

# DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR DER MONTANISTISCHEN WISSENSCHAFTEN (Dr. mont.)

an der Montanuniversität Leoben

## Herstellung, Qualität und Qualitätssicherung von Ersatzbrennstoffen zur Erreichung der 100%-igen thermischen Substitution in der Zementindustrie

erstellt am

Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft,

Montanuniversität Leoben



**Vorgelegt von:**

Dipl.-Ing. Renato Sarc, BSc

0435291

**Betreuer:**

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Roland Pomberger

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Michael Nelles

Leoben, 10. März 2015



## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

## DANKSAGUNG

Die gegenständliche Dissertation ist für mich ein Ziel, das am Ende eines langen Wegs steht, auf dem mich einige Personen besonders unterstützt haben und bei denen ich mich jetzt vom ganzen Herzen bedanken möchte.

Als erstes möchte ich mich bei meinem ersten wissenschaftlichen Betreuer, Univ.-Prof. Dr. mont. Roland Pomberger, Leiter des Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft an der Montanuniversität Leoben, für die ausgezeichnete fachliche Unterstützung, hilfreichen Anregungen und konstruktiv-kritische Diskussionen während des gesamten Weges bedanken.

Großer Dank gebührt auch dem zweiten wissenschaftlichen Betreuer, Prof. Dr. mont. Michael Nelles, Inhaber des Lehrstuhls für Abfall- und Stoffstromwirtschaft an der Universität Rostock, der die Aufgabe eines externen Betreuers übernommen und diese durch fachliche und konstruktive Unterstützung erfolgreich erfüllt hat.

Ein besonderer Dank gebührt dem Emeritus O.Univ.-Prof. Karl Erich Lorber, der es mir im Jahr 2010 ermöglicht hat, zum Team des Instituts für Nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik zu gehören. Vielen Dank für Dein Vertrauen, ausgezeichnete fachliche Unterstützung, Hilfsbereitschaft und erfolgreiche und konstruktive Zusammenarbeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Arbeitskollegen am ehemaligen Institut (IAE) bzw. jetzigem Lehrstuhl (AVAW), insbesondere bei Josef Adam, Alexia Aldrian, Gernot Kreindl und Tanja Trieb, die mir mit Rat und Tat auf dem gesamten Weg zur Seite gestanden sind.

Des Weiteren sei an dieser Stelle Josef Kulmer und dem gesamten Team der Fa. ThermoTeam, Alexander Curtis von Saubermacher Dienstleistungs AG sowie Christian Lampl, Thomas Holliber, Helmut Reiterer, Dejan Milicev von Lafarge Zementwerke GmbH und Ernst-Michael Sipple von Holcim GmbH für die konstruktive und erfolgreiche Zusammenarbeit in unterschiedlichsten Projekten und Aufgaben gedankt.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, Onkel, Tante, Cousin, Cousine und ihren Familien, die mich ermutigt, motiviert und in meinen teilweise komplizierten Entscheidungen auf dem Lebensweg immer unterstützt haben.

Meiner Freundin Monika danke ich für die Liebe, das Verständnis und vor allem für die Geduld aufgrund meiner begrenzten Erreichbarkeit.

Abschließend möchte ich mich auch bei meinen Freunden und Studienkollegen für die schöne und erlebnisreiche gemeinsame Zeit bedanken.

# KURZFASSUNG

## **Herstellung, Qualität und Qualitätssicherung von Ersatzbrennstoffen zur Erreichung der 100%-igen thermischen Substitution in der Zementindustrie**

Ersatzbrennstoffe (EBS) sind Abfälle, die zur Gänze oder in einem relevanten Ausmaß zum Zweck der Energiegewinnung eingesetzt werden und die die Qualitätskriterien gemäß der österreichischen Abfallverbrennungsverordnung (AVV) erfüllen. Die Qualitätskriterien gemäß AVV sind die sogenannten statistischen Grenzwerte, d.h. ausgedrückt als Median und 80-er Perzentil, für acht Schwermetalle (d.h. Sb, As, Pb, Cd, Cr, Co, Ni und Hg), deren Gehalt auf den Nettoheizwert [mg/MJ<sub>TM</sub>] des Brennstoffes bezogen ist. Die EBS müssen vor deren Einsatz zum Zweck der Energiegewinnung, u.a. in Anlagen zur Zementerzeugung, diese Qualitätskriterien erfüllen. Der Einsatz von EBS in der österreichischen Zementindustrie ist Stand der Technik, im Durchschnitt wurden 2013 rd. 72% des thermischen Energiebedarfes des Klinkerherstellungsprozesses durch EBS abgedeckt.

In gegenständlicher Arbeit werden drei Arten von Ersatzbrennstoffen – „EBS LOW Quality“, „EBS MEDIUM Quality“ und „EBS PREMIUM Quality“ – hinsichtlich ihrer Herstellung, Qualität, Qualitätssicherung und Verwertung untersucht und umfangreich beschrieben. Die betrachteten EBS werden aus Siedlungsabfällen und/oder sonstigen nicht gefährlichen Abfällen, wie z.B. für das Recycling nicht geeignete Rückstände aus Sortieranlagen, in mechanischen Aufbereitungs- und EBS Herstellungsanlagen produziert. Die energetische Verwertung von „EBS LOW Quality“ erfolgt in einer Verbrennungsanlage mit Wirbelschichttechnologie und von „EBS MEDIUM Quality“ sowie „EBS PREMIUM Quality“ in einer Drehrohrofenanlage zur Zementerzeugung. Die beschriebenen Forschungsarbeiten wurden an mehreren komplexen mechanischen Abfallbehandlungsanlagen, einer spezialisierten EBS Produktionsanlage, einer Verbrennungsanlage und zwei Anlagen zur Zementerzeugung durchgeführt. Dabei wurden drei Forschungsfelder praxisbezogen wissenschaftlich näher untersucht und die dazugehörigen Forschungsfragen beantwortet und diskutiert. Untersuchte Forschungsfelder sind das technische Konzept zur Herstellung von EBS in Produktionsanlagen, die Qualitätssicherung und erreichbare Qualität von Ersatzbrennstoffen sowie die 100%-ige Substitution von primären Energieträgern im Zementdrehrohrofen.

Diese dabei erzielten neuen Erkenntnisse lassen positive Auswirkungen bei ihren Umsetzungen in der Praxis erwarten, vor allem was Qualität und Quantität des EBS Einsatzes betreffen.

## ABSTRACT

### **Design, Quality and Quality Assurance of Solid Recovered Fuel (SRF) for Achieving 100% Thermal Substitution in Cement Industry**

In Austria, the definition for Refuse Derived Fuels (RDF) is given in the legally binding Waste Incineration Ordinance (WIO) as: "...waste that is used entirely or to a relevant extent for the purpose of energy generation and which satisfies the quality criteria laid down..." in the WIO. The mentioned quality criteria are the so-called statistical limit values expressed as median and 80<sup>th</sup> percentile for eight selected heavy metals (i.e. Sb, As, Pb, Cd, Cr, Co, Ni and Hg). The concentration limits are related to the energy content and expressed as ratio between the content of heavy metals and the net calorific value of the RDF (i.e. [mg/MJ<sub>DM</sub>]). Solid Recovered Fuel (SRF) is a subgroup of RDF that is prepared from non-hazardous waste only. RDF that includes SRF must fulfil these requirements before being used for purpose of energy generation in, among others, cement production plants. The utilization of RDF in Austrian cement industry has become *State of the Art*, with an average thermal substitution rate over 72% in 2013.

In the present Thesis, the design, the quality, the quality assurance and the energy recovery for three types of SRF – "SRF LOW Quality", "SRF MEDIUM Quality" and "SRF PREMIUM Quality" – have been extensively investigated, described and discussed. The SRF types considered are prepared from non-hazardous municipal wastes (household waste and similar commercial, industrial and institutional wastes and/or other non-hazardous wastes, e.g. waste fractions not suitable for recycling processes) in mechanical processing and SRF production plants. Energy recovery of "SRF LOW Quality" is carried out in a fluidised bed incinerator and energy recovery of "SRF MEDIUM Quality" and "SRF PREMIUM Quality" in the rotary kiln of a cement production plant. Various mechanical waste processing plants, including specialised SRF production facility, an incineration plant and two cement kilns have been investigated intensively during the practically oriented scientific work.

New theoretical knowledge and innovative practical findings could be gained in this Thesis, considering the three research fields like: technical concepts for SRF production plants, quality (chemical-physical) and quality assurance of SRF as well as 100% thermal substitution of conventional fuel in the cement industry.

It is expected that the practical implementation of the reported new results of this Thesis will show positive and valuable impacts on quality and quantity of SRF when used as substitute fuel.

## VERÖFFENTLICHUNGEN

Nachfolgend werden nur die für die gegenständliche Dissertation relevanten Veröffentlichungen gemäß Vorgaben des MU-Online (Montanuniversität-Online-Systems) ([https://online.unileoben.ac.at/mu\\_online/voe\\_main.persVoes?pPersonNr=160117](https://online.unileoben.ac.at/mu_online/voe_main.persVoes?pPersonNr=160117)) aufgelistet.

### Beitrag in einer Fachzeitschrift

Lorber, K.E., **Sarc, R.** & Aldrian, A. (2012) Design and quality assurance for solid recovered fuel. In: Waste Management & Research 30 (4). DOI: 10.1177/0734242X12440484. S. 370-380.

Hermann, R., Baumgartner, R.J., **Sarc, R.**, Ragossnig, A., Wolfsberger, T., Eisenberger, M., Budischowsky, A. & Pomberger, R. (2014) Landfill mining in Austria: Foundations for an integrated ecological and economic assessment. In: Waste Management & Research 32 (9). DOI: 10.1177/0734242X14541168. S. 48-58.

Pomberger, R. & **Sarc, R.** (2014) Solid Alternative Fuels – legal, technological and economical developments in Austria. In: Zement, Kalk, Gips international (ZKG international), ISSUE 4. ISSN: 0949-0205. S. 56-64.

**Sarc, R.** & Lorber, K.E. (2013) Production, quality and quality assurance of Refuse Derived Fuels (RDFs). In: Waste Management 33 (2013). ISSN: 0956-053X. S. 1825-1834.

**Sarc, R.**, Lorber, K.E., Pomberger, R., Rogetzer, M. & Sipple, E.M. (2014) Design, Quality and Quality Assurance of Solid Recovered Fuels (SRF) for the Substitution of Fossil Feedstock in the Cement Industry. In: Waste Management & Research 32 (7). DOI: 10.1177/0734242X14536462. S. 565-585.

### Beitrag in einem Konferenz (Tagung, Kongress, Workshop, ...)-Bericht

Lorber, K.E., **Sarc, R.** & Pomberger, R. (2011) Herstellung und Einsatz von Ersatzbrennstoffen (EBS) in Österreich. In: Waste-to-Resources 2011, 4. Internationale Tagung MBA und Sortieranlagen, Kühle-Weidemeier (ed.), Cuvillier Verlag Göttingen, Germany.

### Beitrag in einem Buch

Aldrian, A., **Sarc, R.** & Lorber, K.E. (2012) Quality Assurance of Solid Recovered Fuel (SRF) in Austria. In: K. E. Lorber et al. (Hrsg.): DepoTech 2012 Tagungsband, ISBN: 978-3-200-02821-0. S. 731-734.

Lorber, K.E. & **Sarc, R.** (2012) Production, Quality and Quality Assurance of Refuse Derived Fuels (RDF). In: Proceedings Venice 2012, Fourth International Symposium on Energy from Biomass and Waste, CISA Publisher, Italy. Venice, Italy.

Lorber, K.E. & **Sarc, R.** (2012) Waste to Energy by Preparation of Quality Controlled SOLID RECOVERED FUELS (SRF). In: Proceedings of 4<sup>th</sup> international conference on

Environmental Technology and Knowledge Transfer (eds. Nelles, M. et al.), ISBN: 978-3-86009-125-8. Hefei, P.R. China, May 24-25, 2012. ISBN: 978-3-86009-125-8.

Lorber K.E. & **Sarc, R.** (2014) Recovery of Heat, Power and Secondary Materials by Incineration of Mixed Municipal Solid Waste (MSW). In: Proceedings of the 5<sup>th</sup> international conference on Environmental Technology and Knowledge Transfer (eds. Nelles, M. et al.). Hefei, P.R. China, May 15-16, 2014. ISBN: 978-3-86009-411-2.

Lorber, K.E., **Sarc, R.** & Pomberger, R. (2010) Österreichische Erfahrungen zum Einsatz verschiedener Abfälle als Ersatzbrennstoffe und mögliche Anwendungsprobleme. In: TAKAG 2010 Türkisch-Deutsche Abfalltage. Dokuz Eylül Üniversitesi, Universität Stuttgart, Ege Üniversitesi (Hrsg.). ISBN: 978-3-8356-3228-8. S. 327-348.

Mitterwallner, J., Himmel, W., Pomberger, R. & **Sarc, R.** (2012) Deponierückbau in der Steiermark. In: K. E. Lorber et al. (Hrsg.): DepoTech 2012 Tagungsband, ISBN: 978-3-200-02821-0. S. 585-588.

Pomberger, R. & **Sarc, R.** (2012) The future of solid recovered fuels (SRF). In: Rohstoffe sind Zukunft / Raw Materials are the Future; Band 2 Eumicon - European Mineral Resources Conference 2012, Montanuniversität Leoben, Austria. ISBN: 978-3-901074-35-6. S. 387-408.

**Sarc, R.**, Adam, J. & Curtis, A. (2014) Qualitätssicherung von Ersatzbrennstoffen für die Zementindustrie am Beispiel der Produktionsanlage ThermoTeam. In: Pomberger, R. et al. (Hrsg.): DepoTech 2014 Tagungsband, ISBN: 978-3-200-03797-7. S. 313-318.

**Sarc, R.**, Lorber, K.E. & Pomberger, R. (2012) Značenje goriva proizvedenog iz otpada u modernome gospodarstvu otpadom u Austriji (The Importance of Solid Recovered Fuels (SRF) in Developed Waste Management in Austria). In: XII<sup>th</sup> International Symposium Waste Management Zagreb 2012. Geotehnički fakultet, doc.dr.sc. Aleksandra Anić Vučinić (Hrsg.), Zagreb, Kroatien.

**Sarc, R.**, Pomberger, R. & Lorber, K.E. (2013) Perspektive der Verwertung von Ersatzbrennstoffen in Zementwerken. In: Thomé-Kozmiensky, K. & Versteyl, A.; Strategie, Planung, Umweltrecht., Band 7, Berlin, Germany. S. 139-162.

### **Poster im Rahmen einer wissenschaftlichen Veranstaltung**

Lorber, K.E., **Sarc, R.** & Pomberger, R. (2011) Erfahrungen zum Einsatz verschiedener Abfälle als Ersatzbrennstoffe (EBS). In: I. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft, Straubing, Deutschland.

**Sarc, R.**, Aldrian, A., Adam, J., Pomberger, R. & Lorber, K.E. (2014): Forschungsgruppe "Ersatzbrennstoffe" an der Montanuniversität Leoben. Österreichische Abfallwirtschaftstagung 2014, Schwechat, Österreich.

### **Vortrag oder Präsentation**

Zahlreiche Vorträge bzw. Präsentationen auf nationalen und internationalen Fachtagungen.

## **Betreute BACHELOR- und MASTERARBEITEN**

Nachfolgend werden die vom Dissertanten betreuten Bachelor- und Masterarbeiten aufgelistet, die während der Dissertationszeit entstanden und für das gegenständliche Thema relevant sind.

### **Als Betreuer:**

Benedek, L. (2012) Gegenüberstellung händischer und mechanischer Vorsortierung am Beispiel des Standorts "Maculangasse" der Fa. Saubermacher Dienstleistungs AG. Bachelorarbeit I am Lehrstuhl für Entsorgungs- und Deponietechnik, Montanuniversität Leoben.

Benedek, L. (2012) Gegenüberstellung händischer und mechanischer Vorsortierung am Beispiel des Standorts "Maculangasse" der Fa. Saubermacher Dienstleistungs AG. Bachelorarbeit II am Lehrstuhl für Entsorgungs- und Deponietechnik, Montanuniversität Leoben.

Rogetzer, M. (2013) Theoretische und praktische Untersuchung der Ersatzbrennstoffqualität. Masterarbeit am Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Montanuniversität Leoben.

Ruhri, M. (2014) Trocknung von Ersatzbrennstoffen. Masterarbeit am Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Montanuniversität Leoben.

Eferdinger, S. (2014) REUQ - Ausweis für EBS - Entwicklung eines Ressourcen-, Energie-, Umwelt- und Qualitätsausweises (REUQ) für Ersatzbrennstoffe (EBS). Masterarbeit am Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Montanuniversität Leoben.

### **Als Mitbetreuer:**

David, R. (2014) Materialanalyse und Verwertungsmöglichkeiten einer aus der Ersatzbrennstoff-Produktion ausgeschleusten Polyvinylchlorid-Fraktion. Masterarbeit im Studiengang „Technisches Umweltmanagement und Ökotoxikologie“ an der Fachhochschule Technikum Wien.



# INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>3</b>
1.1 Begriffsdefinitionen .....	5
<b>2 DISSERTATIONSKONZEPT UND WISSENSCHAFTLICHE METHODIK .....</b>	<b>12</b>
2.1 Stand der Technik und Wissenschaft.....	12
2.2 Problemstellung .....	16
2.3 Forschungskonzept und -fragen .....	20
2.3.1 Forschungskonzept.....	20
2.3.2 Forschungsfragen .....	24
2.4 Struktur der gegenständlichen Arbeit.....	25
<b>3 RECHTLICHE UND NORMATIVE ASPEKTE .....</b>	<b>26</b>
3.1 Rechtliche Aspekte .....	26
3.1.1 Abfallwirtschaftsgesetz (AWG 2002).....	26
3.1.2 Abfallverbrennungsverordnung (AVV 2002).....	27
3.2 Normative Aspekte.....	29
<b>4 ERSATZBRENNSTOFFE (EBS) – „IST-STAND“ UND PERSPEKTIVEN .....</b>	<b>33</b>
4.1 Ausgangslage und Perspektiven.....	33
4.2 EBS Herstellung.....	80
4.3 EBS Verwertung in (Mit-)Verbrennungsanlagen durch Wirbelschichttechnologie .....	85
4.4 EBS Verwertung in der Zementindustrie (Drehrohrofen-Technologie).....	88
4.4.1 Ersatzbrennstoffe für die Zementindustrie:.....	89
4.4.2 Verfahrenstechnische Möglichkeiten der EBS-Verwertung im Klinkerherstellungsprozess: .....	90
4.5 Zusammenfassende Darstellung der betrachteten EBS Qualitäten und deren Verwertungsmöglichkeiten .....	93
<b>5 QUALITÄTSSICHERUNG VON ERSATZBRENNSTOFFEN .....</b>	<b>95</b>
<b>6 PRAKTISCH-WISSENSCHAFTLICHE ARBEIT UND EXPERIMENTELLE     ERGEBNISSE.....</b>	<b>112</b>
6.1 „EBS LOW Quality“ – Herstellung und nachfolgende Verwertung in (Mit- )Verbrennungsanlage durch Wirbelschichttechnologie .....	114

6.2	„EBS MEDIUM Quality“ und „EBS PREMIUM Quality“ – Herstellung und nachfolgende Verwertung in der Zementindustrie .....	127
6.2.1	Morphologische Zusammensetzung von „EBS MEDIUM Quality“ und „EBS PREMIUM Quality“ .....	127
6.2.2	Schwermetallgehalte in konventionellem Energieträger Steinkohle und in „EBS MEDIUM Quality“ und „EBS PREMIUM Quality“ .....	129
6.3	„EBS PREMIUM Quality“ – Praktisch-wissenschaftliche Untersuchungen an der Produktionsanlage der „ThermoTeam Alternativbrennstoffverwertungs GmbH“ .....	154
6.3.1	Massen-, Energie- und Stoffbilanzen .....	157
6.3.2	Untersuchungen der Feinfraktion von „EBS PREMIUM Quality“ .....	162
6.4	100%-ige Substitution von primären Energieträgern in der Zementindustrie	165
6.4.1	Fallbeispiel Zementwerk LAFARGE, Standort Retznei.....	165
6.4.2	Durchgeführte Versuche und erzielte Ergebnisse .....	169
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE .....</b>	<b>189</b>
7.1	Qualität und Qualitätssicherung von Ersatzbrennstoffen .....	190
7.2	Technisches Konzept von EBS Produktionsanlagen .....	196
7.3	100%-ige Substitution von primären Energieträgern im Zementdrehrohrofen	199
<b>8</b>	<b>AUSBLICK UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF .....</b>	<b>201</b>
<b>9</b>	<b>VERZEICHNISSE .....</b>	<b>204</b>
9.1	Literatur.....	204
9.2	Abkürzungsverzeichnis .....	213
9.3	Tabellen.....	216
9.4	Abbildungen .....	217

# 1 Einleitung

Durch das mit 1.1.2004 in Kraft getretene Verbot der Deponierung von unbehandelten Abfällen wurde in Österreich ein wichtiger abfallwirtschaftlicher Meilenstein gesetzt. Bei der Aufbereitung von unterschiedlichen Abfallarten entstehen Fraktionen, die anschließend einer stofflichen oder energetischen Verwertung und/oder einer Beseitigung zugeführt werden. Eine der Fraktionen, die in mechanischen Aufbereitungs- und Ersatzbrennstoff (EBS) Herstellungsanlagen entsteht und die der energetischen Verwertung zugeführt werden kann, stellen die EBS dar. Gemäß österreichischer Abfallverbrennungsverordnung 2002 (AVV 2002) werden EBS als Abfälle bezeichnet, die zur Gänze oder in einem relevanten Ausmaß zum Zweck der Energiegewinnung eingesetzt werden und die die festgelegten Qualitätskriterien erfüllen. Die angesprochenen Qualitätskriterien sind statistische Grenzwerte für acht ausgewählte Schwermetalle, deren Gehalt auf den Nettoheizwert des Ersatzbrennstoffes bezogen ist. Das bedeutet, dass bei der energetischen Verwertung solcher Abfälle in Mitverbrennungsanlagen (z.B. Anlagen zur Zementerzeugung) die Schadstoffbelastung in Abhängigkeit von der chemisch gespeicherten Energie im Vordergrund steht.

Bei der Zusammenarbeit von zwei betroffenen Branchen, nämlich der Abfallwirtschaft, die EBS herstellt, und der industriellen Produktion (im gegenständlichen Fall wird die Zementindustrie betrachtet), die EBS energetisch verwertet, müssen unterschiedliche Aspekte des Wirtschaftens berücksichtigt werden. Die Aspekte aus Sicht der Abfallwirtschaft sind z.B. die Schwankung der Abfallqualität, Senken für „minderwertigere“ und problematische Abfälle, Marktsituation und Konkurrenzdruck usw. Aus der Sicht der industriellen Produktion müssen z.B. schwankende Preislage konventioneller Energieträger, Emissionszertifikate sowie Schadstoffeintrag und Energieeffizienz berücksichtigt werden. Damit in weiterer Folge ein Vertrag zwischen den beteiligten Branchen erfolgreich abgeschlossen werden kann, müssen u.a. auch spezifische rechtliche Voraussetzungen erfüllt, die EBS-Qualität definiert und der dazugehörige Preis festgelegt werden. Die größte Herausforderung dieser Zusammenarbeit stellt dabei die Festlegung der in der Praxis unter realen Bedingungen von der Abfallwirtschaft erreichbaren und von der industriellen Produktion geforderten EBS Qualität dar.

Aus diesem Grund werden in gegenständlicher Arbeit die Herstellung, Qualität, Qualitätssicherung und energetische Verwertung von EBS in Anlagen zur Zementerzeugung untersucht. Dabei werden drei Arten von EBS – „EBS LOW Quality“, „EBS MEDIUM Quality“ und „EBS PREMIUM Quality“ – betrachtet, die aus Siedlungsabfällen und/oder sonstigen nicht gefährlichen Abfällen, wie z.B. für das Recycling nicht geeignete Rückstände aus Sortieranlagen, in mechanischen Aufbereitungs- und EBS Herstellungsanlagen produziert

werden. Die energetische Verwertung von „EBS LOW Quality“ erfolgt in einer Verbrennungsanlage mit Wirbelschichttechnologie und von „EBS MEDIUM Quality“ sowie „EBS PREMIUM Quality“ in einer Anlage zur Zementerzeugung mit Drehrohrentechnologie. Die Qualitätssicherung, die zwischen der EBS Herstellung und Verwertung integriert ist, dient dabei u.a. als ein Hilfsmittel zur Erfüllung der rechtlichen, vertrags- und marktspezifischen Anforderungen.

Daraus hervorgehend, sind die nach der zeitlichen Reihenfolge gegliederten Forschungsfelder der gegenständlichen Arbeit:

- Qualität und Qualitätssicherung von Ersatzbrennstoffen:  
Dabei soll mithilfe statistischer Qualitätssicherungsmethoden (z.B. Probenahmekonzepte, repräsentative Probenahme und chemisch-physikalische Untersuchung der Abfälle usw.) die reale, in der Praxis vorhandene Qualität von fein- aber auch grobkörnigen EBS beschrieben und festgelegt sowie mit einem konventionellen bzw. primären Energieträger, der normalerweise in der Zementindustrie eingesetzt wird, verglichen werden.
- EBS Produktionsanlage und technisches Konzept:  
Die Energetische Verwertung von EBS in österreichischen Anlagen zur Zementerzeugung hat im Jahr 2013 eine durchschnittliche thermische Substitutionsrate von primären Energieträgern von rd. 72% erreicht. Damit diese Rate erfüllt bzw. weiterhin erhöht werden kann, muss u.a. die Qualität von EBS weiterhin gesteigert werden. Aus diesem Grund werden in einer EBS Produktionsanlage Untersuchungen durchgeführt, mit denen nachgewiesen werden soll, ob und wodurch die Qualität von EBS gesteigert werden kann und wie dies nachzuweisen ist.
- 100%-ige Substitution von primären Energieträgern im Zementdrehrohrentechnik:  
Wie bereits erwähnt, lag die thermische Substitutionsrate in österreichischen Anlagen zur Zementerzeugung bei rd. 72%, wobei es auch schon Anlagen gibt, die bereits über 80% substituieren. Aus diesem Grund soll untersucht werden, ob es (zum ersten Mal in der Klinkerherstellungsgeschichte) prinzipiell möglich ist, den Klinker ausschließlich nur aus unterschiedlichen EBS herzustellen (d.h. 100%-ige thermische Substitutionsrate).

Zur Durchführung dieser Forschungsarbeiten und zur Beantwortung der aufgezeigten Forschungsfragen wurden umfangreiche Untersuchungen an mehreren komplexen mechanischen Abfallbehandlungsanlagen, sowie einer spezialisierten EBS Produktionsanlage, einer Wirbelschichtverbrennungsanlage und zwei Anlagen zur Zementerzeugung durchgeführt.

## 1.1 Begriffsdefinitionen

Nachfolgend werden die in dieser Arbeit verwendeten wichtigsten Begriffe und Definitionen dargestellt.

### Abfall

Gemäß § 2 Abs. 1 AWG 2002 (BKAOE, 2002) sind Abfälle *„bewegliche Sachen,*

- 1. deren sich der Besitzer entledigen will oder entledigt hat oder*
- 2. deren Sammlung, Lagerung, Beförderung und Behandlung als Abfall erforderlich ist, um die öffentlichen Interessen (§ 1 Abs. 3) nicht zu beeinträchtigen.“*

### Abfallbehandlung

Gemäß § 2 Abs. 5 Z 1 AWG 2002 (BKAOE, 2002) ist Abfallbehandlung *„jedes Verwertungs- oder Beseitigungsverfahren, einschließlich der Vorbereitung vor der Verwertung oder Beseitigung.“*

### Abfallstrom

Gemäß § 3 Z 1 AVV 2002 (BMLFUW, 2002) ist ein Abfallstrom *„ein bestimmter Abfall, welcher aus einem definierten Prozess (gleich bleibendes Verfahren, gleich bleibende Prozessbedingungen und gleich bleibende Einsatzstoffe) in gleich bleibender Qualität regelmäßig bei einem Abfallerzeuger anfällt; dies muss im Hinblick auf die Grenzwertrelevanz und die Kriterien für den Einsatz in einer spezifischen Mitverbrennungsanlage beurteilt werden.“*

### Aufbereitung

Gemäß § 3 Z 4 AVV 2002 (BMLFUW, 2002) ist Aufbereitung *„die Behandlung von Abfällen vor dem Einsatz in Mitverbrennungsanlagen, wie beispielsweise die Klassierung, die Sortierung, die Eisen (Fe)- und Nichteisen (NE)-Metallabscheidung. Die Aufbereitung kann auch aus einer alleinigen Konfektionierung bestehen, sofern die Grenzwerte gemäß Anlage 8 Kapitel 1 eingehalten werden.“*

### Behandlungsanlagen

Gemäß § 2 Abs. 7 Z 1 AWG 2002 (BKAOE, 2002) sind Behandlungsanlagen *„ortsfeste oder mobile Einrichtungen, in denen Abfälle behandelt werden, einschließlich der damit unmittelbar verbundenen, in einem technischen Zusammenhang stehenden Anlagenteile.“*

### Beurteilungswert

Gemäß § 3 Z 7 AVV 2002 (BMLFUW, 2002) ist der Beurteilungswert der *„Wert, anhand dessen die Einhaltung der Grenzwerte überprüft wird.“*

## **Ersatzbrennstoffe (EBS)**

Gemäß § 3 Z 18 AVV 2002 (BMLFUW, 2002) sind Ersatzbrennstoffe „*Abfälle, die zur Gänze oder in einem relevanten Ausmaß zum Zweck der Energiegewinnung eingesetzt werden und die die Vorgaben gemäß Anlage 8 erfüllen. Ein relevantes Ausmaß zum Zweck der Energiegewinnung liegt vor, wenn eine selbstgängige Verbrennung ohne Zusatzfeuerung möglich ist. Klärschlämme und Papierfaserreststoffe, die verbrannt werden und die die Vorgaben gemäß Anlage 8 erfüllen, gelten im Sinne dieser Verordnung als feste Ersatzbrennstoffe.*“

### **EBS LOW Quality**

Als „EBS LOW Quality“ wird in der gegenständlichen Arbeit ein Ersatzbrennstoff bezeichnet, der aus Siedlungsabfällen und/oder sonstigen nicht gefährlichen Abfällen (z.B. für das Recycling nicht geeignete Rückstände aus Sortieranlagen) hergestellt wird und ausschließlich für den Einsatz in der Verbrennungs- oder Mitverbrennungsanlage (z.B. Wirbelschichttechnologie) geeignet ist. Die wesentliche Unterscheidung von anderen EBS liegt vor allem im Heizwert (vgl. Tabelle 1). Eine detaillierte Beschreibung wird in Kapitel 6.1 gegeben.

### **EBS MEDIUM Quality**

Als „EBS MEDIUM Quality“ wird in der gegenständlichen Arbeit ein qualitätsgesicherter Ersatzbrennstoff bezeichnet, der aus Siedlungsabfällen und/oder sonstigen nicht gefährlichen Abfällen (z.B. für das Recycling nicht geeignete Rückstände aus Sortieranlagen) hergestellt wird und der für den Einsatz in der Sekundärfeuerung (vgl. Abbildung 14) in Anlagen zur Zementerzeugung (d.h. Drehrohrofen-Technologie) geeignet ist. Die wesentliche Unterscheidung von anderen EBS liegt – wie bereits erwähnt – insbesondere im Heizwert (vgl. Tabelle 1). Eine detaillierte Beschreibung wird in Kapitel 6.2 gegeben.

### **EBS PREMIUM Quality**

Als „EBS PREMIUM Quality“ wird in der gegenständlichen Arbeit ein qualitätsgesicherter Ersatzbrennstoff bezeichnet, der aus Siedlungsabfällen und/oder sonstigen nicht gefährlichen Abfällen (z.B. für das Recycling nicht geeignete Rückstände aus Sortieranlagen) hergestellt wird und für den Einsatz in der Primärfeuerung (vgl. Abbildung 14) in Anlagen zur Zementerzeugung (d.h. Drehrohrofen-Technologie) geeignet ist. Die wesentliche Unterscheidung von anderen EBS liegt auch hier vor allem im Heizwert (vgl. Tabelle 1). Eine detaillierte Beschreibung wird in 6.2 und 6.3 gegeben.

Tabelle 1: Zusammenfassende Darstellung der Heizwerte für EBS LOW, EBS MEDIUM und EBS PREMIUM Quality

EBS-Art	Sarc & Lorber, 2013*	Sarc et al., 2014b**		Deditz et al., 2014	Zusammen- fassung
	[MJ/kg <sub>OS</sub> ]	[MJ/kg <sub>TM</sub> ]	[MJ/kg <sub>OS</sub> ]	[MJ/kg]***	[MJ/kg <sub>OS</sub> ]
<b>EBS LOW</b>	9 (Mittelwert) 8,9 (Median)			< 12	<b>8 - 12</b>
<b>EBS MEDIUM</b>		21,2 (Median)	15,5 (Median)	15 - 18	<b>12 - 18</b>
<b>EBS PREMIUM</b>	> 22	25,0 (Median)	19,3 (Median)	18 - 24	<b>18 - 25</b>

\* Ergebnisse aus eigenen Untersuchungen (n = 48), vgl. Kapitel 6.1.  
 \*\* Ergebnisse aus eigenen Untersuchungen (n<sub>EBS MEDIUM</sub> = 21; n<sub>EBS PREMIUM</sub> = 15), vgl. Kapitel 6.2.  
 \*\*\* Einheit ist nicht näher spezifiziert, ob OS oder TM ist nicht bekannt.

### Feldprobe

Gemäß § 3 Z 21 AVV 2002 (BMLFUW, 2002) ist eine Feldprobe „eine Probe, aus der die Laborprobe für die nachfolgende Untersuchung hergestellt wird.“

### Fluss

„Bewegung der untersuchten Güter oder Stoffe zwischen Prozessen oder in das System hinein oder aus dem System heraus mit der Einheit z.B. Masse oder Volumen pro Zeit.

Materialflüsse in einen Prozess werden als Inputs (Edukte), solche aus einem Prozess als Outputs (Produkte) bezeichnet. Materialflüsse in ein System werden als Importe, solche aus einem System als Exporte bezeichnet.“ (ASI, 2005)

### Gut

„Material, das aus einem oder mehreren Stoffen besteht und handelbar ist.

Der Handelswert von Gütern kann je nach Betrachter sowohl positiv (z.B. Heizöl, Mineralwasser) als auch negativ (z.B. Restmüll, Abwasser) sein. In besonderen Fällen gibt es Güter, die keinen monetären Wert aufweisen, d.h. sie verhalten sich wertmäßig neutral.“ (ASI, 2005)

### Laborprobe

Gemäß § 3 Z 29 AVV 2002 (BMLFUW, 2002) ist eine Laborprobe „eine Probe, die nach Aufbereitung, Verjüngung und erforderlichenfalls Konservierung aus der Feldprobe erhalten und für die Laboruntersuchung verwendet wird.“

**Los**

Gemäß § 3 Z 30 AVV 2002 (BMLFUW, 2002) ist ein Los *„die gemäß Anlage 8 Z 2 oder Anlage 9 Z 2 festgelegte Menge von einem Abfall, dessen Eigenschaften zu bestimmen sind (Teilmenge der Abfallbeurteilung).“*

**Material**

*„Übergeordneter Begriff für ein Gut oder einen Stoff.“*

*Der Begriff Material wird dann verwendet, wenn Güter und Stoffe betrachtet werden, oder wenn man sich noch nicht festlegen will, auf welcher Ebene (Güter oder Stoffe) eine Untersuchung durchgeführt werden soll. Material schließt Rohmaterialien sowie alle durch biologische, physikalische oder chemische Prozesse veränderte Substanzen ein.“* (ASI, 2005)

**Mitverbrennungsanlage**

Gemäß § 3 Z 33 AVV 2002 (BMLFUW, 2002) ist eine Mitverbrennungsanlage *„jede ortsfeste oder mobile technische Einheit, deren Hauptzweck in der Energieerzeugung oder der Produktion stofflicher Erzeugnisse besteht und in der Abfall als Regel- oder Zusatzbrennstoff verwendet oder im Hinblick auf die Beseitigung thermisch behandelt wird, und zwar mittels Verbrennung durch Oxidation von Abfällen und andere thermische Behandlungsverfahren wie Pyrolyse, Vergasung und Plasmaverfahren, wenn die bei der Behandlung entstehenden Stoffe anschließend verbrannt werden. Falls die Mitverbrennung derart erfolgt, dass der Hauptzweck der Anlage nicht in der Energieerzeugung oder in der Produktion stofflicher Erzeugnisse, sondern in der thermischen Behandlung von Abfällen besteht, gilt die Anlage als Verbrennungsanlage.“*

**Prozess**

*„Vorgang der Umwandlung (biologisch, chemisch, physikalisch), des Transportes oder der Lagerung von Gütern oder Stoffen.“* (ASI, 2005)

**Prüfprobe**

Gemäß § 3 Z 37 AVV 2002 (BMLFUW, 2002) ist eine Prüfprobe *„eine Laborprobe nach einer vom Labor durchgeführten geeigneten Vorbehandlung (z.B. Mahlen zum Erreichen einer ausreichenden Homogenität und Feinheit, Trocknen).“*

**Qualifizierte Stichprobe**

Gemäß § 3 Z 38 AVV 2002 (BMLFUW, 2002) ist eine qualifizierte Stichprobe *„eine Probe, die aus mehreren Stichproben besteht und die einem Los zugeordnet werden kann.“*



## Recycling

Gemäß § 2 Abs. 5 Z 7 AWG 2002 (BKAOE, 2002) ist Recycling „jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfallmaterialien zu Produkten, Sachen oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden. Es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, aber **nicht die energetische Verwertung** und die Aufbereitung zu Materialien, die für die **Verwendung als Brennstoff** oder zur Verfüllung bestimmt sind.“

## Rückstellprobe

Gemäß § 3 Z 40 AVV 2002 (BMLFUW, 2002) ist eine Rückstellprobe „ein aliquoter Anteil der Feldprobe, der für allfällige Kontrolluntersuchungen aufbewahrt wird“

## Stand der Technik

Gemäß § 2 Abs. 8 Z 1 AWG 2002 (BKAOE, 2002) ist Stand der Technik „(beste verfügbare Techniken – BVT) der auf den einschlägigen wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhende Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, deren Funktionstüchtigkeit erprobt und erwiesen ist...“

## Stichprobe

Gemäß § 3 Z 41 AVV 2002 (BMLFUW, 2002) ist eine Stichprobe „eine Probe, die an einem bestimmten Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt gezogen wird. Eine Stichprobe wird nicht einzeln untersucht, sondern mit anderen Stichproben zu einer qualifizierten Stichprobe zusammengefasst.“

## Stoff

„Material, das aus identischen Einzelteilen besteht und entweder ein chemisches Element (Einzelteil Atom, z.B. Natrium, Kohlenstoff oder Kupfer) oder eine chemische Verbindung in reiner Form (Einzelteil Molekül, z.B.  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ , Kupfersulfat) ist.

