbedingt erfüllt werden.

Tabelle 5.18: Inputzusammensetzung der Deponien DK I und DK II; SOLL/IST

Input	SOLL (KANN) Gesamt		IST
	Mg	Mg	m ³
Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken AVV 190112	1.191.500	1.235.500	686.400
nicht kompostierte Fraktion von Siedlungs- und ähnlichen Abfällen AVV 190501	152.200	632.400	486.500
Teilkapazität	1.343.700	867.900	1.156.600

Die Kapazitäten der Deponien sind bedingt technisch, vielmehr flächenmäßig begrenzt. Ihre Limitierung ergibt sich aus dem Restvolumen der jeweiligen Deponieklasse unter Berücksichtigung der Teilkapazitäten. 3 % der Klasse I-Deponien und gut 12 % vom Restvolumen der Klasse II-Deponien werden daher als Vorhaltekapazität adressierter Fraktionen pro Jahr veranschlagt.

Mit einer Einbaudichte von ca. 1,8 Mg/m³ für Schlacke und ca. 1,3 Mg/m³ für Rottegut¹⁵ entspricht die Schlacke einem Volumen von 686.400 m³ und das Rottegut einem Volumen von 486.500 m³.

Das Restvolumen 2014 für Deponien wurde vom Destatis (2015a) mit 225.621.000 m³ für Klasse I-Deponien und für 100.551.000 m³ für Klasse II-Deponien beziffert. Unter Einbezug der Teilkapazitäten ergeben sich Volumina in Höhe von 6.768.600 m³ für Klasse I- sowie 12.066.100 m³ für Klasse II-Deponien.

Dem Deponieeintrag in Höhe von 1.156.600 m³ standen im Jahr 2014 18.834.700 m³ Deponiekapazität gegenüber. Für das Status quo-Jahr steht folglich ausreichend Deponiekapazität zur Verfügung.

Zusammenfassende Darstellung des Status quo

Mit den für das Status quo-Jahr ermittelten Stoffgruppenaufkommen ergibt sich der in Abbildung 5.11 dargestellte Verlauf aller Flüsse. Die dazugehörigen Erfassungs- und Anschlussquoten sowie Anlagenparameter und Distributionen können einer zusammenfassenden Übersicht in Anhang A entnommen werden.

Deutlich zu erkennen ist das große Stoffgruppenaufkommen der Organik, wovon bei einem aktuellen Anschlussgrad von 65 % nach wie vor ein großer Anteil den Weg in den Restabfall findet. Bei den getrennt erfassten Wertstoffen ist PPK am stärksten vertreten. Die MVA und Bioabfallkompostierung bilden die mengenmäßig relevantesten Behandlungswege der in der Arbeit adressierten Abfälle.

¹⁵ Schwankungsbreiten für Schlacke: 1,6-1,8 t/m³ [Fremgen, 2006] und 1,80 - 2,00 Mg/m³ [HSAV, 2006]
Schwankungsbreiten für MBA-Material: 1,2–1,4 Mg/m³ [Bilitewski/Härdtle, 2013]

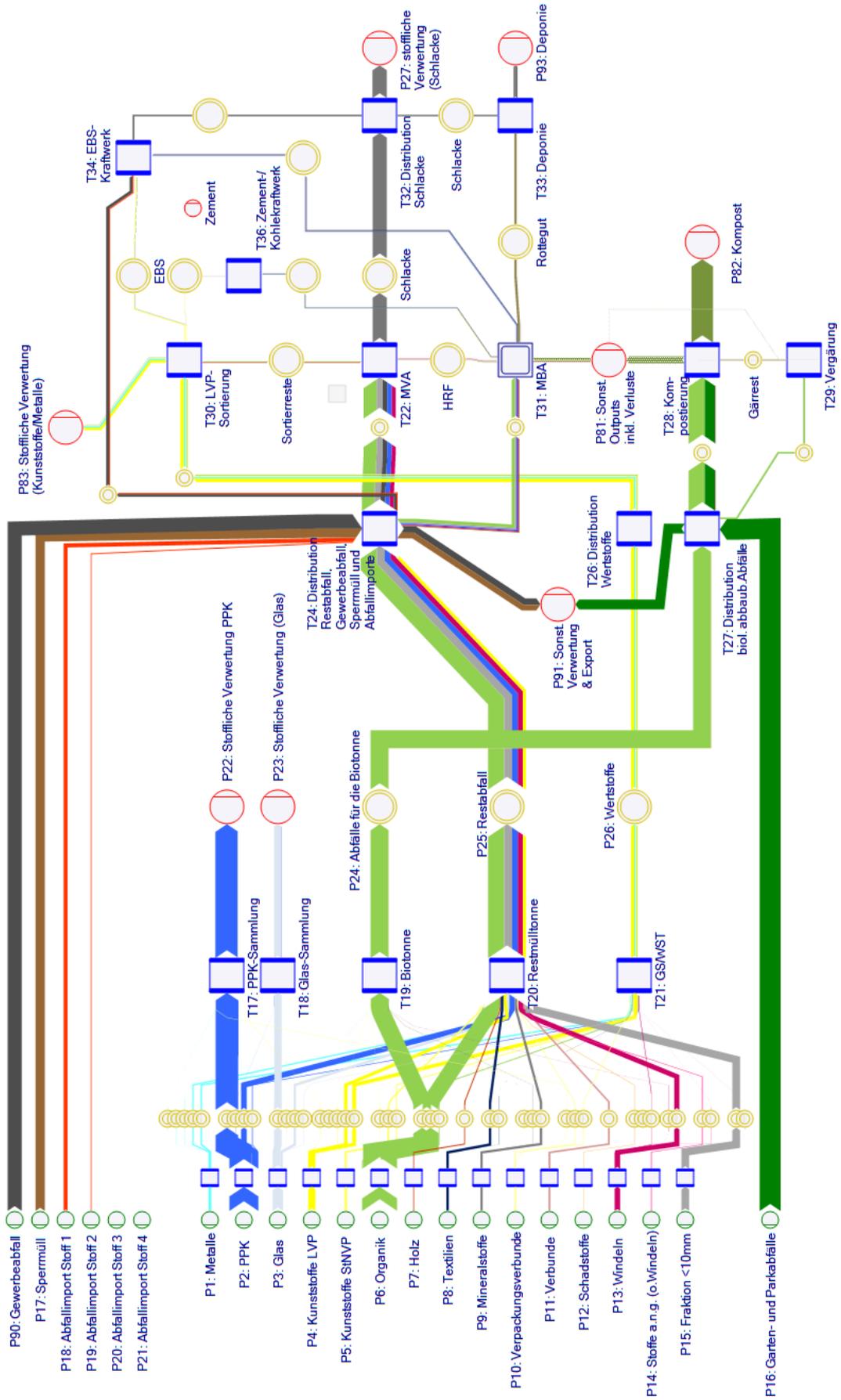


Abbildung 5.11: Stoffgruppenverlauf im Status quo

5.3 Prognosen für den Bilanzraum Deutschland

Im Folgenden werden Prognosen bis in das Jahr 2035 erstellt. Dazu werden zunächst die anzunehmenden Modellvariablen hergeleitet und in das Modell eingegeben, ehe die Berechnung unter Einbezug aller Daten bis 2035 erfolgt. Anschließend wird eine Sensitivitätsbetrachtung der Einflussfaktoren durchgeführt. Hier werden die Prognosewerte für je einen Einflussfaktor eingegeben, während die anderen konstant gehalten werden. Diese Vorgehensweise soll Aufschluss darüber geben, welche Steuerungsgröße den größten Einfluss auf den abgebildeten Realitätsausschnitt ausübt.

Die Bewertung erfolgt auf Grundlage der ausgewerteten Bilanzen.

5.3.1 Modellvariablen bis 2035

In die Eingabemaske können Modellvariablen bis in das Prognosejahr 2060 eingetragen werden. Da eine Prognose bis 2060 mehr einer Spekulation und weniger einer belastbaren Prognose gleicht, beschränkt sich die Vorausschau auf das Zieljahr 2035. Für dieses Zeitfenster lassen sich die demografischen Entwicklungen und die Entwicklung der Anlagenkapazitäten weitestgehend herleiten. Da die Dissertation in erster Linie die Entwicklung des Modells zum Ziel hatte, werden Modellvariablen für diesen Zeitraum auf Grundlage bestehender Prognosen und Literaturangaben und nicht durch eigene Erhebungen hergeleitet. Nur vereinzelt werden die Werte durch eigene Annahmen ergänzt.

Die Modellvariablen

- demografische Randbedingungen
 - Einwohnerzahl
 - Haushalte
 - Kaufkraft
 - Siedlungsdichte
- externe Abfallströme
 - Abfallimporte und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle (getr. ges.)
 - Sperrmüll sowie Garten- und Parkabfälle
- Parameter der Wertstofffassung
 - Wertstofftonne
 - Biotonne
- Anlagenparameter
 - MVA und EBS-Kraftwerke
 - Zement- und Kohlekraftwerke
 - MBA
 - LVP-Sortieranlagen
 - Kompostierungsanlagen
 - Vergärungsanlagen
 - Deponie

ergeben sich wie folgt und sind in Anhang B zusätzlich tabellarisch aufgelistet.

Prognoseannahmen - Demografische Randbedingungen:

Einwohnerzahl

Die Daten zur Bevölkerungsprognose beruhen auf der 13. koordinierten Bevölkerungsprognose des Destatis. Demnach Abbildung 5.12 nimmt die Bevölkerungszahl aufgrund höherer Zuwanderung zunächst zu, ehe sie später wieder absinkt, da die Sterberate die Geburtenrate immer mehr übersteigt [Destatis, 2015] Für das Jahr 2035 wird eine Einwohnerzahl von 80,01 Mio. Einwohner prognostiziert.

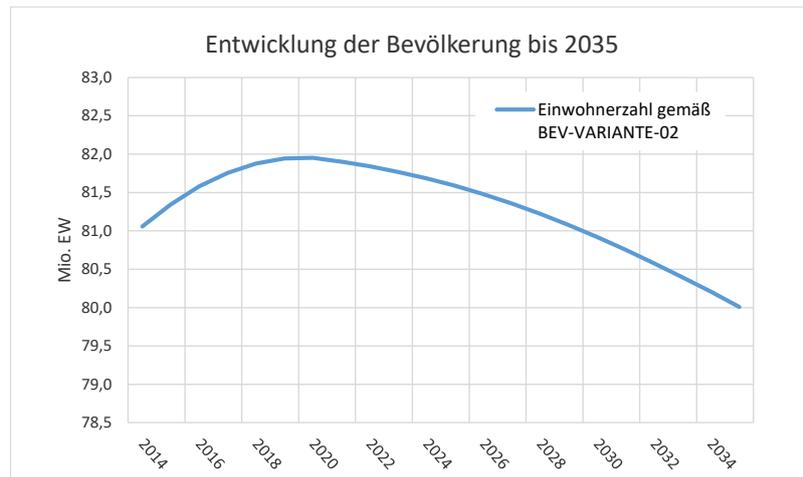


Abbildung 5.12: Bevölkerungsentwicklung bis 2035 bei BEV-VARIANTE-02 mit Kontinuität bei stärkerer Zuwanderung [Destatis, 2015; eigene Darstellung]

Haushalte

Die Zahl der Haushalte in Deutschland ergibt sich aus der vom Destatis (2017) veröffentlichten Haushaltsvorausberechnung bis 2035. Wie in Abbildung 5.13 zu sehen, steigt die Anzahl der Haushalte bis 2027 deutlich an. Danach bleibt der Aufwärtstrend zwar erhalten, flacht aber zusehends ab.

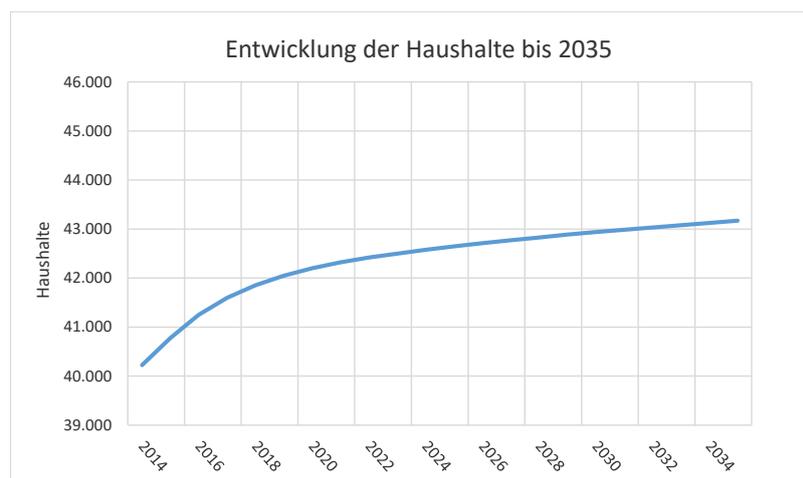


Abbildung 5.13: Entwicklung der Haushalte bis 2035 [Destatis, 2017; eigene Darstellung]

Kaufkraft (Verfügbares Einkommen inkl. Inflationsrate)

Für die Entwicklung des verfügbaren Einkommens und der Inflationsrate liegen keine Prognosen vor. Aufgrund der vorangegangenen linearen Entwicklung (siehe Abbildung 5.14) des verfügbaren Einkommens wird der Trend bis 2035 mit der Funktion $y=350,33x+12642$

fortgeführt. Unter Berücksichtigung der Inflationsrate wird die Kaufkraft erhalten. Die Inflationsrate folgt der Prognose von Statista (2017a) bis 2018 und wird ab 2019 mit der durchschnittlichen Inflationsrate der letzten 10 Jahre fortgeschrieben.

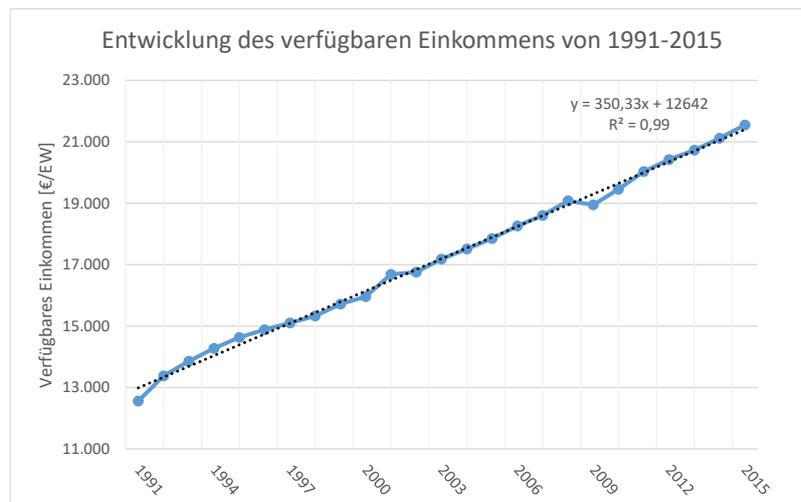


Abbildung 5.14: Entwicklung des verfügbaren Einkommens von 1991-2015 [Destatis, 2017b; eigene Darstellung]

Siedlungsdichte

Für die Entwicklung der Siedlungsdichte gibt es keine einheitliche Prognose, aber einen aktuell deutlich zu erkennenden Urbanisierungstrend. Der Zuzug in die Städte und der damit einhergehende Anstieg der durchschnittlichen Siedlungsdichte konnte durch die Auswertung der *Daten aus dem Gemeindeverzeichnis Kreisfreie Städte und Landkreise nach Fläche und Bevölkerung* [Destatis, 2018] bestätigt werden.

Abbildung 5.15 zeigt den kontinuierlichen Anstieg der durchschnittlichen Siedlungsdichte. Der Bruch des Verlaufs ist durch den Zensus 2011 begründet, mit dessen Korrektur der Einwohnerzahlen nach unten auch die durchschnittliche Siedlungsdichte sank. Auf aktueller Datenbasis zeichnet sich für die Verdichtung der Bevölkerung ein klarer linearer Trend ab, dessen Dauer aber ungewiss ist. Wahrscheinlich scheint aber, dass dieser Trend zunächst anhält. Für das Modell wird ein linearer Anstieg der Siedlungsdichte bis 2027 auf der Grundlage der Steigungsfunktion $y = 12,6x - 24466$ der Jahre 2011 bis 2015 veranschlagt. Ab 2028 flacht die Trendlinie ab, sodass die Siedlungsdichte bis 2035 langsamer zunimmt. 2035 erreicht sie einen Wert von 1.136 EW/km².

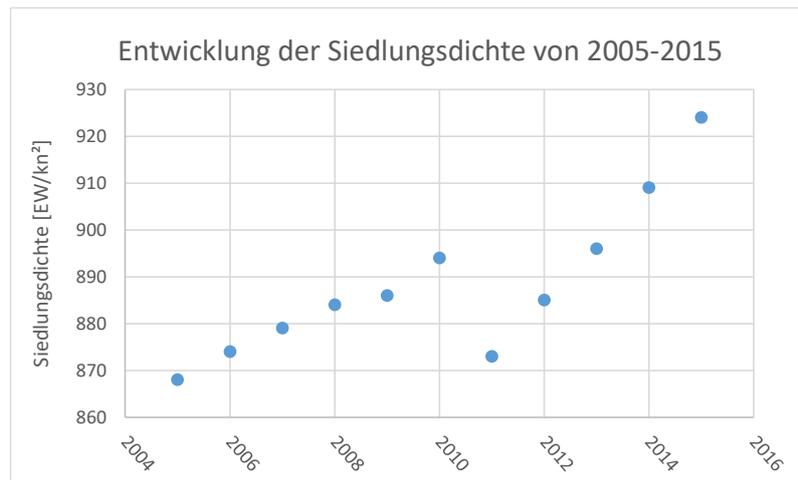


Abbildung 5.15: Entwicklung der Siedlungsdichte von 2005-2015 [Destatis, 2018; eigene Darstellung]

Prognoseannahmen – Externe Abfallströme:

Abfallimport, Gewerbeabfall

Die Eingabe externer und von der Stoffgruppenebene ausgenommener Abfallströme kann optional erfolgen und ist hier am Beispiel von Importen und Gewerbeabfällen gemacht worden. Da die Wahl der Abfallströme und ihr tatsächlicher Einbezug in das Modell je nach Fragestellung variieren kann, werden die Annahmen aus dem Status quo von 2014 für dieses und die folgenden Szenarien konstant fortgeführt. Die Ermittlung ihrer Prognose obliegt nicht der vorliegenden Dissertation.

Sperrmüll sowie Garten- und Parkabfälle

Aufgrund der mangelnden Datenlage wurde auf die detaillierte Betrachtung der Aufkommensentwicklung verzichtet. Die Bestimmung der zukünftigen Mengen orientiert sich an der Entwicklung der Einwohnerzahl und dem Pro-Kopf-Aufkommen aus 2014.

Prognoseannahmen – Wertstofffassung:

Die Anschluss- und Erfassungsquoten für Glas und PPK werden konstant weitergeführt. Für die Anschlussquoten zur Wertstofftonne und Biotonne können keine belastbaren Prognosen getroffen werden. Insbesondere durch das Wertstoffgesetz, das die Einführung der Wertstofftonne nur noch optional vorgibt, kann der Ausbau der Wertstofftonnenabdeckung nicht zweifelsfrei vorhergesagt werden.

Wertstofftonne

Hatten 2014 noch 12,35 Mio. EW (15,2 %) eine Wertstofftonne [Bünemann/Löhle, 2015], so waren es nach Aussagen von Kurth im Jahr 2016 bereits 15 Mio. EW (18,4 %). Das bedeutet, dass vom Start erster Pilotprojekte im Jahr 2004 bis 2014 die Anschlussquote von 0 % auf 15,2 % (1,5 %/Jahr) und danach nochmals auf 18,4 % bis 2016 erhöht (1,6 %/Jahr) wurde. Mit dem ursprünglich geplanten Verpackungsgesetz hätte im Zeitraum der Jahre 2015 bis 2018 mit einem sprunghaften Anstieg des Anschlusses im höheren zweistelligen Bereich gerechnet werden können. Durch das stattdessen eintretende Wertstoffgesetz und der damit verbundenen Optionalität der Wertstofftonne wird der Anschluss sehr wahrscheinlich gedämpft. Daraus ergibt sich für die Prognose lediglich eine Erhöhung um je 10 % in den Jahren 2017, 2018, 2019 und eine Erhöhung um je 1,5 % für die Jahre 2020, 2021 und 2022

pro Jahr, bis sich die Anschlussquote bei 52,9 % eingependelt hat. Von einem Ausbau über diese Quote hinaus wird derzeit nicht ausgegangen. Insbesondere Streitigkeiten um die Verantwortlichkeit stehen einer flächendeckenden Umsetzung der Wertstofftonne im Wege. Die Erfassungsquoten (vgl. Kapitel 5.2) bleiben konstant.

