

**Energiebilanz des Transports und der Behandlung von
Abfällen in Müllverbrennungsanlagen und mechanisch
biologischen Anlagen für Tirol**

DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
„Diplomingenieur für Verfahrens- und Umwelttechnik (FH)“

Eingereicht beim: Fachhochschul-Studiengang
„Verfahrens- und Umwelttechnik“

Betreuer: DI Rudolf Neurauter

Betreuer: DI Wolfgang Felbermayer

Von: Michael Krismer

Studienschwerpunkt: Umwelttechnik

Studienbeginn: 1999

Innsbruck, im April 2003

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Innsbruck, 21. April 2003

Inhaltsverzeichnis

Abstract Deutsch	1
Abstract English	2
1 Einführung und Aufgabenstellung	3
1.1 Zielsetzung.....	3
2 Grundlagen und Definitionen	4
2.1 Abfälle	4
2.2 Transport der Abfälle.....	6
2.2.1 Transportmittel.....	6
2.2.1.1 2-Achs-Pressfahrzeug	6
2.2.1.2 3-Achs-Pressfahrzeug	7
2.2.1.3 Hakenfahrzeug	7
2.2.1.4 Hakenfahrzeug mit Anhänger.....	8
2.2.1.5 SLPS-Tragwagen	8
2.2.1.6 Container.....	9
2.2.2 Umladestationen	9
2.2.3 Transportstruktur	10
2.2.3.1 Transport zur Umladestation bzw. Behandlung	10
2.2.3.2 Transport von der Umladestation zur Behandlung.....	11
2.2.3.3 Transport von der Behandlung zur Endlagerung.....	11
2.3 Thermische Behandlung	13
2.3.1 Rostfeuerung.....	13
2.3.1.1 Verfahrensbeschreibung	13
2.3.1.2 Wärmetauscher bzw. Dampferzeuger.....	15
2.3.2 Wirbelschichtverbrennung.....	17
2.3.2.1 Verfahrensbeschreibung	17
2.3.2.2 Wärmetauscher bzw. Dampferzeuger.....	19
2.3.3 Sonstige Systeme	19
2.3.3.1 RCP-Verfahren	19
2.3.3.2 Syncom-Verfahren.....	21
2.3.3.3 Thermoselect-Verfahren	22
2.3.3.4 Konversionsverfahren.....	23

2.4	Mechanisch biologische Behandlung	25
2.4.1	Fa. Thöni – MBA Kufstein	25
2.4.1.1	Verfahrensbeschreibung	26
3	Berechnung der Energieströme.....	30
3.1	Bestimmung des Heizwertes.....	30
3.2	Abfallzusammensetzung	32
3.3	Transport.....	35
3.3.1	Energieverbrauch LKW-Transport.....	35
3.3.2	Energieverbrauch Bahn-Transport.....	36
3.3.3	Energieverbrauch Umladung	37
3.4	Thermische Behandlung	38
3.4.1	Energieverlauf.....	38
3.4.2	Energetische Verluste	39
3.4.2.1	Verbrennungsluftzusammensetzung.....	41
3.4.2.2	Verbrennungsluftmenge.....	42
3.4.2.3	Rauchgaszusammensetzung.....	45
3.4.2.4	Energienutzung	49
3.4.2.5	Anlagenspezifische Verluste.....	52
3.5	Mechanisch biologische Behandlung	54
3.5.1	Mechanisch biologische Aufbereitung	54
3.5.2	Massenbilanz MBA	56
3.5.3	Wirbelschichtverbrennung.....	56
4	Energiebilanz der Behandlungsvarianten	59
4.1	Variante 1 – Rostfeuerungs-MVA innerhalb Tirols	59
4.1.1	Transportsystem.....	59
4.1.2	Verbrennungsbilanz	64
4.1.3	Gesamtbilanz Variante 1	64
4.2	Variante 2 – Rostfeuerungs-MVA außerhalb Tirols.....	66
4.3	Variante 3 – MBA’s mit dezentralen Deponien	69
4.3.1	Transportsystem.....	69
4.3.1.1	Abfallmengen.....	70
4.3.1.2	Energiebilanz	71
4.3.2	Gesamtbilanz Variante 3.....	72

4.4	Variante 4 – MBA's mit einer zentralen Deponie	74
5	Gegenüberstellung der Varianten	76
6	Zusammenfassung	78
7	Abbildungsverzeichnis.....	84
8	Tabellenverzeichnis	85
9	Formelverzeichnis.....	86
10	Abkürzungsverzeichnis	87
11	Literaturverzeichnis	88

Abstract Deutsch

Spätestens ab dem Jahr 2008 ist es durch das Abfallwirtschaftsgesetz 2002 in Tirol nicht mehr erlaubt, unbehandelten Restmüll zu deponieren. Für dessen Behandlung sind zwei Varianten wahrscheinlich:

- Thermische Behandlung der Abfälle ohne Vorbehandlung in einer Rostfeuerungsanlage.
- Mechanisch biologische Vorbehandlung der Abfälle mit anschließender thermischer Behandlung in einer Wirbelschichtverbrennungsanlage.

Mit dieser Diplomarbeit wird eine Energiebilanz dieser zwei Verfahren erstellt, wobei die folgenden Aspekte in die Bilanzierung einfließen:

- Transport des Restmülls und der Behandlungsfractionen
- Energieverlust bei der mechanisch biologischen Vorbehandlung
- Feuerungsverlust bei der Rost- bzw. Wirbelschichtfeuerung
- Heizwert des Restmülls und der Behandlungsfractionen
- Restenergiegehalt des Deponieguts

Durch die Berechnung und Quantifizierung der einzelnen Energieverluste wird ein Vergleich zwischen beiden Verfahren ermöglicht. Zusätzlich zu den beiden Varianten, wird für den Fall der Rostfeuerungsanlage der Einfluss einer Verbringung des Restmülls außerhalb Tirols und für den Fall der mechanisch biologischen Vorbehandlung der Einfluss der Variation der Deponiestandorte kalkuliert. Dies erlaubt die Schlussfolgerungen:

- Durch die mechanisch biologische Vorbehandlung ergibt sich ein Energieverlust von 10% im Vergleich zur reinen thermischen Behandlung.
- Der Transport hat nur einen marginalen Einfluss auf die Energiebilanz.
- Die Verbringung des Restmülls außerhalb Tirols und die Standorte der Deponien beeinflussen die Bilanz nur geringfügig.

Eine Optimierung der Energiebilanz ist somit in erster Linie durch die Wahl des Behandlungsverfahrens zu erreichen.

Abstract English

Starting from the year 2008 it is permitted by the waste management act of 2002 to deposit untreated residual waste in Tyrol at the latest. For its treatment two variants are probable:

- Thermal treatment of the waste without pre-treatment in a grate combustion plant.
- Mechanical biological pre-treatment of the waste with subsequent thermal treatment in a fluidized bed incineration plant.

With this thesis an energy balance of these two procedures is provided, whereby the following aspects are concerned:

- Transport of the residual waste and the treated parts of the residual waste.
- Loss of energy with a mechanical biological pre-treatment.
- Firing loss during the grate combustion and fluidized bed incineration respectively.
- Heat value of the residual waste and the treated parts of it.
- Residual energy content of the dump.

A comparison between both procedures is made possible by the calculation and quantification of the individual losses of energy.

To the two variants, for the case of the grate combustion plant the influence of a shipment of the residual waste out of Tyrol is calculated additionally and so for the case of the mechanical biological pre-treatment the influence of the variation of the dump sites.

This justifies these conclusions:

- A loss of energy of 10% is caused by the mechanical biological pre-treatment compared to the pure thermal treatment.
- Transport has only a marginal influence on the energy balance.
- The shipment of the residual waste out of Tyrol and the dump sites affect the balance only slightly.

An optimization of the energy balance can be attained thus primarily by the choice of the treatment procedure.

1 Einführung und Aufgabenstellung

Durch die Deponieverordnung von 1996¹ ist ab dem 01.01.2004 die Deponierung von Abfällen nur mehr unter Einhaltung strenger Grenzwerte erlaubt. Um diese Grenzwerte einzuhalten, müssen die Abfälle vorbehandelt werden. Da in Tirol noch keine entsprechenden Behandlungsanlagen vorhanden sind, hat der Landeshauptmann mit der Verordnung vom 26.07.2000² von der Befugnis Gebrauch gemacht, diese Frist bis zum 31.12.2008 zu verlängern. Ab diesem Zeitpunkt dürfen dann auch in Tirol Abfälle nicht mehr ohne eine entsprechende Vorbehandlung deponiert werden. Bis spätestens zu diesem Zeitpunkt müssen also entsprechende Behandlungsanlagen errichtet, oder eine Behandlungsmöglichkeit außerhalb Tirols für die Abfälle geschaffen werden.

1.1 Zielsetzung

Für die Vorbehandlung von Abfällen gibt es die verschiedensten Verfahren. Diese Arbeit geht auf einige, in der Praxis bereits verwendeten Verfahren ein und erstellt für diese eine Energiebilanz. Diese Bilanz beschränkt sich jedoch nicht allein auf die Behandlungsverfahren, sondern inkludiert auch den Transport der Abfälle. Für die Berechnungen werden die spezifischen Mengen und die Zusammensetzung des Tiroler Abfalls berücksichtigt. Daraus ergeben sich folgende Zielsetzungen:

- Energetische Betrachtung von verschiedenen Behandlungsvarianten für Restmüll in Tirol
- Erfassung der Hauptenergieströme
- Quantifizierung der beim Transport verbrauchten Energie
- Quantifizierung der nutzbaren Energie
- Vergleich verschiedener Behandlungsvarianten

¹ vgl. BGBl. I 164/1996.

² vgl. LGBl. 53/2000.

2 Grundlagen und Definitionen

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Eigenschaften und Kennzahlen der, in der Folge für die Berechnungen, herangezogenen Systeme definiert und beschrieben. Auf Grund der enormen Vielfalt an theoretisch möglichen Verfahrensvarianten, welche auch größtenteils in der Praxis umgesetzt sind, ist es hierbei unmöglich alle diese zu beschreiben und mit einzubeziehen. Daher werden hier beispielhaft Lösungsmöglichkeiten herangezogen, die einen gewissen Praxisbezug aufweisen und auch bei einer tatsächlichen Umsetzung wahrscheinlich sind.

2.1 Abfälle

Im Wesentlichen handelt es sich bei den zu behandelnden Abfällen um Siedlungsabfälle gemäß Abfallwirtschaftsgesetz 2002.

„Im Sinne dieses Bundesgesetzes sind „Siedlungsabfälle“ Abfälle aus privaten Haushalten und andere Abfälle, die auf Grund ihrer Beschaffenheit oder Zusammensetzung den Abfällen aus privaten Haushalten ähnlich sind;...“³

Weitere Unterscheidungen betreffend der Siedlungsabfälle werden in diesem Gesetz nicht getroffen, in der Praxis spricht man in der Regel hingegen nicht von Siedlungsabfällen, sondern von Restmüll und Sperrmüll.

Unter Restmüll versteht man jene Siedlungsabfälle, die meist periodisch über die öffentliche Müllabfuhr abtransportiert werden, die keine Wertstoffe sind und somit nicht wiederverwertet werden können.

Der Sperrmüll bezeichnet diejenige Fraktion des Restmülls, die auf Grund ihrer „Sperrigkeit“ nicht in die in der Gemeinde üblichen Sammelbehälter passt. Dieser ist daher in seiner Zusammensetzung auch von der Art der üblichen Sammelbehälter abhängig, da zum Beispiel in einem 1100Ltr. Container viel größere Gegenstände Platz haben als in einem 140Ltr. Container und solche somit nur in der Gemeinde mit den kleinen Sammelbehältern als Sperrmüll anfallen.

Ebenfalls zu den Siedlungsabfällen zählen die hausmüllähnlichen Gewerbeabfälle, die in Industrie und Gewerbe oft in erheblichen Mengen anfallen.

³ Abfallwirtschaftsgesetz 2002, BGBl. I Nr. 102/2002, §2 Abs. 4, 1. Abschnitt Allgemeine Bestimmungen.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich jedoch ausschließlich mit dem kommunalen Restmüll, nicht mit Sperrmüll und den gewerblichen Abfällen. Dies hat vorwiegend folgende Gründe:

- Die Zusammensetzung und die Energiegehalte des Restmülls können relativ gut abgeschätzt werden, was für die restlichen Abfälle nicht der Fall ist.
- Gewerbeabfälle und Sperrmüll sind in den betrachteten Behandlungsanlagen meist gesondert, vereinfacht oder auch gar nicht zu behandeln bzw. vorzubehandeln.
- Die Jahresmengen, im Speziellen auch die Entstehungsorte der gewerblichen Abfälle, sind nur unzureichend bekannt und würden somit die Genauigkeit des Ergebnisses verschlechtern.

Für die Bilanz werden die Restmüllmengen des Jahres 2000 herangezogen, die vom Referat Abfallwirtschaft der Abteilung Umweltschutz des Amtes der Tiroler Landesregierung für diese Arbeit zur Verfügung gestellt wurden. Auf Grund des Datenschutzes werden jedoch nur kumulierte Auswertungen angeführt, damit auf die Abfallmengen einzelner Gemeinden kein Rückschluss gezogen werden kann.

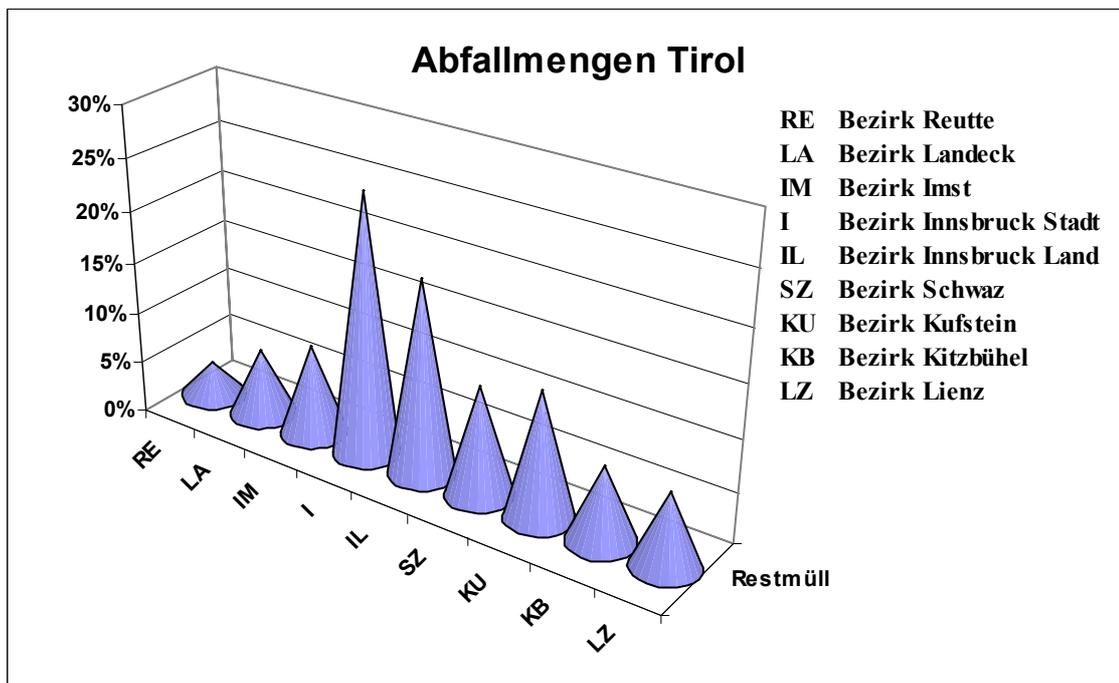


Abbildung 2-1: Abfallmengen der Tiroler Bezirke in Prozent

2.2 Transport der Abfälle

Um den Restmüll in den Anlagen zu behandeln, muss dieser über mehr oder weniger weite Transportstrecken dorthin transportiert werden. Da deren Standorte oft nicht mit den heutigen Deponiestandorten übereinstimmen, müssen hierzu neue Transportsysteme erarbeitet werden. Für eine zentrale Müllverbrennungsanlage ist dies bereits in der MCI Studie „Logistikstudie Abfalltransport Tirol“⁴ geschehen. In der Folge werden die Transportmittel in Anlehnung an diese Studie kurz beschrieben und erforderliche Parameter hinzugefügt.

2.2.1 Transportmittel

Die verschiedenen Transportfahrzeuge sind hier, mit ihren technischen Spezifikationen und Lademengen, welche Großteils aus der oben angeführten MCI Studie übernommen und durch eigene Angaben ergänzt wurden.

2.2.1.1 2-Achs-Pressfahrzeug

Diese Fahrzeuge sind hauptsächlich in städtischen Bereichen im Einsatz, da dort auf Grund enger Gassen, Einfahrten und Straßen ein Sammelfahrzeug mit großer Wendigkeit notwendig ist. Durch die geringe Größe verschlechtert sich jedoch das Verhältnis von Eigengewicht und Lademenge zu Ungunsten von höheren Transportkosten und höherem Energieverbrauch. Die entsprechenden Daten sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Spezifikationen 2-Achs-Pressfahrzeug		
Eigengewicht	Mg	11,0
zulässiges Gesamtgewicht	Mg	18,0
Maximale Nutzlast	Mg	7,0
Mittlere Nutzlast mit Restmüll	Mg	4,190
Verbrauch leer	l/100km	24
Verbrauch voll	l/100km	30

Tabelle 2-1: Kenndaten des 2-Achs-Pressfahrzeugs

⁴ vgl. Logistikstudie Abfalltransport Tirol.

2.2.1.2 3-Achs-Pressfahrzeug

3-Achs-Fahrzeuge haben durch die dritte Achse ein wesentlich höheres zulässiges Gesamtgewicht als 2-Achs-Fahrzeuge. Da sich das Eigengewicht durch einen größeren Aufbau nicht in dem gleichen Maß wie das zulässige Gesamtgewicht ändert, hat dieser Fahrzeugtyp einen besseren Wirkungsgrad. In der Praxis wird daher nach Möglichkeit die Verwendung dieser Fahrzeuge angestrebt. Es gibt sogar bereits erste 4-Achs-Pressfahrzeuge, die diesen Effekt noch besser ausnützen. Hinzu kommen weniger Verschleiß und Reifenverbrauch und somit längere Standzeiten, durch die geringeren Achslasten. Da in Tirol jedoch noch wenige 4-Achs-Pressfahrzeuge im Einsatz sind, wird auf eine detaillierte Beschreibung dieses Typs verzichtet. Die folgende Tabelle zeigt nun, analog zum 2-Achs-Pressfahrzeug, die spezifischen Daten des 3-Achs-Pressfahrzeugs.

Spezifikationen 3-Achs-Pressfahrzeug		
Eigengewicht	Mg	12,9
zulässiges Gesamtgewicht	Mg	26,0
Maximale Nutzlast	Mg	13,1
Mittlere Nutzlast mit Restmüll	Mg	10,145
Verbrauch leer	l/100km	28
Verbrauch voll	l/100km	38

Tabelle 2-2: Kenndaten des 3-Achs-Pressfahrzeugs

2.2.1.3 Hakenfahrzeug

Ein gänzlich anderes Abfalltransportfahrzeug ist das Hakenfahrzeug. Diese Fahrzeuge sind für den Containertransport geeignet und für diesen Zweck mit einem entsprechenden Haken zum Auf- und Abladen von Großraumcontainern ausgerüstet. Der Fahrzeugtyp ist meist ein 3-Achs-Fahrzeug, wobei auch hier der Trend bereits Richtung 4-Achs-Fahrzeuge geht. In der folgenden Tabelle sind die spezifischen Daten dieses Fahrzeuges aufgelistet. Zu den eingesetzten Containerarten wird unter dem Punkt 2.2.1.6 *Container* Näheres erläutert.

Spezifikationen Hakenfahrzeug		
Eigengewicht	Mg	13,7
zulässiges Gesamtgewicht	Mg	26,0
Maximale Nutzlast	Mg	12,3
Mittlere Nutzlast mit Restmüll	Mg	9,133
Verbrauch leer	l/100km	29
Verbrauch voll	l/100km	38

Tabelle 2-3: Kenndaten des Hakenfahrzeugs

2.2.1.4 Hakenfahrzeug mit Anhänger

Das Hakenfahrzeug mit Anhänger ist die optimale Transportweise für Container auf weiteren Straßenstrecken. Durch die Verwendung des Anhängers können 2 Container transportiert werden, außerdem erhöht sich das zulässige Gesamtgewicht auf das Maximum von 40Mg. Die folgende Tabelle zeigt die Spezifikationen dieses Fahrzeugtyps, wie sie für weitere Berechnungen verwendet werden.

Spezifikationen Hakenfahrzeug mit Anhänger		
Eigengewicht	Mg	19,4
zulässiges Gesamtgewicht	Mg	40,0
Maximale Nutzlast	Mg	20,6
Mittlere Nutzlast mit Restmüll	Mg	18,266
Verbrauch leer	l/100km	34
Verbrauch voll	l/100km	44

Tabelle 2-4: Kenndaten des Hakenfahrzeugs mit Anhänger

2.2.1.5 SLPS-Tragwagen

Für den Bahntransport der Großraumcontainer werden bei den ÖBB vorrangig Tragwagen des Typs SLPS eingesetzt. Diese Tragwagen sind mit Drehrahmen, die eine zulässige Lastgrenze von 18Mg aufweisen, ausgestattet. Bei der Verladung eines Containers wird dieser Drehrahmen ausgedreht und der Container darauf geschoben. Anschließend dreht man den Rahmen wieder zurück und sichert diesen. Auf diese Art

und Weise können pro Tragwagen, des in der Tabelle angeführten Typs, 3 Container verladen werden.

Spezifikationen SLPS Tragwagen Typ 472 7 001 – 060		
Eigengewicht	Mg	27,2
Maximale Nutzlast	Mg	53,0
Mittlere Nutzlast mit Restmüll	Mg	27,399
Bruttoenergieverbrauch ⁵	Wh/(Mg*km)	26

Tabelle 2-5: Kenndaten eines SLPS Tragwagens für 3 ACTS

2.2.1.6 Container

In der Abfallwirtschaft sind die verschiedensten Containertypen mit den unterschiedlichsten Abmessungen in Verwendung. Für eine Kombination von Straßen- und Bahntransport sind jedoch lediglich ACTS-Container (Abrollcontainer-Transportsystem) geeignet, da nur diese auf SLPS Tragwagen verladen werden können. In der folgenden Tabelle sind die spezifischen Abmessungen und das Gewicht eines solchen Containers angeführt.

Spezifikationen ACTS Container		
Eigengewicht	Mg	2,682
Länge	m	5,665
Breite	m	2,300
Höhe	m	2,250
Volumen	m ³	29,316

Tabelle 2-6: Kenndaten eines ACTS Containers

2.2.2 Umladestationen

Da die Pressfahrzeuge im Vergleich zu den anderen Fahrzeugtypen, auf Grund ihres schlechten Verhältnisses zwischen Eigen- und Gesamtgewicht, schlechtere

⁵ Telefonische Auskunft von Dr. Punz, ÖBB am 20.02.2003.

Transportkennzahlen haben, ist es bei längeren Transportstrecken sinnvoll, den Abfall in andere Fahrzeuge umzuladen. Zu diesem Zweck benötigt man Umladestationen, wo der Abfall in geeignete Transportcontainer umgeladen wird und wo, durch entsprechende Ausstattung, eine Schädigung der Umwelt ausgeschlossen wird. Natürlich entstehen durch eine Umladung Kosten, Emissionen und ein Energieverbrauch, die so gering als möglich gehalten werden sollen.

Aus diesem Grund wird für die Umladung analog zur MCI Studie lediglich ein Rampensystem mit einem Radlader⁶ vorgeschlagen. Hierbei wird der angelieferte Abfall über eine Rampe, direkt in den Container entleert. Ein Radlader gleicht den Abfall im Container immer wieder an und verdichtet diesen dabei so gut wie möglich. Die dabei erreichbaren Lademengen entsprechen den Werten aus den vorigen Tabellen und sind ebenso aus der angeführten Studie entnommen.

2.2.3 Transportstruktur

Durch die Umladung der Abfälle ergibt sich eine gewisse Struktur beim Transport. So gibt es zum Beispiel definierte Knotenpunkte für den Umschlag des Mülls. Gewisse Transportstrecken sind für einen Bahntransport besser geeignet als für einen LKW-Transport, andere wiederum umgekehrt. Diese Problemstellung wurde bereits in der Logistikstudie Abfalltransport Tirol ausreichend behandelt. Die Ergebnisse bzw. Annahmen sind im Folgenden kurz beschrieben und teilweise ergänzt worden, um ein klar definiertes Ergebnis zu erhalten. Einige Transportsysteme müssen zur Vereinfachung der Berechnungen auf bestimmte Fahrzeugtypen reduziert werden, um die Kalkulierbarkeit zu gewährleisten.

2.2.3.1 Transport zur Umladestation bzw. Behandlung

Dieser Transportabschnitt wird nur vereinfacht betrachtet, da eine exakte Modellierung sehr schwierig ist.

Eigentlich wird der Restmüll von Sammelfahrzeugen direkt beim Erzeuger, in diesem Fall bei den Haushalten, abgeholt. Durch die unterschiedlichsten Siedlungs- und Geländestrukturen ist es kaum realisierbar, diesen Vorgang genau zu beschreiben.

⁶ vgl. Logistikstudie Abfalltransport Tirol, S 17f.

Daher wird der Abfall für die Berechnung dieses Transportabschnitts gesammelt an einer zentralen Stelle der Gemeinde angenommen. Von dort werden die Abfälle mit einem entsprechenden Sammelfahrzeug, dies ist im Fall einer ländlichen Gemeinde ein 3-Achs-Pressfahrzeug und im Fall von Innsbruck ein 2-Achs-Pressfahrzeug, abgeholt. In der Praxis sind natürlich auch in ländlichen Gemeinden 2-Achs-Pressfahrzeuge im Einsatz, jedoch gibt es auch schon erste 4-Achs-Pressfahrzeuge, somit kann im Durchschnitt sicher mit einem 3-Achs-Pressfahrzeug gerechnet werden. Für die Stadt Innsbruck wird ein 2-Achs-Pressfahrzeug angenommen, um der Abholung in engen Gassen und Strassen gerecht zu werden.

Diese Transportfahrzeuge haben eine durchschnittliche Lademenge, woraus sich die zurückzulegenden Kilometer ergeben. Unausgelastete Fahrten werden nicht berücksichtigt.