Keine Stoffe sind z.B. Trinkwasser, da es nicht nur aus reinem Wasser besteht, sondern auch Kalzium und viele Spurenelemente, oder PVC, da es neben polymerisiertem Vinylchlorid auch Additive enthält.“ (ASI, 2005)

## Stoffflussanalyse

„Identifizierung und Quantifizierung aller relevanten Flüsse von Stoffen in einem zeitlich und räumlich exakt abgegrenzten System sowie Bilanzierung der Stoffe innerhalb dieses Systems.“ (ASI, 2005)

## **Stoffliche Verwertung**

Gemäß § 2 Abs. 5 Z 2 AWG 2002 (BKAOE, 2002) ist stoffliche Verwertung „die ökologisch zweckmäßige Behandlung von Abfällen zur Nutzung der stofflichen Eigenschaften des Ausgangsmaterials mit dem Hauptzweck, die Abfälle oder die aus ihnen gewonnenen Stoffe unmittelbar für die Substitution von Rohstoffen oder von aus Primärrohstoffen erzeugten Produkten zu verwenden, ausgenommen die Abfälle oder die aus ihnen gewonnenen Stoffe werden einer thermischen Verwertung zugeführt.“

## **System**

„Sammelbezeichnung für eine Menge von Prozessen (einschließlich Lager), die miteinander über Flüsse in Beziehung stehen, und die Abgrenzung nach außen.“ (ASI, 2005)

## **Systemgrenzen**

„Zeitliche und räumliche Abgrenzung des zu untersuchenden Systems“ (ASI, 2005)

## **Transferkoeffizient ( $k_x$ )**

„Anteil des gesamten in den Prozess eingeführten Gutes oder Stoffes, der in den Output X transferiert wird. Die Summe der Transferkoeffizienten aller Outputs eines Materials muss immer 1 ergeben und wird über die Transferfunktion beschrieben.“ (ASI, 2005)

## **(unaufbereitete) gemischte Siedlungsabfälle**

Gemäß § 3 Z 43 AVV 2002 (BMLFUW, 2002) sind (unaufbereitete) gemischte Siedlungsabfälle „Abfälle aus privaten Haushalten und andere Abfälle, die auf Grund ihrer Beschaffenheit oder Zusammensetzung den Abfällen aus privaten Haushalten ähnlich sind. Davon ausgenommen sind getrennt gesammelte Fraktionen, sowie Garten- und Parkabfälle. Gemischte Siedlungsabfälle sind von inhomogener Zusammensetzung oder weisen hohe oder stark schwankende Schadstoffgehalte auf. Einfache einzelne Aufbereitungsschritte, wie z.B. Trocknung, Verpressung oder nur teilweise Trennung und Sortierung, führen zu keiner wesentlichen Veränderung dieser Eigenschaften, sodass weiterhin unaufbereitete gemischte Siedlungsabfälle vorliegen.“

## **Verbrennungsanlage**

Gemäß § 3 Z 45 AVV 2002 (BMLFUW, 2002) ist eine Verbrennungsanlage „jede ortsfeste oder mobile technische Einheit oder Anlage, die zur thermischen Behandlung von Abfällen mit oder ohne Nutzung der Verbrennungswärme mittels Verbrennung durch Oxidation von Abfällen und anderen thermischen Behandlungsverfahren wie Pyrolyse, Vergasung und Plasmaverfahren eingesetzt wird, wenn die bei der Behandlung entstehenden Stoffe anschließend verbrannt werden.“

## Verwertung als Überbegriff

Gemäß § 2 Abs. 5 Z 5 AWG 2002 (BKAOE, 2002) ist Verwertung *„jedes Verfahren, als deren Hauptergebnis Abfälle innerhalb der Anlage oder in der Wirtschaft in umweltgerechter Weise einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem*

- a) sie andere Materialien ersetzen, die ansonsten zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder*
- b) – im Falle der Vorbereitung zur Wiederverwendung – die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen.*

*Als Verwertung gilt die Vorbereitung zur Wiederverwendung, das Recycling und jede sonstige Verwertung (z.B. die **energetische Verwertung**, die Aufbereitung von Materialien, die für die **Verwendung als Brennstoff** bestimmt sind, oder die Verfüllung) einschließlich der Vorbehandlung vor diesen Maßnahmen. Anhang 2 Teil 1 enthält eine nicht erschöpfende Liste von Verwertungsverfahren.“*

## 2 Dissertationskonzept und wissenschaftliche Methodik

In den folgenden vier Unterkapiteln werden der Stand der Technik und Wissenschaft, Problemstellung, Forschungskonzept und -fragen, verwendete wissenschaftliche Methodik und die Struktur der gegenständlichen Arbeit beschrieben.

### 2.1 Stand der Technik und Wissenschaft

Die Deponierung von unbehandelten Abfällen wurde in Österreich mit 1.1.2004. – bzw. mit Ausnahmen ab 1.1.2009 – (BMLFUW, 2008a) verboten. Damit wurde einer der wichtigsten abfallwirtschaftlichen Meilensteine in der Entwicklung einer modernen Kreislaufwirtschaft in Österreich gesetzt. Die Behandlung von ausgewählten Siedlungsabfällen (d.h. Haushaltsabfälle und ähnliche gewerbliche und industrielle Abfälle), die nach der getrennten Sammlung und Aufbereitung bzw. Sortierung der Fraktionen (d.h. Altstoffe) übrig bleiben, wie z.B. gemischte Siedlungsabfälle (auch als „Restmüll“ bezeichnet), basiert in Österreich auf zwei technologischen Methoden. Einerseits werden die gemischten Siedlungsabfälle in den Müllverbrennungsanlagen (MVA) und andererseits in mechanischen Restabfallsplittinganlagen (MB(RS)) bzw. mechanisch-biologischen Behandlungsanlagen (MBA) behandelt (vgl. Abbildung 1). (Lorber et al. 2010; 2011)

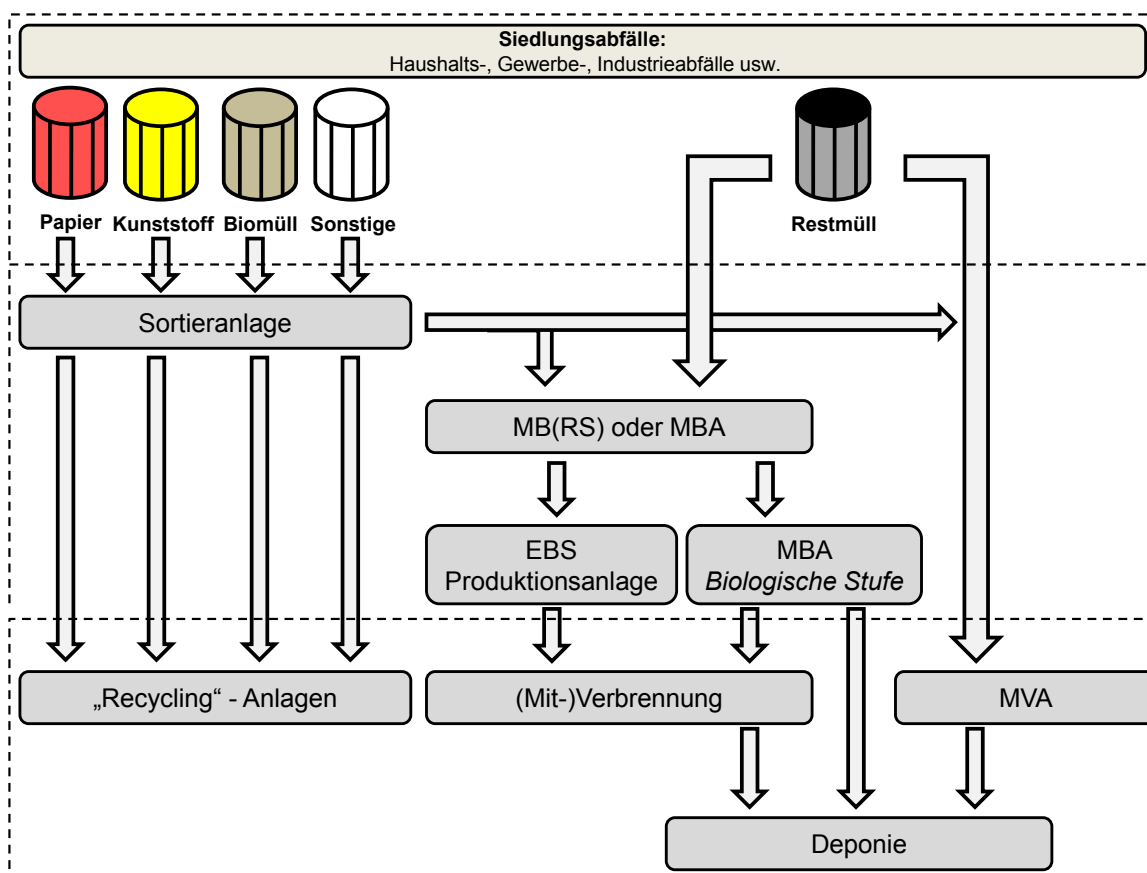


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung des österreichischen „Restmüll-Splitting“ Konzeptes (Lorber et al., 2010, modifiziert)

In der mechanischen Aufbereitung (MB(RS) oder MBA und EBS Produktionsanlage) werden Abfälle zu u.a. Ersatzbrennstoffen unterschiedlicher Qualitäten verarbeitet, wobei die Qualität in erster Näherung über den Heizwert und die Korngröße ( $d_{95}$ ) vereinfacht dargestellt werden kann. Die Aufbereitung beinhaltet Prozesse wie z.B. die Zerkleinerung, Trocknung sowie das Klassieren, Sortieren (Abtrennen) von Eisen- und Nichteisenmetallen und von schweren Materialien (z.B. Problemfraktionen wie Steine, Beton, Ziegel usw.), sowie Pelletieren usw. Alle aufgezählten aber auch weitere Prozesse dienen zur Verbesserung der chemischen, physikalischen, brennstoff- und verwertungstechnischen Eigenschaften der gewonnenen Ersatzbrennstoffe.

Gemäß Informationen aus dem Bundesabfallwirtschaftsplan – Statusbericht 2013 (BMLFUW, 2014) sind im Jahr 2012 in Österreich rund 4 Mio. t Siedlungsabfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen angefallen. Darin sind 1,4 Mio. t an gemischtem Siedlungsabfall bzw. Restmüll und 241.100 t Sperrmüll enthalten. In den österreichischen (Mit-)Verbrennungsanlagen wurden 1,5 Mio. t bzw. 38% der gesamten Siedlungsabfällen thermisch behandelt, und zwar:

- 1.041.400 t/a direkte Anlieferung von gemischtem Siedlungsabfall und Sperrmüll,
- 152.600 t/a heizwertreiche Fraktion aus der mechanischen Aufbereitung von gemischtem Siedlungsabfall und Sperrmüll,
- 321.800 t/a Altstoffe und biogene Altstoffe aus der getrennten Sammlung und anschließender Altstoffsartierung,
- 15.700 t/a biogene Abfälle aus getrennter Sammlung und anschließender Sortierung.

In Österreich waren im Jahr 2012 insgesamt rd. 2.100 Anlagen zur Behandlung von Abfällen im Betrieb, wobei davon elf Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle, 56 thermische Behandlungsanlagen (ohne Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle), 13 biotechnische Behandlungsanlagen zur Vorbehandlung von gemischtem Siedlungsabfall und sonstigen Abfällen (MBA) sowie 136 Anlagen zur Sortierung und Aufbereitung getrennt erfasster Altstoffe und anderer Abfälle betrieben wurden. (BMLFUW, 2014)

Per Definition (siehe Kapitel 1.1) sind Ersatzbrennstoffe (EBS) „Abfälle, die zur Gänze oder in einem relevanten Ausmaß zum Zweck der Energiegewinnung eingesetzt werden und die die Qualitätskriterien gemäß der Abfallverbrennungsverordnung (AVV) erfüllen“. (BMLFUW, 2002) Die EBS können laut AVV zum Zweck der Energiegewinnung in drei verschiedenen Typen von Mitverbrennungsanlagen eingesetzt werden: Anlagen zur Zementerzeugung (werden in der gegenständlichen Arbeit betrachtet), Kraftwerksanlagen (werden in der gegenständlichen Arbeit nicht betrachtet) und sonstigen Mitverbrennungsanlagen (werden in der gegenständlichen Arbeit nur am Rande betrachtet). Die Qualitätskriterien gemäß AVV sind die sog. statistischen (d.h. die Beurteilung erfolgt über den Median und den 80-er

Perzentil) Grenzwerte für acht ausgewählte Schwermetalle (d.h. Sb, As, Pb, Cd, Cr, Co, Ni und Hg), deren Gehalt bezogen auf den Nettoheizwert [mg/MJ<sub>TM</sub>] begrenzt ist (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Statistische Grenzwerte für Ersatzbrennstoffe beim Einsatz in Anlagen zur Zementerzeugung (BMLFUW, 2002)

Parameter	Grenzwerte [mg/MJ <sub>TM</sub> ]	
	Median	80-er Perzentil
Sb	7	10
As	2	3
Pb	20	36
Cd	0,23 <sup>1)</sup>	0,46 <sup>1)</sup>
Cr	25	37
Co	1,5	2,7
Ni	10	18
Hg	0,075	0,15

<sup>1)</sup> Für qualitätsgesicherte Ersatzbrennstoffe (Schlüssel-Nummer 91108 gemäß Abfallverzeichnisverordnung, BGBl. II Nr. 570/2003, in der geltenden Fassung) gilt für den Median ein Grenzwert von 0,45 mg/MJ<sub>TM</sub> und für das 80-er Perzentil ein Grenzwert von 0,7 mg/MJ<sub>TM</sub>.

Damit aus gemischten Siedlungsabfällen hergestellte EBS in Anlagen zur Zementerzeugung eingesetzt werden können, müssen neben o.a. rechtlichen Anforderungen auch weitere – zwischen EBS Hersteller bzw. Lieferant und Verwerter vertraglich festgelegte – Qualitätskriterien eingehalten werden, die einen wichtigen Einfluss u.a. auf die Preisgestaltung haben. Normalerweise beinhalten diese u.a. folgende Parameter (Lorber et al., 2012; Pomberger & Sarc, 2012):

- Korngröße (d<sub>90</sub> oder d<sub>95</sub>) [mm],
- Nettoheizwert [MJ/kg<sub>OS</sub>],
- Aschegehalt [%<sub>TM</sub>],
- biogener Kohlenstoffgehalt [%],
- Wassergehalt [%<sub>OS</sub>],
- Chlorgehalt [%<sub>TM</sub>],
- Schwefelgehalt [%<sub>TM</sub>],
- weitere Beschränkungen [mg/kg<sub>TM</sub>] für Schwermetalle (z.B. Mn, Sn, Ti, V, Zn).

Um die Grundlage (d.h. die o.a. rechtlichen Anforderungen) für eine rechtskonforme Verwertung von EBS in Anlagen zur Zementerzeugung zu erfüllen, sowie die vertraglich festgelegten Parameter zwischen EBS-Lieferant und Abnehmer kontrollieren und den Klinkerherstellungsprozess auf die Qualitätsschwankungen von EBS anpassen zu können usw. muss ein klar definiertes und gleichzeitig in der Praxis umsetzbares Qualitätssicherungssystem für EBS eingesetzt werden.

In Österreich ist der rechtliche und technische Rahmen für die Durchführung der Qualitätssicherung von EBS in der (bereits zuvor erwähnten) Abfallverbrennungsverordnung (BMLFUW, 2002), der Richtlinie für Ersatzbrennstoffe (BMLFUW, 2008b) und in den unterschiedlichen (internationalen) Normen, die vom technischen Gremium CEN/TC 343 – Feste Sekundärbrennstoffe (CEN, 2015) veröffentlicht werden, festgelegt. Zusätzlich muss hier angemerkt werden, dass die von CEN/TC 343 veröffentlichten Normen in Österreich vom Austrian Standards Institute (ASI, 2015) übernommen und angepasst wurden und über die Abfallverbrennungsverordnung (BMLFUW, 2002) rechtlich verbindlich gemacht sind, d.h. die österreichische „EBS-Branche“ ist bei der Umsetzung der Qualitätssicherung rechtlich verpflichtet, diese zu verwenden. Die wichtigsten Normen, auf die in der AVV (BMLFUW, 2002) verwiesen wird, sind u.a. ÖNORM EN 15413 (ASI, 2011k), ÖNORM EN 15442 (ASI, 2011o), ÖNORM EN 15443 (ASI, 2011p).

In Österreich waren im Jahr 2013 acht Zementwerke im Produktionsbetrieb und ein Zementwerk (w&p Zement GmbH, Standort Peggau) wurde als Mahlwerk betrieben. (Mauschitz, 2014; Sarc et al., 2014c) Mit einer installierten Gesamtanlagenkapazität (Klinkerkapazität) von ca. 5,1 Mio. t/a wurden rd. 3,2 Mio. t/a Klinker bzw. rd. 4,4 Mio. t/a Zement produziert. (Mauschitz, 2014)

Da die Verwertung von Abfällen innerhalb einer Volkswirtschaft viele Vorteile in Bezug auf die Verfügbarkeit von (Roh-) Brennstoffen bietet (Sarc et al., 2013), konnte in der österreichischen Zementindustrie 2013, trotz strenger rechtlichen Anforderungen und regelmäßigen Überprüfungen, eine thermische Substitutionsrate von primären Energieträgern (wie z.B. Steinkohle, Braunkohle usw.) durch den EBS-Mix-Einsatz in der Höhe von 72,36% (Mauschitz, 2014) erreicht werden. Insgesamt wurden 483.694 t/a bzw. dementsprechend 8.562.395 GJ/a (Mauschitz, 2014) unterschiedlicher qualitätsgesicherter EBS eingesetzt. Davon wurden 277.909 t/a bzw. 5.325.577 GJ/a (Mauschitz, 2014) EBS, die aus (gemischten) Siedlungsabfällen, Gewerbe- und Industrieabfällen (in der Studie von Mauschitz (2014) als „Kunststoffabfälle“ bezeichnet) produziert und eingesetzt. Ihr energetischer Anteil lag damit bei rd. 62% der Gesamtenergie der im Jahr 2013 insgesamt in der österreichischen Zementindustrie eingesetzten EBS. (Mauschitz, 2014)

Wie bereits in Pomberger & Curtis (2012) und Sarc et al. (2013) berichtet, gibt es Zementwerke in Österreich, die bereits eine höhere thermische Substitutionsrate als der österreichische Durchschnitt (von 72,4%) erzielen konnten.

Abschließend kann festgehalten werden, dass der Einsatz von EBS in Anlagen zur Zementerzeugung in abfallwirtschaftlich hoch entwickelten Ländern, wie z.B. Österreich und Deutschland, bereits zum Stand der Technik gehört.

## 2.2 Problemstellung

Bei der Problemstellung der gegenständlichen Arbeit werden zwei Branchen, nämlich die Abfallwirtschaft und die industrielle Produktion (im gegenständlichen Fall ist die Zementindustrie gemeint) mit ausgewählten Einflussfaktoren (d.h. Aspekten) herausgegriffen und daraus die Herausforderungen der Zusammenarbeit hinterfragt.

Auf der einen Seite hat die Abfallwirtschaft in Österreich, die u.a. das Ziel der EBS Herstellung verfolgt, gewisse Chancen aber auch Risiken, wenn es um die Herstellung und Vermarktung dieser „alternativen“ Brennstoffe geht. Diese Chancen und Risiken können als „Aspekte des Wirtschaftens“ bezeichnet und wie nachfolgend dargestellt, erklärt werden:

- **Unterschiedliche Sammlung der Abfälle:** In Österreich gibt es nicht nur länderspezifisch sondern auch regionalspezifisch unterschiedliche Sammelsysteme (z.B. Kunststoffe im Restmüll oder getrennt gesammelt), die einen direkten Einfluss auf die Qualität des Ausgangsmaterials für die EBS Herstellung haben.
- **Schwankung der Abfallqualität:** Es ist allgemein bekannt, dass die Qualität der Abfälle einerseits jahreszeitspezifisch (Sommer bzw. Winter) und andererseits siedlungsstrukturspezifisch (z.B. rural oder urban) schwankt, was einen direkten Einfluss auf die produzierte EBS-Mengen und deren Qualität hat.
- **Unterschiedliche Lieferanten:** Aus der anlagenbezogenen Sicht eines EBS Herstellers muss erwähnt werden, dass unterschiedliche Lieferanten, die nicht nur aus dem Inland sondern auch aus dem Ausland (z.B. Slowenien und Italien) Abfälle transportieren, auch spezifische Abfallqualitäten mit unterschiedlich stark ausgeprägten Qualitätsschwankungen anliefern.
- **Unterschiedliche Abfallarten:** Es ist zu beachten, dass nicht nur, wie vorher erwähnt, spezifische Abfallqualitäten angeliefert werden, sondern auch unterschiedliche Abfallarten (z.B. Haus-, Gewerbe-, Industrie- sowie Sperrmüll, Rückstände aus Recycling-Prozessen usw.), die auch unterschiedliche Aufbereitungstechnik benötigen.
- **Senken für „minderwertigere“ und problematische Abfälle:** Die Aussage in der Praxis der Abfallwirtschaft „*Der Abfall geht den Weg des geringsten Widerstandes bzw. Geldes*“ bedeutet eigentlich, dass es einerseits immer wieder Abfälle gibt, die nicht alle Anlagen verwerten können und somit an weitere Anlagen (weiter)gegeben werden müssen. Andererseits, gibt es Abfallstoffe (z.B. Sparlampen, Batterien usw.), die Schadstoffe enthalten und durch eine falsche Entsorgung bzw. Fehlwürfe in Abfallströmen landen, welche u.a. für eine EBS Herstellung gedacht sind.
- **Marktsituation und Konkurrenzdruck:** Die Abfallwirtschaft befindet sich, ähnlich wie auch andere Branchen, in wirtschaftlich schweren Zeiten, die durch die



Wirtschaftskrise (2008/2009), Überkapazitäten bei Anlagen, Export aber auch durch Import von Ersatzbrennstoffen usw. geprägt sind. Vor allem die Verwertung von grobstückigen ( $d_{95} = 80 - 120$  mm) EBS in der Sekundärfeuerung der Zementindustrie (vgl. Abbildung 14) steht einerseits in Konkurrenz zu (Mit-)Verbrennungsanlagen mit Wirbelschichttechnologie, andererseits stellt dies aber auch eine wichtige Ergänzung am abfallwirtschaftlichen Markt dar.

- **Stoffliche vs. energetische Verwertung:** Durch rechtliche Vorgaben (z.B. Recyclingquoten), steigende Preise in der stofflichen Verwertung usw. können einerseits unterschiedliche Fraktionen (z.B. Kunststoff PET) aussortiert und zu höheren Preisen verkauft werden, was andererseits zur Verringerung der Heizwerte bei den Ersatzbrennstoffen führen kann.

Auf der anderen Seite befindet sich die industrielle Produktion, im gegenständlichen Fall ist die Zementindustrie gemeint, die das Ziel der Produktherstellung mit international festgelegten Qualitätskriterien verfolgt. Das Produkt muss allen rechtlichen und weiteren Anforderungen des Marktes entsprechen, hohe Qualität aufweisen und gleichzeitig unter Berücksichtigung der Unternehmenswirtschaftlichkeit produziert werden können. Dabei können folgende spezielle Aspekte Bedeutung erlangen:

- **Schwankende Preislage konventioneller Energieträger:** Wie derzeit (Jänner 2015) beobachtet werden kann, sank der Ölpreis (Marke Brent) in den letzten Wochen sogar unter € 50 pro Barrel (<http://www.finanzen.net/rohstoffe/oelpreis/euro> - abgerufen am 07.01.2015), obwohl er vor rund sechs Monaten noch bei ca. € 80 pro Barrel lag.
- **Emissionszertifikate:** Die Verwendung von Ersatzbrennstoffen bringt verglichen mit den konventionellen primären Energieträgern CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparungen mit sich. (Sarc et al., 2014b) Dadurch können gleichzeitig Emissionszertifikate für die Zementindustrie eingespart werden.
- **Lokale Energieträger:** Ein weiterer wesentlicher Aspekt liegt in der Verwertung von lokalen, regionalen Energieträgern. Dadurch kann die Abhängigkeit eines Unternehmens von konventionellen Energieträgern, die in meisten Fällen nach Österreich importiert werden müssen, verringert und damit gleichzeitig ein wesentlicher Beitrag zur Abfallwirtschaft geleistet werden.
- **Schadstoffeintrag und Energieeffizienz:** Ein Nachteil von EBS ist mit Sicherheit die – im Vergleich zu fossilen Brennstoffen – schwankende Qualität (vor allem: Wasser-, Chlor- und Schadstoffgehalt). Aus diesem Grund versucht die Zementindustrie solche EBS zu bekommen, deren Qualität so gut wie möglich der Qualität der Regelbrennstoffe bzw. primären Energieträgern (z.B. Steinkohle) entspricht. Je höher

der Gehalt an unerwünschten (Schad bzw. Stör)-Stoffen, desto mehr Optimierungen im Klinkerherstellungsprozess sind notwendig und desto mehr Aufwand wird betrieben, damit vor allem die Produktqualität eingehalten werden kann.

Neben branchenspezifischen Aspekten müssen hier auch weitere Punkte erwähnt werden, die für beide Branchen gleichzeitig von Bedeutung sind, und zwar:

- **Spezifische rechtliche Voraussetzungen:** Der grundlegende Aspekt der Zusammenarbeit zwischen den zwei angeführten Branchen liegt in den rechtlichen Anforderungen. Einerseits ist die Mindestanforderung an die EBS-Qualität rechtlich vorgeschrieben, d.h. der Schadstoffgehalt in EBS ist bei der Verwertung in der Zementindustrie gemäß AVV 2002 begrenzt (vgl. Tabelle 2) und andererseits gibt es weitere Anforderungen durch fallweise festgelegte Spezifikationen. Erst wenn diese grundlegenden Voraussetzungen erfüllt sind, kann im weiteren Schritt mit der Gestaltung des Vertrages, der u.a. Qualitätskriterien und Preisgestaltung beinhaltet, angefangen werden.
- **Qualität:** Wie bereits in Kapitel 2.1 erklärt, gibt es neben den rechtlichen Anforderungen (d.h. statistische Grenzwerte für acht Schwermetalle) auch weitere Parameter, die zwischen EBS Produzenten und EBS-Verwerter festgelegt werden.
- **Preisgestaltung:** Erst wenn alle zuvor angeführten Aspekte erfüllt sind, kann der Preis verhandelt und gestaltet werden. Wie aus o.a. Aspekten hervorgeht, ist die Thematik der EBS Herstellung und Verwertung ziemlich komplex und mit „Unsicherheiten“ verbunden, die einen wesentlichen Einfluss auf den Preis haben.

Die o.a. Aspekte aus beiden Sichtweisen bzw. Branchen, der Abfallwirtschaft auf der einen Seite und der industriellen Produktion auf der anderen Seite, werden in Abbildung 2 grafisch dargestellt.

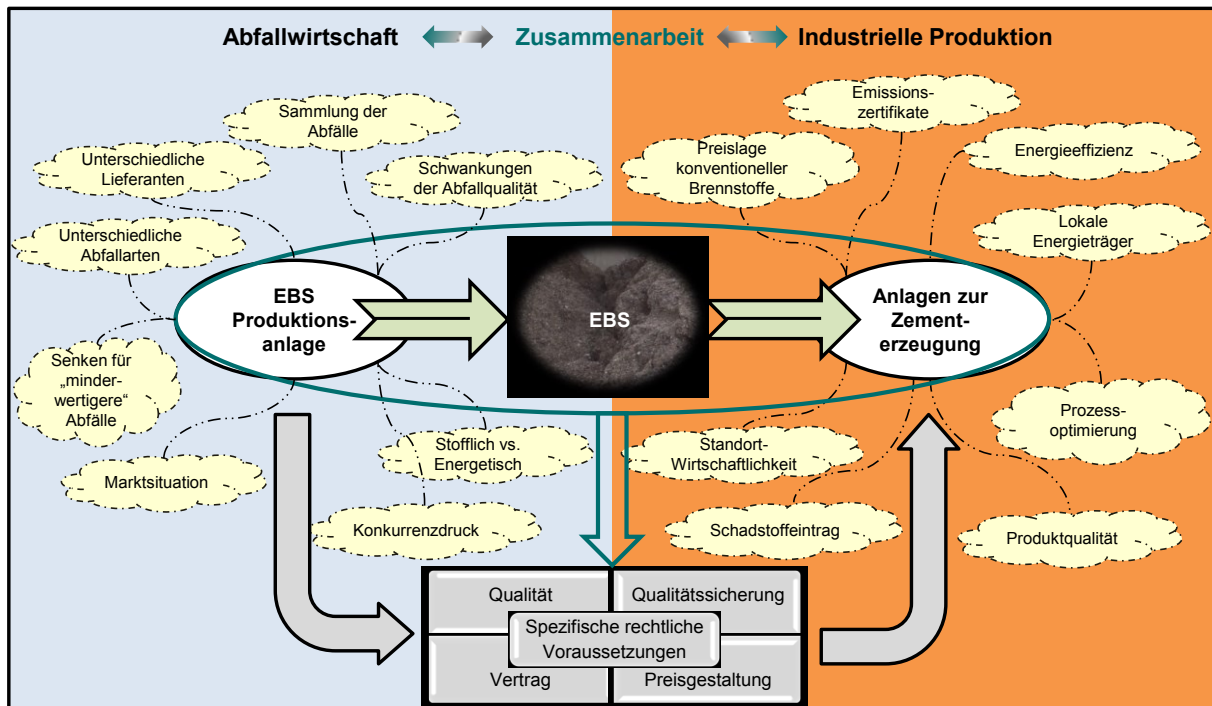


Abbildung 2: Grafische Darstellung der Einflüsse auf die einzelnen Branchen und auf die Zusammenarbeit zwischen der Abfallwirtschaft und der industriellen Produktion im Bereich EBS

Durch die Darstellung der o.a. Aspekte wird die Komplexität der gegenständlichen Thematik „EBS“ ersichtlich, wobei in dieser Arbeit **drei Forschungsfelder** mit dazugehörigen „**Forschungslücken**“ aufgezeigt und untersucht werden:

- **Erforderliche Qualität von Ersatzbrennstoffen und deren Qualitätssicherung:** Durch die spezifischen Gegebenheiten der Abfallwirtschaft (z.B. Abfallherkunft, Anlagenkonzepte, unterschiedliche Lieferanten usw.) stellt sich einerseits die Frage nach Festlegung der realen EBS-Qualität und andererseits nach der Umsetzung der Qualitätssicherung in der Praxis zur Einhaltung der rechtlichen und vertragsspezifischen Anforderungen.
- **Technisches Konzept von EBS Produktionsanlagen:** Die derzeitige Marktsituation und der Konkurrenzdruck führen dazu, dass EBS Produktionsanlagen ständig optimiert und/oder verbessert werden müssen. Unter dem Begriff „Verbesserung“ wird in der abfallwirtschaftlich ausgerichteten EBS-Branche verstanden, dass (wenn möglich, dann sogar gleichzeitig):
  - die Qualität der produzierten EBS gesteigert wird,
  - der Reinheitsgrad der ausgeschleusten Wertstoffe (d.h. FE- und NE-Metalle) im Produktionsprozess erhöht wird,

- möglicherweise weitere bzw. „neue“ Wertstoffe (z.B. ausgewählte Kunststoffe wie PET) für eine stoffliche Verwertung zusätzlich zur bestehenden Abtrennung (FE und NE) ausgeschleust werden,
- der im EBS verbliebene Anteil von Materialien mit Schadstoffen (z.B. PVC mit erhöhtem Chlorgehalt) oder erhöhtem Wassergehalt (z.B. Holz, Papier usw.) verringert wird,
- neue technische Konzepte und Einzel-Anlagen (z.B. zur Trocknung bzw. zur Verringerung des Wassergehaltes) installiert werden.

Dabei stellt sich die Frage, wie dies technisch praktikabel ist und wie die Effektivität der unterschiedlichen umgesetzten Maßnahmen zur Verbesserung der EBS-Herstellung nachgewiesen und bewertet werden kann.

- **100%-ige Substitution von primären Energieträgern im Zementdrehrohrofen:** Wie bereits erwähnt, liegt die thermische Substitutionsrate in der österreichischen Zementindustrie z.Z. bei über 72%, wobei manche Zementwerke bereits 80 bzw. 90% erreicht haben. Hier stellt sich die Frage, ob sogar 100% Substitution in der Praxis möglich und sinnvoll ist und wie dabei der verwendete EBS-Mix zusammengesetzt sein kann bzw. soll.

## 2.3 Forschungskonzept und -fragen

Basierend auf der beschriebenen Problemstellung und den existierenden Forschungslücken lassen sich das Forschungskonzept und die dazugehörigen Forschungsfragen dieser Arbeit, wie nachfolgend dargestellt, formulieren.

### 2.3.1 Forschungskonzept

In Abbildung 3 (Seite 23) ist das Abfallwirtschaftssystem in Österreich vereinfacht dargestellt, das die Behandlung von Siedlungsabfällen beinhaltet. Zusätzlich sind die Systemgrenzen des Forschungskonzeptes der gegenständlichen Dissertation eingezeichnet. Sowohl das Abfallwirtschaftssystem als auch das Forschungskonzept werden nachfolgend näher erklärt.

Wie bereits erwähnt, werden in Österreich Siedlungsabfälle (d.h. Haushalts-, Gewerbe-, Industrieabfälle usw.) nach der getrennten Sammlung und einer eventuellen Vorbehandlung zur weiteren Behandlung entweder direkt in die Verbrennungsanlage (MVA) oder mechanische Abfallbehandlungsanlage (MBA) gebracht (vgl. Abbildung 1 und Abbildung 4). Die Behandlung von Siedlungsabfällen in einer Verbrennungsanlage (z.B. Rostfeuerungs-Technologie) sowie die nachfolgende Ablagerung der Rückstände (d.h. Schlacken und Aschen) auf einer Deponie sind nicht Gegenstand des Forschungskonzeptes dieser Arbeit. D.h. „nur“ die Behandlung von vorbehandelten oder nicht vorbehandelten Siedlungsabfällen in einer mechanischen Abfallbehandlungsanlage wird im Rahmen des Forschungskonzeptes

betrachtet. Das verfahrenstechnische Konzept einer mechanischen Abfallbehandlungsanlage kann entweder einfach (d.h. ohne weitere Aufbereitung des Siebüberlaufs am selben Standort und eine Weitergabe an eine spezialisierte EBS Produktionsanlage (z.B. ThermoTeam) zur weiteren Aufbereitung und EBS-Herstellung) oder komplex (d.h. mechanische Abfallbehandlungsanlage hat selbst die Rolle einer EBS Produktionsanlage) ausgeführt sein (vgl. Kapitel 4.2). Wie aus Abbildung 4 ersichtlich, können in einer komplexen mechanischen Abfallbehandlungsanlage, die die Rolle einer EBS Produktionsanlage hat, mehrere Ersatzbrennstoffqualitäten (d.h. EBS LOW, EBS MEDIUM und/oder EBS PREMIUM Quality) hergestellt werden. In diesem Fall kann EBS LOW Quality an eine Verbrennungs- oder Mitverbrennungsanlage (z.B. Wirbelschichttechnologie) und EBS MEDIUM sowie EBS PREMIUM Quality an eine Anlage zur Zementerzeugung (d.h. Drehrohfen-Technologie) weitergegeben werden. Im Fall, dass überwiegend Hausmüll behandelt wird und dass auch eine biologische Fraktion abgetrennt wird, kann diese in eine spezialisierte Anlage (d.h. MBA mit – *biologischer Stufe*) eingebracht werden. Die biologische Fraktion und ihre Behandlung werden im Rahmen des gegenständlichen Forschungskonzeptes nicht näher betrachtet.