Biotonne

Waren 2014 rund 64,5 % der Einwohner an eine Biotonne angeschlossen (vgl. Kapitel 5.2), haben sich die Anschlussquoten durch die Vorgabe der Getrenntsammlung zum 1. Januar 2015 weiter erhöht. Richter *et al.* (2017) geben an, dass 2015 27 öRE ein flächendeckendes System eingeführt haben. Weitere 17 folgten im Jahr 2016. Zudem stand bei 11 öRE die Entscheidung über die Einführung noch aus. Somit hätten Ende 2016 bis zu 333 von 387 öRE ein Angebot für die Erfassung von Biogut [Richter *et al.*, 2017].

Im Modell erfolgt ein für die Jahre 2015 und 2016 gestaffelter Anstieg der Anschlussquote von je 5 %. Ab 2017 steigt die Anschlussquote jährlich um 2 %, ehe sie ihren Höchststand von 80 % Anschluss erreicht. Zwar soll die Anschlussquote laut Gesetz auf 100 % gesteigert werden, realistisch gesehen liegt sie nach Aussagen von Kern (2016) jedoch bei 80 %. 2012 schätzten Ecoprog noch, dass der Anschluss sogar auf bis zu 90 % ansteigen wird [ecoprog, 2012].

Von einem Anstieg der Erfassungsquote ist zunächst nicht auszugehen. Im Gegenteil, denn insbesondere bei Zwangsanschluss ist die Akzeptanz zur Nutzung des Systems nicht zwangsläufig gegeben. Es wird daher von einem Rückgang der Erfassungsquote von je 2 % für die Jahre 2015 bis 2018 ausgegangen. Mit einer Stabilisierung der erfassten Organikmenge auf einem bestimmten Niveau ist in einem Zeitraum von vier bis fünf Jahren nach Einführung der Tonne zu rechnen [Krause/Oetjen-Dehne/Dehne, 2014]. Als Folge steigt die Erfassungsquote der Organikfraktion im Jahr 2020 um 6 % und nochmals um 5 % in 2021. Als weiteren Effekt des Anschlusszwangs benennt Kern (2016) den Anstieg des Störstoffanteils. In der Prognose 2035 wird für die Jahre 2015 bis 2018 ein Anstieg des Störstoffgehaltes von 0,5 % veranschlagt, der in den Jahren 2019 und 2020 um je 0,3 % zurück geht.

Prognoseannahmen – Anlagenparameter:

Während die Grenzwerte konstant bleiben, ändern sich mit Veränderung der Kapazitäten die dazugehörigen kapazitätslimitierenden Eingabewerte. In einer umfassenden Recherche wurde versucht, Prognosen über die mögliche Entwicklung der Kapazitäten zu finden, um daraus entsprechende Variablenwerte bis 2035 abzuleiten. Da die vorgefundene Datenanlage jedoch sehr schwach ist, wurden die gewonnenen Informationen durch subjektive Einschätzungen ergänzt.

MVA und EBS-Kraftwerke

Aus der 2016 von Huneke *et al.* (2016) veröffentlichten Studie geht hervor, dass die Fachverbände ITAD und VKU eine maßgebliche Veränderung der Anlagenkapazität derzeit übereinstimmend für unwahrscheinlich halten. So soll es keine gravierenden Stilllegungen an Verbrennungskapazität in den nächsten Jahren geben [Huneke *et al.*, 2016]. Darüber hinaus ist eine weitere Zunahme der vorhandenen Verbrennungskapazitäten durch den Bau von Neuanlagen nicht zu erwarten [UBA, 2012].

Ging Alwast (2014) noch von einem durch das Alter der Anlagen begründeten Kapazitätsrückgang bis 2025 aus, verweist Richers (2010) wiederum darauf, dass Ertüchtigungsmaßnahmen die Kapazitäten einiger bestehender Anlagen erhöht haben dürften. Er benennt die Datenlage aber als diffizil.

Für die Annahmen der Prognose wird auf Grundlage der Verbände ITAD und VKU zunächst keine Kapazitätsveränderung bis zum Jahr 2035 angenommen. Bei einem durchschnittlichen Linienalter der MVA von 19,5 Jahren [Alwast, 2015] kann, eine Gesamtbetriebsdauer von ca. 40 Jahren vorausgesetzt, davon ausgegangen werden, dass die Kapazitäten weitere 20 Jahre Bestand haben. Möglichen Anlagenschließungen stehen Ertüchtigungen in diesem Zeitraum gegenüber, wodurch die Kapazität vollends erhalten bleibt. Im Falle einer Fortschreibung über 2035 hinaus würde ab 2038 eine Anlage je fünf Jahre schließen. Es entfallen durchschnittlich 1,5 % der Kapazität (ca. 300.000 Mg). Bei den EBS-Kraftwerken, deren durchschnittliches Linienalter 8,5 Jahre beträgt [Alwast, 2015], bleibt die Kapazität bis 2047 stabil und verringert sich danach um 3 % je fünf Jahre (ca. 160.000 Mg).

Zement- und Kohlekraftwerke

Da die Auslastung einer Mitverbrennungsanlage nach Schu (2006) bei der Verbrennung von Abfällen weniger eine Rolle spielt als die Qualität der eingesetzten Ersatzbrennstoffe, wurde keine Kapazitätsobergrenze für die Menge festgelegt (vgl. Kapitel 5.2). Auf die Abschätzung möglicher Inputmengen in der Zukunft wurde daher verzichtet. Es wird zunächst der für 2014 geltende Input von 3,1 Mio. Mg konstant fortgeschrieben. Obgleich der Wegfall von Kraftwerken zugunsten der Energiewende den Einsatz limitieren könnte, wird zurzeit davon ausgegangen, dass die Steigerung der Mengen in die Zementwerke einen Ausgleich schafft [Flamme, 2018].

MBA

Für die MBA wurden zuletzt mehrere Prognosen zum Anlagenbedarf in Deutschland nach 2025 erstellt. Die prognostizierten Veränderungen fallen jedoch höchst unterschiedlich aus. Die MBA-Kapazitäten könnten aus Sicht verschiedener Autoren auf 80, 60 oder 0 % zurückgehen oder auch um ca. 7,5 Mio Mg/a steigen [Ketelsen/Nelles, 2015]. Ketelsen/Nelles (2015) selbst sehen nach aktueller Kenntnislage durch Auswertungen der Tendenzen und Entwicklungen aus den letzten Jahren einen geringen Kapazitätsrückgang um 5-10 % bis 2020. Über die letztendliche Entwicklung über 2020 hinaus kann nur spekuliert werden. Durch die Erhöhung der Getrennterfassung von Bioabfällen kann in langfristiger Perspektive jedoch davon ausgegangen werden, dass die MBA-Kapazitäten weiter reduziert werden. Für das Modell wird ein Rückgang von 5 % je 10 Jahre ab 2021 angenommen.

LVP

Die aktuell geltende Sortierkapazität für Leichtverpackungen von 3,1 Mio. Mg wird nach Auffassung von Bünemann *et al.* (2011) auch nach Einführung der Wertstofftonne und der damit einhergehenden Mehrmenge ausreichen. Zwänge zum Neuausbau gibt es mengenmäßig betrachtet zunächst nicht. Zwar werden alte und weniger effiziente Anlagen von Zeit zu Zeit geschlossen, aber auch neue Anlagen mit moderner Anlagentechnik gebaut. Im Bedarfsfall könnte auf Anlagen zurückgegriffen werden, die nach Bünemann *et al.* (2011) in der Vergangenheit LVP sortiert haben, aktuell aber nicht beliefert werden und ohne relevanten

Aufwand wieder in Betrieb genommen werden können. Außerdem können zusätzliche Kapazitätsreserven durch längere Betriebszeiten sowie durch kapazitive Ertüchtigung einzelner Anlagen erschlossen werden [Bünemann *et al.*, 2011]. Die Behandlungskapazität wird im Modell daher konstant bei 3,1 Mio. Mg gehalten.

Kompostierung

Aufgrund der Klimadebatte werden Bioabfallkompostierungsanlagen zunehmend durch anaerobe Systeme ersetzt. Zudem ermöglicht nach Aussagen von Krause/Oetjen-Dehne (2015) der vielerorts großzügige Bestand an Kompostierungsanlagen ein Abfangen zusätzlicher Biogutmengen in den Übergangsphasen des Biotonnenausbaus. Von einem Ausbau klassischer Kompostierungssysteme für die Abfälle aus der Biotonne ist aus diesen genannten Gründen nicht auszugehen. Die vorhandene Kapazität wird vielmehr durch Schließungen vereinzelter Standorte sinken. Die Kapazität von 9.774.000 Mg verringert sich in der Prognose bis 2035 um eine kleine/mittelgroße Anlage (ca. 20.000 Mg) pro Jahr.

Vergärung

Nach Einschätzungen des Witzenhausen-Instituts werden die Behandlungskapazitäten von Vergärungsanlagen mittelfristig zunehmen. Kern/Raussen (2015) prognostizieren einen Anstieg der Kapazität für Anlagen zur Behandlung von Bio- und Grüngut auf 5,5 Mio. Mg in 2025. Geht man von einem für diese Anlagen typischen Substratmix aus, könnten nach Einschätzung der Autoren 4,5 Mio. Mg. in 2025 vergoren werden. Hinzu kommen mögliche 0,95 Mio. Mg Kapazität aus gewerblichen Anlagen (vgl. Kapitel 5.2). Steigt die Kapazität in der Zeit um fast das Doppelte, wird ab 2026 von einem verlangsamten Ausbau ausgegangen. Krause/Oetjen-Dehne/Dehne (2014) vermuten, dass aus Kostengründen zunächst die bestehenden Überkapazitäten bei Kompostierungsanlagen ausgeschöpft werden könnten. Das würde einen schleppenden bzw. verlangsamten Ausbau zur Folge haben. Die Kapazität wird auf 6,5 Mio. Mg in 2035 ansteigen.

Deponierung

Die Menge des Restvolumens wird um die jeweilige Einbaumenge des Vorjahres reduziert.

5.3.2 Prognose der Abfallströme und Behandlungskapazitäten bis 2035

Abbildung 5.16 zeigt zunächst die Entwicklung der Gesamtmenge aus Wertstoffen und Restabfall, ungeachtet ihrer Erfassungsform. Dabei ist ein Anstieg der Gesamtabfallmenge zu erkennen. Diese Entwicklung ist auf den demografischen Wandel zurückzuführen. Bis 2020 steigt zunächst die Einwohnerzahl, die ein erhöhtes Abfallaufkommen begünstigt. Zwar sinkt die Einwohnerzahl bis 2035 kontinuierlich (vgl. Abbildung 5.12), die spezifischen Abfallverhaltensmuster tragen jedoch zu einem weiteren Anstieg der Abfallmenge bei. Die Zunahme von Einpersonenhaushalten, der Kaufkraft und der Verdichtung der Bevölkerung führen zu einem Anstieg der Pro-Kopf-Aufkommen. Die Abfallverhaltensmuster kompensieren den durch die sinkende Einwohnerzahl begründeten Rückgang der Abfallmengen nicht nur, sie übersteigen sie sogar.

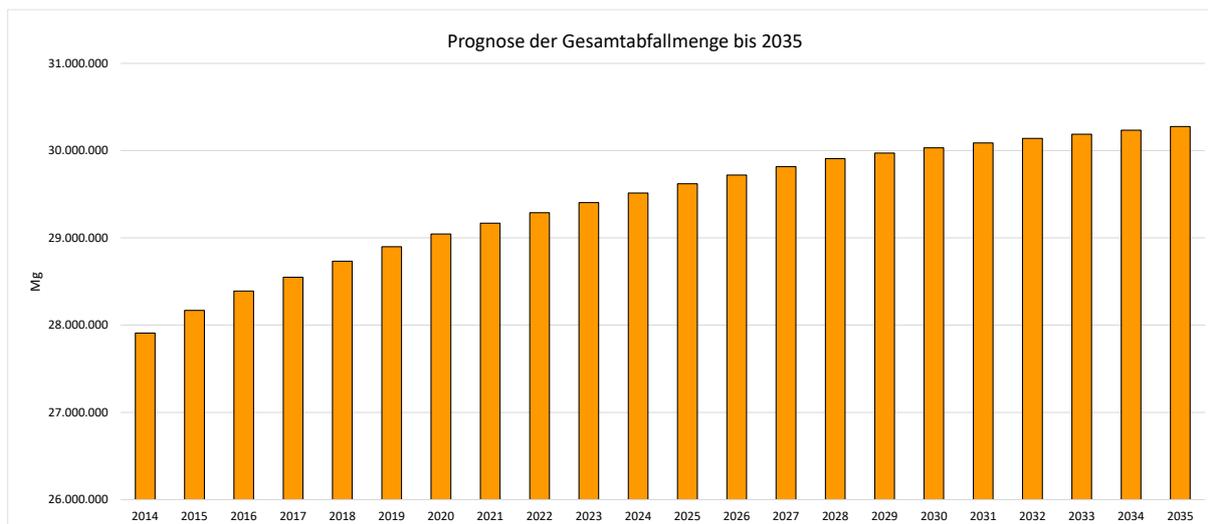


Abbildung 5.16: Prognose der Gesamtabfallmenge bis 2035

Abbildung 5.17 zeigt die Mengen der einzelnen Wertstoffströme im Detail:

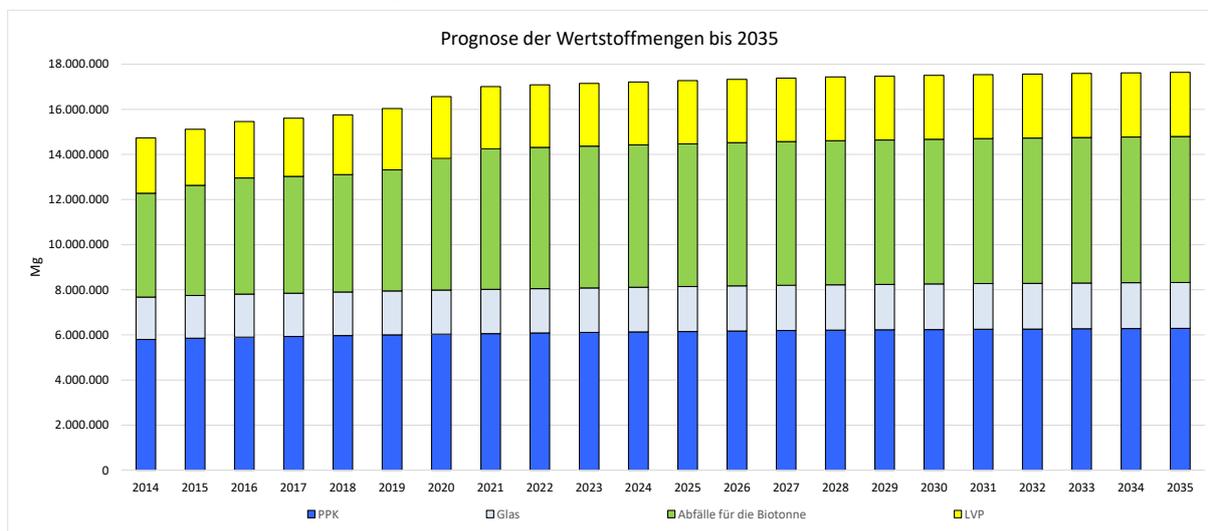


Abbildung 5.17: Prognose der Wertstoffmengen bis 2035

Die Menge der Abfälle für die Biotonne steigt in den Jahren 2014 bis 2016 kontinuierlich an, da der schrittweise Ausbau des flächendeckenden Anschlusses zu einer höheren Gesamterfassungsmenge führt. Ein noch deutlicherer Anstieg der Menge deutet sich für die Jahre 2019 bis 2022 an. Sie ist auf den sprunghaftigen Ausbau der Tonnen zwischen den Jahren 2015 und 2019 zurückzuführen, bei dem sich die erfasste Organikmenge erst einige Jahre später stabilisiert. Mit Erreichen der geschätzten Anschlussquote von 80,5 % und Stabilisierung der Erfassungsquote steigen die Mengen bis 2035 nur noch leicht, aber kontinuierlich. Das ist im Wesentlichen auf den demografischen Wandel zurückzuführen. Wie bereits erwähnt begünstigen Trends bei Haushaltsgröße, Siedlungsdichte und Kaufkraft eine generell höhere Abfallmenge. Ihr Störstoffanteil schwankt zwischen 3 und 7 %.

Ähnlich verhält sich die Situation bei der Wertstoffsammelmenge aus dem Gelbem Sack und der Wertstofftonne. Eine deutliche Zunahme der Sammelmenge kann bis 2021 beobachtet werden. In diesem Zeitraum erhöht sich die Anschlussquote der Tonne von 15,2 auf 52,9 %. Der Anstieg der Sammelmenge ist im Wesentlichen auf Metalle und stoffgleiche Nichtverpackungen zurückzuführen (Abbildung 5.18). Über 2022 hinaus steigt die Menge

bedingt durch den demografischen Wandel nur noch leicht, aber kontinuierlich an. Die Zusammensetzung verändert sich unwesentlich.

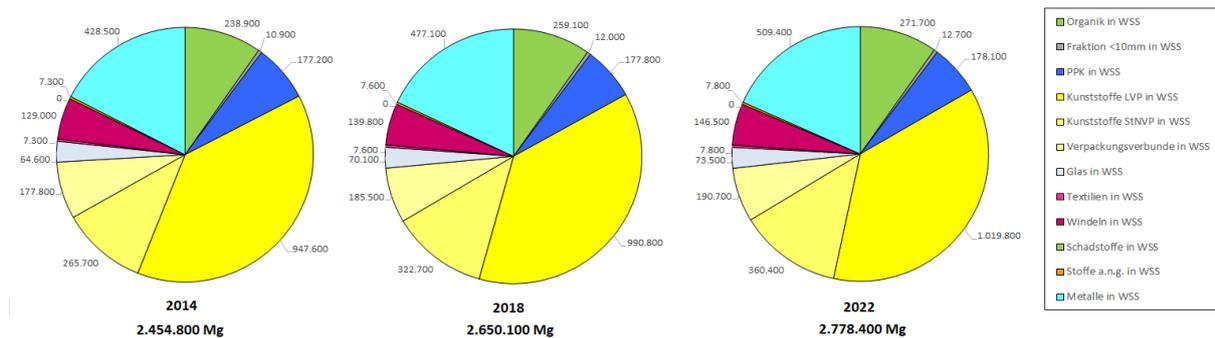


Abbildung 5.18: Veränderung der Zusammensetzung der LVP/StNVP-Sammelmenge bis 2022

Bei den Strömen Glas und PPK ist von einem leichten Anstieg auszugehen. Sie werden in der weiteren Bewertung nicht mehr berücksichtigt.

Der Anstieg der Sammelmengen in der Biotonne und im Gelben Sack/der Wertstofftonne führt zur Entfrachtung des Restabfalls. So sinkt seine Menge während des Ausbaus der anderen beiden Tonnensysteme bis 2022. Ab 2023 stabilisiert sie sich und steigt jährlich wieder geringfügig an (Abbildung 5.19). Wie bei den anderen Abfallströmen auch, ist das durch die Einflüsse des demografischen Wandels zu erklären.

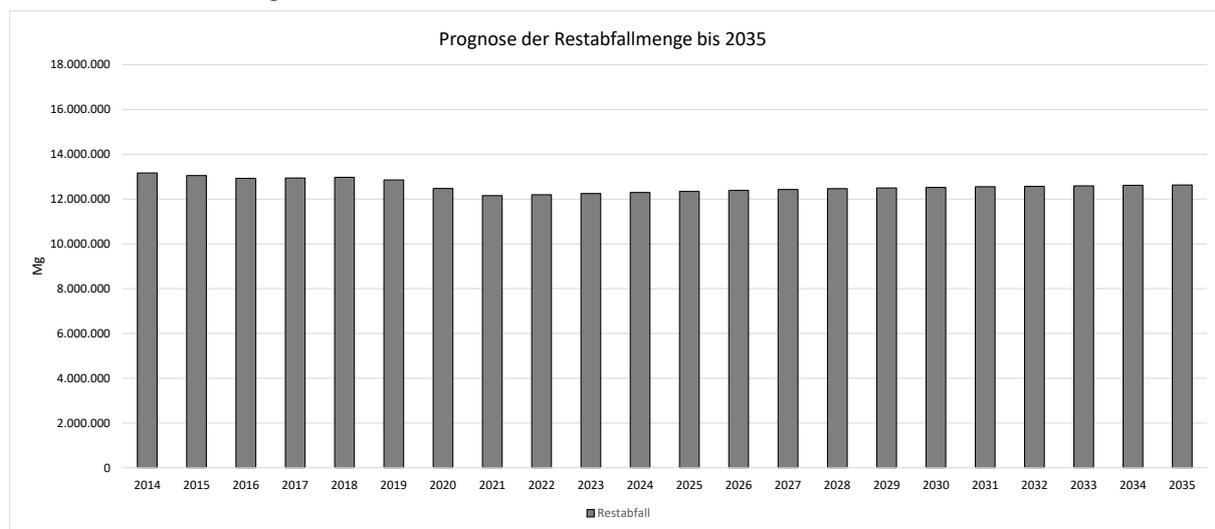


Abbildung 5.19: Prognose der Restabfallmenge bis 2035

Dabei ändert sich nicht nur die Restabfallmenge, sondern auch seine Zusammensetzung. Besonders deutlich zeigt Abbildung 5.20 den Rückgang der Stoffgruppe *Organik* im Restabfallgemisch. Binnen acht Jahren geht er von 30,8 % auf 24,8 % zurück. Mit der sprunghaftigen Erhöhung des Wertstofftonnenanschlusses geht auch der Anteil der Wertstoffe *LVP*, *StNVP*, *Metalle* und *Verpackungsverbunde* zunächst zurück. Da die Anschlussquote in den Jahren 2020/21 nur noch marginal und anschließend gar nicht mehr ansteigt, kommt es ab 2020 zu keiner weiteren signifikanten Entfrachtung des Restabfallgemisches durch diese Stoffgruppen mehr. Im Gegenteil, durch den starken Rückgang der Organik und dem damit verbundenen Rückgang der absoluten Menge, erhöht sich der Prozentwert der Wertstoffe im Gemisch wieder.