2.2.3.2 Transport von der Umladestation zur Behandlung

Für diesen Transportabschnitt sollten nur mehr Transportfahrzeuge mit guten Wirkungsgraden eingesetzt werden. Da die Pressfahrzeuge auf Grund des Gewichtes des Aufbaus keinen guten Wirkungsgrad beim Transport besitzen, werden die Abfälle für diesen Transportabschnitt mit einem Radlader in Container verladen und mit einem Hakenfahrzeug mit Anhänger bzw. einem SPLS-Tragwagen der ÖBB weitertransportiert.

Um einen optimierten Transport zu erreichen, ist eine entsprechende Verdichtung der Abfälle in den Containern notwendig. Hydraulische Pressverfahren erreichen zwar sehr hohe Verdichtungsgrade, bedürfen jedoch in der Umsetzung sehr hoher Investitionskosten, deren Amortisierung sehr stark von den Transportpreisen abhängig ist. Deshalb wird hierbei wie unter Punkt 2.2.2 *Umladestationen* bereits beschrieben, die Umladung mittels eines Radladers herangezogen.

2.2.3.3 Transport von der Behandlung zur Endlagerung

Dieser Transportabschnitt sollte ebenso wie der *Transport von der Umladestation zur Behandlung* mit Fahrzeugen eines entsprechend guten Wirkungsgrades erfolgen, daher werden hierbei die gleichen Fahrzeugtypen, wie bei Punkt 2.2.3.2 *Transport von der Umladestation zur Behandlung* zum Einsatz kommen. Es unterscheiden sich jedoch die

erreichten Nutzlasten, da sich vor diesem Transportabschnitt die Eigenschaften der Abfälle durch Behandlung verändert haben.

So ist zum Beispiel beim Transport der Schlacke aus Verbrennungsanlagen der reglementierende Faktor nicht mehr die Verdichtung der Abfälle, sondern die höchst zulässige Nutzlast der Containerfahrzeuge, in diesem speziellen Fall des Hakenfahrzeugs mit Anhänger.

2.3 Thermische Behandlung

Eine Möglichkeit zur Behandlung der unbehandelten bzw. vorbehandelten Abfälle ist die auf thermischem Weg. Anfangs wurden hierbei fast nur Rostfeuerungsanlagen für unbehandelte Siedlungsabfälle und Wirbelschichtanlagen für vorbehandelte Siedlungsabfälle verwendet. Es drängen jedoch mittlerweile auch viele alternative Verfahren auf den Markt, die teilweise bereits großtechnisch umgesetzt werden. Allerdings fehlt hierbei meist noch die Erfahrung aus der Praxis. Im Folgenden werden nun thermische Behandlungsverfahren beschrieben, sowohl die Rost- und Wirbelschichtfeuerung, als auch alternative Verfahren. Die Beschreibungen werden in Anlehnung an das „Praxishandbuch Abfallverbrennung“⁷ von Egon Dirks vorgenommen.

2.3.1 Rostfeuerung

Die Rostfeuerung ist das gebräuchlichste Verfahren in der Abfallverbrennung. Es zeichnet sich vor allem durch Unempfindlichkeit gegenüber der Abfallzusammensetzung sowie der Beschaffenheit und großer Betriebssicherheit aus. Anlagen dieses Typs sind bereits seit vielen Jahren in der Praxis im Einsatz, auch in Österreich.

2.3.1.1 Verfahrensbeschreibung

Die *Abbildung 2-2: Verfahrensschema Rostfeuerung* zeigt ein Schema einer konventionellen Rostfeuerung. Es ist erkennbar, dass der Verbrennungsofen selbst einen sehr kleiner Teil der Anlage darstellt. Den weitaus größeren und auch aufwendigeren Teil nimmt die Abgasreinigung in Anspruch. Auf diesen Teil wird jedoch nur marginal eingegangen, da dieser bei vielen Anlagentypen sehr unterschiedlich ausgeführt ist und daher in die Energiebilanz nur genormt und vereinfacht eingehen kann.

⁷ vgl. Dirks Egon, Praxishandbuch Abfallverbrennung S. 4ff.

Schnitt durch moderne Rostfeuerungsanlage
(Nürnberg, Betriebsbeginn 2001)

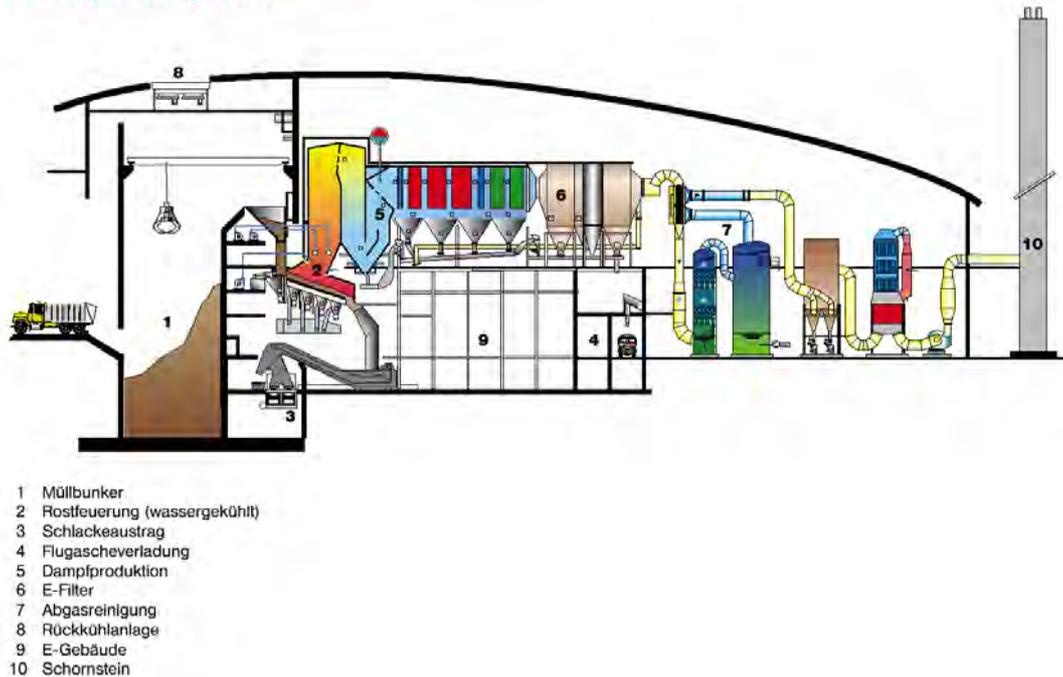


Abbildung 2-2: Verfahrensschema Rostfeuerung⁸

In der *Abbildung 2-3: Rostfeuerung Detaildarstellung* ist der eher kleine Teil des Feuerraums und des Wärmetauschers gesondert dargestellt. Der Abfall wird aus dem Bunker mit einem Kran auf eine Rutsche und dann über eine Schleuse in den Feuerraum eingebracht. Dort erfolgt die Verbrennung des Abfalls in vier Stufen:

- Trocknungsphase: Der Abfall wird erwärmt und das Wasser beginnt zu verdampfen, somit wird der Abfall getrocknet. Temperatur $\leq 250^\circ\text{C}$.
- Entgasungsphase: Ab einer Temperatur von ca. 250°C werden flüchtige Stoffe wie Kohlenwasserstoffe ausgetrieben und Kunststoffe zersetzt.
- Vergasungsphase: Diese Phase beginnt dann ca. ab einer Temperatur von 600°C und ist die eigentliche Verbrennung. Hier werden die Feststoffe oxidiert und die Reaktionsenthalpie freigesetzt.
- Nachbrennzone: In dieser Zone werden die Gase der Entgasungs- und der Vergasungsphase oxidiert. Auch hier wird Energie freigesetzt.

⁸ vgl. vonRoll INOVA, Rostfeuerungen.

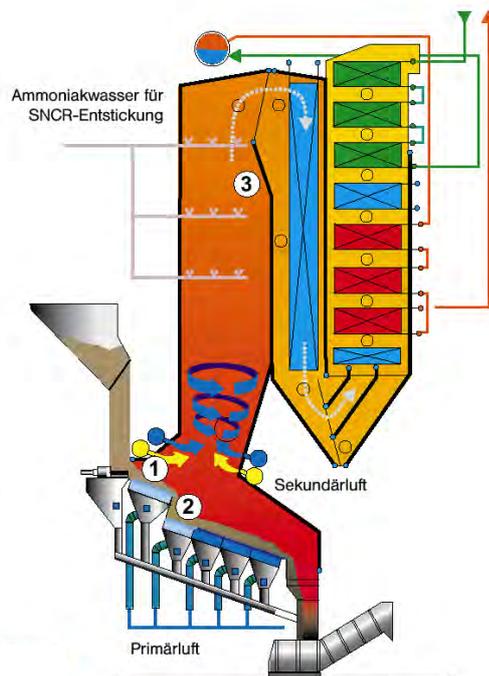


Abbildung 2-3: Rostfeuerung Detaildarstellung⁹

Auf dem Rost ② wird der Abfall durch die Rostbewegung und die Schwerkraft weitertransportiert. Je nach Auslegung ist eine Verweilzeit des Abfalls auf dem Rost von ≥ 1 Stunde gegeben. Zur besseren Nachverbrennung und Verwirbelung der Rauchgase im Verbrennungsraum wird Sekundärluft eingeblasen. Die in der Abbildung ebenfalls dargestellte SNCR-Entstickung dient der Reduktion des NO_x -Gehaltes des Rauchgases. Anschließend wird das heiße Rauchgas ($\geq 850^\circ\text{C}$) durch den Wärmetauscher geleitet.

2.3.1.2 Wärmetauscher bzw. Dampferzeuger

Der Wärmetauscher bei Rostfeuerungsanlagen ist meist 2-bis 4-zügig ausgeführt, wobei der erste Zug leer ist. Die *Abbildung 2-4: Skizze Dampferzeuger* zeigt den grundsätzlichen Aufbau.

⁹ vgl. vonRoll INOVA, Rostfeuerungen.

Dampferzeugerskizze Abfallverbrennungsanlage Frankfurt am Main

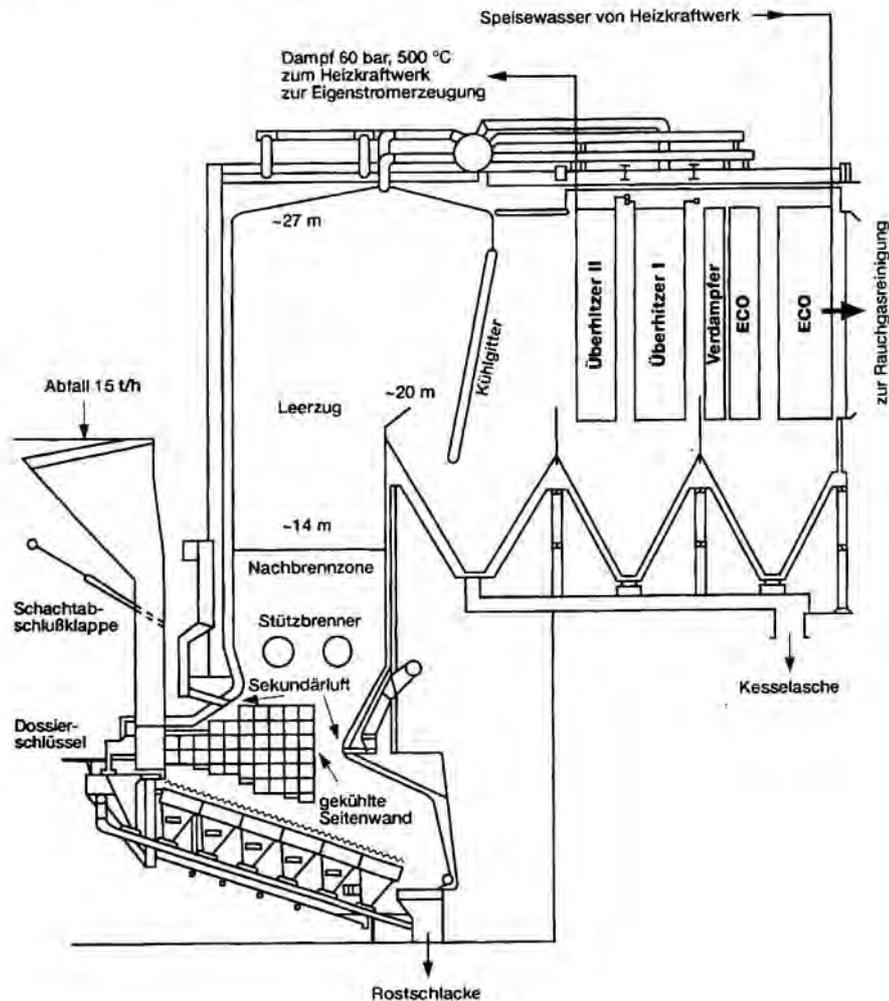


Abbildung 2-4: Skizze Dampferzeuger

Dem heißen Rauchgas zugewandt sind die Überhitzer. Dort wird gesättigter Wasserdampf auf ca. 40bar und 400°C erhitzt. Die Dampfparameter unterscheiden sich bei den einzelnen Müllverbrennungsanlagen oft erheblich, da die gewählten Parameter sehr stark von der Weiterverwendung des Heißdampfes abhängig sind. Mehr dazu unter Punkt 3.4. *Thermische Behandlung*.

In Rauchgasströmungsrichtung, den Überhitzern nachgeschaltet, ist der Verdampfer. Dort wird aus Heißwasser Sattampf erzeugt.

Grundsätzlich ist bemerken, dass die skizzierte Bauweise des Verdampfers nur eine von vielen Möglichkeiten ist, diesen auszuführen.

2.3.2 Wirbelschichtverbrennung

Die Wirbelschichtverbrennung ist neben der Rostfeuerung die zweite thermische Behandlungsvariante, die bereits seit Jahrzehnten in der Praxis angewandt wird. Sie unterscheidet sich jedoch wesentlich von der Rostfeuerung, in der Funktionsweise und den Anforderungen an den Ausgangsbrennstoff. Die Wirbelschichtverbrennung ist sehr gut für hohe Heizwerte geeignet, setzt jedoch eine gewisse Homogenität des Brennstoffes voraus, da ansonsten die Fluidisierung der Wirbelschicht gestört wird.

2.3.2.1 Verfahrensbeschreibung

Die *Abbildung 2-5: Stationäre Wirbelschichtfeuerung* und die *Abbildung 2-6: Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung* zeigen die zwei primär verwendeten Arten von Wirbelschichten. Zum Einen ist dies die stationäre Wirbelschicht, bei der das Bettmaterial zusammen mit dem Brennstoff eingebracht wird und zum Anderen die zirkulierende Wirbelschicht, bei der das Bettmaterial gesondert im Kreislauf geführt wird.

Das inerte Bettmaterial wird bei der Wirbelschichtverbrennung durch das Einblasen von Verbrennungsluft aus dem Düsenboden angehoben und fluidisiert. In diesem Zustand verhält sich die Wirbelschicht ähnlich einer Flüssigkeit und zeichnet sich vor allem durch einen sehr hohen Homogenisierungsgrad aus. Das Bettmaterial umgibt den Abfall von allen Seiten und sorgt für einen guten Wärmeübergang. Die Verwirbelung verhindert stationäre Hotspots, in denen die Verbrennung unkontrolliert heftig abläuft, und sorgt für eine ausreichende Zufuhr an Sauerstoff. Dadurch kann die Verbrennung bei nahezu optimalen Bedingungen geführt werden. Das Bettmaterial besteht meist aus Sand und hat auch eine große Bedeutung als Wärmeträger im Verbrennungsprozess. Es verbraucht sich mit der Zeit durch den Austrag mit dem Rauchgas und der Schlacke und muss laufend erneuert werden. Dies erfolgt durch eine kontinuierliche Zudosierung in den Kreislauf.

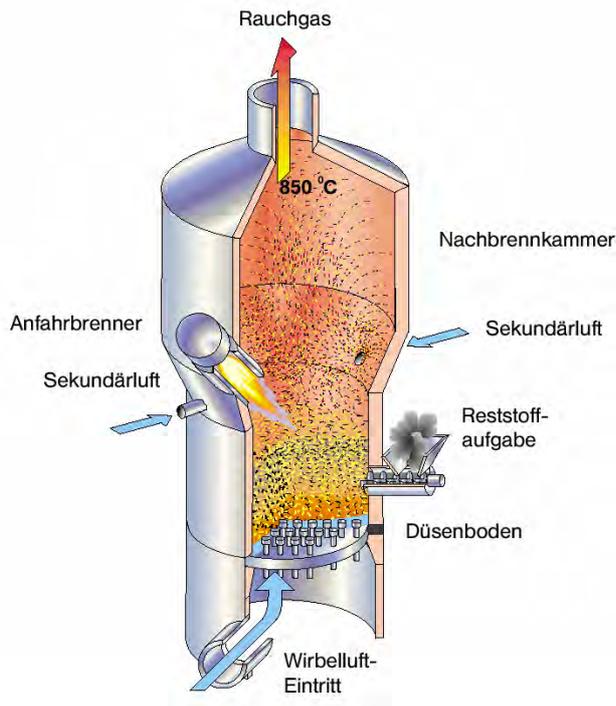


Abbildung 2-5: Stationäre Wirbelschichtfeuerung¹⁰

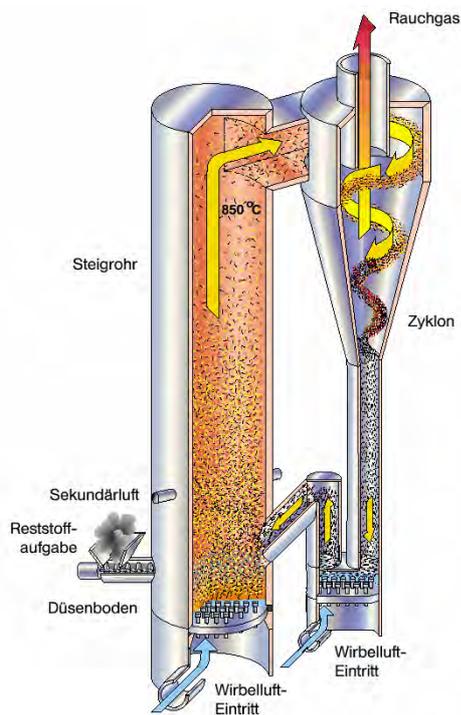


Abbildung 2-6: Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung¹¹

¹⁰ Vgl. vonRoll INOVA, Wirbelschichttechnologien.

¹¹ Vgl. vonRoll INOVA, Wirbelschichttechnologien.

Die Betrachtung dieses Systems weist jedoch sofort auf die Nachteile hin, die bei der Verbrennung von Siedlungsabfällen entstehen können. So sind mit diesem System unmöglich unbehandelte Siedlungsabfälle verbrennbar, da zum Beispiel große und schwere Klumpen die Wirbelschicht stören und diese sogar zum Zusammenbruch der Schicht führen können.

2.3.2.2 Wärmetauscher bzw. Dampferzeuger

Die Wärmetauscher und Dampferzeuger werden im Wesentlichen gleich wie bei der Rostfeuerung im Abgasstrom eingesetzt, jedoch besteht bei der zirkulierenden Wirbelschicht eine weitere Möglichkeit des Wärmeübergangs. Hier kann das über den Zyklon abgeschiedene Bettmaterial und die darin enthaltenen unverbrannten Reststoffe als Wärmeträger genutzt werden. Durch die sehr große spezifische Wärmekapazität im Vergleich zu Rauchgas, ist diese Nutzung sehr ergiebig, beeinträchtigt jedoch die Verbrennung in der Brennkammer, falls das Material dadurch zu stark abgekühlt wird. Daher wird diese Möglichkeit meist nur bei Brennstoffen mit hohem Heizwert eingesetzt. Die Ausführung eines solchen Wärmetauschers ist in der *Abbildung 2-7: Verfahrensschema RCP-Verfahren* angedeutet und wird dort bei der Nachverbrennung des Pyrolysegases eingesetzt.

2.3.3 Sonstige Systeme

Seit den 80-er Jahren wurden von den Herstellerfirmen verschiedenste Varianten von Verbrennungsanlagen entwickelt. Die folgende Aufzählung solcher Verfahren erhebt keinesfalls Anspruch auf Vollständigkeit, soll jedoch einen kurzen Überblick über mögliche Anlagenvarianten bieten.

2.3.3.1 RCP-Verfahren

Das RCP-Verfahren wurde im Hinblick auf eine Verbesserung der Qualität, der bei der Verbrennung von Abfall entstehenden Endstoffe entwickelt. RCP steht für recycled clean products. Das Verfahren besteht aus drei Hauptkomponenten:

- Pyrolysekammer
- Schmelzofen
- Nachbrennkammer (Zirkulierende Wirbelschicht)

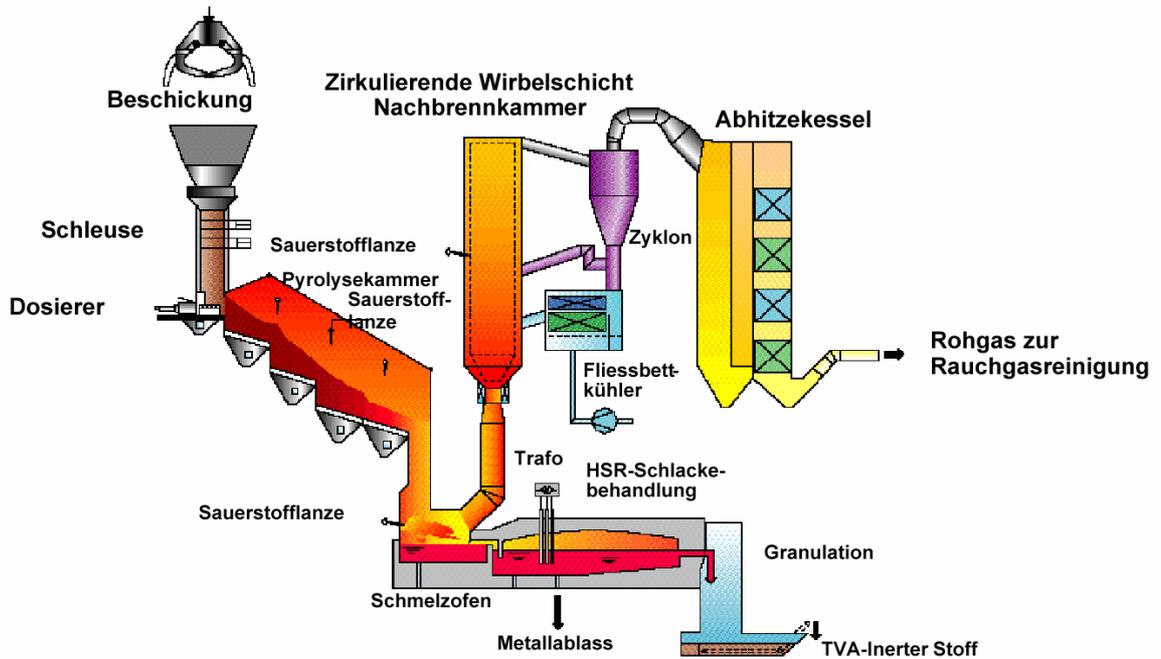


Abbildung 2-7: Verfahrensschema RCP-Verfahren¹²

In der Pyrolysekammer wird der Abfall durch kontrollierte Aufdüsung von Sauerstoff in Pyrolysegas und Pyrolysekoks umgesetzt. Dies geschieht bei einer Temperatur von ca. 900°C. Die Wärmeerzeugung erfolgt durch eine teilweise Verbrennung des Pyrolysegas und kann über die Sauerstoffzufuhr gesteuert werden. Anschließend kommt das Pyrolysegas und der Pyrolysekoks in den Schmelzofen, wo das Pyrolysegas turbulent mit Sauerstoff vermischt wird. Durch die erhöhte Reaktion mit Sauerstoff werden hier Temperaturen bis zu 1400°C erreicht. Diese Temperatur genügt, um die inertesten Anteile der Schlacke zu schmelzen. Durch diese hohe Temperatur verflüchtigen sich Metalle wie Quecksilber, Cadmium und Arsen nahezu vollständig, andere Metalle wie Zink und Blei teilweise. Im unteren Teil des Schmelzofens reichert sich eine Kupfereisen-Legierung an, die von Zeit zu Zeit abgestochen werden kann. Die Schlacke wird in der Folge entweder einer weiteren Veredelung wie z. B. dem HSR-Verfahren

¹² Vgl. vonRoll INOVA, RCP.

(Hochtemperatur-Schmelz-Redox-Verfahren) unterzogen oder einfach durch abrupte Abkühlung verglast. Beim HSR-Verfahren werden die vorhandenen Metalle noch besser abgetrennt, was eine weitere Qualitätssteigerung der Schlacke und der Metalllegierungen mit sich bringt, jedoch mit einem gewissen Energieaufwand verbunden ist. In der verglasten Schlacke sind die noch enthaltenen Metallanteile immobilisiert und dieses Granulat kann in der Bauindustrie wieder verwendet werden. Die Rauchgase werden in der Nachbrennkammer in einer zirkulierenden Wirbelschicht mit gekühltem Sand turbulent gemischt und dadurch auf 900°C abgekühlt. Bei dieser Temperatur erfolgt der vollständige Ausbrand der Abgase. Der aufgeheizte Sand wird mit einem Zyklon abgeschieden und mit einem Fließbettkühler wieder abgekühlt. Der Sand dient somit als Wärmeträger. Die Rauchgase werden anschließend über einen konventionellen Wärmetauscher weiter abgekühlt und den Reinigungsstufen zugeführt.

2.3.3.2 Syncom-Verfahren

Das Syncom-Verfahren koppelt die konventionelle Rostfeuerung mit einer so genannten Fuzzy-Steuerung und mit technischem Sauerstoff angereicherter Verbrennungsluft. Hierbei wird der Rost der Brennkammer in 5 Zonen unterteilt. In den Zonen 2 und 3 wird dem Abfall mit Sauerstoff angereicherte Verbrennungsluft zugeführt. Dadurch erreicht man einen optimierten Ausbrand der Schlacke und eine Reduktion der Abgasmenge. Um den Ausbrand der Abgase zu erhöhen, wird ein Teil des Abgases rezirkuliert und in den Feuerraum wieder eingedüst. Die Steuerung erfolgt mit einer Infrarotkamera mittels Fuzzy-Regelung. Diese Regelung ermöglicht die Steuerung der Anlage auf Grund von „sprachlichen“ Bedienanweisungen, wie zum Beispiel „etwas zu heiß“, „viel weniger“,... . Diese Anweisungen sind individuell gestaltbar und regeln das Prozessverhalten. Die Besonderheit daran ist, dass auch widersprüchliche Anweisungen von der Regelung interpretiert und ausgeführt werden, daher kommt auch der Name (fuzzy = unscharf).

