

Ersatzbrennstoffe aus gewerblichen Abfällen
Entwicklung eines Entscheidungsmodells
für die kleine bis mittelständische
Entsorgungswirtschaft

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
Marcus Kluck
aus Köln

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

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzende: Prof. Dr. S. Rotter

Berichter: Prof. Dr. rer. nat. F. Behrendt

Berichter: Prof. Dr.-Ing. M. Faulstich

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 16.12.2009

Köln 2010

D 83

Berichte aus der Umwelttechnik

Marcus Kluck

Ersatzbrennstoffe aus gewerblichen Abfällen

Entwicklung eines Entscheidungsmodells für die kleine bis
mittelständische Entsorgungswirtschaft

D 83 (Diss. TU Berlin)

Shaker Verlag
Aachen 2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2010

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8843-3

ISSN 0945-1013

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Ersatzbrennstoffe aus gewerblichen Abfällen

Entwicklung eines Entscheidungsmodells für die kleine bis mittelständische Entsorgungswirtschaft

GLIEDERUNG

Abbildungsverzeichnis	5
Gleichungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
1 Einleitung	7
1.1 Problemstellung.....	7
1.2 Ziel.....	8
1.3 Methodik.....	9
2 Systementwicklung und Anlagenplanung	11
2.1 Grundzüge der Systementwicklung.....	11
2.2 Grundlagen der Planung.....	13
2.3 Planung bei kleinen bis mittelständischen Entsorgungsbetrieben.....	14
3 Grundlagenermittlung	17
3.1 Der aktuelle Ersatzbrennstoffmarkt.....	18
3.1.1 Akteure des Ersatzbrennstoffmarktes.....	18
3.1.2 Rechtliche Rahmenbedingungen.....	20
3.1.3 Beschreibung des Referenzbetriebes.....	22
3.2 Analyse des Abfall-Inputs.....	25
3.2.1 Herkunftsbereiche und Aufkommen gewerblicher Abfälle.....	25
3.2.2 Schadstoffpotentiale der Abfallfraktionen.....	27
3.2.3 Abfall-Input-Analyse des Referenzbetriebes.....	28
3.3 Anforderungen der Ersatzbrennstoffverwerter.....	31
3.3.1 Differenzierung der Verwerter und Definition des Brennstoffprofils.....	31
3.3.2 Spezifische Anforderungen an einen optimalen Ersatzbrennstoff.....	33
3.3.2.1 Anlagen der Baustoffindustrie.....	33
3.3.2.1.1 Portlandzementwerk Wittekind.....	36
3.3.2.1.2 Lafarge-Zementwerk Sötenich.....	36
3.3.2.2 Kraft- und Heizwerke der Energieversorgungsunternehmen.....	37
3.3.2.2.1 RWE-Kraftwerk Werne.....	40
3.3.2.3 Ersatzbrennstoff-Kraftwerke.....	41
3.3.3 Stand der offiziellen Gütesicherung.....	44
3.4. Projektdefinition für die Anlagenplanung.....	46
4 Anlagenplanung	50
4.1 Basic-Engineering.....	51
4.1.1 Möglichkeiten der Ersatzbrennstoffherstellung.....	51
4.1.2 Ausgeführte Anlagen zur Ersatzbrennstoffherstellung.....	52
4.1.2.1 Sortier- und Aufbereitungsanlage der AKM Limburg-Weilburg GmbH.....	53
4.1.2.2 Aufbereitungs- und Konditionierungsanlage der Remondis GmbH.....	54
4.1.3 Sortierungs- und Mitverbrennungsversuch des Referenzbetriebes.....	57
4.1.4 Auslegung der Grundoperationen und Entwurf eines Basismodells.....	60
4.1.4.1 Auswahl und Bewertung der Grundoperationen.....	61
4.1.4.1.1 Grundoperation der Zerkleinerung.....	61
4.1.4.1.2 Grundoperation der Klassierung und Sortierung.....	62
4.1.4.1.3 Grundoperation der Kompaktierung.....	63
4.1.4.1.4 Grundoperationen der Abluftreinigung und innerbetrieblichen Logistik.....	64
4.1.4.2 Kombination der Grundoperationen zum Entwurf eines Basismodells.....	66
4.1.4.2.1 Subsystem der Abfallaufbereitung.....	67
4.1.4.2.1.1 Anlieferung und Vorsortierung.....	67
4.1.4.2.1.2 Vor-Zerkleinerung.....	68
4.1.4.2.1.3 Klassierung und Sortierung.....	69