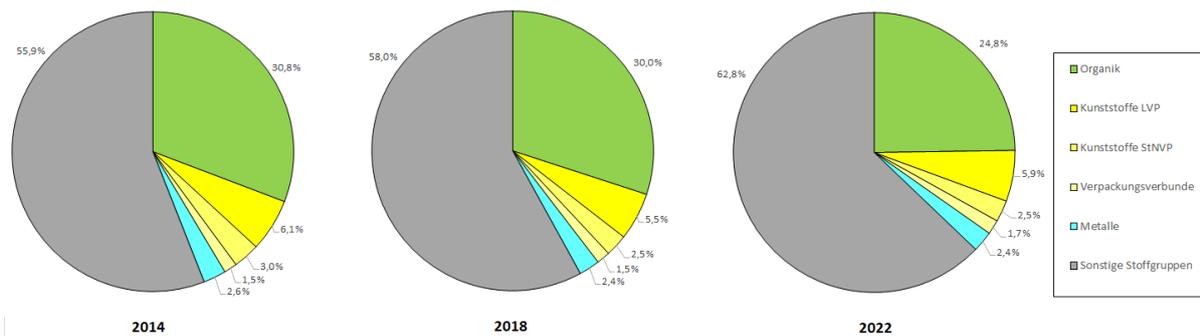


Abbildung 5.20: Veränderung der Restabfallzusammensetzung bis 2022

Abbildung 5.21 zeigt, welcher der Abfallströme sich mengenmäßig durch die Wirkung der Steuerungsgrößen am meisten verändert. Sie stellt die prozentuale Mengenveränderung der verschiedenen Abfallströme im Prognosezeitraum dar (100 = 2014).

Die größte Dynamik ist bei den Abfällen für die Biotonne zu beobachten. Ihre Menge steigt um 40,4 % im Jahr 2035. Die Restabfallmenge sinkt aufgrund der großen Ausgangsmenge an Restabfall und der damit verbundenen Trägheit gegenüber Veränderungen nur geringfügig um 4,1 %. Die LVP/StNVP-Menge steigt um 16,0 %.

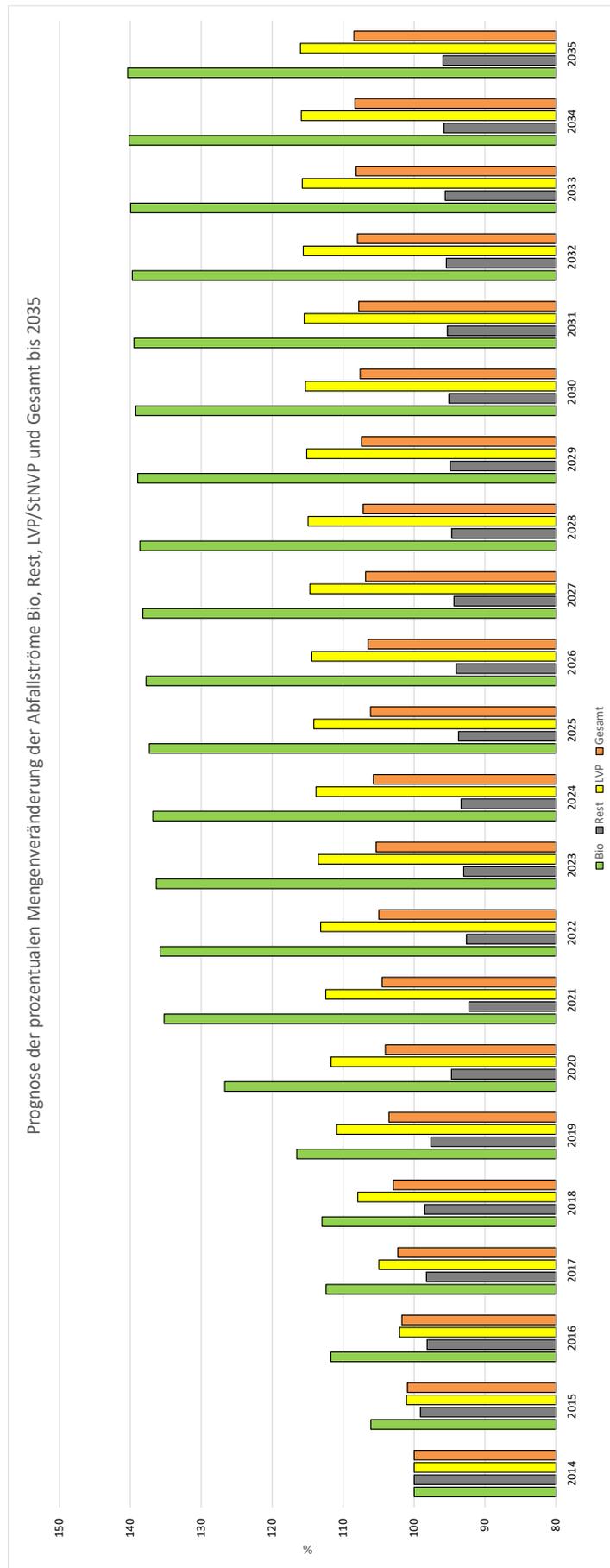


Abbildung 5.21: Prognose der prozentualen Mengenveränderung der Abfallströme Bio, Rest, LVP/StNVP und Gesamt bis 2035

Bewertung der Anlagenkapazitäten

Neben der Betrachtung von Massenströmen können für die Bewertung der Anlagenkapazitäten auch die durch die Stoffgruppenverschiebung bedingten Veränderungen der Eigenschaften von Abfallströmen relevant sein. Während die Kapazität der LVP-Sortieranlagen, der MBA und der biologischen Behandlungsanlagen einzig durch den Masseinput limitiert sind, bemisst sich die Kapazität thermischer Anlagen anhand der eingetragenen Energiemenge. Darüber hinaus sind die Parameter Chlor und Schwefel von Bedeutung, da ihr Input begrenzt ist, um Korrosionen in den Verbrennungsanlagen zu vermeiden. Aus der Zusammensetzung der ermittelten Abfallströme und den stoffgruppenspezifischen Kennzahlen lässt sich auf Eigenschaften des eingetragenen Abfalls, sowohl Primär- als auch Sekundärabfall, schließen.

So wird zum Beispiel der Heizwert von Restabfall, als einer der Hauptinputs in die MVA, von 9,19 MJ/Mg in 2014 auf 8,86 MJ/Mg in 2035 sinken. Zwar ist Restabfall von einem erheblichen Teil organischen Materials entfrachtet worden, im Gegenzug werden ihm aber besonders hochkalorische Stoffgruppen entzogen. Die Chlorkonzentration sinkt durch den Abzug von Kunststoffanteilen von 0,53 Gew.-% in 2014 auf 0,49 Gew.-% in 2035 während die Schwefelkonzentration konstant bei 0,35 Ma-% bleibt.

Abbildung 5.22 zeigt die Prognose der Auslastung der Abfallbehandlungsanlagen. Berücksichtigt sind mögliche Zu- und Abnahmen der Kapazitäten gemäß Anhang B. Diese Betrachtung unterstellt dem Bilanzrahmen Deutschland, dass alle Abfälle in allen Anlagen in Deutschlands behandelt werden können¹⁶.

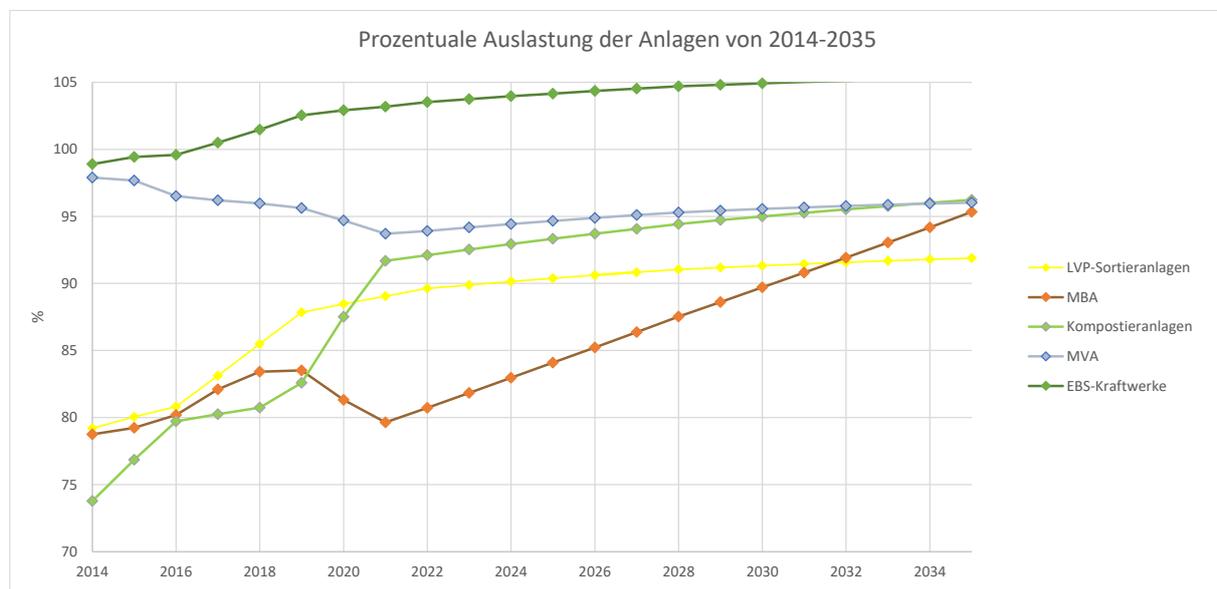


Abbildung 5.22: Auslastung der Anlagen bis 2035

Die Auslastung der LVP-Sortieranlagen ist deckungsgleich mit der Entwicklung der Sammelmenge aus dem Gelben Sack und der Wertstofftonne. Zunächst steigt sie signifikant,

¹⁶ Berücksichtigt werden Folge dessen keine Transportwege. In der Praxis werden Abfälle die im Norden des Landes anfallen nicht zwangsläufig in Süddeutschland behandelt, auch wenn der Norden Unterkapazitäten aufweist. Perspektivisch ist die Abbildung und Bewertung der Anlagenkapazitäten nach Regionen zu clustern.

stabilisiert sich mit Abschluss des Tonnenausbaus aber und steigt danach nur noch leicht durch die Einflüsse des demografischen Wandels. Gleiches trifft auf die Kompostierungsanlagen zu. Auf die Darstellung der Prognose zur Auslastung von Vergärungsanlagen wurde verzichtet, da die Datenlage hier zu unscharf und Prognosen wenig belastbar wären. EBS-Kraftwerke erfahren eine Mehrauslastung, die im Wesentlichen auf den Anstieg von EBS aus LVP-Sortieranlagen zurückzuführen ist. Durch die Wertstofftonne finden zwar mehr hochwertige Wertstoffe wie LVP, StNVP, Metalle und Verpackungsverbunde den Weg in die Sortieranlagen, durch den allgemeinen Anstieg der Stoffgruppenmengen steigt aber die Gesamtmenge und folglich auch die Menge an EBS. Die Auslastung der MBA nimmt vorerst aufgrund des Wegfalls von rund 5-10 % ihrer Kapazitäten bis 2019 zu. Die verbleibende Restkapazität wird dadurch besser ausgelastet. Nach 2019 sinkt die Auslastung wegen der rückläufigen Restabfallmenge. Mit Stabilisierung bzw. der leichten Zunahme der Restabfallmenge steigt, bei gleichzeitiger schrittweiser Stilllegung von MBAs, die Auslastung verbliebener Kapazitäten. Ähnlich verhält sich der Verlauf der MVA-Kapazitäten, jedoch ohne den starken Abfall in den Jahren bis 2019, da hier keine Kapazitäten heruntergefahren werden.

In allen Prognosejahren wurden vom Modell keine Warnhinweise ausgegeben, die auf eine Überschreitung von Chlor- und Schwefelgrenzwerten hindeuteten.

Bei den Deponien DK I und DK II reduziert sich die Kapazität bzw. das Restvolumen jährlich um die eingelagerten Mengen (Tabelle 5.19). Die Entsorgungssicherheit ist bis 2035 gewährleistet. Auf längere Sicht können Ertüchtigungs-, Rückbau- oder Erweiterungsmaßnahmen notwendig werden.

Tabelle 5.19: Verbleibendes Deponievolumen 2014-2025

Jahr	Deponierestvolumen	Deponierestvolumen
	DK I [m ³]	DK II [m ³]
2014	6.768.600	12.066.100
2015	6.547.200	11.579.600
2016	6.326.700	11.097.900
2017	6.107.500	10.621.700
2018	5.887.800	10.143.400
2019	5.667.200	9.662.300
2020	5.447.600	9.184.900
2021	5.232.400	8.724.400
2022	5.020.800	8.278.000
2023	4.808.600	7.829.700
2024	4.595.800	7.379.600
2025	4.382.400	6.927.700
2026	4.168.500	6.474.100
2027	3.954.000	6.019.000
2028	3.739.000	5.562.200
2029	3.523.600	5.104.000
2030	3.307.900	4.644.800
2031	3.091.800	4.184.600

2032	2.875.400	3.723.500
2033	2.658.900	3.261.600
2034	2.442.000	2.798.900
2035	2.225.000	2.335.400

Zunächst kann von einer Entsorgungssicherheit bis 2035 ausgegangen werden. Da sich die Betrachtung jedoch nur auf die Teilkapazitäten konzentriert, die zur Behandlung der in der Arbeit adressierten Abfälle vorgehalten werden (vgl. 5.2.4), ist diese Aussage mit Bedacht zu bewerten. So können die Anlagen durch ein gezieltes Stoffstrommanagement mit anderen Abfällen wie Importen oder weiteren, in der Arbeit nicht betrachteten Abfällen (z. B. Produktionsabfälle) über ihren jetzigen Anteil hinaus ausgelastet werden. Anders herum können die Anteile der in der Arbeit nicht betrachteten Abfälle zurückgefahren werden um Kapazitäten für die in der Arbeit adressierten Abfälle frei zu machen. So kann zum Beispiel auf die minimalen Unterkapazitäten der EBS-Kraftwerke, die laut Prognose ab dem Jahr 2030 auftreten würden, reagiert werden.

5.3.3 Sensitivitätsbetrachtung der Einflussfaktoren

Für die Sensitivitätsbetrachtung werden die Variablenwerte der Prognose 2035 für je einen Einflussfaktor beibehalten, während für die Eingabevariablen der beiden anderen Faktoren die Status quo-Werte konstant fortgeschrieben werden. Ausgewertet werden jeweils nur die primär beeinflussten Abfallströme. Darauf folgt die Bewertung der Ergebnisse und der Anlagenkapazitäten. Die Sensitivitätsbetrachtung soll einen Eindruck davon vermitteln, welcher der Faktoren den größten Einfluss auf die Abfallströme und Behandlungskapazitäten ausübt.

5.3.3.1 Einflussfaktor Biotonne

Abbildung 5.23 zeigt die Sammelmenge der Abfälle für die Biotonne. Sie steigt in den Jahren, in denen der Ausbau des Biotonnenanschlusses erfolgt, von 4,6 Mio. Mg auf 6,0 Mio. Mg an. Da sich die Organikmenge in der Regel erst nach 4 bis 5 Jahren stabilisiert, findet der Anstieg mit einer zeitlichen Verzögerung statt. Zwischen 2019 und 2020 steigt sie am deutlichsten, was auf die Anschlüsse aus 2015/16 zurückzuführen ist. Ab 2021 stabilisiert sich die Menge und ändert sich nicht mehr, da der Anschluss weitestgehend vollzogen ist. Für den unwahrscheinlichen Fall eines 100%igen Anschlusses würde sich die Sammelmenge nochmals um rund 1,2 Mio. Mg erhöhen.

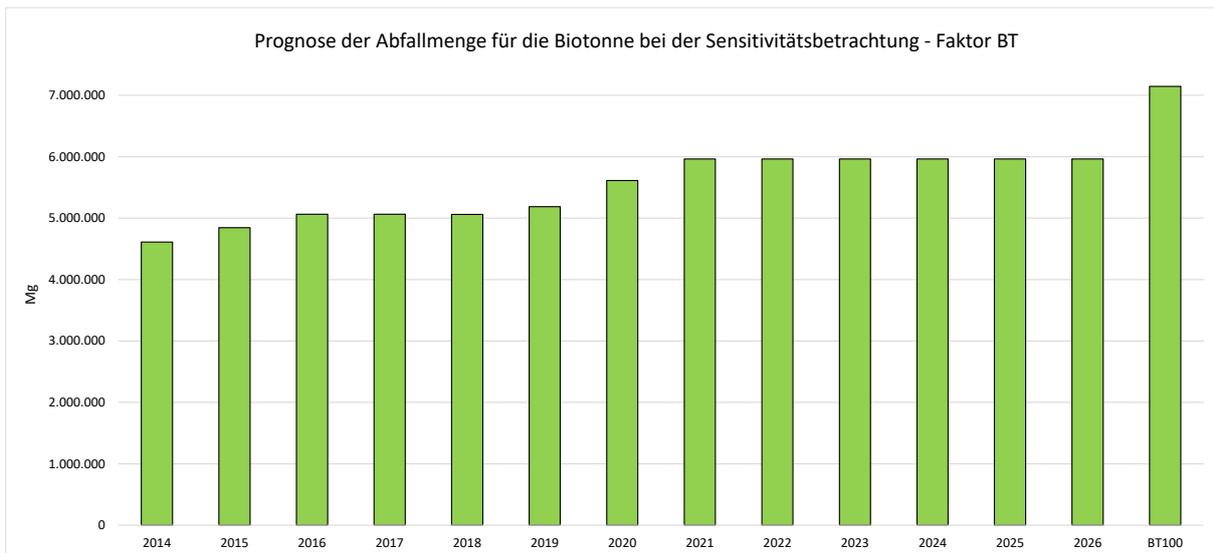


Abbildung 5.23: Prognose der Abfallmenge für die Biotonne bei der Sensitivätsbetrachtung - Faktor BT

Die verstärkte separate Erfassung von Bioabfällen führt auch zu einer Veränderung des Restabfalls. Abbildung 5.24 zeigt den Einfluss auf den Abfallstrom *Abfälle für die Biotonne*, der größer ist als der auf den *Restabfall*. Die bisherige Bioabfallmenge ändert sich um +29 % gegenüber dem Status quo. Bei einem theoretischen Vollanschluss mit 100 % (BT100) würde er sich sogar um +55 % ändern. Die Menge des Restabfalls ändert sich, bedingt durch die große Ausgangsmasse, nur um -10 %, bzw. -19 % bei 100 % Anschluss der Biotonne.

