



Niedertemperatur-Tunneltrockner zur optimierten Wertstoffgewinnung



Dipl.-Ing. Reinhard Schu
Dipl.-Biol. Kirsten Schu
EcoEnergy Gesellschaft für
Energie- und Umwelttechnik mbH
Walkenried am Harz

Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz Energie aus Abfall 3

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. habil. Karl J. Thomé-Kozmiensky
Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann, TK Verlag, Neuruppin

September 2007

Inhalt

	Seite
0	Einleitung4
1	(Werk)stoffliche versus energetische Verwertung.....5
2	Automatische Sortierung.....7
3	Abfallwaschung10
4	Abfalltrocknung11
4 a)	Trockenstabilisierungsverfahren.....11
4 b)	Trommeltrockner.....13
4 c)	Bandrockner14
5	Trocknung zur optimierten Wertstoffgewinnung18
6	Niedertemperatur-Tunneltrockner19
7	Zusammenfassung und Ausblick26
8	Literaturverzeichnis.....28

Tabellen

Tabelle 1:	Energiebedarf bei der Produktion von Verpackungen, verändert nach [15]5
Tabelle 2:	Trockenstabilisierung nach [14], [6] und eigenen Berechnungen12
Tabelle 3:	Trockenstabilisieranlagen nach [3] und eigenen Berechnungen.....12
Tabelle 4:	Trommeltrockner zur EBS-Konfektionierung in Deutschland nach.....13
Tabelle 5:	Trommeltrocknerkenndaten nach [17] [27][28][29]und eigenen Berechnungen.....13
Tabelle 6:	Bandrocknerkenndaten Brennstoffaufbereitungsanlage Wilmersdorf nach [34] und eigenen Berechnungen.....15
Tabelle 7:	Bandrockner für Siedlungsabfälle in Deutschland nach [26][34][38]15
Tabelle 8:	MBA Gärrestetrocknung nach [26][38] und eigenen Berechnungen17
Tabelle 9:	Vergleich der bestehenden Trocknungssysteme für Rest- und Gewerbeabfall.....18
Tabelle 10:	Auslegungsdaten Tunneltrockner.....19
Tabelle 11:	Investitions- und Betriebskosten25

Abbildungen

Abbildung 1: Entwicklung Kunststoffpreise und Rohölpreis	6
Abbildung 2: Prinzip der optischen Sortierung [8]	8
Abbildung 3: Bandrockner der Fa. Sevar Entsorgungsanlagen GmbH, MBA Südniedersachsen [38]....	16
Abbildung 4: Verfahrensschema Bandrockner der Fa. Sevar Entsorgungsanlagen GmbH [38]	16
Abbildung 5: Schnitt des Tunnelrockners	20
Abbildung 6: Draufsicht des Tunnelrockners.....	21
Abbildung 7: Blockfließbild Tunnelrockner	22
Abbildung 8: Sankey-Diagramm Tunnelrocknung mit optimierter Wertstoffgewinnung.....	23
Abbildung 9: Fließbild Tunnelrockner	24
Abbildung 10: Integration Tunnelrockner in eine Wertstoffsartieranlage	26

0 Einleitung

Die energetische Verwertung stand bisher im Vordergrund der Diskussion über Abfallwirtschaftskonzepte und Biomasseverwertung. EEG, Kraftstoffquotengesetz und der CO₂-Handel subventionieren direkt oder indirekt die energetische Verwertung. Die stoffliche bzw. werkstoffliche Verwertung wird nicht oder kaum subventioniert. Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz von 1994 hatte nach langen politischen Diskussionen nicht der stofflichen Verwertung den klaren Vorrang gegenüber der energetischen Verwertung eingeräumt. Dennoch bekannte sich das Duale System Deutschland mit Inkrafttreten des KrW-/AbfG in einer freiwilligen Selbstverpflichtung dazu, der werkstofflichen Verwertung die höchste Priorität beizumessen.

Erst in der EU-Abfallrahmenrichtlinie, die aktuell vor der Verabschiedung steht, wird der Vorrang der stofflichen Verwertung in der 5-stufigen-Abfallhierarchie festgeschrieben.

Die separate Sammlung von Wertstoffen wie Papier, Glas, Metall, Elektronikschrott und Bioabfall zur stofflichen Verwertung ist allgemein anerkannt, heiß diskutiert wird demgegenüber die Sinnhaftigkeit der getrennten Sammlung von Verpackungsabfällen. Lange wurde auf eine teure rohstoffliche Verwertung der Mischkunststoffe wie z. B. in der Kohle-Öl-Anlage in Bottrop, in der der Vergasungsanlage der SVZ zur Methanolgewinnung und auf die stoffliche Verwertung im Hochofen der Fa. Arcelor, Bremen vormals Stahlwerke Bremen, gesetzt. SVZ und Arcelor Bremen verwerten heute keine Mischkunststoffe mehr.

Konkurrenz zur separaten Sammlung von Verpackungsabfällen kam erst 1998 auf, als nachgewiesen wurde, dass nach der Trockenstabilisierung von Restabfall inkl. Verpackungsabfällen mit anschließender trockenmechanischer Aufbereitung ein schadstoff-reduzierter Ersatzbrennstoff produziert werden kann, der langfristig kostengünstig und - zur separaten Sammlung gleichwertig - energetisch in Zement und Kohlekraftwerken und rohstofflich in der SVZ verwertet werden kann.

Die Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen aus gemischten Siedlungsabfällen in Kohlekraftwerken und der Zementindustrie wird mittelfristig eine untergeordnete Rolle spielen. Ersatzbrennstoffe werden heute größtenteils mit hohen Zuzahlungen in Müllverbrennungsanlagen mitverbrannt, nur ein kleiner Teil wird in speziellen Ersatzbrennstoffkraftwerken energetisch verwertet oder wartet in legalen und illegalen Zwischenlagern [10] auf die Fertigstellung der zahlreich geplanten Ersatzbrennstoffkraftwerke.

Eine Ersatzbrennstoffherzeugung aus gemischten Siedlungsabfällen ist verfahrenstechnisch erst nach einer Trocknung oder Waschung mit Inertstoffabscheidung und nachfolgender Konfektionierung effektiv möglich. Mehrfach wurde diese Technik als biologische Trocknung und als thermische Trocknung mit Trommeltrocknern ausgeführt.

Die positive Entwicklung der werkstofflichen Verwertung von Abfällen ist zum einen der rasanten technischen Entwicklung von automatischen Abfallsortiersystemen wie der Nah-Infrarot-Sortiertechnik (NIR) zur Erzeugung sortenreiner Kunststoffe und zum anderen der Ölpreisentwicklung zu verdanken.

Sortenreine Fraktionen für eine werkstoffliche Verwertung können zwar grundsätzlich auch ohne vorherige Trocknung durch optische Sortiersysteme gewonnen werden, wesentlich für die Funktion der NIR-Technik bzgl. Abscheidegrad und Sortenreinheit ist jedoch die Vorbehandlung. Diese Erkenntnis wird heute genutzt und der Nachweis geführt, dass durch eine Trocknung eine optimale Vorkonditionierung für eine nachfolgende mechanische Abfalltrennung mit anschließender automatischer optischer Sortierung in sortenreine Fraktionen für eine werkstoffliche Verwertung möglich ist. Dies wurde 2004 durch Versuche mit Trockenstabilat gezeigt [5][23][24]. In einem Gutachten von 2006 der RWTH Aachen [32], beauftragt von der bvse, wird eine

effektive Wertstoffsartierung aus nicht separat gesammelten Abfällen aufgrund der feuchten Anhaftungen und Querverschmutzungen praktisch ausgeschlossen.

Schlüsseltechnologie der Erzeugung von werkstofflich verwertbaren, sortenreinen Abfallfraktionen ist neben den automatischen Sortiersystemen die Trocknungstechnik mit angepasster Aufbereitung zur Erzeugung von geeigneten Vorprodukten.

1 (Werk)stoffliche versus energetische Verwertung

In diesem Beitrag soll gezeigt werden, dass über eine optimierte stoffliche Verwertung von Abfällen eine wesentlich höhere Energierückgewinnung erfolgt als über eine Müllverbrennung, mit oder ohne Verwertungsstatus.

Eine Unterscheidung in Verwertung und Beseitigung ist in der Abfallwirtschaft aufgrund der Überlassungspflicht bedeutsam, die Unterscheidung in stoffliche und energetische Verwertung - aufgrund der Gleichstellung im KrW-/AbfG - für den Gewerbetreibenden und den privaten Entsorger meist unbedeutend.

Die weitere Differenzierung in rohstoffliche und werkstoffliche Verwertung steht im Zusammenhang mit der Struktur und der Produktion von Kunststoffen.

Zur Produktion von 1 kg Kunststoff werden ca. 1,8 l bis 2,3 l Rohöl als Rohstoff und Energieäquivalent benötigt. Der Brennwert von Rohöl liegt bei 41 MJ/kg [33].

Tabelle 1: Energiebedarf bei der Produktion von Verpackungen, verändert nach [15]

Material	Gesamtenergiebedarf (inkl. Rohstoffenergie) MJ/kg Produkt	Material	Gesamtenergiebedarf (inkl. Rohstoffenergie) MJ/kg Produkt
LDPE Folie	91,81	Weißblech	35,79
HDPE Folie	99,80	Aluminium	193,27
PP Spritzguss	118,84	Weißglas	12,74
PVC Folie	66,25	Wellpappe	19,82
PS (high impact)	91,81	Papier, Karton	44,79
PET Flasche	101,44	Verbunde Papierbasis	55,80
PET Folie	109,19	Holz	17,67

Die Produktionsenergie entfällt zum größten Teil auf die Synthese von Monomeren durch Polymerisation oder Polykondensation. Bei der werkstofflichen Verwertung bleibt diese Strukturenergie erhalten, während bei der rohstofflichen Verwertung diese Energie vernichtet wird. 70 % bis 90 % der Prozessenergie gehen bei der rohstofflichen gegenüber der werkstofflichen Verwertung als Strukturenergie verloren. Rohstoffliche Verwertungswege wie SVZ zur Methanolgewinnung, der Einsatz im Hochofen zur Eisenerzreduktion oder die frühere Ölproduktion in der Kohleölanlage in Bottrop sind aus Gründen der Energieerhaltung einer qualitativen werkstofflichen Verwertung unterlegen.

Der energetische Aufwand zur Erdölförderung steigt stetig an. Die Erdölförderung und damit das Angebot geht bei gleichzeitig steigender Nachfrage zurück. Nach Angaben der Internationalen Energieagentur lag die weltweite Öl-Nachfrage im ersten Quartal 2006 mit 84,9 Millionen Barrel/Tag [20] bereits knapp über dem Angebot von 84,5 Millionen Barrel/Tag. Bis 2030 steigt nach Prognosen der Internationalen Energieagentur der Bedarf auf 116 Millionen Barrel/Tag [21]. Sollte China nur auf die Hälfte der westlichen Verkehrsdichte aufschließen, dann wäre bereits 2020 der weltweite Erdölvorrat aufgebraucht [39]. In dieser Schätzung sind aber auch jene Erdölvorkommen eingerechnet, die mit heutigem Stand der Technik als „nicht förderbar“ gelten.

Preisteigerungen bei Rohöl sind nicht nur Strategie der Erdölexportierenden Länder, sondern sind auch in der immer aufwendigeren Fördertechnik der Erdölförderung begründet. So war es 1930 noch möglich, mit dem Energieäquivalent von einem Barrel Öl 100 Barrel zu fördern. Schon 1970 verringerte sich dieses Verhältnis auf 1:30. Heute – und die Fördereffizienz wird weiter, direkt proportional zur steigenden Förderkomplexität sinken – liegt das Verhältnis bereits bei 1:15. Allein um die momentane Fördergeschwindigkeit zu halten, wäre nur für Saudi-Arabien und Nachbarländer eine Investition von ca. 40 Milliarden Dollar pro Jahr erforderlich [39]. Die IEA geht von weltweit notwendigen Investitionen in Höhe von 3 Billionen Dollar bis zum Jahr 2030, allein zur Ölförderung, aus [21].

Dieser energetische Zusammenhang ist in einer Zeit der Energiepreissteigerung die Ursache für die neue Entwicklung hin zu einer werkstofflichen Verwertung von Kunststoffen. Der Kunststoffpreis ist stark an den Erdölpreis und Energiepreis gekoppelt.

Zur Orientierung der Preisentwicklung von Rohkunststoffen wird der Plastixx-Preisindex verwendet, der die Preisentwicklungen von PE-LD/LLD, PE-HD, PP, PVC, PS, PET sowie ABS, PA, PC, PMMA, POM und PBT nachbildet. Der Preisindex hat sich in den letzten 5 Jahren fast verdoppelt und es wird ein weiterer starker Preisanstieg erwartet. Für Primärkunststoffe liegt der aktuelle Preis im Durchschnitt bei ca. 1.240 €/t bzw. fast 110 €/MWh, für Recyclingkunststoffe bei ca. 200 €/t bis 650 €/t (20 €/MWh bis 55 €/MWh) je nach Kunststoff und Konfektionierung (Ballen, Granulat, Mahlgut) [30].

