



## 1 Einleitung und Zielsetzung

Menschliche Siedlungstätigkeit hat eine Anhäufung verschiedenster Abfälle zur Folge, woraus ein kontinuierlicher Anstieg der abgelagerten Abfallmenge resultiert. Bis in die 1980er Jahre erfolgte keine geregelte Ablagerung der anfallenden Siedlungsabfälle. Aufgrund der stetigen Zunahme und der unkontrollierten Aufhäufung wurde 1993 die erste Verordnung - Technische Anleitung für Siedlungsabfall (TASi) - erstellt. Diese beinhaltete die Auferlegung umfangreicher technischer Maßnahmen für die Ablagerung von Siedlungsabfällen in einem geordneten Deponiebetrieb (TA Siedlungsabfall, 1993). Mit der neuen Methode der konzentrierten Abfallsammlung traten jedoch auch neue Probleme auf. Es bildeten sich große geballte Emissionen durch Sickerwasser und Deponiegas. Des Weiteren wies der Abfall eine sehr starke Heterogenität durch unterschiedliche Abfallzusammensetzung, Größe, Alter und Inhaltsstoffe auf. Ferner kam es zu starken Variationen der Emissionen je nach Lage und Betriebsbedingungen der Deponie. Insgesamt wurden bis zu 13 % der globalen anthropogenen Methanemissionen durch Treibhausgase von Mülldeponien verursacht (Lenz und Cozzarini C., 1998). Zum Lösen dieser Problematik sollte es eine erneute Vereinheitlichung geben, woraufhin 2001 in Deutschland die Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV) zur Ergänzung der TASi eingeführt wurde, welche sowohl die Vorbehandlung als auch die anschließende Ablagerung der Siedlungsabfälle festlegt und beschreibt (AbfAbIV, 2001). Damit ist seit 2005 eine Ablagerung unbehandelter Abfälle auf Deponien untersagt und somit eine Verbrennung oder Vorbehandlung zwingend erforderlich. Die Vorbehandlung besteht aus diversen mechanischen Behandlungsstufen, wie dem Zerkleinern, Sortieren oder dem Separieren und einer Trocknung oder einer biologischen Vorbehandlung, welche mehrere Schritte der Fermentation (Rotte, Vergärung) beinhaltet und zu einer kontrollierten Biogasproduktion führt (AbfAbIV, 2001).

Durch die mechanisch-biologische Abfallbehandlung (MBA) kommt es zu einer Verringerung der abzulagernden Abfallmenge, was eine Verkleinerung der be-



nötigten Ablagerungsflächen impliziert, zum anderen führt sie zu einer Reduzierung des Gehalts von biologisch abbaubaren Substanzen (Knappik, 2011). Weiterhin wird durch die Vorbehandlung eine größere Homogenität des abgelagerten Abfalls realisiert. Ein zusätzlicher Vorteil ist das Erreichen höherer Einbaudichten von bis zu  $18 \text{ kN/m}^3$  (Bräcker, 2010). Diese führen wiederum zu einer Reduzierung der Makroporenvolumina, woraus geringere Wasser- und Gasdurchlässigkeiten resultieren. Folglich kann durch die Abfallvorbehandlung eine Abnahme des Schadstoffausstoßes, der Sickerwasserbelastung und eine effektive und kontrollierte Biogasproduktion erzielt werden, was schließlich zu einer Verringerung und Minimierung des Risikopotentials von Deponien führt.

Seit der Einführung der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung sind nur noch 5 bis 10% der Gasemissionen von Deponien im Vergleich zu unbehandelten Siedlungsabfällen zu verzeichnen (Bräcker, 2010; Ritzkowski, 2000). Trotz der erzielten Verringerung des Schadstoffaustritts durch die Abfallvorbehandlung sind weiterhin ausgeprägte Gasbildungspotentiale vorhanden (Ritzkowski, 2000), da in der Abfallmatrix immer noch biologische, chemische und physikalische Abbauprozesse allgegenwärtig sind. Demzufolge besteht fortwährend ein Restrisiko durch den Abfallkörper, welches geeignete Monitoring-Maßnahmen unerlässlich macht.