4.1.4.2.2 Subsystem der Ersatzbrennstoff-Konfektionierung.....	71
4.1.4.2.2.1 Nachzerkleinerung.....	72
4.1.4.2.2.2 Kompaktierung.....	72
4.1.4.2.3 Systemübergreifende Funktionen.....	72
4.1.4.2.3.1 Innerbetrieblicher Transport.....	73
4.1.4.2.3.2 Zwischenlagerung.....	73
4.1.4.2.3.3 Brennstofflagerung.....	73
4.1.4.2.3.4 Abluftreinigung.....	74
4.1.5 Massen- und Energiebilanz.....	78
4.2 Detail-Engineering.....	82
4.2.1 Detailplanung und Berechnung der Anlagenkomponenten.....	83
4.2.2 Darstellung des Verfahrensfließbildes.....	86
4.2.3 Datenblätter der Anlagenkomponenten.....	89
4.2.4 Layoutplanung der Maschinenaufstellung.....	91
4.2.5 Realisierung.....	93
5 Entwicklung eines Entscheidungsmodells.....	96
5.1 Entscheidungsproblematik und Lösungsmodellierung.....	96
5.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	98
5.2.1 Einleitung und betriebswirtschaftliche Grundlagen.....	98
5.2.2 Kosten der Anlagenerrichtung.....	99
5.2.3 Kosten des Anlagenbetriebes.....	101
5.2.4 Erwartete Umsätze.....	103
5.2.5 Gesamtbewertung.....	104
5.3 Entscheidungsmodell zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen.....	107
5.3.1 Systemanalyse zur Identifizierung entscheidungsrelevanter Einflussfaktoren.....	107
5.3.1.1 Systemabgrenzung.....	107
5.3.1.2 Externe Entscheidungsfaktoren.....	108
5.3.1.3 Interne Entscheidungsfaktoren.....	110
5.3.2 Entwicklung eines Entscheidungsalgorithmus.....	112
5.3.3 Simulation des Entscheidungsmodells.....	117
5.3.3.1 Szenario A – der Referenzbetrieb Kluck Umwelt-Logistik GmbH.....	117
5.3.3.2 Szenario B – der Vergleichsbetrieb Firma Passon.....	118
5.3.4 Sensitivitätsanalysen.....	122
5.3.4.1 Simulation der EBS-tauglichen Input-Abfallmenge.....	123
5.3.4.2 Simulation des Entsorgungspreises für die Sortierreste.....	124
5.3.4.3 Simulation des EBS-Zuzahlungspreises.....	125
5.3.4.4 Simulation des Endkundenpreises für gemischte gewerbliche Abfälle.....	126
5.4 Abschlussbetrachtungen.....	127
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	128
Abkürzungsverzeichnis.....	131
Literaturverzeichnis.....	132
Anhang.....	146
A: Daten zur Abfallanalyse.....	146
A1: EBS-taugliche Abfälle aus dem Gewerbe nach Stoffgruppen.....	146
A2: Schadstoffberechnung.....	147
B: Daten zur Anlagenplanung.....	148
B1: Auslegungsdaten der Abfallbehandlungsschritte.....	148
B2: Datenblätter der Anlagenkomponenten.....	151
C: Daten zur Wirtschaftlichkeitsanalyse des Referenzbetriebes.....	157
D: Berechnungstools.....	159

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Das Umfeld des mittelständischen Entsorgungsunternehmens	12
Bild 2: Systementwicklung und -analyse	12
Bild 3: Phasenschema der Anlagenplanung.....	13
Bild 4: Phasenschema für die Planung von Abfallbehandlungsanlagen.....	14
Bild 5: Systementwicklung und Anlagenplanung.....	16
Bild 6: Grundlagenermittlung im Phasenschema	17
Bild 7: Akteure und Institutionen des Ersatzbrennstoffmarktes	18
Bild 8: Verfahrensfließbild der Kluck Umwelt-Logistik GmbH.....	23
Bild 9: Anlagenlayout der Kluck Umwelt-Logistik GmbH.....	24
Bild 10: Abfallströme vom Erzeuger bis zur Senke	25
Bild 11: Gewerbe- und Baumischabfallsortierung des Referenzbetriebes	28
Bild 12: Projektdefinition im Phasenschema.....	46
Bild 13: Anlagenplanung im Phasenschema.....	50
Bild 14: Klassifizierung von EBS.....	51
Bild 15: Grundsichtbild Abfallaufbereitung AKM Limburg-Weilburg GmbH	53
Bild 16: Verfahrensschema der AKEA.....	55
Bild 17: Sortierkonzept Kluck Umwelt-Logistik GmbH	58
Bild 18: Subsysteme der Ersatzbrennstoffherstellung	66
Bild 19: Basismodell für Ersatzbrennstoffe aus gewerblichen Abfällen	77
Bild 20: Massen- und Energiebilanz zur EBS-Herstellung	80
Bild 21: Detail-Engineering im Phasenschema.....	82
Bild 22: Verfahrensfließbild zur EBS-Herstellung	88
Bild 23: Layout zur Realisierung des Verfahrensschemas im Referenzbetrieb	92
Bild 24: Realisierungsschritt im Phasenschema	93
Bild 25: Systementwicklung und Anlagenplanung.....	97
Bild 26: Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit	98
Bild 27: Systemdarstellung Entscheidungsfaktoren	112
Bild 28: Entscheidungsbaum	113
Bild 29: Ersparnis zur Erweiterungsinvestition	114
Bild 30: Break-Even-Point nach Input-Abfallmengen-Simulation	123
Bild 31: Simulation Entsorgungspreis Sortierreste.....	124
Bild 32: Simulation EBS-Zuzahlungspreis.....	125
Bild 33: Simulation Annahmepreis für gemischte gewerbliche Abfälle	126