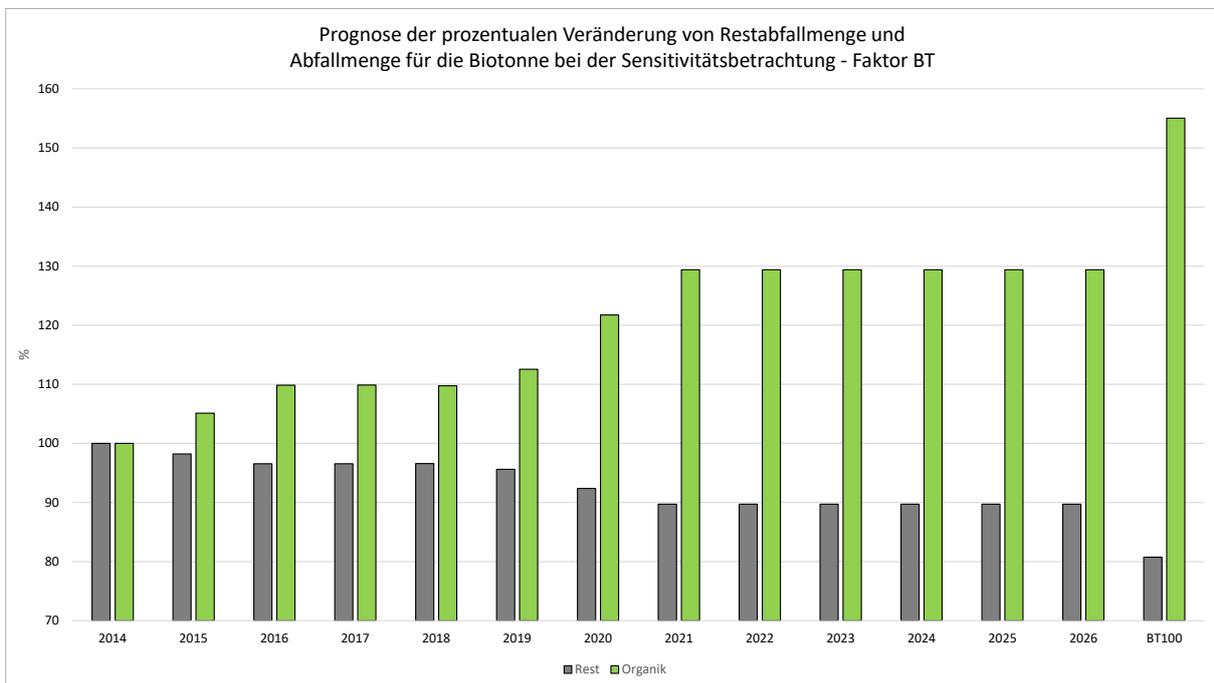


Abbildung 5.24: Prognose der prozentualen Veränderung von Restabfallmenge und Abfallmenge für die Biotonne bei der Sensitivätsbetrachtung - Faktor BT

Die Zusammensetzung von Restabfall verändert sich wie folgt (Abbildung 5.25):

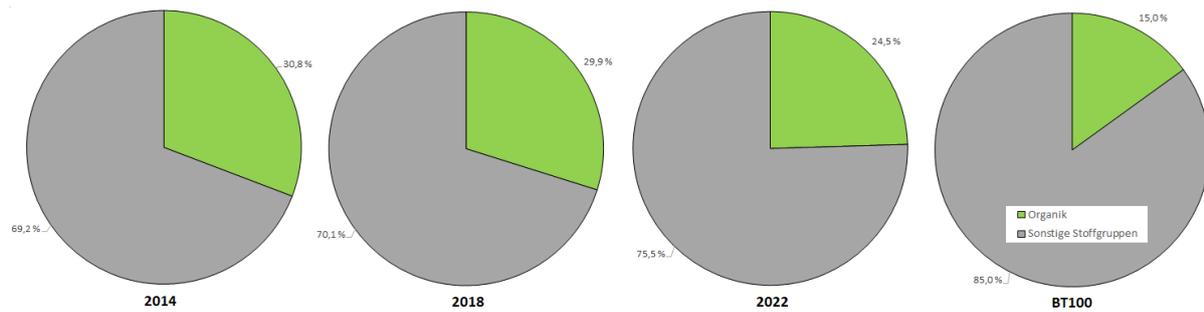


Abbildung 5.25: Veränderung des Organikanteils im Restabfall bei der Sensitivätsbetrachtung - Faktor BT

5.3.3.2 Einflussfaktor Wertstofftonne

Abbildung 5.26 zeigt die Sammelmenge aus Gelbem Sack und Wertstofftonne. Sie steigt in den Jahren, in denen der Ausbau des Wertstofftonnenanschlusses erfolgt, von 2,5 Mio. Mg auf 2,7 Mio. Mg an. Sofern es keine weiteren gesetzlichen Impulse gibt, wird davon ausgegangen, dass der Ausbau ab 2019 als abgeschlossen gilt und die Menge konstant bleibt. Im Vergleich zeigt die Abbildung auch die theoretische Menge, die bei einem Vollanschluss 3,0 Mio. Mg betragen würde (WST100).

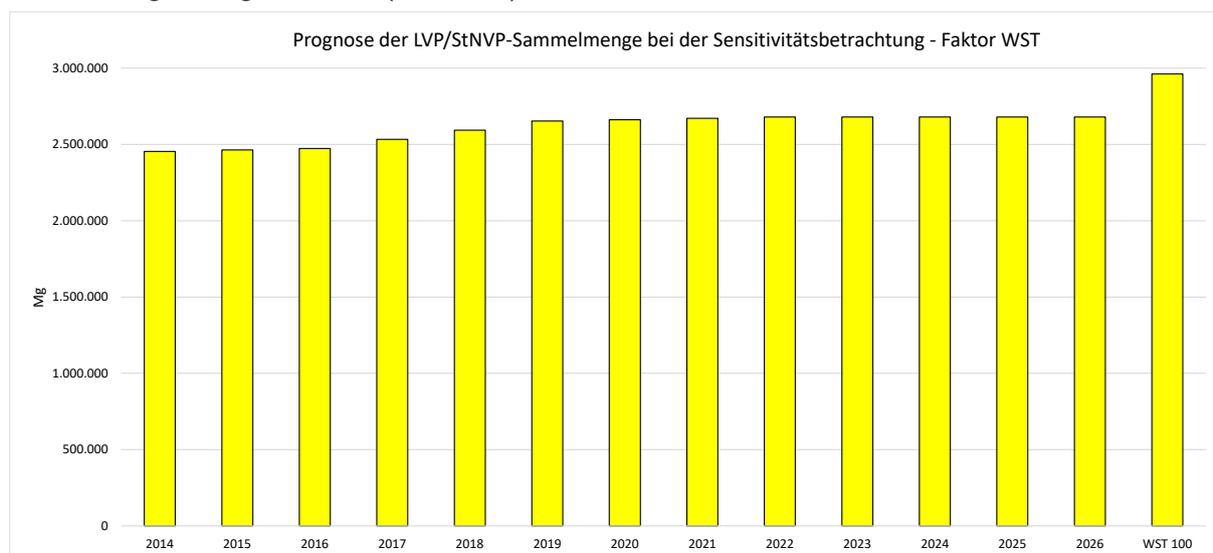


Abbildung 5.26: Prognose der LVP/StNVP-Sammelmenge bei der Sensitivätsbetrachtung - Faktor WST

Die zunehmende Erfassung von Wertstoffen führt auch zu einer Veränderung des Restabfalls. Abbildung 5.27 zeigt den Einfluss auf die Abfallströme *LVP/StNVP* und *Restabfall*. Die bisherige Wertstoffsammelmenge ändert sich um +9,2 %. Bei einem theoretischen Vollanschluss mit 100 % würde er sich sogar um +20,6 % ändern. Restabfall ändert sich, bedingt durch seine große Ausgangsmasse, nur um -1,7 %, bzw. -3,9 % bei 100 % Anschluss der Wertstofftonne (WST100).

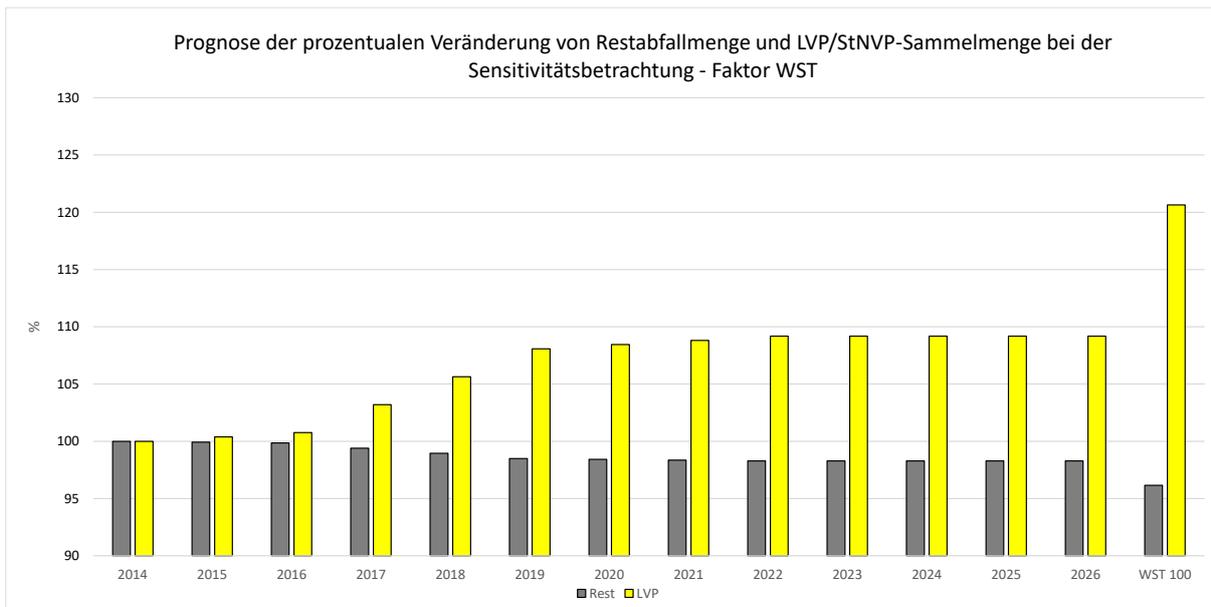


Abbildung 5.27: Prognose der prozentualen Veränderung von Restabfallmenge und LVP/StNVP-Sammelmenge bei der Sensitivitätsbetrachtung - Faktor WST

Die Zusammensetzung von Restabfall ändert sich wie folgt (Abbildung 5.28):

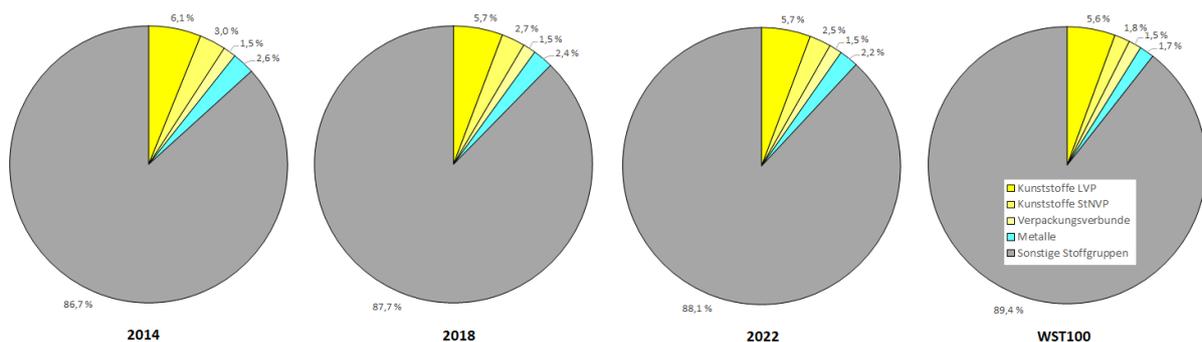


Abbildung 5.28: Veränderung des LVP/StNVP-Anteils im Restabfall bei der Sensitivitätsbetrachtung - Faktor WST

5.3.3.3 Einflussfaktor Demografischer Wandel

Abbildung 5.29 und Abbildung 5.30 zeigen die Sammelmengen der Wertstoffströme PPK, Glas, Abfälle für die Biotonne und LVP/StNVP bzw. Restabfall. In den Jahren 2014 bis 2020 steigt die Einwohnerzahl von 81,058 Mio. EW auf 81,953 Mio. EW, sodass eine verstärkte Zunahme der Abfallströme zu beobachten ist. Die Zunahme von Einpersonenhaushalten und der Kaufkraft sowie die Verdichtung der Bevölkerung begünstigen den Anstieg geringfügig. Ab 2021 sinkt die Einwohnerzahl bis 2035 kontinuierlich auf 80,009 Mio. EW (vgl. Abbildung 5.12). Da die Einpersonenhaushalte, die Kaufkraft und die Siedlungsdichte weiter zunehmen, steigen die Abfallmengen weiter, wenn auch verhaltener als in den Jahren zuvor. Die Abfallverhaltensmuster kompensieren den durch die sinkende Einwohnerzahl begründeten Rückgang der Abfallmengen nicht nur, sie übersteigen ihn sogar. Erst bei einer deutlichen Abnahme der Einwohnerzahl (um beispielsweise minus 7,979 Mio. EW bis zum Jahr 2060 (DW2060) [Destatis, 2015]) sinkt die Abfallmenge wieder.

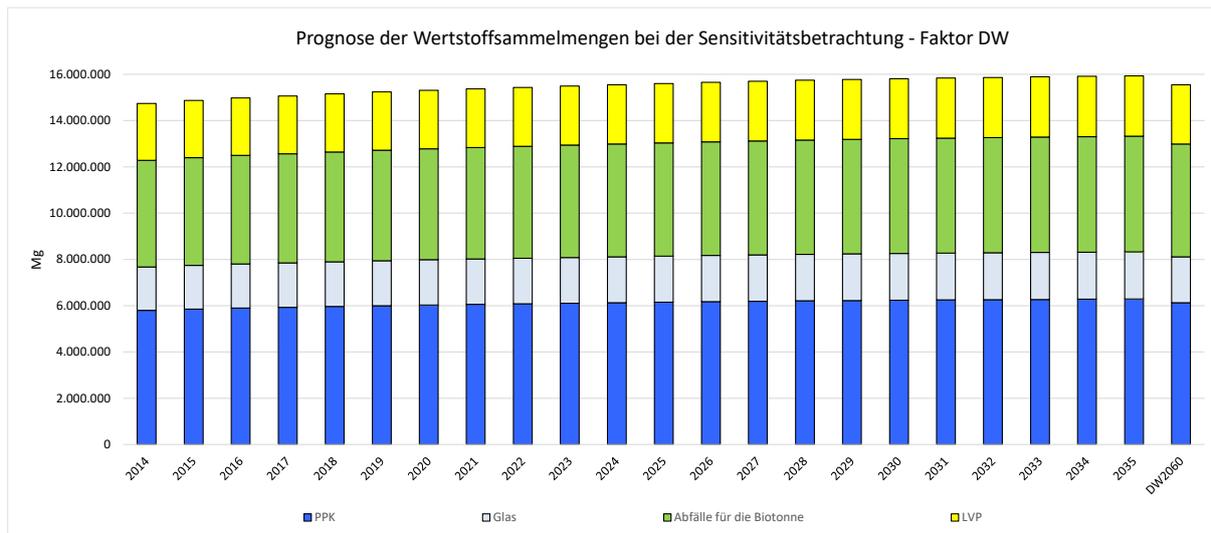


Abbildung 5.29: Prognose der Wertstoffsammelmengen bei der Sensitivitätsbetrachtung - Faktor DW

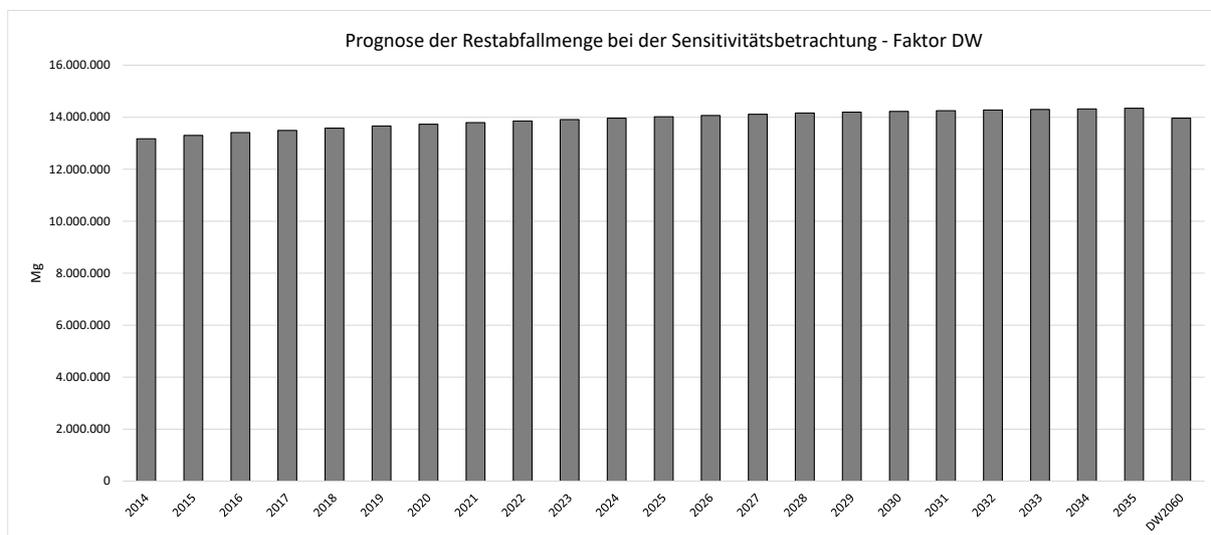


Abbildung 5.30: Prognose der Restabfallmenge bei der Sensitivitätsbetrachtung - Faktor DW

Auf die Zusammensetzung der Abfallströme hat das Steuerungsmodul *demografischer Wandel* zunächst keinen Einfluss. Zwar konnten Informationen darüber gefunden werden, wie sich verschiedene Bevölkerungsmerkmale auf das Restabfallaufkommen auswirken, jedoch gibt es keine hinreichenden Untersuchungen dazu, wie die personenspezifischen Abfallverhaltensmuster die individuellen Mengen der Stoffgruppen verändern.

5.3.3.4 Bewertung der Sensitivitätsbetrachtung

Die Sensitivitätsbetrachtung zeigt, dass jeder der untersuchten Faktoren in unterschiedlicher Weise und mit unterschiedlichem Ausmaß zur Entwicklung des abfallwirtschaftlichen Systems beiträgt.

So übt der demografische Wandel einen großen Einfluss auf die Mengenentwicklung aus. Ging die Fachwelt in den vergangenen Jahren noch davon aus, dass der demografische Wandel zu einer deutlichen Reduzierung der Abfallströme führt, so deuten die in der vorliegenden Arbeit aufgestellten Prognosen auf eine Zunahme der Gesamtabfallmenge hin, und dass, obwohl die Einwohnerzahl Destatis-Prognosen zufolge ab 2019 sinken soll.

Die (neuen) Erfassungssysteme bewirken wiederum eine Verschiebung der Mengenanteile zwischen den Abfallströmen. Durch die Stoffgruppenverschiebung nimmt die Menge der getrennt erfassten Bioabfälle mit +19 % deutlich stärker zu als die der Wertstoffe aus LVP/StNVP mit +9,2 %. Die ursprünglichen Erwartungen an die erweiterte Wertstofffassung mittels Wertstofftonne, deutlich mehr Wertstoffe¹⁷ separat zu erfassen, werden nicht erfüllt. Es wird davon ausgegangen, dass das Wertstoffgesetz, welches anstelle des Verpackungsgesetzes in Kraft treten wird, den Ausbau der Wertstofftonne nicht in dem Maße vorantreibt wie ursprünglich angedacht. Als wesentlicher Einflussfaktor ist folglich die Biotonne herauszustellen. Durch ihren flächendeckenden Ausbau kann eine große Menge organischen Materials separat erfasst werden.

Als gemeinsames Vergleichskriterium wurde der Einfluss des jeweiligen Faktors auf die Restabfallmenge herangezogen (Abbildung 5.31). Dabei verändert sich die Restabfallmenge durch die Biotonne um -10,3 % bis 2035 und durch die Einführung der Wertstofftonne um -1,7 %. Beim demografischen Wandel steigt die Restabfallmenge bis 2035 um 8,9 %. Die stärkste Mengenveränderung erwirkt folglich der flächendeckende Ausbau der Biotonne. Eine Zunahme der Mengen ist nur durch den demografischen Wandel zu erwarten. Bei den Extremwerten (BT100, WST100) fallen die Auswirkungen noch einmal stärker aus. Die Biotonne bewirkt einen Rückgang der Restabfallmenge um -19,3 %, die Wertstofftonne -3,9 %. Beim demografischen Wandel fällt die Veränderung im Extremfall (DW2060) mit +6,0 % weniger stark aus, was auf den einen deutlichen Rückgang der Einwohnerzahl bis 2060 zurückzuführen ist.

Es kann geschlussfolgert werden, dass von der Einführung der Biotonne die größte Dynamik bei der Entwicklung der Abfallstrommengen zu erwarten ist. Das bestätigt auch die Prognose bis 2035 (vgl. 5.3.2), in welcher durch die Einführung der Biotonne UND dem fortschreitenden demografischen Wandel ein Anstieg der Abfälle für die Biotonne um 40,4 % bis 2035 zu erwarten ist.