Mülldeponien sind aufgrund ihres Aufbaus als verkapselte Konstruktionen und somit auch als übergroße Bioreaktoren zu betrachten, die sowohl durch äußere Einflüsse (Witterungsbedingungen und mechanische Beanspruchung) als auch durch biologische und chemische Reaktionen innerhalb des Konstrukts stark beansprucht werden. Die Geschwindigkeit der Abbauprozesse und der auftretenden Emissionen hängt sehr stark von diesen biologischen, chemischen und physikalischen Prozessen und deren gegenseitigen Wechselwirkungen ab. Aus diesem Grund ist die Charakterisierung der Einflussgrößen auf die Gasbildung von Methan und Kohlendioxid, der hauptsächlichen Treibhausgase, von großem Interesse. Bisherige Untersuchungen zeigen einen direkten Einfluss von Temperatur, pH-Wert, Pufferkapazität, Wassergehalt (Fischer, 2011) und Ansammlungen diverser Stoffe, die inhibierende Auswirkungen auf die Reaktionsprozesse innerhalb des Deponiekörpers und auf die mikrobielle Aktivität sowie



die damit verbundene Gassynthese haben (Meima et al., 2008). Temperaturschwankungen werden nicht nur durch verschiedene Jahreszeiten und Witterungsbedingungen verursacht, sie können ebenso in Verbindung mit unterschiedlichen Deponietiefen auftreten. Dabei können Temperaturen von 20 bis 60 °C vorherrschen (Dernbach, 1982). Auch der Wassergehalt spielt bei der Gassynthese eine entscheidende Rolle. Innerhalb einer Deponie ist das Wasser nahezu ubiquitär vorhanden und dient primär als Transportmedium für Nährstoffe und Wärme. Der Wassergehalt im Abfall ist zum einen von der jeweiligen Vorbehandlung abhängig, wobei Schwankungen von 10 bis 55 % w/w auftreten können (Velis et al., 2009), zum anderen wird er von den klimatischen Bedingungen rund um das Deponiegebiet beeinflusst. Demzufolge existieren aufgrund von Wärme, Kälte, Wind und Niederschlägen unterschiedliche Sickerwassermengen.

Ziel dieser Arbeit ist die Charakterisierung der wesentlichen Stoffströme in vorbehandelten Siedlungsabfällen zum besseren Verständnis von deren Abbauverhalten und der damit verbundenen Gasemission in verschiedenen Skalen. Dies geschieht unter definierten Bedingungen im Labormaßstab, wofür in der vorliegenden Arbeit zunächst ein Scale-Down vom Deponie- in den Labormaßstab durchgeführt wird. Bisherige Untersuchungen von Prozessen in verschiedenen Raum-Zeit-Skalen in Böden und Deponien zeigen unterschiedliche Einflüsse verschiedenster Prozessparameter in der jeweiligen Skala (Knappik, 2011; Zehe, 1999; Seyfried und Wilcox, 1996; Vázquez, 2008). Weiterhin besteht die Annahme, dass mit größer werdendem Reaktionsraum lokale Reaktionsprozesse einen geringeren Einfluss haben, während der Einfluss von Transport und Abfallstruktur ansteigt (Vázquez, 2008; Meima et al., 2002). Mit Hilfe der unterschiedlichen Reaktorgrößen soll in dieser Arbeit untersucht werden, inwieweit die Stoffströme und die reaktionskinetischen Daten vom kleinen in den nächst größeren Maßstab übertragen werden können.

Aufgrund der Komplexität der äußeren Einflüsse, der Stoffströme und der auftretenden Reaktionen ist es schwierig, geeignete Modelle für die Beschreibung von Deponien sowie austretenden Gas- und Sickerwasseremissionen zu finden. Im Rahmen



dieser Arbeit sollen daher Künstliche Neuronale Netze (KNN) eingesetzt werden, um mit Hilfe experimenteller Daten das synthetisierte Gas des Siedlungsabfalls in Deponiebioreaktoren zu simulieren.