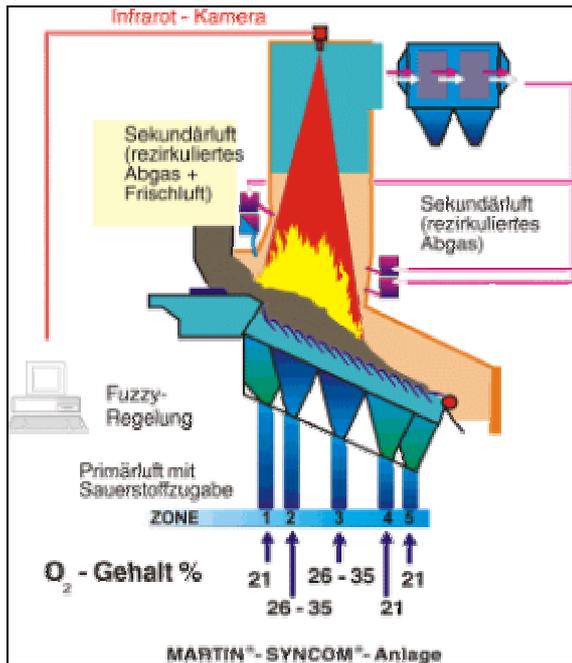


Abbildung 2-8: Verfahrensschema einer Syncom-Anlage

2.3.3.3 Thermostelect-Verfahren

Dieses Verfahren wurde Ende der 80-er Jahre entwickelt und hat die Behandlung der Abfälle in einem Hochtemperaturreaktor und die Produktion von Synthesegas zum Ziel. Die Abfälle werden hierfür auf ca. 10% verdichtet und in einen druckfesten, dichten Vergasungskanal eingebracht, wo sie bei 600°C zuerst getrocknet und anschließend entgast werden. Im Verbrennungsraum wird nun den entstandenen Zersetzungsprodukten gezielt Sauerstoff zugegeben. Durch Zufeuerung wird bei einer Temperatur von bis zu 2000°C energiereiches Synthesegas gebildet. Im oberen Teil dieses Hochtemperaturreaktors werden die restlichen organischen Komponenten des Rauchgases bei ca. 1500°C zerstört und das Synthesegas abgezogen. Im unteren Teil im Homogenisierungsreaktor wird die Schlacke mit Propangasbrennern bei ca. 1600°C-2000°C flüssig gehalten und anschließend mittels Schockkühlung durch Wasser granuliert.

Das abgezogene Synthesegas durchläuft mehrere Reinigungsstufen und kann anschließend als Energieträger weiterverwendet werden. Die folgende Abbildung zeigt das Verfahrensschema einer Thermostelectanlage:

Konversions-Verfahren

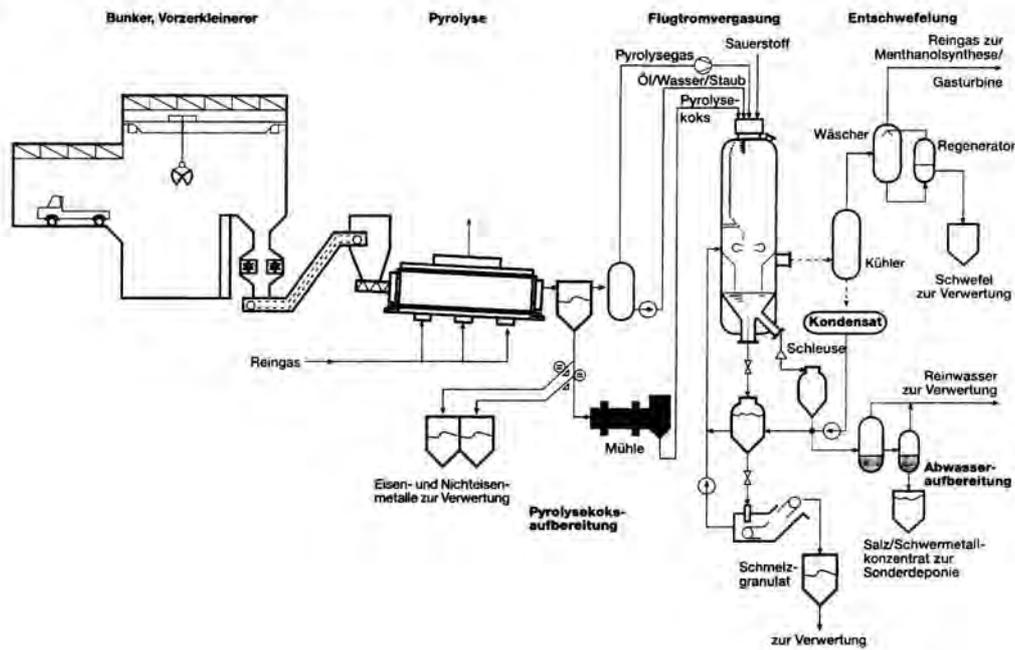


Abbildung 2-10: Verfahrensschema Konversionsverfahren¹⁴

¹⁴ Dirks Egon, Praxishandbuch Abfallverbrennung, Seite 20.

2.4 Mechanisch biologische Behandlung

Neben der rein thermischen Behandlung von Abfällen besteht auch die Möglichkeit den Restmüll mechanisch biologisch zu behandeln und in eine deponiefähige heizwertarme Fraktion und eine heizwertreiche Fraktion für die Wirbelschichtverbrennung aufzuteilen. Die Deponierung des Rottereststoffes (heizwertarme Fraktion, RRS), ist im BGBl. Nr. 164/1996 wie folgt geregelt: „...Abfälle aus mechanisch-biologischer Vorbehandlung, die in gesonderten Bereichen auf einer Massenabfalldeponie abgelagert werden, sofern der aus der Trockensubstanz bestimmte Verbrennungswert (oberer Heizwert) dieser Abfälle weniger als 6000kJ/kg beträgt. Die Vermischung eines Abfalls aus mechanisch-biologischer Vorbehandlung mit heizwertarmen Materialien oder Abfällen unter der Zielsetzung, diesen Grenzwert zu unterschreiten, ist unzulässig.“¹⁵ Diese Regelung erfordert eine mechanische sowie auch eine biologische Vorbehandlung der Abfälle um den genannten Grenzwert von 6000kJ/kg H_o einzuhalten.

2.4.1 Fa. Thöni – MBA Kufstein

Die Fa. Thöni Industriebetriebe G.m.b.H. hat in den Jahren 1997 und 1998 in Zusammenarbeit mit der Montanuniversität Leoben, der Technischen Universität München und der Abfallwirtschaft & Umwelttechnik Ingenieur-Gesellschaft bRmbH Augsburg, unter der Patronanz des Landes Tirol ein Pilotprojekt zu dem Thema „Möglichkeiten und Grenzen des Restmüllsplittings am Beispiel der Abfallbehandlungsanlage Kufstein“ durchgeführt. Mit diesem Projekt wurde versucht, welche Möglichkeiten bei der mechanisch biologischen Vorbehandlung von Siedlungsabfällen gegeben sind.

¹⁵ BGBl. 164/1996, Deponieverordnung, III. Abschnitt §5 Ziffer 7. f).

2.4.1.1 Verfahrensbeschreibung

Das zu Grunde liegende Verfahrensschema ist im Wesentlichen 4-stufig:

- I. Mechanische Zerkleinerung und Siebung des Materials
- II. Dynamische, belüftete und bewässerte Intensivrotte
- III. Quasi-statische, belüftete und bewässerte Nachrotte
- IV. Siebung oder Sichtung des Rotteguts

Die Parameter dieser Stufen wurden während der Versuchsdauer variiert und das gesiebte Rottegut bzw. auch die Zwischenstufen beurteilt. Der mit 6000kJ/kg begrenzte obere Heizwert des Endprodukts zur Deponierung hat sich als der bestimmende Parameter erwiesen.

Es wurden insgesamt 6 Versuche durchgeführt, wobei jedoch im Wesentlichen nur bei einem dieser Versuche die Grenzwerte für die Deponierung mit einer einfachen Siebung eingehalten werden konnten. In den anderen Fällen war zumindest eine verfahrenstechnisch aufwendigere Variante, wie zum Beispiel der Einsatz eines Zick-Zack-Sichters notwendig, um die geforderte Qualität zu erreichen.

In der folgenden Abbildung ist nun das Verfahrensschema der mechanisch biologischen Behandlung der Charge III dargestellt. In dem Schema sind auch die Siebschnitte und die Behandlungsdauer angegeben.

Versuch 3 (Charge III)

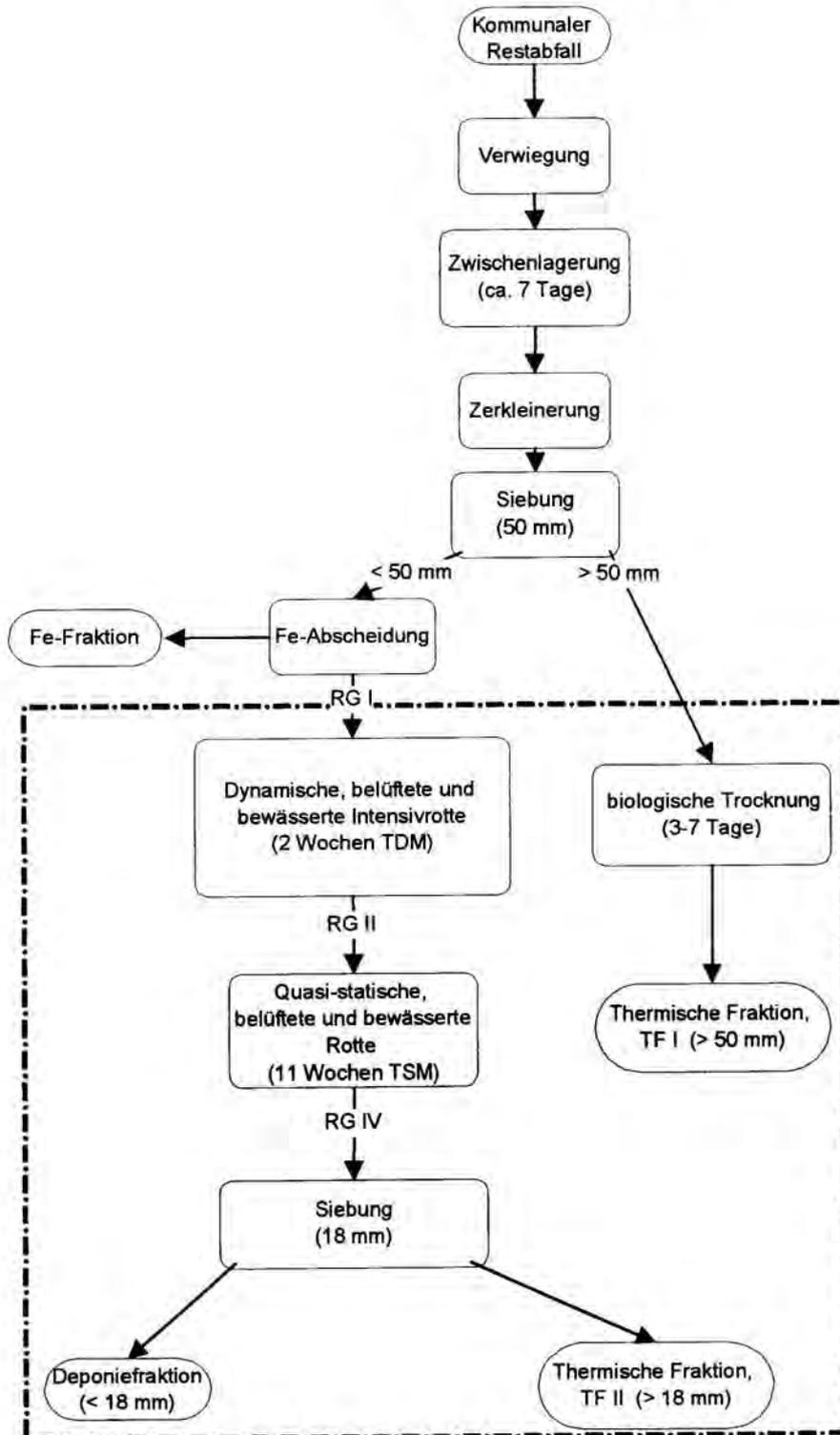


Abbildung 2-11: Verfahrenschema mechanisch biologische Behandlung¹⁶

¹⁶ vgl. Fa. Thöni, Endbericht zum Pilotprojekt, Seite 25.

Der angelieferte Restmüll wird vor Behandlungsbeginn bis zu 7 Tagen zwischengelagert, wobei eine Einstellung des Wassergehaltes optional möglich ist. Anschließend wird das Material mittels eines Zerkleinerungsaggregats für die Siebung vorbereitet. Durch diese Zerkleinerung sollen Säcke und Tüten aufgerissen, Umverpackungen zerlegt und organische Großteile zerkleinert werden. Danach wird der Restmüll mit einem Trommelsieb auf 50mm abgeseibt. Der Siebüberlauf stellt einen Teil des BRAM (Brennstoff aus Müll) dar. Das geseibte Material wird anschließend biologisch behandelt.

Die biologische Behandlung kann im Wesentlichen auf zwei Arten erfolgen:

- aerobe Kompostierung
- anaerobe Vergärung mit anschließender aerober Kompostierung

Die anaerobe Vergärung hat zwar die Vorteile, dass einerseits die Behandlungsdauer verkürzt wird und andererseits auch noch Faulgas, das zur Energieproduktion genutzt werden kann, gewonnen wird, jedoch ist das Verfahren relativ empfindlich gegenüber Störeinflüssen und im Bereich des Restmüllsplittings erst in der Erprobungsphase. Es werden mittlerweile die ersten großtechnischen Anlagen gebaut, welche in naher Zukunft in Betrieb gehen sollen, doch fehlen zur Durchführung einer Energiebilanz die wesentlichen Eckdaten für solche Anlagen.

In der Pilotanlage Kufstein wurde eine aerobe Kompostierung der Siebfraction in zwei Stufen durchgeführt. In der ersten Stufe wird das Rottegut in einer dynamischen, belüfteten und bewässerten Intensivrotte (TDM) für ca. 2 Wochen behandelt. Anschließend wird das Material in einer wöchentlich umgesetzten, belüfteten und bewässerten Rotte für ca. 11 Wochen nachbehandelt. Dann wird das Rottegut auf 18mm abgeseibt, wobei wiederum eine heizwertreiche Fraktion (Siebüberlauf), die dem BRAM zugeführt wird und ein Rottereststoff (RRS), der die Kriterien für die Deponierbarkeit erfüllt, entsteht.

In der *Abbildung 2-12: Trockenmassebilanz der Pilotanlage Kufstein* ist die Massebilanz des Verfahrens dargestellt. So können hierbei ca. 18,5% des angelieferten Abfalls einer direkten Deponierung zugeführt werden. Ca. 65% sind der Verbrennung in einer Wirbelschichtanlage zuzuführen.

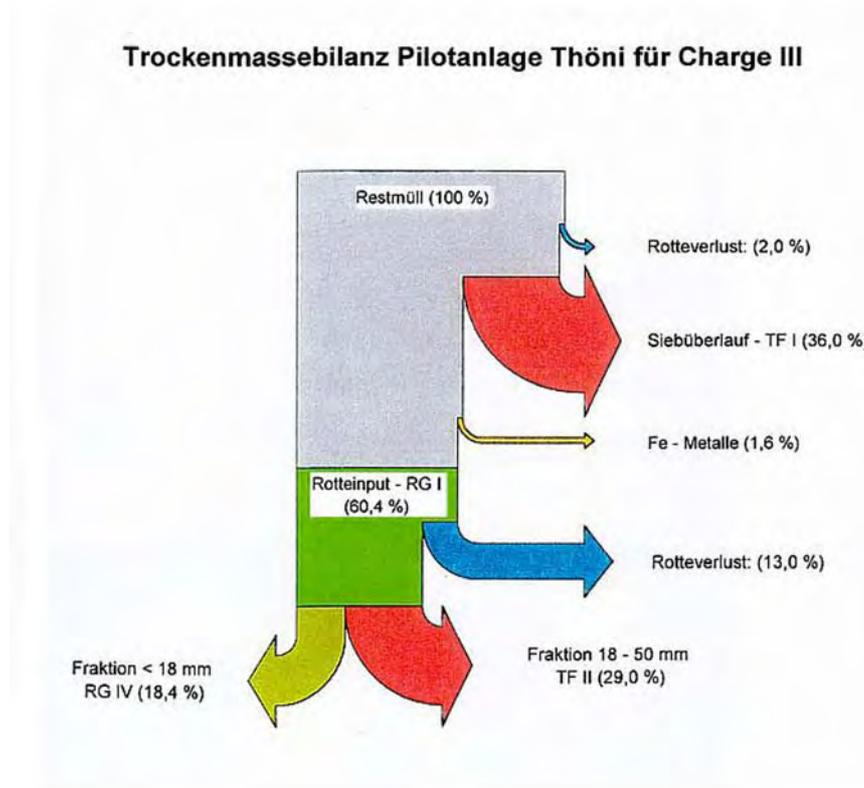


Abbildung 2-12: Trockenmassebilanz der Pilotanlage Kufstein¹⁷

¹⁷ Fa. Thöni, Endbericht zum Pilotprojekt Kufstein, Seite 55.

3 Berechnung der Energieströme

3.1 Bestimmung des Heizwertes

Laut DIN 51900¹⁸ wird der Heizwert mit einer kalorimetrischen Bombe bestimmt. In *Abbildung 3-1: Bombenkalorimeter* ist eine entsprechende Bombe dargestellt. Die Bestimmungen sind Routine und besitzen eine gute Reproduzierbarkeit, jedoch sind sie für Reinstoffe und nicht für ein komplexes Gemisch, wie es Abfall ist, entwickelt worden.

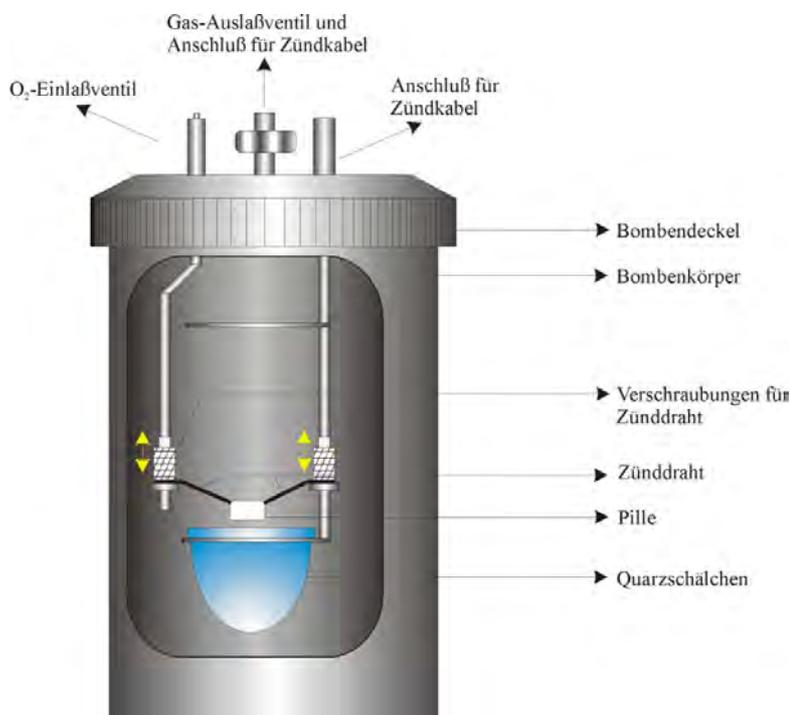


Abbildung 3-1: Bombenkalorimeter

Die Probenmenge, die bei herkömmlichen Kalorimetern eingesetzt wird, liegt im Bereich von einigen Gramm. Dies funktioniert sehr gut bei Reinstoffen, macht jedoch die Heizwertbestimmung von Abfällen relativ schwierig. Hierbei muss die Probe immer wieder homogenisiert und zerkleinert werden (möglichst ohne die Probe dabei zu verändern), damit auch mit der sehr kleinen Probenmenge, die im Kalorimeter zum Einsatz kommt, ein Ergebnis mit möglichst großer Sicherheit bestimmbar ist. Da die Größe der Kalorimeter in der Praxis meist stark limitiert ist und daher diese kleinen

¹⁸ vgl. DIN 51900 Teil1, Seite 2.

Probenmengen unvermeidlich sind, wird die Anzahl der Bestimmungen erhöht um die Ergebnisunsicherheit zu verringern.

Eine Abfallmenge von mehreren kg wird entnommen und bis zur Gewichtskonstanz bei 105°C getrocknet. Anschließend werden Störstoffe wie Mineralien, Glas und Metalle aussortiert und deren Anteil bestimmt. Störstoffe sind hierbei lediglich Stoffe, die keinem Verbrennungsvorgang unterzogen werden können, also Unbrennbares. Dann wird die Probe mit Scheren und Mühlen zerkleinert. Bei der Zerkleinerung ist darauf zu achten, dass durch die Erwärmung, die durch Reibung immer gegeben ist, keine lokalen thermischen Umsetzungsvorgänge von Statten gehen. Die Probe wird soweit verkleinert bis sie im Kalorimeter verwendet werden kann. Laut Norm entspricht dies einer Korngröße von <2mm. Die Probe wird anschließend noch einmal getrocknet, damit die Wasserfreiheit sichergestellt ist.

Die Probe wird in eine entsprechende Form gepresst oder lose im Kalorimeter bei einem Druck von 30bar in einer Sauerstoffumgebung durch den Zünddraht zur Verbrennung gebracht. Die entstehende Wärme wird durch die Messung der Temperaturerhöhung der Bombe bzw. des Tauchbades, in dem sich die Bombe befindet, gemessen.

Mit dieser Methode wird der Heizwert H_o der Probe bestimmt. Dieser Heizwert ist auf die Trockenmasse bezogen und gibt die Energie an, die bei der Verbrennung eines Stoffes frei wird, wenn man die Verbrennungsprodukte wieder auf die Bezugstemperatur zurückkühlt. Angegeben wird meist der spezifische Heizwert H_o in [MJ/kg].

Eine Möglichkeit, den Heizwert zu berechnen, besteht aus der Elementaranalyse. Im Wesentlichen sind die chemischen Reaktionen, die bei einer Verbrennung ablaufen, bekannt. Kennt man die Elementarzusammensetzung des Abfalls, so kann man daraus mit empirischen Formeln den Heizwert berechnen. Eine solche Formel ist zum Beispiel:

$H_o \approx 34,0c + 124,3h + 6,3n + 19,1s - 9,8o$	
H_o	oberer Heizwert $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$
c, h, n, s, o	Massenanteile der Elemente bei der Elementaranalyse

Formel 3-1: Verbandsformel zur Berechnung des H_o aus der Elementaranalyse¹⁹

¹⁹ Cerbe Günter / Hoffmann Hans-Joachim, Einführung in die Thermodynamik, Seite 369.

3.2 Abfallzusammensetzung

Die Zusammensetzung des Restmülls in Tirol wurde unter Anderem bei dem Pilotversuch der MBA Kufstein ermittelt. Die bestimmte Zusammensetzung ist mit den dazugehörigen Heizwerten aus der Literatur in der folgenden Tabelle dargestellt:

Hauptgruppe	Sortierfraktion	Anteil in M-%	Spezifischer Heizwert H_o [MJ/kg]	Beitrag zum H_o gesamt [MJ/kg]
Papier und Pappe	Packpapier und Pappe	11,49%	15,100	1,735
	Druckerzeugnisse	2,12%	14,000	0,297
Metallverpackungen	Ferromagnetische Metallverpackungen	1,70%	0,000	0,000
	Nichtferromagnetische Metallverpackungen	0,80%	0,000	0,000
Glasverpackungen	Glasverpackungen (Hohlglas)	3,20%	0,000	0,000
Leichtverpackungen	Kunststoffverpackungen	7,79%	37,100	2,891
	Verbundstoffverpackungen	2,54%	22,300	0,568
Sonstige Metalle	Ferromagnetische Metalle	0,40%	0,000	0,000
	Nichtferromagnetische Metalle	0,20%	0,000	0,000
Sonstiges Glas	(Flach-) Glas	0,30%	0,000	0,000
Sonstige Kunststoffe	Sonstiger Kunststoff	1,29%	34,700	0,449
Sonstige Verbundstoffe	Materialverbund (zB E-Schrott)	2,54%	22,000	0,559
Biogene Abfälle	Organik Küche	13,60%	19,800	2,693
	Organik Garten	0,62%	16,800	0,104
Textilfraktion	Textilien Bekleidung	5,19%	19,900	1,032
Mineralien	Mineralien	4,20%	0,000	0,000
Holz/Gummi/Leder	Holz/Gummi/Leder	2,14%	23,300	0,498
Windelfraktion	Windeln	13,25%	17,800	2,358
Problemstoffe	Problemstoffe	0,40%	0,000	0,000
Feinmüllfraktion	Feinmüllfraktion <10mm	20,60%	8,800	1,813
Restfraktion	Rest	5,67%	16,000	0,907
	Summe:	100,0%		15,903

Tabelle 3-1: Abfallzusammensetzung im Raum Kufstein²⁰

Mit diesem oberen Heizwert H_o für Restmüll, lässt sich nun der untere Heizwert H_u wie folgt ermitteln:

²⁰ vgl. Endbericht zum Pilotprojekt Kufstein, S. 12.

$$H_u = (H_o - 8,94 \cdot h \cdot 2,442) \cdot (1 - w_{H_2O}) - w_{H_2O} \cdot 2,442$$

H_u unterer Heizwert $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$

H_o oberer Heizwert $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$

w_{H_2O} Masseanteil Wasser

h Masseanteil Wasserstoff im Brennstoff

Formel 3-2: Berechnung des unteren Heizwertes

Bei der Bestimmung des H_o wird einerseits eine getrocknete Probe verwendet, wodurch sich der untere Heizwert durch die Korrektur mit dem enthaltenen Wasser ergibt. Andererseits kondensiert das, bei der Verbrennung, entstandene Wasser bei der Bestimmung wieder aus und erhöht den Messwert. Bei der Verbrennung wird das Wasser jedoch dampfförmig durch den Kamin abgeführt, wodurch sich die Korrektur mit dem Wasserstoffgehalt des Abfalls erklärt.