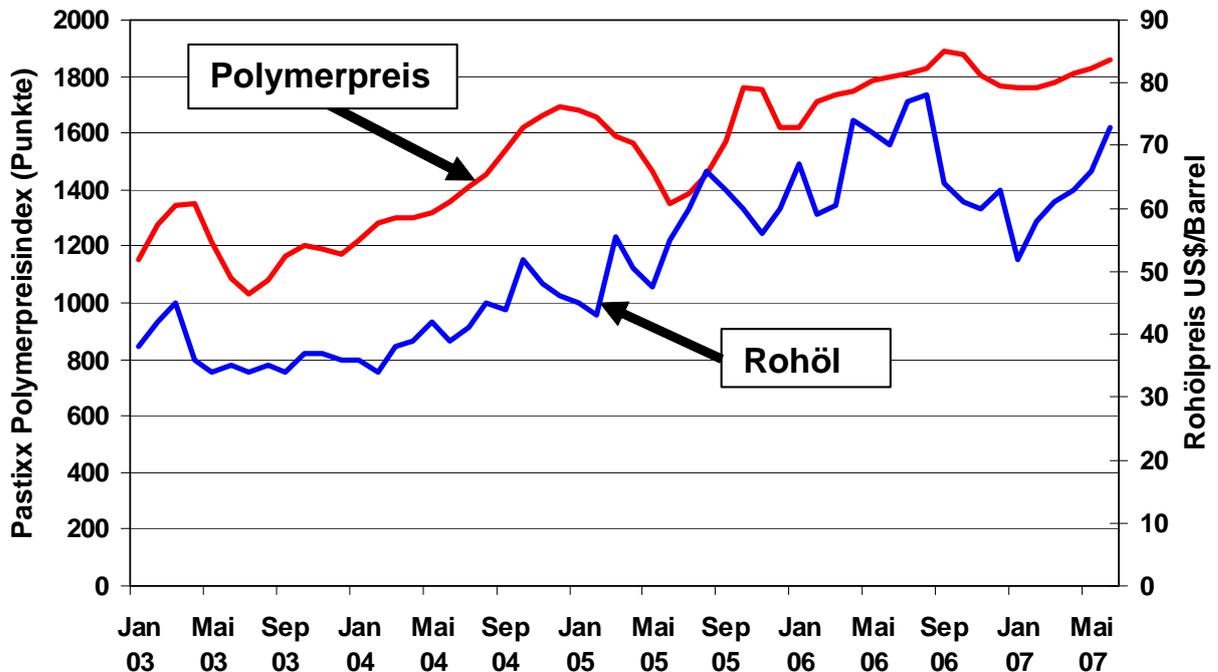


Abbildung 1: Entwicklung Kunststoffpreise und Rohölpreis

Eine ähnliche Preisentwicklung ist für Wertstoffe, die ebenfalls eine hohe Grundstoffproduktionsenergie besitzen wie PPK, Metalle und Glas zu verzeichnen.

Daher ist die stoffliche Verwertung von Metallen, Glas und PPK sowie die werkstoffliche Verwertung von Kunststoffen bei steigenden Energiekosten und im Sinne einer CO₂-Reduktion erforderlich.

Zu den ökonomischen Anreizen der werkstofflichen Verwertung gehören die Wertstoffpreissteigerungen und die erhöhten Kosten der energetischen Verwertung von Ersatzbrennstoffen aufgrund fehlender Kraftwerkskapazitäten.

Einen wesentlichen Beitrag zur verbesserten Wirtschaftlichkeit der Sortierung von sortenreinen Fraktionen leistet die rasante technologische Entwicklung der automatischen Sortiersysteme. Die Investitionskosten einer Sortieranlage betragen nur ca. 1/10 bis 1/7 der Investitionen eines Ersatzbrennstoffkraftwerkes zur energetischen Verwertung.

Sortieranlagen haben kürzere Amortisationszeiten und passen damit auch zu den Vertragslaufzeiten von 1 bis 5 Jahren für DSD-Mischkunststoffe sowie Gewerbeabfälle. Zur Investitionsentscheidung für ein Ersatzbrennstoffkraftwerk werden Vertragslaufzeiten von 10 oder mehr Jahren benötigt.

Die stoffliche oder werkstoffliche Verwertung kann nicht Selbstzweck sein, im Vordergrund bleibt die Entsorgungssicherheit des Abfalls.

Die erzeugten Produkte aus dem Abfall müssen eine gleich bleibend hohe Qualität und Menge aufweisen, damit die nachfolgende verarbeitende Industrie einen entsprechend sicheren Absatz der Fertigprodukte gewährleisten kann.

Ohne eine angepasste Vorbehandlung kann eine automatische Sortierung diesen Ansprüchen nicht gerecht werden. Abfälle mit Oberflächenfeuchte und Schmutzanhaftungen lassen sich zwar über NIR- und Röntgentechnik erkennen, die Erkennungsquote und Sortenreinheit lässt sich jedoch mit einer Trocknung bzw. Waschung mit anschließender Trocknung und angepasster Aufbereitung vor der automatischen Sortierung wesentlich verbessern.

2 Automatische Sortierung

Auch heute noch wird in Deutschland zur Sortierung das Handklauben bzw. die Handsortierung eingesetzt. Bei der Handsortierung können je nach Stückgröße und Stückgewicht zwischen 50 kg/h bis 300 kg/h je Person bei Förderbandgeschwindigkeiten von 0,1 m/s bis 0,2 m/s positiv sortiert werden. Liegen die Personalkosten bei mind. 12 €/h, ergeben sich allein für die Handsortierung Kosten von 40 €/Mg bis 240 €/Mg Wertstoff.

Die Sortiergüte ist zudem stark abhängig von dem Sortierer und dem zu trennenden Material. Das menschliche Auge ist jedoch nicht in der Lage, Kunststoffsorten soweit zu unterscheiden, dass sortenreine Kunststoffe für die werkstoffliche Verwertung gewonnen werden können.

Automatische Sortiersysteme arbeiten mit optischer Farb-, Form- und Materialerkennung von Wertstoffen. Optische Systeme können über Farbbildanalyse, Nahinfrarottechnik und Röntgentechnik unterschiedliche Materialeigenschaften erkennen und entsprechend sortenreine Kunststoff-Fractionen ausschleusen. Die Ausschleusung erfolgt pneumatisch über Düsenbalken.

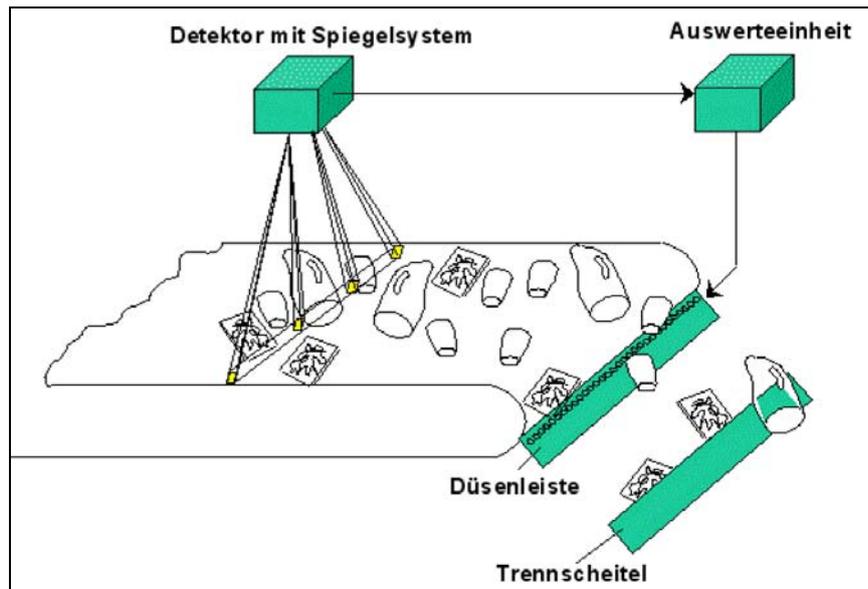


Abbildung 2: Prinzip der optischen Sortierung [8]

Der Hauptenergieverbrauch der automatischen Sortiersysteme liegt dementsprechend in den Luftkompressoren, die einen Druck von 6 bar bis 10 bar zur Ausschleusung erzeugen müssen. Je leichter und kleiner der auszuschleusende Wertstoff, desto höher ist der Energieeinsatz pro Tonne Material.

Neben den automatisierten Metall-, Glas- und Steinsortiertechnologien sind die wesentlichen Anbieter der NIR-Kunststoff-Sortierung auf dem deutschen Markt die folgenden Firmen:

- TiTech Visionsort GmbH, Andernach (System Polysort und Autosort)
- RTT Systemtechnik GmbH, Zittau (System Unisort)
- Steinert Elektromagnetebau GmbH, Köln (System Pellenc)

Optische Sortiersysteme für die Abfallsortierung wurden Anfang der 90er Jahre entwickelt, quasi gleichzeitig mit der EU Verpackungsrichtlinie und dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, und werden seit ca. 10 Jahren in der Sortierung von Mischkunststoffen aus der separaten Sammlung von Leichtverpackungen eingesetzt. Mindestens die Hälfte aller DSD-Sortieranlagen wurde bereits 2003 mit NIR-Sortieranlagen ausgerüstet.

Haupteinsatzfeld von optischen Sortieranlagen in der Aufbereitung von heizwertreichen Fraktionen aus MBA-Anlagen und Gewerbeabfällen ist die Aussortierung von PVC in der Ersatzbrennstoffaufbereitung zur Reduzierung des Chlorgehaltes vor der energetischen Verwertung.

Irritationen in der Politik haben die guten Versuchsergebnisse zur sortenreinen Kunststofftrennung aus heizwertreichen Fraktionen und Gewerbeabfällen hervorgerufen, die aus drei Projekten bekannt sind [16].

In der DSD-Sortieranlage Neuss wurden bereits 2003 Versuche zur automatischen Sortierung von Restabfall durchgeführt. Getrennt wurden dabei Eisen- und Nichteisenmetalle, Folien, Getränkekartonagen (FKN), PET-Flaschen, PE- und PP-Hartkunststoffe, Polystyrol, Mischkunststoffe und Ersatzbrennstoffe. Am Beispiel der Sortierung von Abfällen aus der Stadt Neuss zeigte sich, dass hier über eine Mischerfassung mehr Abfälle dem werkstofflichen Recycling und der energetischen Nutzung zugeführt werden konnten als beim bestehenden System. Die gewonne-

nen Wertstoffe waren qualitativ den vom Dualen System Deutschland (DSD) gewonnenen Wertstoffen gleichwertig [24].

Die DSD AG, das Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz und die Herhof Umwelttechnik GmbH führten 2004 das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Technisch ökonomische Analyse der gemeinsamen Erfassung und Aufbereitung von Restabfall und LVP“ durch. Das Projekt umfasste die Versuchsgebiete Westerwaldkreis und den Raum Trier. Das Restabfall-LVP-Gemisch wurde trockenstabilisiert und in einer Sortieranlage automatisch sortiert. Eine Sortierung des trockenstabilisierten Materials war technisch mit guten Qualitäten durchführbar. Das Sortiererergebnis war dabei abhängig vom Wassergehalt des Materials [5][23][24][42].

Seit 2004 führt die Stadt Leipzig zusammen mit der ALBA AG und DSD einen Modellversuch zur Erweiterung der Sammlung mit der Gelben Tonne durch, der im Jahr 2005 auch auf Berlin ausgedehnt wurde. Gesammelt wurden neben den DSD-Verpackungen auch stoffgleiche Nichtverpackungen, wie weitere Kunststoffe, Metalle und auch Elektrokleingeräte. Die Sortieranlage Leipzig wurde dazu umgebaut und mit einem automatischen Trenner für Elektrokleingeräte versehen [16]. Die erfasste Wertstoffmenge, bezogen auf die Gesamtabfallmenge, stieg nach ersten Ergebnissen von 14,2 % auf 16,4 % bei gleichzeitiger Einsparung von Entsorgungskosten aufgrund des verringerten Restabfallvolumens. Die erweiterte Sammlung soll bis Ende 2007 in 700.000 Haushalten in Berlin eingeführt werden [24].

Die Reinheit der positiv sortierten Kunststoffe in Neuss und Trier war vergleichbar mit den Sortiererergebnissen von Leichtverpackungen aus dem DSD [25]. Grundsätzlich ist ein trockenes, von Feingut befreites Material ohne Querverschmutzungen besser als Vorprodukt zur optischen Sortierung geeignet [32].

Die Versuche in Trier und Westerwald haben zwar gezeigt, dass eine Trocknung eine wesentliche Verbesserung der Vorprodukte vor der automatischen Sortierung bewirkt ([5][23][42]). „Die Restabfallbehandlung nach dem Trockenstabilisierungsverfahren weist einige Besonderheiten auf, denen durch eine angepasste Prozessführung entsprochen werden muss, sollen werkstofflich verwertbare Kunststoff- und Verbundfraktionen abgetrennt werden. Zu nennen sind hier bspw. die verfahrensbedingte Notwendigkeit einer Vorzerkleinerung sowie die Änderungen der Abfallstruktur durch die biologische Behandlung.“ [5]. „Das Staubpotential könnte durch entsprechende Maßnahmen weiter reduziert werden, da sich Staubablagerungen auf den optischen Systemen negativ auf das Sortiererergebnis auswirken [19].