Somit ergeben sich für die vorliegende Arbeit folgende Teilaufgaben:

- Konstruktion und Bau dreier verschiedener Reaktorgrößen (1,3 l; 18,5 l; 78,8 l) mit gleichem H:D-Verhältnis von 1,7:1 für die Charakterisierung der Stoffströme und Reaktionen in verschiedenen Skalen,
- Festlegung geeigneter Randbedingungen für die Erzielung einer größtmöglichen Vergleich- und Übertragbarkeit der Abbauprozesse,
- Charakterisierung des Abfalls und der jeweiligen Abfallschüttung in den verschieden großen Deponiebioreaktoren,
- Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Reaktionsparameter (Temperatur und Wassergehalt) auf die Biogasentstehung sowie
- Entwicklung eines Künstlichen Neuronalen Netzes für die Simulation der Gasbildung aller Reaktorgrößen.

Das neuronale Netz stellt dabei ein datengetriebenes Blackbox-Modell dar. Mit Hilfe der gewonnenen experimentellen instationären Online- und Offlineprozessdaten soll es schlussendlich möglich sein, ein Künstliches Neuronales Netz zu trainieren und zu validieren, um die Gasbildung der Deponiebioreaktoren in den unterschiedlichen Größenskalen zu simulieren. **Abbildung 1** zeigt den Überblick der in dieser Arbeit gewählten Herangehensweise zur Charakterisierung der Stoffströme vorbehandelter Siedlungsabfälle durch Verwendung von Scale-Down Labormodellreaktoren sowie Künstlicher Neuronaler Netze (KNN) unter Berücksichtigung verschiedener Parameter, die einen Einfluss auf die Gasemissionen des deponierten Siedlungsabfalls haben.