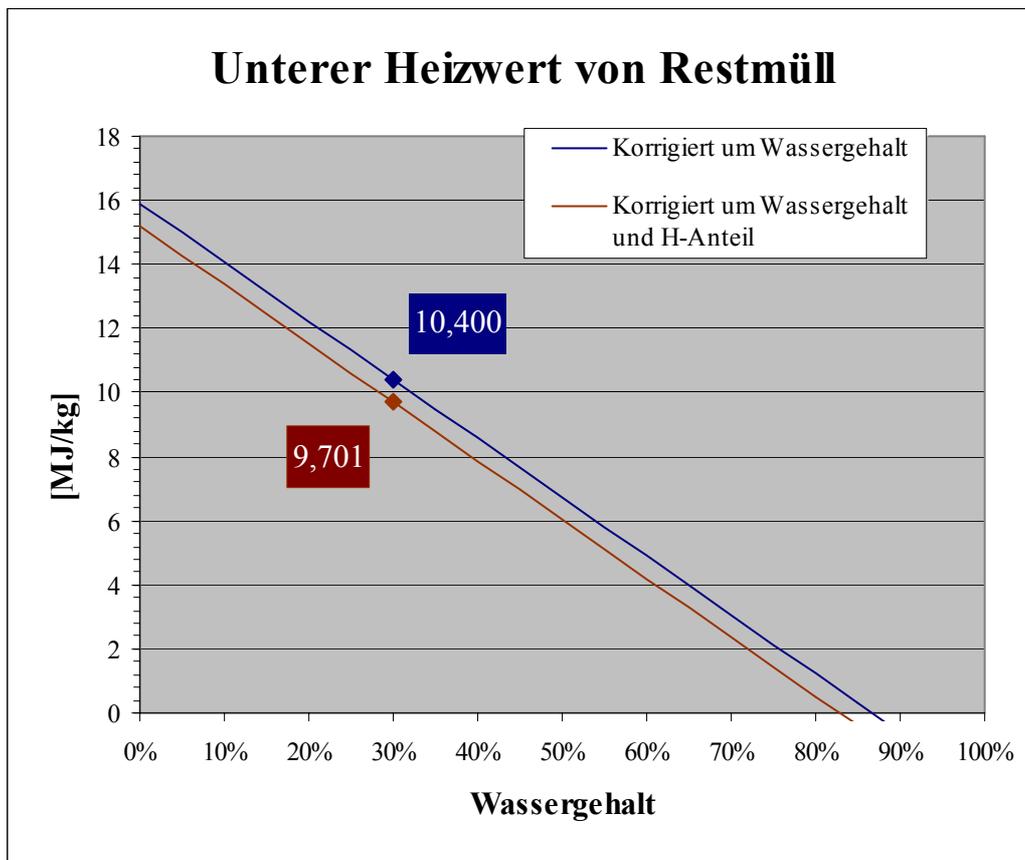


Abbildung 3-2: Unterer Heizwert von Restmüll bei verschiedenen Wassergehalten

Die markierten Werte bei einem Wassergehalt von 30% entsprechen einem Abfall mit üblichem Wassergehalt. In der Literatur finden sich die unterschiedlichsten Heizwerte bei ähnlicher Zusammensetzung. Bei der Bestimmung kondensiert, wie oben bereits erwähnt, das bei der Verbrennung entstandene Wasser wieder aus und gibt die Kondensationswärme an die Umgebung ab. Das Messergebnis lässt sich um diese Kondensationswärme durch die Enthalpiedifferenz des entstandenen Verbrennungswassers korrigieren, jedoch muss hierzu der Wasserstoffgehalt der Probe bekannt sein.

Quelle	H ₂ O	H	H _o MJ/kg	H _u MJ/kg
Ecoling Studie ²¹				10,6
Dirks ²²				10,5
UBA ²³	0,347	0,032	16,9	9,5
TU Dresden ²⁴	0,265	0,034		8,4
Fratzscher ²⁵	0,25	0,036		10,3

Tabelle 3-2: Untere Heizwerte von Restmüll Literaturangaben

Da die Streuung der Werte doch relativ groß ist, wird als Basis für die Energiebilanz der obere Heizwert H_o aus der *Tabelle 3-1: Abfallzusammensetzung im Raum Kufstein* herangezogen. Die genauen Werte für die Energiebilanz ergeben sich aus der *Tabelle 3-6: Zusammensetzung Restmüll und BRAM* und den entsprechenden Berechnungsformeln für den oberen und den unteren Heizwert.

²¹ vgl. Ecoling Studie, S. 6.

²² Dirks Egon, Praxishandbuch Abfallverbrennung Seite 83.

²³ Umweltbundesamt, Entwicklungspotentiale der mechanisch biologischen Abfallbehandlung, Seite 80.

²⁴ TU Dresden, Skript Thermische Abfallbehandlung SS 1999, Seite 14.

²⁵ Fratzscher Wolfgang/Stephan Karl, Strategien zur Abfallenergieverwertung, Seite 92.

3.3 Transport

Im Folgenden wird der Energieverbrauch der einzelnen Transportmittel errechnet.

3.3.1 Energieverbrauch LKW-Transport

Der Energieverbrauch beim LKW-Transport wird am leichtesten durch den Dieserverbrauch ermittelt. Durch diesen kann mit Hilfe des $H_u = 42,1 \text{ MJ/kg}^{26}$ von Diesel auf den tatsächlichen Energieverbrauch geschlossen werden. Mit der Dichte von $0,83 \text{ kg/dm}^{327}$ errechnet sich der Energieverbrauch folgendermaßen:

$$E_{LKW} = \frac{(m_{Ladung} \left(\frac{DV_{voll} - DV_{leer}}{m_{voll}} \right) + DV_{leer}) \cdot H_u \cdot \rho_{Diesel}}{m_{Ladung}}$$

E_{LKW}	Energieverbrauch LKW $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{Mg} \cdot \text{km}} \right]$
m_{Ladung}	geladene Abfallmenge [Mg]
m_{voll}	maximale Abfallmenge [Mg]
DV_{voll}	Dieserverbrauch voll $\left[\frac{1}{\text{km}} \right]$
DV_{leer}	Dieserverbrauch leer $\left[\frac{1}{\text{km}} \right]$
H_u	unterer Heizwert von Diesel $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$
ρ_{Diesel}	Dichte von Diesel $\left[\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \right]$

Formel 3-3: Berechnung Energieverbrauch LKW

In dieser Formel wird der Energieverbrauch, bezogen auf die tatsächliche Lademenge, berechnet. Hierzu wird die Verbrauchskurve zur Vereinfachung linearisiert und lässt sich somit durch den Leer- und den Vollverbrauch charakterisieren.

²⁶ Gieck, Z 10.

²⁷ Gieck, Z 5.

3.3.2 Energieverbrauch Bahn-Transport

Der Energieverbrauch beim Bahntransport wurde einerseits auf Basis des Umweltberichtes der ÖBB von 1998 berechnet und andererseits in einem Telefonat mit Herrn Dr. Punz von den Österreichischen Bundesbahnen abgeklärt. In dem Umweltbericht von 1998 ist der Gesamtenergieverbrauch beim Gütertransport mit $1.119.400 \text{ MWh}^{28}$ angegeben wobei $15.348.000.000 \text{ Mg} \cdot \text{km}^{29}$ zurückgelegt wurden. Mit diesen Zahlen errechnet sich der Energieverbrauch wie folgt:

$$E_{\text{Bahn}} = \frac{E_{\text{ges}}}{m_{\text{ges}} \cdot l_{\text{ges}}} = \frac{1.119.400.000}{15.348.000.000} \cdot 3,6 = 0,263$$

E_{Bahn}	Energieverbrauch Bahn $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{Mg} \cdot \text{km}} \right]$
E_{ges}	Gesamtenergieverbrauch [kWh]
m_{ges}	Transportierte Masse [Mg]
l_{ges}	zurückgelegte Strecke [km]

Formel 3-4: Berechnung Energieverbrauch Bahn

Der zuständige Mitarbeiter der ÖBB hat den bereits in der *Tabelle 2-5: Kenndaten eines SLPS Tragwagens für 3 ACTS* aufgeführten Bruttoenergieverbrauch von $26 \text{ Wh}/(\text{Mg} \cdot \text{km})$ angegeben. Dieser Energieverbrauch bezieht sich auf das Gesamtgewicht des Tragwagens. Der Verbrauch pro transportierter Tonne Abfall errechnet sich somit folgender Maßen:

²⁸ vgl. ÖBB Umweltbericht 1998, S. 35.

²⁹ vgl. ÖBB Umweltbericht 1998, Umweltkennzahlen.

$$E_{\text{Bahn}} = \frac{E_{\text{Brutto}} \cdot (m_{\text{Tara}} + m_{\text{Container}} + m_{\text{Ladung}})}{m_{\text{Ladung}}} \cdot \frac{3,6}{1000}$$

E_{Bahn}	Energieverbrauch Bahn	$\left[\frac{\text{MJ}}{\text{Mg} \cdot \text{km}} \right]$
E_{Brutto}	Bruttoenergieverbrauch	$\left[\frac{\text{Wh}}{\text{Mg} \cdot \text{km}} \right]$
m_{Tara}	Taragewicht Tragwagen	$[\text{Mg}]$
$m_{\text{Container}}$	Taragewicht aller Container	$[\text{Mg}]$
m_{Ladung}	Geladene Abfallmenge	$[\text{Mg}]$

Formel 3-5: Berechnung Energieverbrauch Bahn 2-te Möglichkeit

Berechnet man nun den Energieverbrauch für die entsprechenden Lademengen der transportierten Güter, so ergeben sich folgende Werte:

Energieverbrauch Bahn		
Mittlerer Energieverbrauch mit Restmüll	MJ/(Mg*km)	0,214
Mittlerer Energieverbrauch mit BRAM	MJ/(Mg*km)	0,233
Mittlerer Energieverbrauch mit Schlacke	MJ/(Mg*km)	0,200

Tabelle 3-3: Energieverbrauch Bahn

Vergleicht man diese Werte mit dem Rechenwert aus *Formel 3-4: Berechnung Energieverbrauch Bahn* so ist ersichtlich, dass die Werte in der gleichen Größenordnung liegen und somit eine plausible Grundlage darstellen. In der Folge wird mit den Werten aus *Tabelle 3-3: Energieverbrauch Bahn* weitergerechnet, da hier eine Unterscheidung zwischen den Lademengen möglich ist und auch die Leerfahrten gerechnet werden können.

3.3.3 Energieverbrauch Umladung

Die Umladung wird wie unter Punkt 2.2.2 *Umladestationen* beschrieben relativ einfach durchgeführt, daher fällt dort lediglich der Energieverbrauch des Radladers und des Transports mit dem LKW zur Bahnverladung an.

3.4 Thermische Behandlung

Bei der thermischen Behandlung der Abfälle treten eine Reihe von Verlusten auf, die in die Energiebilanz aufgenommen werden müssen. Viele dieser Verluste sind gar nicht bzw. sehr schlecht berechenbar, da sich zum Beispiel die Kennwerte eines Wärmetauschers über den Jahresverlauf durch Korrosion und Anpackungen derart verändern, dass man hier nur Praxiswerte heranziehen kann. Jedoch sind auch die Praxiswerte zwischen einzelnen Anlagen sehr unterschiedlich, daher werden diese Verluste nach Möglichkeit ausgeschieden und nicht bilanziert.

Alle berechenbaren Werte werden auf die durchschnittlichen Verhältnisse in Tirol berechnet.

Die Berechnungen werden für den Anlagentyp Rostfeuerung und Wirbelschicht durchgeführt.

3.4.1 Energieverlauf

Im Folgenden wird nun der wesentliche Verlauf der Energieströme bei der thermischen Verwertung beschrieben. Die *Abbildung 3-3: Energieflussdiagramm MVA Rugenberger Damm* zeigt die Hauptenergieströme der Anlage. Die größten Verluste sind durch das Abgas und den Eigenenergieverbrauch gegeben.

Wie aber durch die Komplexität der Abbildung bewusst wird, ist der Gesamtverlust durch eine Vielzahl von Einzelverlusten bedingt, die bei einem theoretischen Vergleich nicht berücksichtigt werden können, da sie meist sehr anlagenspezifisch sind und sich sogar bei Anlagen des gleichen Typs unterscheiden.

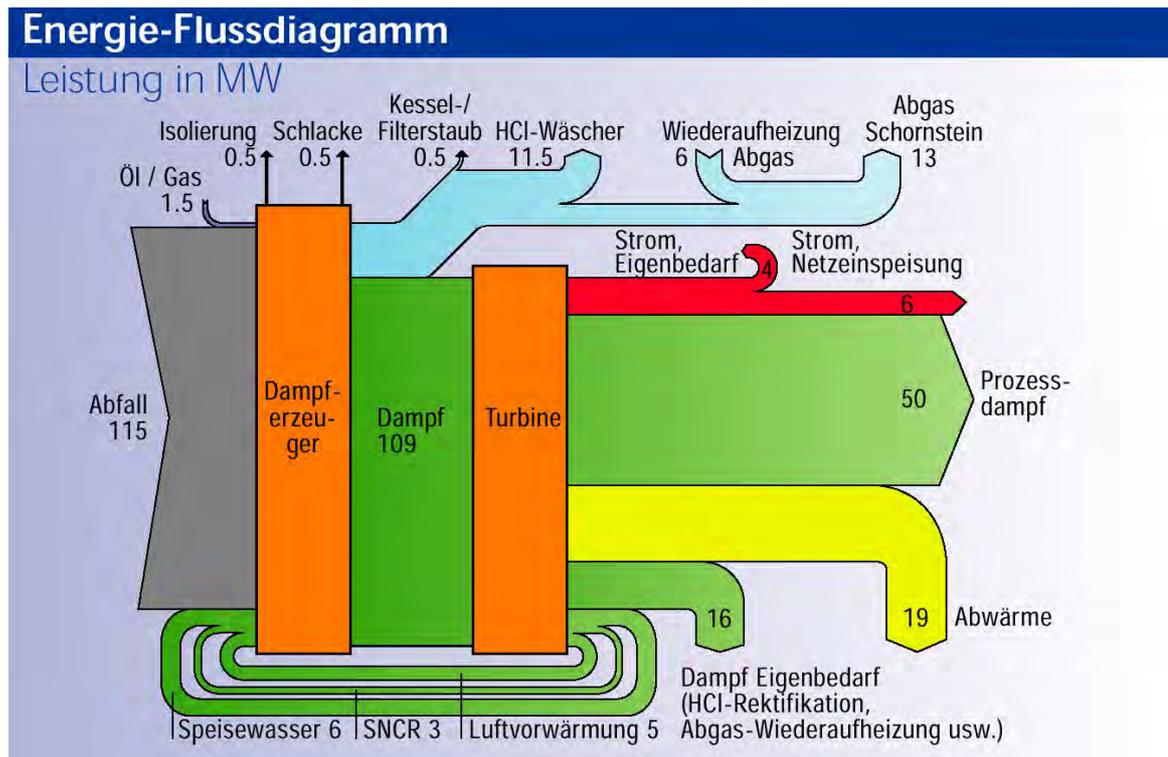


Abbildung 3-3: Energieflussdiagramm MVA Rügenberger Damm³⁰

Eine große Rolle spielt hierbei oftmals die Abgasreinigungsanlage, da gerade der Eigenenergieverbrauch dieses Anlagenteils sehr stark von der Funktionsweise der Anlage beeinflusst wird. So kann zum Beispiel eine abwasserfreie Behandlung der Rauchgase, durch Eindampfen des benötigten Washwassers, einen erheblichen zusätzlichen Energiebedarf mit sich bringen, speziell auch die Nachbehandlung der Schlacke ist sehr energieintensiv.

Einen großen Einfluss hat auch die Art der Energienutzung, da die Umwandlung von thermischer in elektrische Energie einen sehr schlechten Wirkungsgrad besitzt.

3.4.2 Energetische Verluste

Diese Vielzahl von Verlusten, die zum Großteil nur sehr schwer oder sogar überhaupt nicht berechenbar sind, erschweren eine theoretische Bilanzierung. Daher muss dieses komplexe System auf das Wesentliche reduziert werden, um eine Bilanz zu erstellen. Vor allem der Bereich der Abgasreinigung unterscheidet sich bei verschiedenen

³⁰ vgl. Müllverwertung Rügenberger Damm, Umwelterklärung 2000, Seite 15.

Anlagen oft wesentlich. Eines haben jedoch fast alle Verbrennungsanlagen gemeinsam. Das heiße Abgas verlässt den Wärmetauscher bei einer Temperatur von 220°C , was sich in erster Linie durch die Vermeidung von HCl-Korrosion im Wärmetauscher begründen lässt. Während der Rauchgasreinigung findet eigentlich keine Nutzung der im Abgas enthaltenen Restenergie mehr statt, im Gegenteil, bei einigen Varianten der Rauchgasreinigung ist sogar noch ein zusätzlicher Energieinput in das Abgas notwendig. Dies kann zum Beispiel durch eine Entstickung der Rauchgase, nach der Nasswäsche erforderlich sein, da hierzu eine Temperatur von $\sim 350^{\circ}\text{C}$ gegeben sein muss.

Bei dem hier betrachteten System erfolgt die Reduktion des NO_x -Gehaltes bereits im Brennraum, durch die Eindüsung von Harnstoff bzw. Ammoniak gemäß dem SNCR-Verfahren, daher wird angenommen, dass die Rauchgasreinigung energieautark betrieben wird.

Mit diesen Annahmen kann das System der Verbrennung folgender Maßen dargestellt werden:

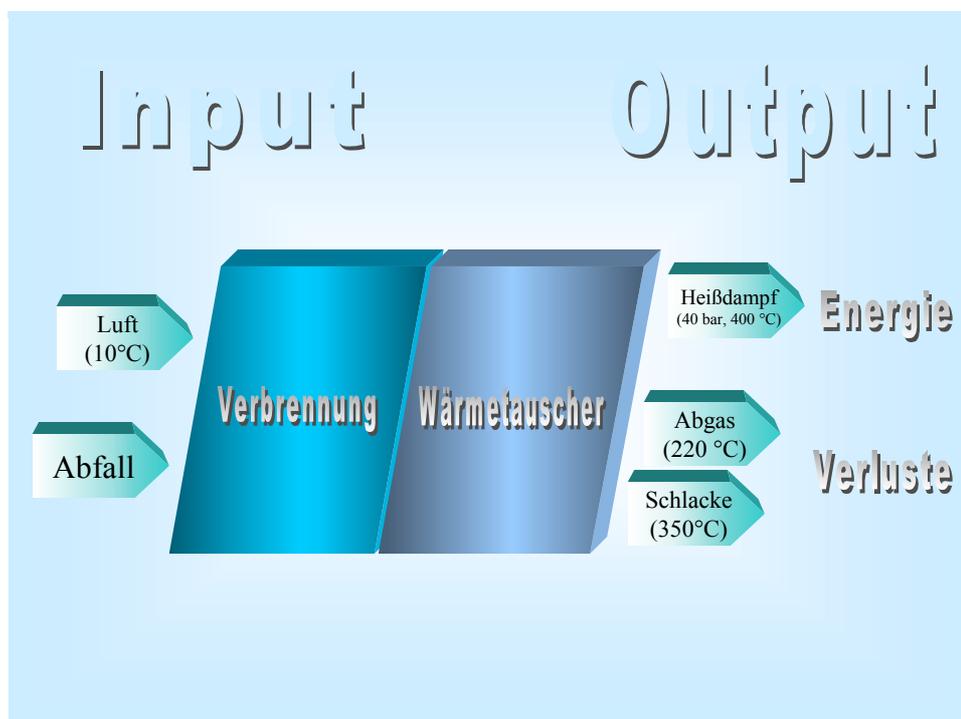


Abbildung 3-4: Reduziertes System Abfallverbrennung

In der Folge werden die in der Abbildung dargestellten Input- und Outputparameter näher beschrieben.

3.4.2.1 Verbrennungsluftzusammensetzung

Die Verbrennungsluft, die zur Verbrennung herangezogen wird, muss je nach Verfahren mehr oder weniger vorgewärmt werden. Dies kostet natürlich Energie, die von der durchschnittlichen Enthalpie der Umgebungsluft abhängig ist. In der *Abbildung 3-5: Luftenthalpie in Innsbruck* ist die Durchschnittsenthalpie der Luft in Innsbruck für definierte Temperaturen abzulesen.

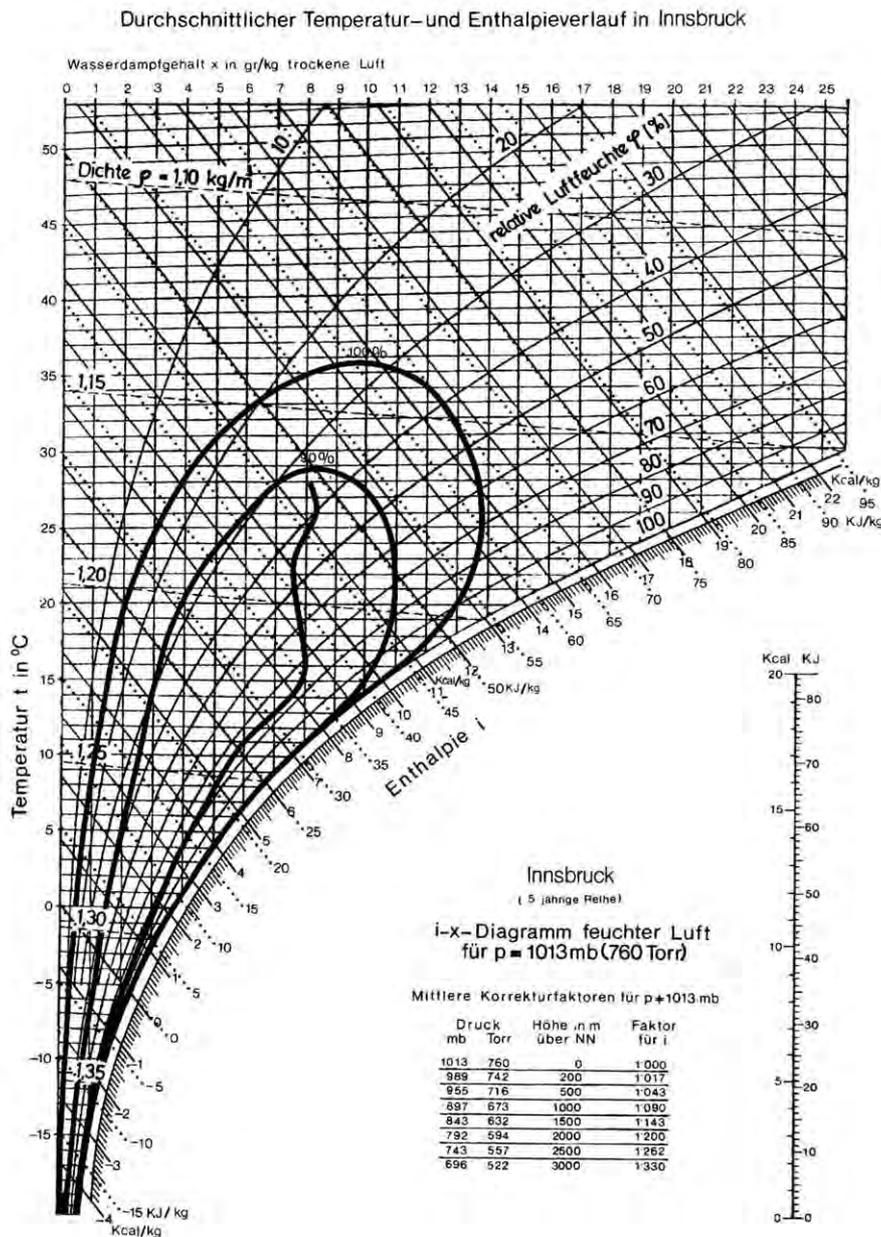


Abbildung 3-5: Luftenthalpie in Innsbruck³¹

³¹ Fachverband der Maschinen- und Stahlbauindustrie, Klimadaten von Österreich, Seite 95.

In dem Mollierdiagramm ist nicht nur die durchschnittliche Luftenthalpie, sondern auch noch Abgrenzungen für die Häufigkeit dieser gegeben.

Kombiniert man nun diese Abbildung mit der Durchschnittstemperatur, so erhält man eine Durchschnittsenthalpie der Luft. Die *Tabelle 3-4: Durchschnittswerte für Innsbruck, Temperatur und Enthalpie* fasst nun die Temperaturen der letzten 5 Jahre und die dazu aus dem Diagramm abgelesene Luftenthalpie und die absolute Feuchte zusammen.

Universität Innsbruck, 1998-2002			
Jahr	Temperatur [°C]	Enthalpie [kJ/kg]	Wasserdampfgehalt [g/kg] Luft _{trocken}
1998	9,8	23,9	5,6
1999	9,5	23,3	5,5
2000	10,5	25,2	5,9
2001	9,7	23,5	5,6
2002	10,6	25,4	5,9
Mittelwert	10,0	24,3	5,7

Tabelle 3-4: Durchschnittswerte für Innsbruck, Temperatur und Enthalpie³²

Somit ergibt sich für Innsbruck bei einer Durchschnittstemperatur von 10°C eine durchschnittliche Wasserfracht von 5,7g pro kg trockener Luft. Da die meisten Tabellen auf trockene Luft bezogen sind, wird in der Folge der Wasserdampf und die trockene Luft gesondert betrachtet und bilanziert.

3.4.2.2 Verbrennungsluftmenge

Die Luftmenge die zur Verbrennung benötigt wird, hängt nicht nur von der Abfallzusammensetzung, sondern auch von der Verbrennungsführung ab. Prinzipiell wird für die Verbrennung mindestens die stöchiometrische Luftmenge nach den

³² Die Temperaturwerte sind den Aufzeichnungen des Instituts für Meteorologie der Universität Innsbruck entnommen. Im Internet abrufbar unter <http://www2.uibk.ac.at/fakultäten/c7>

Reaktionsgleichungen benötigt. Die 2 chemischen Hauptreaktionen bei der Verbrennung sind hierbei:

- $C + O_2 \rightarrow CO_2$ $-\Delta H = 393,52 \text{ kJ/mol}^{33}$
- $4H + O_2 \rightarrow 2 H_2O$ $-\Delta H = 241,83 \text{ kJ/mol}^{34}$

Beide Reaktionen sind exotherm und setzen die angegebenen Energien frei. Nach diesen und anderen Gleichungen lassen sich die stöchiometrisch benötigten Mengen an Sauerstoff berechnen und mit dem Luftsauerstoffgehalt auf die benötigte Luftmenge umlegen.