Die Bewertung der Anlagenkapazität kann hier, wie bei den Abfallströmen auch, ausschließlich hypothetisch erfolgen, da für zukünftige Betrachtungen letztendlich immer das Zusammenspiel mehrerer Faktoren entscheidend ist. Manche Effekte heben sich unter Umständen auf oder ihre Wirkung wird bei parallelem Einsatz verstärkt. So steigt der Heizwert der Restabfallmischung durch den Entzug von Organik, fällt andererseits jedoch wieder durch den parallelen Entzug heizwertreichen Materials. Die durch den Biotonnenausbau ausgelöste Dynamik innerhalb der Abfallströme wird durch den Einfluss des demografischen Wandels weiter verstärkt, da mehr Mengen für den Stoffgruppentransfer zur Verfügung stehen.

Die folgende Bewertung wird jeweils für die abfallstromspezifische Behandlungsanlage und für die restabfallbehandelnden Anlagen (anhand von Menge und/oder Heizwert) durchgeführt.

Bei ausschließlicher Anwendung des Faktors *demografischer Wandel* können die Mengen der Abfallströme Abfälle für die Biotonne und Wertstoffe aus LVP/StNVP mit den bis 2035

¹⁷ Bei einer erwarteten Mehrmenge von 7 kg/EW*a und einer Einwohnerzahl von rund einer Million, hätte sich gesamte Mehrmenge auf 560.000 Mg belaufen was einen Mengenzuwachs von 22,8 % bedeuten würde.

prognostizierten Kapazitäten der jeweilig adressierten Anlagen behandelt werden. Da dem Anstieg der Restabfallmenge keine weitere Entfrachtung durch die Wertstoffsammelsysteme entgegenwirkt, tritt für die MVA im Jahr 2035 eine thermische Unterkapazität in Höhe von 4 % und bei der MBA eine massenbezogene Unterkapazität von 5 % auf. Durch den signifikanten Einwohnerrückgang sinken langfristig auch die Restabfallmengen (DW2060). Aufgrund der Stilllegung von Anlagen im Prognosezeitraum bis 2060 treten dennoch Unterkapazitäten von rund 4 % bei MVA und bis zu 38 % bei den MBA auf, was auf die massive Reduktion der MBA-Behandlungskapazitäten zurückzuführen ist.

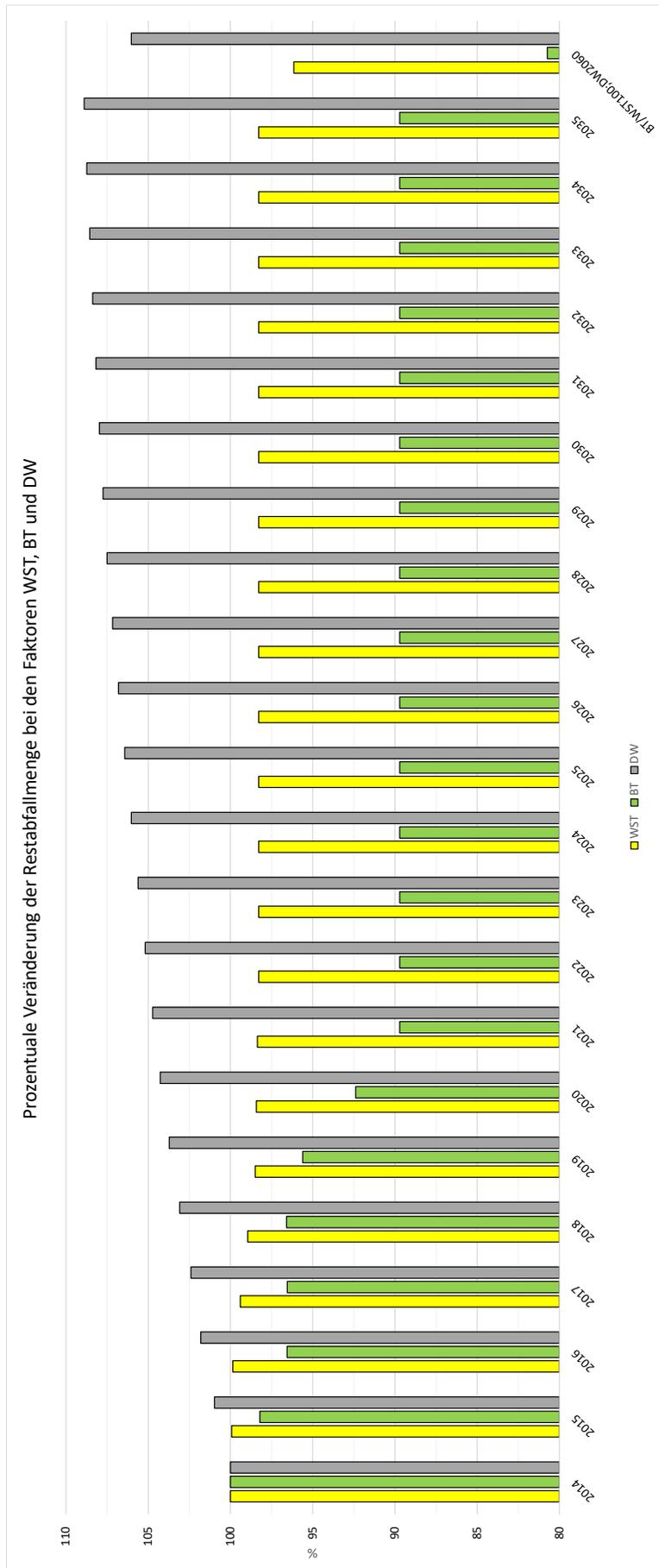


Abbildung 5.31: Prozentuale Veränderung von Restabfall bei den Faktoren WST, BT und DW

Bei ausschließlicher Anwendung des Faktors *Biotonne* kann die Menge der Abfälle für die Biotonne mit der bis 2035 prognostizierten Kapazität der biologischen Anlagen behandelt werden. Dies gilt auch bei einem theoretischen Anschluss von 100 %. Im Verlauf der Prognose bis 2035 wird für Restabfall eine maximale Veränderung von -10 % auf Mengenseite und +2,2 % auf Heizwertseite erreicht. Trotz des Heizwertanstiegs ginge die thermische Auslastung der MVAs um bis zu 6,08 % zurück, da mit abnehmender Menge auch die eingetragene Energiemenge zurückgeht. Der Rückgang des MBA-Mengeninputs läge bei 8,8 %. Die Auswirkungen auf den Restabfall wären bei einem 100%igen Anschluss mengenmäßig mit -19 % und heizwertmäßig mit +10 % zu beziffern. Damit ginge die thermische Auslastung der MVA um 12 % zurück und der MBA-Mengeninput ginge um 16,7 % zurück. Der Ausbau der Biotonne wäre für die Bewirtschaftung und Planung von thermischen und mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen demnach nicht unbedeutend.

Bei ausschließlicher Anwendung des Faktors *Wertstofftonne* kann die Menge der LVP/StNVP in der bis 2035 prognostizierten Kapazität der Sortieranlagen behandelt werden. Dies gilt auch bei einem theoretischen Anschluss von 100 %. Die Auswirkungen auf den Restabfall machen bei einem 100%igen Anschluss sowohl mengenmäßig als auch heizwertbezogen weniger als -4 % aus. Im Verlauf der Prognose bis 2035 fallen die mengenseitigen Veränderungen mit -1,8 % und die heizwertseitigen Veränderung mit -2,5 % nochmal geringer aus. Die thermische Auslastung der MVA ginge damit um bis zu 1 % zurück, im theoretischen Fall eines Vollanschlusses der Wertstofftonne um maximal 2,2 %. Von einem signifikanten Einfluss auf die MVA ist in dieser Prognose folglich nicht auszugehen. Der Rückgang des MBA-Inputs mit rund 2 % ist ebenfalls sehr gering und dahingehend bedeutungslos, als dass die mechanischen Stufen ihre Kapazitäten ohnehin nicht ausschöpfen.

Wie eingangs erwähnt, ist für eine ganzheitliche Betrachtung immer das Zusammenspiel mehrerer Faktoren entscheidend. Käme es neben der aktuell prognostizierten demografischen Entwicklung zu keiner weiteren Entfrachtung des Restabfalls durch den Ausbau der Biotonne und der Wertstofftonne, wäre die Entsorgungssicherheit auf lange Sicht nicht gewährleistet. Nur durch den Stoffgruppentransfer in die Wertstoffströme kann die Entsorgungssicherheit für Restabfall gewährleistet werden. In den entsprechenden Wertstoffbehandlungsanlagen stehen langfristig ausreichende Behandlungskapazitäten zur Verfügung.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit dem entwickelten Modell können die Menge und Zusammensetzung zukünftiger Abfallströme sowie die Auslastung der behandelnden Anlagen, unter Berücksichtigung der Steuerungsgrößen demografischer Wandel und erweiterte Wertstoffeffassung, prognostiziert werden. Stoffstrommodelle haben sich bei der Modellierung als geeignetes Mittel erwiesen.

Für die Modellbildung wurde ein realweltlicher Ausschnitt in ein Modell abstrahiert. Dafür war die Reduktion der Komplexität eines Realitätsausschnittes erforderlich. Mittels eines Top-Down-Ansatzes ist es gelungen, das Modellkonstrukt auf ein handhabbares Minimum zu reduzieren indem irrelevante Sachverhalte eliminiert und relevante Sachverhalte in das Modell integriert wurden. So wurde bei den Abfallströmen, deren Mengen nicht auf Basis des demografischen Steuerungsmoduls berechnet wurden (z. B. getrennt gesammelte, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle) auf die Betrachtung auf Stoffgruppenebene verzichtet. Die Umsetzung der Erfassungssysteme wurde anhand der Anschluss- und Erfassungsquoten sowie des Störstoffanteils realisiert. Die gewählten Quoten für die Prognosen stützen sich primär auf Expertenmeinungen und eigene Annahmen. Eine Verknüpfung der Steuerungsmodule demografischer Wandel und Wertstoffeffassung untereinander ist aufgrund der komplexen Wechselbeziehungen nicht erfolgt, auch wenn die angenommenen Anschluss- und Erfassungsquoten sowie die Störstoffanteile beispielsweise stark von der Siedlungsdichte abhängen. Die Quoten der Erfassungssysteme ändern sich folglich nicht durch die Veränderung der demografischen Randbedingungen, sondern ausschließlich durch die manuelle Anpassung ihrer Variablenwerte in der Eingabemaske. Nichts desto trotz wurden demografische Einflüsse bei der Herleitung der Wertstoffeffassungsvariablen berücksichtigt. Die für die Kapazitäten der Behandlungsanlagen relevanten Parameter und deren Transferfaktoren zum Stoffübergang wurden auf ein notwendiges Minimum beschränkt. Obwohl die Auswahl als ausreichend erachtet wurde, ist die Abstrahierung auf relevante Inhalte, insbesondere bei der Wahl von Transferfaktoren, mit der Unsicherheit, das reale Abbild nicht verhaltenstreu widerzugeben. Diese Unsicherheit konnte jedoch durch die Verifikation des Modells anhand von Status quo-Daten minimiert und so die Verhaltenstreu gegenüber dem ausgewählten Realitätsausschnitt belegt werden.

Darüber hinaus erfüllt das Modell die Anforderungen, den Detailierungsgrad auf Stoffgruppenebene abzubilden und durch Parameter flexibel zu sein, woraus sich die folgenden Vorteile ergeben:

Durch die Modellierung auf Stoffgruppenebene kann der Einfluss personenspezifischer Abfallverhaltensmuster auf das Aufkommen einzelner Stoffgruppen und der Einfluss der Erfassungssysteme auf die Zusammensetzung von Abfallströmen nachvollzogen werden. Weiter lässt sich über fraktionsspezifische Kennzahlen auf die Eigenschaften der Abfallströme und damit neben der quantitativen auch auf die qualitative Auslastung der behandelnden Anlagen schließen. Aus praktischer Sicht kann diese Betrachtungsebene zum einen dabei helfen, das Abfallverhalten der Bevölkerung besser zu verstehen, so dass Erfassungssysteme optimal darauf abgestimmt und Bedarfe für Abfallvermeidungsmaßnahmen formuliert werden können. Zum anderen kann der Stoffgruppenansatz für die Bewertung des Erfassungserfolges

einzelner Wertstoffsysteme und die Eignungs- und Bedarfsprüfung eines (neuen) Systems durch eine Vorabprognose genutzt werden. Durch die Sankeydarstellung lassen sich die Stoffgruppen visuell und übersichtlich darstellen.

Die Eingabe demografischer Randbedingungen kann für Städte, städtisch/ländlich geprägte Landkreise oder Bundesländer und Länder auf nationaler und internationaler Ebene erfolgen. So kann unter anderem der Einfluss der Urbanisierung oder der Landflucht auf das abfallwirtschaftliche System kenntlich gemacht werden.

Die für den gewählten Bilanzraum eingeführten oder einzuführenden Erfassungssysteme lassen sich über die Eingabe von Anschluss- und Erfassungsquoten steuern und bestimmen über die Zusammensetzung der Abfallströme im Bilanzraum. Durch die Variation der Eingabewerte kann in verschiedenen Was-wäre-wenn-Szenarien die Sinnhaftigkeit und Effizienz eines bestehenden oder eines neuen Systems bewertet und mögliche Optimierungspotentiale aufgezeigt werden.

Die im gewählten Bilanzraum zur Verfügung stehenden Anlagenkapazitäten sowie deren Leistungsfähigkeit können durch die Eingabe kapazitätslimitierender Variablenwerte und Transferfaktoren angepasst werden. Durch die Eingabe einer Kapazität von null, lassen sich Anlagen von der Betrachtung ausschließen. Sofern eine Untersuchung auf Abfallstromebene enden soll, können auch die Kapazitäten aller Anlagen auf null gesetzt werden. Andernfalls werden die Anlagen über die Distribution beschickt. Der praktische Anwender erhält die Möglichkeit, die Auslastung der Anlagen langfristig planen und damit die Wirtschaftlichkeit und die Entsorgungssicherheit gewährleisten zu können. In verschiedenen Was-wäre-wenn-Szenarien kann über den Bedarf neuer oder die Stilllegung alter Anlagen entschieden werden.

Die Variation aller Eingabewerte erlaubt letztendlich die Beantwortung unterschiedlichster Fragestellungen. Begonnen bei einer dicht besiedelten Stadt ohne Wertstoff- und Biotonne, über den städtisch geprägten Landkreis mit Biotonne aber ohne Wertstofftonne bis hin zu einem Land in dem alle Erfassungssysteme zum Einsatz kommen (wie im Beispielbilanzraum Deutschland geschehen). Sofern ein Anlagenpark angeschlossen wird, kann die Konstellation ebenfalls frei definiert werden.

Schlussfolgernd lässt sich feststellen, dass das Modell aus wissenschaftlicher Sicht alle vorab aufgestellten Anforderungen erfüllt. Aus praktischer Sicht erweist es sich als wichtiges Planungsinstrument für die zukünftige Abfallwirtschaft. Es kann einen möglichen Handlungsbedarf für die Initiierung von Abfallvermeidungsstrategien, für die Ausgestaltung von Erfassungssystemen, für das Management von Stoffströmen und für die Planung zukünftiger Behandlungskapazitäten aufzeigen. Damit bietet es einen langfristigen Nutzen und einen großen Mehrwert für die Abfallwirtschaft.

Die mit dem Modell aufgestellten Prognosen liefern trotz der umfangreichen Datenrecherche und -aufbereitung nur einen Anhaltspunkt über mögliche Entwicklungen im abfallwirtschaftlichen System. Aufgrund der teils unsicheren Datenlage sind die Resultate als Richtwerte zu verstehen. Während sich die Dissertation primär mit der Entwicklung des Modells befasste, müssen die Modellvariablen durch weitere, im Idealfall experimentelle, Erhebungen ermittelt werden, um die Aussagekraft der Prognosen zu stärken. In

weitergehenden Schritten sind zunächst die getroffenen Annahmen zum demografischen Wandel zu verifizieren, indem der Einfluss der berücksichtigten, personenspezifischen Merkmale auf das Abfallverhalten näher untersucht wird. Dabei sollte die Untersuchung auf weitere personenspezifische Abfallverhaltensmuster, wie zum Beispiel der Einfluss des Alters auf das Abfall- bzw. das individuelle Stoffgruppenaufkommen, ausgeweitet werden. Ferner ist die Multikollinearität zwischen den betrachteten Variablen auszuschließen. Anhang C zeigt Ansätze zur zukünftigen Datenerhebung in Form einer Erhebungsmatrix. Nach Auffassung der Autorin sind diese Untersuchungen so umfangreich, dass sie einer eigenständigen Arbeit bedürfen.

Das Modell selbst kann für zukünftige Anwendungen erweitert werden. Das gilt für weitere Steuerungsmodule ebenso wie für zusätzliche Abfallströme oder Anlagenparameter. Ein möglicher Aspekt, die Abfallvermeidung, ließe sich an gleich mehreren Stellen im Modell integrieren. Sei es durch eine effizientere Produktgestaltung (z. B. die Reduzierung der Wandstärken bei Verpackungsmaterial) oder durch gezielte Abfallvermeidungsstrategien beim Verbraucher. Darüber hinaus können veränderliche Konsummuster (z. B. von Glas zu Plastik) zur Veränderung der Stoffgruppenaufkommen beitragen.

Der vorgestellte Ansatz beschränkt sich fast ausschließlich auf die Betrachtung von Massen- und Energieströmen, ohne die Berücksichtigung von Elementen. Ausnahme bilden die Stoffe Chlor und Schwefel. Die Ergänzung um weitere Elemente (z. B. Kohlenstoff) ist möglich, sofern die Algorithmen dahingehend angepasst werden. UMBERTO® lässt es nicht zu, den bisherigen Materialien einen spezifischen Gehalt eines Elements zu hinterlegen, welches den Prozess analog zu den Algorithmen des Trägermaterials mit durchläuft. Das Element ist separat anzulegen und die Prozessspezifikation um die entsprechenden Algorithmen zu ergänzen. Im Ergebnis ließe sich beispielweise der Verlauf gebundenen Kohlenstoffs nachvollziehen.