Weiter ist zu beachten, dass trockene Materialien leichter sind als nasse und sich somit eine höhere Relativbewegung auf dem Band ergibt. Dies kann zu einer ungenaueren Ausschleusung führen, wenn vom Zeitpunkt der Detektion bis zum Ausschleusen eine zu lange Wegstrecke liegt und damit die Relativbewegung einen zu hohen Einfluss hat. Die Wegstrecke zwischen Detektion und Ausschleusung bestimmt sich unter anderem aus der Verarbeitungsgeschwindigkeit des Erkennungssystems und der Stückgröße. Eine 300 mm Folie kann nicht nach einer Strecke von 100 mm aussortiert werden, selbst wenn dies die Detektionsgeschwindigkeit zuließe. Bei einer Bandgeschwindigkeit von 2,5 m/s liegen die Wegstrecken der Erkennung bei ca. 20 cm bis 70 cm, je nach Systemanbieter. Mit der Weiterentwicklung der Prozessorgeschwindigkeit wird sich die Wegstrecke entsprechend minimieren und damit die Fehlerquote durch Relativbewegungen des Sortiergutes reduzieren.

Neben der Weiterentwicklung der optischen Erkennungssysteme wie z. B. Multisensorsysteme, Röntgensysteme [43] und Prozessorgeschwindigkeit ist ein wesentlicher Optimierungsfaktor eine gute Vorbehandlung, Vereinzelung und Dosierung.

Im Folgenden werden die heute angewandten Trocknungsverfahren und Waschverfahren vorgestellt und auf ihre Eignung zur Vorbehandlung vor einer automatischen Sortierung untersucht.

3 Abfallwaschung

In Deutschland ist heute keine kommerziell betriebene Anlagentechnik bekannt, mit der gemischte Siedungsabfälle mit dem Ziel der werkstofflichen Verwertung gewaschen werden.

Zur Aufbereitung von DSD-Leichtverpackungen wurde im Rahmen der Expo 2000 eine Kunststoffrecyclinganlage nach dem SORTEC-Verfahren vorgestellt [22].

Der Abfall wird nach einer trockenmechanischen Aufbereitung mit Windsichtung, Fe-Metallabscheidung und NIR-Sortierung zur PET-, PS-, und Getränkekarton-Positivsortierung in einem Pulper gewaschen und aufgefaseret.

Die Pulpe wird dann über eine Siebtrommel nachgewaschen und in einer Abwasserreinigung werden die Faserstoffe für die Wiederverwendung in der Papierindustrie zurückgewonnen. Über einen Wirbelstromabscheider wird Aluminium abgeschieden.

Nach einer Feinzerkleinerung werden in einer Sortierzentrifuge Aluminium-Kunststoff-Verbunde, und eine Polyolefinfraktion weitgehend sortenrein für eine anschließende werkstoffliche Verwertung zurückgewonnen [13].

Ein neues und interessantes Wasch-Verfahren wurde von einem Unternehmen aus Israel, ARROW ECOLOGY LTD entwickelt, das ArrowBio-Verfahren. Das Verfahren wurde als Demonstrationsanlage mit ca. 50.000 t/a Durchsatzleistung in Israel erstmals gebaut.

Eine zweite Anlage wird 2008 in Sydney, Australien mit 90.000 t/a Hausmüll in Betrieb gehen, eine weitere Anlage mit ca. 150.000 t/a in Mexiko. Bei diesem Verfahren wird der gesamte Abfall ohne vorherige Trockenaufbereitung gewaschen und über automatische und manuelle Sortierung werden Wertstoffe (Kunststoffe, Metalle, Holz etc.) gewonnen.

Die Organikfraktion wird abgetrennt und vergoren, Steine, Kies und Sand werden abgeschieden. Das Verfahren benötigt keine Zerkleinerung 0.

Ein ähnliches Verfahrensprinzip wendet auch das NMT-Verfahren der Firma EcoEnergy an, das bisher erst im Demonstrationsmaßstab getestet wurde.

Nach einer trockenen Aufbereitung der Abfälle wird eine Abfallfraktion < 150 mm ohne weitere Zerkleinerung schonend in mehreren Prozessstufen getrennt und gewaschen. Wertstofffraktionen wie Holz, Folien und Hartkunststoffe werden in einer gewaschenen Fraktion 30 mm bis 150 mm angereichert [36].

Zur weiteren Trennung der angereicherten Wertstofffraktionen in sortenreine Fraktionen ist auch bei den beiden letztgenannten Waschverfahren eine optische Sortierung mit vorhergehender Trocknung und Aufbereitung erforderlich.

Das SORTEC-Verfahren ist nur für Abfälle aus der separaten Sammlung sinnvoll einzusetzen, auch bei diesem Verfahren wird die PET-, PS- und Getränkekarton-Fraktion nach einer trockenen Aufbereitung mittels NIR-Technik aussortiert.

Eine vorherige Trocknung der Abfälle würde auch hier die Wertstoffeffassung verbessern.

Grundsätzlich sind über Waschung und Trocknung aufbereitete, mit Wertstoffen angereicherte Abfallfraktionen ideal für eine weitere sortenreine Fraktionierung einzusetzen.

Eine Waschung alleine ist dann ausreichend, wenn eine Vereinzelung vor der Sortierung möglich ist.

4 Abfalltrocknung

Aus dem Stand der Technik ist es bekannt, zur weitgehenden Aufbereitung von Abfällen diese zunächst einer Trocknung zu unterziehen. Die Trocknung verbessert die Qualität der Aufbereitung und die Verwertungsmöglichkeiten für die zu separierenden Teilfraktionen. Darüber hinaus kann durch eine Trocknung auch der Heizwert des getrockneten Gutes angehoben werden.

Bei den direkten Trocknungsverfahren für Abfälle wird zwischen Kaltlufttrocknung und Warmlufttrocknung unterschieden.

Kaltlufttrocknung

Bei der Kaltlufttrocknung wird die zur Trocknung erforderliche Energie aus dem Trocknungsgut entnommen, z. B. über Abkühlung des Trocknungsgutes oder über exotherme Reaktionen im Trocknungsgut wie beim Trockenstabilisierungsverfahren. Die biologische Trocknung wird durch Nutzung der Eigenerwärmung des Abfallgemisches in Verbindung mit einer Zwangsbelüftung und Energierückführung mittels Wärmetauscher erreicht. Die Energie zur Trocknung wird hauptsächlich durch Oxidation organischer Inhaltstoffe im Abfall aufgrund mikrobakterieller Prozesse (Kompostierung) erzeugt. Kennzeichnend für das Verfahren sind ein Abluftvolumenstrom von 3.000 m³/Mg bis 5.000 m³/Mg und eine Verweilzeit von 6 bis 10 Tagen zur Trocknung des Abfalls. Die lange Trocknungszeit und das entsprechende Reaktionsvolumen erfordern unter dem Gesichtspunkt einer vollständigen Kapselung und Automatisierung der Anlagen einen entsprechenden technischen Aufwand.

Warmlufttrocknung

Bei der Warmlufttrocknung wird die zur Trocknung benötigte Wärmeenergie vorrangig durch vorgewärmte Luft von außen an das Trockengut herangeführt.

Zur Warmlufttrocknung von Hausmüll und/oder der heizwertreichen Fraktion aus Siedlungsabfällen kommen heute bereits Intensivtrockner mit kurzen Verweilzeiten und hohen Trocknungstemperaturen zum Einsatz. Die Intensivtrockner bedingen einen hohen Aufbereitungsgrad des zu trocknenden Gutes vor der Trocknung. In Betrieb sind Trommeltrockner zur Restabfallbehandlung, die in der Regel mit Erdgas, Deponiegas und Abwärme aus BHKW's beheizt werden. Die Abluft wird mittels Zyklone und Gewebefilter, in Ausnahmefällen mittels Wäscher und regenerativer thermischer Oxidation (RTO) gereinigt. Das Material ist für Trommeltrockner auf eine Korngröße < 60 mm zu zerkleinern. Die anschließende Wertstoffsartierung erfordert neue verbesserte Sortierverfahren. Aufgrund der hohen Temperaturen sind zusätzliche Schutzmaßnahmen erforderlich.

Bekanntere Verfahren zur Abfalltrocknung sind biologische Trockenstabilisierungsverfahren und thermische Verfahren, ausgeführt als Trommeltrockner und Bandtrockner. Bisher keine kommerzielle Anwendung eines Trocknungsverfahrens als Konditionierung vor einer sortenreinen Fraktionierung zur werkstofflichen Verwertung bekannt.

4 a) Trockenstabilisierungsverfahren

Trockenstabilisierungsverfahren in Restabfallbehandlungsanlagen wurden in der Vergangenheit von den Firmen Herhof Umwelttechnik GmbH, Lentjes GmbH, Nehlsen GmbH & Co. KG, Wehrle Umwelt GmbH und Herhof GmbH realisiert.

Trockenstabilisierungsverfahren eignen sich grundsätzlich zur Vorbehandlung vor einer automatischen Sortierung, wie dies auch die Versuche in mit Trockenstabilat in der Sortieranlage Trier unter Begleitung des Dualen Systems Deutschland AG 2004 gezeigt haben [5][23].

Positiv zu bewerten für eine nachfolgende Wertstoffsartierung ist der geringe erforderliche Zerkleinerungsgrad gegenüber anderen Trocknungssystemen von < 150 mm und teilweise < 250 mm.

Über den Rotteprozess werden ca. 61 kg Biomasse pro Tonne Abfall [14] verbraucht, das entspricht ca. 300 kWh/Mg Abfallinput. Pro Tonne Einsatzmaterial werden ca. 300 kg Wasser verdampft.

Im Weiteren werden die Kenndaten des Trockners auf die Wasserverdampfungsleistung normiert:

Tabelle 2: Trockenstabilisierung nach [14], [6] und eigenen Berechnungen

Parameter	pro t Wasserverdampfung*
Temperatur	Eintritt: 20 °C - Austritt 60 °C
Abluftemissionen:	10.000 - 16.500 Nm ³ /t
Stromverbrauch:	120 - 180 kWh/t
Erdgasverbrauch RTO:	80 - 150 kWh/t
Wärmeeinsatz (aus Rotteprozess):	850 - 1.000 kWh/t

*Bezug ist nur der Anteil des Trockenstabilisierungsverfahrens, der für die Abfalltrocknung benötigt wird

Tabelle 3: Trockenstabilisierungsanlagen nach [3] und eigenen Berechnungen

	Abfalldurchsatz t/a	theor. Leistung t H ₂ O/h
Trockenstabilisierungsverfahren Herhof		
MBS ZAB Nuthe-Spree (Niederlehme)	135.000	5,50
MBS Aßlar	155.000	6,40
MBS Osnabrück	90.000	3,70
MBS Westerwald (Rennerod)	100.000	4,00
MBS Trier-Mertesdorf	180.000	7,40
BMA Dresden	105.000	4,30
Trockenstabilisierung Lentjes		
MBA Wetterau	49.000	2,00
Trockenstabilisierung Nehlsen		
MBV Lübben Ratsvorwerk/Niederlausitz	28.000	1,20
MBS Vogtland	65.000	2,30
MBV-/EBS Anlage Stralsund	70.000	2,70
Trockenstabilisierung Wehrle Umwelt		
MBA Kahlenberg (100.000 t/a gesamt)	55.000	3,00

4 b) Trommeltrockner

Alle in Deutschland betriebenen Trommeltrocknungsanlagen für die Ersatzbrennstoffkonfektionierung wurden von der Firma Vandenbroek geliefert.

Tabelle 4: Trommeltrockner zur EBS-Konfektionierung in Deutschland nach

	Abfalldurchsatz t/a	Leistung t H ₂ O/h
Trommeltrockner Vandenbroek		
SBS ECOWEST, Ennigerloh	160.000	2,5 - 3,5
MPS Chemnitz (2 Trockner)	143.000	(2x) 4 -5
MPS Berlin-Reinickendorf	160.000	5 - 7
MPS Berlin-Pankow	160.000	5 - 7

Neben den oben genannten Trocknern wurden noch weitere Trommeltrockner in Lünen von der Firma Remondis [12] und in Hoyerswerda von der SVZ zur Brennstoffaufbereitung betrieben, sind aber heute nicht mehr in Betrieb.

Tabelle 5: Trommeltrocknerdaten nach [17] [27][28][29] und eigenen Berechnungen

Parameter	pro t Wasserverdampfung
Temperatur:	Eintritt: 350 °C - Austritt 105 °C
Abgasemission:	3.000 – 4.000 Nm ³ /t
Stromverbrauch:	40 – 80 kWh/t
Erdgasverbrauch RTO:	25 - 50 kWh/t
Wärmeeinsatz Trocknung (Erd-, Bio- oder Deponiegas):	850 kWh/t

Um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten, werden die zu trocknenden Abfälle auf ca. < 60 mm gesiebt bzw. zerkleinert. Eine sortenreine Wertstoffsartierung nach der Trocknung ist aufgrund der geringen Stückgröße erschwert.. Die Verweilzeit des Trocknungsgutes im Trommeltrockner beträgt ca. 10 bis 20 min. [1]. Das nasse Gut wird mittels Heißluft getrocknet, die in einem Gasbrenner erzeugt wird. Die heißen Rauchgase strömen mit einer Temperatur von 300 °C bis 400 °C direkt in die Trommeltrockner. Als Verbrennungsluft wird die Hallenabluft aus der Ersatzbrennstoffaufbereitung verwendet.