Diese Luftmenge ist dann die minimale Luftmenge, die zur Verbrennung des Stoffes benötigt wird. In der Praxis wird jedoch mehr Luft benötigt, um eine entsprechende Verbrennung zu erreichen. Das Maß an Mehrluft, das benötigt wird, ist durch die Luftüberschusszahl gegeben, die wie folgt definiert ist.

$\lambda = \frac{L_{vorh.}}{L_{min}}$	
λ	Luftüberschusszahl
$L_{vorh.}$	Luftverbrauch vorhanden $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$
L_{min}	Luftverbrauch minimal $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$

Formel 3-6: Definition der Luftüberschusszahl λ

Daraus folgt, wenn $\lambda > 1$ ist, dann erfolgt die Verbrennung mit Luftüberschuss, ist $\lambda = 1$, dann erfolgt die Verbrennung stöchiometrisch und bei $\lambda < 1$ erfolgt die Verbrennung bei Luftunterschuss, das heißt unvollständig.

In Verbrennungsanlagen wird mit den verschiedensten Luftüberschusszahlen gearbeitet, vor allem wird auch der Luftüberschuss zur Steuerung der Verbrennung herangezogen. Daher ist der Wert nicht konstant und es können nur Mittelwerte zur Berechnung

³³ Cerbe Günter/Hoffmann Hans-Joachim, Einführung in die Thermodynamik, Seite 419.

³⁴ Cerbe Günter/Hoffmann Hans-Joachim, Einführung in die Thermodynamik, Seite 418.

verwendet werden. In *Tabelle 3-5: Luftüberschusszahlen verschiedener Literaturquellen* sind mögliche λ -Werte zusammengefasst.

λ -Werte verschiedener Verbrennungen				
		Minimum	Mittelwert	Maximum
Praxishandbuch Abfallverbrennung ³⁵	Rostfeuerung	1,5		1,8
TU Darmstadt ³⁶		1,6		2,2
J. Seier, FZ Karlsruhe ³⁷	Wirbelschichtfeuerung		1,4	

Tabelle 3-5: Luftüberschusszahlen verschiedener Literaturquellen

Da die Abfallzusammensetzung einer Verbrennungsanlage schwankt und meist auch nicht genau bekannt ist, kann die Mindestluftmenge L_{\min} auch mit einer Näherungsformel berechnet werden.

$$L_{\min} \cong 0,24 \cdot (H_u + 2,25)$$

H_u Unterer Heizwert $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$
 L_{\min} Luftverbrauch minimal $\left[\frac{\text{m}^3_n}{\text{kg}} \right]$

Formel 3-7: Berechnung des Mindestluftbedarfs³⁸

Setzt man in diese Formel den errechneten unteren Heizwert $H_u=9,7\text{MJ/kg}$ vom Restabfall für Tirol ein, so erhält man einen Mindestluftbedarf von $2,87\text{m}^3_n/\text{kg}$ Abfall.

³⁵ Dirks Egon, Praxishandbuch Abfallverbrennung, Seite 103.

³⁶ Prof. Dr.-Ing. Janicka J., FB 16 KVT I, WS 2002/2003 Seite 4.4-1.

³⁷ J. Seier, Wissenschaftliche Berichte FZKA6336, Seite 46.

³⁸ Dirks Egon, Praxishandbuch Abfallverbrennung Seite 103.

3.4.2.3 Rauchgaszusammensetzung

Für die weitere Bilanzierung ist die Kenntnis der Rauchgasmenge und Rauchgaszusammensetzung, die von der eingesetzten Verbrennungsluftmenge und der Zusammensetzung des Brennstoffes abhängig sind, notwendig. Für diese Berechnung muss daher die Elementarzusammensetzung des Abfalls herangezogen werden.

In der *Tabelle 3-6: Zusammensetzung Restmüll und BRAM* sind einige Elementaranalysen von Restmüll und BRAM dargestellt. Auffällig sind die relativ großen Unterschiede bei den unteren Heizwerten wie bereits unter Punkt 3.2 *Abfallzusammensetzung* angesprochen.

So hat ein Restmüll laut einem Skriptum der TU Dresden, bei fast gleichen Gehalten an C, H, N, S und einem höheren O-Gehalt von 3%, jedoch einem um 8% kleineren Wassergehalt, einen um 1,1MJ/kg geringeren Heizwert als der Restmüll der UBA-Literaturquelle. Vergleicht man das mit der *Formel 3-1: Verbandsformel zur Berechnung des Ho* aus der Elementaranalyse so stellt man fest, dass sich eigentlich der zusätzliche O-Gehalt und der verminderte Wassergehalt im Wesentlichen kompensieren müssten und somit der Heizwert übereinstimmen sollte.

Ein Indiz dafür, dass der Heizwert der TU Dresden zu tief ist, gibt die dritte Restmüllanalyse aus Fratzscher. Dort würde eine Erhöhung des C-Anteils um ca. 4%, was gleichbedeutend mit 40g/kg ist, eine Steigerung des Heizwertes um ca. 2MJ/kg bedingen. 40g C entsprechen jedoch ca. 3,3mol C, was mit der Standardbildungsenthalpie von CO₂ eine Steigerung um nur ca. 1,3MJ bedeuten würde. Betrachtet man jedoch den Wassergehalt der UBA-Literaturquelle, so ist dieser doch relativ hoch, was auch durch den berechneten Aschegehalt von nur 23% bestätigt wird. Korrigiert man diesen Wassergehalt auf 30%, so steigt der Aschegehalt auf ca. 27,5% womit der übliche Schlackeanteil von ca. 25% und ein Ascheanteil im Rauchgas von ca. 2% abgedeckt sind.

	UBA ³⁹	TU Dresden ⁴⁰		Fratzscher ⁴¹	DA	
	Restmüll	Restmüll	BRAM	Restmüll	Restmüll	BRAM
C	0,234	0,239	0,41	0,278	0,234	0,381
H	0,032	0,034	0,058	0,036	0,032	0,054
N	0,005	0,006	0,006	0,008	0,005	0,006
S	0,0041	0,001	0,002	0,002	0,0041	0,002
O	0,151	0,189	0,303	0,171	0,151	0,282
H ₂ O	0,347	0,265	0,074	0,25	0,30	0,15
Asche	0,227*	0,261	0,139	0,25	0,2739	0,129
H _u	9,5	8,4	16,1	10,3	9,1*	15,4*

* Eigene Berechnung

Tabelle 3-6: Zusammensetzung Restmüll und BRAM

Setzt man die in dieser Arbeit verwendeten Werte der Spalte DA in die *Formel 3-1: Verbandsformel zur Berechnung des H_o* aus der Elementaranalyse ein, so ergibt sich der obere Heizwert H_o zu 15,091MJ/kg, was sehr gut mit dem Wert von 15,903MJ/kg aus der *Tabelle 3-1: Abfallzusammensetzung im Raum Kufstein* übereinstimmt. Daher wird diese Zusammensetzung für die Energiebilanz herangezogen.

Mit dieser Elementaranalyse kann auch die *Formel 3-7: Berechnung des Mindestluftbedarfs* überprüft werden. Die folgende Tabelle zeigt die einzelnen Verbrennungsreaktionen und gibt die benötigten Sauerstoffmengen an.

Bei dieser „Verbrennungsrechnung“ wird von einer möglichst optimierten Verbrennungsführung ausgegangen. Das heißt, dass der Gehalt an CO sehr klein ist und daher vernachlässigt werden kann. Weiters ist der Gehalt an NO_x so gering als möglich zu halten, sodass auch dieser vernachlässigbar ist. Der N-Gehalt des Brennstoffes wird im Abgas als N₂ abgegeben. Inkludiert man diese Überlegungen und Vereinfachungen, so ergibt sich folgender Mindestluftbedarf:

³⁹ Umweltbundesamt, Entwicklungspotentiale der mechanisch biologischen Abfallbehandlung, Seite 80.

⁴⁰ TU Dresden, Skript Thermische Abfallbehandlung SS 1999, Seite 14.

⁴¹ Fratzscher Wolfgang/Stephan Karl, Strategien zur Abfallenergieverwertung, Seite 92.

Reaktion	Brennstoff pro kg Abfall	Sauerstoff pro kg Abfall	Produkt pro kg Abfall
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	19,092mol C	19,092mol O ₂	19,092mol CO ₂
$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	15,556mol H ₂	7,778mol O ₂	15,556mol H ₂ O
$N \rightarrow N_2$	0,350mol N	0mol O ₂	0,175mol N ₂
$S + O_2 \rightarrow SO_2$	0,125mol S	0,125mol O ₂	0,125mol SO ₂
O ₂ in Verbindungen (wirkt negativ)		4,626mol O ₂	
Summe		22,370mol O₂	

Tabelle 3-7: Mindestsauerstoffbedarf Verbrennung Restmüll

Geht man nun von der Zusammensetzung der trockenen Luft aus, so besteht diese aus 20,946Vol.% O₂ und 78,084Vol.-% N₂, weitere Bestandteile sind 0,934Vol.-% Argon und 0,033Vol.-% CO₂⁴². Da das Molare Volumen der einzelnen Gase nahezu gleich ist, bedeutet das, dass 1 mol Luft 0,209mol O₂ enthält. Aus *Tabelle 3-7*: ergibt sich daher ein Mindestluftbedarf für die stöchiometrische Verbrennung von 106,8mol. Mit dem Molvolumen von 22,41m³/kmol ergibt sich ein Luftbedarf von 2,39m³/kg Restmüll. Vergleicht man nun diesen Wert mit dem Wert der empirischen Näherungsformel *Formel 3-7: Berechnung des Mindestluftbedarfs*, der ca. 2,73m³/kg Restmüll beträgt, so ist ein beträchtlicher Unterschied sichtbar. Dies erklärt vielleicht, dass die Luftüberschusszahlen derselben Quelle wie die der Formel mit $\lambda=1,5-1,8$ doch um einiges geringer sind als die anderer Quellen, die im Bereich von $\lambda=1,6-2,2$ liegen, denn wenn mit einem höheren Mindestluftbedarf gerechnet wird, so bedingt dies natürlich direkt geringere Luftüberschusszahlen (vgl. *Formel 3-6: Definition der Luftüberschusszahl λ*). Daher werden für folgende Berechnungen die höheren Luftüberschusszahlen verwendet.

In der Folge wird für die Verbrennung mit einer Rostfeuerung eine mittlere Luftüberschusszahl von $\lambda=1,7$ angenommen. Mit dieser ergibt sich die in folgender Tabelle angeführte Verbrennungsbilanz:

⁴² Hahne E., Technische Thermodynamik, Seite 277.

Verbrennungsrechnung Rostfeuerung						
	Input			Output		
	<i>Luft</i>			<i>Abgas</i>		
	m ³	kg	mol	mol	kg	m ³
O ₂	38,0291	1,217	0,852	15,6590	0,501	0,351
N ₂	141,7675	3,971	3,178	141,9425	3,976	3,181
Ar	1,6957	0,068	0,038	1,6957	0,068	0,038
CO ₂	0,0599	0,003	0,001	19,1524	0,843	0,429
H ₂ O	1,6642	0,030	0,037	33,8778	0,610	0,759
SO ₂	-	-	-	0,1253	0,008	0,003
Asche	-	-	-	n.b.	0,024	<0,001
Σ	183,2165	5,288	4,107	~212,4528	6,030	4,762
	<i>Abfall</i>			<i>Schlacke</i>		
C	19,4821	0,234	n.b.	0,3896	0,005	n.b.
H	31,7479	0,032	n.b.	0,6350	0,001	n.b.
N	0,3570	0,005	n.b.	0,0071	0,000	n.b.
S	0,1279	0,004	n.b.	0,0026	0,000	n.b.
O	9,4408	0,151	n.b.	0,1888	0,003	n.b.
H ₂ O	16,6572	0,300	n.b.	0,0000	0,000	n.b.
Asche	n.b.	0,274	n.b.	n.b.	0,250	n.b.
Σ	n.b.	1,000	n.b.	n.b.	0,259	n.b.
	Input	6,288		Output	6,288	

n.b. nicht berechnet

Tabelle 3-8: Input – Output Verbrennung Rostfeuerung

Der Sauerstoffgehalt des Abgases liegt laut dieser Berechnung bei 7,37Vol-%, was in dem Bereich liegt, in dem gängige Verbrennungsanlagen betrieben werden. Der Sauerstoffgehalt im Rauchgas wird meist kontinuierlich gemessen und zur Steuerung des Verbrennungsprozesses herangezogen. Die Hauptkomponenten des Rauchgases sind N₂, O₂, CO₂ und H₂O. In der Praxis befinden sich im Rauchgas noch andere Stoffe, die hier nicht angeführt wurden, da sie für die Energiebilanz so gut wie keine Relevanz besitzen. Zu beachten ist jedoch, dass ca. 2-3% der Asche durch die Strömung mit dem

Rauchgas mitgerissen und erst später mit der Rauchgasreinigung wieder abgeschieden werden.

3.4.2.4 Energienutzung

Das entstandene heiße Rauchgas mit einer Temperatur $>850^{\circ}\text{C}$ wird im Wärmetauscher auf 220°C abgekühlt. Hierbei geht die enthaltene Energie auf den Heißdampf über, der dann in der Folge als Wärmeträger fungiert. MVA's arbeiten mit den verschiedensten Dampfparametern, die sehr stark von der Art der Energienutzung abhängig sind. Für die Energienutzung lässt sich feststellen, dass die Wirkungsgrade umso besser sind, umso höher der Druck und die Temperatur des Heißdampfes sind. In der Literatur werden als durchschnittliche Dampfparameter meist 40bar und 400°C angegeben.

Wie bereits in der *Abbildung 3-4: Reduziertes System Abfallverbrennung* dargestellt, kann das System der Verbrennung und Dampfnutzung auf einige wenige Parameter reduziert werden. Dadurch ergibt sich folgende Formel zur Berechnung des nutzbaren Energiegehaltes des Abfalls.

$$E_{\text{nutzbar}} = E_{\text{Abfall}} \cdot (1 - w - nv) - E_{\text{Rauchgas}} - E_{\text{Schlacke}}$$

E_{nutzbar}	nutzbarer Energiegehalt des Abfalls
E_{Abfall}	oberer Heizwert des Abfalls
w	Wassergehalt des Abfalls
nv	Anteil des "Nicht - Verbrannten"
E_{Rauchgas}	Energiegehalt des Rauchgases nach dem Wärmetauscher
E_{Schlacke}	Energiegehalt der Schlacke beim Austrag aus dem Feuerraum

Formel 3-8: Berechnung des Energiegehalts des Heißdampfes

Da der untere Heizwert H_u in den Literaturangaben große Schwankungsbreiten (vgl. *Tabelle 3-2: Untere Heizwerte von Restmüll Literaturangaben*) aufweist, wird für diese Berechnung der obere Heizwert H_o herangezogen und die Verluste durch den Wassergehalt und das entstandene Verbrennungswasser in den Abgasverlust einberechnet. Somit errechnet sich der Energiegehalt des Abfalls einfach zum oberen Heizwert H_o , der um den Wassergehalt des Abfalls (dieser hat ja keinen Heizwert) und den Anteil des Unverbrannten reduziert wird.

Für die Berechnung des Rauchgasverlustes müssen die spezifischen Wärmekapazitäten der einzelnen Rauchgasbestandteile herangezogen werden. In der *Tabelle 3-9: Mittlere spezifische Wärmekapazität der Verbrennungsgase* sind die durchschnittlichen spezifischen Wärmekapazitäten der einzelnen Rauchgasinhaltsstoffe angegeben.

Spezifische Wärmekapazitäten					
	kJ/(kg*K)				
	0°C	100°C	200°C	300°C	400°C
O ₂	0,9084	0,9218	0,9355	0,9500	0,9646
N ₂	1,026	1,031	1,035	1,041	1,048
Ar	0,52				
CO ₂	0,8205	0,8689	0,9122	0,9510	0,9852
SO ₂	0,607	0,637	0,663	0,687	0,707
Asche	0,85				
H ₂ O _{gasförmig}	1,858	1,874	1,894	1,918	1,946

Tabelle 3-9: Mittlere spezifische Wärmekapazität der Verbrennungsgase⁴³

Für die Berechnung der Enthalpiedifferenz des Rauchgases wird der Mittelwert der entsprechenden Temperaturbereiche herangezogen. Die Bestimmung des Heizwertes erfolgt laut Norm bei Raumtemperatur in einem Labor und ist auf 25°C bezogen. Somit ergibt sich der Rauchgasverlust aus dem Produkt der Temperaturdifferenz (220°C und 25°C) und der spezifischen Wärmekapazität. Gesondert betrachtet wird der Wasseranteil im Rauchgas. Bis 100°C ist das Wasser gasförmig als Wasserdampf vorhanden, spätestens dann fängt das Wasser an auszukondensieren und ist als Flüssigkeit zu bilanzieren. Hinzu kommt noch die Kondensationswärme des Wassers. Somit errechnet sich der Rauchgasverlust nach folgender Formel:

⁴³ Gieck, Tabellen Z13, Z6 und Z1-Z4.

$$E_{\text{Rauchgas}} = \sum_i m_i \cdot c_{p_i} \cdot \Delta T + m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (c_{p_{\text{H}_2\text{O}, \text{gasförmig}}} \cdot \Delta T_{\text{H}_2\text{O}, \text{gasförmig}} + r_{\text{H}_2\text{O}} + c_{p_{\text{H}_2\text{O}, \text{flüssig}}} \cdot \Delta T_{\text{H}_2\text{O}, \text{flüssig}})$$

E_{Rauchgas} Energiegehalt Rauchgas
 c_p spezifische Wärmekapazität der Rauchgase bzw. des Wassers
 ΔT Temperaturdifferenz
 $r_{\text{H}_2\text{O}}$ Verdampfungswärme Wasser
 $m_{\text{H}_2\text{O}}$ Masse des Wassers im Rauchgas

Formel 3-9: Berechnung des Energieverlusts durch das Rauchgases

Für die Berechnung des Verlustes durch die Schlacke muss deren Zusammensetzung betrachtet werden, die in der folgenden Tabelle dargestellt ist.

	Schlacke		Filterstaub
	Reimann, Hämmerli	Zevenbergen	
SiO ₂	49,7	48,6	30,0
Al ₂ O ₃	9,5	7,7	13,8
CaO	14,1	10,9	16,9
Na ₂ O	3,2	2,6	3,7
MgO	2,3	2,1	2,3
K ₂ O	1,5	1,2	5,3
Fe ₂ O ₃	6,9	15,4	3,2
SO ₄	0,87	k.A.	10,8
Cl	0,27	k.A.	6,5
C	1,7	k.A.	3,7
Glühverlust	4,4	4,1	k.A.

Tabelle 3-10: Zusammensetzung einer MVA-Schlacke⁴⁴

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass der Hauptbestandteil der Schlacke SiO₂, also im Wesentlichen Sand ist, daher wird für die Berechnung des Energieverlustes auch die

⁴⁴ vgl. Mast et al.

spezifische Wärmekapazität von Sand herangezogen, die laut Gieck⁴⁵ rund 0,80kJ/(kg*K) beträgt. Die Schlacketemperatur am Ende des Rosts wird mit 350°C angenommen und die Enthalpiedifferenz wird wiederum auf die Bezugstemperatur von 25°C nach folgender Formel berechnet.

$$E_{Schlacke} = m_{Schlacke} \cdot c_{p_{Schlacke}} \cdot \Delta T$$

$E_{Schlacke}$	Energiegehalt Schlacke
$m_{Schlacke}$	Schlackemenge
$c_{p_{Schlacke}}$	spezifische Wärmekapazität der Schlacke
ΔT	Temperaturdifferenz

Formel 3-10: Berechnung des Energieverlusts durch die Schlacke

Berechnet man nun den nutzbaren Energiegehalt des Restmülls, so kommt man bei der Rostfeuerung mit einer Luftüberschusszahl $\lambda=1,7$ und einem oberen Heizwert $H_0=15,09\text{MJ/kg}$ auf 7,41MJ/kg.

Das bedeutet, dass man bei dieser Art der Verbrennung, bezogen auf den **H₀** **einen Verlust von ca. 50,9%** und bezogen auf den **H_u** **einen Verlust von ca. 18,9%** zu verbuchen hat. Hierbei sind jedoch noch keine Verluste, wie z.B. durch den Wärmeübergang des Wärmetauschers oder den Eigenenergieverbrauch der Anlage, einberechnet.

D. h., dass der maximale Wirkungsgrad einer Rostfeuerungsanlage bezogen auf den H_u des Abfallinputs, mit den angegebenen Spezifikationen, ~81% nicht übersteigen kann. Sehr wahrscheinlich wird er je nach Wirkungsgrad der eingesetzten Energienutzungssysteme sogar deutlich darunter liegen.

3.4.2.5 Anlagenspezifische Verluste

Zu diesen Verlusten hinzugezählt, müssten nun noch die Verluste des Wärmetauschers und die Verluste bei der Energienutzung gezählt werden. Diese Verluste sind in der Praxis nicht zu vernachlässigen, können jedoch in diesem Fall beim Vergleich

⁴⁵ Gieck, Tabelle Z3.

verschiedener Verfahren gleichgesetzt werden, d. h., dass die Verluste bei der Energienutzung und beim Wärmeübergang für die betrachteten Verfahren im Wesentlichen gleich groß sind. Daher können sie bei der Bilanzierung vernachlässigt werden.

In der Folge wird die theoretisch, zur Nutzung, verfügbare Energie angegeben. In der Praxis hängt der tatsächliche Nutzungsgrad jedoch stark von der Art der Nutzung (Elektrizität, Fernwärme) ab und natürlich auch von den Abnehmern, da meist kein konstanter Wärmebedarf über das gesamte Jahr gegeben sein wird.

3.5 Mechanisch biologische Behandlung

Die mechanisch biologische Behandlung gliedert sich aus energetischer Sicht vor allem in die Bereiche

- mechanisch biologische Aufbereitung
- Verbrennung des BRAM in der Wirbelschichtanlage
- Deponierung des RRS

welche in den folgenden Punkten näher betrachtet werden. Grundsätzlich ist anzuführen, dass vor allem bei der mechanischen aber auch bei der biologischen Behandlung sehr viele verschiedene Systeme in der Praxis zum Einsatz kommen und es daher sehr schwierig ist, genaue Energiebilanzen über diese Verfahren zu erstellen. Daher werden für diesen Bilanzteil Literaturwerte verwendet.

Die größte Rolle spielt der Anteil des BRAM und des RRS an der Massebilanz und der Energiegehalt dieser Massefraktionen bei der Verbrennung und der Deponierung. Hierbei wirkt sich bei der Verbrennung auch die Art der Verbrennungstechnologie, nämlich der Wirbelschichtfeuerung aus, da diese auf Grund des sehr guten Homogenisierungsgrades von Brennstoff und Verbrennungsluft mit einer geringeren Luftüberschusszahl von $\lambda=1,4$ betrieben werden kann.

3.5.1 Mechanisch biologische Aufbereitung

Das Prinzip dieses Verfahrens wurde bereits unter dem Punkt *2.4 Mechanisch biologische Behandlung* beschrieben. Hier sollen die energetischen Aspekte näher betrachtet werden. Bei dem Verfahrensschritt der mechanischen Behandlung wird der Restmüll mit mechanischen Verfahrensmethoden zerkleinert und gesiebt. Hierzu werden fix aufgestellte Maschinen wie Hammer- und Schneidmühlen, sowie Schredder und Trommelsiebe oder Ähnliches eingesetzt. Die Beschickung der Anlagen erfolgt im Regelfall mit Radladern oder gleichwertigen Baumaschinen.

Hierbei fällt vor allem Strom- und Dieserverbrauch an.

Die biologische Behandlung erfolgt bei der Vorgehensweise der Pilotanlage Kufstein zuerst in einer Intensivrotte und anschließend in einer quasi statischen Nachrotte.

Während der Intensivrotte wird das Rottegut täglich umgesetzt, bewässert und belüftet, hingegen erfolgt bei der Nachrotte die Umsetzung nur mehr wöchentlich. Energie wird dabei vor allem bei der Umsetzung in Form von Diesel oder Strom und bei der Belüftung in der Form von Strom verbraucht.

Die folgende Tabelle zeigt Literaturangaben über den durchschnittlichen Energieverbrauch von MBA's.

Energieverbrauch MBA		
	Stromverbrauch kWh/Mg Abfall	Dieserverbrauch kg/Mg Abfall
BEWEND ⁴⁶	~50	~1,3
UBA ⁴⁷	45	1,8
Ökobilanz BASF ⁴⁸	46	0,4

Tabelle 3-11: Literaturangaben Energieverbrauch MBA

Das Umweltbundesamt gibt diesen Energieverbrauch speziell für die Pilotanlage Kufstein an. Daher werden diese Werte für die Berechnung herangezogen. Allerdings kann diese Energie nur bedingt mit dem Heizwert des Abfalls bilanziert werden. Der verbrauchte Diesel kann relativ einfach mit dem H_u von Diesel, der $42,1\text{MJ/kg}$ ⁴⁹ beträgt, in thermische Energie umgerechnet werden. Schwieriger ist dies bei der verbrauchten elektrischen Energie. Diese kann nicht einfach mit thermischer Energie verglichen werden, da die elektrische Energie viel „höherwertiger“ ist. So kann man aus 1MJ elektrischer Energie zwar ohne weiteres 1MJ thermische Energie erzeugen, jedoch nicht umgekehrt. Daher muss dieser Wirkungsgrad bei der Erzeugung von Elektrizität aus thermischer Energie in die Bilanz mit aufgenommen werden.

Bei der Stromerzeugung in kalorischen Kraftwerken wird ein Wirkungsgrad von max. 36-42%⁵⁰ erzielt. Geht man von dem günstigsten Fall mit 42% Wirkungsgrad aus, so entspricht die elektrische Energie von 45kWh der thermischen Energie von 385,7MJ.

⁴⁶ vgl. Brunner et al., BEWEND, Seite 111.

⁴⁷ vgl. UBA, Entwicklungspotentiale der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung, Anhang B.

⁴⁸ vgl. Ökobilanz BASF, Seite 15.

⁴⁹ Gieck, Tabellen Z10.

⁵⁰ Kost T., Skript Thermische Abfallbehandlung, Seite 57.