7 Quellenverzeichnis

7.1 Literatur

[Aleßio, 2012]

Aleßio, H.-P.: Feuerungsleistungsdiagramm – Möglichkeiten und Grenzen bei der Abfallverbrennung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Band 9, S. 193-212. TK Verlag: Neuruppin 2012

[Alwast, 2011]

Alwast, H.: Auswirkung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes auf Stoffströme und Behandlungskapazitäten in Deutschland. Vortrag auf dem 23. Kasseler Abfall- und Bioenergieforum. Kassel 2011

[Alwast, 2014]

Alwast, H.: Abfallwirtschaft im Gleichgewicht? Entwicklung von Restabfallmengen und die künftig notwendigen Behandlungskapazitäten in Deutschland. Vortrag auf der IFAT –Forum Halle B1. München 2014

[Alwast, 2015]

Alwast, H.: 10 Jahre nach TAsi – Neue Ausschreibungsrunde 2015 – Mengen, Potentiale, Märkte und Preise - Vortrag auf dem 27. Kasseler Abfall- und Bioenergieforum - Bio- und Sekundärrohstoffverwertung. Kassel 2015

[Alwast/Riemann, 2010]

Alwast, H., Riemann, A.: Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen. Umweltbundesamt (Hrsg.) UBA-Texte 50/2010. Berlin/Herne 2010

[Amlinger et al., 2005]

Amlinger, S., Peyr, S., Hildebrandt, U., Müsken, J., Cuhls, C., Clemens, J.: Stand der Technik der Kompostierung. Richtlinie des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.). Wien 2005

[Baccini/Brunner, 1991]

Baccini, P., Brunner, P. H.: Metabolism of the Anthroposphere. Springer-Verlag: New York 1991

[Backhaus et al., 2016]

Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W., Weiber, R.: Multivariate Analysemethoden – Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer-Verlag: Berlin 2016. 14.Auflage

[von Bechtolsheim/Charlier/Wagner, 2011]

von Bechtolsheim, C., Chalier, I.-K., Wagner, J.: RE KrWG – Neuorganisation der Bioabfallentsorgung erforderlich? – Teil 2: Prüfungsprogramm des öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgers für die Organisationsentscheidung über eine getrennte Bioabfallsammlung. In: Müll und Abfall (04/2011), S. 180-184

[von Bechtolsheim, 2010]

von Bechtolsheim, C.: Aktueller Stand: Umsetzung der EU -Abfallrahmenrichtlinie, insbesondere: Novelle des Kreislaufwirtschaftsgesetzes. In: Obladen, H.-P. /Meetz, M. (Hrsg.): Betriebswirtschaftliche Strategien für die Abfallwirtschaft und Stadtreinigung, S.7-14. Berlin 2010

[BGS, 2016]

Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe e.V.: Ersatzbrennstoffe. Münster 2016. URL: www.bgs-ev.de [Zugriff 13.11.2016]

[Bilitewski/Härdtle/Marek, 2000]

Bilitewski, B., Härdtle, G., Marek, K.: Abfallwirtschaft – Handbuch für Praxis und Lehre. Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg 2000. 3.Auflage

[Bilitewski/Härdtle, 2013]

Bilitewski, B., Härdtle, G.: Abfallwirtschaft – Handbuch für Praxis und Lehre. Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg 2013. 4.Auflage

[BMU, 2011]

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Abfall nutzen, Ressourcen schonen. Broschüre. Bonn 2011

[Born, 2002]

Born, M.: Korrosions- und Verschlackungspotenziale bei der Verbrennung und Mitverbrennung von Abfällen (Thermodynamische Bewertung). In: Grundmann, J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe – Aufbereitung, Mitverbrennung und Monoverbrennung von festen Siedlungsabfällen, S. 117-131. Springer-VDI-Verlag GmbH: Düsseldorf 2002

[Bothe, 2015]

Bothe, D.: Mengenstromnachweise der Dualen Systeme - Analysen und Ergebnisse. In: Müll und Abfall (12/2015), S. 664-678

[Brunner et al., 2003]

Brunner, P.H., Daxbeck, H., Berchthold, G., Brandt, B., Eder, M., Fehring, R., Hochreiter, W., Huger, P., Janisch, J., Kreisel, M., Maunz, A., Pomberger, R., Schneckenleithner, B., Schulze-Bauer, D., Siegl, H., Smutny, R., Spet, G., Staber, W.: ÖWAV Regelblatt 514 - Die Anwendung der Stoffflussanalyse in der Abfallwirtschaft, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband. ÖWAV-Regelblatt 514. Wien 2003

[Brunner/Rechberger, 2004]

Brunner, P. H., Rechberger, H.: Practical Handbook of Material Flow Analysis. Lewis Publishers: Boca Raton/London/New York/Washington D. C. 2004

[BSB, 2017]

Behörde für Schule und Berufsbildung der freien Hansestadt Hamburg: FAQs zum Hamburger Sozialindex. Hamburg 2017. URL: <http://www.hamburg.de/bsb/hamburger-sozialindex/4025318/artikel-faq-sozialindex/> [Zugriff 6.02.2018]

[Bünemann et al., 2011]

Bünemann, A., Rachut, G., Christiani, J., Langen, M., Wolters, J.: Planspiel zur Fortentwicklung der Verpackungsverordnung Teilvorhaben 1: Bestimmung der Idealzusammensetzung der Wertstofftonne. Umweltbundesamt (Hrsg.) UBA-Texte 08/2011. Dessau-Roßlau 2011

[Bünemann/Löhle, 2015]

Bünemann, A., Löhle, S.: Erfahrungen mit der Wertstofftonne – Überblick und Bilanz, In: Tagungsbeitrag zum 25. Kasseler Abfall- und Bioenergieforum, S.263-273. Kassel 2015

[Bvse, 2016]

Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V.: Altpapier – Stationen eines Rohstoffes. Bonn 2016. URL: <https://www.bvse.de/papier-recycling-2/altpapier-stationen-eines-rohstoffes.html> [Zugriff 13.12.2016]

[Dehoust, 2012]

Dehoust, G.: Verwertungsquoten für die Wertstofffassung – Methodik und Statusanalyse. Präsentation zum Fachgespräch. Dessau 2012

[Dehoust/Christiani, 2012]

Dehoust, G., Christiani, J.: Analyse und Fortentwicklung der Verwertungsquoten für Wertstoffe - Sammel- und Verwertungsquoten für Verpackungen und stoffgleiche Nichtverpackungen als Lenkungsinstrument zur Ressourcenschonung. Umweltbundesamt (Hrsg.) UBA-Texte 40/2012. Dessau-Roßlau 2012

[Dehne et al., 2014]

Dehne, I., Oetjen-Dehne, R., Siegmund, N., Dehoust, G., Möck, A.: Stoffstromorientierte Lösungsansätze für eine hochwertige Verwertung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen. Umweltbundesamt (Hrsg.) UBA-Texte 15/2018. Dessau-Roßlau 2014

[Deike/Warnecke/Vogell, 2012].

Deike, R., Warnecke, R., Vogell, M.: Recyclingpotenziale bei Rückständen aus der Müllverbrennung. Abschlussbericht. Duisburg/Essen/Schweinfurt/Würzburg 2012

[Destatis, 2009]

Statistisches Bundesamt: Bevölkerungsentwicklung in Deutschland bis 2060 - 12. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Begleitmaterial zur Pressekonferenz. Wiesbaden 2009

[Destatis, 2015]

Statistisches Bundesamt: Bevölkerungsentwicklung in Deutschland bis 2060 - 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Wiesbaden 2015

[Destatis, 2015a]

Statistisches Bundesamt: Abfallentsorgung – Fachserie 19 Reihe 1. Wiesbaden 2015

[Destatis, 2016]

Statistisches Bundesamt: Abfallbilanz 2014. Wiesbaden 2016

[Destatis, 2017]

Statistisches Bundesamt: Entwicklung der Privathaushalte bis 2035 - Ergebnisse der Haushaltsvorausberechnung. Wiesbaden 2017

[Destatis, 2017a]

Statistisches Bundesamt. Aufkommen der Abfallströme Hausmüll, Abfälle für die Biotonne, und getrennt erfasste Wertstoffe in den Jahren 2004-2014. Abgerufen auf GENESIS-online. URL: https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data.jsessionid=6E99E21A4B3B3CFCDEDEC5CB36C34C8.tomcat_GO_1_1?operation=abrufabelleAbrufen&selectionname=32121-0001&levelindex=1&levelid=1467281234804&index=2 [diverse Zugriffe 2017]

[Destatis, 2017b]

Statistisches Bundesamt: Verfügbares Einkommen privater Haushalte je Einwohner in Deutschland bis 2015. Wiesbaden 2017

[Destatis, 2018]

Statistisches Bundesamt: Daten aus dem Gemeindeverzeichnis Kreisfreie Städte und Landkreise nach Fläche und Bevölkerung 2005-2015. Wiesbaden 2018

[Doedens/Gallenkemper/Ketelsen, 2006]

Doedens, H.; Gallenkemper, B.; Ketelsen, K.: Einhaltung der Ablagerungskriterien durch MBA-Anlagen – Ergebnisse der ASA-Umfrage, In: Wiemer, K., Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung – stofflich, energetisch, S. 575-584. Witzhausen 2006

[Döppenschmidt, 1993]

Döppenschmidt, A.: Abfall und seine Bewältigung in privaten Haushalten. Dissertation an der Bayrischen Julius-Maximilians-Universität, Diplomica Verlag GmbH: Würzburg 1993

[Dörffel, 2006]

Dörffel, C.: Restabfallmengen aus privaten Haushalten in Sachsen – Entwicklung eines abfallwirtschaftlichen Simulations- und Prognosemodells. Dissertation an der Technischen Universität Dresden, Schriftenreihe des Institutes für Abfallwirtschaft und Altlasten - Band 44. Dresden 2006

[DTU]

Technical University of Denmark/ Department of Environmental Engineering: EASETECH, <http://www.easetech.dk/>

[ecoprog, 2012]

Ecoprog GmbH: Marktstudie Biotonne Deutschland. Studie. Köln 2012

[Engelhardt, 2014]

Engelhardt, A. Korrelation und Kausalität. Stand 2014. URL: <http://www.crashkurs-statistik.de/korrelation-und-kausalitaet/> [Zugriff: 6.02.2018]

[EUWID, 2016]

Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH: Verbrenner importierten 2015 über 1,7 Mio t EBS. Stand 2016. URL: <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/einzelansicht/Artikel/deutsche-verbrenner-importierten-2015-ueber-17-mio-t-ebs-und-gemischten-siedlungsabfall-1.html> [Zugriff 15.09.2017]

[Faulstich et al., 2016]

Faulstich, M., Vodegel, S., Fedianina, E., Franke, M., Reh, K., Degener, P., Hense, P.: Stoffströme für Müllverbrennungsanlagen in 2025. In: Müll und Abfall (05/2016), S. 220-226

[Fehrenbach/Giegrich/Mahmood, 2007]

Fehrenbach, H., Giegrich, J., Mahmood, S.: Beispielhafte Darstellung einer vollständigen, hochwertigen Verwertung in einer MVA unter besonderer Berücksichtigung der Klimarelevanz. Umweltbundesamt (Hrsg.) UBA-Texte 16/08. Dessau-Roßlau 2007

[Fehrenbach/Giegrich/Schmidt, 2007]

Fehrenbach, H., Giegrich, J., Schmidt, R.: Ökobilanz thermischer Entsorgungssysteme für brennbare Abfälle in Nordrhein-Westfalen. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.). Düsseldorf 2007

[Fehrenbach/Giegrich/Möhler, 2007]

Fehrenbach, H., Giegrich, J., Möhler, S.: Behandlungsalternativen für klimarelevante Stoffströme. Umweltbundesamt (Hrsg.) UBA-Texte 39/2007. Dessau-Roßlau 2007

[Flamme, 2018]

Flamme, S. Persönliche Auskunft.

[Frein et al., 2006]

Frein, T., Möller, G., Petermann, A., Wilpricht, M.: Bedarfsgerechte Stellenzuweisung – das neue Instrument Sozialindex. Ministerium für Schule und Weiterbildung, NRW. In: Schulverwaltung NRW (6/2006)

[Fremgen, 2006]

Fremgen, B.: Verwendung aufbereiteter MVA-Schlacke als güteüberwachter Deponiebaustoff - Praxisbeispiele -. Vortrag auf der ICP-Tagung. Karlsruhe 2006

[Fricke/Bahr, 2010]

Fricke, K., Bahr, T.: Stoffliche oder energetische Verwertung – die Wahl der Verwertungsart als Schlüssel zur Energieeffizienz. Vortrag auf dem 12. Infoseminar Erfahrungsaustausch Kommunale Abfallwirtschaft der GGSC. Berlin 2010

[GENESIS-online]

GENESIS-online Datenbank. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden. URL:
<https://www-genesis.destatis.de>

[GfK in ProAgeMedia, 2008]

GfK SE zitiert in ProAgeMedia GmbH: Für 2050 prognostizierte Altersverteilung für Deutschland. Nürnberg/Bad Kreuznach 2008. URL:
http://www.proagemedia.de/assets/media/pdf/pam/Informationen_ProAgeMedia.pdf
[Zugriff 10.06.2016]

[GfK, 2016]

GfK SE: Kaufkraft in Deutschland steigt 2017 um 1,7%. Stand 2016. URL:
<http://www.gfk.com/de/insights/press-release/kaufkraft-deutschland-2017/> [Zugriff 10.02.2017]

[Grundmann/Balhar, 2009]

Grundmann, T., Balhar, M.: Stand und Perspektiven der Mechanisch-Biologischen Abfallbehandlung (MBA) in Deutschland. In: Müll und Abfall (04/2009), S.204-209

[HSAV, 2006]

Hanseatisches Schlackenkontor ARGE Vertrieb: Merkblatt für den Einbau von envau-schlacke. Hamburg 2006

[Harant/Kröger, 2005]

Harant, M., Kröger, W.: Sortierung von Abfällen aus Haushalten, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.). Augsburg 2005

[Häberle/Bidlingmaier, 1994]

Häberle, H., Bidlingsmaier, W. (Hrsg.): TA-Siedlungsabfall Erfolgreiche Abfallwirtschaftskonzepte, Restmüllbehandlung, Absatzstrategien. Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg 1994. 1.Auflage

[Hauser, 2007]

Hauser, H.: Logistik der Abfallwirtschaft – Veränderungen durch den demografischen Wandel?, Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik. Vortrag auf dem Workshop des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau 2007

[Heibeck et al., 2012]

Heibeck, L., Wilcken, H.-D., Kornau, J., Albers, H.: Bewertung der Leistungsfähigkeit einer Sortieranlage für Leichtverpackungen nach Einführung einer Wertstofftonne. In: Müll und Abfall (12/2012), S. 664-671

[Heilmann, 2000]

Heilmann, A.: Stoffstrommanagement für Abfälle aus Haushalten. Dissertation an der Technischen Universität Dresden, Schriftenreihe des Institutes für Abfallwirtschaft und Altlasten - Band 13. Dresden 2000

[Hoffmann et al., 2010]

Hoffmann, G., Wunsch, C., Brunn, L., Schnapke, A., Schignitz, D., Günther, M., Baumann, J., Wagner, J., Bilitweski, B.: Nutzung der Potentiale biogenen Anteils im Abfall zur Energieerzeugung. Umweltbundesamt (Hrsg.) UBA-Texte 33/2011. Dessau-Roßlau 2010

[Hoffmeister, 2007]

Hoffmeister, J.: Einfluss der demografischen und wirtschaftlichen Entwicklung in Deutschland auf das zukünftige Abfallaufkommen. Vortrag auf dem Workshop des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau 2007

[Hoffmeister, 2016]

Hoffmeister, J. Persönliche Auskunft auf der IFAT 2016

[Huber, 1984]

Huber, H.-D.: Spezifische Müllmengen und Müllzusammensetzungen in Haushalten unterschiedlicher Größe bei der getrennten Sammlung von Haushaltsabfällen. Diplomarbeit. Stuttgart 1984

[Huneke et al., 2016]

Huneke, F., Linkenheil, C. P., Lenck T., Heddrich, M.-L., Treder, M.: Beitrag Thermischer Abfallbehandlungsanlagen zur Energiewende. Energy Brainpool. Berlin 2017

[IEKrW, 2017]

Institut für Energie und Kreislaufwirtschaft an der Hochschule Bremen GmbH. Auskünfte über LVP/StNVP-Anteile im LVP-Sammelgemisch. Bremen 2017

[ifu, 2018]

Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH: UMBERTO®. URL:

<https://www.ifu.com/umberto/>

[ITAD, 2016]

Interessensgemeinschaft Thermischer Abfallbehandlungsanlagen Deutschland e.V.: Kapazitäten und Importe – Faktenblatt. Düsseldorf 2016

[ITAD, 2017]

Interessensgemeinschaft Thermischer Abfallbehandlungsanlagen Deutschland e.V.: Annahmerichtwerte Hausmüllverbrennungsanlage; Anlagendaten. URL:

<https://www.itad.de/information/wiefunktionierteinemva/338..html> [Zugriff: 15.09.2017]

[IWR, 2012]

Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement; TU Wien: STAN. <http://www.stan2web.net/>

[Kaimer/Schade, 1998]

Kaimer, M., Schade, D.: Bewerten von thermischen Abfallbehandlungsanlagen - Planung, Genehmigung, Konzept und Betrieb. In: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis - Band 111, Erich Schmidt Verlag: Berlin 1999

[Kaufeld, 2016]

Kaufeld, S., persönliche Auskunft. 2016

[Kehres, 2010]

Kehres, B.: KrWG: Weichenstellung für die Verwertung von Bioabfällen. In: H&K aktuell 10/2010, S. 5-6

[Keller, 2013]

Keller, D.: Von Störchen und Babys: die partielle Korrelation. URL: <http://www.statistik-und-beratung.de/2013/05/von-storchen-und-babys-die-partielle-korrelation/> [Zugriff 7.11.2017]

[Kern/Siepenkothen, 2013]

Kern, M., Siepenkothen, J.: Mehr Recycling durch die Wertstofftonne- Perspektiven der Wertstoffeffassung. Witzenhausen 2013

[Kern/Raussen, 2007]

Kern, M., Raussen, T.: Potentieller Beitrag der Bioabfallverwertung zur Energieversorgung. Witzenhausen 2007. URL:

http://www.witzenhausen-institut.de/downloads/ks_22_kern_raussen.pdf [Zugriff 07.08.2013]

[Kern, 2016]

Kern, M. Persönliche Auskunft im Rahmen des 28. Kassler Abfallforums

[Kost, 2001]

Kost, T.: Brennstofftechnische Charakterisierung von Abfällen, Schriftenreihe des Instituts für Abfallwirtschaft und Altlasten - Band 16. Dresden 2001

[Ketelsen/Nelles, 2015]

Ketelsen, K., Nelles, M.: Stand und neue Entwicklungstendenzen / Perspektiven von MBA in Deutschland. Vortrag auf der Waste-to-Resources. Hannover 2015

[Kranert, 2010]

Kranert, M.: Einführung in die Abfallwirtschaft. Cord-Landwehr (Hrsg.). Vieweg + Teubner Verlag: Wiesbaden 2010. 4.Auflage

[Krause/Oetjen-Dehne/Dehne, 2014]

Krause, P., Oetjen-Dehne, R., Dehne, I.: Verpflichtende Umsetzung der Getrenntsammlung von Bioabfällen. Umweltbundesamt (Hrsg.) UBA-Texte 84/2014. Dessau-Roßlau 2014

[Krause/Oetjen-Dehne, 2015]

Krause, P., Oetjen-Dehne, R.: Flächendeckender Ausbau der Biotonne in Deutschland - Stand und Perspektiven für die Kaskadennutzung. Vortrag auf der Waste-to-Resources. Hannover 2015

[Kurth, 2016]

Kurth, P. Podiumsdiskussion im Rahmen des 28. Kassler Abfallforums.

[LfU, 2005]

Bayrisches Landesamt für Umweltschutz: Sortierung von Abfällen aus Haushalten. Stand 2005.
URL: http://www.abfallratgeber.bayern.de/publikationen/doc/verwertung/sortierung_abfaelle.pdf
[Zugriff 20.01.2014]

[LfU, 2008]

Bayrisches Landesamt für Umwelt: Restmüllzusammensetzung, Einflussfaktoren, Abhängigkeit von lokalen abfallwirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Einbricht zum Vorhaben UmweltSpezial. Augsburg 2008

[LfULG, 2016]

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hrsg.): Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen – Sächsische Sortierrichtlinie 2014. Dresden 2016

[Lösch, 1984]

Lösch, K.: Probleme des Abfallaufkommens und der Abfallbeseitigung dargestellt am Beispiel bundesdeutscher Städte. Dissertation an der Universität Bremen. Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung. Bremen 1984

[Löschau, 2012]

Löschau, M.: Input-Output-Analyse als Methode zur stofflichen Bilanzierung komplexer Entsorgungssysteme. Dissertation an der Technischen Universität Berlin. Berlin 2012

[Meinfelder/Richers, 2008]

Meinfelder, T. Richers, U.: Entsorgung der Schlacke aus der thermischen Restabfallbehandlung. Wissenschaftliche Berichte des Forschungszentrums Karlsruhe. Karlsruhe 2008

[Mielke/Sparmann/Kappa, 2008]

Mielke, F., Sparmann, A., Kappa, S.: Die Zukunft der EBS-Verwertung in Braunkohlekraftwerken aus Sicht der Vattenfall Europe. In: Urban, A., Bilitewski, B., Faulstich, M. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik Universität Kassel - Band 13. Kassel 2008

[Nehlsen, 2015]

Persönliche Auskünfte der Mitarbeiter an der LVP-Sortieranlage. Bremen 2015

[Oetjen-Dehne, 2012]

Oetjen-Dehne, R.: Recherche und Untersuchungen an Abfallbehandlungsanlagen in Sachsen-Anhalt und Abgrenzung der Abfallschlüssel 191209 und 191212. Vortrag auf der IHK-Veranstaltung "Energie und Rohstoffe für morgen". Berlin 2012

[Oerter, 2012]

Oerter, M.: Umsetzung der IED in der Zementindustrie. Fachlicher Teil der Mitgliederversammlung des BGS e.V. Münster 2012 In: Flamme, S., Harms, S. In: Kurth, P., Oexle, A., Faulstich, M. (Hrsg.) Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Springer Vieweg: Wiesbaden 2018

[Oerter, 2017]

Oerter, M.: Hochwertige Verwertung von Abfällen – Der Beitrag der Zementindustrie zu einer modernen Kreislaufwirtschaft. In: Flamme *et al.* (Hrsg.): 15. Münsteraner Abfallwirtschaftstage. Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft - Band 17. Münster 2017

[PRé Sustainability, 2015]

PRé Consultants B.V.: SimaPro. URL: <https://network.simapro.com/esuservices/>

[Prognos, 2017]

Prognos AG: Zusammenhänge von Abfallwirtschaft und Demografie erkennen und nutzen. Produktblatt Demografie und Abfallwirtschaft.

URL: <https://www.prognos.com/themen/infrastruktur-verkehr/abfall-rohstoffe/kompetenzen/>

[Zugriff 26.10.2017]

[Radde, 2006]

Radde, A.: Entwicklung der Abfallwirtschaft in Deutschland. In: Urban, A., Bilitewski, B., Faulstich, M. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik Universität Kassel - Band 11. Kassel 2006

[Rautenstrauch/Schulze, 2002]

Rautenstrauch, C., Schulze, T.: Informatik für Wirtschaftswissenschaftler und Wirtschaftsinformatiker. Springer-Verlag: Berlin 2003

[Reinmann/Hämmerli-Wirth, 1992]

Reimann, D.O., Hämmerli-Wirth, H.: Verbrennungstechniken – Bedarf-Entwicklung-Berechnung-Optimierung. In: Abfallwirtschaftsjournal (8/1992), S. 605-679.