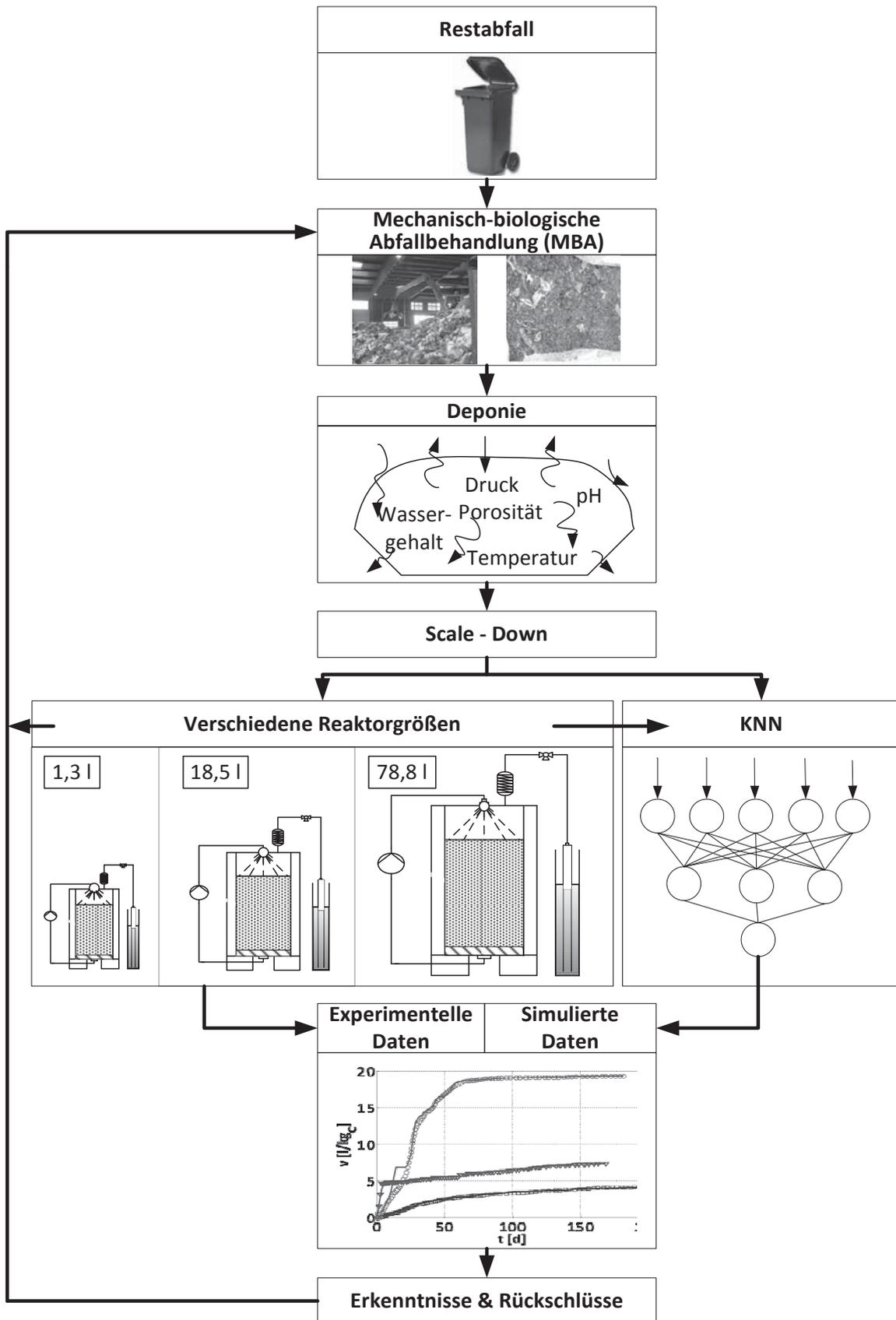


Abbildung 1: Herangehensweise zur Charakterisierung der Stoffströme vorbehandelter Siedlungsabfälle durch Verwendung von Scale-Down Labormodellreaktoren sowie Künstlicher Neuronaler Netze (KNN).



Im Idealfall ist die Beschreibung aller Reaktorgrößen mit ein und demselben Netz möglich, was folglich die Grundlage für eine Maßstabsübertragung in den Deponie-maßstab darstellt. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen somit zukünftig dazu beitragen, die Vorbehandlungen weiter zu optimieren und daraus resultierend die Deponiegasemissionen schneller und weitgehender zu reduzieren.



## 2 Grundlagen

### 2.1 Deponierung von Abfällen

Die Deponierung von Abfällen hat eine geballte Ansammlung verschiedenster Stoffe zur Folge, deren Wechselwirkungen untereinander eine große Anzahl unterschiedlichster Reaktionen und somit auch ausgeprägte Schadstoffpotentiale mit sich bringen. Aufgrund dessen haben unterschiedliche Umwelteinflüsse und Reaktionen innerhalb des Deponiekörpers Auswirkungen auf seine Stabilität. Zur Überwachung und Eingrenzung auftretender Schadenspotentiale ist eine exakte Kenntnis der einzelnen Prozesse innerhalb der Deponie notwendig. Deshalb wird in den nachfolgenden Kapiteln zunächst das Grundprinzip der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA) (2.1.1) am Beispiel der MBA-Anlage des Abfallzweckverbandes aha (Region Hannover) erläutert. In Kapitel 2.1.2 wird das Konzept der Deponie als Bioreaktor vorgestellt. Anschließend werden die Phasen der Gasentstehung einer Deponie (2.1.3) und die Abbauprozesse und Reaktionen (2.1.4) dargestellt. Darauffolgend werden auftretende Stoffströme (2.1.5) innerhalb der Abfallmatrix dargelegt und mögliche Einflussfaktoren auf diese Reaktionen und Stoffströme (2.1.6) erörtert. Letztendlich wird der Einfluss verschiedener Größenskalen auf die Abbauprozesse und Transportvorgänge diskutiert (2.1.7).

#### 2.1.1 Mechanisch-biologische Abfallbehandlung

Seit 2005 ist in Deutschland die Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV) als Ergänzung der Technischen Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (TASi) (TA Siedlungsabfall, 1993) zur Verringerung des Schadstoffausstoßes in Deponien in Kraft (AbfAbIV, 2001). Diese regelt sowohl die Vorbehandlung von Siedlungsabfällen als auch die darauffolgende Ablagerung der



Reststoffe. Mit Einführung der TAsi sind Siedlungsabfälle entweder zu verbrennen oder einer mechanisch-biologischen Vorbehandlung zu unterziehen.