Die sich drehende Trocknungstrommel ist mit Transportschaufeln ausgestattet, die das Gut durch die Trocknerstrommel befördern. Die Trommel ist in Abschnitte eingeteilt, die jeweils aus zwei runden Trennwänden bestehen und für einen intensiven Kontakt zwischen den Rauchgasen und dem Trocknungsgut sorgen, um die hinzugefügte Wärme besser zu nutzen und einen möglichst hohen Sättigungsgrad der Abluft zu erreichen. Die Rauchgase werden durch die Wärmeübertragung bis zum Ende der Trocknungstrommel auf < 110 °C abgekühlt, wobei sich das Trocknungsgut auf ca. 70°C erwärmt..

Das getrocknete Gut wird nach der Trocknerstrommel in einem Zyklon von der Trocknungsluft getrennt. Schwerteilchen werden über ein Austragsgehäuse hinter der Trommel separat abgetrennt. Nach der Entstaubung wird der größte Teil der Trocknungsluft zum Gasbrenner zurückgeführt und wieder erwärmt (Kreislaufführung der Trocknungsluft). Die nicht

zurückgeführte Trocknungsluft wird als Abgas über eine regenerative Nachverbrennungsanlage (RTO) gereinigt.

Die MPS-Anlagen unterliegen im Gegensatz zu den Trockenstabilatanlagen nicht den strengen Abluftreinigungsvorschriften der 30. BImSchV. In den frühen Planungen wurde dies für die Trommeltrocknungsverfahren als Vorteil angesehen. Dieser Vorteil entfiel jedoch mit der novellierten TA-Luft, in deren Konsequenz auch für die thermische Abfalltrocknung eine RTO einzusetzen ist [4]. Alle MPS-Projekte (Berlin, Chemnitz) basierten in ihrer Entstehung auf einer stofflichen Verwertung der Ersatzbrennstoffe in der SVZ, die heute keine Abfälle mehr annimmt. Zitat Prof. Dr. Peter von Dierkes: „Die Grundidee ist sehr plausibel, denn die Eigenschaften eines für das SVZ geeigneten Produktes sind bekannt. Es müssen extrem störstofffreie, stark verdichtete Pellets, form- und thermostabil, also mit geringer Restfeuchte sein. Daraus ergab sich der Zwang zur Trocknung, und das wiederum warf die Frage auf, woher die Energie dafür stammen sollte. Die Antwort war ebenso einfach wie schlüssig: aus der Vergärung der heizwertarmen Fraktion gewinnen wir Gas, das als Energieträger für den Trocknungsprozess eingesetzt werden kann.“ [7]

Trommeltrocknungsanlagen zur Ersatzbrennstoffkonfektionierung werden heute standortbedingt vorwiegend mit Erdgas betrieben.

Vandenbroek empfiehlt bei der Planung die Nutzung von BHKW-Abwärme, wie dies bei der Trommeltrocknung von mechanisch entwässerten Gärresten < 40 mm vor der Nachrotte in den Projekten MBA Lübeck (2 x 1,7 t/h H₂O) und MBA Schwarze Elster (1 x 1,3 t/h) der Firma Allgaier eingesetzt wird [2].

Trommeltrockner mit Inputspezifikationen < 60 mm Korngröße sind als Vorschaltanlage vor einer optischen Sortierung zur Erzeugung sortenreiner Werkstoffe nur bedingt geeignet. Weiterentwicklungen der Trommeltrockner für gröbere Abfallfraktionen und eine angepasste Sortiertechnik können die Eignung der Trommeltrocknung für die Gewinnung sortenreiner Werkstoffe verbessern.

4 c) Bandrockner

Neue Klärschlammrockner werden heute zunehmend entweder als Bandrockner oder als solare Trocknungsanlagen installiert. Hauptgrund für diese Trendwende ist die Möglichkeit zur Nutzung von Abwärme bzw. Umgebungswärme oder solarer Energie. Die Energiekosten betragen mehr als 50 % der gesamten Trocknungskosten und stellen ein hohes Optimierungspotential, sowohl bzgl. der Energiemenge als auch des Energieniveaus dar.

Kraft-Wärme-Kopplung ist ein bedeutender Pfeiler der Energiepolitik und wird durch zusätzliche Vergütungen für KWK-Strom nach dem Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz gefördert. Anlagen nach EEG erhalten bis zu 20 €/MWh KWK-Strom. Eine Erweiterung des KWK-Gesetzes auf Abfallverbrennungsanlagen mit einer zusätzlichen Vergütung von 15 €/MWh für KWK-Strom [40] ist geplant. Anlagen, die nach dem Zuteilungsgesetz am CO₂-Zertifikathandel teilnehmen, erhalten im Fall der Kraft-Wärmekopplung höhere Zertifikatzuteilungen [§ 14 ZuG].

Eine zukunftsweisende Abfalltrocknung zur Ersatzbrennstoffkonditionierung wird in Wilmersdorf, östlich von Berlin, von der Firma Otto-Rüdiger Schulze betrieben [34]. Die EBS-Aufbereitungsanlage hat einen Durchsatz von 100.000 t/a Haus- und Gewerbeabfall aus Berlin und Brandenburg. Nach einer mechanischen Abfallaufbereitung mit Absiebung der Feinkornfraktion, Fe-Abscheidung, händischer Wertstoffsartierung, Störstoffentfrachtung, Feinzerkleinerung mit einer Hammermühle, Windsichtung und Abscheidung von NE-Metallen aus der Schwerfraktion wird der so erzeugte Ersatzbrennstoff über einen Kollergang anpelletiert. Die aufbereiteten

Ersatzbrennstoffe hatten jedoch einen hohen Wassergehalt. Mit dem Bau des Biomassekraftwerkes mit ca. 25,4 MW Feuerungswärmeleistung konnte Abwärme zur Verbesserung der Brennstoffqualität genutzt werden. Es wurde 2004 ein Bandrockner mit 2,25 MW Abwärmebedarf zur Trocknung des Ersatzbrennstoffes vor dem Kollergang installiert. Der Bandrockner der Firma Amandus Kahl GmbH & Co. KG wird mit Niederdruckdampf bei einer Temperatur von 120 °C beheizt. Die Abluft aus dem Trockner wird nach einer Filterung dem Biomassekraftwerk als Verbrennungsluft zugeführt. Die Warmluft wird dem Trocknungsgut bei ca. 80 °C bis 110 °C zugeführt. Bei einer Verweilzeit im Trockner von ca. 10 min. wird eine Restfeuchte von ca. 20 % erreicht. Höhere Trocknungsgrade würden höhere Verweilzeiten bedingen.

Tabelle 6: *Bandrocknerkenndaten Brennstoffaufbereitungsanlage Wilmersdorf nach [34] und eigenen Berechnungen*

Parameter	pro t Wasserverdampfung
Temperatur	Eintritt: 100 °C - Austritt 40 °C
Abgasemission ohne Umluftbetrieb:	ca. 10.000 Nm ³ /t
Stromverbrauch:	80 – 100 kWh/t
Erdgasverbrauch RTO	0 kWh/t Zuluft Biomassekraftwerk
Wärmeeinsatz Trocknung (Abwärme Biomassekraftwerk)	900 kWh/t

Der Bandrockner in Wilmersdorf stellt eine nicht typische Anwendung im Abfallbereich dar, da hier die Abluftmenge (Nutzung im benachbarten Biomassekraftwerk) nicht durch Umluftführung minimiert wird.

In der folgenden Tabelle sind weitere Bandrockner zur Abfalltrocknung enthalten, Klärschlamm-trockner und Trockner für sortenreine Kunststoffe nach der Waschung werden hier nicht betrachtet.

Tabelle 7: *Bandrockner für Siedlungsabfälle in Deutschland nach [26][34][38]*

	Abfall-durchsatz t/a	Leis-tung t H ₂ O/h	Temperatur-Heizmedium	Energiebedarf therm./elektr. kWh/ t H ₂ O	Abluftmenge Nm ³ / t H ₂ O
Amandus Kahl GmbH & Co. KG					
EBS-Aufbereitungsanlage Wil-mersdorf	100.000	2,5 – 3	Dampf 120°C	900/50	10.000
Klein Abwasser- und Schlamm-technik GmbH					
MBA Wiefels	113.500	2,4	Abgas BHKW 485 °C	895/45	3.500
MBA Sachsenhagen (Schaum-burg)	75.000	1		700/80	2.000
Sevar Entsorgungsanlagen GmbH					
MBA Südniedersachsen (Deidero-de)	133.000	2,25	Abgas BHKW	835/62	350

Bemerkenswert sind die Maßnahmen zur Abluftminimierung und Wärmerückgewinnung bei den Bandtrocknungssystemen.

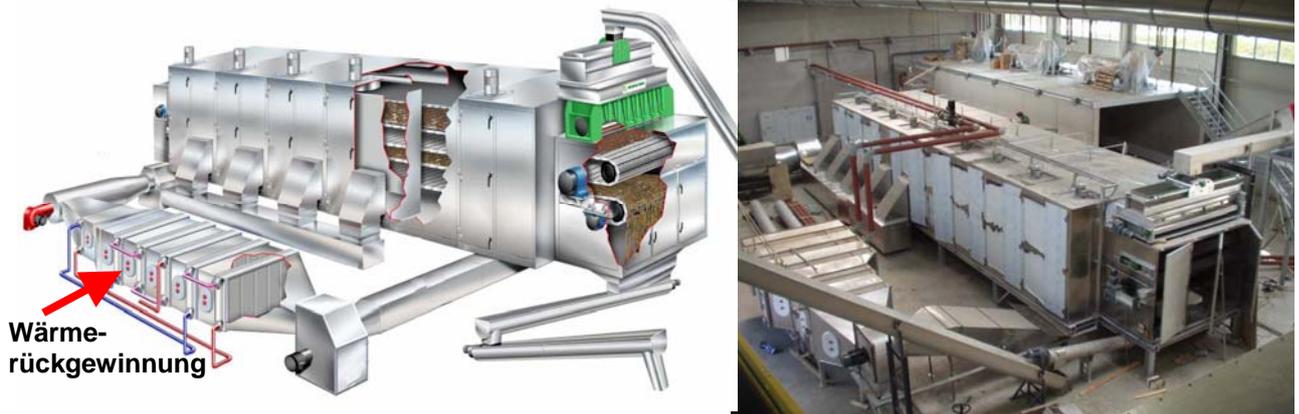


Abbildung 3: Bandrockner der Fa. Sevar Entsorgungsanlagen GmbH, MBA Südniedersachsen [38]

Die mit einer optimierten Umluftführung auf $< 350 \text{ Nm}^3/\text{t H}_2\text{O}$ reduzierbaren Abluftmengen betragen nur noch 2 % bis 3,5 % der Abluftmenge eines Trockenstabilisierungsverfahrens mit $10.000 \text{ Nm}^3/\text{t H}_2\text{O}$ bis $16.500 \text{ Nm}^3/\text{t H}_2\text{O}$.

Auch ein Trommeltrocknungsverfahren kann die Abluftemissionen nicht wirtschaftlich in der gleichen Größenordnung reduzieren wie ein Bandrocknungssystem.

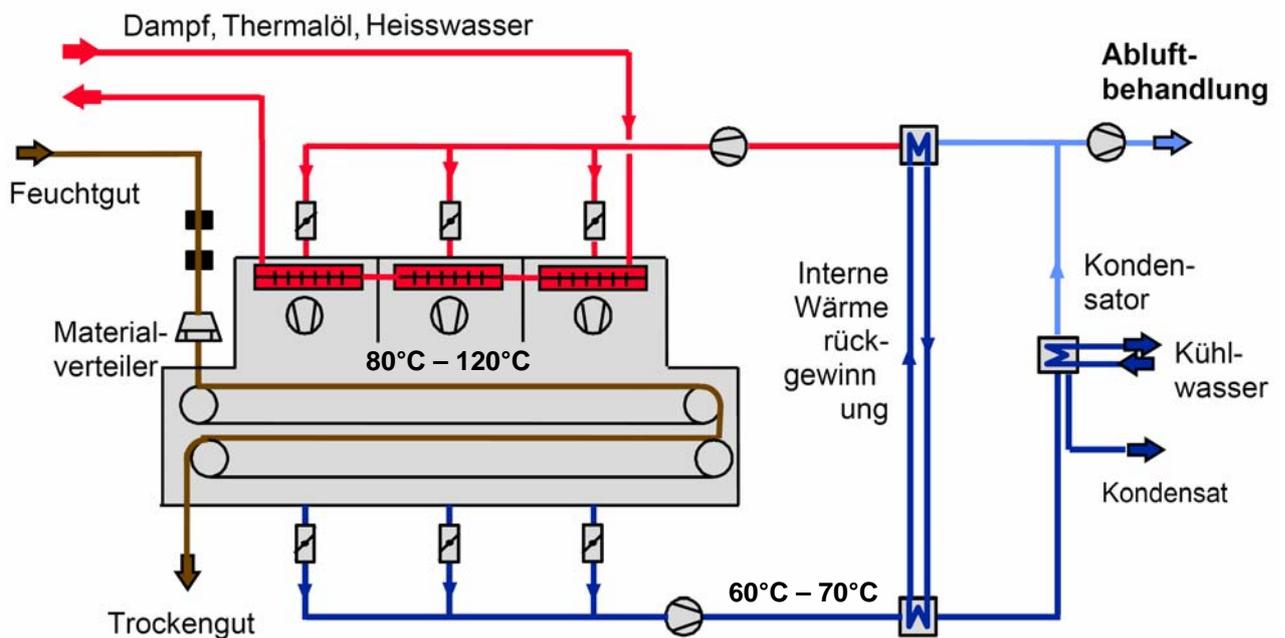


Abbildung 4: Verfahrensschema Bandrockner der Fa. Sevar Entsorgungsanlagen GmbH [38]

Trocknungssysteme mit befeuerten Heißgaserzeugern oder Trockenstabilisierungsverfahren haben aufgrund der Rauchgasentstehung bzw. des Sauerstoffbedarfs der Mikroorganismen

geringere Abgasreduktionspotentiale durch Kondensation der Brüden in der Abluft als Trocknungssystem mit Abwärmenutzung.