Somit beläuft sich der Energieverbrauch bei der mechanisch biologischen Abfallbehandlung auf ca. 0,461MJ/kg Restmüll. Das entspricht ca. 5% des H_u von Restmüll.

3.5.2 Massenbilanz MBA

Aus der *Abbildung 2-12: Trockenmassebilanz der Pilotanlage Kufstein* lässt sich ablesen, dass aus einem Mg trockenen Abfall 18,4% RRS und 65% BRAM entstehen. Rechnet man dies mit den angenommenen Wassergehalten um so erhält man folgende Bilanz.

Feuchtmassebilanz MBA		
Input	Output	
Restmüll	BRAM	RRS
1 Mg	0,535Mg	0,152Mg

Tabelle 3-12: Feuchtmassebilanz der MBA

Für die Berechnung wurde für den RRS, ebenso wie für den BRAM, ein Wassergehalt von 15 % angenommen. Die erhaltenen Ergebnisse entsprechen im Wesentlichen der Feuchtmassebilanz der Pilotanlage Kufstein⁵¹.

3.5.3 Wirbelschichtverbrennung

In der Folge wird nun die Verbrennungsbilanz, wie unter dem Punkt *3.4.2 Energetische Verluste* am Beispiel der Rostfeuerung allgemein beschrieben und durchgerechnet, für den Fall der Wirbelschichtfeuerung berechnet. Die Systembeschreibung der nutzbaren Energie und der Verluste sowie die Formeln zu deren Berechnung ändern sich hierbei nicht, lediglich die Zusammensetzung des Abfallinputs, sowie der Luftüberschuss bei der Verbrennung. In der folgenden Tabelle ist die mengenmäßige Input – Output – Bilanz für diese Verbrennung dargestellt. Die Brennstoffzusammensetzung wurde bereits in der *Tabelle 3-6: Zusammensetzung Restmüll und BRAM* dargestellt. Der

⁵¹ vgl. Fa. Thöni, Endbericht Pilotanlage Kufstein, Seite 54.

Luftüberschuss wurde mit $\lambda=1,4$ und der Anteil des Unverbrannten mit nur 1% angenommen, da die bessere Homogenisierung während der Verbrennung eine geringeren Anteil an Unverbranntem bewirkt.

Der Output von 8,091kg pro kg Abfall liegt hier auf Grund des höheren Heizwertes wesentlich höher als bei der Verbrennung von Restmüll, wo dieser nur 6,288kg pro kg Abfall betragen hat.

Verbrennungsrechnung Wirbelschicht						
	Input			Output		
	<i>Luft</i>			<i>Abgas</i>		
	m ³	kg	mol	mol	kg	m ³
O ₂	50,9660	1,630	1,142	14,9561	0,478	0,335
N ₂	189,9949	5,322	4,259	190,1921	5,328	4,263
Ar	2,2726	0,091	0,051	2,2726	0,091	0,051
CO ₂	0,0803	0,004	0,002	31,5087	1,386	0,706
H ₂ O	2,2303	0,040	0,050	37,0488	0,667	0,830
SO ₂	-	-	-	0,0574	0,004	0,001
Asche	-	-	-	n.b.	0,009	<0,001
Σ	245,5441	7,087	5,504	~276,0358	7,964	6,187
	<i>Abfall</i>			<i>Schlacke</i>		
C	31,7459	0,381	n.b.	0,3175	0,004	n.b.
H	53,5151	0,054	n.b.	0,5352	0,001	n.b.
N	0,3984	0,006	n.b.	0,0040	0,000	n.b.
S	0,0580	0,002	n.b.	0,0006	0,000	n.b.
O	17,6180	0,282	n.b.	0,1762	0,003	n.b.
H ₂ O	8,3286	0,150	n.b.	-	-	n.b.
Asche	n.b.	0,129	n.b.	n.b.	0,120	n.b.
Σ	n.b.	1,004	n.b.	n.b.	0,127	n.b.
	Input	8,091		Output	8,091	

Tabelle 3-13: Input – Output Verbrennung Wirbelschicht

Deutlich geringer fällt jedoch der Anteil der zu deponierenden Schlacke aus, der bei ca. 13,5% des Abfallinputs liegt.

Berechnet man nun analog zum Punkt 3.4.2.4 *Energienutzung* die Verluste für diese Art der Verbrennung, so kommt man auf den Betrag für die nutzbare Energie von 13,43MJ/kg BRAM.

Somit hat man bezogen auf den H_o von 19,97MJ/kg einen Verlust von ca. 32,8% und bezogen auf den H_u von 15,43MJ/kg einen Verlust von ca. 13,0%, was deutlich niedriger ist als die Verluste bei der Rostfeuerung.

4 Energiebilanz der Behandlungsvarianten

Im folgenden werden die Energiebilanzen für verschiedene Behandlungsvarianten des Bundeslandes Tirol gezogen. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um diese 4 Varianten:

- Rostfeuerungs-MVA innerhalb Tirols (Variante 1)
- Rostfeuerungs-MVA außerhalb Tirols (Variante 2)
- MBA's mit dezentralen Deponien und einer Wirbelschicht-MVA in Tirol (Variante 3)
- MBA's mit einer zentralen Deponie und einer Wirbelschicht-MVA in Tirol (Variante 4)

4.1 Variante 1 – Rostfeuerungs-MVA innerhalb Tirols

In der Variante 1 wird der gesamte Restmüll Tirols in einer zentralen Rostfeuerungsanlage im Raum Kundl behandelt. Der Restmüll kann ohne Vorbehandlung in dieser Anlage verfeuert werden, daher sind lediglich folgende Punkte bei der Energiebilanz zu betrachten:

- Energieverbrauch beim Transport der Abfälle
- Energienutzung bei der Verbrennung der Abfälle
- Restenergiegehalt der Schlacke

Für die Berechnung wird von der kommunalen Restabfallmenge des Jahres 2000 ausgegangen.

4.1.1 Transportsystem

Der Transport erfolgt über Umladestationen, wo der Restmüll für den Weitertransport in ACTS-Container umgeladen wird. Die Lage dieser Umladestationen wurde der

Logistikstudie Abfalltransport Tirol⁵² entnommen. In der *Abbildung 4-1: Variante 1* Lage der Umladestationen und der MVA sind die Lage der Umladestationen und der Rostfeuerungsanlage dargestellt.

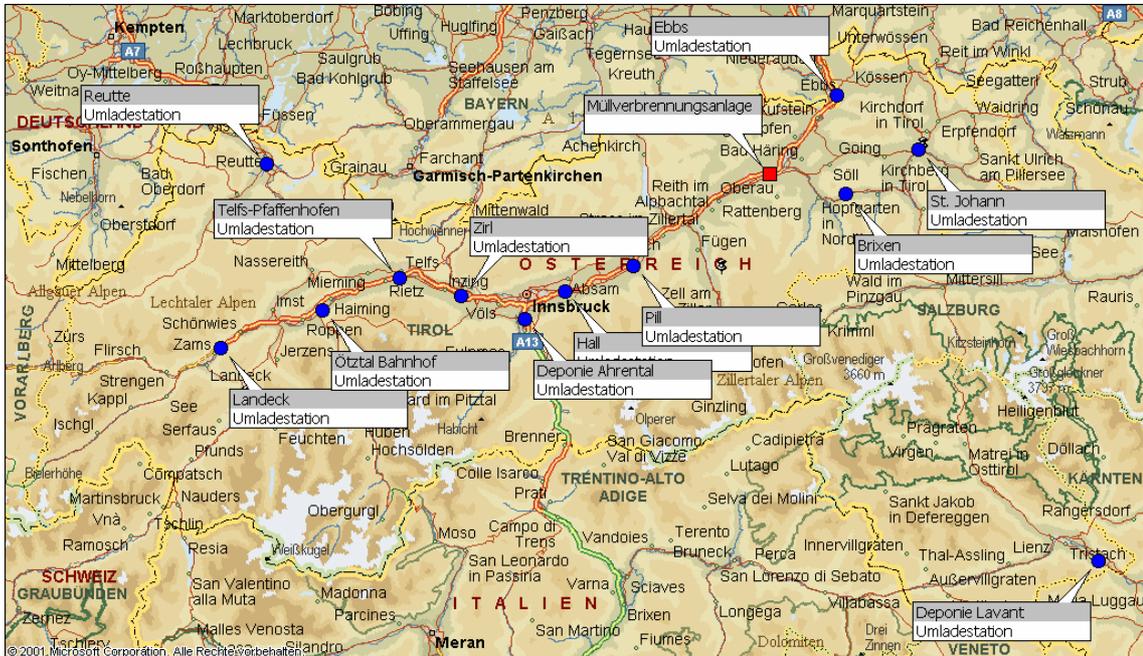


Abbildung 4-1: Variante 1 Lage der Umladestationen und der MVA

Es wurde hierbei jene Variante der Logistikstudie herangezogen, welche die besten transportspezifischen Kenndaten aufweist, um einem optimierten Transport möglichst nahe zu kommen. Die folgende Abbildung zeigt die Einzugsgebiete der Umladestationen, die sich aus einem optimierten Transport ergeben. Hierbei begrenzen die blauen Linien in Kombination mit der Landesgrenze das jeweilige Einzugsgebiet. Die Abgrenzung der Einzugsgebiete erfolgte auf Grund einer Kosten- und Emissionsoptimierung des Transportes. Mit dieser Aufteilung lässt sich der Energieverbrauch für jede Gemeinde einzeln berechnen.

⁵² vgl. MCI Studie, Logistikkonzept Abfalltransport Tirol.

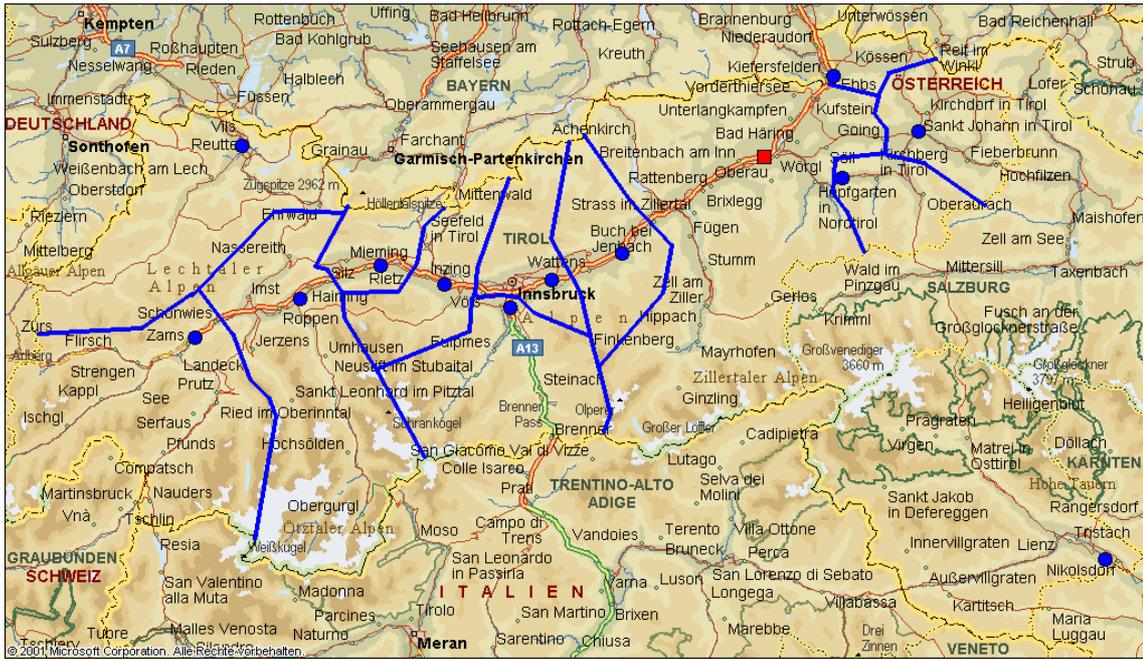


Abbildung 4-2: Variante 1 Einzugsgebiete der Umladestationen und der MVA

Die folgende Tabelle zeigt die Transportmatrix, in der die spezifischen Energiedaten der verwendeten Transportfahrzeuge angeführt sind. Weiters sind die Transportfahrzeuge Entsorgungsgebieten bzw. einzelnen Gemeinden oder Umladestationen zugewiesen. Damit ist der Transport für alle Gemeinden eindeutig definiert.

In dieser Tabelle ist der Energieverbrauch in MJ/(Mg*km) angegeben. Diese Einheit enthält einerseits den Energieverbrauch des Transportmittels in MJ/km, welcher sich durch den Dieserverbrauch pro km errechnet und somit je nach Lademenge unterschiedlich ist, und andererseits die durchschnittliche Lademenge in Mg. Da die zurückzulegenden km von der Lademenge des Transportfahrzeugs abhängig sind, ergibt sich ein Zusammenhang zwischen Transportgut und spezifischem Energieverbrauch. So ergeben sich bei einem Transportvolumen von 100Mg*km, bei einer Lademenge von 10Mg, Leer- und Vollfahrten von jeweils 10km und bei einer Lademenge von 20Mg, Leer- und Vollfahrten von jeweils 5km. Das Transportvolumen unterscheidet sich hierbei jedoch nicht. Da sich der Energieverbrauch sowohl der Leerfahrt als auch der Vollfahrt aus dem Produkt des spezifischen Energieverbrauchs in MJ/(Mg*km) und dem Transportvolumen in Mg*km ergibt, unterscheidet sich nicht nur der spezifische Energieverbrauch der Vollfahrt durch die Lademenge, sondern auch derjenige der Leerfahrt. Daher unterscheidet sich dieser für eine Leerfahrt eines Hakenfahrzeugs mit

Hänger beim Transport von Restmüll von dem einer Leerfahrt desselben Fahrzeugs beim Transport von Schlacke.

Transport- abschnitt	Entsorgungsgebiet	Transportmittel	Transportgut	MJ/(Mg*km)) leer	MJ/(Mg*km)) Voll
Gem. bis zur US	Innsbruck	2-Achs- Pressfahrzeug	Restmüll	2,038	2,343
	Rest von Tirol	3-Achs- Pressfahrzeug	Restmüll	0,982	1,252
US bis zum Bhf.	Umladestation Ahrental	Hakenfahrzeug	Restmüll	1,130	1,390
	Rest	Hakenfahrzeug + Hänger	Restmüll	0,662	0,835
US bzw. Bhf. bis zur MVA	Landeck, Ötztal, Pfaffenhofen, Zirl, Ahrental, Hall, Reutte, Lavant	Hakenfahrzeug + Hänger	Restmüll	0,662	0,835
	Pill, MVA, Brixen, Ebbs, St. Johann	SLPS	Restmüll	0,120	0,214
MVA bis zur Deponie	gesamt Tirol	Hakenfahrzeug + Hänger	Schlacke	0,584	0,757
	gesamt Tirol	SLPS	Schlacke	0,106	0,200

Tabelle 4-1: Transportmatrix Variante 1

Berechnet man mit den entsprechenden Abfallmengen und den zurückgelegten Kilometern die dabei verbrauchte Energie, so ergibt sich folgende Aufteilung auf die einzelnen Transportabschnitte. Zur Optimierung des Transportes werden die Leercontainer für den Rücktransport der Schlacke zur Deponie genutzt. Bei dieser Variante wird angenommen, dass nur mehr eine Deponie in Tirol in Betrieb sein wird und die gesamte Schlacke dorthin transportiert wird. Da die Deponie Ahrental die größte Deponie in Tirol ist, zentral liegt und auch in Zukunft über genügend Deponievolumen verfügt, wird diese dafür in Betracht gezogen.

Betrachtet man nun die Anteile der einzelnen Transportabschnitte am Gesamtenergieverbrauch des Transportes, so wird deutlich, dass die Abholung der Abfälle mit Pressfahrzeugen den evident größten Anteil ausmacht. Den zweitgrößten Einfluss hat der Transportabschnitt von der Umladestation zur Verbrennungsanlage. Dies wird durch *Abbildung 4-3* illustriert.

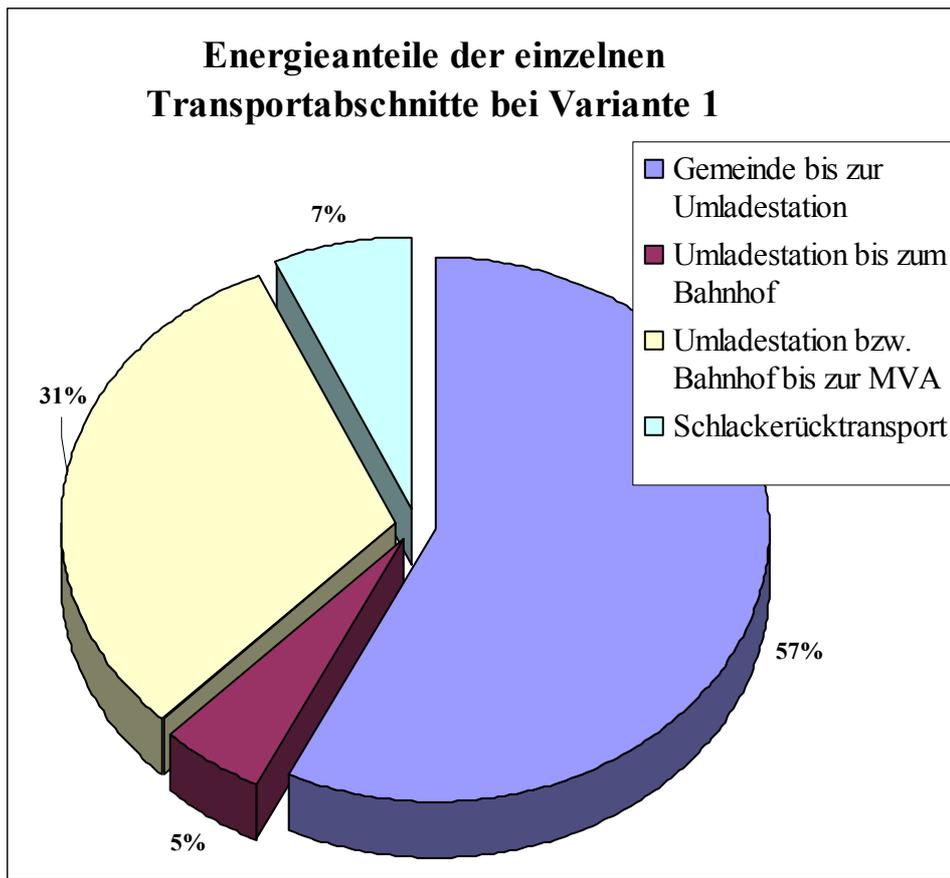


Abbildung 4-3: Energieanteile der einzelnen Transportabschnitte Variante 1

Auffällig ist auch die starke Reduktion des Energieaufwandes beim Transport durch die thermische Behandlung. Nimmt der Transport von der Umladestation zur MVA noch 31% des Gesamtaufwandes in Anspruch, sind es beim Schlackerücktransport nur mehr 7%. Dies ist einerseits auf die Mengenreduktion durch die Verbrennung und andererseits auf die, im Vergleich zu den Umladestationen Reutte oder Roppen, günstige Lage der Deponie Ahrental zurück zu führen.

4.1.2 Verbrennungsbilanz

Im Punkt 3.4.2 *Energetische Verluste* wurde die Verbrennungsbilanz für eine Rostfeuerung durchgerechnet. Nimmt man den dort berechneten Energieverlust von 1,660MJ/kg Abfall bezogen auf den H_u von 9,133MJ/kg, so ergibt sich ein Verlust von $151,8 \cdot 10^6$ MJ pro Jahr.

Wie im Punkt 3.4.2.5 bereits erwähnt, bezieht sich die angegebene Energie auf die theoretische Energiemenge, die zur Nutzung bereitgestellt werden kann. Energieverluste bei der Nutzung, wie z. B. durch Verstromung, werden auch bei allen folgenden Bilanzen nicht mit einbezogen.

4.1.3 Gesamtbilanz Variante 1

In der folgenden Abbildung sind die Anteile der einzelnen Verluste, wie der beim Transport, der thermischen Behandlung sowie der Deponierung der Schlacke dargestellt.

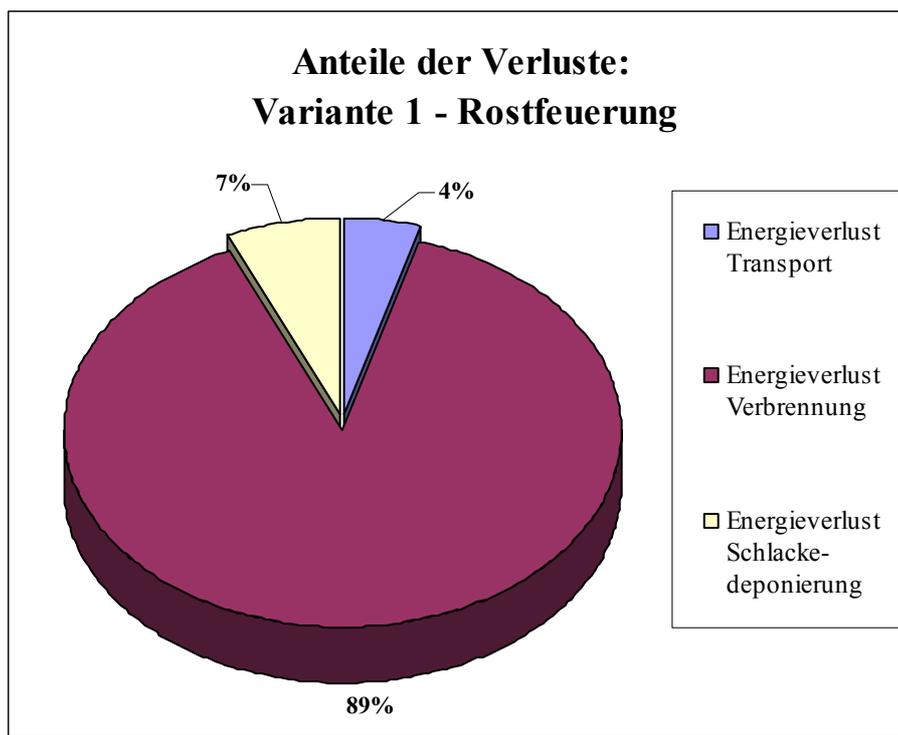


Abbildung 4-4: Energieverluste Variante 1

In der Abbildung ist sehr gut ersichtlich, dass der Hauptverlust bei der Verbrennung entsteht und die Verluste beim Transport sowie der Restenergiegehalt der Schlacke nur einen sehr kleinen Einfluss haben.

In der folgenden Tabelle werden die Verluste dem Gesamtenergiegehalt des Abfalls gegenübergestellt und somit eine Gesamtbilanz über den Behandlungsprozess erstellt. Verluste sind in der Tabelle negativ eingetragen:

Gesamtbilanz Variante 1 in Mio. MJ				
	positiv		negativ	
Energiegehalt Restmüll	835,2	100,0%		
Energieverlust Transport			-7,7	-0,9%
Energieverlust Verbrennung			-157,9	-18,9%
Energieverlust Schlackedeponierung			-11,7	-1,4%
Gesamt	657,9	78,8%		

Tabelle 4-2: Gesamtenergiebilanz Variante 1

Diese Bilanz zeigt, dass ca. 80% des Energiegehaltes des Abfalls zur Nutzung bereitgestellt werden können. Die restlichen 20% sind durch die angegebenen Verluste nicht für eine Nutzung verfügbar.

Der Transportenergieverlust wird bereits beim Transport der Abfälle verbraucht, somit wird bei der Verbrennung selbst eine um diesen Betrag höhere Energiemenge zur Nutzung bereitgestellt, hier wird jedoch immer das Gesamtsystem betrachtet, wodurch dieser Energieverbrauch beim Transport negativ zu verbuchen ist.

4.2 Variante 2 – Rostfeuerungs-MVA außerhalb Tirols

Diese Variante betrachtet das Szenario, dass der Restmüll, gleich wie in Variante 1, gesammelt und zu einer zentralen Stelle transportiert wird, dort jedoch im Gegensatz nicht verbrannt, sondern zu einer Rostfeuerungsanlage außerhalb Tirols verbracht wird. Diese Variante soll aufzeigen, wie weit man die Abfälle transportieren könnte, bis die Energiebilanz negativ wird. Hierbei wird zwischen den folgenden Möglichkeiten unterschieden:

- Weitertransport der Abfälle mit der Bahn ohne Rücktransport der Schlacke
- Weitertransport der Abfälle mit LKW's ohne Rücktransport der Schlacke
- Weitertransport der Abfälle mit der Bahn und Rücktransport der Schlacke
- Weitertransport der Abfälle mit LKW's und Rücktransport der Schlacke

Die *Abbildung 4-5: Energieverbrauch Verbringung der Abfälle* zeigt den Energieverbrauch beim Transport in Abhängigkeit der Entfernung. Der Schnittpunkt mit der y-Achse spiegelt das Energieguthaben aus der Variante 1 wieder. Die beim Transport verbrauchte Energie wirkt sich negativ aus, somit ist der Schnittpunkt mit der x-Achse genau bei der Entfernung, wo die Gesamtenergiebilanz gleich Null ist. Das heißt, dass genau soviel Energie durch den Transport verbraucht wurde, wie durch die Verbrennung mit einer Rostfeuerung gewonnen wird.