Im mechanischen Teil der Vorbehandlung erfolgt zunächst eine Abtrennung der Grobfraction und somit eine Aufkonzentrierung des organischen Materials. Während der darauffolgenden biologischen Behandlung wird ein gezielter Abbau des organischen Materials bewirkt. Somit kann ein kontrollierter Schadstoffaustritt erfolgen, welcher wiederum energetisch (Strom- und Wärmeerzeugung) verwertet werden kann.

Die MBA bringt viele Vorteile mit sich. So impliziert die Reduktion des abgelagerten Abfallvolumens eine Reduktion der Ablagerungsflächen. Durch die Vorbehandlung wird eine größere Homogenität des Abfalls erzielt. Außerdem können höhere Einbau- und Ablagerungsdichten erreicht werden, welche wiederum zu einem gleichmäßigen und geringeren Absetzverhalten sowie zu kleineren Porenvolumina führen (Bräcker, 2010). Verringerte Porenvolumina bedeuten eine Reduzierung der Infiltrationsrate und somit eine Verminderung der Gas- und Sickerwasserdurchlässigkeit. Weiterhin wird die Sättigung des Abfalls bei niedrigeren Wassergehalten erreicht (Münnich et al., 2010). Der wichtigste Punkt ist die Verringerung des biologisch abbaubaren organischen Anteils in dem abgelagerten Abfallkörper, womit zum einen eine geringere Sickerwasserbelastung und zum anderen verminderte Gasemissionen um 90 bis 95 % einhergehen (Ritzkowski, 2000). Schlussendlich kann ein kontrollierter Gasaustrag zur effektiven Energienutzung erfolgen.

In **Abbildung 2** ist die mechanisch-biologische Abfallbehandlung am Beispiel der MBA- Anlage des Abfallzweckverbands aha der Region Hannover schematisch dargestellt. Der Restabfall wird zunächst einer mechanischen Behandlung unterzogen. Dafür wird er als erstes durch Schredder zerkleinert, bevor er mit Hilfe einer Siebtrommel in eine Grob- und Feinfraction aufgeteilt wird. Aus beiden Fractionen werden anschließend Metalle mittels Magnetabscheider entfernt. Die Grobfraction mit einer Partikelgröße  $> 60$  mm gelangt daraufhin in die Abfallverbrennungsanlage zur energetischen Verwertung, während die Feinfraction mit einer Partikelgröße  $< 60$  mm einer biologischen Behandlung unterzogen wird.