Das bei der Wärmerückgewinnung entstehende Kondensat muss allerdings weiter aufbereitet werden.

An Deponiestandorten mit Sickerwasseraufbereitung, Kläranlagen und MBA, vor allem mit Naßfermentationsverfahren, stellt die Kondensatwasseraufbereitung ein geringeres Problem dar, da eine Abwasseraufbereitungsanlage sowieso erforderlich ist.

In einigen Trockenstabilatanlagen mit Wärmerückgewinnung und teilweiser Kondensation wird das entstehende Kondensat soweit gereinigt, dass es als Zusatzwasser für die zur Kondensation benötigten Naßkühltürme eingesetzt werden kann.

Tabelle 8: MBA Gärrestetrocknung nach [26][38] und eigenen Berechnungen

Parameter	pro t Wasserverdampfung
Temperatur Umluftsystem	Eintritt: 80 – 120 °C Austritt 40 – 80 °C
Abgasemission:	350 – 3.500 Nm ³ /t
Stromverbrauch:	45 – 80 kWh/t
Erdgasverbrauch RTO	7 - 70 kWh/t
Wärmeeinsatz Trocknung (Abwärme BHKW)	700 - 900 kWh/t
Kondensat zur Entsorgung	0 – 1.000 kg/t

5 Trocknung zur optimierten Wertstoffgewinnung

Automatische optische Sortiersysteme haben die Möglichkeiten der sortenreinen Werkstoffgewinnung revolutioniert. Wesentlich für die automatische Sortierung ist dabei eine angepasste Aufbereitung und Dosierung.

In den folgenden Aufbereitungstechniken sind trockene Abfälle besser geeignet und es wird ein besseres Trennergebnis erzielt:

- Siebtechnik
- Windsichtung
- Ballistischer Sichter
- Vereinzelung

Die Trocknung von Abfällen mit hohen Restfeuchtegehalten, wie Siebüberlauf aus der Restabfallbehandlung und Gewerbeabfälle, stellt die effektivste Optimierung der optischen Sortiertechnik dar. Die sortierten Wertstoff-Fractionen sind zudem trocken, geruchsarm und hygienisiert.

Die wesentlichen Kenndaten der bisher eingesetzten Trocknungssysteme sind in der nachfolgenden Tabelle gegenübergestellt. Da unterschiedliche Energieträger eingesetzt werden, wurde ein elektrisches Energieäquivalent definiert. Je nach Energieträger sind nach dem Stand der Technik unterschiedliche Nettowirkungsgrade bei der Verstromung möglich. Es wurden folgende Annahmen getroffen:

- Erdgas: 50% elektrischer Nettowirkungsgrad in GuD Kraftwerken
- Biomasse: 26% elektrischer Nettowirkungsgrad in Biomassekraftwerken
- Abwärme: 10% elektrischer Nettowirkungsgrad in einer Dampfturbine bei Dampf (3 bar/133 °C)

Tabelle 9: Vergleich der bestehenden Trocknungssysteme für Rest- und Gewerbeabfall

Parameter	pro t/H ₂ O	Trocken-stabilisierung	Trommel-Trockner (Brenngas)	Trommel-Trockner (Abwärme)	Bandtrockner (Abwärme)
Inputspezifikation		< 200 mm, biogener Anteil	< 60 mm	< 40 mm (Gärrest)	< 40 mm (Gärrest)
Verweilzeit		6 – 10 Tage	10 – 20 min.	10 – 20 min.	10 -20 min.
Heizmedium		Rotte (Biomasse)	Erdgas	Abwärme	Abwärme
Temperatur Trocknungsluft Eintritt/Austritt		20 °C/ 60 °C	350 °C/ 105 °C	350 °C/ 105 °C	80 - 120°C/ 40 - 80°C
Abgasemission:	Nm ³	10.000 – 16.500	3.000 – 4.000	3.000 – 4.000	350 – 3.500
Stromverbrauch:	kWh	160 – 180	40 - 80	40 - 80	40 – 80
Erdgasverbrauch RTO	kWh	80 -150	25 - 50	25 – 50	7 - 70
Wärmeeinsatz Trocknung	kWh	1.000	850	850	700 – 900
Elektr. Energieäquivalent	kWh	460 - 515	470 - 530	140 - 195	154 – 205
Kondensat zur Entsorgung	kg	0	0	0	0 – 1.000

Nach energetischen Kriterien und aus emissionstechnischer Sicht ist bei thermischen Trocknungssystemen ein Abwärmenutzungskonzept zu präferieren. Die Inputkriterien der thermischen Trocknung erschweren jedoch bisher noch eine effektiven Wertstoffsartierung, da die Wertstoffe vor der Trocknung entweder aufgrund der kurzen Verweilzeiten oder um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten auf Korngrößen < 40 mm bzw. < 60 mm zerkleinert werden müssen. Die Trockenstabilisierung kann aufgrund der hohen Verweilzeit und Störstoffunempfindlichkeit Stückigkeiten bis 200 mm trocknen und damit eine nachfolgende Wertstoffsartierung optimieren.

Bedingung der Trockenstabilisierung ist ein Mindestanteil an leichtabbaubarer Organik. Eine Trockenstabilisierung von Restabfall inkl. der Fraktion < 80 mm ist bereits in vielen Projekten realisiert worden. Die Siebüberlauffraktion > 80 mm aus Restabfall und Gewerbeabfällen beinhaltet meist nicht genügend leichtabbaubare Organik. Zudem müsste die Organik, wenn nur geringe Organikgehalte im Abfall vorhanden sind, durch Zerkleinerung aufgeschlossen werden. Diese Zerkleinerung erschwert die nachfolgende Wertstoffsartierung.

Idealerweise sollte der Abfall unzerkleinert vor der weiteren Aufbereitung und Wertstoffsartierung getrocknet werden. EcoEnergy hat hierzu einen Verfahrensvorschlag erarbeitet und die Machbarkeit untersucht.

6 Niedertemperatur-Tunnelrockner

Bei dem Niedertemperatur-Tunnelrockner handelt es sich um einen an den Abfall adaptierten, kontinuierlichen Bandrockner im Umluftbetrieb, als Band wird ein belüftbares Pendelbodensystem eingesetzt. Zur Beheizung wird Niedertemperaturabwärme verwendet. Im Trockner kann Material bis zu einer Korngröße von 400 mm verarbeitet werden. Die Fraktion sollte aus einem Siebschnitt 80 mm bis 300 mm und grob zerkleinertem Siebüberlauf > 300 mm bestehen, um eine möglichst geringe Zerkleinerungswirkung zu haben. Folgende technische Daten für einen Durchsatz von 100.000 t/a Gewerbeabfall wurden angesetzt:

Tabelle 10: Auslegungsdaten Tunnelrockner

Parameter		Daten
Wasserverdampfungsleistung	t/h	3
Verweilzeit im Tunnel	Std.	8 – 24
Inputspezifikation	mm	40 - 300
Dichte Abfallinput	kg/m ³	70 – 200
Heizmedium	Abwärme	> 95°C
Temperatur Trocknung Eintritt/Austritt		85°C/45°C-50°C
Abluftemissionen Trocknung	Nm ³ /t H ₂ O	350 – 700
Stromverbrauch Trocknung	kWh/t H ₂ O	80
Erdgasverbrauch RTO	kWh/t H ₂ O	7 – 14
Wärmeeinsatz Trocknung	kWh/t H ₂ O	1.000
Elektr. Energieäquivalent	kWh/t H ₂ O	190
Kondensat zur Entsorgung	kg/t H ₂ O	0
Anzahl Tunnel	Stück	2
Schütthöhe im Tunnel	m	ca. 6,0
effektive Breite Belüftung Tunnel	m	10,0 m

Beheizungslänge	m	30,0 m
Kühllänge	m	4 m
Fläche Belüftungsboden Beheizung	m ²	2 x 300
Flächenbelastung Trocknungsgut	Kg/m ²	800
Belastung Belüftungsboden Beheizung	Nm ³ /(m ² xh)	350

Die Zuführung in den Tunnel erfolgt mit einem Schachtzuführsystem, wobei das Trockengut gleichzeitig eine Abdichtung gegenüber dem Zuführsystem darstellt. Die Schütthöhe im Tunnelrockner muss zur optimalen Wasserdampfsättigung der Umluft möglichst hoch gewählt werden und beträgt ca. 6 m. Zur Einstellung der Schütthöhe kann ein deckenseitig angeordneter verstellbarer Abstreifer eingesetzt werden. Zur Förderung des Trocknungsgutes durch den Tunnelrockner wird ein Pendelbodensystem eingesetzt, das einen Massenfluss des durch das System getragenen Trockengutes erlaubt. In zahlreichen Projekten der Bio- und Restabfallbehandlung wurden bereits Pendelbodensysteme zum Beispiel von den Firmen Linde-KCA Dresden, Horstmann GmbH & Co. KG, Gicom b.v., Christiaens b.v, Hese Umwelt GmbH und Lurgi Energie und Entsorgung GmbH eingesetzt. Als Durchlauf-Tunnelsystem wurde ein Pendelbodensystem bisher nur in der MBA Wetterau zur Trockenstabilisierung eingesetzt. Generalunternehmer war die Fima Lurgi Energie und Entsorgung GmbH, heute Lentjes, geliefert wurde das Pendelbodensystem von Küttner GmbH & Co. KG. Ein- und Austrag des Restabfalls < 200 mm erfolgt vollautomatisch [3].

Das getrocknete Material aus dem Tunnelrockner wird ausgetragen mit einem Pendelbodensystem sowie einer Pendelklappe am Austrag, die zusätzlich mit einem Haspelsystem zum dosierten Austrag aus dem Tunnel versehen ist und gleichzeitig einen Luftabschluss gegenüber dem Austrittssystem darstellt. Auf diese Weise wird der Einbruch an Falschluff minimiert und Abluft vermieden. Der Einsatz von Dosiereinrichtungen zur Dosierung des Materialaustrags erlaubt einen effektiven und störungsfreien Betrieb der nachfolgenden Aufbereitungsaggregate.

Die folgenden Abbildungen zeigen Schnitt und Draufsicht des Tunnelrockners für einen Durchsatz von 100.000 t/a Gewerbeabfälle bzw. einer Trocknungsleistung von ca. 3 t/h Wasserverdampfung.