Neben einer umfangreichen Literaturrecherche und der Einarbeitung in das Thema, wurden für die gegenständliche Dissertation umfangreiche praktisch-wissenschaftliche Forschungsarbeiten an mehreren komplexen mechanischen Abfallbehandlungsanlagen, sowie einer spezialisierten EBS Produktionsanlage, einer Verbrennungsanlage mit Wirbelschichttechnologie und zwei Anlagen zur Zementerzeugung (d.h. Drehrohfen-Technologie) durchgeführt.

Die Forschungsarbeiten können den drei, bereits in der Problemstellung (Kapitel 2.2) vorgestellten, Forschungsfeldern zugeordnet werden:

- **Qualität und Qualitätssicherung von Ersatzbrennstoffen:**

Die Qualitätssicherung (QS) zur Festlegung der EBS Qualität wurde wie folgt durchgeführt:

- QS für EBS LOW Quality aus unterschiedlichen mechanischen Abfallbehandlungsanlagen für Verbrennungsanlagen (z.B. Wirbelschichttechnologie), vgl. Kapitel 6.1,
- QS für EBS MEDIUM und EBS PREMIUM Quality aus unterschiedlichen mechanischen Abfallbehandlungsanlagen für Anlagen zur Zementerzeugung (d.h. Drehrohfen-Technologie), vgl. Kapitel 6.2,
- QS für Siebüberlauf und ausgewählte vorbehandelte Abfälle aus unterschiedlichen mechanischen Abfallbehandlungsanlagen für EBS Produktionsanlage (z.B. Fa. ThermoTeam), vgl. Kapitel 6.3,

- QS für EBS PREMIUM Quality aus der EBS Produktionsanlage (z.B. Fa. ThermoTeam) für Anlagen zur Zementerzeugung (d.h. Drehrohrofen-Technologie), vgl. Kapitel 6.3.
- **Technisches Konzept von EBS Produktionsanlagen:**

Bei der EBS Produktionsanlage (Fa. ThermoTeam) wurden umfangreiche Untersuchungen des technischen Konzeptes und des produzierten EBS (d.h. Materialcharakterisierung, Massen- und Stoffbilanzen, EBS Trocknung, PVC und PET Ausschleusung) durchgeführt (vgl. Kapitel 6.3 und 6.4).
- **100%-ige Substitution von primären Energieträgern im Zementdrehrohrofen:**

Bei den Anlagen zur Zementerzeugung (d.h. Drehrohrofen-Technologie) wurden in einem Zementwerk am Standort Rohožnik/Slowakei Untersuchungen zur Festlegung der Qualität von eingesetzten EBS und zum Vergleich der Qualität von eingesetzten EBS mit der Qualität von konventionellen primären Energieträgern (d.h. Steinkohle) durchgeführt.

Andererseits wurden im Zementwerk am Standort Retznei/Österreich Untersuchungen des eingesetzten EBS aus der Anlage von ThermoTeam vorgenommen sowie drei Versuche zur Erreichung einer 100%-igen thermischen Substitutionsrate im Klinkerherstellungsprozess durchgeführt.

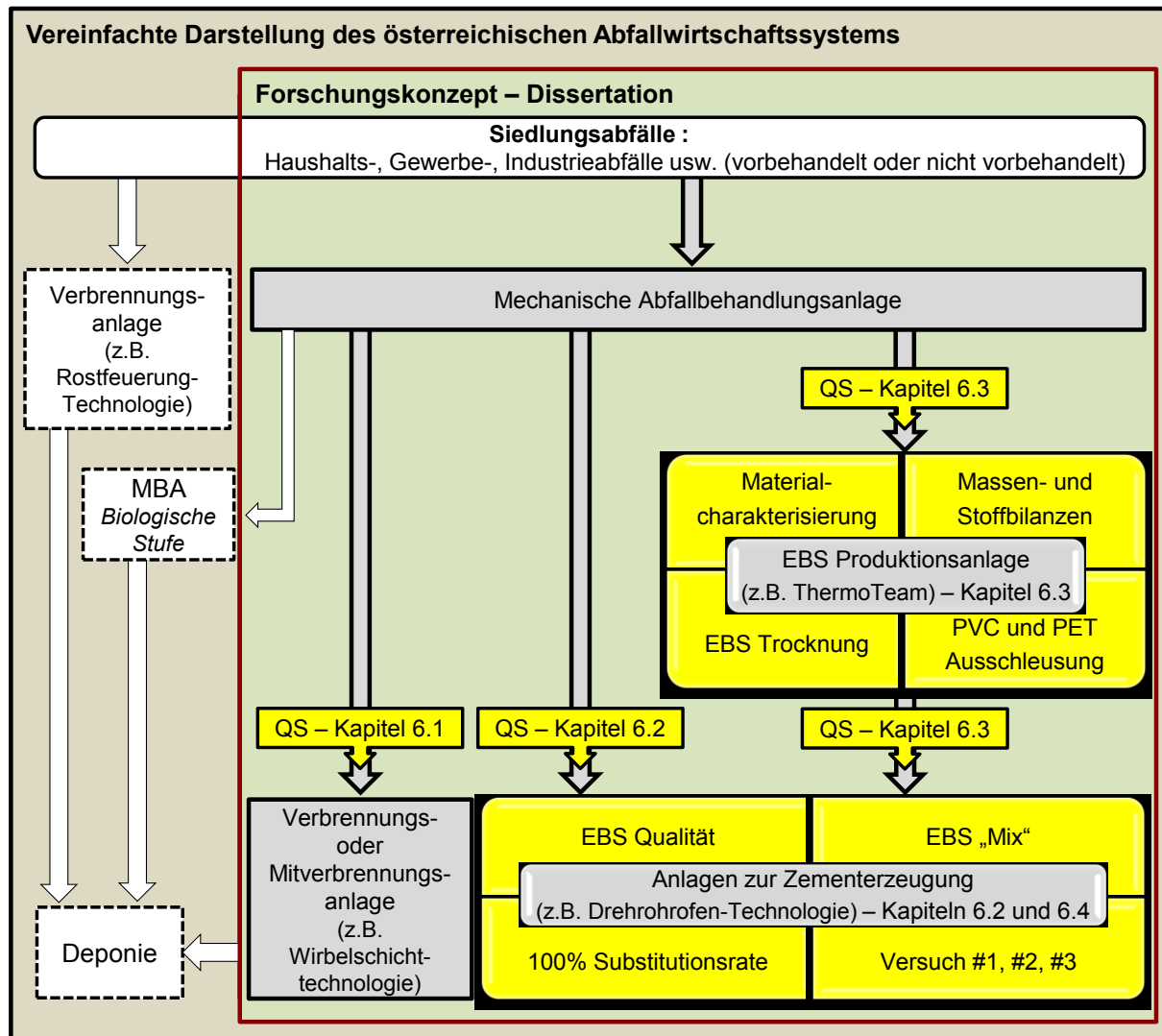


Abbildung 3: Integrierte Systemgrenzen des Forschungskonzeptes für die gegenständliche Dissertation (Anmerkung: Kapitel 6.1/2/3/4 steht für 1.-4. Unterkapitel im 6. Kapitel dieser Arbeit)

### **2.3.2 Forschungsfragen**

Die Herstellung von EBS und deren Verwertung in der österreichischen Zementindustrie gehört zum Stand der Technik, weist aber weiterhin, wie in der Problemstellung eingehend beschrieben, ein großes Forschungs- und Entwicklungspotential auf. Ein speziell ausgewählter Teil dieses Bereichs wird in der gegenständlichen Arbeit durch drei Forschungsfelder behandelt, wobei für jedes Feld gezielt Forschungsfragen gestellt werden, und zwar:

#### **1. Qualität und Qualitätssicherung von Ersatzbrennstoffen:**

**Frage 1.1. Welche Qualität haben die fein- und grobkörnigen Ersatzbrennstoffe in der Praxis und ist diese Qualität vergleichbar mit der Qualität eines primären Energieträgers?**

**Frage 1.2. Kann die reale Qualität von Ersatzbrennstoffen die derzeit gültigen rechtlichen Anforderungen erfüllen?**

#### **2. Technisches Konzept von EBS Produktionsanlagen:**

**Frage 2.1. Kann die Qualität von Ersatzbrennstoffen weiter gesteigert werden, um die thermische Substitutionsrate von EBS in der Zementindustrie in Richtung 100% zu erhöhen?**

**Frage 2.2. Wie kann die erzielte Qualitätssteigerung erzielt und konkret in einer EBS Produktionsanlage nachgewiesen werden?**

#### **3. 100%-ige Substitution von primären Energieträgern im Zementdrehrohrofen:**

**Frage 3.1. Kann bzw. wie kann eine 100%-ige Substitutionsrate von primären Energieträgern im Zementdrehrohrofen erreicht werden, wenn vorrangig feste EBS eingesetzt werden?**



## 2.4 Struktur der gegenständlichen Arbeit

Die Dissertation besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen (d.h. wissenschaftliche Theorie und praktische Umsetzung), die in insgesamt acht Kapiteln (K 1-K 8) abgehandelt werden, vgl. Abbildung 4. In die Arbeit werden insgesamt fünf Veröffentlichungen (V1-V5) aufgenommen, die gleichzeitig einen wesentlichen Teil der eigenständigen Forschungsleistungen darstellen. Zu jeder Veröffentlichung werden in der Dissertationsarbeit zusätzlich eine kurze Einleitung und Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse gebracht. Die Forschungsergebnisse aus der praktisch-wissenschaftlichen Arbeit, die teilweise aufgrund der Geheimhaltungsverpflichtungen (d.h. firmeninterne abfall- und prozesstechnische Daten) vor dem Zeitpunkt der Fertigstellung der gegenständlichen Arbeit nicht veröffentlicht werden dürften, werden im Kapitel 6 beschrieben und diskutiert.

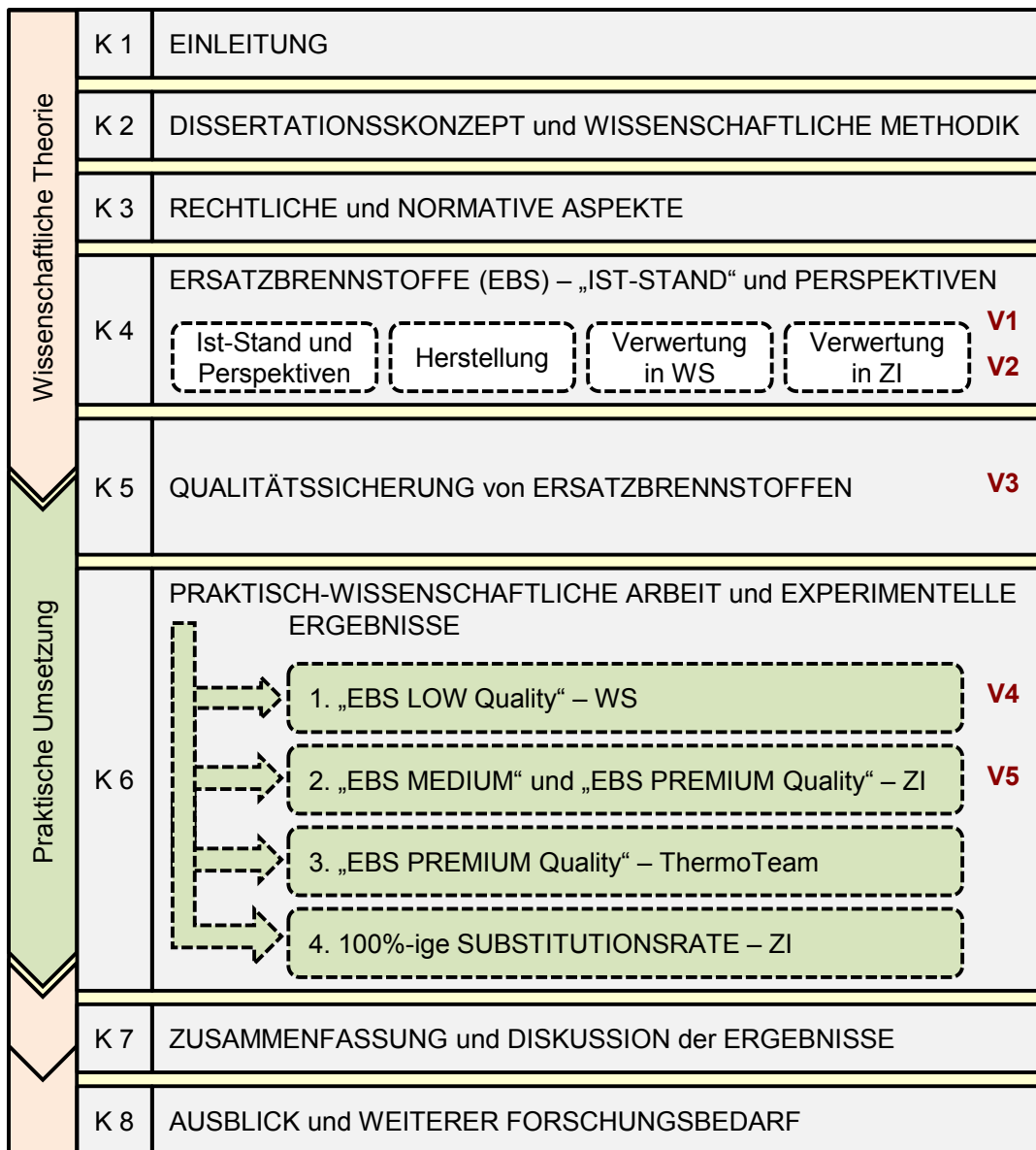


Abbildung 4: Struktur der gegenständlichen Arbeit (Anmerkung: K 1-K 8 werden für die Kapiteln in der Arbeit und Bezeichnungen V1-V5 für Veröffentlichungen verwendet)

### 3 Rechtliche und normative Aspekte

Nachfolgend werden die wichtigsten rechtlichen und normativen Aspekte kurz beschrieben, wobei hier zusätzlich angemerkt wird, dass in den Veröffentlichungen (vgl. Kapitel 4, 5 und 6) bereits beide Aspekte ausführlicher behandelt wurden.

#### 3.1 Rechtliche Aspekte

Die rechtlichen Aspekte, die sich mit der EBS Herstellung und Verwertung beschäftigen, erstrecken sich vom Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (BKAOE, 2002), welches die rechtliche Basis der österreichischen Abfallwirtschaft regelt, bis hin zur Abfallverbrennungsverordnung (BMLFUW, 2002), die u.a. die Vorgaben für EBS bei deren Einsatz in den (Mit-)Verbrennungsanlagen festlegt. Des Weiteren muss hier auch die Richtlinie für Ersatzbrennstoffe (BMLFUW, 2008b) erwähnt werden, in der die ersten Anforderungen beim Einsatz von EBS in Mitverbrennungsanlagen geregelt wurden. Mit dieser Richtlinie wurde bereits 2008 eine Basis geschaffen, die im Jahr 2010 von der Abfallverbrennungsverordnung (BMLFUW, 2002) übernommen wurde.

##### 3.1.1 Abfallwirtschaftsgesetz (AWG 2002)

Gemäß § 1 Abs. 1 Abfallwirtschaftsgesetz (BKAOE, 2002) ist die Abfallwirtschaft im Sinne des Vorsorgeprinzips und der Nachhaltigkeit so auszurichten, dass:

- „1. schädliche oder nachteilige Einwirkungen auf Mensch, Tier und Pflanze, deren Lebensgrundlagen und deren natürliche Umwelt vermieden oder sonst das allgemeine menschliche Wohlbefinden beeinträchtigende Einwirkungen so gering wie möglich gehalten werden,*
- 2. die Emissionen von Luftschadstoffen und klimarelevanten Gasen so gering wie möglich gehalten werden,*
- 3. Ressourcen (Rohstoffe, Wasser, Energie, Landschaft, Flächen, Deponievolumen) geschont werden,*
- 4. bei der stofflichen Verwertung die Abfälle oder die aus ihnen gewonnenen Stoffe kein höheres Gefährdungspotential aufweisen als vergleichbare Primärrohstoffe oder Produkte aus Primärrohstoffen und*
- 5. nur solche Abfälle zurückbleiben, deren Ablagerung keine Gefährdung für nachfolgende Generationen darstellt.“ (BKAOE, 2002)*

Die Grundsätze zur Erreichung der o.a. abfallwirtschaftlichen Ziele sind über die Abfallhierarchie in § 1 Abs. 2 gegeben:

1. *Abfallvermeidung*;
2. *Vorbereitung zur Wiederverwendung*;
3. *Recycling*;
4. **sonstige Verwertung, z.B. energetische Verwertung**;
5. *Beseitigung*. (BKAOE, 2002)

Der Einsatz von qualitätsgesicherten EBS in Mitverbrennungsanlagen, d.h. Anlagen zur Zementerzeugung gemäß AWG 2002 (BKAOE, 2002) wird als „**sonstige Verwertung, z.B. energetische Verwertung**“ eingestuft.

Weitere Bestimmungen zur Verwertung von EBS sind in der Abfallverbrennungsverordnung (BMLFUW, 2010) zu finden.

### 3.1.2 Abfallverbrennungsverordnung (AVV 2002)

Die Ziele der Abfallverbrennungsverordnung (BMLFUW, 2002) sind:

1. *der Schutz des Lebens und der Gesundheit von Menschen vor schädlichen Einwirkungen, die durch die Verbrennung oder Mitverbrennung von Abfällen entstehen können, sowie die Vermeidung von Belastungen der Umwelt,*
2. *der Betrieb von Verbrennungs- und Mitverbrennungsanlagen in einer Weise, dass Emissionen möglichst gering gehalten werden,*
3. *Effizienz im Einsatz und in der Verwendung von Energie,*
4. *im Fall der Mitverbrennung die Verlagerung von in Abfällen enthaltenen Schadstoffen, insbesondere von Schwermetallen, in das Produkt möglichst zu vermeiden, wenn dies eine Gefährdung des Lebens oder der Gesundheit von Menschen oder eine Belastung der Umwelt bewirkt.*

Neben dem ersten Ziel, das sich mit Emissionen aus (Mit-)Verbrennungsanlagen beschäftigt, wird hier auf das zweite Ziel ein wenig näher eingegangen. Der Betrieb von (Mit-)Verbrennungsanlagen gemäß AVV muss folgende Anforderungen erfüllen:

*„...Mitverbrennungsanlagen müssen so ausgelegt und ausgerüstet sein und so betrieben werden, dass die Temperatur des entstehenden Verbrennungsgases kontrolliert, gleichmäßig und selbst unter den ungünstigsten Bedingungen zwei Sekunden lang auf 850 °C erhöht wird. Wenn gefährliche Abfälle mit einem Gehalt von mehr als einem Gewichtsprozent an halogenierten organischen Stoffen, berechnet als Chloride, mitverbrannt*

werden, muss die Temperatur für mindestens zwei Sekunden auf 1 100 °C erhöht werden....“ (BMLFUW, 2002)

Im vierten Ziel der AVV 2002 wird auf die Verlagerung von in Abfällen enthaltenen Schadstoffen, insbesondere von Schwermetallen, in das Produkt eingegangen. Dazu wurden in der AVV (BMLFUW, 2002) umfangreiche Vorgaben für Abfälle bei der Verbrennung in Mitverbrennungsanlagen definiert. Eine der Vorgaben ist die Festlegung der statistischen Grenzwerte für Ersatzbrennstoffe beim Einsatz in Anlagen zur Zementerzeugung. Das heißt, bevor die EBS energetisch verwertet werden dürfen, müssen diese einem Qualitätssicherungsprozess (für den auch Vorgaben definiert sind, detaillierte Informationen sind im Kapitel 5 enthalten) unterzogen werden, mit dem nachgewiesen wird, dass der Beurteilungswert für EBS die (statistischen) Grenzwerte gemäß AVV einhält. Die (statistischen) Grenzwerte für Ersatzbrennstoffe beim Einsatz in Anlagen zur Zementerzeugung sind bereits in Tabelle 2 dargestellt, werden aber hier in Tabelle 3 wegen ihrer aktuellen Bedeutung für Kapitel 3 noch einmal gezeigt.

Tabelle 3: Statistische Grenzwerte für Ersatzbrennstoffe beim Einsatz in Anlagen zur Zementerzeugung (BMLFUW, 2002)

Parameter	Grenzwerte [mg/MJ <sub>TM</sub> ]	
	Median	80-er Perzentil
Sb	7	10
As	2	3
Pb	20	36
Cd	0,23 <sup>1)</sup>	0,46 <sup>1)</sup>
Cr	25	37
Co	1,5	2,7
Ni	10	18
Hg	0,075	0,15

<sup>1)</sup> Für qualitätsgesicherte Ersatzbrennstoffe (Schlüssel-Nummer 91108 gemäß Abfallverzeichnisverordnung, BGBl. II Nr. 570/2003, in der geltenden Fassung) gilt für den Median ein Grenzwert von 0,45 mg/MJ<sub>TM</sub> und für das 80-er Perzentil ein Grenzwert von 0,7 mg/MJ<sub>TM</sub>.

Der Schadstoffgehalt bzw. im gegenständlichen Fall der Schwermetallgehalt in Abfällen wird üblicherweise auf zwei Arten dargestellt:

- als absolute Konzentration [mg Schwermetall / kg<sub>TM</sub> Ersatzbrennstoff] oder
- als Verhältnis zwischen der Schadstoffmenge und dem Energieinhalt [mg Schwermetall / MJ<sub>TM</sub> Energie]. (Sarc et al., 2014b)

Unter dem Begriff „statistische Grenzwerte“ wird ihre mathematische Form beschrieben, d.h. die Grenzwerte sind in Median und 80-er Perzentil ausgedrückt, da Schwermetalle in EBS heterogen verteilt sind und die Ergebnisse teilweise stark schwanken. (Sarc et al., 2014b)

Die konkrete Anwendung, Berechnung und die Einhaltung von Grenzwerten wird gemäß AVV (BMLFUW, 2002) wie folgt erklärt:

*„Die Einhaltung von Grenzwerten muss für jeden Abfall ... getrennt nach Herkunft und Abfallart beurteilt werden. Zur Bestimmung des Medians und des 80-er Perzentils werden die 10 letzten Untersuchungsergebnisse herangezogen. ... Sind zu Beginn der Untersuchungen 5 bis 9 Analysenergebnisse (inkl. eventuell vorhandener Vorinformationen) vorhanden, muss ebenfalls der Median und das 80-er Perzentil bestimmt werden.... Sind weniger als fünf Analysenergebnisse vorhanden (zu Beginn der Untersuchungen), wird abweichend zu den obigen Ausführungen aus den Analysenergebnissen der arithmetische Mittelwert (Beurteilungswert) berechnet. Der Grenzwert gilt in diesem Fall als eingehalten, wenn der Beurteilungswert den Grenzwert für den Median nicht überschreitet und kein Einzelmessergebnis den Grenzwert für das 80-er Perzentil überschreitet.“*

### 3.2 Normative Aspekte

Normen sind unverbindliche Regelwerke, deren Anwendung auf freiwilliger Entscheidung basiert, können aber sehr sinnvoll sein, wenn es sich z.B. um die Vergleichbarkeit von Vorgehensweisen, Ergebnissen usw. handelt. In besonderen Fällen kann der Gesetzgeber Normen oder ihre Teile durch die Einbindung in das Gesetz oder eine Verordnung auch für „verbindlich“ erklären. Mit dieser Vorgehensweise wird die Anwendung dieser Normen verpflichtend. (ASI, 2015)

So einen Fall aus der Praxis, wo die ausgewählten Normen in eine Verordnung eingebunden worden sind, stellt die Abfallverbrennungsverordnung (BMLFUW, 2002) dar. Gemäß AVV (BMLFUW, 2002) muss bereits bei der Probenahmeplanung die ÖNORM EN 15442 „Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Probenahme“ (ASI, 2011o) berücksichtigt werden.

Die europäischen Normen, die auch in Österreich vom Austrian Standards Institute (ASI, 2015) übernommen und veröffentlicht werden, sind vom Technischen Komitee CEN/TC 343 – „Solid Recovered Fuels“ erarbeitet (CEN, 2015). Die vom Normungsinstitut veröffentlichten Normen mit dem Vorzeichen „Solid Recovered Fuels“ bzw. „Feste Sekundärbrennstoffe“ sind gemäß ÖNORM EN 15357, Punkt 3.104 (ASI, 2011a) und Grech (2013) im folgenden Fall anzuwenden:

- Es handelt sich um einen festen Abfall,
- Feste Sekundärbrennstoffe sind nur aus nicht gefährlichen Abfällen hergestellt,

- Feste Sekundärbrennstoffe werden zur Energiegewinnung in Verbrennungs- oder Mitverbrennungsanlagen eingesetzt,
- Klassifikations- und Spezifikationsanforderungen gemäß ÖNORM EN 15359 (ASI, 2011c) werden eingehalten.

Des Weiteren enthält die ÖNORM EN 15359 (ASI, 2011c) eine grafische Erklärung des Anwendungsbereiches der Normen des CEN/TC 343 – „Solid Recovered Fuels“, vgl. Abbildung 5. Wie aus Abbildung 5 ersichtlich, unterliegen die Anforderungen an die Abfallsammlung sowie den Einsatz bzw. die Verwendung von klassifiziertem Brennstoff in Verbrennungs- oder Mitverbrennungsanlagen nicht dem Anwendungsbereich. (ASI, 2011c; Grech, 2013)

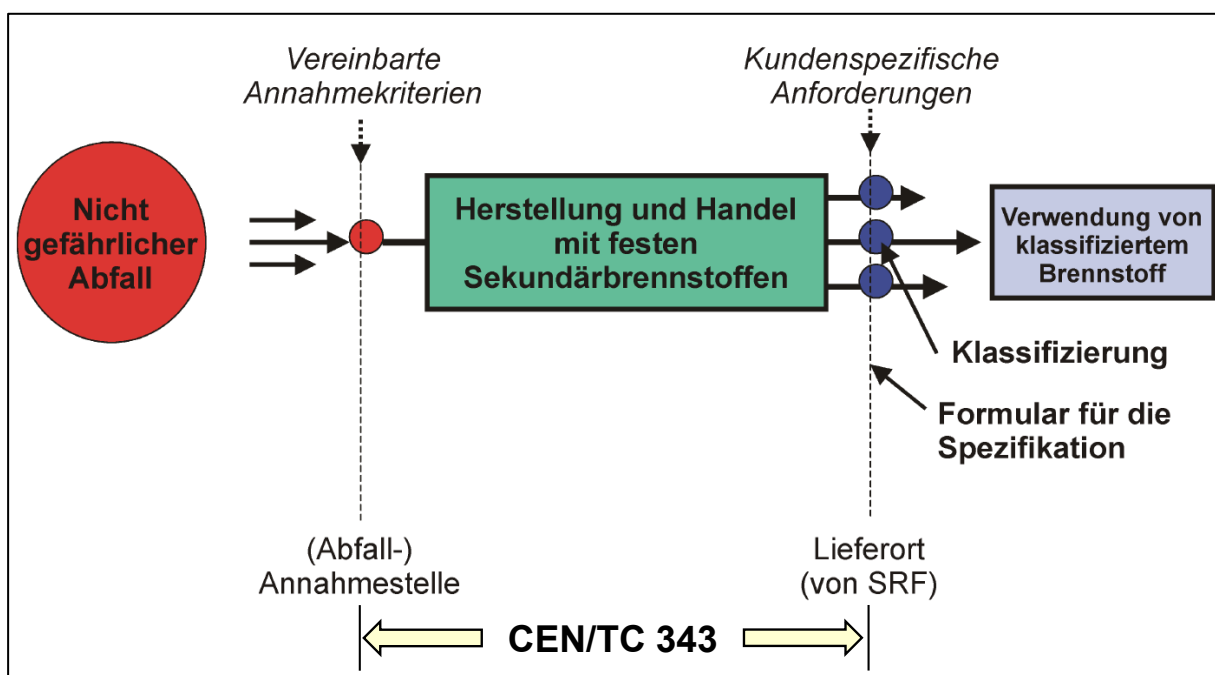


Abbildung 5: Anwendungsbereich der Normen des CEN/TC 343 – „Solid Recovered Fuels“ (ASI, 2011c; Grech, 2013)

Anschließend werden hier alle Normen, die bei der EBS Herstellung und Verwertung relevant bzw. zu berücksichtigen sind, in einer zusammenfassenden Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Für „Feste Sekundärbrennstoffe“ (SRF) bzw. Ersatzbrennstoffe (EBS) relevante Normen (ASI, 2015)

<b>ÖNORM EN 15357 2011 05 01</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Terminologie, Definitionen und Beschreibungen“</i>	ASI, 2011a
<b>ÖNORM EN 15358 2011 05 15</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Qualitätsmanagementsysteme – Besondere Anforderungen für die Anwendung bei der Herstellung von festen Sekundärbrennstoffen“</i>	ASI, 2011b
<b>ÖNORM EN 15359 2011 12 15</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Spezifikationen und Klassen“</i>	ASI, 2011c
<b>ÖNORM EN 15400 2011 05 15</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung des Brennwertes“</i>	ASI, 2011d
<b>ÖNORM EN 15401 2010 08 15</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung der Schüttdichte“</i>	ASI, 2010
<b>ÖNORM EN 15402 2011 05 15</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Bestimmung des Gehaltes an flüchtigen Substanzen“</i>	ASI, 2011e
<b>ÖNORM EN 15403 2011 05 15</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes“</i>	ASI, 2011f
<b>ÖNORM EN 15407 2011 05 01</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung des Gehaltes an Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Stickstoff (N)“</i>	ASI, 2011g
<b>ÖNORM EN 15408 2011 05 01</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung des Gehaltes an Schwefel (S), Chlor (Cl), Fluor (F) und Brom (Br)“</i>	ASI, 2011h
<b>ÖNORM EN 15410 2011 12 15</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung des Gehaltes an Hauptelementen (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, Si, Ti)“</i>	ASI, 2011i
<b>ÖNORM EN 15411 2011 10 15</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung des Gehalts an Spurenelementen (As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Ti, V und Zn)“</i>	ASI, 2011j
<b>ÖNORM EN 15413</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Herstellung“</i>	ASI,

<b>2011 10 15</b>	<i>der Versuchsprobe aus der Laboratoriumsprobe“</i>	2011k
<b>ÖNORM EN 15414-3 2011 05 01</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes unter Verwendung des Verfahrens der Ofentrocknung – Teil 3: Wassergehalt in gewöhnlichen Analysenproben“</i>	ASI, 2011l
<b>ÖNORM EN 15415-1 2011 10 15</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung – Teil 1: Siebverfahren für kleine Partikel“</i>	ASI, 2011m
<b>ÖNORM EN 15415-2 2012 05 15</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung – Teil 2: Manuelles Verfahren zur Bestimmung der größten projizierten Länge für große Partikel“</i>	ASI, 2012a
<b>ÖNORM EN 15415-3 2012 05 15</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung – Teil 3: Bildanalysenverfahren für große Partikel“</i>	ASI, 2012b
<b>ÖNORM EN 15440 2011 12 15</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung des Gehaltes an Biomasse“</i>	ASI, 2011n
<b>ÖNORM EN 15442 2011 05 01</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Probenahme“</i>	ASI, 2011o
<b>ÖNORM EN 15443 2011 05 15</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Herstellung von Laboratoriumsproben“</i>	ASI, 2011p
<b>ÖNORM EN 15590 2011 10 15</b>	<i>„Feste Sekundärbrennstoffe – Bestimmung des aktuellen Grades der aeroben mikrobiellen Aktivität mittels des realen dynamischen Respirationsindex“</i>	ASI, 2011q



## 4 ERSATZBRENNSTOFFE (EBS) – „Ist-Stand“ und Perspektiven

Im gegenständlichen Kapitel werden der Ist-Stand und die Perspektiven der Ersatzbrennstoffproduktion und -verwertung dargestellt. Bei der EBS-Verwertung werden zwei Aspekte betrachtet, einerseits die Verwertung in den (Mit-)Verbrennungsanlagen mit der Wirbelschichttechnologie und andererseits die Verwertung in der Zementindustrie.

### 4.1 Ausgangslage und Perspektiven

Wie bereits erklärt, werden in der gegenständlichen Arbeit Ersatzbrennstoffe behandelt, die aus Siedlungsabfällen (d.h. Haushalts-, Industrie- und Gewerbeabfällen) hergestellt werden und die die Anforderungen des EBS-Marktes erfüllen (vgl. Tabelle 3 und Abbildung 5). Die grundlegende Anforderung für eine Verwertung von EBS in österreichischen (Mit-)Verbrennungsanlagen liegt im rechtlichen Rahmen, d.h. der EBS muss vor der Verwertung die rechtlich festgelegten Qualitätskriterien (vgl. Tabelle 3) erfüllen.

Die nachfolgenden zwei Fachbeiträge von Pomberger & Sarc (2012) und Sarc et al. (2013) geben einen umfangreichen Überblick über den Stand der Technik und den Perspektiven bei der Herstellung und Verwertung von Ersatzbrennstoffen, nicht nur in Österreich, sondern auch im Ausland.

Neben Zahlen, Daten und Fakten werden vor allem die Anforderungen und Entwicklungen von EBS unter der Berücksichtigung von rechtlichen, material-, produktions-, markt- und wirtschaftsspezifischen Aspekten betrachtet und dargestellt. Diese Aspekte werden aus zwei „Extremfall-Perspektiven“ betrachtet, einerseits aus der Sicht von Regionen mit niedriger und andererseits mit hoher abfallwirtschaftlicher Entwicklung. Während in abfallwirtschaftlich niedrig entwickelten Ländern der Abfall den Weg des geringsten Geldes und somit des niedrigsten technischen Aufwandes geht (d.h. noch immer rd. 80 Mio. Tonnen (unvorbehandelte) Siedlungsabfälle in der EU auf nicht dem Stand der Technik entsprechenden Deponien landen (Kleppmann, 2013)), stellt andererseits in abfallwirtschaftlich hoch entwickelten Ländern wie Österreich und Deutschland der Einsatz von EBS in der Zementindustrie bereits den Stand der Technik (EC, 2010) dar.

Abschließend werden in den Beiträgen klare Herausforderungen aufgezeigt aber auch Perspektiven gegeben. Die Herausforderungen, mit denen der internationale Markt in den nächsten Jahren weiterhin konfrontiert sein wird, sind z.B. die Finanzierung und darüber hinaus die Entwicklung der Abfallwirtschaft, damit geeignete Abfallströme überhaupt verfügbar gemacht werden können. Diese Abfallströme können in weiterer Folge zu EBS verarbeitet werden. Des Weiteren muss die gesellschaftliche Akzeptanz, dass Abfälle (Anmerkung: EBS sind per Definition weiterhin „Abfälle“, vgl. Kapitel 3.1.2) in der

Zementindustrie mitverbrannt werden, erreicht werden. Dazu ist anzumerken, dass inzwischen nicht nur die aufbereiteten und für die Verwertung geeigneten EBS sondern sogar unaufbereitete Abfälle in Ländern wie Österreich bereits ein „knappes Gut“ geworden sind, da die durch Überkapazitäten bei den „Konkurrenzanlagen“ (d.h. Recyclingbetriebe und Müllverbrennungsanlagen (Kleppmann, 2013)) verursachte Nachfrage immer noch größer ist, als das derzeitige Angebot. Wie im Beitrag Sarc, et al. (2013) erklärt wird, werden in Regionen mit hoher Substitutionsrate in der Zementindustrie Themen wie z.B. 100%-ige Substitutionsrate, Trocknung von Abfällen bzw. EBS, Chlorproblematik in EBS sowie neue EBS aus Landfill Mining usw. die marktspezifischen und technischen Entwicklungen der nächsten Jahre stark beeinflussen.

### Veröffentlichung 1:

## **Die Zukunft von Ersatzbrennstoffen (Solid Recovered Fuels – SRF)**

### **[The Future of Solid Recovered Fuels (SRF)]**

Pomberger, R. & **Sarc, R.** (2012) The future of solid recovered fuels (SRF). In: Rohstoffe sind Zukunft / Raw Materials are the Future; Band 2 Eumicon - European Mineral Resources Conference 2012, Montanuniversitaet Leoben, Austria. ISBN: 978-3-901074-35-6. S. 387-408.

### Kommentar zu den eigenen Leistungen bei der Veröffentlichung 1:

Für die Veröffentlichung 1 wurde das Konzept mit dem Erstautor besprochen und der Beitrag gemeinsam geschrieben. Zuerst wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt und anschließend die wichtigsten Aspekte und Erkenntnisse zum Thema Ersatzbrennstoffe zusammengeführt. Die Veröffentlichung 1 gibt einen umfangreichen Überblick über die EBS Herstellung, Verwertung und Potentiale zur Weiterentwicklung und stellt damit einen wichtigen Ausgangspunkt für die nachfolgenden Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Ersatzbrennstoffe dar.

Der interne „Review-Prozess“ wurde von Prof. Karl E. Lorber und Prof. Roland Pomberger durchgeführt.