Gleichungsverzeichnis

Gleichung 1: Ausbeute	78
Gleichung 2: Volumenstrom	83
Gleichung 3: Geschwindigkeit der Förderbänder	86
Gleichung 4: Wirtschaftlichkeit.....	98
Gleichung 5: Annuitätenfaktor.....	99
Gleichung 6: Kapitaldienst.....	99
Gleichung 7: Spezifische Behandlungskosten.....	105
Gleichung 8: Break-Even-Point.....	106
Gleichung 9: Umsatz- und Kostenberechnung	115

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Materialbilanz des Referenzbetriebes	24
Tabelle 2: Für die EBS-Herstellung relevante Abfallarten	26
Tabelle 3: Heizwertreiche Abfallarten des Referenzbetriebes	29
Tabelle 4: Schadstoffzusammensetzung des EBS-tauglichen Abfallinputs	30
Tabelle 5: Relevante Eigenschaften von herzustellenden Ersatzbrennstoffen	32
Tabelle 6: Vorgaben deutscher Zementwerke an Spurenelementgehalte	35
Tabelle 7: Ersatzbrennstoffprofil Zementindustrie	35
Tabelle 8: Vorgaben an Spurenelementgehalte	39
Tabelle 9: Ersatzbrennstoffprofil Kraftwerke	39
Tabelle 10: Ersatzbrennstoffprofil EBS-Kraftwerke	43
Tabelle 11: Gütekriterien im Vergleich	45
Tabelle 12: Ersatzbrennstoffprofile der Projektdefinition	47
Tabelle 13: Gegenüberstellung EBS-Profile und Abfall-Input	49
Tabelle 14: Ausgangsmaterial für BPG®- und SBS®-Produktion	55
Tabelle 15: Spezifikationen für die AKEA-Ersatzbrennstoffe	56
Tabelle 16: Brennstoffanalyse Probesortierung	59
Tabelle 17: Übersicht über die Bewertung der Grundoperationen	65
Tabelle 18: Ergebnisübersicht des Basic-Engineering	75
Tabelle 19: Durchsattabelle	81
Tabelle 20: Allgemeine Kennziffern und Auslegungsgrößen	83
Tabelle 21: Auslegungsgrößen des Gesamtverfahrens	84
Tabelle 22: allgemeine Maschinenkennziffern in Datenblättern	89
Tabelle 23: Berechnung des maximalen Durchsatzes	91
Tabelle 24: Kostentabelle der Bauausführung	94
Tabelle 25: Kostenabschätzung für das Genehmigungsverfahren	95
Tabelle 26: Ermittlung des Lagerhaltungs- und Transportbedarfes	95
Tabelle 27: Annuitätenfaktoren	99
Tabelle 28: Investitionskosten	100
Tabelle 29: Kapitalkosten	100
Tabelle 30: Betriebskosten insgesamt	103
Tabelle 31: Zusammenfassung der Umsätze	104
Tabelle 32: Wirtschaftlichkeitsberechnung	104
Tabelle 33: Deckungsbeitragsrechnung	105
Tabelle 34: Externe Entscheidungsfaktoren	110
Tabelle 35: Interne Entscheidungsfaktoren	111
Tabelle 36: Investitionsrechnung	114
Tabelle 37: Ausbringungsquoten	115
Tabelle 38: Tabelle Entscheidungsfaktoren als Basis für Datenerhebung	116
Tabelle 39: Erhebung der Entscheidungsfaktoren des Referenzbetriebes	117
Tabelle 40: Erhebung der Entscheidungsfaktoren für den Vergleichsbetrieb	119
Tabelle 41: Wirtschaftlichkeits-Kennwerte des Vergleichsbetriebes	120
Tabelle 42: Spezifische Behandlungskosten des Vergleichsbetriebes	121
Tabelle 43: Deckungsbeitragsrechnung des Vergleichsbetriebes	121
Tabelle 44: Kennzahlenvergleich Kluck – Passon	121