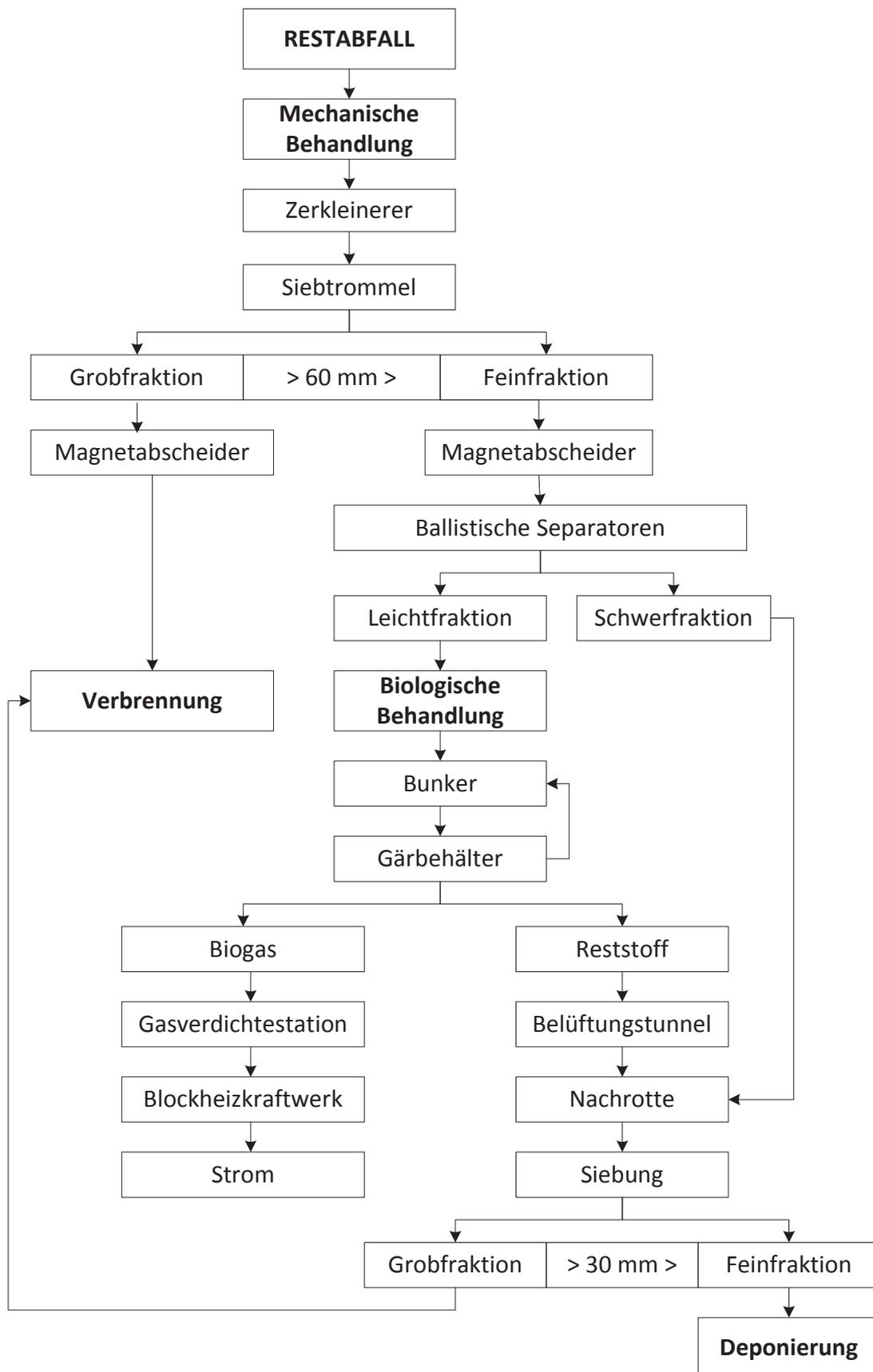


Abbildung 2: Schematische Darstellung der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung der Anlage in Hannover nach Frischen (2008).