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 1**

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 2**

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 3**

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 4**

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 5**

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 6**



**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 7**

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 8**

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 9**

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 10**

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 11**

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 12**

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 13**

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 14**



**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 15**

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 16**

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 17**

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 18**

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 19**

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 20**

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 21**

**Veröffentlichung 1: Pomberger & Sarc, 2012; S. 22**



**Veröffentlichung 2:****Perspektiven der Verwertung von Ersatzbrennstoffen in  
Zementwerken****[The Prospects for Recovery of Solid Recovered Fuels in Cement Industry]**

**Sarc, R., Pomberger, R. & Lorber, K.E.** (2013) Perspektive der Verwertung von Ersatzbrennstoffen in Zementwerken. In: Thomé-Kozmiensky, K. & Verstejl, A.; Strategie, Planung, Umweltrecht., Band 7, Berlin, Germany. S. 139-162.

**Kommentar zu den eigenen Leistungen bei der Veröffentlichung 2:**

Für die Veröffentlichung 2 wurde vom Erstautor das Konzept erstellt und der Beitrag geschrieben. Zuerst wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt und anschließend die wichtigsten Aspekte und Erkenntnisse zum Thema Ersatzbrennstoffe aus zwei Sichtweisen (d.h. einerseits die Anforderungen aus Sicht von Regionen mit niedriger Substitutionsrate in der Zementindustrie und andererseits die Anforderungen aus Sicht von Regionen mit hoher Substitutionsrate in der Zementindustrie) zusammengeführt. Des Weiteren muss hier erwähnt werden, dass im Beitrag zum ersten Mal auch ein konkretes Projekt zur Erreichung einer 100%-igen thermischen Substitutionsrate (d.h. eines der Ziele der gegenständlichen Arbeit, vgl. Kapitel 2.3) kurz vorgestellt wird. Die Ergebnisse aus dem angesprochenen Forschungsprojekt werden in Kapitel 6 der gegenständlichen Arbeit präsentiert. Neben der Veröffentlichung 1 (Pomberger & Sarc, 2012) stellt die Veröffentlichung 2 einen weiteren Meilenstein der Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Ersatzbrennstoffe dar.

Abschließend wird angemerkt, dass der interne „Review-Prozess“ von Prof. Karl E. Lorber und Prof. Roland Pomberger durchgeführt wurde.

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 1**

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 2**

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 3**

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 4**

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 5**

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 6**

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 7**



**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 8**

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 9**

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 10**

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 11**

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 12**

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 13**

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 14**

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 15**



**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 16**

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 17**

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 18**

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 19**

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 20**

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 21**

**Veröffentlichung 2: Sarc et al., 2013; S. 22**

## 4.2 EBS Herstellung

Einleitend wird erwähnt, dass die Thematik der EBS Herstellung bereits aus Sicht beider Aspekte, d.h. sowohl aus der des Einsatzmaterials (d.h. Siedlungsabfälle; Definition ist in Kapitel 1.1 gegeben) als auch aus der der eingesetzten Technologien in unterschiedlichen Veröffentlichungen (Lorber et al., 2010; 2011; 2012; Pomberger & Sarc, 2012; Sarc et al., 2013; 2014a; 2014b) behandelt und diskutiert worden ist und dass hier nur die zusammenfassenden Informationen dargestellt werden.

Wie Pomberger (2008), Sarc & Lorber (2013) sowie FA19D (2008) berichten, werden Siedlungsabfälle in unterschiedlichen Anlagentypen und auf Basis verschiedener Anlagenkonzepte mit unterschiedlichen Zielsetzungen behandelt. Wenn nur das Einsatzmaterial und seine Eigenschaften betrachtet werden, dann muss erwähnt werden, dass Siedlungsabfälle aus Haushalten (z.B. Restmüll) und Siedlungsabfälle aus Gewerbebetrieben voneinander abweichende Eigenschaften aufweisen und aus diesem Grund deren Sammlung und vor allem Behandlung getrennt erfolgen soll, was aber in der Praxis nicht immer umsetzbar ist. Die durchschnittliche aktuelle Zusammensetzung des österreichischen Restmülls ist im Bundesabfallwirtschaftsplan 2011 (BMLFUW, 2011; 2014) sowie Sarc & Lorber (2013) und Sarc et al. (2013; 2014b) beschrieben. Aus Sicht der Abfallbehandlung kommen in Österreich unterschiedliche Anlagentypen und -konzepte in der Praxis zum Einsatz, wobei das grundlegende Konzept von Nelles (1998) dargestellt wurde (vgl. Abbildung 6).

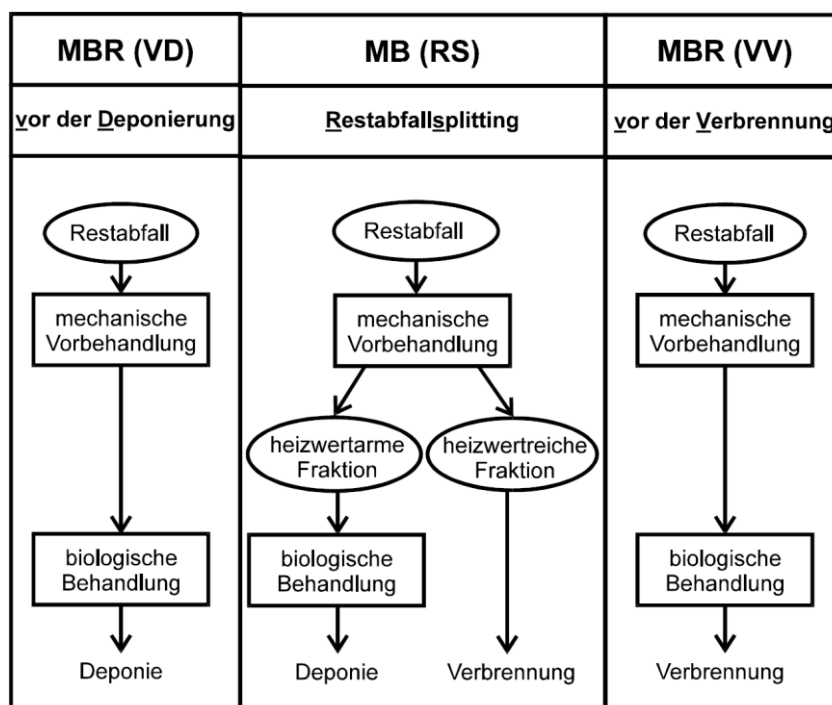


Abbildung 6: Schematische Darstellung der grundlegenden MBA-konzepte (MBR (VD) – Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung (vor der Deponierung); MB (RS) –



Mechanische Behandlung (Restabfallsplitting); MBR (VV) – Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung (vor der Verbrennung) (Nelles, 1998)

Anzumerken ist, wie im Kapitel 2.1 ausführlich beschrieben, dass nach derzeit gültigen rechtlichen Anforderungen das Konzept MBR (VD) in Österreich nicht mehr zulässig ist, weil im Zuge der Deponieverordnung 2008 (BMLFUW, 2008a) ein Ablagerungsverbot eingeführt wurde, das für Rückstände aus der MBA mit einem Brennwert  $> 6.600 \text{ kJ/kg}_{\text{TM}}$  gilt. Somit gibt es grundsätzlich zwei verfahrenstechnische Konzepte in der Praxis, die die derzeit (2015) gültigen rechtlichen Anforderungen erfüllen (vgl. Abbildung 7):

1. MB (RS) bzw. Endrotteverfahren:  
Mechanisch-Biologische Abfallbehandlung (MBA-Verfahren, aerob/anaerob),
2. MBA vor der Verbrennung bzw. Trockenstabilisierung:
  - a. Mechanisch-Biologische Stabilisierung (MBS-Verfahren),
  - b. Mechanisch-Physikalische Stabilisierung (MPS-Verfahren). (Nelles et al., 2012)

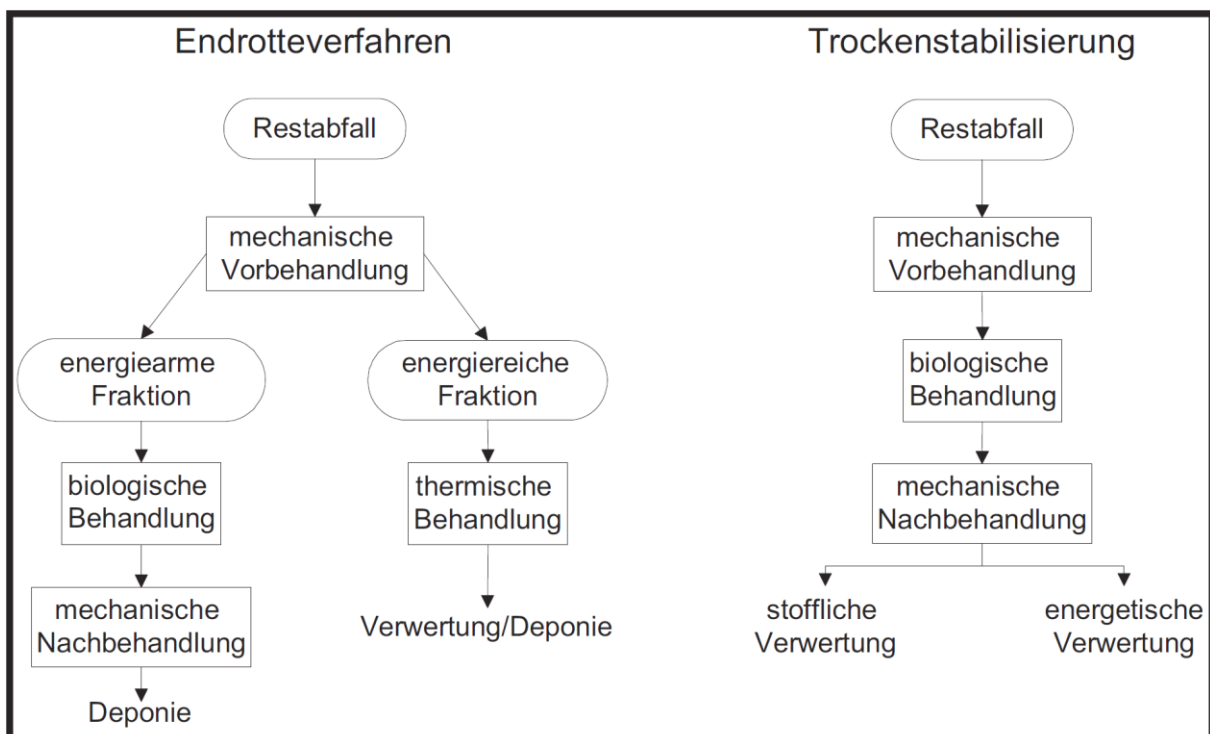


Abbildung 7: Vereinfachte Darstellung der grundlegenden MBA-Konzepte, die die derzeit gültigen rechtlichen Anforderungen (BMLFUW, 2008a) erfüllen (Nelles et al., 2012)

Des Weiteren berichtet Pomberger (2008), dass es in Österreich eine weitgehende Differenzierung zwischen mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen (MBA) und Splittinganlagen (RS-Anlagen) gibt und dass die MBAs überwiegend Siedlungsabfälle aus kommunalem Bereich behandeln während Splittinganlagen die Siedlungsabfälle aus

Gewerbebetrieben trennen. Nach der Behandlung wird in allen Anlagentypen und -konzepten eine brennbare Fraktion (entweder nur eine heizwertreiche Fraktion (d.h. Siebüberlauf oder hochkalorische Leichtfraktion) oder sogar schon ein fertiger EBS – d.h. mittelkalorischer EBS (EBS LOW Quality und/oder EBS MEDIUM Quality) und/oder hochkalorischer EBS (EBS PREMIUM Quality)) hergestellt. Es wird angemerkt, dass die heizwertreiche Fraktion nicht mit EBS identisch ist, da die heizwertreiche Fraktion eigentlich (nur) das Ausgangsmaterial für die EBS Herstellung darstellt. Die heizwertreiche Fraktion wird in Bezug auf die Qualität und den Anforderungen des Marktes von Pomberger (2008) sogar als ein „Zwischenprodukt“ bezeichnet (vgl. Abbildung 8).

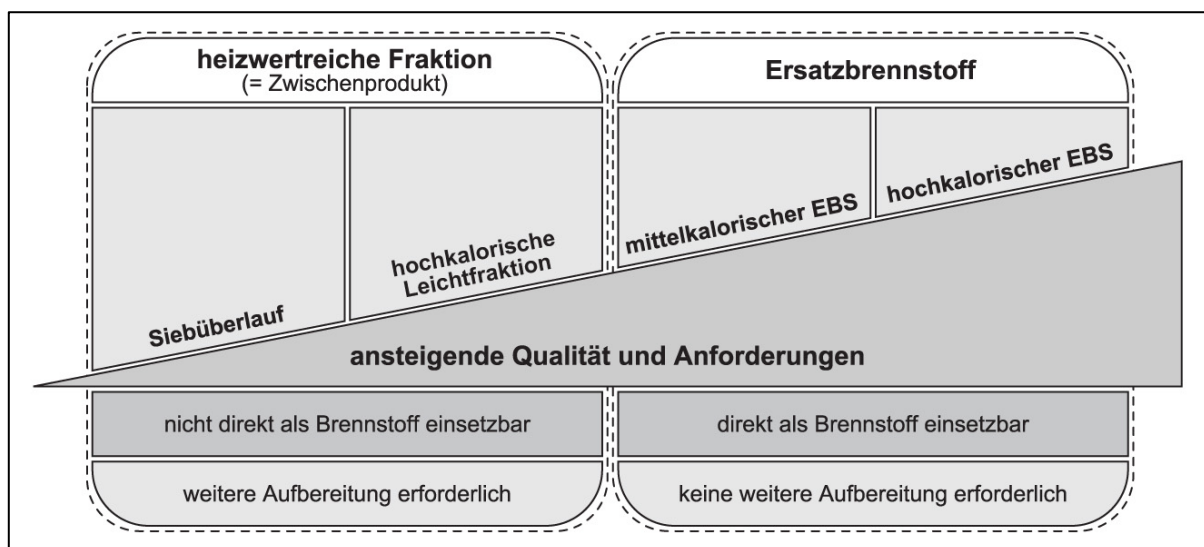


Abbildung 8: Zusammenhang und Abgrenzung der heizwertreichen Fraktion vom Ersatzbrennstoff in Bezug auf Qualität und Anforderungen (Pomberger, 2008)

Wie aus Abbildung 8 ersichtlich, können unter Berücksichtigung der Aufbereitungstiefe in einer mechanischen bzw. mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlage folgende EBS Arten gewonnen werden:

1. Mittelkalorischer EBS für den Einsatz in Verbrennungs- oder Mitverbrennungsanlagen (z.B. Wirbelschichttechnologie), vgl. Kapitel 6.1,
2. Mittelkalorischer EBS für den Einsatz in Anlagen zur Zementerzeugung (d.h. Drehrohfen-Technologie), vgl. Kapitel 6.2,
3. Hochkalorischer EBS für den Einsatz in Anlagen zur Zementerzeugung (d.h. Drehrohfen-Technologie), vgl. Kapitel 6.3 und 6.4.

Wie Sarc & Lorber (2013) berichten, ist allgemein zu erwarten und anzunehmen, dass die Qualität der produzierten EBS vorwiegend von zwei Faktoren abhängig ist:

1. Herkunft und Art der Abfälle, die in die Aufbereitung gelangen,
2. Umfang und Tiefe der mechanischen Aufbereitung.

Die Ergebnisse aus umfangreichen Untersuchungen von Sarc & Lorber (2013) zeigen aber deutlich, dass die Qualität von produzierten EBS in der Praxis im Wesentlichen von Herkunft und Art der Abfälle, die in die Aufbereitung gelangen, abhängt und erst in zweiter Linie von der eingesetzten Aufbereitungstechnologie bestimmt wird. Basierend auf dieser Tatsache, kann festgehalten werden, dass hochkalorischer EBS viel einfacher aus „sauberen“ und getrennt gesammelten Abfällen bzw. Rückständen aus dem Recyclingprozess gewonnen werden kann als aus gemischten Siedlungsabfällen. Die Eigenschaften von produzierten Ersatzbrennstoffen werden ausführlich von Beckmann & Horeni (2002), Beckmann et al. (2007; 2012) und Sarc et al. (2014b) beschrieben.

Die verfahrenstechnischen Konzepte von Abfallbehandlungsanlagen mit dem Ziel der EBS Herstellung (vgl. Abbildung 6 und Abbildung 7) werden nachfolgend noch detaillierter dargestellt, damit die Unterschiede in der Zielsetzung der Anlagen aber auch in den nachgeschalteten Verwertungswegen verdeutlicht werden. Der Stand der Technik der österreichischen Abfallbehandlungsanlagen (sowohl MBAs als auch Splittinganlagen) wird im Bericht des UBA (2006; 2008) ausführlich behandelt.

Einleitend werden hier die aufbereitungstechnischen Grundverfahren, die bei der mechanischen Aufbereitung und Produktion von EBS zum Einsatz kommen, dargestellt (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5: Grundverfahren in Anlagen zur EBS Herstellung (Pomberger, 2008)

<b>Zerkleinerung</b>	- reißende, schlagende und schneidende Zerkleinerer - langsam und schnelllaufende Zerkleinerer
<b>Sortierung</b>	- Metallsortierung (Magnetscheidung, Wirbelstromscheidung) - Sichtung (Windsichtung) - Ballistische Verfahren (Ballistikseparator, NIR Trenngeräte)
<b>Klassierung</b>	- Siebung (Kreisschwingsiebe, Trommelsiebe)
<b>Konditionierung</b>	- Pressen (z.B. Ballenpressen), Pelletieren
<b>Homogenisierung</b>	- Lagerboxen

Ausgehend von den o.a. aufbereitungstechnischen Grundverfahren werden von Pomberger (2008), Sarc & Lorber (2013), Sarc et al. (2014a; 2014b) und von Deditz et al. (2014) einige verfahrenstechnischen Konzepte vorgestellt und beschrieben, wobei Deditz et al. (2014) zusätzlich drei konkrete Anlagenprojekte in Deutschland, Estland und Österreich vergleichend beschreibt, die sich hinsichtlich der „Destination“ d.h. des Verwertungsweges der brennbaren Output-fraktion unterscheiden, und zwar:

### 1. **Aufbereitungsanlage (MB bzw. MBA) für Siedlungsabfälle aus Haushalten ohne Aufbereitung des Siebüberlaufs:**

Pomberger (2008) berichtet, dass es sich dabei um keine EBS Produktionsanlage handelt, weil lediglich nur die einfachsten Aufbereitungsschritte (d.h. Zerkleinerung und Siebung) zum Einsatz kommen, die in Bezug auf die Korngröße und den Störstoffgehalt keine definierte Fraktion herstellen können, damit diese als Brennstoff ohne zusätzliche Aufbereitung eingesetzt werden kann, d.h. der Siebüberlauf muss in einer nachgeschalteten spezialisierten EBS Produktionsanlage weiter aufbereitet werden.

### 2. **Aufbereitungsanlage (MB bzw. MBA) für Siedlungsabfälle aus Haushalten mit Nachaufbereitung des Siebüberlaufs:**

Hier wird von Pomberger (2008) angeführt, dass durch die Nachaufbereitung ein mittelkalorischer EBS für Verbrennungs- oder Mitverbrennungsanlagen (z.B. Wirbelschichttechnologie) hergestellt wird. Deditz et al. (2014) berichten über ein entsprechendes Anlagenkonzept in Deutschland. Sarc & Lorber (2013) verweisen auf ein Beispiel in Österreich (vgl. Kapitel 6.1). Pomberger (2008) beschreibt auch die Möglichkeit, dass mit der (zusätzlich) eingesetzten Windsichtung vom Siebüberlauf ein kleiner Anteil an hochkalorischer Leichtfraktion gewonnen werden kann, der zur weiteren Verarbeitung in die EBS Produktionsanlage gelangt.

### 3. **Aufbereitungsanlage (MA) für Siedlungsabfälle aus Gewerbebetrieben:**

Pomberger (2008) beschreibt, dass diese Anlagen mittelkalorischen EBS für die Verbrennungs- oder Mitverbrennungsanlage (z.B. Wirbelschichttechnologie) und gegebenenfalls eine hochkalorische Leichtfraktion als Rohstoff für die nachgeschaltete EBS Produktionsanlage herstellen.

### 4. **Kombinierte Aufbereitungs- (MA) und EBS Produktionsanlagen für Siedlungsabfälle aus Haushalten und Gewerbebetrieben:**

Sarc & Lorber (2013) und Sarc et al. (2014b) beschreiben komplexe Abfallaufbereitungsanlagen, die Siedlungsabfälle sowohl aus Haushalten als auch aus Gewerbebetrieben verarbeiten und dabei mehrere verschiedene Output-Fractionen gewinnen. Neben der Feinfraktion, die entweder in die biologische Stufe der MBA gelangt (vgl. Abbildung 3) oder an die Müllverbrennungsanlage weitergegeben wird, werden alle drei EBS-Qualitäten hergestellt, und zwar:

- a) **EBS LOW Quality** - für den Einsatz in Verbrennungs- oder Mitverbrennungsanlagen (z.B. Wirbelschichttechnologie), vgl. Kapitel 6.1,
- b) **EBS MEDIUM Quality** - für den Einsatz in Anlagen zur Zementerzeugung (d.h. Drehrohrofen-Technologie), vgl. Kapitel 6.2,

- c) **EBS PREMIUM Quality** - für den Einsatz in Anlagen zur Zementerzeugung (d.h. Drehrohfen-Technologie), vgl. Kapitel 6.2 und 6.3.

#### 5. EBS Produktionsanlagen

Pomberger (2008) berichtet, dass diese Anlagen das Ziel der Konditionierung von bereits vorher aufbereiteten Abfällen (z.B. Siebüberlauf oder hochkalorische Leichtfraktion) verfolgen und dazu hochkalorische Ersatzbrennstoffe definierter Qualität (d.h. definierter Heizwert und Korngröße) herstellen. Dabei können zwei Anlagentypen unterschieden werden:

- a) Anlagen mit einfacher Linienführung und
- b) Anlagen mit doppelter Linienführung.

Deditz et al. (2014) berichten über zwei konkrete Anlagen, eine in Estland und eine in Österreich. Sarc et al. (2014a) beschreiben ebenfalls eine konkrete Anlage in Österreich, die eine Kapazität von rd. 100.000 t/a aufweist.

Abschließend muss festgehalten werden, dass die o.a. Konzepte zeigen, wie einerseits komplex, andererseits systematisch gut vernetzt die Abfallwirtschaft ist. Wie bereits erwähnt, muss in erster Linie der zu verarbeitende Abfall umfangreich untersucht und charakterisiert werden, da er den wichtigsten Einfluss auf die Qualität der Output-Fractionen hat. Danach müssen die Verwertungsmöglichkeiten für die Output-Fractionen aus unterschiedlichen Konzepten für Aufbereitungsanlagen gefunden werden und erst dann kann gezielt ein verfahrenstechnisches Konzept (z.B. wie o.a. – 1.-5.) für die EBS Herstellung erstellt werden.

### 4.3 EBS Verwertung in (Mit-)Verbrennungsanlagen durch Wirbelschichttechnologie

Einleitend wird erwähnt, dass die praktisch-wissenschaftliche Untersuchung der EBS-Qualität und seine Verwertung in einer (Mit-)Verbrennungsanlage mit Wirbelschichttechnologie im Kapitel 6.1 beschrieben wird.

Die Verbrennungs- oder Mitverbrennungsanlagen verwenden zur thermischen Behandlung der vorbehandelten (d.h. auf bestimmte Korngröße zerkleinerten) Abfälle u.a. die Wirbelschichttechnologie. In Österreich sind sieben (Mit-)Verbrennungsanlagen mit einer Wirbelschicht ausgestattet, die auch aufbereitete EBS einsetzen und eine Gesamtkapazität von 0,86 Mio. t/a im Betrieb (vgl. Abbildung 9) aufweisen. (Schmidt, 2014) In Sarc & Lorber (2013) wird beispielhaft eine österreichische Wirbelschichtverbrennungsanlage im Detail untersucht und die umfangreichen Versuchsergebnisse diskutiert.

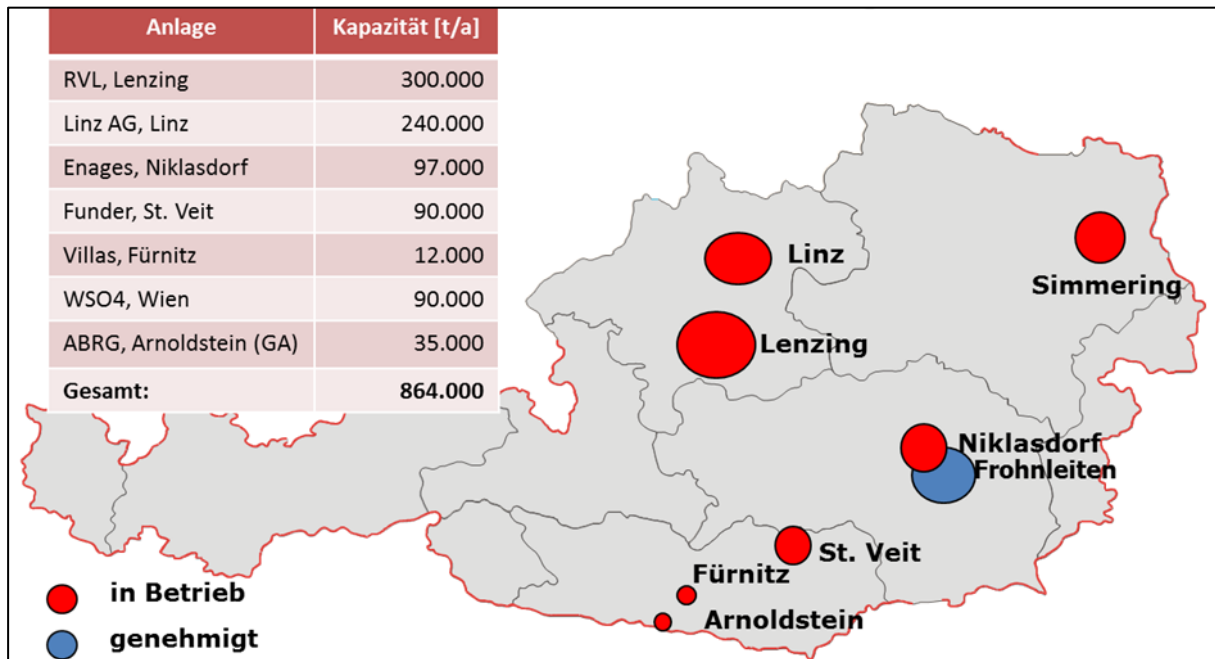


Abbildung 9: (Mit-)Verbrennungsanlagen mit Wirbelschichttechnologie und mit EBS Einsatz in Österreich (Anmerkung: (GA) steht für gefährliche Abfälle) (Sarc et al., 2014c; Schmidt, 2014)

Wie Thomé-Kozmiensky (2013) berichtet, wurde diese Technologie durch Fritz Winkler zum ersten Mal im Jahr 1921 für die Kohlevergasung eingesetzt. Obwohl diese Technologie in vielen Bereichen wie z.B. der Trocknung von Klärschlamm, Vergasung, Pyrolyse und Verbrennung von Abfällen, Biomasse, Rückstände aus der Papierindustrie etc. sowie auch in der Abgasreinigung Anwendung findet, wird sie am häufigsten für die Verbrennung von aufbereiteten Abfällen eingesetzt. Unter Berücksichtigung der zu verbrennenden Materialien und ihren Eigenschaften, wird zwischen drei Bauarten unterschieden (Thomé-Kozmiensky, 2013):

1. Stationäre,
2. Zirkulierende und
3. Rotierende Wirbelschicht.

Ein wesentliches Kriterium bei der Behandlung in Wirbelschichtanlagen ist die Korngröße des Materials, die verbrennungstechnisch begrenzt ist. Aufgrund dieser Anforderung muss so gut wie immer eine vorgeschaltete Aufbereitung installiert werden. Des Weiteren gibt Thomé-Kozmiensky (2013) folgende Definition für eine Wirbelschicht: *„Wirbelschicht ist der Zustand, in dem sich Feststoffpartikel befinden, wenn sie in einem Reaktor durch ein von unten nach oben strömendes fluides Medium von ihrem Festbett aufgewirbelt werden. In Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit stellt sich eine lebhafte Bewegung und Durchmischung der Feststoffpartikel ein. Der Übergang vom Festbett zum Wirbelbett, das*

sich wie ein Fluid verhält, wird als Wirbelpunkt bezeichnet. Das Wirbelbett ist die technische Voraussetzung für Wirbelschichtverfahren.“ Die verfahrenstechnische Beschreibung wird in Abbildung 10 gegeben. Die Rückstände aus der Verbrennung sind Bettasche und/oder Flugstaub und Filterasche.

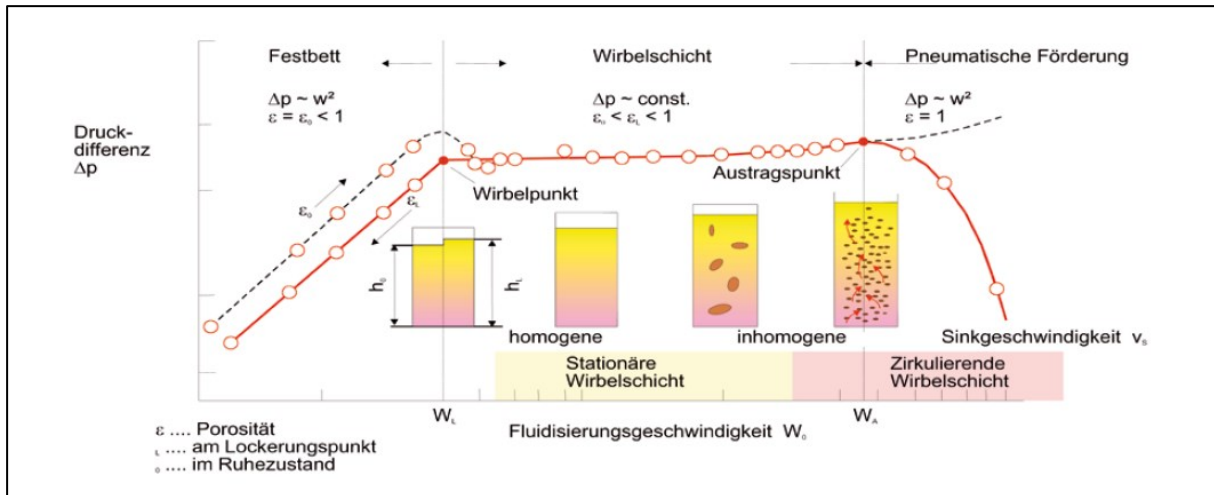


Abbildung 10: Schichtverhältnisse bei der Wirbelschicht – ausgehend vom Festbett über die stationäre und zirkulierende Wirbelschicht bis zur pneumatischen Förderung – in Abhängigkeit von der Druckdifferenz (Thomé-Kozmiensky, 2013)

Wie bereits in Sarc & Lorber (2013) zum Teil festgestellt, berichtet auch Thomé-Kozmiensky (2013), dass Qualität und Quantität des Outputs von Qualität und Quantität des Abfallinputs, von der Bauart des Reaktors und von den in der Anlage eingestellten Betriebsbedingungen bestimmt werden. Die wichtigsten stofflichen Eigenschaften von Abfällen und Inertstoffen sind (Thomé-Kozmiensky, 2013):

- Korngröße,
- Kornform (z.B. 2D, 3D),
- Rohdichte,
- Chemische Zusammensetzung und
- Heizwert.

Dass Siebüberlauf oder EBS LOW Quality keine hochwertige Qualität aufweisen und mit den Regelbrennstoffen wie z.B. Steinkohle nicht vergleichbar sind, zeigt auch nachfolgende Abbildung 11. Während auf der X-Achse die Herausforderungen (von „vielfältige Herausforderung“ bis hin zum „Standard“) und die Brennstoffklasse dargestellt werden, wird auf der Y-Achse der Heizwert der Brennstoffe berücksichtigt. Daraus ist eindeutig ersichtlich, dass die (Mit-)Verbrennung von Abfällen niedriger Qualität mit vielfältigen technischen Herausforderungen verbunden ist.

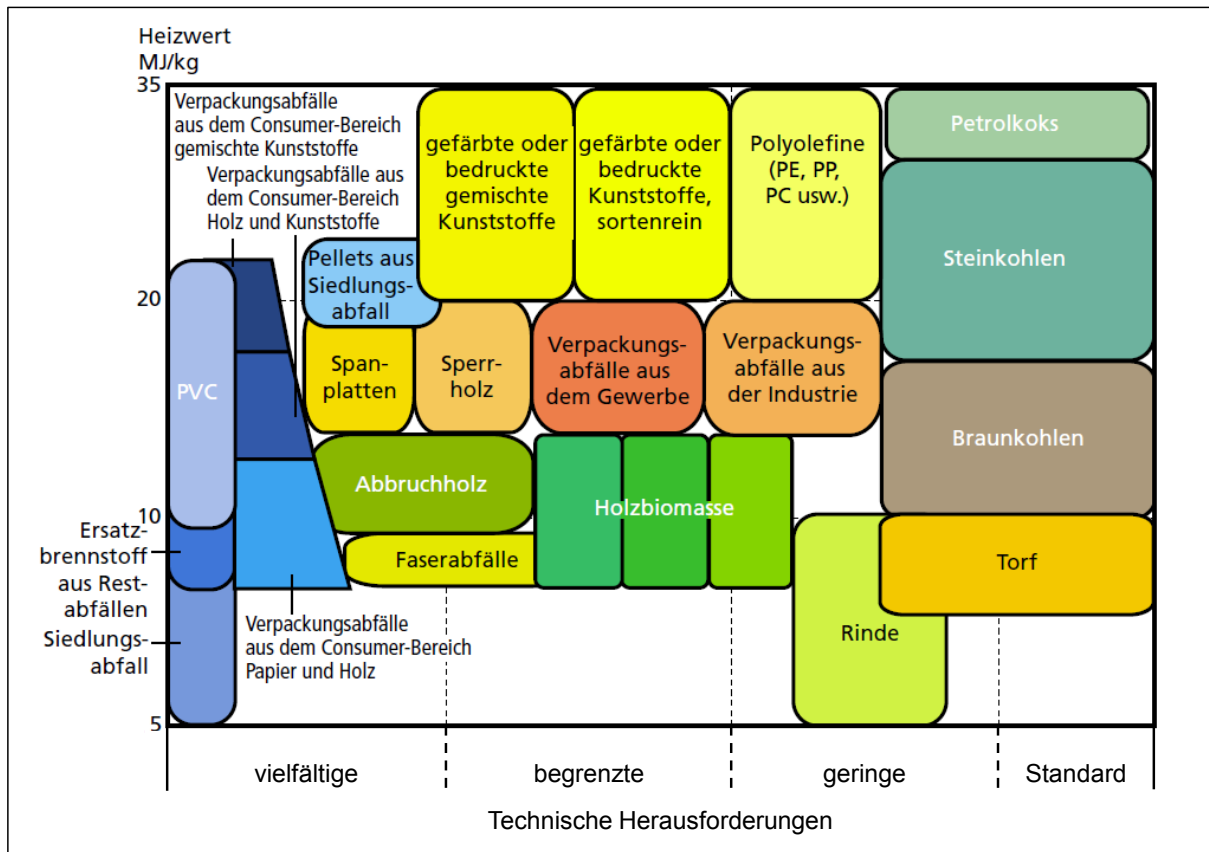


Abbildung 11: Zusammenhang zwischen verwendeten Brennstoffen und technischen Herausforderungen in der Wirbelschichttechnik (leicht modifiziert aus Hämäläinen, 2004; Winter & Szentannai, 2009; Thomé-Kozmiensky, 2013)

#### 4.4 EBS Verwertung in der Zementindustrie (Drehrohrofen-Technologie)

Einleitend wird erwähnt, dass diese Thematik, d.h. die energetische Verwertung von qualitätsgesicherten EBS in der Zementindustrie, den wichtigsten Schwerpunkt der gegenständlichen Dissertationsarbeit darstellt. Eine umfangreiche Beschreibung dazu ist u.a. im wissenschaftlichen „Review“ Beitrag von Sarc et al. (2014b) enthalten.

Die energetische Verwertung von Abfällen in der Zementindustrie gehört – wie bereits festgestellt – in Europa zum „Stand der Technik“. (EC, 2010) Der Einsatz von EBS in der österreichischen Zementindustrie, die (statistischen) Grenzwerte für EBS, die Umsetzung der Qualitätssicherung sowie die Emissionen aus dem Zementofen werden in der Abfallverbrennungsverordnung (BMLFUW, 2002) geregelt, vgl. Kapitel 3.1.2.

Nachfolgend werden zwei Bereiche betrachtet, nämlich die EBS für die Zementindustrie und die verfahrenstechnische Möglichkeiten der EBS-Verwertung im Klinkerherstellungsprozess.