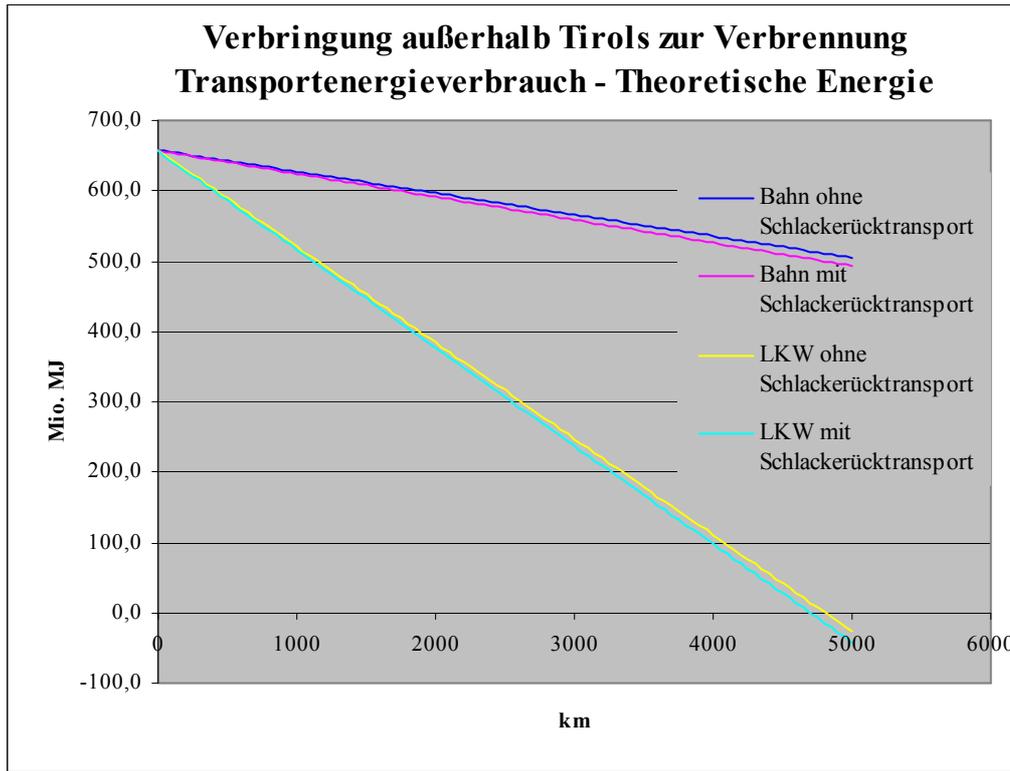


Abbildung 4-5: Energieverbrauch Verbringung der Abfälle außerhalb Tirols I

In dieser Abbildung ist sehr gut das Energieverhältnis zwischen LKW und Bahntransport ersichtlich. Während sich das Energieguthaben bei einem Bahntransport der Abfälle nur sehr langsam verbraucht, geschieht das bei einem LKW-Transport doch erheblich schneller. Dort erreicht man bei einer Transportentfernung von ca. 4800km, ohne Schlackerücktransport, eine Energiebilanz die gleich Null ist. Somit wäre bei dieser Transportentfernung die gesamte erzeugte Energie durch den Transport wieder verbraucht worden. Der zusätzliche Energieverbrauch durch den Schlackerücktransport ist so gut wie vernachlässigbar, da durch das Wegfallen von Leerfahrten nur geringfügig mehr Energie verbraucht wird.

In der Praxis ist jedoch der Nutzungsgrad der Energie, z. B. durch Verstromung, mit einzubeziehen. So geht die Studie „Stand der Technik bei Abfallverbrennungsanlagen“ von einem Gesamtwirkungsgrad, bei normalen Dampfparametern der Verstromung, von 20%⁵³ aus. Berechnet man mit diesem Wirkungsgrad die letztendlich zur Nutzung zur

⁵³ vgl. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Stand der Technik bei Abfallverbrennungsanlagen Seite 54.

Verfügung gestellte Energie, so beträgt diese nur mehr 167,0 Mio. MJ. Die folgende Abbildung stellt nun die Transportverlustgeraden zum Einen in Kombination mit dieser nutzbaren Energie dar und zum Anderen in Kombination mit der Energiedifferenz der Variante 1 und 3. Hierbei wird der Schlackerücktransport nicht betrachtet.

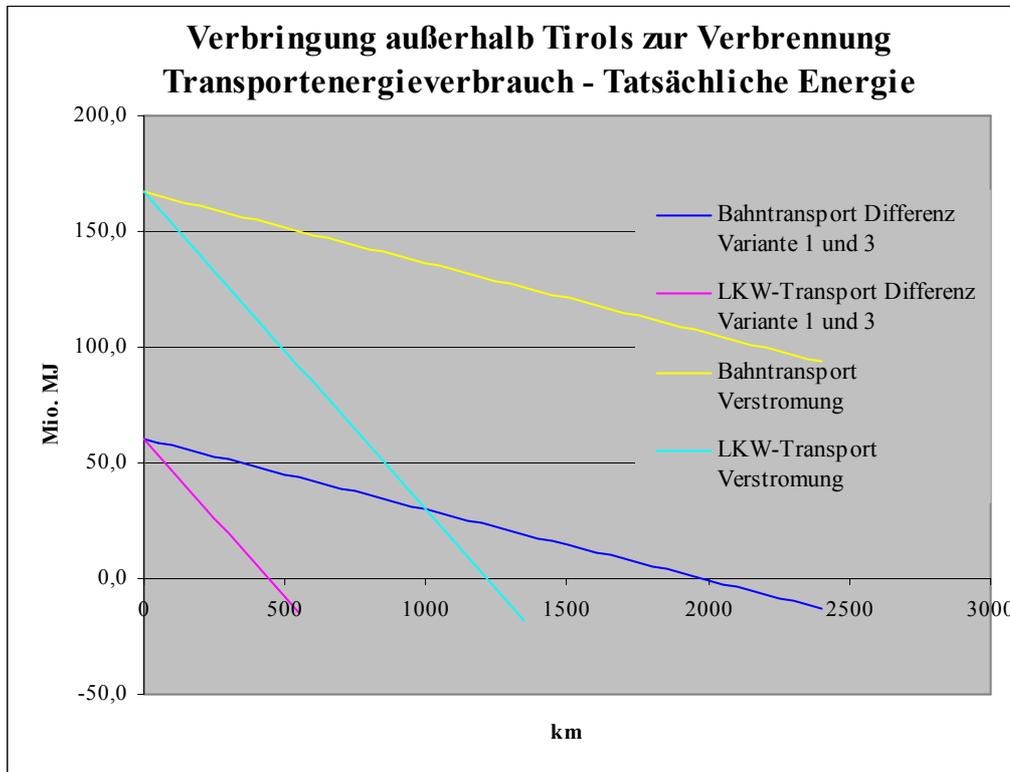


Abbildung 4-6: Energieverbrauch Verbringung der Abfälle außerhalb Tirols II

In der Kombination mit der tatsächlich zur Verfügung stehenden Energie werden die Transportstrecken, die bis zu einer ausgeglichenen Energiebilanz zurückgelegt werden können, doch erheblich reduziert. So können bei einer reinen Verstromung des Energiegehaltes der Abfälle nur mehr ca. 1225km mittels LKW-Transport zurückgelegt werden, bevor die Bilanz negativ wird.

Im Falle der Energiedifferenz zwischen der Variante 1, der reinen Rostfeuerung ohne Vorbehandlung und der Variante 3, der mechanisch biologischen Vorbehandlung mit anschließender Wirbelschichtfeuerung, ergibt sich sogar eine noch kürzere Distanz. So können beim Transport mit LKW nur ca. 410km zurückgelegt werden, bis das Energieguthaben der Variante 1 gegenüber der Variante 3 verbraucht ist.

4.3 Variante 3 – MBA's mit dezentralen Deponien

Bei dieser Variante wird der gesamte Restmüll in mechanisch biologischen Behandlungsanlagen vorbehandelt und in die Fraktionen RRS und BRAM gesplittet. Der RRS wird auf der nächstgelegenen Deponie direkt abgelagert und der BRAM in die zentrale Wirbelschichtfeuerungsanlage zur thermischen Behandlung gebracht.

4.3.1 Transportsystem

Die folgende Abbildung zeigt die Lage und die Einzugsgebiete der MBA's und der Wirbelschichtverbrennungsanlage.

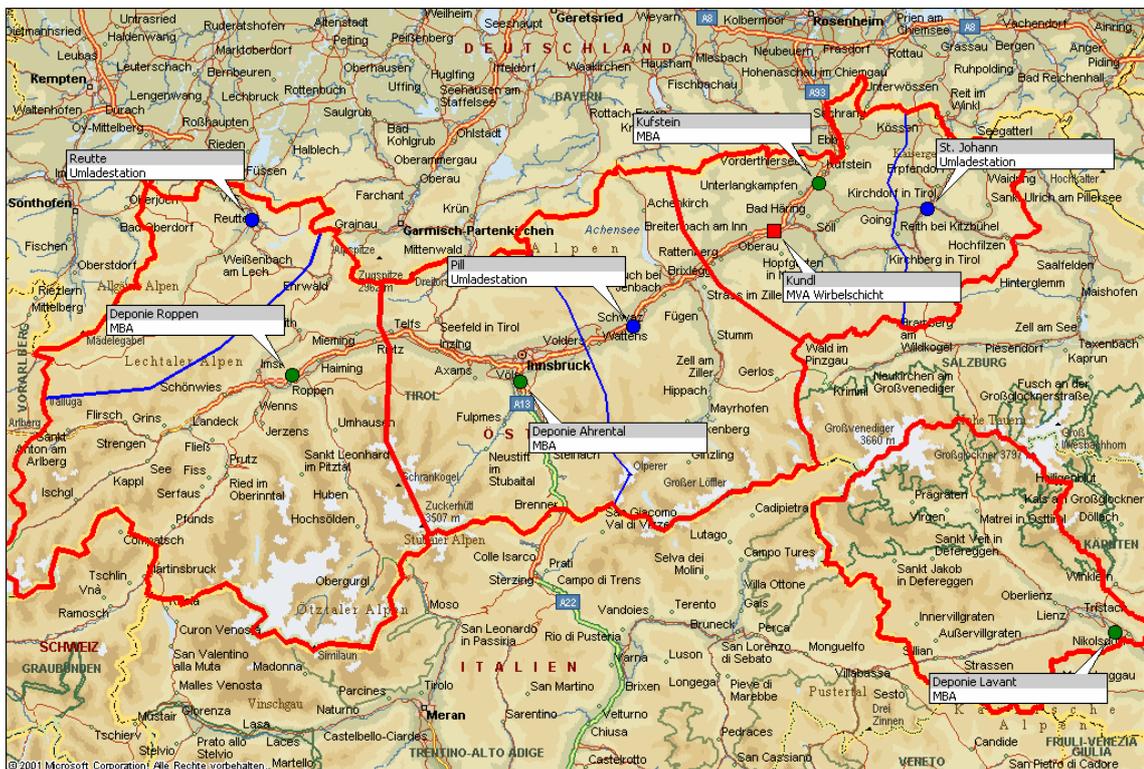


Abbildung 4-7: Variante 2 – Lage und Einzugsgebiete der MBA's

Die rot umrahmten Bereiche illustrieren die Einzugsgebiete der 4 MBA's, wobei bei großen Einzugsgebieten eine Umladung zur Optimierung des Transportes erfolgt. Die Zuordnung der Gemeinden zu den Umladestationen ergibt sich durch die blaue Begrenzungslinie. Bei den MBA's Roppen, Ahrental und Lavant ist das Deponiegelände direkt neben der MBA gelegen, im Fall der MBA Kufstein ist die

nächstgelegene Deponie Riederberg auch nur wenige km entfernt, sodass der Transport des RRS von der MBA zur Deponie vernachlässigt werden kann.

Die folgende Abbildung zeigt die Anteile der einzelnen Transportabschnitte am Gesamtenergieverbrauch beim Transport. Der Anteil des Transportes zur Umladestation bzw. zur MBA hat sich im Vergleich zur Variante 1 deutlich von 57% auf 73% erhöht, da einerseits der Transport durch das Wegfallen von Umladestationen weniger optimiert ist und andererseits der Transportanteil von der MBA zur MVA deutlich verringert wurde.

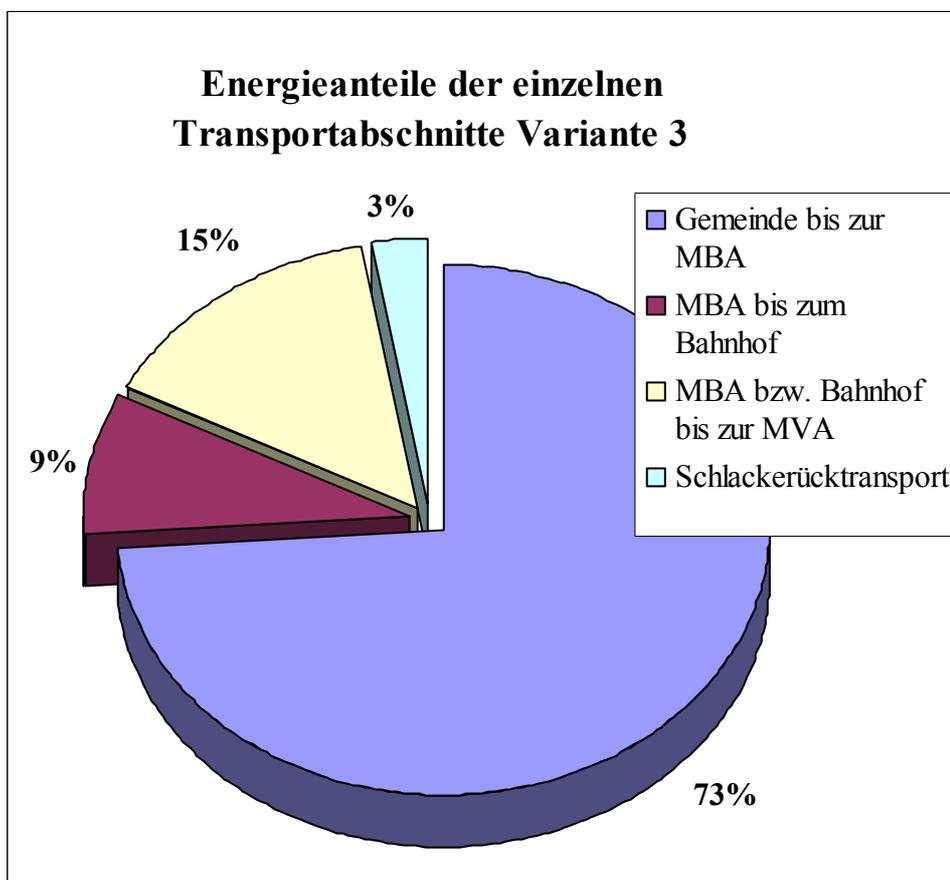


Abbildung 4-8: Energieanteile der einzelnen Transportabschnitte Variante 3

4.3.1.1 Abfallmengen

Die folgende Abbildung zeigt die Aufteilung der Restmüllmenge auf die einzelnen MBA's. Dies ist ein rein rechnerischer Wert, es wurde dabei keine Rücksicht auf tatsächliche Behandlungskapazitäten wie z. B. die der Pilotanlage Kufstein genommen.

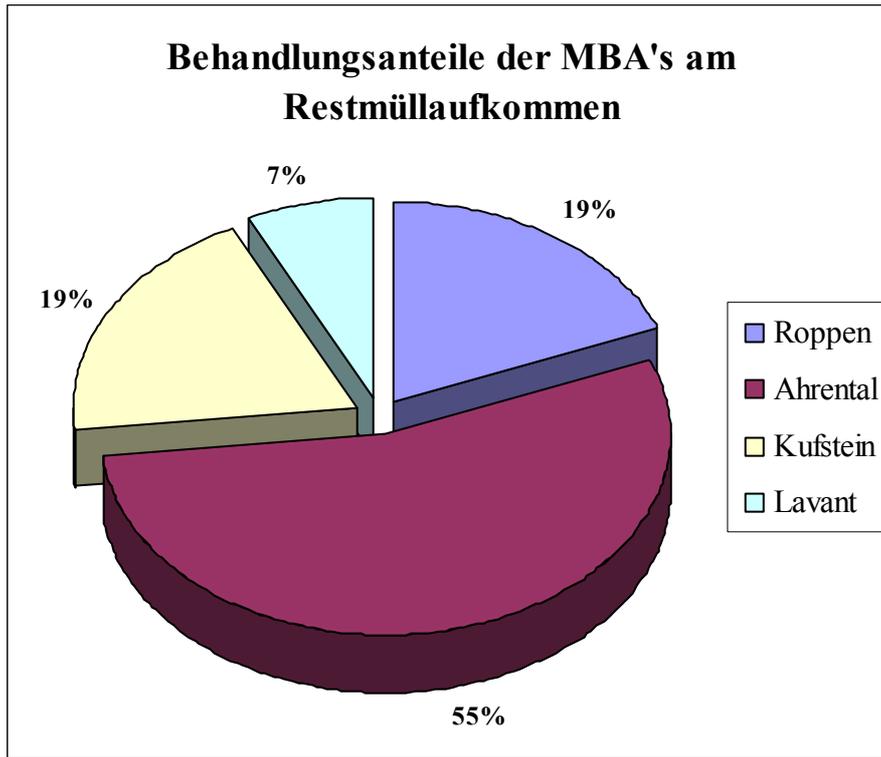


Abbildung 4-9: Anteile der MBA's bei der Behandlung, Variante 3

Die MBA Ahrental hat auf Grund der nahen Lage des Ballungsraumes Innsbruck, den mit Abstand größten Teil des Restmülls zu behandeln, da in diesem Raum ein Großteil der Bevölkerung lebt und die anfallende Müllmenge daher entsprechend groß ist. Dies ist auch aus der *Abbildung 2-1: Abfallmengen der Tiroler Bezirke in Prozent* ersichtlich, wobei das Einzugsgebiet der MBA Ahrental im Wesentlichen den Bezirken Innsbruck Land, Innsbruck Stadt und Schwaz entspricht.

4.3.1.2 Energiebilanz

Die folgende Abbildung zeigt die Anteile der einzelnen Energieverluste am Gesamtenergieverlust. Im Gegensatz zur Variante 1, wo fast der gesamte Energieverlust durch den Verbrennungsverlust entstanden ist, sind hierbei nun mehrere Verluste nennenswert.

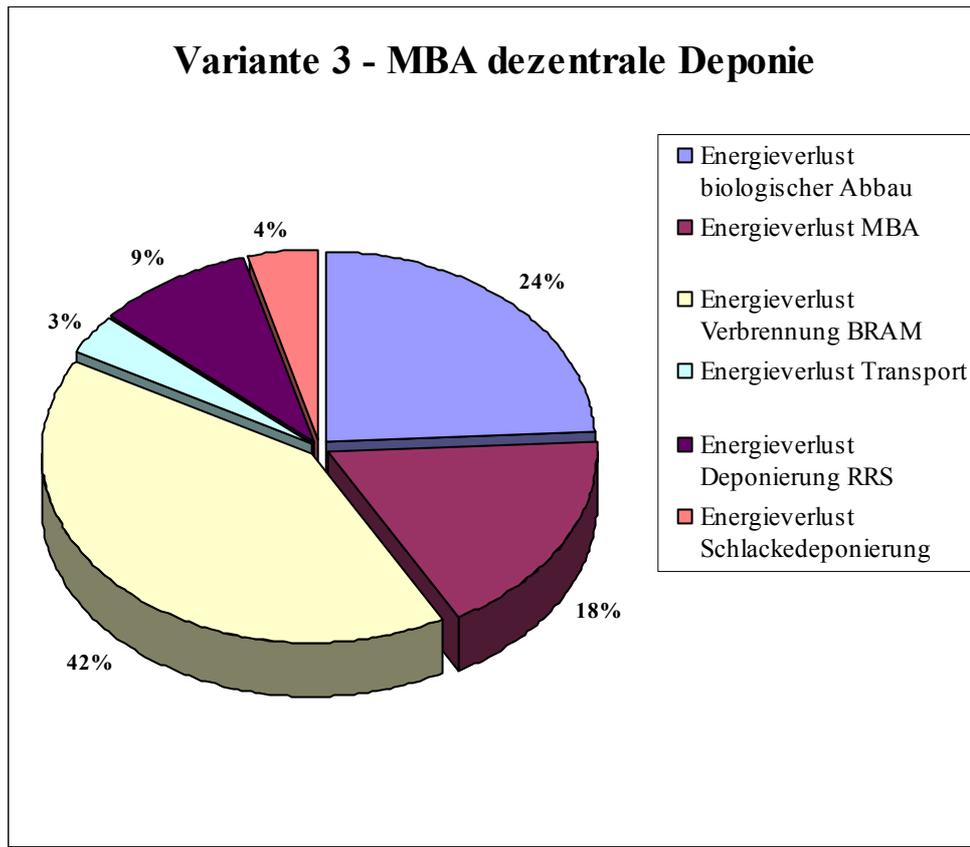


Abbildung 4-10: Anteile der einzelnen Verluste am Gesamtverlust Variante 3

So entstehen hierbei nur mehr 42% durch den Verbrennungsverlust. Über 50% entstehen durch die Verluste bei der mechanisch biologischen Behandlung.

4.3.2 Gesamtbilanz Variante 3

Betrachtet man die Gesamtbilanz dieser Variante, so ergibt sich die *Tabelle 4-3: Gesamtbilanz Variante 3*. Der Betrag der nutzbaren Energie ist hierbei um ca. 10% gesunken, da durch das geänderte Verbrennungsverfahren, nicht der gesamte Energieverbrauch der MBA kompensiert werden kann.

Gesamtbilanz Variante 3 in Mio. MJ				
	positiv		negativ	
Energiegehalt Restmüll	835,2	100%		
Energieverlust Transport			-8,1	-1,0%
Energieverlust Verbrennung			-98,0	-11,7%
Energieverlust RRS- Deponierung			-22,5	-2,7%
Energieverlust biologischer Abbau			-57,5	-6,9%
Energieverlust MBA			-42,2	-5,1%
Energieverlust Schlackedeponierung			-9,6	-1,1%
Gesamt	597,3	71,5%		

Tabelle 4-3: Gesamtbilanz Variante 3

4.4 Variante 4 – MBA's mit einer zentralen Deponie

Bei dieser Variante werden analog zur Variante 3 die Abfälle in mechanisch biologischen Anlagen vorbehandelt und der heizwertreiche BRAM anschließend in einer zentralen Wirbelschichtverbrennungsanlage energetisch verwertet. Hierbei wird jedoch angenommen, dass nur mehr eine zentrale Deponie weiter betrieben wird und somit der anfallende RRS nicht auf der nächstgelegenen Deponie abgelagert wird, sondern zu dieser zentralen Deponie transportiert werden muss.

Analog zu der Schlackerückführung bei der Variante 1, wird hierzu auf Grund der zentralen Lage und des Ausbaupotentials die Deponie Ahrental als zentrale Ablagerungsmöglichkeit herangezogen.

Die folgende Abbildung zeigt die Anteile des Energieverbrauches der einzelnen Transportabschnitte am Gesamtenergieverbrauch beim Transport.

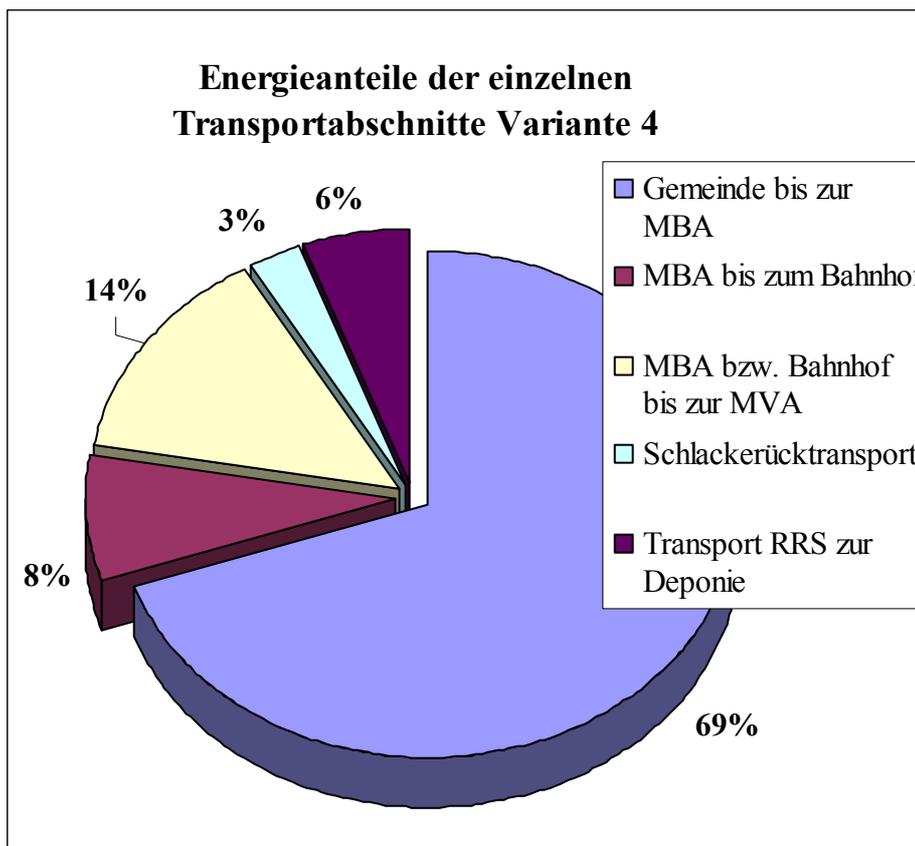


Abbildung 4-11: Energieanteile der Transportabschnitte, Variante 4

Obwohl für ca. 50% der Abfälle der Transportabschnitt des RRS zur Deponie entfällt, da diese auf der MBA Ahrental behandelt werden, ist dieser mit 6% nicht unmaßgeblich.

Die Gesamtenergiebilanz ändert sich im Vergleich zur Variante 3 nur unwesentlich um die Erhöhung des Energieverlustes beim Transport. Dieser beträgt bei der Variante 4 ca. 8,6 Mio. MJ, was eine Erhöhung um ca. 0,5 Mio. MJ bedeutet. Somit verringert sich die nutzbare Energie auf 596,9 Mio. MJ, was lediglich eine Änderung von ca. 0,01% bedeutet.

5 Gegenüberstellung der Varianten

Vergleicht man die einzelnen Varianten miteinander, so können folgende Punkte aus Sicht der Energienutzung und des Energieverbrauches festgestellt werden:

- Der Unterschied bei der nutzbaren Energie zwischen einer zentralen Rostfeuerungsanlage und der mechanisch biologischen Vorbehandlung mit einer angeschlossenen Wirbelschichtverbrennung beträgt ca. 10% zu Gunsten der zentralen Rostfeuerungsanlage.
- Der Energieverbrauch beim Transport ist im Vergleich zu der nutzbaren Energie sehr klein und hat daher nur einen marginalen Einfluss auf die Gesamtbilanz.
- Die Schlackerückführung wirkt sich auf den Energieverbrauch beim Transport so gut wie nicht aus, weil durch das Wegfallen von Leerfahrten nur eine relativ geringe Energiedifferenz zusätzlich verbraucht wird.
- Die Deponiestandorte haben nur einen unwesentlichen Einfluss auf die Gesamtenergiebilanz.

Die folgende Graphik stellt die essentiellen Punkte der Energiebilanz der Variante 1 und der Variante 3 dar. Feststellbar ist, dass sich die nutzbare Energie um ca. 10% unterscheidet und die Aufteilung der Verluste sich wesentlich verändert.