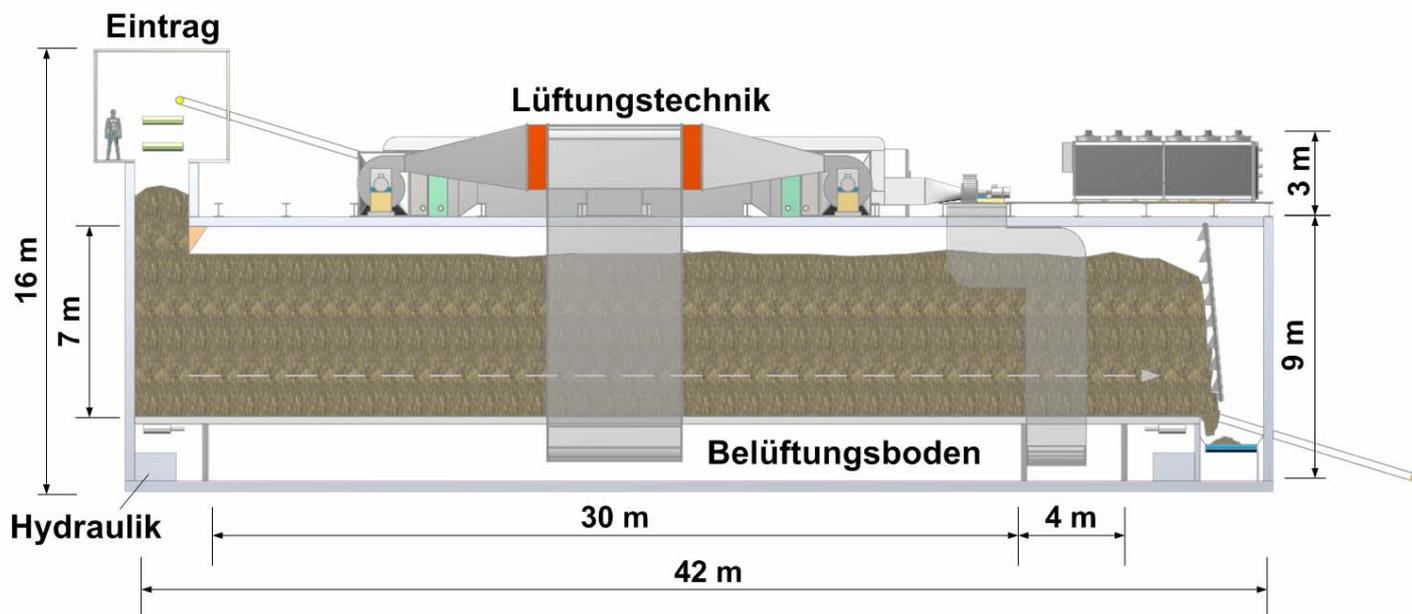


Abbildung 5: Schnitt des Tunnelrockners

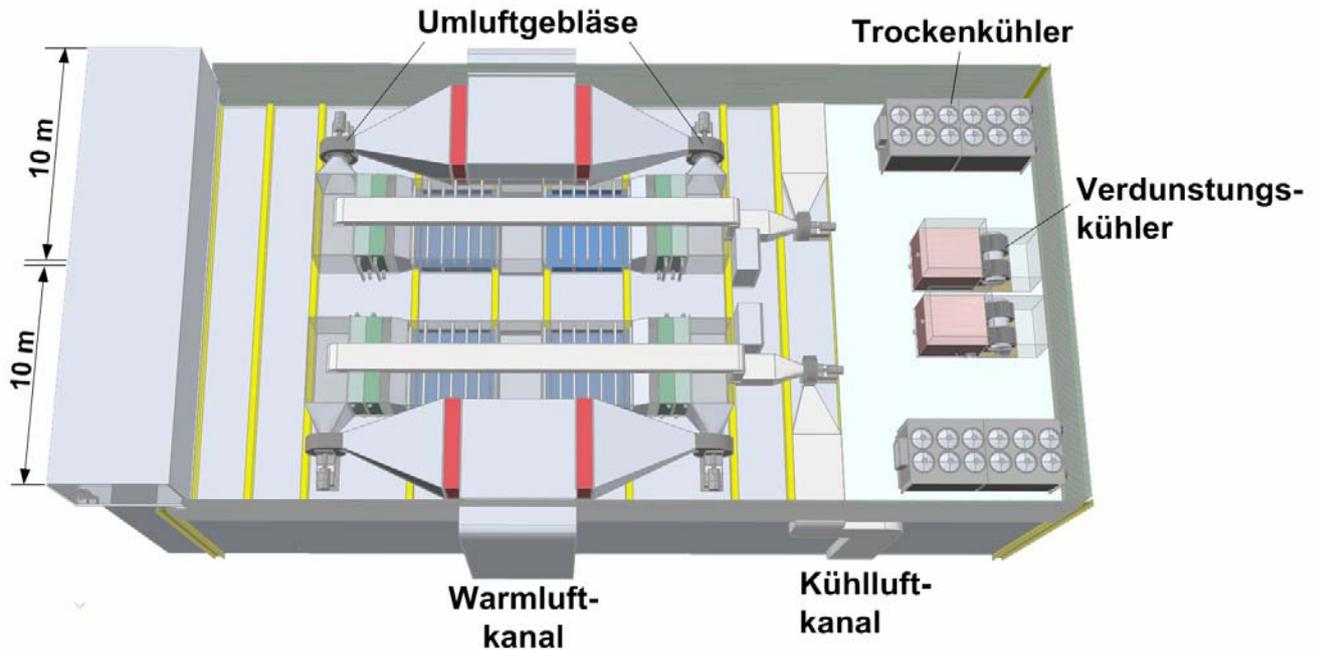


Abbildung 6: Draufsicht des Tunnelrockners

Aufbereitung nach der Trocknung

Die der Windsichtung vorgeschaltete Siebung bei 40 mm dient der Abtrennung des Feingutes, da dieses die Sauberkeit der Flugfraktion verschlechtern würde. Die Windsichtung kann ein- oder zweistufig ausgeführt werden. Als zweite Sichterstufe kann auch ein ballistischer Sichter eingesetzt werden, der durch die 1. Windsichterstufe erheblich entlastet wird. Die Windsichtung und der ballistische Sichter arbeiten bei trockenen Abfällen deutlich trennschärfer als bei feuchten Abfällen.

Mit der Windsichtung werden vor allem flächige Bestandteile wie Folien und PPK abgetrennt. Die Flugfraktion ist trockenstabilisiert und kann entweder direkt energetisch oder nach einer weiteren Aufbereitung stofflich verwertet werden. Mit optischen Sortiersystemen kann diese Fraktion nach Papier und Kunststoffsorten getrennt werden.

Aus dem Schwergut werden Fe- und NE-Metalle abgeschieden. Durch Siebung und Windsichtung wird der Staubanteil der Schwerfraktion reduziert. Die staubfreie und trockene Schwerfraktion von 40 mm bis 400 mm ist ideal aufbereitet für die weitere optischen Sortierung (Nah-Infrarot, Röntgen).

Hier werden alle optisch erfassbaren Wertstoffe abgetrennt. Verwertbare Produktfraktionen werden mit einem optischen Sortiersystem in ein oder zwei Wertstofffraktionen ausgeschleust. Die weitere Aufbereitung der Wertfraktionen erfolgt effektiv in einer separaten Anlage mit mehreren kleineren optischen Sortiersystem in Reihenschaltung. Durch eine zweistufige NIR-Sortierung können höhere Reinheitsgrade erzielt werden als durch eine einstufige NIR-Sortierung aus der gesamten Schwergutfraktion.

Um eine Durchtrocknung der verbleibenden Grobstoffe zu ermöglichen, wird die nicht erkannte Schwerfraktion auf < 40 mm zerkleinert und wieder dem Trocknungsprozess zugeführt und bei der Siebung < 40 mm als Brennstofffraktion abgeschieden.

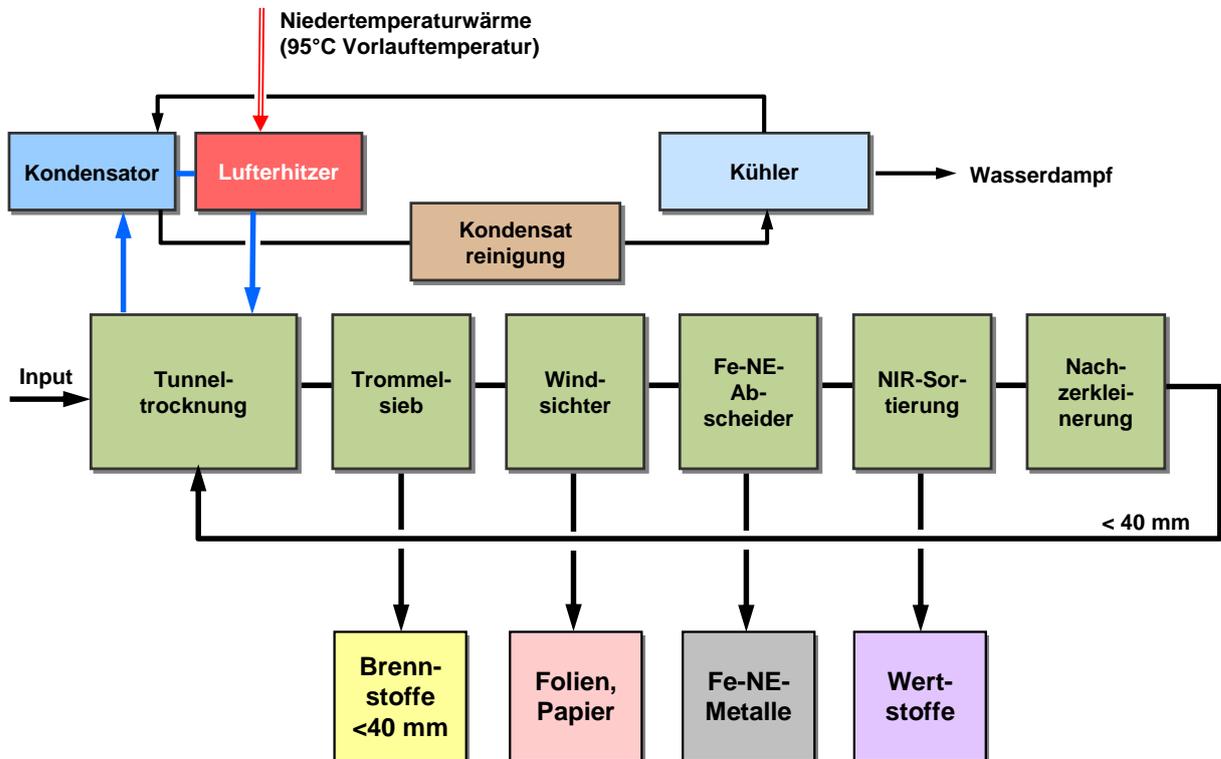


Abbildung 7: Blockfließbild Tunnelrockner

Lüftungstechnik

Bei dem konzipierten Niedertemperatur-Tunnelrockner wird Umluft verwendet, die im Kreislauf zur Kondensation gekühlt und wieder aufgeheizt wird. Die Aufheizung der abgekühlten Umluft wird vorrangig bis zu einem Temperaturniveau von ca. 85 °C durchgeführt, um zu hohe Temperaturen im Trocknungsgut und damit Brandgefährdungen (vgl. Richtlinie 1999/92/EG vom 16. Dezember 1999) und negative Produktveränderungen der Kunststofffraktionen zu vermeiden. Zudem kann durch das niedrige Temperaturniveau preiswerte Abwärme bei ca. 95 °C verwendet werden, beispielsweise vom BHKW oder Niedertemperaturwärme aus Kraftwerksprozessen.

In der Kondensation wird die Umluft von etwa 45 °C bis 50 °C auf 30 °C bis 35 °C, abhängig von den klimatischen Bedingungen, abgekühlt. Dabei werden die in der Umluft enthaltenen Staub sowie Schad- und Geruchsstoffe, z.B. Ammoniak und Schwefelwasserstoff ausgewaschen. Das Kondensat/Waschwasser ist schadstoffhaltig und wird vor der Verwendung als Zusatzwasser im Kühlturm in einer Abwassereinigungsanlage geklärt. Zur Kühlung wird ein Hybridkühlturm-System verwendet, in dem das geklärte Abwasser vollständig verwendet werden kann. Die Trocknungsanlage kann somit wasserneutral betrieben werden. Das Kühlturmsystem besteht aus einem Verdunstungskühler und einem Trockenkühler.

Die abgekühlte und entfeuchtete Umluft wird auf eine Trocknungstemperatur von 85 °C aufgeheizt. Optional kann soweit standortabhängig sinnvoll eine Wärmerückgewinnung als Wärmeverschiebesystem entsprechend Abbildung 4 oder mittels Wärmepumpe eingesetzt werden. Sollte die Trocknung unmittelbar an einer Verbrennungsanlage installiert werden, bietet sich analog dem o.g. Projekt EBS-Auf-bereitungsanlage Wilmersdorf ein Durchluftsystem an, in dem die Abluft im Kraftwerk als Verbrennungsluft genutzt wird.

Durch die Kreislaufführung der Umluft kann die Trocknung weitgehend abluftfrei betrieben werden. Es entsteht gerade nur soviel Abluft, wie aus Undichtigkeitsgründen aus dem System abgesaugt werden muss.

Die Trocknung sowie die Befüllung und/oder Entleerung des Tunnel-trockners wird vollautomatisch durchgeführt.

In dem folgenden Sankey-Diagramm ist eine angenommene Stoffstromverteilung aus einem Abfallinput Restabfall-Siebüberlauf > 80 mm und Gewerbeabfällen dargestellt.

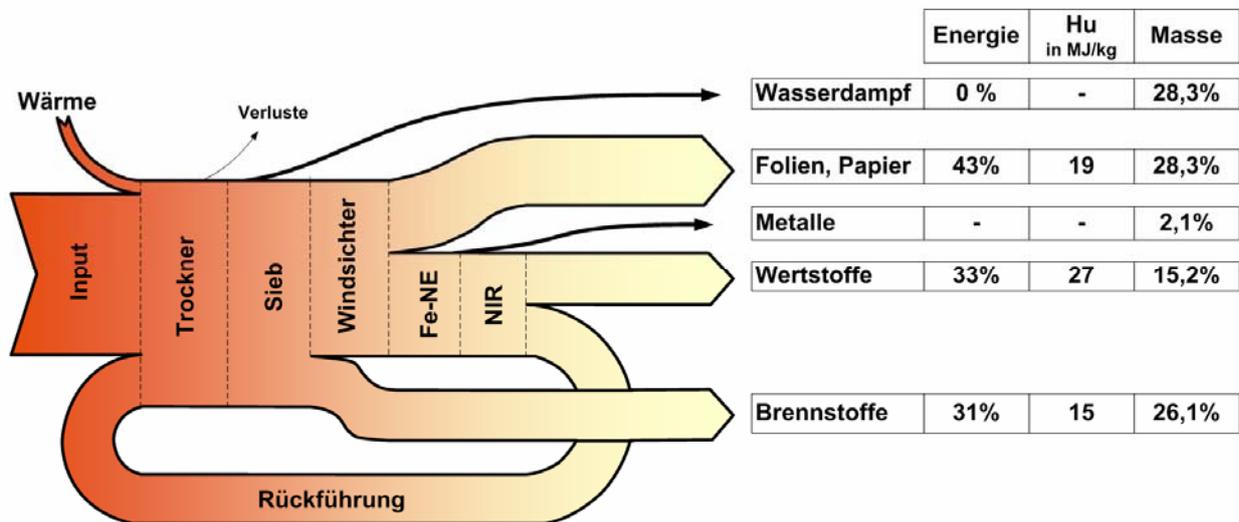


Abbildung 8: Sankey-Diagramm Tunnel-trocknung mit optimierter Wertstoffgewinnung

Wie zu erkennen ist, stellen die Wertstoffe zwar einen geringen Massenanteil von ca. 15 % dar, jedoch beträgt der Energieanteil dieser Fraktion 1/3 der gesamten Abfallfraktion.