#### 4.4.1 Ersatzbrennstoffe für die Zementindustrie:

Durch den Einsatz von EBS in der Zementindustrie wird die chemisch gespeicherte Energie für die Produktion von Klinker genutzt. In der österreichischen Zementindustrie wurden im Jahr 2013 unterschiedliche Brennstoffarten verwendet:

- Konventionelle (primäre) Energieträger: Steinkohle, Braunkohle, Heizöl (unterschiedliche Qualitäten), Erdgas, Petrolkoks usw.,
- Ersatzbrennstoffe: Altreifen, Altöl, Lösungsmittel, landwirtschaftliche Rückstände, Papierfaserstoffe, Kunststoffabfälle, Tiermehl usw.

Anzumerken ist, dass unter „Kunststoffabfälle“ EBS bezeichnet werden, die aus aufbereiteten (gemischten) Siedlungsabfällen aus Haushalten, Industrie und Gewerbe, sowie Rückständen aus den Sortier- und Recyclingprozessen (Kunststoffe, Papier, Glas) usw. hergestellt werden. Im Jahr 2013 wurden mengen- und energiemäßig 277.909 t/a bzw. 5.325.577 GJ/a „Kunststoffabfälle“ als EBS in der österreichischen Zementindustrie eingesetzt. Ihr Gewichtsanteil beim Gesamtersatzbrennstoffinput betrug 2013 rd. 57%, ihr Energieanteil rd. 62%, vgl. Abbildung 12.

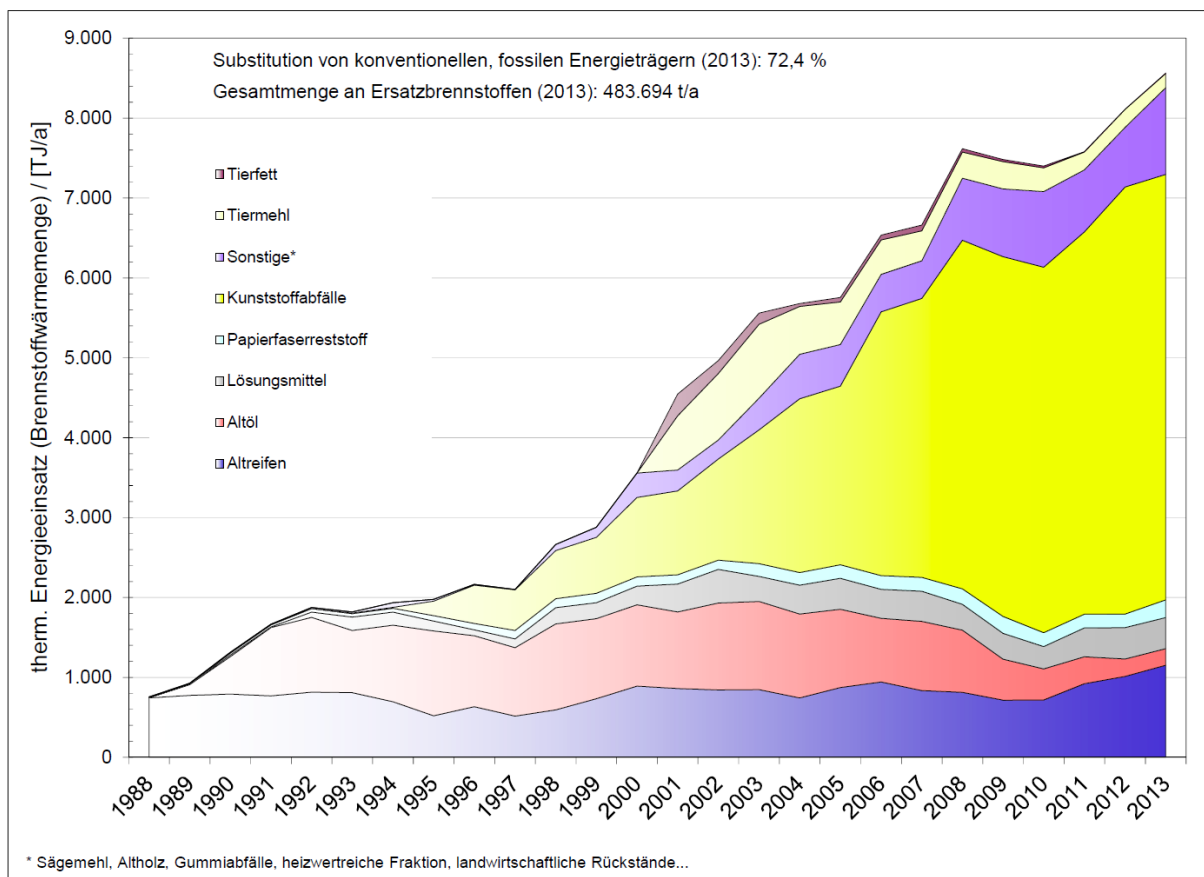


Abbildung 12: Brennstoffwärmemengen aus der Verfeuerung von EBS in Anlagen der österreichischen Zementindustrie (Mauschitz, 2014)

Während die thermische Substitutionsrate von konventionellen Energieträgern in der österreichischen Zementindustrie im Jahr 2008 noch bei rd. 51% lag, betrug diese schon im Jahr 2013 rd. 72%, vgl. Abbildung 13. (Mauschitz, 2014)

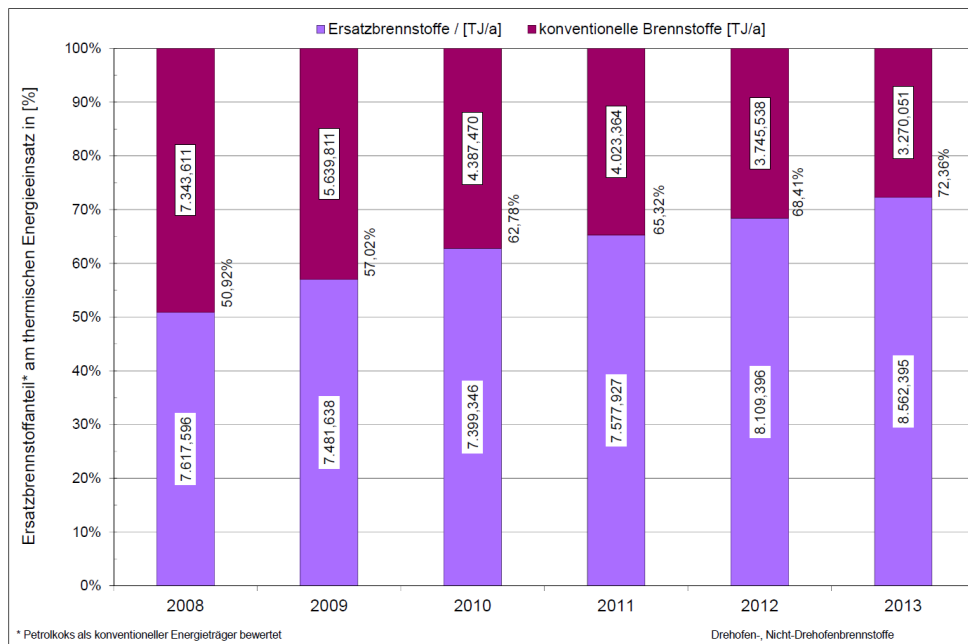


Abbildung 13: Thermische Substitutionsrate von konventionellen Energieträgern in der österreichischen Zementindustrie (Zeitraum: 2008 – 2013) (Mauschitz, 2014)

#### 4.4.2 Verfahrenstechnische Möglichkeiten der EBS-Verwertung im Klinkerherstellungsprozess:

Grundsätzlich gesehen, kann der Einsatz von Energieträgern über die Primärfeuerung oder über die Sekundärfeuerung des Drehrohrs erfolgen, vgl. Abbildung 14. Anzumerken ist, dass für die Feuerungsmöglichkeiten bzw. die Brennstoff-Aufgabestellen im Klinkerherstellungsprozess unterschiedliche Anforderungen an die festen Energieträger gestellt werden. Während in der Primärfeuerung feinkörniger ( $d_{95} < 30$  (35) mm und überwiegend 2-dimensional (2D)) und energiereicher ( $H_u > 18$  MJ/kg<sub>OS</sub>) EBS (d.h. EBS PREMIUM Quality) verwendet werden muss, kann in der Sekundärfeuerung ein größerer ( $d_{95} = 80 - 120$  (300) mm, 3-dimensional (3D) auch möglich) und weniger energiereicher ( $H_u < 18$  MJ/kg<sub>OS</sub>) EBS (d.h. EBS MEDIUM Quality) eingesetzt werden. Am Primärbrenner (d.h. Primärfeuerung) wird der EBS durch die Lanze in das Drehrohr eingebracht. Damit der Klinkerherstellungsvorgang im Drehrohr problemlos abläuft, wird in der Primärfeuerung thermische Energie in Verbindung mit hohen Temperaturen (Festbetttemperatur ca. 1.450°C und Abgastemperatur ca. 2.000 °C) benötigt. In der Sekundärfeuerung wird vor allem thermische Energie, aber nicht in Verbindung mit hoher Temperatur benötigt, deswegen liegen die Materialtemperatur im rotierenden Festbett bei rd. 1.000°C und die Abgastemperatur bei rd. 1.050 bis 1.150°C. (Sarc et al., 2014b)

Wie bereits im Kapitel 3.1.2 beschrieben, wird in der österreichischen Abfallverbrennungsverordnung (BMLFUW, 2002) festgelegt, dass die Verbrennungsabgase, die durch die Verbrennung von Abfällen entstehen, „...kontrolliert, gleichmäßig und selbst unter den ungünstigsten Bedingungen zwei Sekunden lang auf 850°C ... wenn gefährliche Abfälle ... mitverbrannt werden ... mindestens zwei Sekunden auf 1 100°C erhöht werden.“

In der Praxis kann diese Anforderung in der Zementanlage erfüllt werden. Die Verweilzeiten im Drehrohr betragen ca. 8 Sekunden bei über 1.200°C, vgl. Abbildung 15.

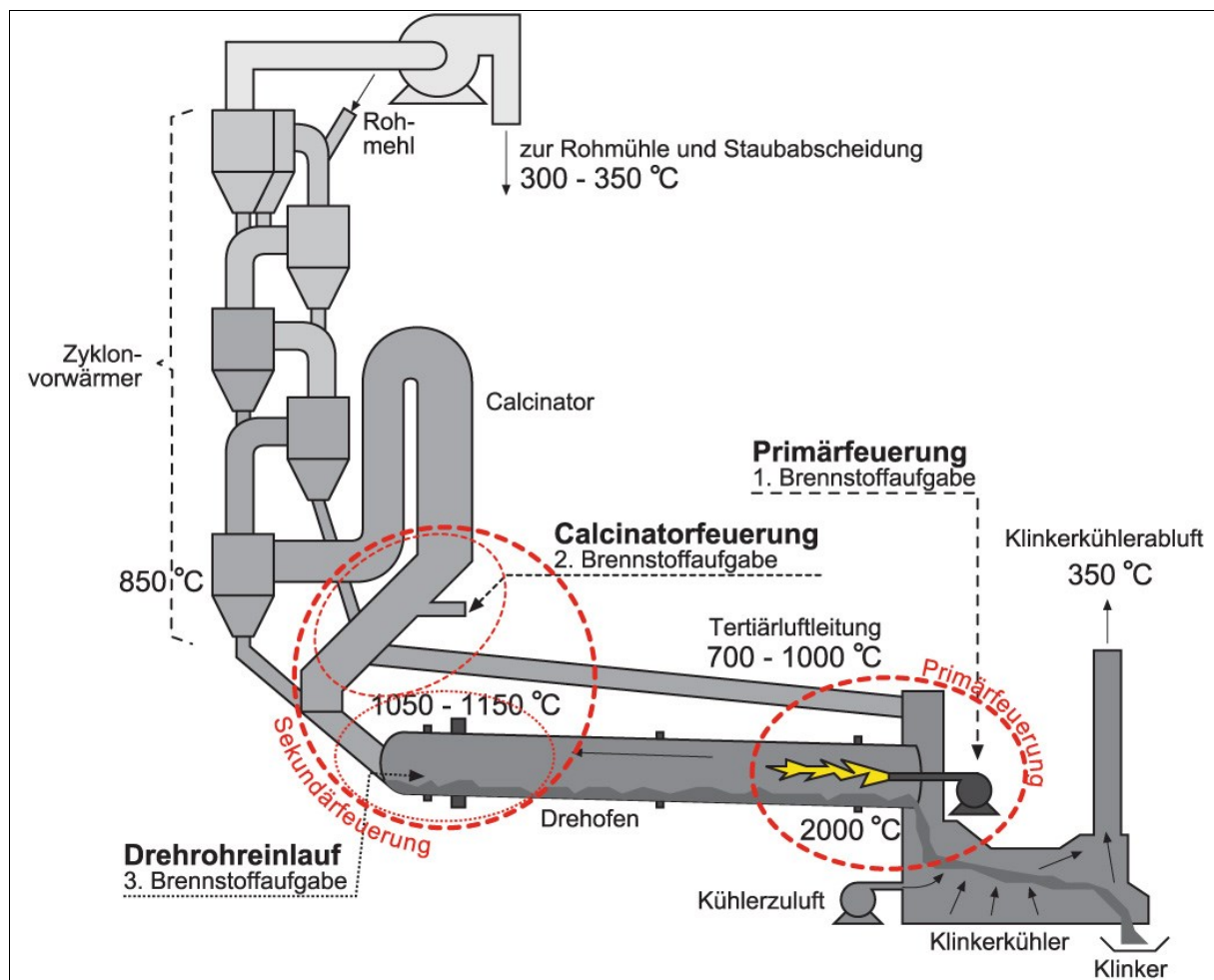


Abbildung 14: Feuerungsmöglichkeiten (d.h. Primär- und Sekundärfeuerung) im Klinkerherstellungsprozess (Pomberger, 2008)

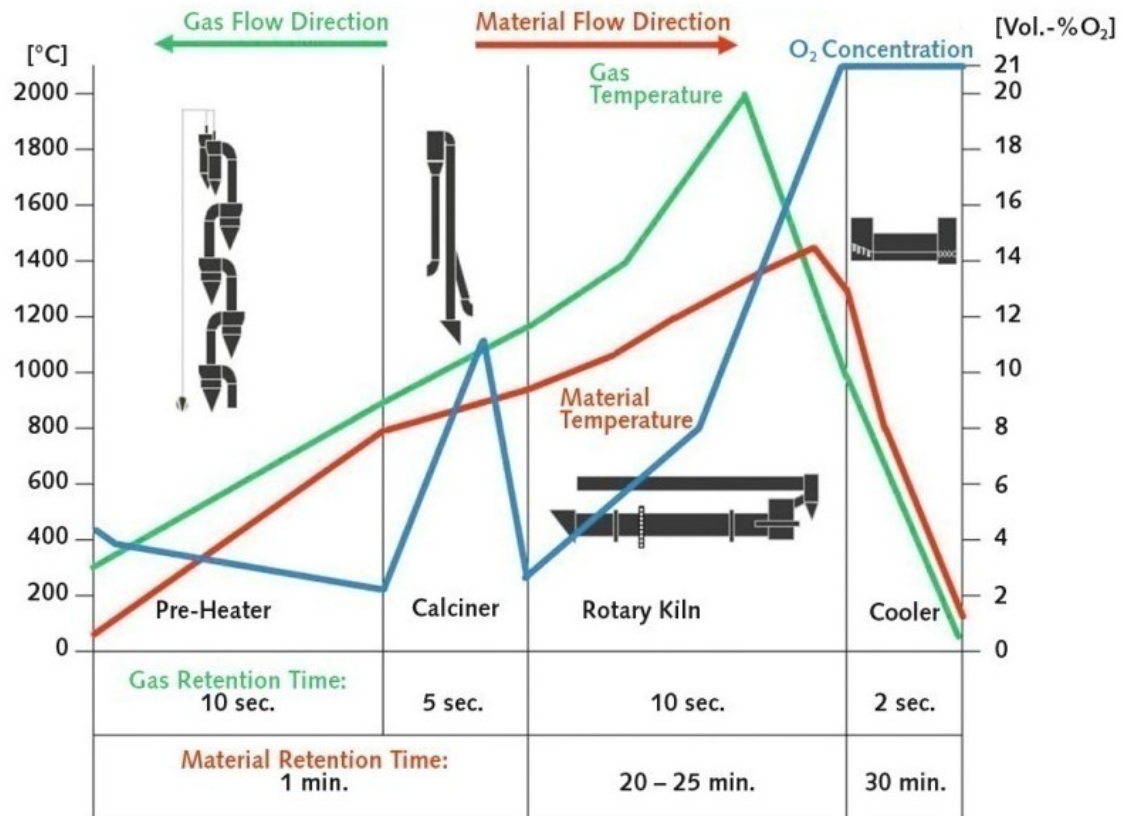


Abbildung 15: Verlauf von Temperatur [°C], Sauerstoffgehalt [Vol.-%O<sub>2</sub>], sowie Abgasverweilzeit (Sek.) und Materialverweilzeit (Min.) im Klinkerherstellungsprozess (Schürmann, 2014, leicht modifiziert)

Wie bereits erwähnt, waren in Österreich im Jahr 2013 acht Zementwerke im aktiven Produktionsbetrieb und ein Zementwerk (w&p Zement GmbH (Peggau)) wurde als Mahlwerk betrieben, vgl. Abbildung 16. (Mauschitz, 2014; Sarc et al., 2014b; 2014c)

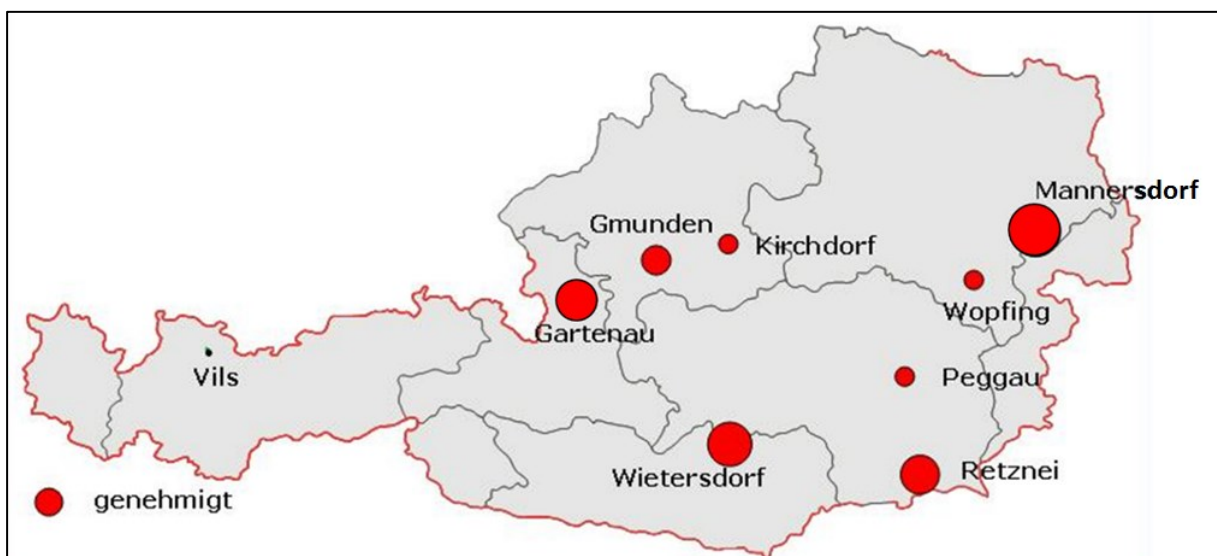


Abbildung 16: Zementwerke mit genehmigtem Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Österreich (Sarc et al., 2014c; Schmidt, 2014)

## 4.5 Zusammenfassende Darstellung der betrachteten EBS Qualitäten und deren Verwertungsmöglichkeiten

Der Einsatz von EBS unterschiedlicher Qualitäten in (Mit-)Verbrennungsanlagen und in der Zementindustrie (ZI) ist in der Praxis die häufigste Form der energetischen Verwertung von aufbereiteten Siedlungsabfällen. Wie bereits erwähnt, werden im Rahmen der gegenständlichen Arbeit drei EBS-Qualitäten und ihre Einsatzfelder betrachtet, und zwar:

- a) **EBS LOW Quality** - Einsatz in (Mit-)Verbrennungsanlagen (z.B. Wirbelschichttechnologie),
- b) **EBS MEDIUM Quality** - Einsatz in der Zementindustrie; in der Sekundärfeuerung und/oder in spezialisierten Vorbrennkammern, die „Hotdisc“ bezeichnet werden (nähere Beschreibung wird in Sarc et al., (2014b) gegeben),
- c) **EBS PREMIUM Quality** – Einsatz in der Zementindustrie; in der Primärfeuerung.

Nachfolgende Abbildung 17 gibt eine zusammenfassende Darstellung der betrachteten EBS-Qualitäten und deren Verwertungsmöglichkeiten. Die EBS-Qualität wird dabei mittels der Parameter Heizwert [ $\text{MJ}/\text{kg}_{\text{OS}}$ ] und Korngröße [ $\text{mm}$ ] vereinfacht beschrieben.

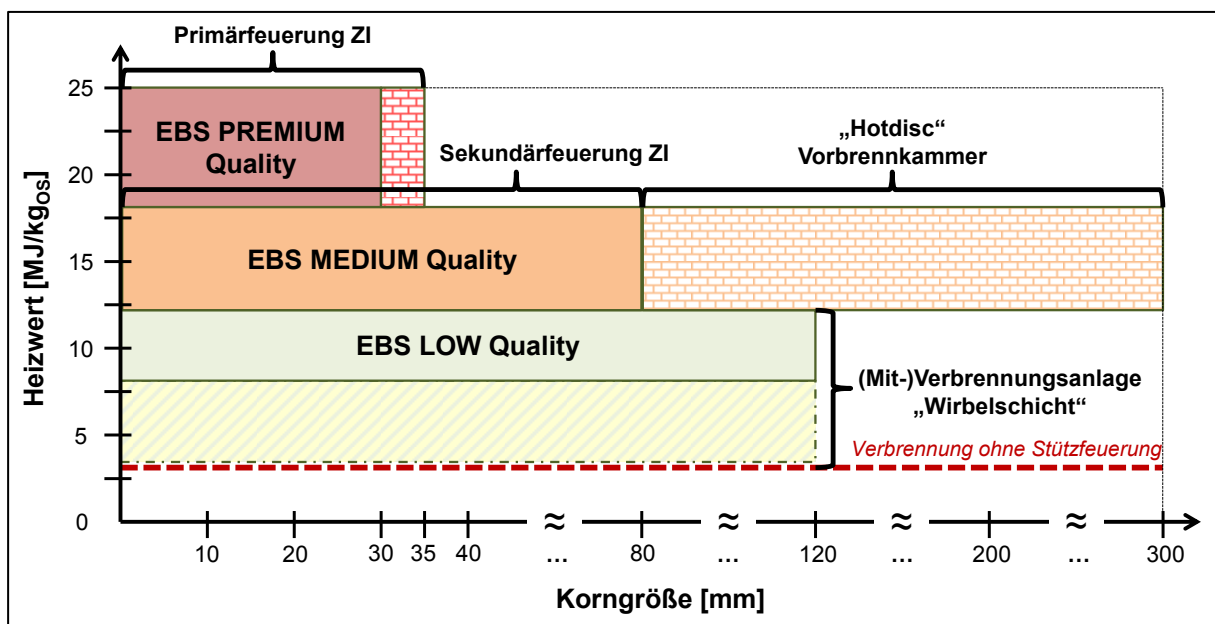


Abbildung 17: Zusammenfassende Darstellung der betrachteten EBS-Qualitäten (beschrieben durch den Heizwert [ $\text{MJ}/\text{kg}_{\text{OS}}$ ] und die Korngröße [ $\text{mm}$ ]) und deren Verwertungsmöglichkeiten (Lorber & Sarc, 2013; 2014; Sarc et al., 2014b; 2014c; Schmidt, 2014)

Wie aus Abbildung 17 ersichtlich, kann EBS PREMIUM Quality in Bezug auf seine Korngröße um maximal 5 mm variieren, d.h.  $d_{95} \leq 30 - 35 \text{ mm}$ , damit dieser noch immer in der Primärfeuerung des Drehrohrs akzeptiert wird. EBS MEDIUM Quality kann in der

Sekundärfeuerung (z.B. Kalzinator) der Zementanlage mit  $d_{95} \leq 80$  mm eingesetzt werden. Spezialisierte Systeme wie z.B. die „Hotdisc“ Vorbrennkammer sind flexibler, was die Korngröße des EBS in der Sekundärfeuerung angeht. Hier können sogar EBS mit  $d_{95} \leq 300$  mm übernommen werden. FLSmidth (2011) und Karrahe (2014) berichten, dass in der „Hotdisc“ Vorbrennkammer fester sperriger Abfall (z.B. Altreifen) mit einer Abmessung  $\varnothing$  1.200 x 500 mm verbrannt werden kann. Weitere Informationen zur „Hotdisc“ Vorbrennkammer sind in Lorber et al. (2010; 2011; 2012), Pomberger (2008) und Sarc et al. (2013; 2014b) enthalten. EBS LOW Quality muss mit seiner Korngröße bei  $d_{95} < 120$  mm liegen, um in der (Mit-)Verbrennungsanlage mit der Wirbelschichttechnologie verbrannt werden zu können. Im Gegensatz zur Primär- und Sekundärfeuerung in der Zementindustrie, wo der untere Heizwertbereich (d.h. 18 MJ/kg<sub>OS</sub> für Primärfeuerung bzw. 12 MJ/kg<sub>OS</sub> für Sekundärfeuerung) prozesstechnisch begrenzt ist, ist die Wirbelschicht in Bezug auf den Heizwert der verbrannten Abfälle wesentlich flexibler. Lorber & Sarc (2014) berichten, dass in (Mit-)Verbrennungsanlagen mit Wirbelschichttechnologie Abfälle mit einem Heizwert  $\geq 3$  MJ/kg<sub>OS</sub> noch selbstgänglich verbrannt werden können bzw. eine Verbrennung ohne Stützfeuerung möglich ist.

## 5 Qualitätssicherung von Ersatzbrennstoffen

Die Qualitätssicherung (QS) von Ersatzbrennstoffen in Österreich dient einerseits zur Einhaltung der rechtlichen Vorgaben gemäß AVV (BMLFUW, 2002) und andererseits zur Überprüfung der Konformität der zwischen EBS Hersteller und Verwerter vertraglich festgelegten Spezifikationen. Insbesondere zur Erfüllung der rechtlichen Vorgaben gibt es klare Richtlinien und Vorgaben gemäß AVV (BMLFUW, 2002), die eingehalten werden müssen. Des Weiteren muss erwähnt werden, dass die QS in Europa über die Normen des CEN/TC 343 – Feste Sekundärbrennstoffe (vgl. Kapitel 3.2) vereinheitlicht wird. Neben den Empfehlungen von CEN/TC bedient sich z.B. der deutsche EBS-Markt dem Qualitätssicherungs- und Klassifizierungssystem „RAL-GZ 724 für Sekundärbrennstoffe“ (BGS, 2015). Während in der ÖNORM EN 15359 (ASI, 2011c) nur die Parameter Heizwert, Chlorgehalt und Quecksilbergehalt für die Klassifizierung Verwendung finden, werden gemäß RAL GZ 724 (BGS, 2015) auch weitere Schwermetalle etc. berücksichtigt. Flamme & Geiping (2012) geben einen umfangreichen Überblick über die Klassifizierung und Anforderungen an die QS von Ersatzbrennstoffen. Beckmann et al. (2003) gehen sogar einen Schritt weiter und schlagen verschiedene Parameter vor, die chemische (d.h. Schwermetalle, Parameter der Elementaranalyse (C, H, N, O, S, Cl, F) usw.), mechanische (Schüttdichte und Korngrößenverteilung), kalorische (Heizwert usw.) und reaktionstechnische Eigenschaften (Zünd- und Ausbrandverhalten) von EBS umfangreich beschreiben. Am Beispiel der o.a. Aussagen und Informationen geht hervor, wie umfangreich und vielseitig das Thema Qualitätssicherung von EBS ist. Aus diesem Grund werden nachfolgend nur Angaben zur QS von EBS in Österreich gemacht.

Die Umsetzung der Qualitätssicherung in der österreichischen Praxis basiert im Wesentlichen auf fünf Schritten (Sarc et al. 2014a; 2014b):

1. **Siebanalysen:** Durchführung von Siebanalysen zur Bestimmung der Korngröße ( $d_{90}$  oder  $d_{95}$  in [mm]) und Schüttdichte ( $\lambda_s$  in [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]) gemäß ÖNORM EN 15415-1 (ASI, 2011m);

Dazu werden konkrete Ergebnisse aus Untersuchungen des EBS MEDIUM Quality (auch Hot Disc Fuel (HDF) bezeichnet in Lorber et al. (2012) – Veröffentlichung 3 und Sarc et al. (2014b) – Veröffentlichung 5) vorgestellt. Beim HDF handelt es sich um einen besonderen Ersatzbrennstoff aufgrund seines ungewöhnlich großen Korngrößenspektrums ( $d_{95} = 80 - 120 (300) \text{ mm}$ ). Damit dafür ein Probenahmekonzept (Schritt 2.) erstellt werden kann, musste für dieses Material erst die tatsächliche Korngröße gemäß Vorgaben der ÖNORM EN 15415-1 (ASI, 2011m) bestimmt werden. Es wurden insgesamt vier Siebanalysen am Standort Rohožnik durchgeführt, und zwar am 3.12.2011 sowie am 13.1., 3.2. und 30.4.2012, wobei

insgesamt rd. 250 kg HDF gesiebt wurde. Mittels Analysen konnte eine Korngröße ( $d_{95}$ ) für den untersuchten HDF von 191 mm bestimmt werden, vgl. Abbildung 18. Die Schüttdichte ( $\lambda_s$ ) vom HDF lag bei  $142 \text{ kg/m}^3$ . (Sarc & Aldrian, 2011; 2012)

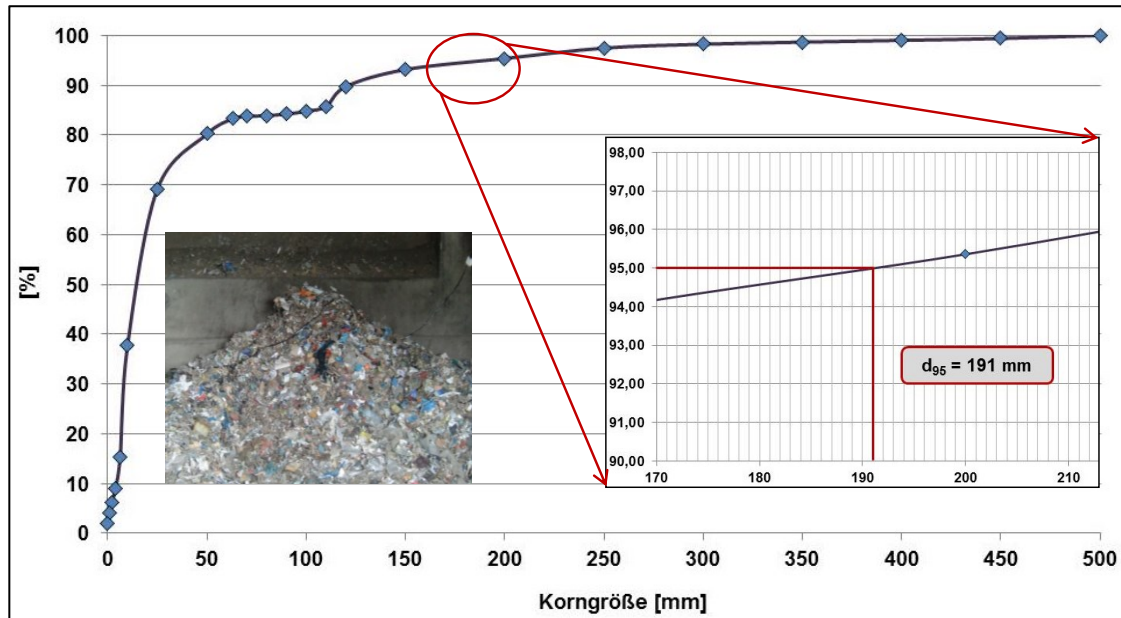


Abbildung 18: Ergebnisse aus Siebanalysen zur Bestimmung der Korngröße ( $d_{95}$ ) für den am Standort Zementwerk Rohožnik untersuchten HDF (Sarc & Aldrian, 2011; 2012, modifiziert)

**2. Probenahmekonzept und Probenahme:** Dieser Schritt beinhaltet die Erarbeitung eines repräsentativen Probenahmekonzeptes und die Umsetzung der Probenahme gemäß ÖNORM EN 15442 (ASI, 2011o).

Zum Probenahmekonzept bzw. Probenahmeplan muss angemerkt werden, dass gemäß AVV (BMLFUW, 2002) für jeden Abfall nach Herkunft und Art ein eigener Probenahmeplan zu erstellen ist. Die Probenahmenvorschriften werden dazu unter Berücksichtigung der zu einer Anlage zur Zementerzeugung angelieferten Abfallmenge nach zwei Gruppen differenziert angewendet (BMLFUW, 2002):

- a. *Probenahmenvorschriften für Abfallströme > 40.000 t/a,*
- b. *Probenahmenvorschriften für Abfälle, ausgenommen Abfallströme > 40.000 t/a (d.h. für Abfallströme  $\leq 40.000 \text{ t/a}$ ), vgl. Abbildung 19.*



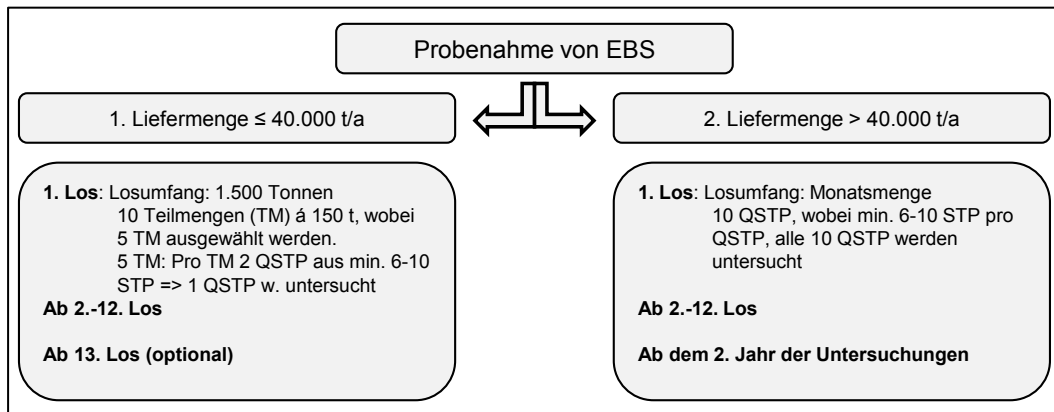


Abbildung 19: Zusammenfassende Darstellung der Probenahmenvorschriften gemäß AVV (BMLFUW, 2002, modifiziert)

Ein konkretes Probenahmekonzept für den angesprochenen HDF wird in Abbildung 20 gegeben.

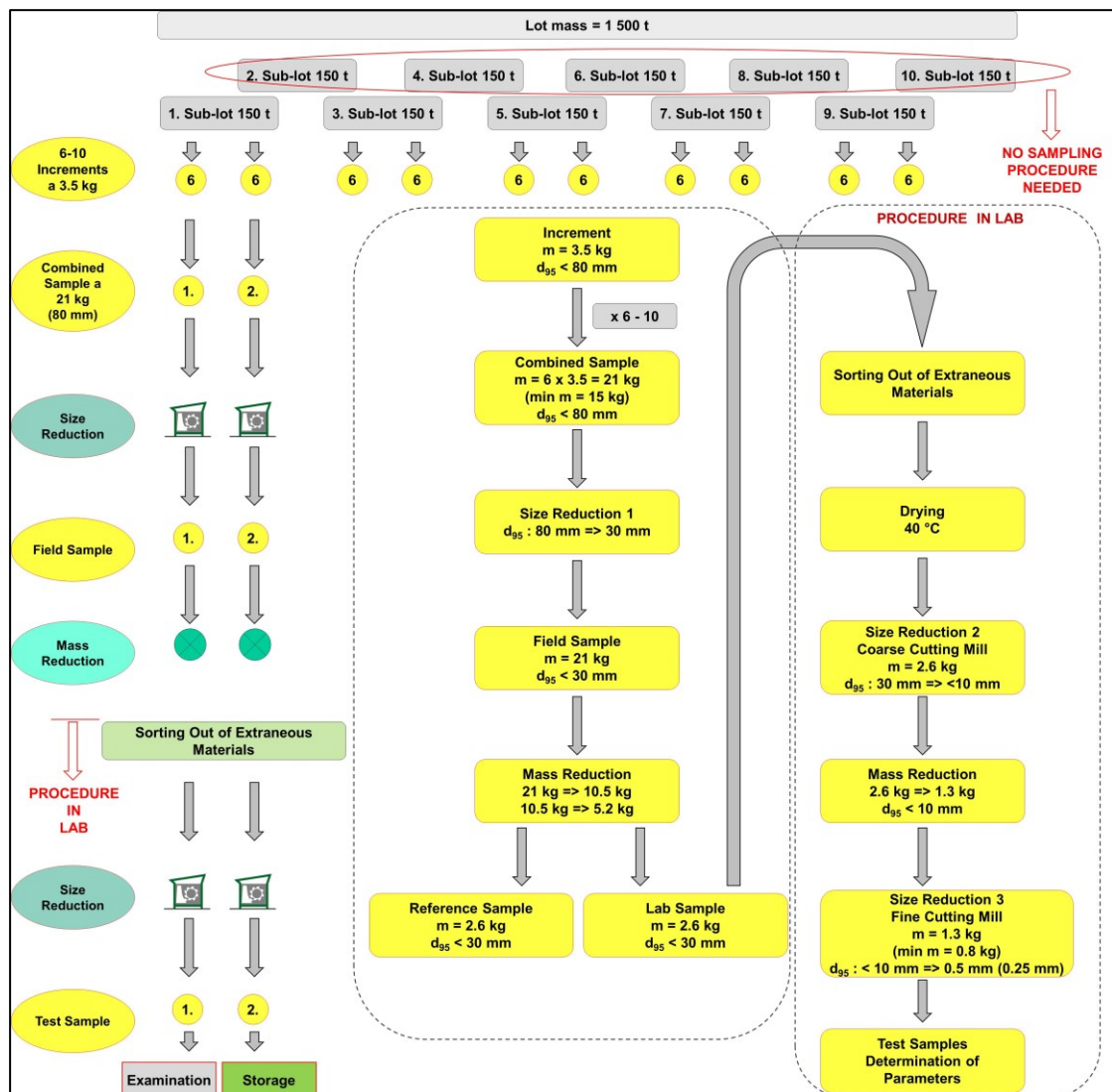


Abbildung 20: Probenahmekonzept für den untersuchten HDF (Bedingungen: Liefermenge ≤ 40.000 t/a, Untersuchung des ersten Loses.) (Lorber et al., 2012)

Die genaue Beschreibung beider Abfallstrom-abhängiger Gruppen und Vorgehensweisen wird in der u.a. Veröffentlichung 3 von Lorber et al. (2012) gegeben.