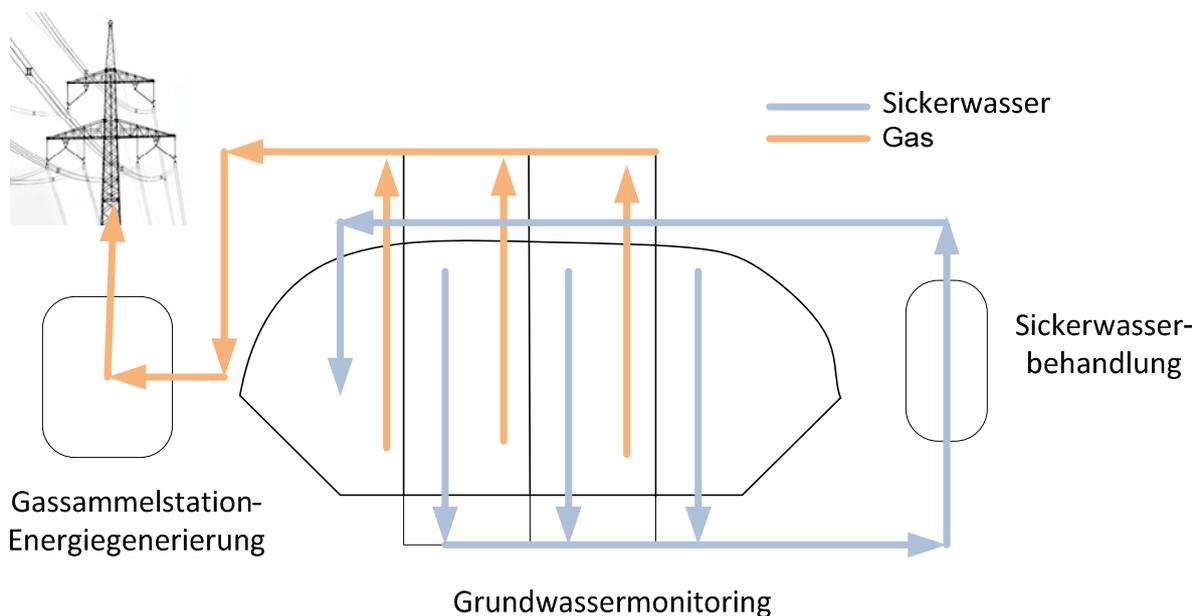
Für die biologische Behandlung gelangt die Feinfraktion zunächst in ballistische Separatoren, in denen sie in eine Leicht- und eine Schwerfraktion aufgeteilt wird. Die Schwerfraktion, welche vorwiegend aus inerten Materialien wie Steinen und Glas besteht, wird der späteren Nachrotte beigemischt. Die Leichtfraktion gelangt zunächst in einen Bunker, welcher als Zwischenlager und zur Regelung des Volumenstroms für die nachfolgende Behandlung dient. Der Restabfall wird nun unter Sauerstoffausschluss einer Temperaturerhöhung auf etwa 35 bis 42 °C unterzogen. Des Weiteren wird er zur Verbesserung der Fließfähigkeit durch die Zugabe von Wasser, Dampf und rezykliertem Gärrest verdünnt. Dieses Gemisch wird nun in Gärbehälter geleitet, in denen der Abfall für drei bis vier Wochen unter Sauerstoffausschluss gärt. Dabei wird die verfügbare organische Substanz zu Biogas (bestehend aus 55 % Methan und 45 % Kohlendioxid) verarbeitet, welches nach anschließender Verdichtung im Blockheizkraftwerk zu Strom umgewandelt wird. Der restliche Feststoff wird nach drei- bis vierwöchiger Gärung einer zweitägigen Sauerstoffbelüftung in Druckbelüftungstunneln unterzogen. Ziel der Aerobisierung ist der konzentrierte Austrag und die separate Entsorgung des entstehenden Ammoniaks. Darauffolgend gelangt der Reststoff für insgesamt sechs Wochen auf die aerobe Nachrotte, die aus sechs Feldern besteht. Innerhalb jedes Feldes verbleibt der Abfall für je eine Woche. Eine anschließende Siebung trennt den Reststoff abermals in eine Grob- und eine Feinfraktion auf. Die Grobfraktion, hier  $x > 30$  mm, gelangt in die Verbrennungsanlage während die Feinfraktion  $x < 30$  mm nun gemäß der Abfallverordnung deponiert werden darf (Vielhaber und Hülter, 2008).

### 2.1.2 Deponie als Bioreaktor

Seit der Einführung der Technischen Anleitung für Siedlungsabfall gibt es geregelte Vorschriften über den Aufbau einer Deponie sowie deren Betrieb (TA Siedlungsabfall, 1993). Dadurch sollen neben kontrolliertem Biogasaustrag auch die Sickerwasseremissionen verringert werden. Im Laufe der Zeit wurde ein neues Konzept der Bioreaktordeponie entwickelt, womit der Deponiekörper gezielt durch technische



Maßnahmen beeinflusst und nicht inerte, organische Stoffe von der angrenzenden Umgebung abgetrennt werden, um die Gefährdung der Umwelt zu minimieren (Kranert und Landwehr, 2010). Generell können drei verschiedene Betriebsweisen der Deponiebioreaktoren unterschieden werden. Sie können aerob, anaerob oder fakultativ anaerob betrieben werden. In **Abbildung 3** ist eine anaerob betriebene Bioreaktor-Deponie mit Vorrichtungen zur Rezyklierung und Behandlung des Sickerwassers sowie einer Gassammelstation zur effektiven Energiegewinnung schematisch dargestellt.