Die Fraktion Folien/Papier könnte über NIR-Sortierung weiter in werkstofflich verwertbare Folien- und Papierfraktionen getrennt werden.

In Abbildung 9 ist der erwartete Massenfluss nochmals übersichtlich dargestellt.

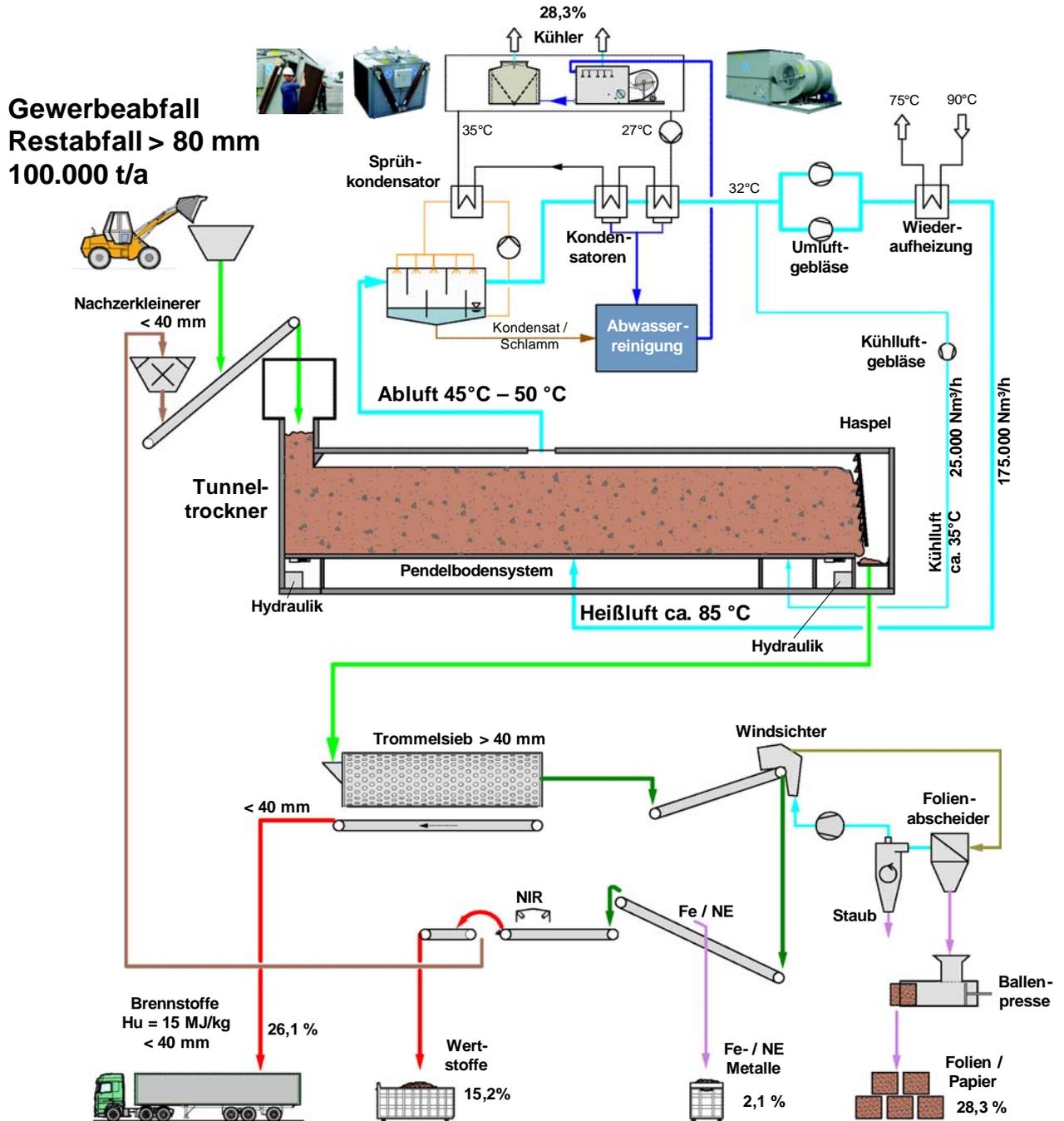


Abbildung 9: Fließbild Tunneltrockner

Tabelle 11 zeigt die für das Trocknungs- und Aufbereitungskonzept abgeschätzten Investitions- und Betriebskosten. Die Kosten sind getrennt nach den Trocknungs- und Aufbereitungskosten dargestellt. Allein durch die Trocknung können neben der wesentlich verbesserten Aufbereitungsmöglichkeit auch 20 % bis 30 % der Inputmenge reduziert werden.

Da die Gesamtinvestition nur ca. 1/7 eines Ersatzbrennstoffkraftwerkes darstellt, ist auch mit kürzeren Amortisationszeiten zu rechnen.

Dieser Umstand begünstigt den Abschluss von mittelfristigen Gewerbeabfalllieferverträgen, da langfristige Verträge zur Zeit von Gewerbeabfall-Lieferanten kaum noch abgeschlossen werden.

Die Kosten für die Trocknung betragen ca. 70 €/t Wasserverdampfung, ca. 20 €/t Wasserverdampfung wurden für die Abwärme kalkuliert, die bei einem Vorteil des Wärmelieferanten durch die Subventionierung der Stromeinspeisung nach KWKG-Gesetz, EEG oder höhere CO₂-Zertifikatzuteilungen auch geringer ausfallen können.

Bezogen auf den Input betragen die gesamten Behandlungskosten ohne Entsorgungskosten ca. 30 €/t bis 35 €/t.

Maßgeblich für die Wirtschaftlichkeit ist die Qualität der verwertbaren Stoffströme. Für die Verwertung der Wertstoffe wurden konservativ 15 €/t Verwertungskosten berücksichtigt, für die Fraktion Folien/Papier wurden für die energetischen Verwertung Kosten von 60 €/t kalkuliert, die sich bei einer weiteren NIR-Sortierung dieser Fraktion noch reduzieren lassen.

Soweit die Marktentwicklung für die Wertstoff-Fraktionen sich tendenziell weiterentwickelt wie bisher, ist mit Gesamtsystemkosten unterhalb von 70 €/t zu rechnen.

Tabelle 11: Investitions- und Betriebskosten

Invest und Betriebskosten Trocknung	€/t Input	€/t H ₂ O	Invest und Betriebskosten Aufbereitung	€/t Input
Annuität (Invest 6 Mio. €)	6	21	Annuität (Invest 5 Mio. €)	5
Wartung, Versicherung	2	7	Wartung, Versicherung	2
Personal	2	7	Personal	2
Strom 55 €/MWh)	1	4	Strom 55 €/MWh)	1
Wärme 20 €/MWh bei 95 °C	6	20	Wärme 20 €/MWh bei 95 °C	-
Sonst. Betriebsmittel	1	4	Sonst. Betriebsmittel	1
SUMME Trocknung	18	63	SUMME Aufbereitung	11

SUMME Behandlungskosten	29,0
--------------------------------	-------------

Entsorgungskosten	€/t Input	€/ spez.	Kosten Gesamt	€/t Input
Folien, Papier	17,0	60	Behandlungskosten	29,0
EBS < 40 mm, 15 MJ/kg	23,5	90	Entsorgungskosten	41,1
Wertstoffe	2,3	15	SUMME	70,1
Metalle	- 1,7	- 80		
SUMME Entsorgung	41,1	Ø 57,3		

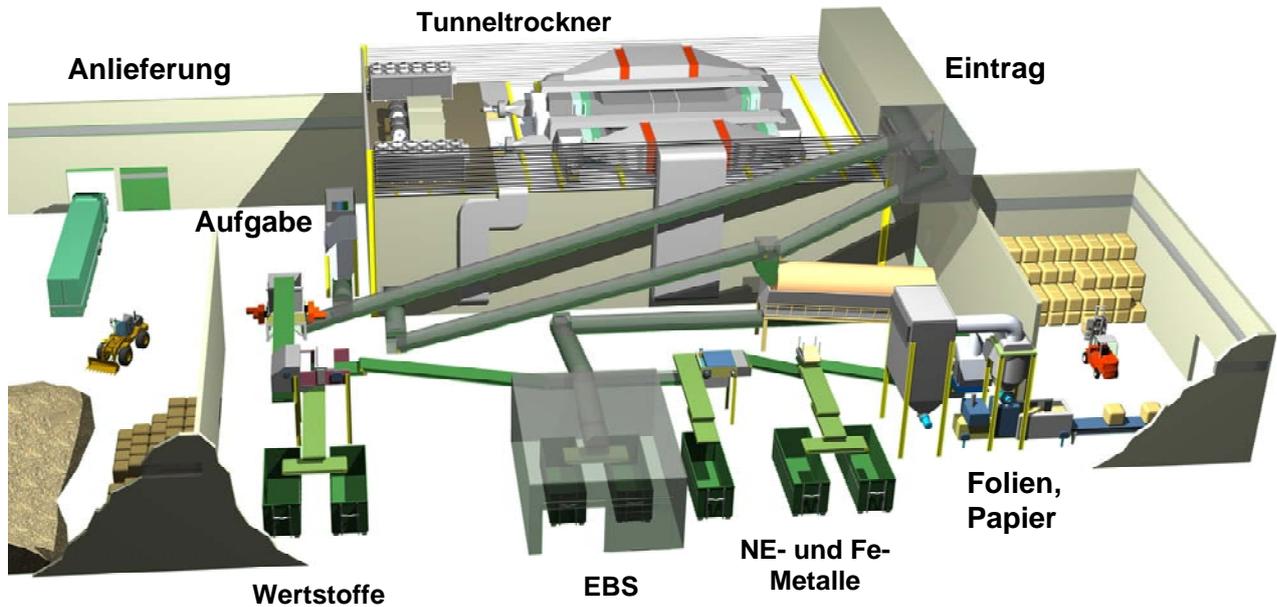


Abbildung 10: Integration Tunneltrockner in eine Wertstoffsartieranlage

7 Zusammenfassung und Ausblick

Für einige überraschend, für andere längst überfällig, ist die Entwicklung weg von der einseitigen Verbrennung, ob zur Beseitigung in MVA oder energetischen Verwertung in einem Ersatzbrennstoffkraftwerk oder Mitverbrennung, hin zu einer Recyclinggesellschaft mit Ressourcenverantwortung.

Die höchste Form der Energierückgewinnung aus Abfällen liegt, wenn nicht vermeidbar oder wiederverwendbar, in einer intelligenten werkstofflichen Verwertung, aber nicht um jeden Preis. Die Wiedereinführung der gemeinsamen Sammlung von Restabfall und Verpackungsabfall, nur weil nachgewiesen wurde, dass Wertstoffe auch direkt aus Restabfall gewonnen werden können, ist eine Forderung, die unter den regionalen Gegebenheiten geprüft werden muß.

Weniger als ein Viertel aller Restabfälle und hausmüllähnlichen Gewerbeabfälle werden nicht über thermische Anlagen direkt entsorgt. Sortieranlagen bestehen bereits in Deutschland, angepasst und spezialisiert auf Verpackungsabfälle und materialgleiche Nicht-Verpackungen.

Sie sind fast alle ausgerüstet mit modernen automatischen Sortiersystemen und der Ausbau schreitet weiter voran.

Würde die separate Sammlung wegfallen, müsste vor jeder MVA eine Aufbereitungsanlage mit Trocknung und anschließender Stoffstromteilung installiert werden, um nicht die Verbrennungskapazitäten zu überlasten und die stoffliche Verwertung auf den Stand vor der Verpackungsverordnung zu reduzieren.

Ressourcenschonung bedeutet auch die effektive Nutzung vorhandener Anlagenkapazitäten und Systeme. Die historischen Gründe für die Entstehung des Status Quo sollten nicht den unemotionalen Blick in die Zukunft trüben.

Die Erfassungsquote an Verpackungsabfällen ist wesentlich höher, als bei der Einführung prognostiziert wurde. Warum sollte man das System der getrennten Erfassung von Verpackungsabfällen gerade jetzt ändern, obwohl es immer besser funktioniert und zudem heute das Monopol des DSD nicht mehr besteht?