**3. Kontinuierliche interne Analysen:** Durchführung von internen Analysen zur Einhaltung der rechtlichen Vorgaben (vgl. Tabelle 3, statistische Grenzwerte der AVV 2002). In der Praxis werden dazu zwei Modelle angewendet:

a) QS durch den EBS-Lieferanten: die QS wird vom EBS-Hersteller oder -Lieferant umgesetzt,

b) QS durch den EBS-Verwerter: die QS wird vom EBS-Verwerter umgesetzt.

In beiden Fällen (d.h. sowohl a) als auch b)) kann die kontinuierliche Qualitätskontrolle auch durch einen Dritten, d.h. externe Einrichtung erfolgen.

Weitere Informationen dazu sind in der Veröffentlichung 3 von Lorber et al. (2012) enthalten.

**4. Externe Überwachung:** Erfolgt mindestens einmal jährlich durch eine Fachperson oder Fachanstalt:

Weitere Informationen zum Thema externe Überwachung werden in Veröffentlichung 3 von Lorber et al. (2012) und Veröffentlichung 5 von Sarc et al. (2014b) gegeben.

**5. Analytische Methoden und Bewertung sowie Vergleich der Labors:** Hier erfolgt die Überprüfung der Vorgehensweisen, Ergebnisse usw. gemäß verschiedener Normen (vgl. Tabelle 4).

Die nachfolgende Veröffentlichung 3 gibt einen Überblick über die Herstellung und Qualitätssicherung von Ersatzbrennstoffen, insbesondere EBS MEDIUM Quality (in der Veröffentlichung bezeichnet als Hot Disc Fuel (HDF)) und EBS PREMIUM Quality (in der Veröffentlichung bezeichnet als Primary Burner Fuel (PBF)). Es wird u.a. gezeigt, wie die beiden EBS-Arten aus Siedlungsabfällen (Haushalts-, Gewerbe- und Industrieabfälle) hergestellt werden können, welche aufbereitungstechnischen Aggregate zum Einsatz kommen und wie die Qualitätssicherung von EBS, die mittels LKWs (d.h. Walking Floor Lastkraftfahrzeuge) zu den Anlagen zur Zementerzeugung angeliefert werden, in der Praxis effizient umgesetzt werden kann. Dazu werden zwei konkrete Beispiele gemäß ÖNORM EN 15442 - *Anhang F: Bestimmung des Mindestumfangs einer Einzelprobe für die Probenahme aus ruhenden Partien oder aus Fahrzeugen* - (ASI, 2011o) durchgerechnet und dazugehörige Probenahmekonzepte vorgestellt:

1. Szenario 1: Qualitätssicherung von EBS PREMIUM Quality (PBF);  $d_{95} < 30$  mm, Abfallstrom  $> 40.000$  t/a (vgl. Abbildung 21),



Abbildung 21: Fotodokumentation von EBS PREMIUM Quality (PBF) (Sarc & Aldrian, 2011; 2012)

2. Szenario 2: Qualitätssicherung von EBS MEDIUM Quality (HDF);  $d_{95} < 80$  mm, Abfallstrom  $< 40.000$  t/a (vgl. Abbildung 22).



Abbildung 22: Fotodokumentation von EBS MEDIUM Quality (HDF) (Sarc & Aldrian, 2011; 2012)

Als eines der wichtigsten Ergebnisse wird festgehalten, dass die **Korngröße ( $d_{95}$ )** der heterogenen Abfallproben wahrscheinlich der wichtigste Parameter für die Umsetzung der repräsentativen Probenahme ist, weil diese einerseits die Menge der Stichprobe und der qualifizierten Stichprobe und andererseits die Komplexität der nachfolgenden Schritte (Probenzerkleinerung, -verjüngung usw.) maßgeblich beeinflusst.

**Veröffentlichung 3:****Design and quality assurance for solid recovered fuel**

Lorber, K.E., **Sarc, R.** & Aldrian, A. (2012) Design and quality assurance for solid recovered fuel. In: Waste Management & Research 30 (4). DOI: 10.1177/0734242X12440484. S. 370-380.

**Kommentar zu den eigenen Leistungen bei der Veröffentlichung 3:**

Die Veröffentlichung 3 basiert auf den eigenständigen praktischen Arbeiten und den dabei gewonnenen Erfahrungen in einem Zementwerk. Dazu wurden im Rahmen eines Projektes (Sarc & Aldrian, 2011; 2012) eine umfangreiche Literaturrecherche und die Vorbereitungsarbeiten im Zementwerk (Ortsaugenschein, Dokumentation der Vorgänge, Ausarbeitung des Konzeptes, Planung der Siebanalysen, usw.) vorgenommen. Des Weiteren wurden Siebanalysen vom HDF vor-Ort ausgeführt und die Berechnungen der benötigten Mengen für die Stichprobe und die qualifizierte Stichprobe durchgeführt. Anschließend wurde ein Probenahmekonzept für alle Abfälle (sowohl PBF als auch HDF) erstellt. Zusätzlich wurden Überlegungen zu einer automatisierten Probenverjüngungsanlage angestellt und ein Besuch in Deutschland organisiert. Der Beitrag wurde in Zusammenarbeit mit den angeführten Mitautoren gemeinsam geschrieben und nach einem strengen „Peer-Review“ - Prozess im Journal „Waste Management & Research“ veröffentlicht.

**Veröffentlichung 3: Lorber et al., 2012; S. 1**

**Veröffentlichung 3: Lorber et al., 2012; S. 2**

**Veröffentlichung 3: Lorber et al., 2012; S. 3**

**Veröffentlichung 3: Lorber et al., 2012; S. 4**



**Veröffentlichung 3: Lorber et al., 2012; S. 5**

**Veröffentlichung 3: Lorber et al., 2012; S. 6**

**Veröffentlichung 3: Lorber et al., 2012; S. 7**

**Veröffentlichung 3: Lorber et al., 2012; S. 8**

**Veröffentlichung 3: Lorber et al., 2012; S. 9**

**Veröffentlichung 3: Lorber et al., 2012; S. 10**

**Veröffentlichung 3: Lorber et al., 2012; S. 11**

## 6 Praktisch-wissenschaftliche Arbeit und experimentelle Ergebnisse

Im gegenständlichen Kapitel wird auf die experimentellen Ergebnisse und neuen Erkenntnisse aus der selbstständig durchgeführten praktisch-wissenschaftlichen Arbeit, d.h. auf die praktische Umsetzung der sowohl im Labormaßstab als auch an großtechnischen Anlagen durchgeführten Untersuchungen näher eingegangen. Die praktisch-wissenschaftlichen Arbeiten und die dabei erzielten Ergebnisse werden mittels vier Unterkapiteln beschrieben, und zwar:

1. **Unterkapitel 6.1:** „EBS LOW Quality“ – Herstellung und nachfolgende Verwertung in (Mit-)Verbrennungsanlagen durch Wirbelschichttechnologie:

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse aus Untersuchungen von EBS LOW Quality, der in der Wirbelschicht eingesetzt wird, vorgestellt. Die Vorgehensweise sowie die erzielten Ergebnisse werden im Fachbeitrag von Sarc & Lorber (2013) umfangreich beschrieben und diskutiert.

2. **Unterkapitel 6.2:** „EBS MEDIUM Quality“ und „EBS PREMIUM Quality“ – Herstellung und nachfolgende Verwertung in der Zementindustrie:

Dazu wird ein Fachbeitrag von Sarc et al. (2014b) vorgestellt, in dem die Herstellung, die Qualität, Qualitätssicherung und Verwertung von beiden angeführten EBS Arten eingehend untersucht worden ist. Des Weiteren wird die Qualität von EBS mit der Qualität eines konventionellen Energieträgers (d.h. Steinkohle) verglichen.

3. **Unterkapitel 6.3:** „EBS PREMIUM Quality“ – Praktisch-wissenschaftliche Untersuchungen an der Produktionsanlage der „ThermoTeam Alternativbrennstoffverwertungs GmbH“:

In diesem Unterkapitel werden ausgewählte Ergebnisse und neue Erkenntnisse aus den vielseitigen Untersuchungen in der EBS Produktionsanlage „ThermoTeam Alternativbrennstoffverwertungs GmbH“ (abgekürzt als ThermoTeam) erstmalig vorgestellt und diskutiert. Da es sich aus Firmensicht um sensible anlagen- und brennstoffspezifische Daten eines österreichischen Betriebes, der auf dem EBS-Markt eine wesentliche Rolle spielt, handelt, durften vor der Fertigstellung der Dissertation diese Daten nicht in Form einer internationalen Veröffentlichung publiziert werden.

4. **Unterkapitel 6.4:** 100% -ige Substitution von primären Energieträgern in der Zementindustrie:

Im vierten Unterkapitel werden die Ergebnisse aus umfassenden Untersuchungen zum Thema 100%-ige Substitution von primären Energieträgern in der



Zementindustrie erstmalig vorgestellt. Die Untersuchungen wurden im Zementwerk der „Lafarge Zementwerke GmbH“ am Standort Retznei durchgeführt. So wie zum dritten Unterkapitel angemerkt, durften auch hier die vertraulichen anlagen- und brennstoffspezifischen Daten vor dem Zeitpunkt der Fertigstellung der gegenständlichen Dissertation aus vertraglichen Gründen nicht in Form einer Veröffentlichung publiziert werden.

## 6.1 „EBS LOW Quality“ – Herstellung und nachfolgende Verwertung in (Mit-)Verbrennungsanlage durch Wirbelschichttechnologie

Sowohl die Herstellung als auch die Verwertung von EBS LOW Quality wurde im Zeitraum 2011 bis 2013 umfangreich untersucht und im Fachbeitrag Sarc & Lorber (2013), der nachfolgend angeführt ist, beschrieben.

Wie im Beitrag von Sarc & Lorber (2013) berichtet, erfolgt die Herstellung von EBS LOW Quality in einer kombinierten Aufbereitungs- (MA) und EBS Produktionsanlage für Siedlungsabfälle aus Haushalten und Gewerbebetrieben (vgl. Kapitel 4.2). Neben den Siedlungsabfällen werden auch Bau- und Abbruchabfälle (d.h. gemischte Bau- und Abbruchabfälle) eingesetzt, um EBS unterschiedlicher Qualitäten herzustellen. Im Originalbeitrag wird der untersuchte EBS als „Medium Quality“ bezeichnet. Dazu muss angemerkt werden, dass es sich nach der Einstufung gemäß Tabelle 1 eigentlich um „EBS LOW Quality“ handelt. Somit wird für die (Mit-)Verbrennung in der Wirbelschicht EBS LOW Quality „extern“ hergestellt. Die dabei erzielte durchschnittliche (d.h. Mittelwert aus Sortieranalysen A1, A2 und B) morphologische Zusammensetzung des EBS ist in nachfolgender Abbildung 23 dargestellt.

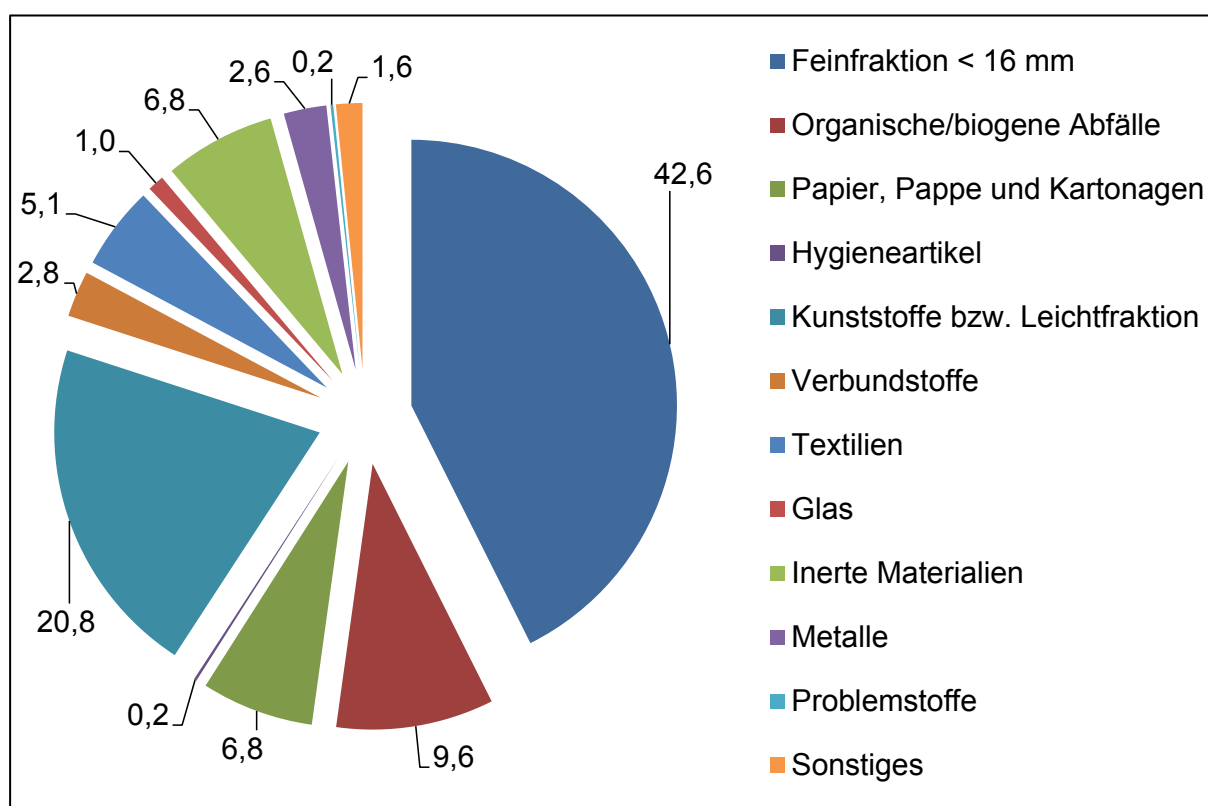


Abbildung 23: Durchschnittliche morphologische Zusammensetzung des extern aufbereiteten „EBS LOW Quality extern“ (modifiziert aus Sarc & Lorber (2013) – Table 3, Mittelwerte aus den Ergebnissen der Sortieranalysen A1, A2 und B)

Nachdem „extern“ aufbereiteter EBS LOW Quality zu der beschriebenen (Mit-)Verbrennungsanlage angeliefert wird, erfolgt dort noch eine zusätzliche „interne“ Aufbereitung, damit die Brennstoffeigenschaften (vor allem Korngröße ( $d_{95}$ ), Wasser- und Aschegehalt) an die speziellen Erfordernisse der Wirbelschichtanlage angepasst werden. Die interne Aufbereitungsanlage besteht im Wesentlichen aus einem Trommelsieb, einem Zerkleinerer und einem bis zwei Magnetabscheider. Die Qualität eines noch zusätzlich intern aufbereiteten EBS LOW Quality, der dann dem Verbrennungsprozess zugeführt wird, ist exemplarisch in Abbildung 24 dargestellt.

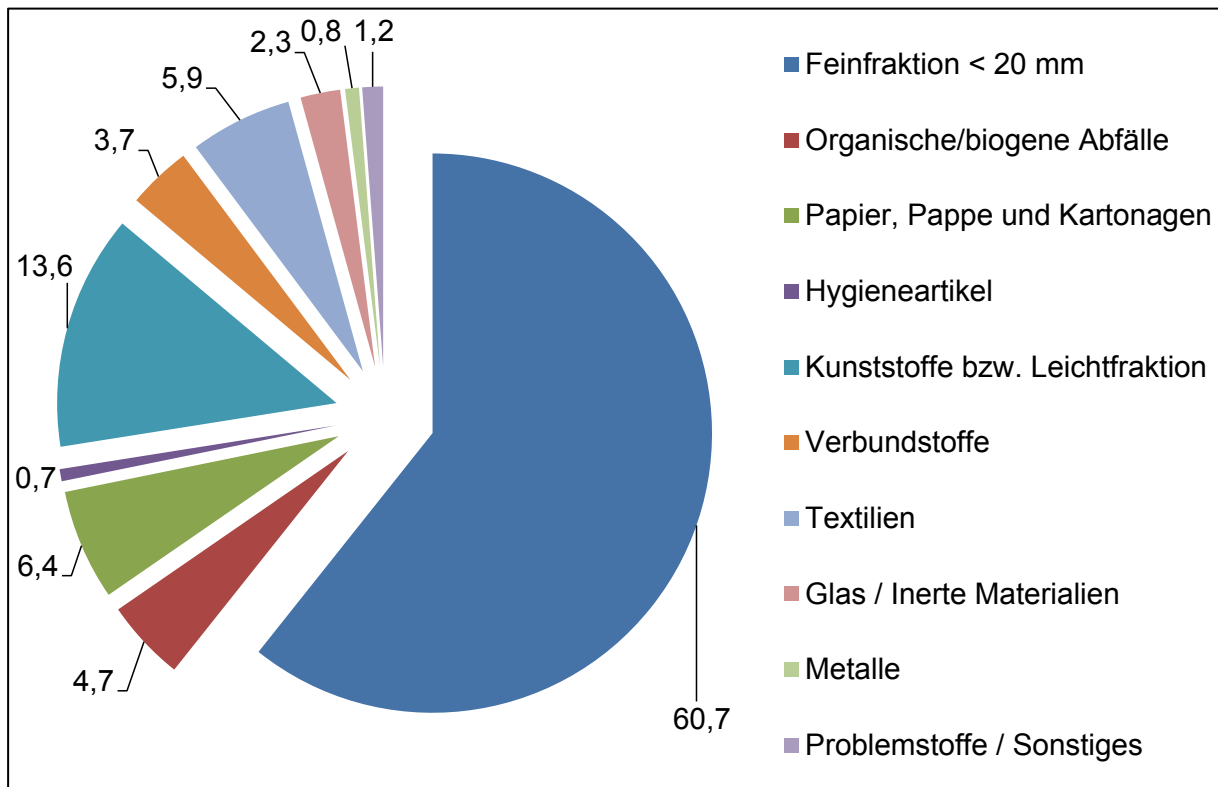


Abbildung 24: Durchschnittliche morphologische Zusammensetzung des „EBS LOW Quality intern“ nach der zusätzlichen internen Aufbereitung (modifiziert aus Sarc & Lorber (2013) – Table 5, Mittelwerte aus den Ergebnissen der Sortieranalysen)

Wie aus den beiden Abbildungen deutlich ersichtlich, liegt der wesentliche Unterschied zwischen (nur) extern aufbereitetem (siehe Abbildung 23) und extern und intern aufbereitetem EBS LOW Quality (siehe Abbildung 24) im Anteil der Feinfraktion, d.h. in der Korngrößenverteilung. Dies ist ein wesentlicher Punkt, da die Korngröße von eingesetzten Brennstoffen in der (Mit-)Verbrennungsanlage mit Wirbelschichttechnologie eine kritische Größe (vgl. Abbildung 17) darstellt. In Bezug auf die kalorischen Eigenschaften berichten Sarc & Lorber (2013), dass der Heizwert (nach der externen Aufbereitung: zwischen 6-15 MJ/kg<sub>OS</sub>) auf 9 MJ/kg<sub>OS</sub> homogenisiert wird.

Des Weiteren berichten Sarc & Lorber (2013), dass die Qualität der produzierten EBS in erster Linie von der Qualität der in einer Aufbereitungs- und EBS Produktionsanlage eingesetzten Inputabfälle abhängt und erst in zweiter Linie vom Aufbereitungsprozess. Die chemischen Eigenschaften von produziertem EBS werden überwiegend von der Abfallart und -qualität und die physikalischen vom Umfang und der Tiefe des Aufbereitungsprozesses beeinflusst.

#### **Veröffentlichung 4:**

### **Production, quality and quality assurance of Refuse Derived Fuels (RDFs)**

**Sarc, R. & Lorber, K.E.** (2013) Production, quality and quality assurance of Refuse Derived Fuels (RDFs). In: Waste Management 33 (2013). ISSN: 0956-053X. S. 1825-1834.

#### **Kommentar zu den eigenen Leistungen bei der Veröffentlichung 4:**

Die Veröffentlichung 4 basiert auf den sehr umfangreichen praktischen Arbeiten im Rahmen von Untersuchungen an einer (Mit-)Verbrennungsanlage und den daraus gewonnenen Ergebnissen. Dazu wurden vom Erstautor unterschiedliche Tätigkeiten wie z.B. Vorbereitungsarbeiten (d.h. Idee, Konzept, Planung und Organisation sowie vor-Ort Abstimmung), praktische Arbeitsschritte (d.h. Probenahme, Sieb- und Sortieranalysen, Aufnahme von Daten usw.) sowie theoretische Beiträge (Literaturrecherche und Auswertung der Daten) durchgeführt und erstellt. Die praktischen Untersuchungen (z.B. Sortieranalysen) vom angelieferten (d.h. extern aufbereiteten) EBS wurden im Anlieferungsbereich vor dem Bunker der (Mit-)Verbrennungsanlage durchgeführt. Mit dem Anlagenbetreiber wurden technische Spezifikationen der internen Aufbereitungsanlage und des Ofenaufgabeguts besprochen und aufgezeichnet. Des Weiteren wurden mehrere EBS Lieferanten kontaktiert und besichtigt, damit das technische Konzept der externen Aufbereitungs- und EBS Produktionsanlage dargestellt werden konnte. Die statistischen Auswertungen wurden selbstständig gestaltet und der Beitrag in Zusammenarbeit mit dem Ko-Autor geschrieben. Des Weiteren wurde der Beitrag einer kritischen Begutachtung im Rahmen des „Peer-Review“ - Prozesses von der unabhängigen Fachjury des wissenschaftlichen Journals „Waste Management“ unterzogen.

**Veröffentlichung 4: Sarc & Lorber, 2013; S. 1**

**Veröffentlichung 4: Sarc & Lorber, 2013; S. 2**

**Veröffentlichung 4: Sarc & Lorber, 2013; S. 3**

**Veröffentlichung 4: Sarc & Lorber, 2013; S. 4**



**Veröffentlichung 4: Sarc & Lorber, 2013; S. 5**

**Veröffentlichung 4: Sarc & Lorber, 2013; S. 6**

**Veröffentlichung 4: Sarc & Lorber, 2013; S. 7**

**Veröffentlichung 4: Sarc & Lorber, 2013; S. 8**

**Veröffentlichung 4: Sarc & Lorber, 2013; S. 9**

**Veröffentlichung 4: Sarc & Lorber, 2013; S. 10**

## 6.2 „EBS MEDIUM Quality“ und „EBS PREMIUM Quality“ – Herstellung und nachfolgende Verwertung in der Zementindustrie

Wie bereits im Kapitel 4.4 erwähnt, ist die energetische Verwertung von Abfällen in der Zementindustrie in Europa „Stand der Technik“ (EC, 2010). Die Herstellung und Verwertung von EBS MEDIUM Quality und EBS PREMIUM Quality in der Zementindustrie wird umfangreich im nachfolgenden „Review Article“ – „*Design, quality and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry*“ von Sarc et al. (2014b) beschrieben. In dieser Veröffentlichung wird EBS MEDIUM Quality als „*regular-grade coarse hot disc fuel (HDF)*“ und EBS PREMIUM Quality als „*premium-grade fine main burner fuel (MBF)*“ bezeichnet. EBS PREMIUM Quality wird über eine spezielle Lanze an der Primärfeuerung des Drehrohrausgangs eingebracht und EBS MEDIUM Quality über die spezielle Vorbrennkammer an der Sekundärfeuerung (FLSmidth, 2011) dem Klinkerherstellungsprozess zugeführt, vgl. Abbildung 14 und Abbildung 17. Des Weiteren berichten Sarc et al. (2014b) über die chemische Zusammensetzung der o.a. EBS Arten, die in verschiedenen österreichischen mechanischen Aufbereitungs- und EBS Produktionsanlagen hergestellt und im Holcim Zementwerk Rohožnik/Slowakei energetisch verwertet werden. Es wird ein Qualitätsvergleich (insbesondere was den Gehalt an Schwermetallen, die auch gemäß AVV 2002 (BMLFUW, 2002) begrenzt sind, vgl. Tabelle 3) mit dem üblichen konventionellen Energieträger (d.h. Steinkohle) durchgeführt. Dazu werden umfangreiche Untersuchungen (Zeitraum: November 2012 – April 2013) beschrieben, in denen nach Art und Herkunft unterschiedliche EBS (d.h. fünf EBS PREMIUM und sieben EBS MEDIUM Quality) aus insgesamt acht EBS Produktionsanlagen beprobt und in weiterer Folge hinsichtlich ihrer morphologischen (Sortieranalyse), physikalischen und chemischen Eigenschaften bzw. Zusammensetzung charakterisiert werden. Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse aus diesem Beitrag von Sarc et al. (2014b) zusammenfassend dargestellt.

### 6.2.1 Morphologische Zusammensetzung von „EBS MEDIUM Quality“ und „EBS PREMIUM Quality“

Die durchschnittliche morphologische Zusammensetzung von EBS MEDIUM Quality ist in Abbildung 25 und von EBS PREMIUM Quality in Abbildung 26 dargestellt. Wie aus den beiden Grafiken ersichtlich, liegt der Anteil an Kunststoffen bzw. an der Leichtfraktion bei ca. 28%. Des Weiteren ist ersichtlich, dass der Anteil an der Feinfraktion < 11,2 mm beim EBS PREMIUM Quality bei rd. 44% liegt, was für die Aufgabe wichtig ist, da in der Primärfeuerung die akzeptierbare Korngröße ( $d_{95}$ ) 30 (35) mm beträgt.

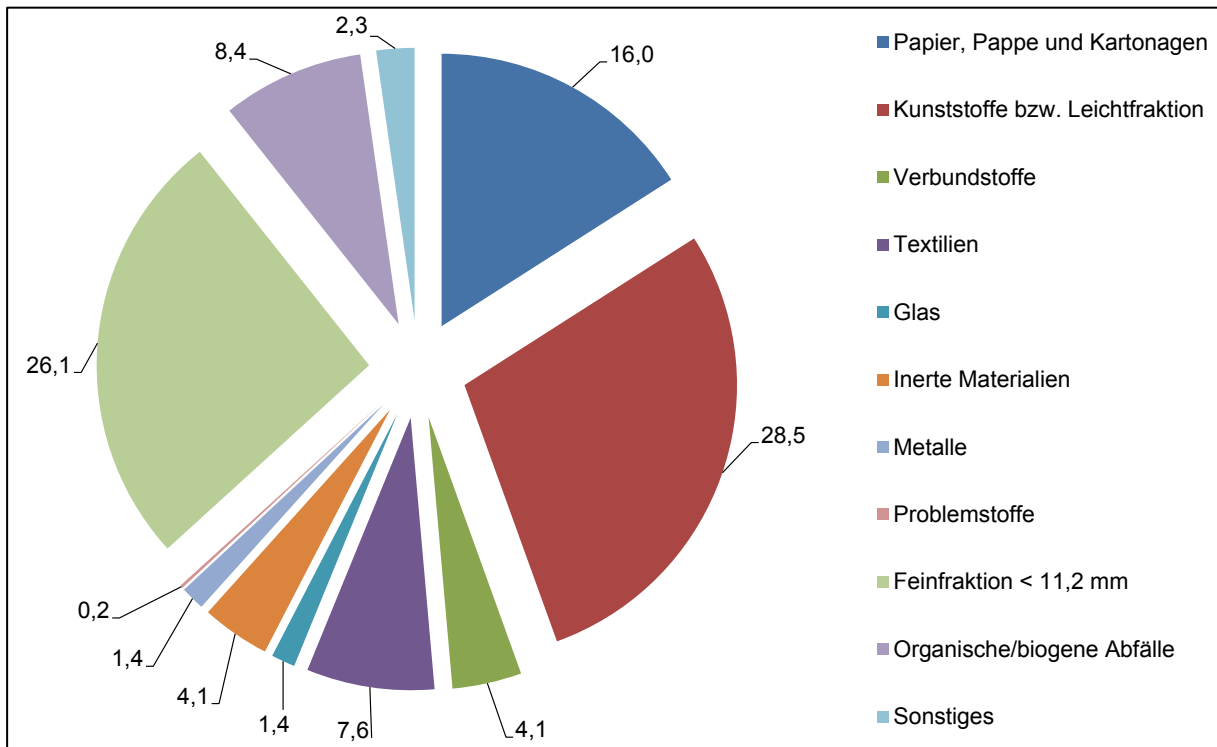


Abbildung 25: Sortieranaysen – Ergebnis: Durchschnittliche morphologische Zusammensetzung von EBS MEDIUM Quality (modifiziert aus Sarc et al. (2014b) – Table 6)

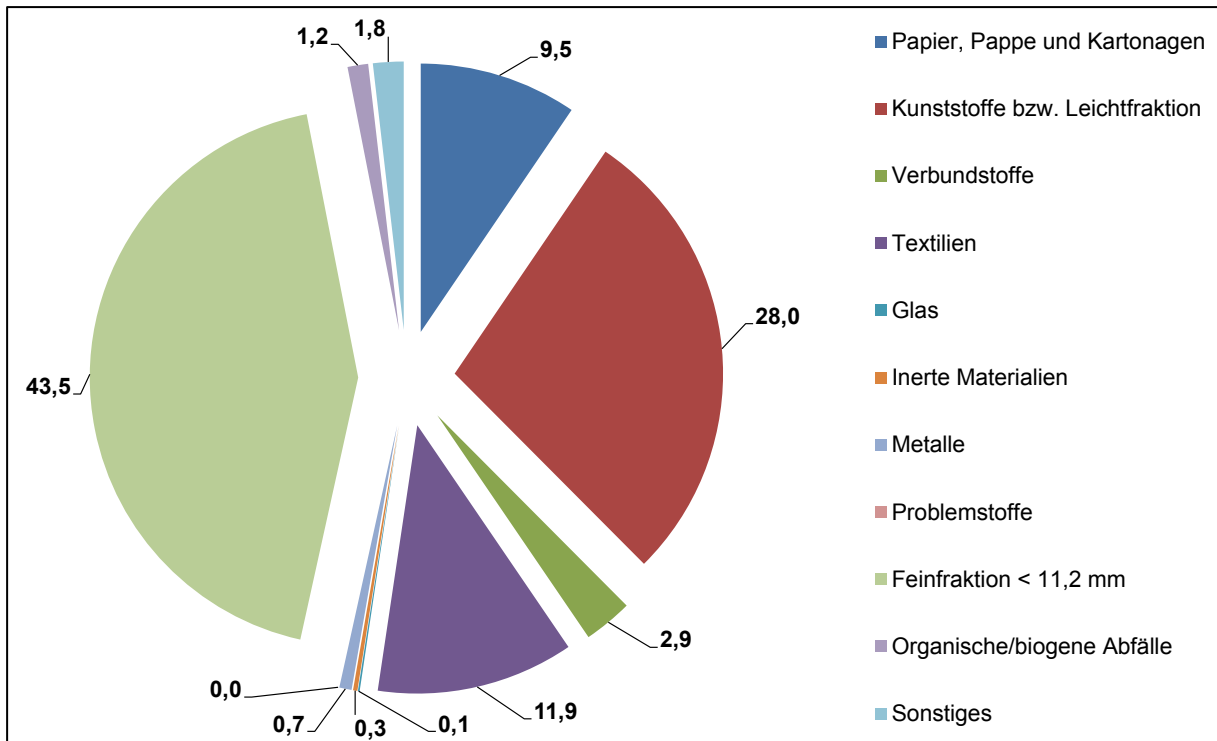


Abbildung 26: Sortieranaysen – Ergebnis: Durchschnittliche morphologische Zusammensetzung von EBS PREMIUM Quality (modifiziert aus Sarc et al. (2014b) – Table 4)



## 6.2.2 Schwermetallgehalte in konventionellem Energieträger Steinkohle und in „EBS MEDIUM Quality“ und „EBS PREMIUM Quality“

Ein weiterer wesentlicher Aspekt, mit dem sich Sarc et al. (2014b) befassen, ist die Schwermetallbelastung von Brennstoffen vor ihrem Einsatz in der Zementindustrie. Dazu wird hingewiesen, dass nur für den Einsatz von EBS in der Zementindustrie rechtlich festgelegte Qualitätskriterien (vgl. Tabelle 3) erfüllt werden müssen, da Ersatzbrennstoffe rechtlich als „Abfall“ gelten. Der Einsatz konventioneller primärer Energieträger unterliegt gesetzlich keinen begrenzenden Qualitätskriterien. In einer Reihe von Vergleichsuntersuchungen konnten Sarc et al. (2014b) nachweisen, dass die Qualität von primären Energieträgern (im gegenständlichen Fall wurde die Steinkohle betrachtet) mit der Qualität der beiden sekundären Energieträgern (EBS MEDIUM und EBS PREMIUM Quality) durchaus vergleichbar ist, vgl. Abbildung 27. Ergänzend zu den publizierten Daten aus Sarc et al (2014b) wurden auch weitere neue Daten über die Qualität von EBS MEDIUM und EBS PREMIUM Quality in die Grafik aufgenommen, die im Zeitraum Juni-August 2014 generiert wurden. Dazu wurden wieder nach Art und Herkunft unterschiedliche EBS (d.h. fünf EBS MEDIUM Quality und fünf EBS PREMIUM Quality) aus insgesamt acht österreichischen Aufbereitungs- und EBS Produktionsanlagen beprobt und konform zu den Normen charakterisiert.

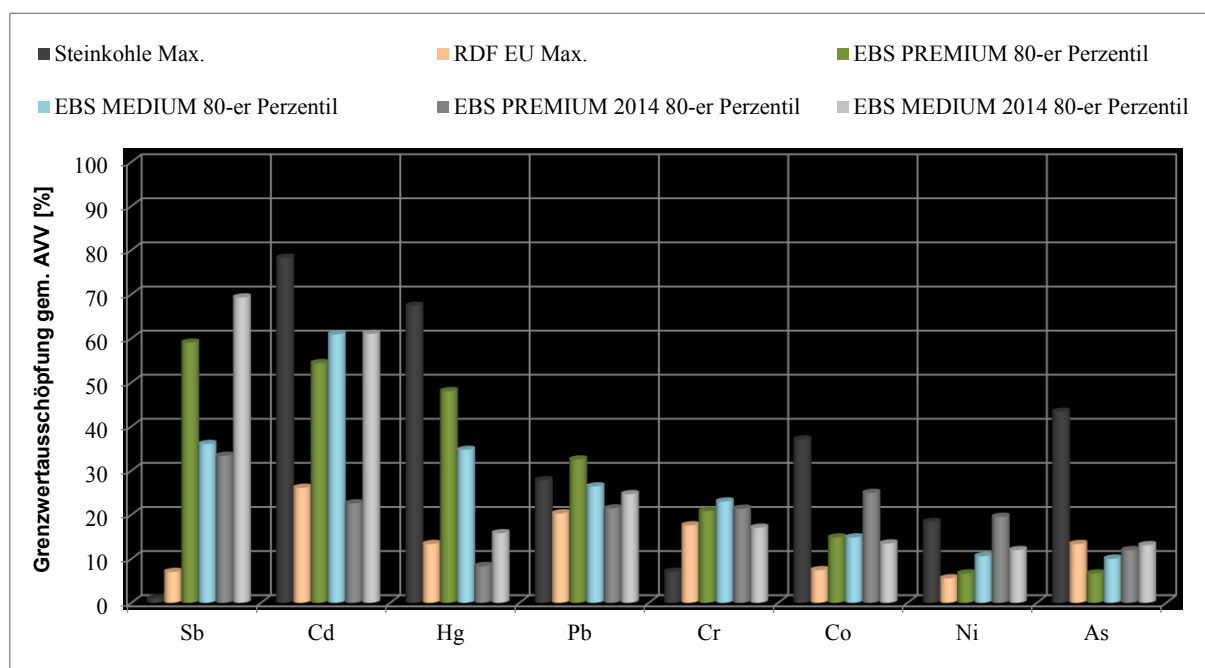


Abbildung 27: Schwermetallgehalte in Steinkohle, RDF EU, EBS PREMIUM Quality, EBS MEDIUM Quality sowie EBS PREMIUM Quality 2014 und EBS MEDIUM Quality 2014 verglichen mit rechtlich festgelegten Qualitätskriterien (Grenzwerte gemäß AVV, vgl. Tabelle 3, ausgewiesen als 100%) (modifiziert aus Sarc et al. (2014b) und ergänzt mit weiteren Analysedaten für das Jahr 2014)

Wie in Abbildung 27 ersichtlich, halten alle untersuchten Ersatzbrennstoffproben die statistischen Grenzwerte der AVV 2002 ein. Von Antimon (Sb) und Chrom(Cr) abgesehen, haben Ersatzbrennstoffe keine höheren Schwermetallgehalte als Steinkohle.