[Rettenberger et al., 2012]

Rettenberger, G., Urban-Kiss, S., Schneider, R., Müsken, J., Kruse, G.: Handbuch Bioabfallbehandlung Erfassung des Anlagenbestands Bioabfallbehandlung. Umweltbundesamt (Hrsg.) UBA-Texte 54/2012. Dessau-Roßlau 2012

[Richers, 2010]

Richers, U.: Abfallverbrennung in Deutschland – Entwicklung und Kapazitäten. KIT Scientific Reports 7560. Karlsruhe 2010

[Richter et al., 2017]

Richter, F., Kern, M., Raussen, T., Wagner, J., Blume, M.: Schlussbericht "Optimierung der Biogasausbeute durch effiziente Erfassung und Vergärung von Nahrungs- und Küchenabfällen in Deutschland (Bio-OPTI)". Witzenhhausen 2017

[Sammet/Wachter, 1976]

Sammet, D., Wachter, J.: Verfahrensmöglichkeiten der Gebührenveranlagung bei der Abfallbeseitigung, In: Der Städtetag 29.1976 In: Döppenschmidt, 1993.

[Scheffold/Oetjen-Dehne, 2014]

Scheffold, K.-H., Oetjen-Dehne, R.: Recycling von Hohlglas – Technik, Qualität und Wirtschaftlichkeit – In: Thome´-Kozmiensky, K. J. (Hrsg): Entsorgung von Verpackungsabfällen, S. 91 – 114. TK Verlag: Neuruppin 2014

[Schirmer, 2007]

Schirmer, M.: Ersatzbrennstoffe und Chlor – ein noch immer ungelöstes Problem. In: Urban, A., Bilitewski, B., Faulstich, M. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik Universität Kassel – Band 12 . Kassel 2007

[Schmidt/Pomberger/Heigl, 2007]

Schmidt, G., Pomberger, R., Heigl, M.: Keine fossilen Energieträger für die Zementindustrie mehr – von der Vision zur Verwirklichung. International Conference "Waste Management, Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development". Ljubljana 2007

[Schug et al., 2007]

Schug, H., Eickenbusch, H. Marscheider-Weidemann, F., Zeck, A.: Zukunftsmarkt Stofferkennung und –trennung. Umweltbundesamt/Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.). Fallstudie. Dessau-Roßlau/Berlin 2007

[Schnurer, 2004]

Schnurer, H. : Entsorgungssicherheit ab 2005 -die Position des Bundes-. In: Fachtagung des Anwaltsbüros Gaßner, Groth, Siederer & Coll.: Abfalldeponien im Jahr 2005. Berlin 2004

[Schroer/Konys, 2002]

Schroer, C., Konys, J.: Rauchgasseitige Hochtemperatur-Korrosion in Müllverbrennungsanlagen – Ergebnisse und Bewertung einer Literaturrecherche. Karlsruhe 2002

[Schu, 2006]

Schu, R.: EBS-Beschaffung, Anlagenauslegung und Qualitätssicherung. VDI Seminar Ersatzbrennstoffe für Industrieanlagen. Berlin 2006

[Schulze/ Schlitte, 2012]

Schule, S., Schlitte, F.: Auswirkungen der Abfallgesetzgebung auf das Abfallaufkommen und die Behandlungskapazitäten bis 2020. Hamburgisches WeltWirtschaftsinstitut (HWWI). Hamburg 2012

[Seidel, 1998]

Seidel, J.: Prognose für die Mengen- und Heizwertentwicklung des kommunalen Restabfalls in Südsachsen. Diplomarbeit TU Chemnitz. Zitiert in Dörffel, 2006.

[Simdynamics, 2016]

Simdynamics. URL: <https://www.simdynamics.org/index.htm>

[Spiegel et al., 2010]

Spiegel, W., Herzog, T., Mager, G., Müller, W., Schmidl, W., Albert, F. W.: Korrosion in Abfallverbrennungsanlagen. Chemnin GmbH: Augsburg 2010

[Spohn, 2015]

Spohn, C.: Sicherstellung der Anlagenauslastung - Bestandsaufnahme und Prognose. Vortrag aus den 14. Münsteraner Abfallwirtschaftstagen. Münster 2015

[Spohn, 2016]

Spohn, C.: Entwicklungen in der Abfallverbrennung in Deutschland. Vortrag auf dem 28. Kasseler Abfallforum. Kassel 2016

[Spohn, 2017]

Spohn, C.: Aktuelle Situation der Betreiber thermischer Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland. Vortrag auf der Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz. Berlin 2017

[Statista 2017]

Statista GmbH: Einwohnerzahl - Anzahl der Einwohner von Deutschland von 1990 bis 2016. Werte ab 2011; Werte für 2004-2010: Schätzwerte inkl. Berücksichtigung des Zensus. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2861/umfrage/entwicklung-der-gesamtbevoelkerung-deutschlands/> [Zugriff 12.02.2017]

[Statista, 2017a]

Statista GmbH: Inflationsrate in Deutschland. Stand 2017. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1046/umfrage/inflationsrate-veraenderung-des-verbraucherpreisindexes-zum-vorjahr/> [Zugriff 12.07.2017]

[Stock, 2017]

Stock, M. Persönliche Auskunft.

[SUBV, 2018]

Senator für Bau, Umwelt und Verkehr: Indikator Abfall und Verwertung (Bremen-Indikator). URL: <https://www.bauumwelt.bremen.de/detail.php?gsid=bremen213.c.10026.de> [Zugriff 8.02.2018]

[Tauw, 2013]

Tauw GmbH: Entwurf der Mantelverordnung Grundwasser, Ersatzbaustoffe und Bodenschutz. URL: <http://www.tauw.de/nachrichten/artikel/article/entwurf-der-mantelverordnung-grundwasser-ersatzbaustoffe-und-bodenschutz/> [Zugriff 31.03.2016]

[Tietz, 2006]

Tietz, H.-P.: Systeme der Ver- und Entsorgung. Teubner-Verlag: Wiesbaden 2006. 1. Auflage

[TheMathWorks, 2018]

The MathWorks Inc.: MatLab. URL: <https://de.mathworks.com/products/matlab.html>

[Thiel, 2012]

Thiel, S.: Ersatzbrennstoff-Kraftwerke in Deutschland und Österreich. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall - Band 10, S.837-852. TK Verlag: Neuruppin 2013

[Thiel/Thomé-Kozmiensky, 2011]

Thiel, S., Thomé-Kozmiensky, K. J.: Mechanisch-biologische Abfallbehandlung – Verfahrenskonzepte, Technik, Probleme –. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Thiel, S. (Hrsg.): Waste Management CD 25, S.1-15. TK-Verlag: Neuruppin 2011

[Thinkstep, 2018]

Thinkstep AG: GaBi. URL:

<http://www.gabi-software.com/deutsch/index/>

[Thurich, 2011]

Thurich, E.: pocket politik. Demokratie in Deutschland. Bundeszentrale für politische Bildung. Bonn 2011. 4. Auflage

[UBA, 2004]

Umweltbundesamt - Cleaner Production Germany: DSD Sortierhandbuch. Dessau-Roßlau 2004

[UBA, 2011]

Umweltbundesamt: Die Wertstofftonne: kürzere Wege für ein hochwertiges Recycling. Presseinformation. URL:

http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/2011/pdf/pd11-012_die_wertstofftonne_kuerzere_wege_fuer_ein_hochwertiges_recycling.pdf [Zugriff 22.05.2013]

[UBA, 2012]

Umweltbundesamt: Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung. URL:

<http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeId=2307> [Zugriff 22.05.2013]

[UBA, 2012a]

Umweltbundesamt: Anlagen zur mechanisch biologischen Abfallbehandlung. URL:

<http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeId=2306> [30.05.2013]

[UBA, 2013]

Umweltbundesamt: Bioabfallsammlung und –behandlung. URL: <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeId=3148> [Zugriff 3.05.2013]

[UZH, 2017]

Universität Zürich: Multiple Regressionsanalyse. Methodenportal. URL:

<http://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse/zusammenhaenge/mreg.html>

[Zugriff 7.11.2017]

[VKU, 2017]

Verein kommunaler Unternehmen e.V.: Die thermische Verwertung – Integraler Bestandteil einer nachhaltigen Abfallwirtschaft. URL: <http://www.vku.de/muellverbrennung.html?p=1> [Zugriff 04.04.2017]

[Vogel, 2015]

Vogel, J.: Prognose von Zeitreihen. Springer-Gabler Verlag: Wiesbaden 2015

[Wallmann et al., 2006]

Wallmann, R., Dorstewitz, H., Hake, J., Fricke, K., Santen, J.: Abluftbehandlung nach 30. BImSchV - erste Betriebserfahrungen und Optimierungsansätze. URL: <http://www.umwelt.niedersachsen.de/themen/abfall/siedlungsabfall/zustaendigkeiten/8032.html> [Zugriff 12.09.2016]

[Worldbank, 2010]

The World Bank Group: Country Classification. In: Kranert, M.: Einführung in die Abfallwirtschaft. Cord-Landwehr (Hrsg.) Vieweg + Teubner Verlag: Wiesbaden 2010. 4. Auflage

[Worldbank, 2012]

The World Bank Group (Ed.). Hoornweg, D., Bhada-Tata, P.: Waste Generation by Country Income Level. What a waste - A Global Review of Solid Waste Management. Washington D.C 2012

[Wosniok, 2017]

Wosniok, W. Persönliche Auskunft.

[Zwisele/Nogueira, 2014]

Zwisele, B., Nogueira, M.: Einfluss des demographischen Wandels auf die Menge und Zusammensetzung von Haushaltsabfällen. Vortrag auf der Hamburg T.R.E.N.D.. Hamburg 2014

7.2 Gesetze / Verordnungen / Richtlinien

[AVV]

Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung – AVV) vom 10. Dezember 2001 (BGBl. I 2010 S. 3379; 2002 S.1488, 2833; 2017 S. 2644, 2646)

[1. BImSchV, 2010]

Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen. Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes vom 26. Januar 2010 (BGBl. I 2010 S. 38; 2017 S. 420)

[17. BImSchV]

Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen. Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes vom 2. Mai 2013 (BGBl. I 2013 S. 1021, 1044, 3754)

[30. BImSchV]

Verordnung über Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfällen. Dreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes vom 20. Februar 2001 (BGBl. I 2001 S. 305, 317; 2017 S. 3465).

[DepV]

Verordnung über Deponien und Langzeitlager - Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I 2009 S. 900; 2017 S. 3465).

[KrWG]

Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen vom 24. Februar 2012 (BGBl. I 2012 S. 212; 2017 S. 2808)

[LAGA M19]

Mitteilung 19 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA). Merkblatt über die Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle. 1994.

ANHÄNGE

Anhang A Modellvariablen im Status quo

A 1: Abfallzusammensetzung und –Eigenschaften

A 1 - 1: Restabfallzusammensetzung	2
A 1 - 2: Zusammensetzung der Abfälle für die Biotonne	2
A 1 - 3: Zusammensetzung des LVP-Sammelgemisches.....	3
A 1 - 4: Zusammensetzung des Glas-Sammelgemisches	3
A 1 - 5: Zusammensetzung der PPK-Sammelgemisches.....	3
A 1 - 6: Stoffgruppenbezogene Abfalleigenschaften	4

A 2: Gleichungen des Regressionsmodells

A 2 - 1: Regressionsgleichungen der demografischen Faktoren für jede Stoffgruppe	6
--	---

A 3: Transferfaktoren der Behandlungsanlagen

A 3 - 1: Transferfaktoren der MBA.....	7
A 3 - 2: Transferfaktoren von MVA und EBS-Kraftwerk.....	8
A 3 - 3: Transferfaktoren der biologischen Behandlungsanlagen	8
A 3 - 4: Transferfaktoren der LVP-Sortieranlage	8

A 4: Transferfaktoren der Distribution

A 4 - 1: Transferfaktoren der Abfallstrom-Distribution	9
A 4 - 2: Transferfaktoren der Schlacke-Distribution.....	9

Anhang B Modellvariablen bis 2035

B 1: Demografische Randbedingungen

B 1 - 1: Modellvariablen des demografischen Wandels 2014-2060	10
---	----

B 2: Parameter der Wertstofffassung

B 2 - 1: Modellvariablen der Wertstofftonne und Biotonne 2014-2060	12
B 2 - 2: Modellvariablen der Anlagenkapazitäten 2014-2060	14

Anhang C Ansätze zur zukünftigen Datenerhebung

C 1 - 1: Matrix personenspezifischer Merkmale	16
---	----

Anhang A Modellvariablen im Status quo

A 1: Abfallzusammensetzung und -eigenschaften

A 1 - 1: Restabfallzusammensetzung

Stoffgruppe	%	Menge [Mg]	Bemerkung
Metalle	2,7	355.606	
PPK	10,5	1.382.913	
Glas	4,9	645.359	
Kunststoffe (LVP)	6,0	787.602	entsprechen 65 % (LVP) und 35 % (StNVP) der Fraktion Kunststoffe (hergeleitet nach [Bünemann <i>et al.</i> , 2011] und [IEKrW, 2017])
Kunststoffe (StNVP)	3,2	424.093	
Organik	30,9	4.069.715	
Holz	1,9	250.241	
Textilien	4,9	645.359	
Mineralstoffe	4,6	605.848	
Verpackungsverbunde	1,5	191.896	entsprechen 31 % der Fraktion Stoffe a.n.g. [vgl. Hoffmann <i>et al.</i> ; 2010]
Verbunde	3,2	427.123	entsprechen 69 % der Fraktion Stoffe a.n.g. [vgl. Hoffmann <i>et al.</i> ; 2010]
Schadstoffe	0,5	65.853	
Windeln	9,5	1.256.475	entsprechen 90 % der Fraktion Stoffe a.n.g. [vgl. Hoffmann <i>et al.</i> ; 2010]
Stoffe a.n.g. (ohne Windeln)	1,1	139.608	entsprechen 10 % der Fraktion Stoffe a.n.g.
Fraktion <10mm	14,7	1.936.078	
GESAMT	100	13.183.771	[GENESIS-online]

*die absolute Restabfallmenge stammt aus GENESIS-online. Die Stoffgruppenanteile ergeben sich aus der prozentualen Zusammensetzung nach [Hoffmann *et al.*, 2010]. Die Stoffgruppen Kunststoffe, Verbunde und Stoffe a.n.g. mussten für die weitere Verwendung in der Arbeit nochmals differenziert werden.

A 1 - 2: Zusammensetzung der Abfälle für die Biotonne

Stoffgruppe	%	Menge [Mg]	Bemerkung
Organik	97	4.464.813	
Metalle	0,2	9.666	7 % von 3 % Störstoffen in 100 % Biotonne*
Glas	0,3	13.809	10 % von 3 % Störstoffen in 100 % Biotonne*
Kunststoff LVP	0,5	20.713	15 % von 3 % Störstoffen in 100 % Biotonne*
Kunststoff StNVP	0,9	41.426	30 % von 3 % Störstoffen in 100 % Biotonne*
Mineralien	0,9	41.426	30 % von 3 % Störstoffen in 100 % Biotonne*
Windeln	0,2	11.047	8 % von 3 % Störstoffen in 100 % Biotonne*
GESAMT	100	4.602.900	[GENESIS-online]

*eigene Annahmen

A 1 - 3: Zusammensetzung des LVP-Sammelgemisches

Stoffgruppe	%	Menge [Mg]	Bemerkung
Metalle	17,1	416.214	
PPK	2,6	182.550	
Glas	7,5	63.067	
Kunststoffe (LVP)	39,6	936.864	
Kunststoffe (StNVP)	10,0	243.400	
Organik	0,3	233.236	
Textilien	9,6	7.302	
Verpackungsverbunde	7,5	182.550	
Schadstoffe	0,0	0	
Windeln	5,2	126.074	
Stoffe a.n.g. (ohne Windeln)	0,3	7.302	
Fraktion <10mm	0,4	10.716	
GESAMT	100	2.434.000	[Bothe, 2015]

*die absolute LVP-Sammelmenge stammt aus [Bothe, 2015]. Die Stoffgruppenanteile ergeben sich aus der prozentualen Zusammensetzung nach [Bünemann *et al.*, 2011].

A 1 - 4: Zusammensetzung des Glas-Sammelgemisches

Stoffgruppe	%	Menge [Mg]	Bemerkung
Glas	99,4	1.866.447	
Metalle	0,1	2.253	19,67 % von 0,61 % Störstoffe in 100 % Glassammlung [vgl. Bilitewski/Härdtle, 2013]
PPK	0,4	7.511	65,57 % von 0,61 % Störstoffe in 100 % Glassammlung [vgl. Bilitewski/Härdtle, 2013]
Kunststoff LVP	0,1	938	8,19 % von 0,61 % Störstoffe in 100 % Glassammlung [vgl. Bilitewski/Härdtle, 2013]
Mineralien	0,0	750	6,55 % von 0,61 % Störstoffe in 100 % Glassammlung [vgl. Bilitewski/Härdtle, 2013]
GESAMT	100	1.877.900	[GENESIS-online]

A 1 - 5: Zusammensetzung der PPK-Sammelgemisches

Stoffgruppe	%	Menge [Mg]	Bemerkung
PPK	97,7	5.673.650	
Metalle	0,1	6.767	5 % von 2,3 %* Störstoffe in 100 % PPK-Sammlung
Verpackungsverbunde	1,6	94.745	70 % von 2,3 %* Störstoffe in 100 % PPK-Sammlung
Kunststoff LVP	0,6	33.837	25 % von 2,3 %* Störstoffe in 100 % PPK-Sammlung
GESAMT	100	5.809.000	[GENESIS-online]

*der Störstoffgehalt wird vom [bvse, 2016], in Abhängigkeit des Erfassungssystems, auf 1 - 3,5 % geschätzt (1 % Bündelsammlung, 2,5 % Depotcontainer und 3,5 % Monotonne). Es wurde das Mittel von 2,3 % angenommen.