Einige Abfallwirtschaftskonzepte basieren auf mechanisch-biologischen Aufbereitungsanlagen, die auch Verpackungsabfälle und materialgleiche Nicht-Verpackungen durch die in diesem Beitrag beschriebenen Nachrüstungen aufbereiten und werkstofflich verwerten könnten.

Eine alternative Lösung wurde in einem Modellversuch in einer DSD-Sortieranlage der SERO Leipzig GmbH erprobt.

Mit einer Erweiterung der Gelben Tonne (Gelbe Tonne^{Plus}), in der auch materialgleiche Nicht-Verpackungen angenommen werden, konnte nachgewiesen werden, dass der Wertstoffanteil im Restabfall reduziert und die Verwertungsquote erhöht werden konnte.

Der vorliegende Beitrag stellt die Möglichkeiten der Optimierung der Wertstoffgewinnung durch Trocknung von Siebüberlauf aus Restabfall und Gewerbeabfall dar, um die Recyclingquote von Wertstoffen zu erhöhen und Wertstoffe zur direkten werkstofflichen Verwertung sowie wertstoffangereicherte Vorprodukte zur weiteren Aufbereitung in vorhandenen Sortieranlagen zu erzeugen, zum Beispiel auch ergänzend zur Gelben Tonne^{Plus}, die den Gewerbeabfall nicht erfasst.

Eine hohe Dunkelziffer an illegaler Entsorgung von Gewerbeabfällen wird neben den bekannten Ablagerungen in Tongruben [10] vermutet.

Es werden nicht genügend kostengünstige energetische VerwertungsKapazitäten entsprechend den in der Abfallrahmenrichtlinie vorge-schlagenen Energieeffizienzkriterien entstehen, um alle Gewerbeabfälle zur Verwertung aufzunehmen.

Die vorgeschlagene Optimierung der Wertstoffgewinnung durch Trocknung stellt zudem eine Alternative zur direkten energetischen Verwertung von Siebüberlauf aus Restabfall und Gewerbeabfall dar.

Neben der Wertstoffgewinnung wird gleichzeitig der Chlorgehalt und Heizwert in der verbleibenden Ersatzbrennstoff-Fraktion reduziert.

Dies ist vor dem Hintergrund einer steigenden PVC-Fracht im Gewerbeabfall auch ohne Wertstofffassung erforderlich [35].

8 Literaturverzeichnis

- [1] Abfallwirtschaftsverband Chemnitz (AWVC): Abfallbeseitigung RABA. Download: <http://www.awvc.de/>, Stand: 03.08.2007
- [2] ALLGAIER WERKE GmbH: Firmeninformationen Trommeltrockner-Anlage für organischen Restmüll. Produktinformation,
Download: <http://www.allgaier.de/verfahrenstechnik/trockner/einsatzbeispiele/files/93.pdf>, Stand: 27.07.2007
- [3] ASA (Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung) e.V.: MBA-Steckbriefe 2007/2008. Februar 2007
- [4] Butz, W.: Entwicklung vor dem Hintergrund der Ablagerungsverordnung und der 30. BImSchV. In: Wasser, Luft, Boden (WLB), Heft 7-8, 2001.
- [5] Christiani, J.: Entwicklungspotentiale der Verpackungsverwertung aus technologischer Sicht - exemplarisch anhand der Einbindung eines GiG-Konzeptes in Trockenstabilatanlagen. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Restabfallbehandlung IX, Verlag: Witzhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2005, Seite 71-75
- [6] Dach, J. et al.: Ökoeffizienz der regenerativen thermischen Oxidation (RTO) im Hinblick auf die Vermeidung klimawirksamer Emissionen. In: Kühle-Weidemeier (Hrsg.): Tagungsband Internationale Tagung MBA 2007, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2007 Seite 567-579
- [7] v. Dierkes, P.: Stand der Umsetzung des STAB-Konzeptes in Berlin. In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe, Band 2. TK-Verlag, Neuruppin, 2002, Seite 65-69
- [8] Duales System Deutschland: DSD Sortierhandbuch, Stand April 2004
- [9] ECOWEST Entsorgungsverbund Westfalen GmbH: EBS-Anlage (Ennigerloh). Download: http://www.ecowest.de/rubrik/06_Technik/04_EBS-Animation/01_EBS-Animation.htm, Stand: 03.08.2007
- [10] EUWID Recycling und Entsorgung: Ersatzbrennstoff-Markt steht vor erster Weichenstellung im Herbst. In: EUWID, Nr. 30 vom 24.07.2007, S. 3
- [11] Finstein, M. S.: ArrowBio Process integrates preprocessing and advanced anaerobic digestion to recover recyclables and generate energy. In: Proceedings of SWANA's (Solid Waste Association of North America) 11th annual landfill Symposium and Conference 05-08 June 2006, Nashville, Tennessee, USA.
Download: <http://www.oaktech-environmental.com/documents/ProceedingsSWANA2006Nashville.pdf>,
Stand: 01.08.2007
- [12] Fendel, A.: Umsetzung von Projekten des Hauses Rethmann zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen. In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe, Band 2. TK-Verlag, Neuruppin, 2002, Seite 269-276
- [13] Göschl, A.; Hartleitner, B.; Kreibe, S.: Die Entwicklung des Grünen-Punkt-Systems - Verwertungstechnik, politischer Druck und Innovation durch Worte. Ergebnisse aus einem Forschungsprojekt von BIfA GmbH - Bayerisches Institut für Abfallforschung und MPS e.V. - Münchner Projektgruppe für Sozialforschung. In: BIfA-Texte Nr 14, Januar 2001. Download: <http://www.bifa.de/download/textnr14.pdf>, Stand: 26.07.2007
- [14] Grüneklee, C. E.: Biologische Trocknung von Hausmüll mit dem Herhof Trockenstabilat-Verfahren –Biologische, chemische und physikalische Grundlagen- In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe, Band 2. TK-Verlag, Neuruppin, 2002, Seite 299-306
- [15] GUA Gesellschaft für umfassende Analysen GmbH; GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH: Verpacken ohne Kunststoff – Auswirkungen auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen. Studie, Endbericht. Wien, November 2004.

Download: http://www.bkv-gmbh.de/site/Verpacken%202004/GUA_Kurzfassung.pdf Stand: 01.08.2007

- [16] Heyde, M.: Innovationsprogramm 2007 der Duales System Deutschland GmbH. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Restabfallbehandlung IX, S. 63-64. Verlag: Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2005
- [17] Hoffmann, E; Trocknung - Voraussetzung für die Ersatzbrennstoffherstellung, In: Karl J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Reformbedarf in der Abfallwirtschaft, Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2001 (Seite 411-416)
- [18] Hoppe, C.: Restabfallbehandlungsmethoden zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen. In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe, Band 2. TK-Verlag, Neuruppin, 2002, Seite 307 – 322
- [19] Hüskens, J.: mdl. Mitteilung, Juli 2007
- [20] International Energy Agency: Medium-Term Oil Market Report 2006 Download: http://omrpublic.iea.org/currentissues/MED_OMR06.pdf Stand: 01.08.2007
- [21] International Energy Agency: World Energy Outlook 2006
Download: <http://www.worldenergyoutlook.org/summaries2006/German.pdf>
Stand: 01.08.2007
- [22] Julius, J.: Kaktus auf der EXPO 2000. In: AIR-mail, Hauszeitung der Aachener Institute für Rohstofftechnik. Ausgabe 2, Mai 1999.
Download: <http://www.air.rwth-aachen.de/airmails/airmail02/index.html>, Stand: 01.08.2007
- [23] Jung, G.: Restmüll-/LVP-Versuche in Rheinland-Pfalz - Perspektiven für die Abfallwirtschaft. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Restabfallbehandlung IX. Verlag: Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2005 , Seite 65-70
- [24] Keßler, H. et al.: ZIEL 2020 - Abfallwirtschaft im Umbruch. In: Müll und Abfall, Nr.6, 2006. Download: <http://www.umweltbundesamt.de/abfallwirtschaft/nachhaltigkeit/dokumente/ZIEL-2020-Abfall.pdf>, Stand: 27.07.2007
- [25] Keßler, H.: Von der Kreislaufwirtschaft zur Stoffstromwirtschaft. In: Infraneu 6. Abfall-Fachtagung „Die Abfallwirtschaft in unserer Region –Bestandsaufnahme und Perspektive“ 28.August 2006, Berlin
- [26] Klein Abwasser- und Schlammtechnik GmbH: Firmeninformationen, 2007
- [27] Kragting,M; Hoffmann, E; Thermische Trocknung der heizwertreichen Restabfallfraktion mit Trommeltrocknungsanlagen von Vandenbroek In:Karl J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe, Band 2, Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2002 (Seite 383-390)
- [28] Kragting,M; Hoffmann, E; Physikalische Trocknung der heizwertreichen Restabfallfraktion, Witzenhausen-Institut - Bio- und Restabfallbehandlung VIII; K. Wiemer, M. Kern Witzenhausen 2004 (Seite 600-607)
- [29] Kragting,M; Hoffmann, E; Trommeltrockner für alternative Brennstoffe, WLB „Wasser, Luft und Boden“ - Zeitschrift für Umwelttechnik, Vereinigte Fachverlage GmbH, Mainz - Ausgabe März/April 2006 (Seite 54-56)
- [30] New Media Publisher GmbH: bvse-Marktbericht Kunststoffe - Juli 2007. Download: <http://plasticker.de/preise/marktbericht2.php?j=7&mt=7&quelle=bvse>, Stand: 27.07.2007

- [31] Niedersächsisches Umweltministerium: Kunststoffindustrie in Niedersachsen am Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung. Expertenkommission, Endbericht des Arbeitskreises 1 "Kunststoffverwertung", November 1999. Download: http://cdl.niedersachsen.de/blob/images/C982992_L20.pdf, Stand: 26.07.2007
- [32] Pretz, T. et al.: Ressourcenwirtschaft ohne getrennte Abfallsammlung? Gutachten im Auftrag des bvse, 06. April 2006.
Download: <http://www.bvse.de/images/picturepool/1/244.pdf>, Stand: 01.08.2007
- [33] Schalles, H.: Die stoffliche und energetische Nutzung von Kunststoffabfällen. Vortrag an den 9. Schweriner Wissenschaftstagen, 10.09.2004.
Download: http://www.ikr-schalles.de/stoffliche_und_energetische_Nutzung_von_Kunststoffabfaellen.pdf,
Stand: 27.07.2007
- [34] Schröder, P.: Herstellung von Ersatzbrennstoff aus Berliner Hausmüll mit einem mechanischen Aufbereitungsverfahren. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 4: TK Verlag Neuruppin, 2004, S. 225-232
- [35] Schu, R., Niestroj, J.: Anlagenauslegung, Brennstoffbeschaffung und Qualitätssicherung für Abfallverbrennungsanlagen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 2. TK Verlag, Neuruppin, 2007, Seite 319-344
- [36] Schu, R.: Zukunftsfähige MBA-Konzepte – Vision 2020. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 1. TK Verlag, Neuruppin, 2006, Seite 265-298
- [37] Schu, R.: Verfahren und Vorrichtung zur Trocknung und stoffstromspezifischen Aufbereitung von durchlüftungsfähigen, grobkörnigen Abfällen. Patentanmeldung AZ 10 2006 042 159.0, 2006
- [38] Sevar Entsorgungsanlagen GmbH, Firmeninformationen, 2007
- [39] SwissTüvAG: Der Weg zu neuer Energie - Verfahrenstechnische Anlage zur Produktion von Kraftstoffen aus hochkalorischen Kunststoffabfällen.
Download:
http://www.swisstuevag.com/go/swisstuevag/_ws/resource/_ts_1180437432495/r00ABXQAS2R5bjptb2R1bGVzL3NpdGVzL3diYnNpdGUvcGFnZXMvaG9tZS9yZW5Y2xpbmcbvWFpbi9fcGFnZV9pZF9vX2FkdmFuY2VkXzg2Nw==/link01/stag_recycling_info_generell_web_vp_neu.pdf, Stand: 27.07.2007
- [40] Troge, A.: Was wäre die Entsorgungswirtschaft ohne die Abfallverbrennung? Vortrag : Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz, 31.01.2007, Berlin
- [41] Viertel, L.: Herstellung und Verwertung von Ersatzbrennstoffen unter besonderer Berücksichtigung des Werkstoffes PVC. Studienarbeit Fachhochschule Köln. Download: http://www.agpu.de/fileadmin/user_upload/diplomarbeiten/StudienarbeitPVC_Endfassung3.pdf, Stand: 27.07.2007
- [42] Wöbbeking, K. H.; Schaubbruch, W.: Ökonomische Analyse der gemeinsamen Erfassung und Aufbereitung von Restabfall und Leichtverpackungen auf der Grundlage der Trockenstabilisierung in Rheinland-Pfalz. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Restabfallbehandlung IX, S. 76-80. Verlag: Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2005
- [43] Zeiger, E.: Neue Möglichkeiten der automatischen Sortierung von Haus- und Gewerbeabfällen mit Mogensen Röntgensortiertechnik. In: Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): Energie aus Abfall 1, TK-Verlag: Neuruppin, 2006, Seite 257-263