### Veröffentlichung 5:

## **Design, Quality and Quality Assurance of Solid Recovered Fuels (SRF) for the Substitution of Fossil Feedstock in the Cement Industry**

**Sarc, R.**, Lorber, K.E., Pomberger, R., Rogetzer, M. & Sipple, E.M. (2014) Design, Quality and Quality Assurance of Solid Recovered Fuels (SRF) for the Substitution of Fossil Feedstock in the Cement Industry. In: Waste Management & Research 32 (7). DOI: 10.1177/0734242X14536462. S. 565-585.

### Kommentar zu den eigenen Leistungen bei der Veröffentlichung 5:

Die Veröffentlichung 5 basiert auf den umfangreichen Untersuchungen an insgesamt acht Aufbereitungs- und EBS Produktionsanlagen und einem Zementwerk. Dazu wurden vom Erstautor unterschiedliche Leistungen wie z.B. Vorbereitungsarbeiten (d.h. Idee, Konzept, Planung und Organisation sowie vor-Ort Abstimmung), praktische Arbeiten (d.h. Probenahme, Sieb- und Sortieranalysen, Aufnahme von Daten usw.) und theoretische Arbeiten (Literaturrecherche und Auswertung der Daten) erbracht. Die Probenahme wurde vor-Ort in Aufbereitungs- und EBS Produktionsanlagen durchgeführt und die Sieb- und Sortieranalysen wurden im lehrstuhleigenen Labor ausgeführt. Die Daten zur Auswertung sind selbstständig statistisch bearbeitet und der Beitrag inkl. Schlussfolgerungen unter Federführung des Erstautors geschrieben worden. Des Weiteren wurde der Beitrag einer kritischen Begutachtung im Rahmen des „Peer-Review“ - Prozesses von der unabhängigen Fachjury des wissenschaftlichen Journals „Waste Management & Research“ unterzogen. Die Originalität, Aktualität und herausragende Qualität der Veröffentlichung wurden dabei vom Fachjournal erkannt und gewürdigt, das den o.a. Beitrag zum „*Editor's Choice for July*“ kürte.

**Waste Management & Research Editor's Choice for July**

Kommentar von Sage

**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 1**

**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 2**

**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 3**

**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 4**

**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 5**



**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 6**

**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 7**

**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 8**

**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 9**

**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 10**

**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 11**

**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 12**

**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 13**



**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 14**

**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 15**

**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 16**

**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 17**

**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 18**

**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 19**

**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 20**

**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 21**



**Veröffentlichung 5: Sarc et al., 2014; S. 22**

### 6.3 „EBS PREMIUM Quality“ – Praktisch-wissenschaftliche Untersuchungen an der Produktionsanlage der „ThermoTeam Alternativbrennstoffverwertungs GmbH“

Das Unternehmen ThermoTeam Alternativbrennstoffverwertungs GmbH betreibt seit Mitte 2003 die größte österreichische EBS Produktionsanlage (Jahreskapazität: 100.000 t/a mit 15 t/h), in der voraufbereitete heizwertreiche Fraktionen aus Siedlungs- und sonstigen Abfällen zu hochwertigem EBS PREMIUM Quality verarbeitet werden (vgl. Abbildung 28).

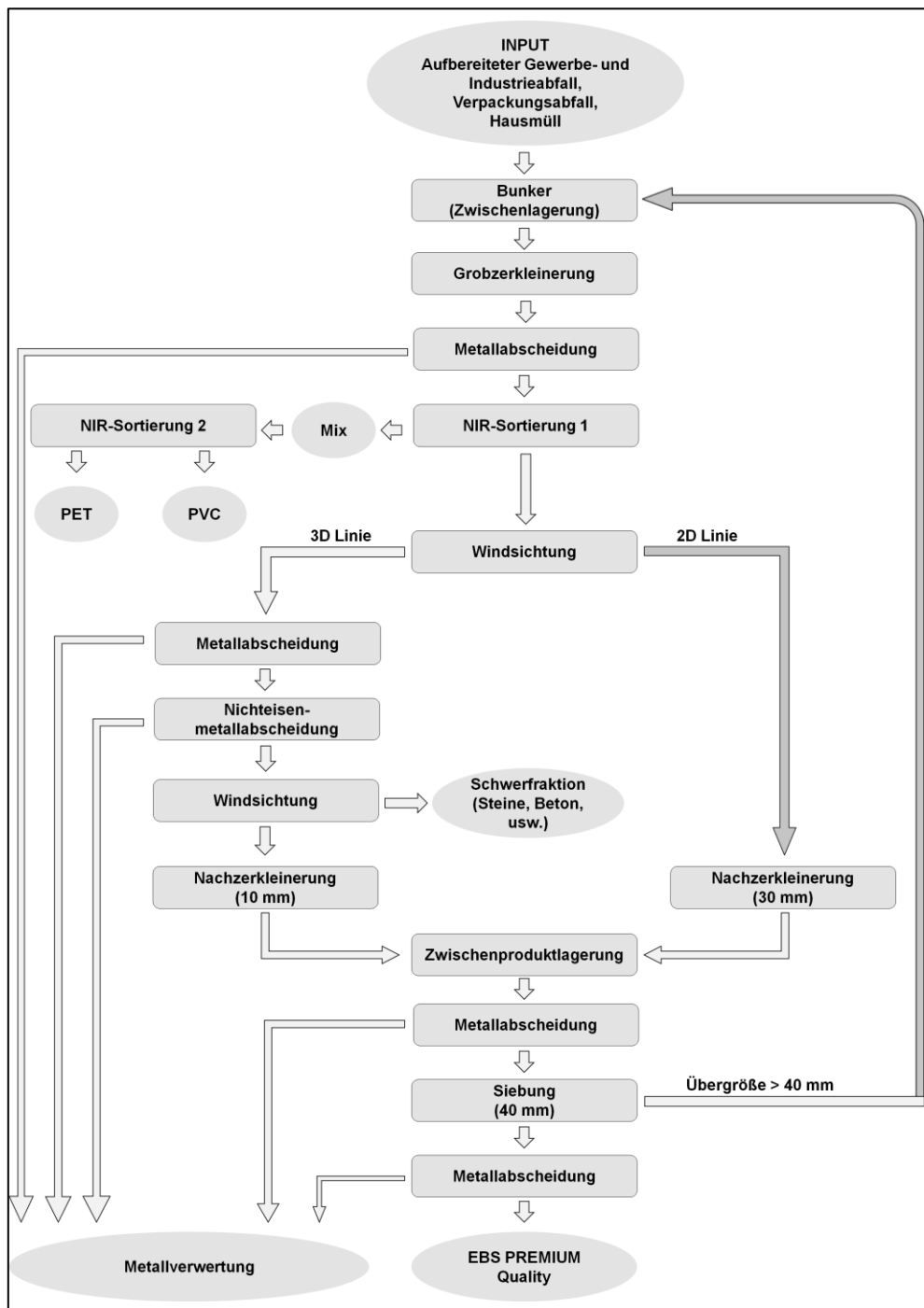


Abbildung 28: Fließbild der EBS PREMIUM Quality Produktionsanlage ThermoTeam (modifiziert aus Sarc et al., 2014a)

Wie in Abbildung 28 dargestellt, ist die Anlage ThermoTeam zweistufig mit Nahinfrarot (NIR) Sortiergeräten (2 x REDWAVE 2800 NIR 64 sensor2-Way zur Ausschleusung von Kunststoffen (d.h. PET und PVC) und 1 x REDWAVE 1200 NIR 64 2W zur Ausschleusung von Kunststoff PET (REDWAVE, 2015)) ausgestattet (vgl. Abbildung 29). Mit diesen Geräten soll sichergestellt werden, dass ein durchschnittlicher Chlorgehalt von 0,8‰<sub>OS</sub> im EBS PREMIUM Quality gewährleistet wird und damit gelegentlich in EBS auftretende Chlorspitzenwerte gekappt werden. (Sarc et al., 2014a) Die ersten zwei parallel angeordneten Geräte schleusen PET und PVC aus und das dritte Gerät schleust nur PET aus. Die Funktionsweise der NIR-Geräte sowie deren Aufgabe sind in Sarc et al. (2014a) beschrieben.

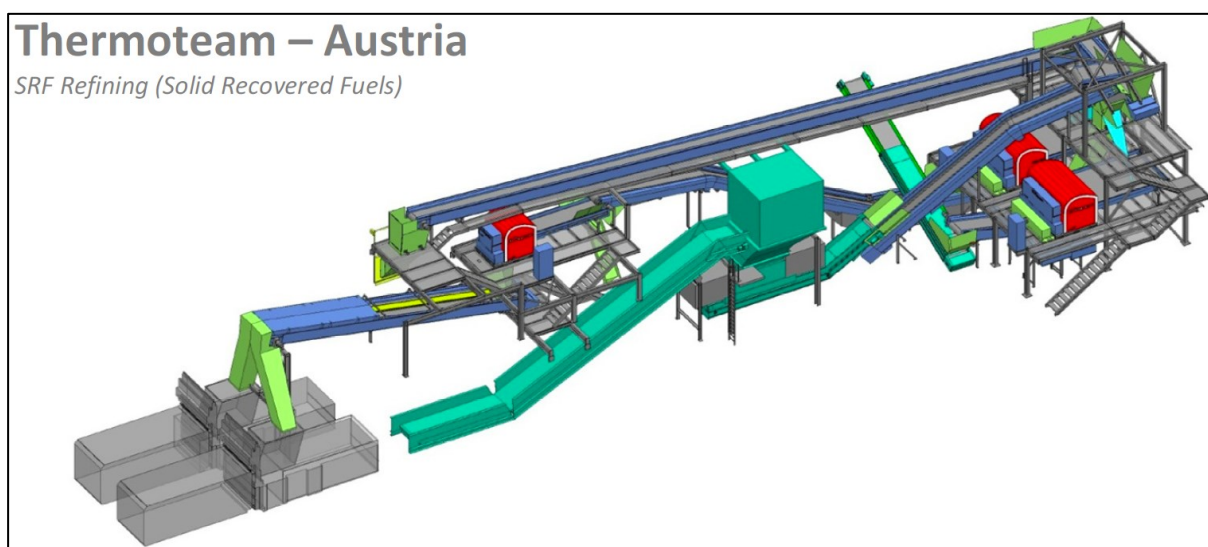


Abbildung 29: Positionierung von REDWAVE NIR Sortiergeräten zur Ausschleusung von PET und PVC in der EBS Produktionsanlage ThermoTeam (REDWAVE, 2015)

Wie bereits erwähnt, werden in der EBS Produktionsanlage ThermoTeam seit 2012 bis dato umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. In gegenständlicher Arbeit sind dazu nur ausgewählte und zur Beantwortung der Problemstellung relevante Daten und Ergebnisse über die Produktion, Qualität und Qualitätssicherung von schadstoffminimiertem und gleichzeitig wertstoffoptimiertem, ofenfertigem EBS PREMIUM Quality dargestellt.

### **Spezifische Untersuchungen an der Anlage ThermoTeam**

Die EBS Produktionsanlage ThermoTeam übernimmt voraufbereitete Abfälle von unterschiedlichen Lieferanten. Damit die angelieferte Abfallqualität überprüft wird, wurden bzw. werden umfangreiche Untersuchungen gemäß derzeit gültiger Qualitätssicherung (vgl. Kapitel 5) durchgeführt. Dazu wurde ein praxisnahes, rechtskonformes und kundenspezifisches Qualitätssicherungskonzept ausgearbeitet bzw. die Vorgehensweise an

die Abfallverbrennungsverordnung (BMLFUW, 2002) für Liefermenge  $\leq 40.000$  t/a und das erste Los (vgl. Abbildung 19) angepasst. Es wurden die Anlieferungen der fünf wichtigsten Kunden je drei Mal überprüft, d.h. der Gesamtumfang betrifft 15 Untersuchungen mit insgesamt rd. 2.263 t Abfälle (Input). Die Abfälle wurden in der Anlage im Normalbetrieb behandelt. Während des Prozesses wurden Outputfraktionen mehrmals beprobt und anschließend chemisch-physikalisch untersucht. Nach der Behandlung wurden alle anfallenden Fraktionen gewogen und deren Mengen bestimmt. Die Untersuchungen sollen Daten für die Massen-, Energie- und Stoffbilanz (z.B. Chlor und Antimon) liefern. Nachfolgende Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Auswertungen der Ergebnisse aus 15 kundenspezifischen Untersuchungen.

Tabelle 6: Zusammenfassende Auswertung der Ergebnisse (Mittelwerte) aus 15 kundenspezifischen Untersuchungen

Zusammenfassende Auswertung: 15 Versuche				Ströme j	Inputfraktion	PVC Fraktion	PET Fraktion	EBS PREMIUM
			Einheit	0	1	2	3	
Masse	Massenstrom		[kg <sub>OS</sub> ]	2.263.369	40.780	29.920	2.126.805	
	Massenstrom		[%]	100	1,80	1,32	93,97	
	Trockenrückstand (105 °C)		[%]	82,4	96,7	96,5	81,4	
	Massenstrom	$M_i$	[kg <sub>TM</sub> ]	1.864.641	39.433	28.871	1.730.472	
Inhalte	Inhaltsstrom <sub>Chlor</sub>	$m_{Cl\ in\ i}$	[kg <sub>TM</sub> ]	26.157	7.096	389	18.673	
	Inhaltsstrom <sub>Antimon</sub>	$m_{Sb\ in\ i}$	[kg <sub>TM</sub> ]	165,8	24,9	7,4	133,5	
Konzentration	Konzentration Stoff <sub>Chlor</sub>		[% <sub>TM</sub> ]	1,40	17,99	1,35	1,08	
	Konzentration Stoff <sub>Antimon</sub>		[% <sub>TM</sub> ]	0,009	0,063	0,026	0,008	
Ausbringen	Masseausbringen	$m_i / \text{Summe } (M_i)$	[% <sub>TM</sub> ]	100,0	1,8	1,3	94,0	
	Inhaltsausbringen Stoff <sub>Chlor</sub>	$m_{Cl\ in\ i} / \text{Summe } (m_{Cl\ in\ i})$	[% <sub>TM</sub> ]	100,0	27,1	1,5	71,4	
	Inhaltsausbringen Stoff <sub>Antimon</sub>	$m_{Sb\ in\ i} / \text{Summe } (m_{Sb\ in\ i})$	[% <sub>TM</sub> ]	100,0	15,0	4,5	80,5	
Heizwert (unterer)Hu			[kJ/kg <sub>TM</sub> ]	20.779	19.827	22.168	21.248	
Energieinhalt			[MJ]	38.745.598	781.838	640.012	36.768.361	
			Ströme j		FE Fraktion	NE Fraktion	Inert Fraktion	
			Einheit		4	5	6	
Masse	Massenstrom		[kg <sub>OS</sub> ]		33.498	3.395	28.971	
	Massenstrom		[%]		1,48	0,15	1,28	
Energieinhalt			[MJ]		282.465	28.628	244.294	

Wie in Tabelle 6 dargestellt, werden in der ThermoTeam Anlage sechs Fraktionen getrennt abgeschieden:

1. PVC Fraktion – mit PVC Material angereicherte Fraktion, ausgeschleust mittels NIR Sortiergerät,
2. PET Fraktion – mit PET (Flaschen) angereicherte Fraktion, gewonnen mittels NIR Sortiergerät,
3. EBS PREMIUM – EBS PREMIUM Quality,
4. FE Fraktion – mittels Magnetabscheider gewonnene Fraktion,

5. NE – mittels Wirbelstromabscheider gewonnene Fraktion und
6. Inert Fraktion – mittels Windsichter ausgeschleuste Fraktion.

Nachfolgend wird auf die einzelnen Ergebnisse näher eingegangen.

### 6.3.1 Massen-, Energie- und Stoffbilanzen

Nachfolgend werden die Ergebnisse und sich daraus ableitende Bilanzen beschrieben.

- **Massenbilanz:**

Bei 15 kundenspezifischen Untersuchungen betrug der Anlagendurchsatz im Untersuchungszeitraum insgesamt rd. 2.263 t Abfälle. Dabei wurden rd. 2.126 t EBS PREMIUM Quality (Originalsubstanz) produziert. In Abbildung 30 ist die entsprechende Massenbilanz der EBS Produktionsanlage von ThermoTeam dargestellt. Wie ersichtlich, wurden dabei rd. 93% der Inputfraktion zum EBS PREMIUM Quality verarbeitet.

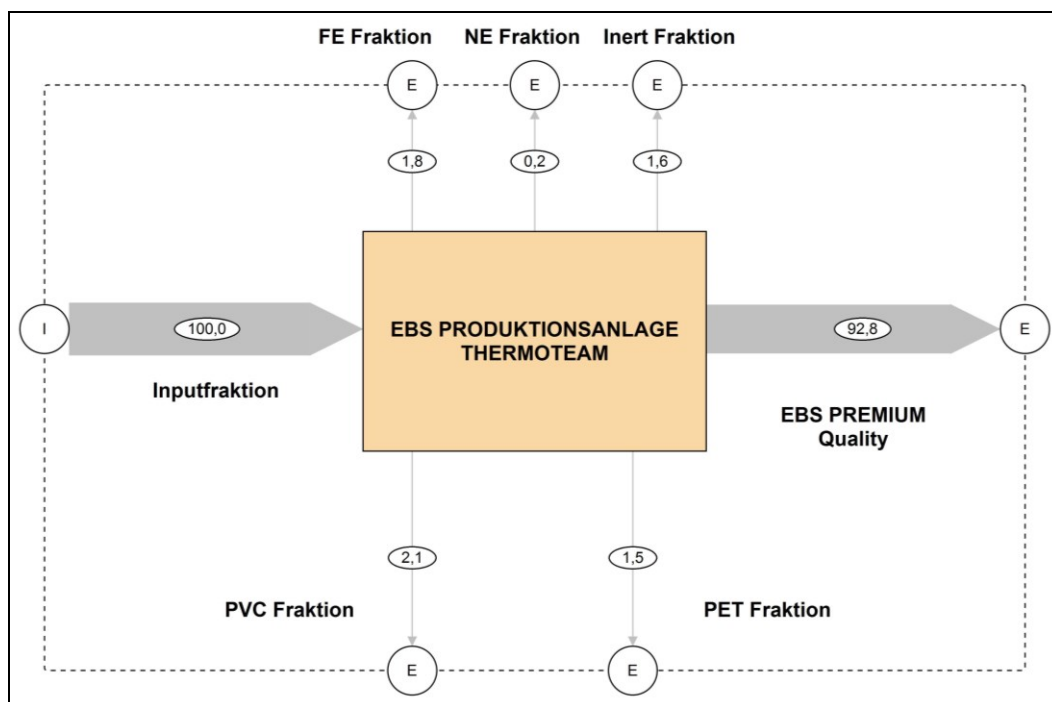


Abbildung 30: Massenbilanz der EBS Produktionsanlage ThermoTeam (Angaben in [%<sub>TM</sub>])

- **Energiebilanz:**

In Abbildung 31 wird die Energiebilanz der EBS Produktionsanlage ThermoTeam dargestellt. Wie ersichtlich, beinhaltet die EBS PREMIUM Quality Fraktion rd. 95% der Gesamtenergiemenge.

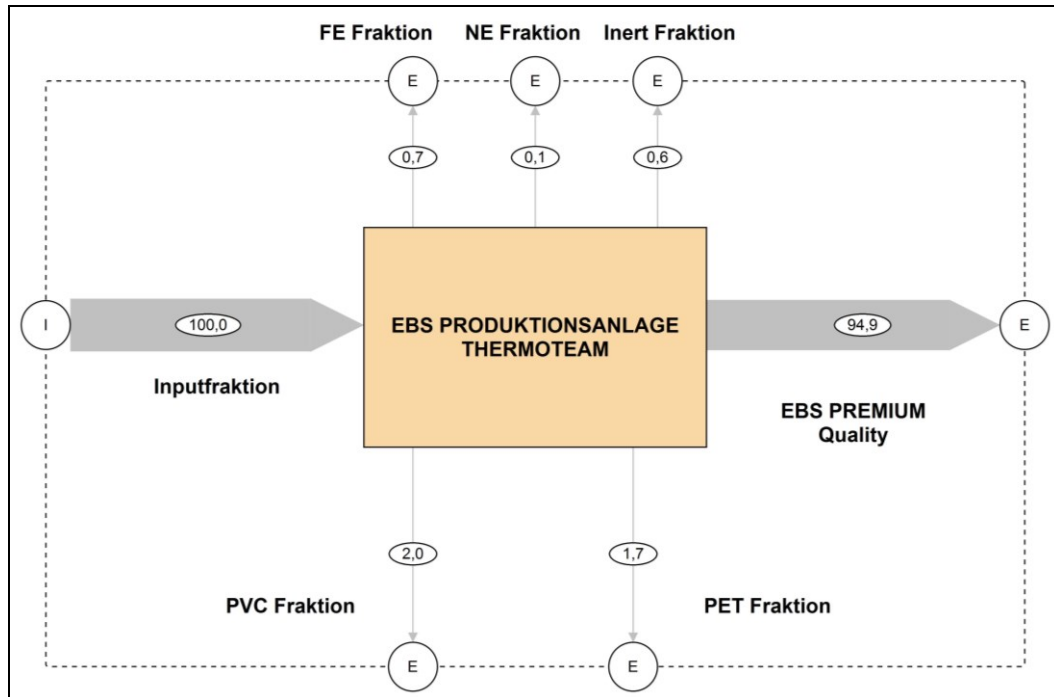


Abbildung 31: Energiebilanz der EBS Produktionsanlage ThermoTeam (Angaben in [%])

- **Stoffbilanz – Chlor:**

Die Ausschleusung von Chlor-haltigen Stoffen (vorwiegend Kunststoff PVC) in der EBS Produktionsanlage ThermoTeam erfolgt mittels NIR Sortiergeräten. Aus diesem Grund wurden eingehende Untersuchungen zur Chlorverteilung in Outputfraktionen, zur Ausschleusungseffizienz der installierten NIR Sortiergeräte und zur physikalischen Charakterisierung der PVC Fraktion durchgeführt.

- Chlorverteilung in Outputfraktionen

Nachfolgende Abbildung 32 zeigt die Chlorbilanz für die EBS Produktionsanlage ThermoTeam. Wie ersichtlich, beträgt der Transferkoeffizient von Chlor in die PVC Fraktion rd. 27% und in die PET Fraktion 1,5%. Dies bedeutet, dass durch NIR Sortierung der Chlorgehalt im EBS um rd. 25-30% verringert werden kann.

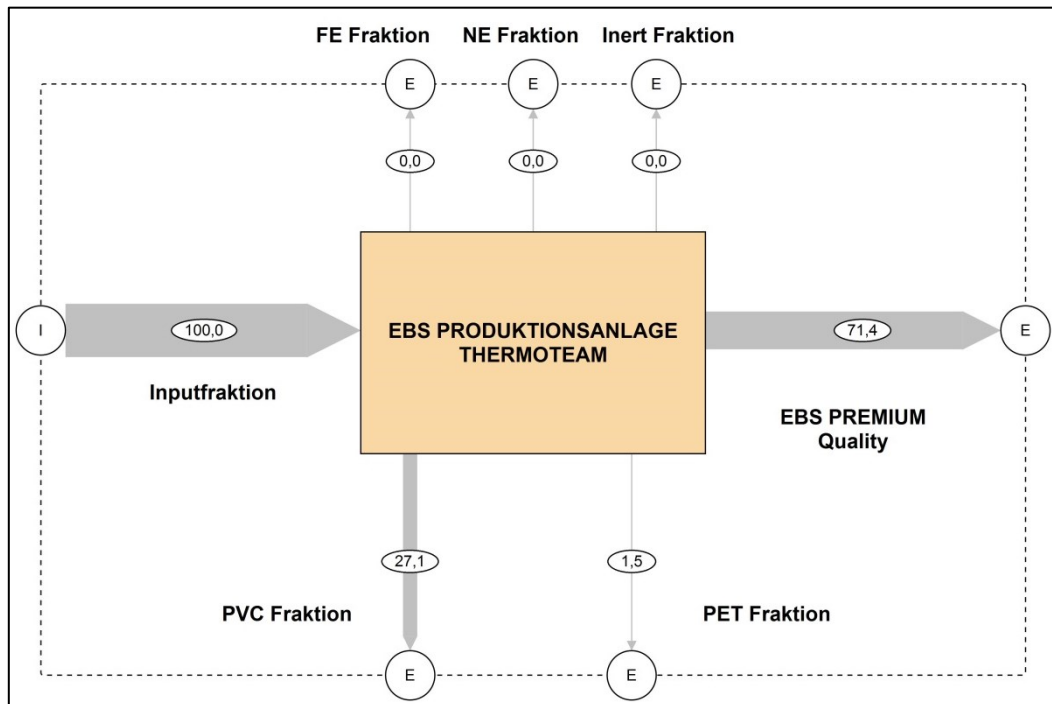


Abbildung 32: Chlorbilanz für die EBS Produktionsanlage ThermoTeam (Angaben in [%])

- Ausschleusungseffizienz der installierten NIR Sortiergeräte

Dazu wurde eine statistische Methode nach Zahnhofer (2013) angewendet, mit der die Auswirkung des Einbaus der NIR Ausschleusungsanlage auf den Chlorgehalt im EBS PREMIUM Quality analysiert und bestimmt wurde. Zahnhofer (2013) konnte, basierend auf den umfangreichen Messergebnissen ( $n = 446$  vor dem Einbau der Anlage und  $n = 23$  nach dem Einbau) zeigen, dass der durchschnittliche zu erwartende Chlorgehalt in der EBS Fraktion vor dem Einbau der Ausschleusungsanlage bei  $0,86\%_{OS}$  lag. Nach Einbau der Ausschleusungsanlage lag der durchschnittliche Chlorgehalt bei  $0,64\%_{OS}$ . Somit konnte statistisch nachgewiesen werden, dass durch Ausschleusung der durchschnittliche Chlorgehalt um rd. 26% gesenkt wird und dass sich damit das 95% Konfidenzintervall um 33% verringert (vgl. Abbildung 33).

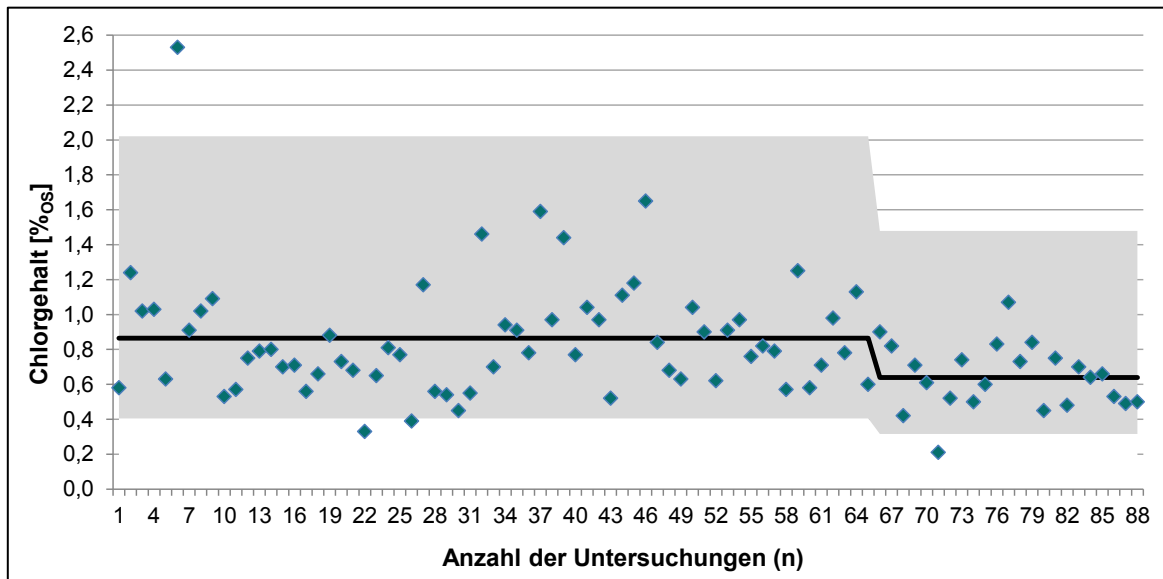


Abbildung 33: Ergebnisse aus der statistischen Analyse des Chlorgehaltes im EBS PREMIUM Quality vor der Installation der NIR Sortieranlage (n = 0-65) und nach der Installation der NIR Sortieranlage (n = 66-88). Verringerung des 95% Konfidenzintervalls

- Sortenspezifische Charakterisierung der PVC Fraktion

Die Untersuchungen zur Charakterisierung der PVC Fraktion in der EBS Produktionsanlage ThermoTeam wurden von David (2014) beschrieben. Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse dargestellt. Die Charakterisierung der PVC Fraktion wird über vier Eigenschaftskriterien (d.h. weich, hart, durchsichtig und undurchsichtig) durchgeführt. In Abbildung 34 ist die Zusammensetzung der ausgeschleusten PVC Fraktion nach diesen vier gewählten Kriterien dargestellt. Es muss angemerkt werden, dass die vier o.a. Unterfraktionen rd. 90-95% der gesamten ausgeschleusten PVC Fraktion ausmachen.

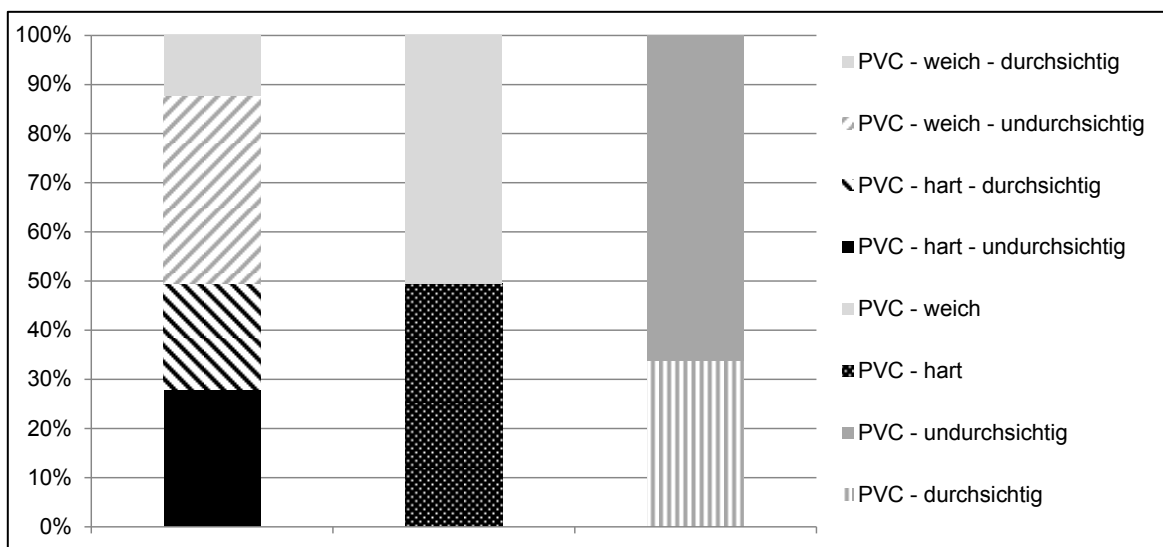


Abbildung 34: Zusammensetzung und sortenspezifische Charakterisierung der PVC Fraktion nach vier Eigenschaftskriterien (David, 2014)



Des Weiteren wurde der Chlorgehalt der PVC Fraktion und jeder darin enthaltenen Unterfraktion (d.h. eine Unterfraktion entspricht einem Sortierkriterium) festgestellt. Nachfolgende Abbildung 35 zeigt, dass der durchschnittliche Chlorgehalt der PVC Fraktion bei rd. 23%<sub>TM</sub> liegt. Des Weiteren zeigt sich, dass der Chlorgehalt in der Unterfraktion PVC - hart (rd. 40%<sub>TM</sub>) signifikant höher ist als in der Unterfraktion PVC - weich (rd. 7%<sub>TM</sub>). Auch die Unterfraktion PVC - durchsichtig (Chlorgehalt rd. 33%<sub>TM</sub>) weist im Vergleich zur Unterfraktion PVC - undurchsichtig (Chlorgehalt rd. 18%<sub>TM</sub>) eine höhere Belastung auf.

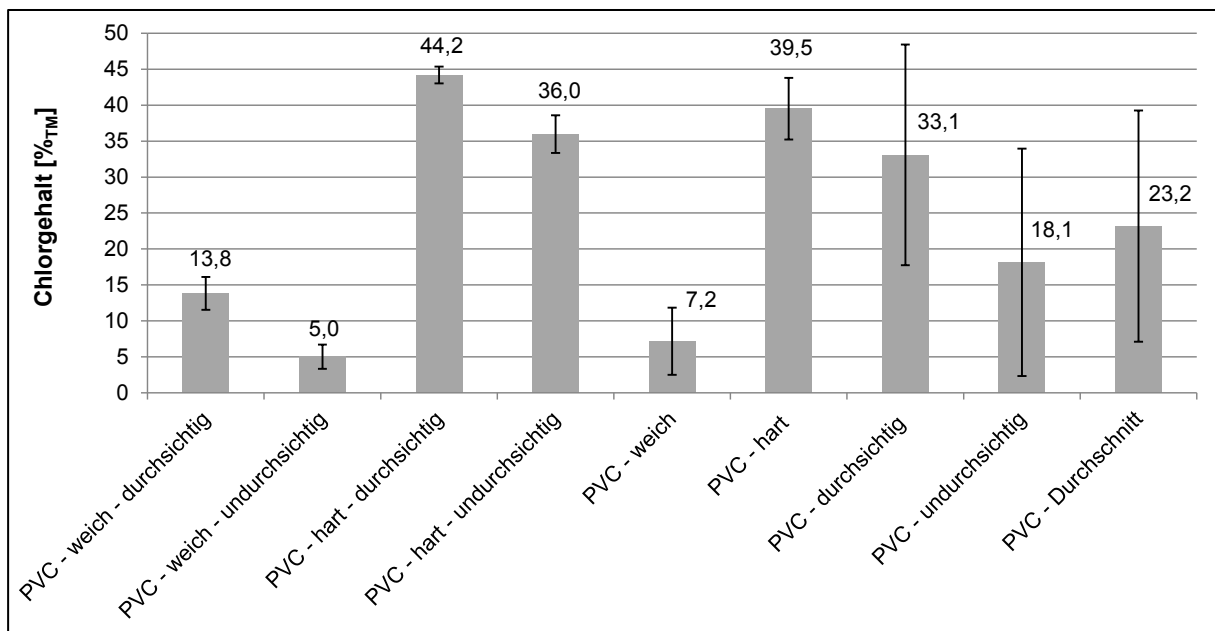


Abbildung 35: Sortenspezifische Verteilung von Chlor in PVC. Durchschnittlicher Chlorgehalt inkl. Standardabweichung [%<sub>TM</sub>] der PVC Fraktion und der einzelnen Unterfraktionen (David, 2014)

- **Stoffbilanz – Antimon:**

Wie bereits erwähnt, wird am EBS-Produktionsstandort Retznei mittels NIR Sortieranlage auch Kunststoff PET aussortiert. Kreindl (2007) hat an der EBS Produktionsanlage ThermoTeam umfangreiche Untersuchungen der PET Fraktion durchgeführt und berichtet dazu, dass der durchschnittliche Antimongehalt in PET – Getränkeflaschen bei 280 mg/kg<sub>TM</sub> liegt. Da der Antimongehalt in EBS auch rechtlich begrenzt ist (vgl. Tabelle 3), wurde im Rahmen der beschriebenen Untersuchungen auch das Schwermetall Antimon bilanziert. Wie aus Abbildung 36 hervorgeht, konnte durch die Installation der NIR Sortieranlagen und die Ausschleusung der PET Fraktion der Antimongehalt im EBS PREMIUM Quality um rd. 20% verringert werden. Zudem ist festzustellen, dass der Antimongehalt in der PVC Fraktion überraschenderweise rd. drei Mal höher ist als jener in der PET Fraktion, was nach den bisherigen Erkenntnissen nicht zu erwarten war.