A 1 - 6: Stoffgruppenbezogene Abfalleigenschaften

Stoffgruppe	Parameter	Wert	Einheit	Quelle	Anmerkung
Metalle	Schwefel	0	kg/Mg TS	Kost, 2001	
	Chlor	0	kg/Mg TS		
	Heizwert	0	MJ/Mg		
	Wassergehalt	0	%		
PPK	Schwefel	853	kg/Mg TS	LfU, 2008 Kost, 2001	
	Chlor	1208	kg/Mg TS		
	Heizwert	11000	MJ/Mg		
	Wassergehalt	25,5	%		
Glas	Schwefel	501	kg/Mg TS	LfU, 2008 Kost, 2001	
	Chlor	592	kg/Mg TS		
	Heizwert	0	MJ/Mg		
	Wassergehalt	0	%		
Kunststoffe LVP	Schwefel	1237	kg/Mg TS	LfU, 2008 Kost, 2001	entspricht den Werten der Stoffgruppe“ Kunststoffverpackungen inkl. Folien“
	Chlor	4880	kg/Mg TS		
	Heizwert	31000	MJ/Mg		
	Wassergehalt	18	%		
Kunststoffe StNVP	Schwefel	1,56	kg/Mg TS	LfU, 2008 Kost, 2001	entspricht den Werten der Stoffgruppe „Sonstige Kunststoffe“
	Chlor	33,15	kg/Mg TS		
	Heizwert	35.000	MJ/Mg		
	Wassergehalt	26	%		
Organik	Schwefel	3,51	kg/Mg TS	LfU, 2008 Kost, 2001	WG gemittelt aus Küchen- und Gartenabfällen
	Chlor	6,87	kg/Mg TS		
	Heizwert	5.000	MJ/Mg		
	Wassergehalt	60	%		
Holz	Schwefel	0,50	kg/Mg TS	LfU, 2008 Kost, 2001	
	Chlor	0,54	kg/Mg TS		
	Heizwert	14.500	MJ/Mg		
	Wassergehalt	17	%		
Textilien	Schwefel	1,09	kg/Mg TS	LfU, 2008 Kost, 2001	
	Chlor	1,12	kg/Mg TS		
	Heizwert	14.000	MJ/Mg		
	Wassergehalt	23	%		
Mineralstoffe	Schwefel	27,08	kg/Mg TS	LfU, 2008 Kost, 2001	entspricht den Werten der Stoffgruppe „Inertes“
	Chlor	0,73	kg/Mg TS		
	Heizwert	0	MJ/Mg		
	Wassergehalt	10	%		
Verpackungsverbunde	Schwefel	0,92	kg/Mg TS	LfU, 2008 Kost, 2001	
	Chlor	2,88	kg/Mg TS		
	Heizwert	16.500	MJ/Mg		
	Wassergehalt	20	%		
Verbunde sonstige	Schwefel	1,30	kg/Mg TS	LfU, 2008	
	Chlor	5,70	kg/Mg TS		

Stoffgruppe	Parameter	Wert	Einheit	Quelle	Anmerkung
	Heizwert	21.000	MJ/Mg		
	Wassergehalt	1	%	Kost, 2001	
Schadstoffe	Schwefel	0,5	kg/Mg TS	Kost, 2001	entspricht den Werten der Stoffgruppe „Problemstoffe“
	Chlor	1,5	kg/Mg TS		
	Heizwert	3.000	MJ/Mg	LfU, 2008	
	Wassergehalt	10	%	Kost, 2001	Entspricht „Problemstoffe“
Windeln	Schwefel	1,37	kg/Mg TS	LfU, 2008	entspricht den Werten der Stoffgruppe „Hygieneprodukte“
	Chlor	4,04	kg/Mg TS		
	Heizwert	8.000	MJ/Mg		
	Wassergehalt	37	%	Häberle/ Bidlingmaier 1994	
Stoffe a.n.g. (ohne Windeln)	Schwefel	5,93	kg/Mg TS	LfU, 2008	entspricht den Werten der Stoffgruppe „Leder, Gummi, Kork“
	Chlor	53,07	kg/Mg TS		
	Heizwert	25.500	MJ/Mg		
	Wassergehalt	15	%		Schätzwert
Fraktion < 10 mm	Schwefel	3,48	kg/Mg TS	LfU, 2008	
	Chlor	6,01	kg/Mg TS		
	Heizwert	4.000	MJ/Mg		
	Wassergehalt	37	%	Kost, 2001	
Sperrmüll	Schwefel	1,40	kg/Mg TS	Fehrenbach/ Giegrich/ Möhler, 2007	
	Chlor	1,70	kg/Mg TS		
	Heizwert	15.988	MJ/Mg	Heilmann, 2000	zitiert in Hoffmann <i>et al.</i> (2010)
	Wassergehalt	9,70	%	Heilmann, 2000	ermittelt über TS-Angabe
Gewerbeabfall	Schwefel	2,70	kg/Mg TS	Fehrenbach/ Giegrich/ Schmidt, 2007	
	Chlor	8,60	kg/Mg TS		
	Heizwert	11.000	MJ/Mg		
	Wassergehalt	22,90	%		

A 2: Gleichungen des Regressionsmodells

A 2 - 1: Regressionsgleichungen der demografischen Faktoren für jede Stoffgruppe

Stoffgruppe [kg]	Haushaltsgröße	Kaufkraft	Siedlungsdichte
	Abnahme pro Schritt (1Pers) =10%	Zunahme pro Schritt (1€) =0,006%	Zunahme pro Schritt (1EW/km ²) =0,07%
Metalle	$y = 12,2 - 1,2x$	$y = 4,50 + 0,0003x$	$y = 5,92 + 0,004x$
PPK	$y = 111,9 - 11,3x$	$y = 41,27 + 0,0023x$	$y = 54,28 + 0,039x$
Glas	$y = 40,0 - 4,0x$	$y = 14,74 + 0,0008x$	$y = 19,39 + 0,014x$
Kunststoffe LVP	$y = 27,9 - 2,8x$	$y = 10,29 + 0,0006x$	$y = 13,54 + 0,010x$
Kunststoffe StNVP	$y = 11 - 1,1x$	$y = 4,04 + 0,0002x$	$y = 5,31 + 0,004x$
Organik	$y = 135,4 - 13,7x$	$y = 49,93 + 0,0028x$	$y = 65,68 + 0,047x$
Holz	$y = 3,9 - 0,4x$	$y = 1,43 + 0,0001x$	$y = 1,87 + 0,001x$
Textilien	$y = 10,1 - 1,0x$	$y = 3,72 + 0,0002x$	$y = 4,89 + 0,003x$
Mineralstoffe	$y = 10 - 1,0x$	$y = 3,69 + 0,0002x$	$y = 4,85 + 0,003x$
Verpackungsverbunde	$y = 7,2 - 0,7x$	$y = 2,67 + 0,0001x$	$y = 3,51 + 0,003x$
Verbunde sonstige	$y = 6,6 - 0,7x$	$y = 2,43 + 0,0001x$	$y = 3,20 + 0,002x$
Schadstoffe	$y = 1,0 - 0,1x$	$y = 0,38 + 0,0000x$	$y = 0,49 + 0,000x$
Stoffe a.n.g. (Windeln)	$y = 21,5 - 2,2x$	$y = 7,94 + 0,0004x$	$y = 10,44 + 0,007x$
Stoffe a.n.g. (ohne Windeln)	$y = 2,3 - 0,2x$	$y = 0,84 + 0,0000x$	$y = 1,10 + 0,001x$
Fraktion < 10 mm	$y = 30,1 - 3,0x$	$y = 11,09 + 0,006x$	$y = 14,58 + 0,010x$

A 3: Transferfaktoren der Behandlungsanlagen

A 3 - 1: Transferfaktoren der MBA

MBA

Schritt 1: Separierung Rotte/EBS

	Rotte	therm_Vewertung	Sonstige
Organik in Restmüll	0,54	0,22	0,24
Fraktion <10mm in Restmüll	1	0	0
PPK in Restmüll	0	1	0
Windeln in Restmüll	0,45	0,55	0
Kunststoffe LVP in Restmüll	0	1	0
Textilien in Restmüll	0	1	0
Glas in Restmüll	1	0	0
Mineralstoffe in Restmüll	1	0	0
Verbunde in Restmüll	0	1	0
Kunststoffe StNVP in Restmüll	0	1	0
Metalle in Restmüll	0	0	1
Holz in Restmüll	0	1	0
Verpackungsverbunde in Restmüll	0	1	0
Stoffe a.n.g. (o.Windeln) in Restmüll	0	1	0
Schadstoffe in Restmüll	1	0	0
Sperrmüll	0	1	0
hmä Gewerbeabfall	0	1	0

Schritt 2: Stoffverteilung Rottegut

	Deponie	Verlust
Rotte Deponiematerial	0,5135	0,4865

Schritt 3: Splittung EBS

	EBS-KW	MVA	Zementwerk	Sonstige
Organik in Restmüll	0,1	0,8	0	0,1
Fraktion <10mm in Restmüll	0	0	0	0
PPK in Restmüll	0,58	0,01	0,36	0,05
Windeln in Restmüll	0,2	0,68	0,1	0,02
Kunststoffe LVP in Restmüll	0,25	0	0,7	0,05
Textilien in Restmüll	0,85	0,1	0	0,05
Glas in Restmüll	0	0	0	0
Mineralstoffe in Restmüll	0	0	0	0
Verbunde in Restmüll	0,95	0	0	0,05
Kunststoffe StNVP in Restmüll	0,25	0	0,7	0,05
Metalle in Restmüll	0	0	0	0
Holz in Restmüll	0,95	0	0	0,05
Verpackungsverbunde in Restmüll	0,3	0	0,65	0,05
Stoffe a.n.g. (o.Windeln) in Restmüll	0,4	0,5	0	0,1
Schadstoffe in Restmüll	0	0	0	0
Sperrmüll	0,65	0	0,29	0,06
hmä Gewerbeabfall	0,49	0	0,51	0

A 3 - 2: Transferfaktoren von MVA und EBS-Kraftwerk

Schlackeübergang	
MVA	0,25
EBS-Kraftwerk	0,20

A 3 - 3: Transferfaktoren der biologischen Behandlungsanlagen

	Kompostierung	Vergärung
Output	50	80
Verlust	50	20

A 3 - 4: Transferfaktoren der LVP-Sortieranlage

LVP-Sortieranlage	TF		
	in stoffl. Verwertung	in HRF/SBS	in Sortierreste
Fraktion <10mm	0,13	0,03	0,84
Glas	0,13	0,03	0,84
LVP SVPP	0,90	0,05	0,05
LVP sonst. KS	0,50	0,25	0,25
LVP Folien	0,05	0,91	0,04
StNVP SVPP	0,90	0,05	0,05
StNVP sonst.KS	0,75	0,13	0,12
StNVP Folien	0,06	0,91	0,04
Metalle	0,95	0,03	0,03
Organik	0,13	0,03	0,84
PPK	0,20	0,37	0,43
Schadstoffe	0,00	0,00	0,00
Stoffe a.n.g.	0,13	0,03	0,84
Textilien	0,13	0,03	0,84
Verpackungsverbunde	0,75	0,13	0,13
Windeln	0,13	0,03	0,84
	EBS-KW (HRF)	Zementwerk (SBS)	
HRF/SBS-Verteilung	80	20	

A 4: Transferfaktoren der Distribution

A 4 - 1: Transferfaktoren der Abfallstrom-Distribution

Abfall/Anlage	MVA	MBA	EBS-KW	LVP	Kompostierung	Vergärung
Restabfall	79,5	20,5				
Gewerbeabfall	32	3,9	20			
Sperrmüll	32	7,7				
Import 1 UK&Irland			25			
Import 1 UK&Irland	75					
Import 2 BeNeLux	100					
Import 2 BeNeLux			0			
LVP-Sammelgemisch				1		
Abfälle für die Biotonne					90,5	9,5
Garten- und Parkabfälle					51,5	0,44
Distribution Schlacke						
Schlackeverwertung						31
Schlackedeponierung						69

*übrige Anteile verlassen den Bilanzraum als *sonstige Verwertung*

A 4 - 2: Transferfaktoren der Schlacke-Distribution

Abfall/Anlage	Verwertung	Deponierung
Schlacke	90*	10

*davon wurden 76 % in mineralischer Form im Deponie- und Straßenbau verwertet, 7 % als metallisches Eisen und 0,7 % in Form von NE-Metallen gewonnen und 7 % einer Untertage- oder sonstigen Verwertung zugeführt [Deike/Warnecke/Vogell, 2012].

Anhang B Modellvariablen bis 2035

B 1: Demografische Randbedingungen

B 1 - 1: Modellvariablen des demografischen Wandels 2014-2060

	Einwohner [Mio.]	Haushalte [1Tsd.]	Einkommen [€/EW]	Inflationsrate [%]	Kaufkraft [€/EW]	Siedlungsdichte Ø [EW/km ²]
2014	81,058	40.223	21.117	0,9	20.927	909
2015	81,345	40.774	21.467	0,2	21.357	924
2016	81,579	41.247	21.817	0,4	21.664	936
2017	81,757	41.595	22.167	1,4	21.791	948
2018	81,879	41.850	22.517	1,5	22.114	961
2019	81,945	42.049	22.867	1,5	22.460	973
2020	81,953	42.202	23.217	1,5	22.805	986
2021	81,902	42.321	23.567	1,5	23.150	999
2022	81,841	42.416	23.917	1,5	23.495	1.011
2023	81,769	42.498	24.267	1,5	23.840	1.024
2024	81,685	42.574	24.617	1,5	24.185	1.036
2025	81,589	42.646	24.967	1,5	24.530	1.049
2026	81,479	42.709	25.317	1,5	24.875	1.062
2027	81,357	42.769	25.667	1,5	25.220	1.074
2028	81,222	42.828	26.017	1,5	25.565	1.087
2029	81,076	42.885	26.367	1,5	25.910	1.094
2030	80,919	42.936	26.717	1,5	26.255	1.101
2031	80,753	42.985	27.067	1,5	26.600	1.108
2032	80,578	43.033	27.417	1,5	26.946	1.115
2033	80,396	43.078	27.767	1,5	27.291	1.122
2034	80,206	43.123	28.117	1,5	27.636	1.129
2035	80,009	43.170	28.467	1,5	27.981	1.136
2036	79,804	43.281	28.817	1,5	28.326	1.143
2037	79,592	43.391	29.167	1,5	28.671	1.150
2038	79,372	43.502	29.517	1,5	29.016	1.157
2039	79,143	43.612	29.867	1,5	29.361	1.164
2040	78,906	43.723	30.217	1,5	29.706	1.171
2041	78,661	43.834	30.567	1,5	30.051	1.178
2042	78,407	43.944	30.917	1,5	30.396	1.185
2043	78,145	44.055	31.267	1,5	30.741	1.192
2044	77,875	44.166	31.617	1,5	31.086	1.199
2045	77,597	44.276	31.967	1,5	31.431	1.206
2046	77,312	44.387	32.317	1,5	31.777	1.213
2047	77,02	44.497	32.667	1,5	32.122	1.220
2048	76,723	44.608	33.017	1,5	32.467	1.227
2049	76,421	44.719	33.367	1,5	32.812	1.234
2050	76,115	44.829	33.717	1,5	33.157	1.241
2051	75,806	44.940	34.067	1,5	33.502	1.248
2052	75,496	45.050	34.417	1,5	33.847	1.255

	Einwohner [Mio.]	Haushalte [1Tsd.]	Einkommen [€/EW]	Inflationsrate [%]	Kaufkraft [€/EW]	Siedlungsdichte Ø [EW/km²]
2053	75,184	45.161	34.767	1,5	34.192	1.262
2054	74,873	45.272	35.117	1,5	34.537	1.269
2055	74,564	45.382	35.467	1,5	34.882	1.276
2056	74,257	45.493	35.817	1,5	35.227	1.283
2057	73,955	45.603	36.167	1,5	35.572	1.290
2058	73,657	45.714	36.517	1,5	35.917	1.297
2059	73,364	45.825	36.867	1,5	36.263	1.304
2060	73,079	45.935	37.217	1,5	36.608	1.311

B 2: Parameter der Wertstofffassung

B 2 - 1: Modellvariablen der Wertstofftonne und Biotonne 2014-2060

	Anschlussquote WST [%]	Anschlussquote BT [%]	Erfassungsquote BT [%]	Störstoffquote BT [%]
2014	15,2	64,5	81,5	3
2015	16,8	69,5	79,5	3,5
2016	18,4	74,5	77,5	4
2017	28,4	76,5	75,5	4,5
2018	38,4	78,5	73,5	5
2019	48,4	80,5	73,5	4,7
2020	49,9	80,5	79,5	4,3
2021	51,4	80,5	84,5	4,3
2022	52,9	80,5	84,5	4,3
2023	52,9	80,5	84,5	4,3
2024	52,9	80,5	84,5	4,3
2025	52,9	80,5	84,5	4,3
2026	52,9	80,5	84,5	4,3
2027	52,9	80,5	84,5	4,3
2028	52,9	80,5	84,5	4,3
2029	52,9	80,5	84,5	4,3
2030	52,9	80,5	84,5	4,3
2031	52,9	80,5	84,5	4,3
2032	52,9	80,5	84,5	4,3
2033	52,9	80,5	84,5	4,3
2034	52,9	80,5	84,5	4,3
2035	52,9	80,5	84,5	4,3
2036	52,9	80,5	84,5	4,3
2037	52,9	80,5	84,5	4,3
2038	52,9	80,5	84,5	4,3
2039	52,9	80,5	84,5	4,3
2040	52,9	80,5	84,5	4,3
2041	52,9	80,5	84,5	4,3
2042	52,9	80,5	84,5	4,3
2043	52,9	80,5	84,5	4,3
2044	52,9	80,5	84,5	4,3
2045	52,9	80,5	84,5	4,3
2046	52,9	80,5	84,5	4,3
2047	52,9	80,5	84,5	4,3
2048	52,9	80,5	84,5	4,3
2049	52,9	80,5	84,5	4,3
2050	52,9	80,5	84,5	4,3
2051	52,9	80,5	84,5	4,3
2052	52,9	80,5	84,5	4,3
2053	52,9	80,5	84,5	4,3
2054	52,9	80,5	84,5	4,3

	Anschlussquote WST [%]	Anschlussquote BT [%]	Erfassungsquote BT [%]	Störstoffquote BT [%]
2055	52,9	80,5	84,5	4,3
2056	52,9	80,5	84,5	4,3
2057	52,9	80,5	84,5	4,3
2058	52,9	80,5	84,5	4,3
2059	52,9	80,5	84,5	4,3
2060	52,9	80,5	84,5	4,3
Extrem	100	100	81,5	3

B 2 - 2: Modellvariablen der Anlagenkapazitäten 2014-2060

	FWL MVA [MWh]	FWL EBS [MWh]	MBA [Mio. Mg]	Kompostierung [Mio. Mg]	Vergärung inkl. gewerblichem Anteil [Mio. Mg]	Deponie [m³]
2014	4.870	1.059	1,65	9,77	2,85	18.834.700
2015	4.870	1.059	1,62	9,75	3,14	18.126.800
2016	4.870	1.059	1,59	9,73	3,43	17.424.600
2017	4.870	1.059	1,56	9,71	3,72	16.729.200
2018	4.870	1.059	1,54	9,69	4,01	16.031.200
2019	4.870	1.059	1,51	9,67	4,30	15.329.500
2020	4.870	1.059	1,48	9,65	4,59	14.632.500
2021	4.870	1.059	1,47	9,63	4,96	13.956.700
2022	4.870	1.059	1,45	9,61	5,33	13.298.700
2023	4.870	1.059	1,44	9,59	5,71	12.638.300
2024	4.870	1.059	1,43	9,57	6,08	11.975.400
2025	4.870	1.059	1,41	9,55	6,45	11.310.100
2026	4.870	1.059	1,40	9,53	6,55	10.642.600
2027	4.870	1.059	1,39	9,51	6,65	9.973.000
2028	4.870	1.059	1,37	9,49	6,75	9.301.300
2029	4.870	1.059	1,36	9,47	6,85	8.627.600
2030	4.870	1.059	1,35	9,45	6,95	7.952.600
2031	4.870	1.059	1,33	9,43	7,05	7.276.400
2032	4.870	1.059	1,32	9,41	7,15	6.599.000
2033	4.870	1.059	1,31	9,39	7,25	5.920.400
2034	4.870	1.059	1,29	9,37	7,35	5.240.900
2035	4.870	1.059	1,28	9,35	7,45	4.560.400
2036	4.870	1.059	1,27	9,33	7,45	n. a.
2037	4.870	1.059	1,25	9,31	7,45	n. a.
2038	4.797	1.059	1,24	9,29	7,45	n. a.
2039	4.797	1.059	1,23	9,27	7,45	n. a.
2040	4.797	1.059	1,21	9,25	7,45	n. a.
2041	4.797	1.059	1,20	9,23	7,45	n. a.
2042	4.797	1.059	1,19	9,21	7,45	n. a.
2043	4.725	1.059	1,18	9,19	7,45	n. a.
2044	4.725	1.059	1,16	9,17	7,45	n. a.
2045	4.725	1.059	1,15	9,15	7,45	n. a.
2046	4.725	1.059	1,14	9,13	7,45	n. a.
2047	4.725	1.059	1,13	9,11	7,45	n. a.
2048	4.654	1.027	1,12	9,09	7,45	n. a.
2049	4.654	1.027	1,10	9,07	7,45	n. a.
2050	4.654	1.027	1,09	9,05	7,45	n. a.
2051	4.654	1.027	1,08	9,03	7,45	n. a.
2052	4.654	1.027	1,07	9,01	7,45	n. a.
2053	4.584	996	1,06	8,99	7,45	n. a.
2054	4.584	996	1,04	8,97	7,45	n. a.
2055	4.584	996	1,03	8,95	7,45	n. a.

	FWL MVA [MWh]	FWL EBS [MWh]	MBA [Mio. Mg]	Kompostierung [Mio. Mg]	Vergärung inkl. gewerblichem Anteil [Mio. Mg]	Deponie [m³]
2056	4.584	996	1,02	8,93	7,45	n. a.
2057	4.584	996	1,01	8,91	7,45	n. a.
2058	4.516	967	1,00	8,89	7,45	n. a.
2059	4.516	967	0,98	8,87	7,45	n. a.
2060	4.516	967	0,97	8,85	7,45	n. a.

*die Trends wurden bereits bis 2060 fortgeschrieben, so dass Prognosen im Bedarfsfall über 2035 hinaus erstellt werden können.

Die Auswahl deckt zunächst die grundlegenden demografischen Aspekte ab. Sie kann durch beliebige weitere Einflussfaktoren ergänzt werden (in der Tabelle beispielhaft dargestellt am Punkt Sozialniveau schwach, mittel, stark). Der Erhebungsaufwand vergrößert sich dadurch jedoch ungemein. Darüber hinaus werden diese Erhebungen im bestmöglichen Fall stoffgruppenspezifisch durchgeführt, da die Abfallverhaltensmuster je Stoffgruppe unterschiedlich ausfallen können.

Für die Auswertung der Daten müssten diese in einheitliche Achsenabschnitte geclustert werden. Werte verschiedener Regressionskoeffizienten lassen sich nur vergleichen, wenn die Variablen in gleichen Einheiten Skalenabhängigkeit gemessen wurden, denn der numerische Wert b_j ist abhängig von der Skala, auf der der Regressionskoeffizienten die Variable X_j gemessen wurde. Demnach wären z. B. die Kaufkraft in 1 Tsd. € und die Altersstrukturen in Altersklassendurchschnittswerten anzugeben. Alternativ könnten auch die auf das Mittel normierten Abweichungen in % herangezogen werden (vgl. Zwisele/Nogueira, 2014). Durch die schrittweise und partielle Regression können Einflussfaktoren zunächst eingegrenzt und im multiplen Regressionsmodell für umfangreiche Zukunftsprognosen von Abfallmengen und -zusammensetzungen herangezogen werden.