**Abbildung 3: Schematische Darstellung einer anaerob betriebenen Bioreaktor-Deponie nach Green (2005).**

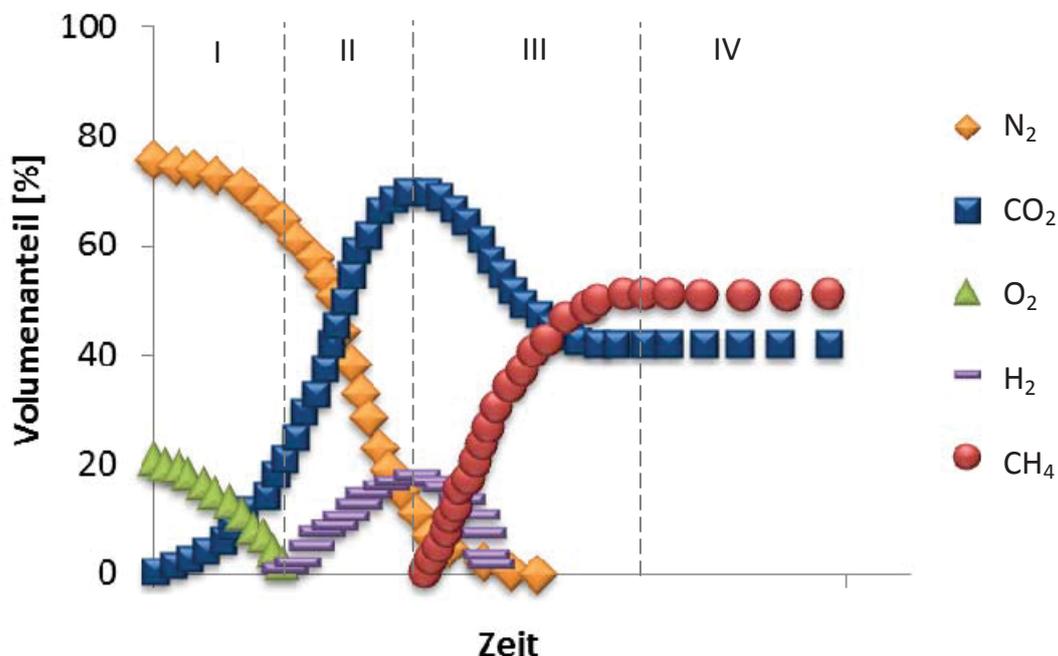
An der Deponiebasis muss eine Basisabdichtung erfolgen. Diese besteht nebst natürlicher Barrieren aus diversen Schichten von synthetischen Schutzauflagen sowie einer Sickerwasserauffangvorrichtung. Weiterhin erfolgt eine Rezyklierung des Sickerwassers zur Erhöhung des Wassergehalts innerhalb der Deponie und zur Umverteilung von Mikroorganismen und Nährstoffen sowie zur Extraktion hoher Konzentrationen inhibierender Substanzen aus der festen Abfallphase, was zu einer Stabilisierung der Prozesse innerhalb der Abfallmatrix führt (Calabro und Mancini, 2012). Als nachteilig erweist sich, dass die Rezyklierung zu einer Erhöhung der Ammonium- bzw. Ammoniakkonzentration im Sickerwasser und im Deponiegas führt. Aus diesem Grund be-



steht die Möglichkeit der Sickerwasserbehandlung, wobei das Ammoniak in Nitrat umgewandelt wird und dieses als ein besserer Elektronendonator zur mikrobiellen Verfügung steht. Des Weiteren werden Gasbrunnen zum kontrollierten Gas- und Energieaustausch eingebracht (Green, 2005).

### 2.1.3 Phasen der Deponiegasentstehung

Die Entstehung des Deponiegases ist von vielen Faktoren abhängig. So beeinflussen das Vorhandensein von Sauerstoff und Nährstoffen, Anteile an Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphat, Temperatur, pH-Wert, Redoxpotential, Wassergehalt, Partikelgröße, Porosität sowie der Gehalt an inhibierenden Stoffen maßgeblich die Prozesse innerhalb der Abfallmatrix und demnach die Entstehung des Deponiegases (Meima et al., 2008). Trotz alledem kann der Prozess der Deponiegassynthese nach Farquhar und Rovers (1973) in vier Phasen (**Abbildung 4**) unterteilt werden.



**Abbildung 4:** Zeitliche Entwicklung der Gaszusammensetzung in Deponien nach Farquhar und Rovers (1973): Phase I: aerobe Phase; Phase II: anaerobe, saure Gärung; Phase III: anaerobe, instabile Methangärung; Phase IV: anaerobe, stabile Methangärung.