Während z. B. bei der Variante 1 nahezu der gesamte Verlust bei der Rostfeuerung entsteht, teilt sich dieser bei der Variante 2, durch die Vorbehandlung der Abfälle, auf diese und auf die Wirbelschichtverbrennung auf. Durch ein geändertes Verbrennungsverfahren kann jedoch der zusätzliche Verlust bei der mechanisch biologischen Behandlung teilweise ausgeglichen werden.

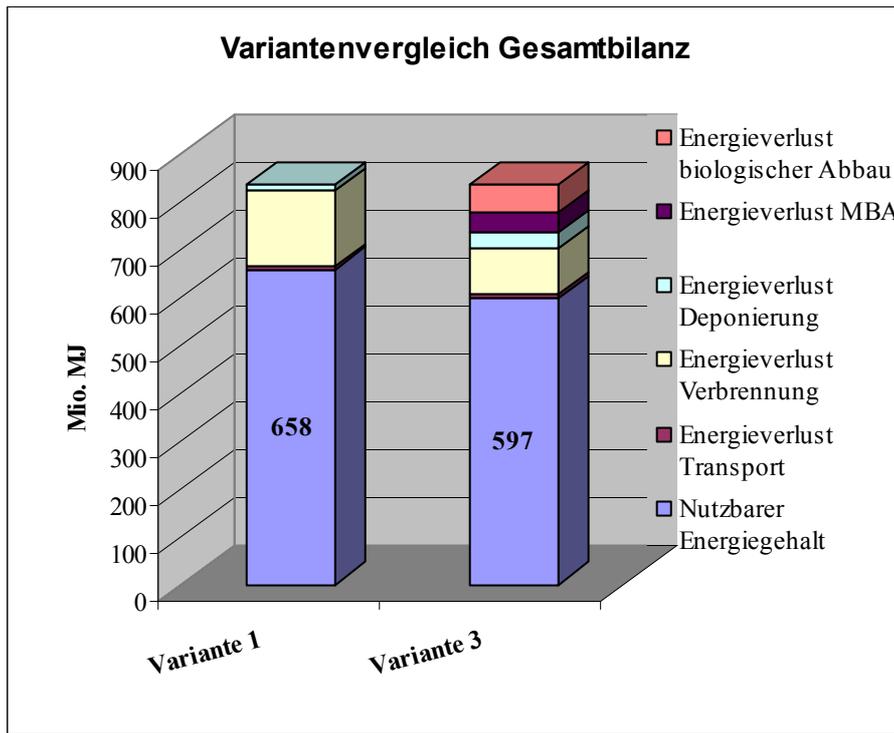


Abbildung 5-1: Variantenvergleich Variante 1 und 3

Um die Größenordnung der berechneten Verluste zu verdeutlichen, sind diese in der folgenden Tabelle auf den Heizenergieverbrauch einer 80m²-Wohnung, mit einem jährlichen Heizölbedarf von 2000l, umgerechnet worden. Eine solche Wohnung hat einen Energieverbrauch von ca. 71149MJ pro Jahr.

Vergleich Energieverluste mit Heizenergieverbrauch einer 80m ² -Wohnung		
	Variante 1	Variante 3
	Anzahl der 80m ² -Wohnungen	
Energiegehalt Abfall	11.739,0	11.739,0
Energieverlust Transport	-108,0	-113,5
Energieverlust Verbrennung	-2.220,0	-1.377,0
Energieverlust Deponierung	-164,7	-451,2
Energieverlust MBA	-	-592,5
Energieverlust biologischer Abbau	-	-808,6
Nutzbarer Energiegehalt	9.246,2	8.396,1

Tabelle 5-1: Vergleich der Verluste mit Heizenergieverbrauch

6 Zusammenfassung

Spätestens ab dem Jahr 2008 darf in Tirol kein unbehandelter Restmüll mehr deponiert werden. Um den Restmüll zu behandeln bzw. einer Vorbehandlung zuzuführen, gibt es im Wesentlichen zwei Möglichkeiten:

- Thermische Behandlung des gesamten Restmülls.
- Mechanisch biologische Vorbehandlung des Restmülls mit anschließender Deponierung des RRS und thermischer Behandlung des BRAM.

Mit dieser Diplomarbeit wurde eine Energiebilanz dieser Verfahren erstellt, um einen Vergleich zu ermöglichen. Die Bilanz ist jedoch nicht auf das Behandlungsverfahren selbst beschränkt, sondern inkludiert auch den Abfalltransport.

Für die thermische Behandlung der Abfälle, sowohl Restmüll als auch BRAM, sind folgende Verfahren gebräuchlich:

- Rostfeuerung
- Wirbelschichtverbrennung
- RCP-Verfahren
- Syncom-Verfahren
- Thermoselect-Verfahren
- Konversionsverfahren

Für die Bilanzierung werden die ersten beiden Verfahren herangezogen, da diese bereits seit Jahrzehnten in der Praxis eingesetzt werden und daher entsprechende Erfahrungswerte vorliegen. Die anderen Verfahren drängen zwar immer mehr auf den Markt, sind aber großtechnisch kaum oder noch gar nicht umgesetzt bzw. wurden noch nicht für den Brennstoff Restmüll angewandt.

Für die mechanisch biologische Vorbehandlung bezieht sich die Arbeit auf eine Pilotanlage der Fa. Thöni in Kufstein, da diese Anlage einerseits in Tirol liegt und daher die gewonnenen Erkenntnisse gut auf das restliche Bundesland umlegbar sind und andererseits, weil die Zielsetzung der Anlage ein Restmüllsplitting in RRS und BRAM ist, das für die betrachtete Vorbehandlung benötigt wird. Alternative Verfahren zur

mechanisch biologischen Behandlung werden nur am Rande erwähnt, da diese noch im Entwicklungsstadium sind.

Der Energieverbrauch beim Transport wird für die spezifischen Transportfahrzeuge gesondert berechnet, wobei auf das Modell der MCI Studie, Logistikkonzept Abfalltransport Tirol, zurückgegriffen wird. Der Energieverbrauch beim Transport errechnet sich hierbei entweder durch den Dieserverbrauch des Fahrzeugs oder durch die Angaben der Transportfirma wie zum Beispiel der ÖBB. Hierbei zeigt sich, dass sich der Energieverbrauch der einzelnen Fahrzeuge oft erheblich unterscheidet und besonders bei den Pressfahrzeugen, die zur Abholung der Abfälle direkt bei den Haushalten im Einsatz sind, am Größten ist.

Die folgende Tabelle fasst den spezifischen Energieverbrauch der eingesetzten Transportfahrzeuge pro Tonnenkilometer zusammen.

Zusammenstellung der Transportfahrzeuge				
	Restmüll	Schlacke	BRAM	RRS
	MJ/(Mg*km)			
2-Achs-Pressfahrzeug	2,343	-	-	-
3-Achs-Pressfahrzeug	1,252	-	-	-
Hakenfahrzeug	1,390	1,257	1,563	1,390
Hakenfahrzeug mit Hänger	0,835	0,757	0,936	0,835
SLPS	0,214	0,200	0,233	0,214

Tabelle 6-1: Energieverbrauch der einzelnen Transportfahrzeuge

Ein wichtiger Punkt für die Bilanzierung ist die Kenntnis der Zusammensetzung des Restmülls. Bei der Pilotanlage in Kufstein wurden zwar Sortieranalysen durchgeführt, jedoch benötigt man zur Berechnung eines Verbrennungsvorganges die Elementarzusammensetzung des Brennstoffes. Da eine solche Analyse für Tirol nicht vorliegt, wurden Literaturwerte herangezogen und auf die wahrscheinliche Zusammensetzung des Tiroler Restmülls angeglichen. Da der Restmüll ein sehr komplexes Gemisch aus den verschiedensten Stoffen ist und daher auch der Heizwert und die Elementarzusammensetzung entsprechenden Schwankungen unterworfen sind, kann die genaue Zusammensetzung nicht bestimmt werden.

Die folgende Tabelle zeigt die Elementarzusammensetzung von Restmüll und BRAM, wie sie für die Berechnungen verwendet wurden.

Anteile der Elemente an den Abfällen		
	Restmüll	BRAM
Kohlenstoff - C	0,234	0,381
Wasserstoff - H	0,032	0,054
Stickstoff - N	0,005	0,006
Schwefel - S	0,0041	0,002
Sauerstoff - O	0,151	0,282
Wasser – H ₂ O	0,30	0,15
Asche	0,2739	0,129
Unterer Heizwert - H _u	9,1*	15,4*

* Eigene Berechnung

Tabelle 6-2: Zusammensetzung der Abfälle

Mit dieser Abfallzusammensetzung kann nun die Verbrennungsbilanz durchgeführt werden. Dies geschieht für die zwei betrachteten Verfahren, der Rostfeuerung mit dem Brennstoff Restmüll und der Wirbelschichtverbrennung mit dem Brennstoff BRAM. Das System der Verbrennung wird hierzu vereinfacht, indem die gesamte Rauchgasreinigung ausgegliedert wird, da diese bei den beiden Verfahren gleich ausgeführt werden kann. Ebenso wird die Nutzung der entstehenden Energie ausgeklammert, da der Wirkungsgrad dieser stark von der Art der Nutzung (als Fernwärme oder durch Verstromung) abhängig ist, jedoch nichts mit der theoretischen Energie, die durch die Verbrennung zur Verfügung gestellt werden kann, zu tun hat. Somit kann der Verlust bei der Verbrennung auf folgende Verluste reduziert werden:

- Verlust durch das heiße Rauchgas und den Austrag heißer Schlacke aus dem Feuerraum.
- Verlust durch den Anteil an Unverbranntem in der Schlacke, die deponiert wird.

Führt man diese Bilanz mit den genannten Parametern durch so ergibt sich folgende Tabelle:

Bilanzierung der Verbrennung				
	Rostfeuerung		Wirbelschichtfeuerung	
	Mio. MJ		Mio. MJ	
Energiegehalt Abfall	835,2	100,0%	755,2	100,0%
Rauchgasverlust	157,9	18,9%	98,0	13,0%
Deponieverlust	11,7	1,4%	5,1	0,7%
Theoretisch nutzbare Energie	665,6	79,7%	652,1	86,3%

Tabelle 6-3: Energiebilanz Verbrennung

In der Tabelle ist gut ersichtlich, dass die Wirbelschichtverbrennung einen viel besseren Wirkungsgrad besitzt als die Rostfeuerung, so kann diese bei einem reduzierten Energieinput, da die Abfallmenge durch die mechanisch biologische Vorbehandlung reduziert wurde, fast dieselbe Energiemenge bereitstellen, wie die Verbrennung des gesamten Restmülls auf einer Rostfeuerungsanlage.

Ein weiterer Punkt, der in die Energiebilanz aufgenommen werden muss, ist der Energieverbrauch bei der mechanisch biologischen Vorbehandlung. Für diese Behandlung werden einerseits die verschiedensten mechanischen Schritte wie Zerkleinerung und Siebung, wobei Diesel- und Stromverbrauch auftritt und andererseits die biologische Behandlung, bei der das Gut öfters umgesetzt und belüftet werden muss, eingesetzt. Um nicht einzelne Schredder, Siebe, Gebläse und Maschinen energetisch bilanzieren zu müssen, wurden für den Energieverbrauch einer solchen Anlage Literaturwerte herangezogen. Für die Massenbilanz wurden die Kenndaten der Pilotanlage Kufstein verwendet. Die folgende Tabelle zeigt die verwendete Feuchtmassebilanz und den errechneten Energieverbrauch der MBA:

Spezifikationen einer MBA		
Energieverbrauch	0,461 MJ/kg Restmüll	
	BRAM	RRS
Feuchtmassebilanz pro Mg Input	0,535Mg	0,152Mg

Tabelle 6-4: Zusammenfassung MBA-Daten

Mit diesen Informationen kann eine Gesamtenergiebilanz erstellt werden, welche schließlich für die folgenden vier Varianten durchgeführt wurde:

- I. Rostfeuerungs-MVA innerhalb Tirols (Variante 1)
- II. Rostfeuerungs-MVA außerhalb Tirols (Variante 2)
- III. MBA's mit dezentralen Deponien und einer Wirbelschicht-MVA in Tirol (Variante 3)
- IV. MBA's mit einer zentralen Deponie und einer Wirbelschicht-MVA in Tirol (Variante 4)

In der Variante 1 wird der gesamte Tiroler Restmüll in einer zentralen Rostfeuerungsanlage ohne Vorbehandlung verbrannt. Der Transport erfolgt über Umladestationen zu einem Großteil per Bahn. Bei dieser Variante treten lediglich die Verluste bei der Verbrennung und der Transportverlust auf.

In der Variante 2 wird ermittelt wie weit man den gesammelten Restmüll transportieren kann, bis die, durch die Verbrennung erzeugte Energie verbraucht ist, was bei einem LKW-Transport einer Entfernung von ca. 4800km entspricht.

In der Variante 3 wird die Vorbehandlung der Abfälle in MBA's, die Deponierung des RRS und die Verbrennung des erzeugten BRAM in einer zentralen Wirbelschichtfeuerungsanlage betrachtet. Der RRS wird dabei auf der nächstgelegenen Deponie abgelagert. Bei dieser Variante treten neben dem Verbrennungsverlust und dem Transportverlust auch noch die Verluste bei der mechanisch biologischen Behandlung sowie der Deponierung des RRS auf.

Die Variante 4 entspricht im Wesentlichen der Variante 3, jedoch wird angenommen dass nur mehr die zentrale Deponie Ahrental zur Deponierung des RRS verwendet wird.

Dies ergibt jedoch lediglich einen zusätzlichen Energieaufwand in der Größenordnung von 0,01%.

Die *Tabelle 6-5: Gesamtbilanz Variante 1 und 3* stellt die einzelnen Verluste der Varianten 1 und 3 dar. Hierbei fällt auf, dass der Energieverlust bei der mechanisch biologischen Behandlung die Gesamtbilanz der Variante 3 doch erheblich verschlechtert. Diese Variante hat unter der alleinigen Betrachtung der Verbrennungsbilanz (vgl. *Tabelle 6-3: Energiebilanz Verbrennung*) noch fast genauso viel Energie zur Nutzung bereitgestellt, jedoch bei der Gesamtbilanz ergibt sich ein Unterschied von ca. 10%.

Gesamtbilanz Variante 1 und 3				
	Variante 1		Variante 3	
Energiegehalt Abfall	835,2	100,0%	835,2	100,0%
Energieverlust Transport	-7,7	-0,9%	-8,1	-1,0%
Energieverlust Verbrennung	-157,9	-18,9%	-98,0	-11,7%
Energieverlust Deponierung	-11,7	-1,4%	-32,1	-3,8%
Energieverlust MBA			-42,2	-5,1%
Energieverlust biologischer Abbau			-57,5	-6,9%
Nutzbarer Energiegehalt	657,9	78,8%	597,4	71,5%

Tabelle 6-5: Gesamtbilanz Variante 1 und 3

Zusammenfassend können folgende Punkte angeführt werden:

- Durch die mechanisch biologische Vorbehandlung des Restmülls verringert sich die nutzbare Energie um ca. 10%.
- Der Transport hat nur einen sehr geringen Anteil an der Energiebilanz.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Abfallmengen der Tiroler Bezirke in Prozent.....	5
Abbildung 2-2: Verfahrensschema Rostfeuerung.....	14
Abbildung 2-3: Rostfeuerung Detaildarstellung.....	15
Abbildung 2-4: Skizze Dampferzeuger	16
Abbildung 2-5: Stationäre Wirbelschichtfeuerung.....	18
Abbildung 2-6: Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung	18
Abbildung 2-7: Verfahrensschema RCP-Verfahren.....	20
Abbildung 2-8: Verfahrensschema einer Syncom-Anlage	22
Abbildung 2-9: Verfahrensschema Thermoselectverfahren.....	23
Abbildung 2-10: Verfahrensschema Konversionsverfahren.....	24
Abbildung 2-11: Verfahrensschema mechanisch biologische Behandlung.....	27
Abbildung 2-12: Trockenmassebilanz der Pilotanlage Kufstein	29
Abbildung 3-1: Bombenkalorimeter	30
Abbildung 3-2: Unterer Heizwert von Restmüll bei verschiedenen Wassergehalten	33
Abbildung 3-3: Energieflussdiagramm MVA Rugenberger Damm.....	39
Abbildung 3-4: Reduziertes System Abfallverbrennung.....	40
Abbildung 3-5: Luftenthalpie in Innsbruck	41
Abbildung 4-1: Variante 1 Lage der Umladestationen und der MVA	60
Abbildung 4-2: Variante 1 Einzugsgebiete der Umladestationen und der MVA.....	61
Abbildung 4-3: Energieanteile der einzelnen Transportabschnitte Variante 1.....	63
Abbildung 4-4: Energieverluste Variante 1	64
Abbildung 4-5: Energieverbrauch Verbringung der Abfälle außerhalb Tirols I.....	67
Abbildung 4-6: Energieverbrauch Verbringung der Abfälle außerhalb Tirols II.....	68
Abbildung 4-7: Variante 2 – Lage und Einzugsgebiete der MBA's.....	69
Abbildung 4-8: Energieanteile der einzelnen Transportabschnitte Variante 3.....	70
Abbildung 4-9: Anteile der MBA's bei der Behandlung, Variante 3.....	71
Abbildung 4-10: Anteile der einzelnen Verluste am Gesamtverlust Variante 3	72
Abbildung 4-11: Energieanteile der Transportabschnitte, Variante 4	74
Abbildung 5-1: Variantenvergleich Variante 1 und 3	77

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Kenndaten des 2-Achs-Pressfahrzeugs	6
Tabelle 2-2: Kenndaten des 3-Achs-Pressfahrzeugs	7
Tabelle 2-3: Kenndaten des Hakenfahrzeugs	8
Tabelle 2-4: Kenndaten des Hakenfahrzeugs mit Anhänger	8
Tabelle 2-5: Kenndaten eines SLPS Tragwagens für 3 ACTS.....	9
Tabelle 2-6: Kenndaten eines ACTS Containers.....	9
Tabelle 3-1: Abfallzusammensetzung im Raum Kufstein.....	32
Tabelle 3-2: Untere Heizwerte von Restmüll Literaturangaben.....	34
Tabelle 3-3: Energieverbrauch Bahn.....	37
Tabelle 3-4: Durchschnittswerte für Innsbruck, Temperatur und Enthalpie	42
Tabelle 3-5: Luftüberschusszahlen verschiedener Literaturquellen.....	44
Tabelle 3-6: Zusammensetzung Restmüll und BRAM.....	46
Tabelle 3-7: Mindestsauerstoffbedarf Verbrennung Restmüll	47
Tabelle 3-8: Input – Output Verbrennung Rostfeuerung.....	48
Tabelle 3-9: Mittlere spezifische Wärmekapazität der Verbrennungsgase	50
Tabelle 3-10: Zusammensetzung einer MVA-Schlacke.....	51
Tabelle 3-11: Literaturangaben Energieverbrauch MBA	55
Tabelle 3-12: Feuchtmassebilanz der MBA	56
Tabelle 3-13: Input – Output Verbrennung Wirbelschicht.....	57
Tabelle 4-1: Transportmatrix Variante 1	62
Tabelle 4-2: Gesamtenergiebilanz Variante 1	65
Tabelle 4-3: Gesamtbilanz Variante 3	73
Tabelle 5-1: Vergleich der Verluste mit Heizenergieverbrauch.....	77
Tabelle 6-1: Energieverbrauch der einzelnen Transportfahrzeuge.....	79
Tabelle 6-2: Zusammensetzung der Abfälle.....	80
Tabelle 6-3: Energiebilanz Verbrennung.....	81
Tabelle 6-4: Zusammenfassung MBA-Daten.....	82
Tabelle 6-5: Gesamtbilanz Variante 1 und 3	83

9 Formelverzeichnis

Formel 3-1: Verbandsformel zur Berechnung des H_0 aus der Elementaranalyse.....	31
Formel 3-2: Berechnung des unteren Heizwertes.....	33
Formel 3-3: Berechnung Energieverbrauch LKW.....	35
Formel 3-4: Berechnung Energieverbrauch Bahn.....	36
Formel 3-5: Berechnung Energieverbrauch Bahn 2-te Möglichkeit.....	37
Formel 3-6: Definition der Luftüberschusszahl λ	43
Formel 3-7: Berechnung des Mindestluftbedarfs.....	44
Formel 3-8: Berechnung des Energiegehalts des Heißdampfes.....	49
Formel 3-9: Berechnung des Energieverlusts durch das Rauchgases.....	51
Formel 3-10: Berechnung des Energieverlusts durch die Schlacke.....	52

10 Abkürzungsverzeichnis

ACTS	Abrollcontainertransportsystem
BGBI	Bundesgesetzblatt
Bhf.	Bahnhof
BRAM.....	Brennstoff aus Müll, Heizwertreiche MBA-Fraktion
Bsp.	Beispiel
bzw.....	beziehungsweise
DA.....	vorliegende Diplomarbeit von Michael Krismer
H _o	oberer Heizwert
H _u	unterer Heizwert
m ³ _n	Normkubikmeter
MBA	Mechanisch biologische Abfallbehandlungsanlage
Mg.....	Megagramm = 1000kg = Tonne
Mio.....	Million
MVA	Müllverbrennungsanlage
n.b.	nicht berechnet
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
RCP.....	recycled clean products
RRS.....	Rottereststoff, Deponiefraktion aus MBA
SLPS	Bauartreihe eines Tragwagens mit 3 Drehrahmen für ACTS-Container
SNCR.....	Selektive nichtkatalytische Reduktion
TDM.....	Thöni Dynamik Rottemodul
TS.....	Trockensubstanz
TOC	gesamter organischer Kohlenstoff
TU	Technische Universität
UBA.....	Umweltbundesamt Österreich
US	Umladestation
z.B.....	zum Beispiel

11 Literaturverzeichnis

- Amt der Tiroler Landesregierung Umweltschutz/Abfallwirtschaft, Ecoling AG: Standorterhebung für Abfallbehandlungsanlagen im Bundesland Tirol, Nordtirol; Untersuchungsbericht Dezember 2000.
- BASF: Ökoeffizienz-Analyse Restmüllentsorgung – Mechanisch-biologische Abfallbehandlung, Müllverbrennung sowie Deponie – Ludwigshafen, April 2001.
- Brunner et al.: Bewertung abfallwirtschaftlicher Maßnahmen mit dem Ziel der nachsorgefreien Deponie (BEWEND). Endbericht Version 3, Wien November 2000.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Stand der Technik bei Abfallverbrennungsanlagen; Josef Stubenvoll, Siegmund Böhmer, Ilona Szednyj und Gabriele Zehentner, Wien, September 2002.
- Cerbe Günter/Hoffmann Hans-Joachim: Einführung in die Thermodynamik; Von den Grundlagen zur technischen Anwendung 13.Auflage. Carl Hanser Verlag München Wien 2000.
- DIN 51900: Bestimmung des Brennwertes mit dem Bombenkalorimeter und Berechnung des Heizwertes. Allgemeine Angaben, Grundgeräte und Grundverfahren. Deutsche Normen August 1977.
- Dirks, Egon: Praxishandbuch Abfallverbrennung, Technik und Betrieb thermischer Behandlungsverfahren. Herrentor Fachbuchverlag, 2000.
- Felkel, Heinz Dr./ Herbsthofer Hermann DI: Klimadaten von Österreich. Fachverband der Maschinen- und Stahlbauindustrie Österreichs, 1978
- Fratzscher Wolfgang/Stephan Karl: Strategien zur Abfallenergieverwertung; Ein Beitrag zur Entropiewirtschaft. Vieweg Handbuch Umweltwissenschaften. 1. Auflage Oktober 2000.
- Gieck, K. und R.: Technische Formelsammlung, 30. deutsche Auflage 1995 (75. Gesamtauflage).
- Hahne E.: Technische Thermodynamik, Einführung und Anwendung. Oldenbourg Verlag München Wien. 3., überarbeitete Auflage, 2000.

- Kost, T.: Skript zum Seminar Thermische Abfallbehandlung, SS 1999, TU Dresden, Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten
- Management Center Innsbruck: Logistikstudie Abfalltransport Tirol; Ökonomische und ökologische Betrachtung verschiedener Transportvarianten. Juli 2002.
- Mast et al.: Einfluss der Abfallzusammensetzung auf Schadstoffgehalt und –menge der Verbrennungsrückstände Phase I, Abschlußbericht Forschungskennzeichen 103 10 903 im Auftrag des Umweltbundesamtes Deutschland, Juli 1996.
- Müllverwertung Rugenberger Damm: Umwelterklärung 2000. Umwelterklärung der MVR Müllverwertung Rugenberger Damm GmbH & Co.KG
- ÖBB: Umweltbericht 1998. Umweltmanagement der Österreichischen Bundesbahnen Stand Dezember 1998.
- Seier J.: Kleinanlagen zur energetischen Verwertung von Abfällen, Institut für Kern- und Energietechnik, Projekt Schadstoff- und Abfallarme Verfahren; Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe. 1999.
- Thöni Industriebetriebe G.m.b.H.: Endbericht zum Pilotprojekt „Möglichkeiten und Grenzen des Restmüllsplittings am Beispiel der Abfallbehandlungsanlage Kufstein“. Montanuniversität Leoben, Technische Universität München, Abfallwirtschaft & Umwelttechnik Ingenieur-Gesellschaft bRmgH Augsburg im Auftrag der Thöni Industriebetriebe G.m.b.H. Telfs unter der Patronanz des Landes Tirol. Dezember 1998
- Umweltbundesamt Österreich: Entwicklungspotentiale der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung. Eine ökologische Analyse. Uwe Lahl, Barbara Zeschmar-Lahl, Thomas Angerer. Monographien Band 125. Wien, Juni 2000.
- VDI Wärmeatlas: VDI Wärmeatlas, Recherchieren – Berechnen – Konstruieren. Verein Deutscher Ingenieure. Springer Verlag Berlin Heidelberg 1997.
- vonRoll INOVA: RCP Stand der Erkenntnisse aus der Anlage Bremerhafen.
- vonRoll INOVA: Rostfeuerungen. Die Von Roll Rosttechnologie – innovativ und bewährt. Broschüre der vonRoll INOVA GMBH.
- vonRoll INOVA: Wirbelschichttechnologie. Für die thermische Behandlung von Schlämmen, pastösen und aufbereiteten Abfällen. Broschüre der vonRoll INOVA GMBH.