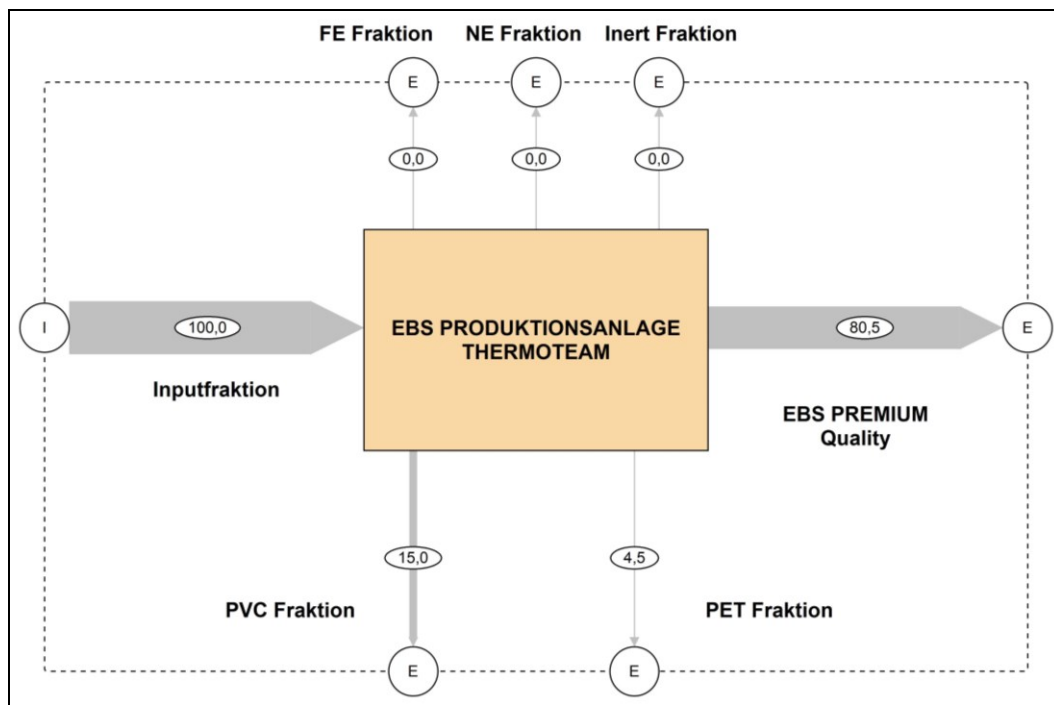


Abbildung 36: Antimonbilanz für die EBS Produktionsanlage ThermoTeam (Angaben in [%])

### 6.3.2 Untersuchungen der Feinfraktion von „EBS PREMIUM Quality“

Der Ansatz, die (heizwertärmere) Feinfraktion (< 11,2 mm) aus dem EBS PREMIUM Quality abzusieben bzw. teilweise abzusieben und einer energetischen Verwertung in der Sekundärfeuerung der Zementindustrie zuzuführen, ist zum ersten Mal von Sarc et al. (2014b) diskutiert und vorgeschlagen worden (vgl. Kapitel 6.2). Sarc et al. (2014b) zeigten, dass der höhere Heizwert in größeren Fraktionen (d.h. > 11,2 mm) liegt und dass eine Absiebung der Feinfraktion einerseits zur Erhöhung und andererseits zur Stabilisierung des Heizwertes des EBS PREMIUM Quality führen würde. Der Anteil der Fraktion 0-2 mm betrug im Durchschnitt 9,1%, der Fraktion 2-4 mm 6,6%, der Fraktion 4-8 mm 15,4%. (Sarc et al., 2014b)

Basierend auf o.a. Überlegungen, wurden fünf Proben von EBS PREMIUM Quality (d.h. P2, P3, P5, P6 und P7, vgl. Tabelle 12) mit einem Sieb (Maschenweite: 6,3 mm) abgesiebt und einer weiteren chemisch-physikalischen Untersuchung im lehrstuhleigenen Labor unterzogen. Ziel dieser Untersuchung war es, trotz der vorhandenen Schwankungen eine erste Abschätzung der Transferkoeffizienten für die Feinfraktion (< 6,3 mm) und Grobfraktion (> 6,3 mm) vorzunehmen. Damit soll dargestellt werden, wie viel Prozent von der Originalprobe in die Fraktion < 6,3 mm transferiert werden würde. In Tabelle 7 sind die zusammenfassenden Ergebnisse aus den Klassier-Untersuchungen von Originalproben (P2, P3, P5, P6 und P7) und den dazugehörigen **Fraktionen < 6,3 mm bzw. > 6,3 mm** enthalten. In Abbildung 37 sind die abgeschätzten Transferkoeffizienten für unterschiedliche EBS Parameter dargestellt. Die Transferkoeffizienten zeigen, welcher Anteil eines Stoffes bzw.

einer Eigenschaft aus der Originalprobe in die Fraktion < 6,3 mm und in die Fraktion > 6,3 mm übertragen wird. Die Ergebnisse sind gewichtet dargestellt, d.h. es wurde auch der dazugehörige Anteil der Fraktion in der Probe bei der Bestimmung der Transferkoeffizienten mitberücksichtigt.

Tabelle 7: Auswertung der Ergebnisse aus Untersuchungen von fünf Originalproben zur Bestimmung der Qualität der EBS Fraktionen < 6,3 mm und > 6,3 mm

Parameter	Einheit	Originalproben P2, P3, P5, P6 und P7			Fraktionen < 6,3 mm			Fraktionen > 6,3 mm			Veränderung: Fraktionen > 6,3 mm (Mittelwert) / Originalproben (Mittelwert)
		Mittelwert	Standardabweichung	Relative Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Relative Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Relative Standardabweichung	
TS	[%]	84,2	3,1	4%	75,1	1,8	2%	87,8	4,1	5%	+4%
WG	[%]	15,8	3,1	20%	24,9	1,8	7%	12,2	4,1	34%	-23%
H <sub>u</sub>	[MJ/kg <sub>TM</sub> ]	26,4	0,9	3%	19,3	1,5	8%	29,2	0,9	3%	+11%
H <sub>u</sub>	[MJ/kg <sub>OS</sub> ]	21,5	1,2	6%	13,9	1,4	10%	24,5	1,6	6%	+14%
AG	[% <sub>TM</sub> ]	14,4	2,2	15%	26,1	3,4	13%	9,6	4,1	42%	-33%
TC	[% <sub>TM</sub> ]	50,4	1,9	4%	40,9	2,5	6%	54,2	2,6	5%	+7%
X <sub>B</sub> <sup>TC</sup>	[% <sub>TM</sub> ]	30,9	8,4	27%	40,7	13,7	34%	27,1	7,4	27%	-12%
X <sub>nB</sub> <sup>TC</sup>	[% <sub>TM</sub> ]	69,1	8,4	12%	59,3	13,7	23%	72,9	7,4	10%	+6%
Cl	[mg/kg <sub>TM</sub> ]	10.880	2.828	26%	9.160	1.448	16%	11.596	3.519	30%	+7%
Sb	[mg/kg <sub>TM</sub> ]	157	114	73%	80	10	13%	185	157	85%	+18%
As	[mg/kg <sub>TM</sub> ]	7,4	2,3	31%	13,6	1,1	8%	5,0	2,5	50%	-33%
Pb	[mg/kg <sub>TM</sub> ]	362	240	66%	730	185	25%	217	262	121%	-40%
Cd	[mg/kg <sub>TM</sub> ]	11,6	14,3	123%	6,3	2,5	40%	13,5	20,0	148%	+16%
Cr	[mg/kg <sub>TM</sub> ]	99	19	19%	218	73	34%	47	53	111%	-52%
Co	[mg/kg <sub>TM</sub> ]	38	32	84%	67	49	73%	25	23	92%	-34%
Ni	[mg/kg <sub>TM</sub> ]	40	12	30%	87	29	33%	21	12	57%	-49%
Hg	[mg/kg <sub>TM</sub> ]	0,4	0,2	37%	0,8	0,2	24%	0,4	0,1	38%	-9%

(+ ) für Anreicherung und (- ) für Abreicherung

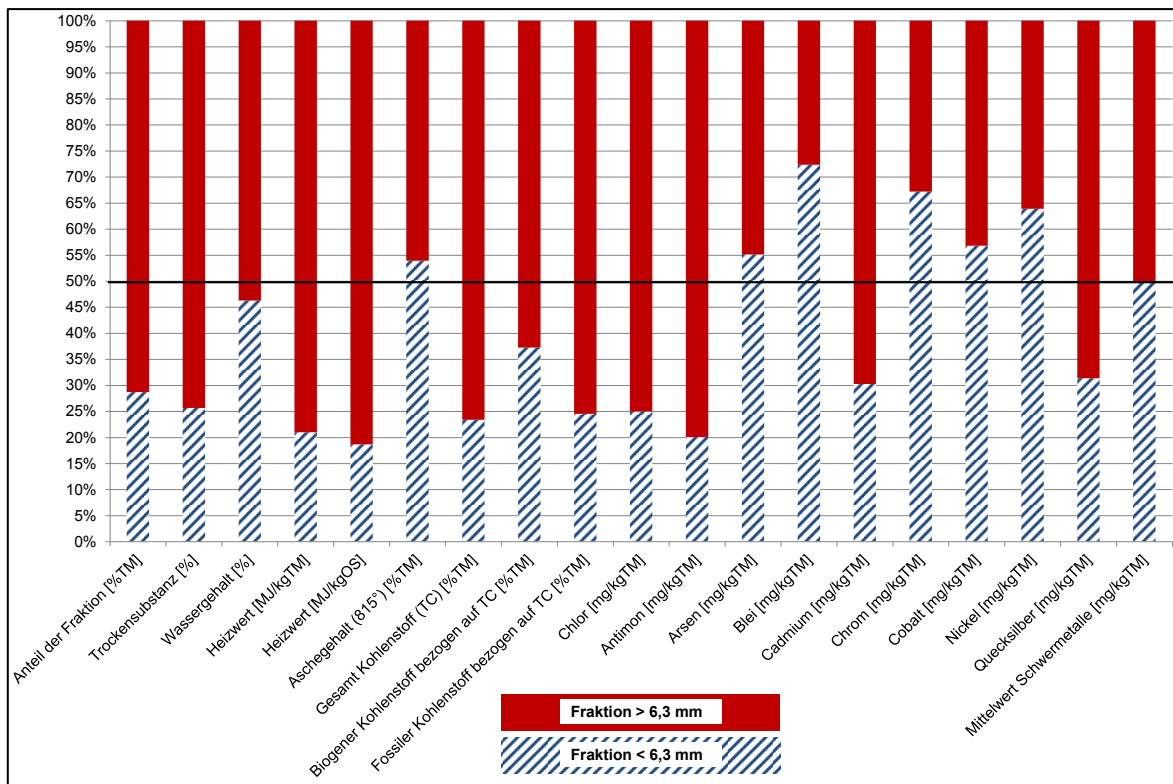


Abbildung 37: Abgeschätzte Transferkoeffizienten [%] für verschiedene Parameter (auf der X-Achse) von Originalproben in die Fraktion > 6,3 mm und < 6,3 mm

Wie aus Tabelle 7 ersichtlich, führt eine Absiebung (< 6,3 mm) des EBS PREMIUM Quality zu einer Verringerung des Wassergehaltes, Erhöhung des Heizwertes, Verringerung des Aschegehaltes, Erhöhung des Chlorgehaltes (Anmerkung: dies ist auch zu erwarten, da Chlor überwiegend in PVC Kunststoffen, d.h. Fraktion > 6,3 mm vorliegt) und zu einer Verringerung des Schwermetallgehaltes (Ausnahmen: Sb und Cd) im Siebüberlauf. Aufgrund der relativ geringen Anzahl der untersuchten Proben und der teilweise hohen Standardabweichung können hier noch keine exakten Transferkoeffizienten festgelegt werden. Unbestritten jedoch ist die signifikante Erhöhung des Heizwertes in der Fraktion > 6,3 mm (um ca. 10% verglichen mit den Originalproben (vgl. Tabelle 7)). Des Weiteren soll angemerkt werden, dass die Auswirkung einer Absiebung auf weitere Qualitätsparameter der Fraktion < 6,3 mm in nachfolgenden Forschungsarbeiten näher untersucht werden sollen, da durch die Absiebung ein „neuer“ EBS gewonnen wird und daher zu prüfen ist, ob die statistischen Grenzwerte für die energetische Verwertung in Anlagen zur Zementerzeugung (vgl. Tabelle 3) eingehalten werden können.

Die abgeschätzten (gewichteten) Transferkoeffizienten, die in Abbildung 37 dargestellt sind, zeigen, dass der Anteil der Fraktion < 6,3 mm rd. 25-30% von EBS PREMIUM Quality ausmacht. Diese 25-30% des Siebdurchlaufs < 6,3 mm beinhalten aber ca. 45% des gesamten EBS PREMIUM Quality Wassergehalts. Des Weiteren muss angemerkt werden, dass die Transferkoeffizienten der Fraktion < 6,3 mm für fünf von acht Schwermetallen in einem Bereich um bzw. über 50% liegen. Emissionsrelevante (Abgas) Schwermetalle, wie Antimon, Cadmium und Quecksilber hingegen, befinden sich aber offensichtlich überwiegend in der Grobfraktion > 6,3 mm.

## 6.4 100%-ige Substitution von primären Energieträgern in der Zementindustrie

Der Einsatz von EBS unterschiedlicher Art und Zusammensetzung zur Bereitstellung der thermischen Energie im Klinkerherstellungsprozess anstelle von primären Energieträgern (z.B. Steinkohle, Heizöl, Petrolkoks usw.) wird in der Zementindustrie als „thermische Substitution von primären Energieträgern“ bezeichnet. Entsprechend kann die daraus abgeleitete „thermische Substitutionsrate [%]“ berechnet werden, die aussagt, wie viel Prozent thermischer Energie aus Ersatzbrennstoffen, bezogen auf den gesamten thermischen Energiebedarf des Klinkerherstellungsprozesses, bereitgestellt wird. Wie bereits im Kapitel 4.4 erwähnt, lag der durchschnittliche spezifische thermische Energiebedarf des Klinkerherstellungsprozesses in der österreichischen Zementindustrie im Jahr 2013 bei  $3.749 \text{ MJ/t}_{\text{Klinker}}$  und die thermische Substitutionsrate bei rd. 72% (Mauschitz, 2014). Des Weiteren muss erwähnt werden, dass es auch Zementwerke gibt, wo die thermische Substitutionsrate über dem österreichischen Durchschnitt liegt und wo darüber hinausgehend das Ziel der 100%-igen Substitution von primären Energieträgern verfolgt wird. Dieses ambitionierte Ziel wurde u.a. auch im Rahmen der gegenständlichen Dissertation und den dazugehörigen Projekten verfolgt. Dazu wurden Vorbereitungsarbeiten und großtechnische Versuche in der EBS Produktionsanlage ThermoTeam (vgl. Kapitel 6.3) und im benachbarten Zementwerk Retznei der Lafarge Zementwerke GmbH durchgeführt. Nachfolgend werden das Zementwerk Retznei und die durchgeführten Versuche beschrieben und ausgewählte Ergebnisse, die nicht einer strikten Geheimhaltungsverpflichtung unterliegen, vorgestellt.

### 6.4.1 Fallbeispiel Zementwerk LAFARGE, Standort Retznei

Das Zementwerk der Lafarge Zementwerke GmbH am Standort Retznei hat eine maximale Klinkerproduktionskapazität von 1.450 t Klinker pro Tag. Der spezifische Wärmebedarf beträgt im Durchschnitt rd. 3.500 MJ/t Klinker. Die für die Produktion von Klinker erforderliche Wärmeenergie wird durch Einsatz von primären Energieträgern und unterschiedlichen EBS bereitgestellt, die über den ofenauslaufseitig situierten Hauptbrenner und durch eine spezielle Aufgabereinrichtung der Sekundärfeuerung beim Ofeneinlauf (für die Aufgaben von ganzen Altreifen) in den Drehrohrofen gelangen. Die heißen Ofenabgase werden durch das Wärmetauscher-Ventilator-System im Gegenstrom zum aufgegebenen Ofenmehl durch das Ofensystem und die Heißzyklon-Wärmetauschern gesaugt. Im vierstufigen Zyklon-Wärmetauscher wird das Ofenmehl mit den aus dem Ofen aufsteigenden,

heißen Abgasen in Kontakt gebracht, erhitzt und durch Abgabe von CO<sub>2</sub> aus den karbonatischen Komponenten entsäuert (vgl. Abbildung 38). (Holliber et al., 2015)

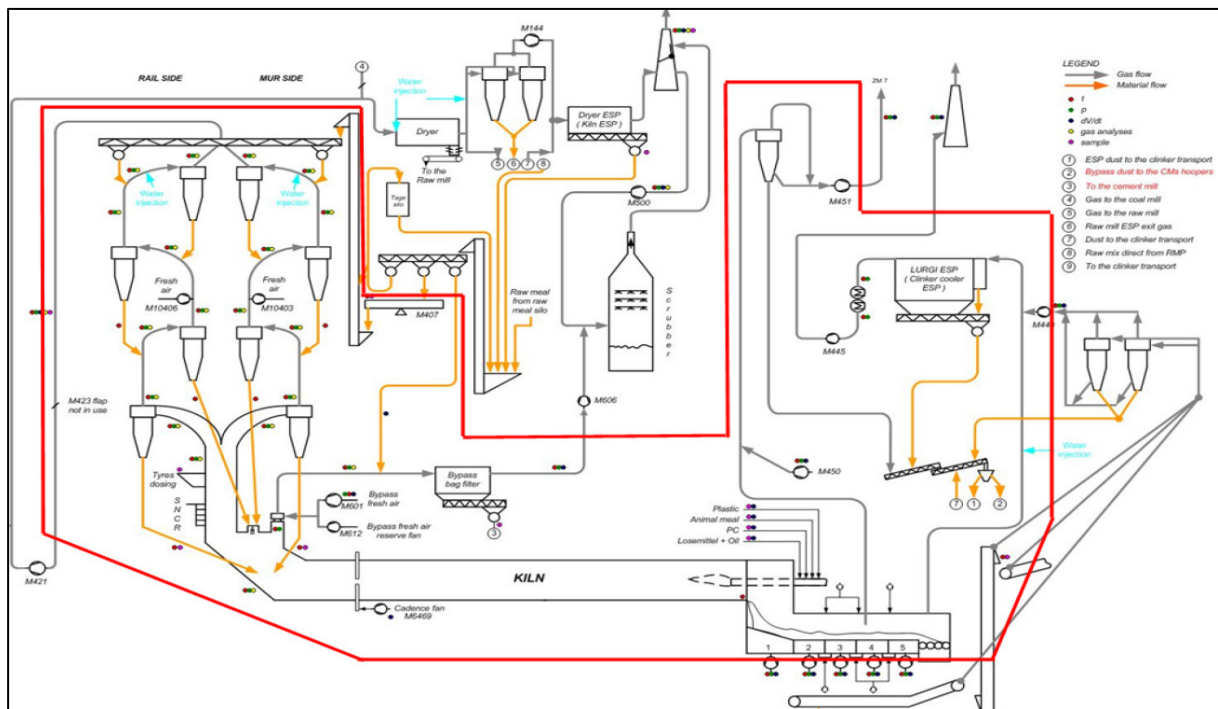


Abbildung 38: Technisches Fließbild des Zementwerkes Retznei der Lafarge Zementwerke GmbH (Holliber et al., 2015)

Der spezifische Energiebedarf des Klinkerherstellungsprozesses lag im Jahr 2013 bei 3.410 MJ/t<sub>Klinker</sub> und die durchschnittliche thermische Substitutionsrate bei 86%. (Holliber et al., 2014) Nachfolgend wird detailliert auf die verwendeten Brennstoffe und deren Zusammensetzung eingegangen:

- **Verwendete Brennstoffe:**

Im Zementwerk Retznei werden Brennstoffe über die Primärfeuerung mit einer durchschnittlichen Einblasgeschwindigkeit von ca. 22 m/s eingebracht und haben dabei 1-1,3 Sekunden, damit sie im Flug (d.h. vor dem Kontakt mit dem Klinkermaterial am Boden des Drehrohrofens) vollständig verbrennen. Nachfolgende Tabelle 8 gibt einen Überblick über die im Zementwerk Retznei verwendeten Brennstoffarten, ihre Heizwerte und Mengen sowie Anteile am Gesamtbrennstoffmix für den Zeitraum 2011 bis 2013.

Tabelle 8: Verwendete Brennstoffarten und Mengen im Zementwerk Retznei, Zeitraum 2011 bis 2013 (Holliber et al., 2015)

Brennstoffart	Durchschnittlicher Heizwert [MJ/t <sub>os</sub> ]	2011			2012			2013		
		[t/a]	[GJ/a]	Anteil [%]	[t/a]	[GJ/a]	Anteil [%]	[t/a]	[GJ/a]	Anteil [%]
Steinkohle	28.500	844	24.054	2,0	987	28.130	2,2	0	0	0,0
Petrolkoks	30.500	7.073	215.727	17,8	6.500	198.250	15,5	5.234	159.644	13,1
Heizöl - leicht	41.700	192	8.006	0,7	271	11.301	0,9	193	8.048	0,7
Altreifen	27.000	10.379	280.233	23,2	11.673	315.171	24,7	12.002	324.054	26,5
Tiermehl	18.000	4.938	88.884	7,3	4.663	83.934	6,6	2.817	50.706	4,1
Pilzmyzel	17.000	0	0	0,0	936	15.912	1,2	0	0	0,0
Klärschlamm	11.000	1.046	11.506	1,0	583	6.413	0,5	628	6.908	0,6
Lösungsmittel	21.700	5.916	128.377	10,6	5.984	129.853	10,2	6.360	138.009	11,3
Altöl	35.000	547	19.145	1,6	126	4.410	0,3	5	175	0,0
Öl-Wasser-Emulsion	23.800	3.478	82.776	6,8	2.930	69.734	5,5	2.580	61.404	5,0
EBS PREMIUM Quality	20.200	17.401	351.500	29,0	20.449	413.070	32,4	17.773	359.010	29,4
Reifenflusen	29.100	0	0	0,0	0	0	0,0	3.928	114.298	9,4
<b>Summe</b>		<b>51.814</b>	<b>1.210.209</b>	<b>100,0</b>	<b>55.102</b>	<b>1.276.177</b>	<b>100,0</b>	<b>51.520</b>	<b>1.222.256</b>	<b>100,0</b>

Wie aus Tabelle 8 ersichtlich, lag der thermische Anteil an EBS PREMIUM Quality in den Jahren 2011 bis 2013 bei rd. 30%. Des Weiteren muss angemerkt werden, dass seit 2013 auch Reifenflusen (d.h. Rückstände aus der mechanischen Aufbereitung von Altreifen) energetisch verwertet werden.

- **Thermische Substitutionsrate [%]:**

Der erste Ersatzbrennstoff, d.h. Altreifen, wurde im Zementwerk Retznei bereits im Jahr 1982 eingesetzt. Als zweiter Ersatzbrennstoff kam danach im Jahr 1996 der EBS PREMIUM Quality zum Einsatz. Nachfolgende Abbildung 39 zeigt die Entwicklung der thermischen Substitutionsrate im Zementwerk Retznei im Zeitraum 1982, als sie lediglich 1% betrug, bis 2013, ab dem sie bei rd. 86% liegt.

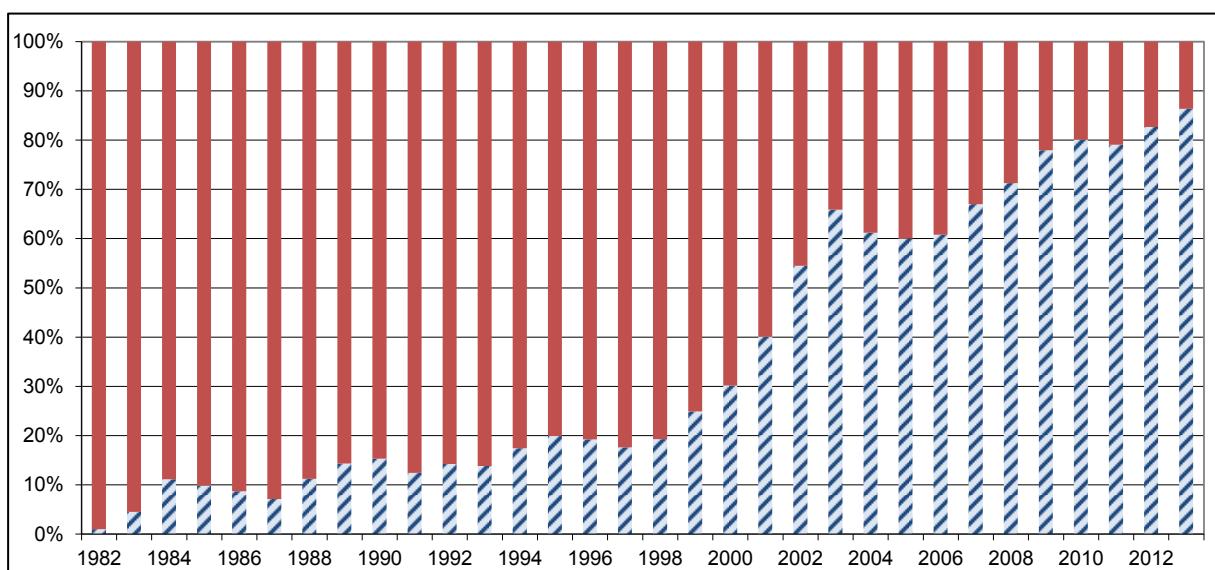


Abbildung 39: Entwicklung der thermischen Substitutionsrate (blau-strichliert) am Standort Retznei der Lafarge Zementwerke GmbH im Zeitraum 1982 bis 2013 (Holliber et al., 2015)

- **EBS Mix:**

Bis 2000 wurden im Zementwerk Lafarge am Standort Retznei nur zwei EBS-Arten (d.h. Altreifen und EBS PREMIUM Quality) energetisch verwertet. Im Jahr 2013 waren es insgesamt neun EBS-Arten, mit denen rd. 86% des thermischen Bedarfes für den Klinkerherstellungsprozess abgedeckt werden konnte (vgl. Abbildung 40).

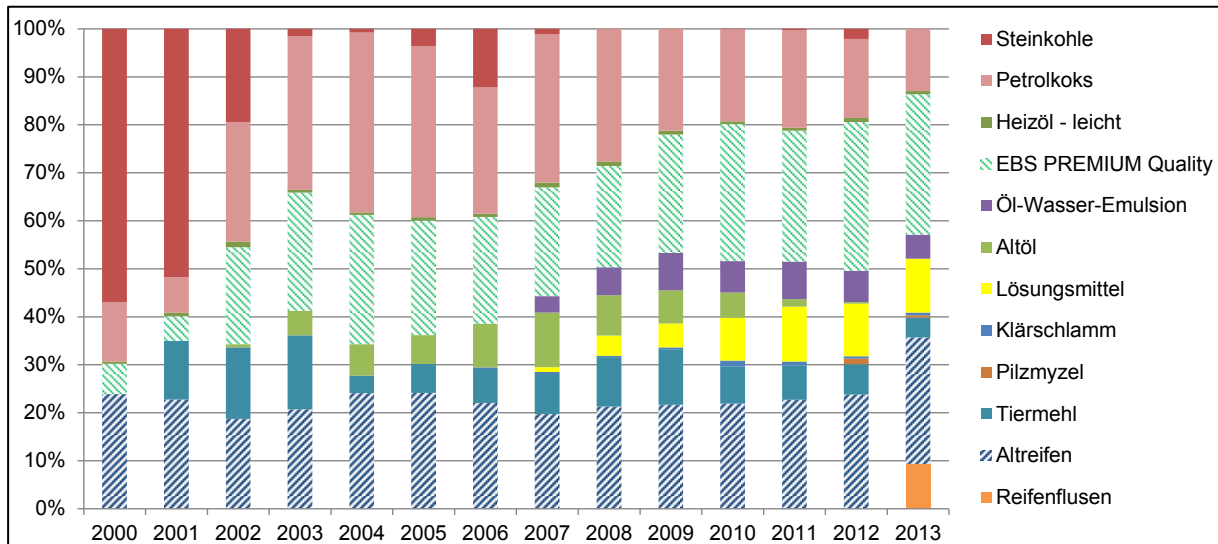


Abbildung 40: Entwicklung des EBS-Mix im Werk Retznei der Lafarge Zementwerke GmbH im Zeitraum 2000 bis 2013 (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge) (Holliber et al., 2015)

- **Pilot-Versuch 100%-ige Substitution:**

Ergänzend wird hier bemerkt, dass der erste Versuchsbetrieb mit dem Ziel einer 100%-igen thermischen Substitution im Zementwerk Retznei bereits vom 1.3.2010 (15<sup>00</sup> h) bis 5.3.2010 (14<sup>00</sup> h) erfolgreich durchgeführt worden ist. (Holliber et al., 2015; Sarc et al., 2013) Die Verwertung von unterschiedlichen flüssigen und festen EBS hat damals nachweislich zu keinen Erhöhungen der Emissionen am Kamin, Prozessstörungen oder Sicherheitsproblemen usw. geführt. Dies kann als positiver Beweis für die prinzipielle Möglichkeit gelten, durch den alleinigen (100%) Einsatz von EBS Klinker herzustellen, der alle marktspezifischen Qualitätsanforderungen erfüllt. Im Rahmen dieses Pilotversuches konnten aber auch aufgetretene technische und brennstoffspezifische Probleme und Schwächen festgestellt werden, und zwar:

- Schwankender Heizwert unterschiedlicher EBS,
- Geeignete EBS Mix Zusammensetzungen müssen gefunden/erprobt werden,
- Flammentemperaturschwankungen treten auf,
- Erhöhung des thermischen Gesamtenergiebedarfes feststellbar,



- Probleme bei Förderungs- und Einblastechik für unterschiedliche EBS,
- Verschleiß/Abtragen der Ausmauerung/Feuerfestmaterialien der Ofenzustellung etc.

Während im Normalbetrieb die spezifische thermische Energiemenge am Primärbrenner bei  $> 22 \text{ GJ/t}_{\text{Brennstoff}}$  liegt, lag sie beim Pilot-Versuch nur zwischen 21-22  $\text{GJ/t}_{\text{Brennstoff}}$ , d.h. im unteren noch akzeptierbaren Bereich. Der Grund waren vor allem die schwankenden Heizwerte des EBS Mix, bedingt durch den teilweise hohen Wasser- und Aschegehalt von EBS PREMIUM Quality. Der spezifische thermische Gesamtenergiebedarf während des Pilot-Versuches lag bei  $3.750 \text{ MJ/t}_{\text{Klinker}}$  und damit rd. 4% über den im Jahr 2010 durchschnittlichen Bedarf von  $3.597 \text{ MJ/t}_{\text{Klinker}}$ . (Holliber et al., 2015) Dies wirft die Frage auf, ob eine 100% thermische Substitutionsrate in der Praxis auch sinnvoll ist.

## 6.4.2 Durchgeführte Versuche und erzielte Ergebnisse

Nachfolgend wird auf die im Rahmen der gegenständlichen Arbeit durchgeführten drei experimentellen Versuche an der Anlage Retznei mit dem Ziel der 100%-igen thermischen Substitutionsrate näher eingegangen.

- **Versuch 1: 13. – 21. Mai 2013**

Bei der Versuchsdurchführung standen zwei Aspekte im Vordergrund, und zwar:

- a) **Herstellung von neuen 2D-EBS PREMIUM Quality in der Anlage ThermoTeam,**
- b) **Einsatz von Substitutions-Brennstoffen im Zementwerk Retznei.**

**a) Herstellung von EBS-NEW PREMIUM Quality in der Anlage ThermoTeam:**

Eine wichtige Erkenntnis aus dem in Kapitel 6.4.1 beschriebenen Pilot-Versuch ist, dass bei der Erhöhung der thermischen Substitutionsrate auf 100% die Brennstoffmix-optimierung zur Verringerung der Flammentemperaturschwankungen eine Herausforderung darstellt. Dies bedeutet, dass anlagentechnisch am Drehrohr keine wesentlichen Verbesserungen notwendig erscheinen, wohl aber die Qualität von EBS PREMIUM Quality weiter optimiert werden muss. Dazu wurden folgende Optimierungspotentiale erkannt:

- **Korngröße und -form:** Ein feineres EBS Material mit kleinerer Korngröße weist (aufgrund der höheren spezifischen Oberfläche) verbrennungstechnische Vorteile auf. Da in der in Kapitel 6.3 beschriebenen EBS Produktionsanlage von ThermoTeam das Inputmaterial in 2-dimensionale (2D) und 3-dimensionale (3D) Stoffströme getrennt wird, kann auf 2D Material zurückgegriffen werden, das gewisse verbrennungstechnische Vorteile gegenüber dem 3D Material aufweist. Ein Nachteil beim Einsatz von 3D Material (Gummitteile, Leder, Verbundstoffe usw.) liegt darin, dass gröbere 3D Stücke im Drehrohrofen (DRO) schlechter bzw. unvollständig

verbrennen und damit die Flammenstabilität negativ beeinflussen. Durch das Einbringen der Brennstoffe über die Lanze am Primärbrenner kann aufgrund der nicht rechtszeitigen Energieabgabe von 3D-förmigen EBS die Flammentemperatur negativ beeinflusst werden.

- Wasser- und Aschegehalt: Das 2D Material von EBS hat in der Regel einen geringeren Wasser- und Aschegehalt und damit höheren Heizwert, verglichen mit dem 3D Material.

Aus diesem Grund wurde beim ersten Versuch in der EBS Produktionsanlage ThermoTeam der Ansatz verfolgt, den EBS PREMIUM Quality so herzustellen, dass nur 2D Material (vgl. Abbildung 28: 2D Linie) dazu verwendet wird. Der ofenfertige EBS PREMIUM Quality wird mittels Rohrgutförderer zum Zementwerk Retznei geliefert. Dazu wurden bei den Nach-Zerkleinerern Siebkörbe mit einer Maschenweite von 20 mm eingesetzt und nur noch 2D Material nachzerkleinert und als „2D-EBS-NEW PREMIUM Quality“ im Produktstrom ausgeschleust. Nachfolgende Abbildung 41 zeigt die Nach-Zerkleinerer mit improvisiertem Produktaustrag und Tabelle 9 gibt einen Überblick über die wichtigsten Parameter, durch die der (neue) 2D-EBS-NEW PREMIUM Quality charakterisiert wird.



Abbildung 41: Versuch 1: Fotodokumentation – ThermoTeam (14.5.2013). Herstellung von „2D-EBS-NEW PREMIUM Quality“

Tabelle 9: Ergebnisse Versuch 1: Charakterisierung des 2D-EBS-NEW PREMIUM Quality, ausschließlich hergestellt aus 2D Material

Parameter	Kurzbez.	Einheit	13.05.2013		14.05.2013		15.05.2013		16.05.2013		Mittelwert	Standard- abweichung
			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P1-P8	P1-P8
Trockensubstanz (105°C)	TS	[%]	79,7	79,4	85,7	86,0	87,4	87,5	85,3	85,2	<b>84,5</b>	3,2
Wassergehalt	WG	[%]	20,3	20,6	14,3	14,0	12,6	12,5	14,7	14,8	<b>15,5</b>	3,2
Heizwert	Hu	[MJ/kg <sub>TM</sub> ]	26,4	26,0	26,2	23,7	27,0	27,4	24,3	24,0	<b>25,6</b>	1,4
Heizwert	Hu	[MJ/kg <sub>OS</sub> ]	20,5	20,0	22,1	20,0	23,0	23,7	20,4	20,1	<b>21,2</b>	1,5
Aschegehalt (815°)	AG	[% <sub>TM</sub> ]	10,5	11,1	13,5	13,2	11,6	9,6	11,1	17,3	<b>12,2</b>	2,4
Aschegehalt (815°)	AG	[% <sub>OS</sub> ]	8,3	8,8	11,6	11,4	10,2	8,4	9,4	14,7	<b>10,3</b>	2,2
Chlor	Cl	[mg/kg <sub>TM</sub> ]	8.700	11.000	5.300	7.700	10.600	3.800	6.500	5.900	<b>7.438</b>	2.547
Chlor	Cl	[mg/kg <sub>OS</sub> ]	6.900	8.700	4.500	6.600	9.300	3.300	5.500	5.000	<b>6.225</b>	2.061
Antimon	Sb	[mg/kg <sub>TM</sub> ]	36,0	30,0	54,0	57,0	84,0	100,0	72,0	74,0	<b>63,4</b>	23,7
		[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	1,4	1,2	2,1	2,4	3,1	3,6	3,0	3,1	<b>2,5</b>	0,9

Wie aus Tabelle 9 ersichtlich, liegt der Wassergehalt noch immer im Durchschnitt bei 15,5%, schwankt aber tagesabhängig von 12 bis rd. 20%, was wiederum einen negativen Einfluss auf das Verbrennungsverhalten hat. Positiv ist, dass der Heizwert über die gesamte Versuchszeit immer über 20 MJ/kg<sub>OS</sub> lag. Des Weiteren ist anzumerken, dass der Chlorgehalt im Durchschnitt bei 0,62%<sub>OS</sub> lag, wobei an 2 Tagen Spitzenwerte mit 0,87 bzw. 0,93%<sub>OS</sub> aufgetreten sind. Antimon lag bei allen Proben deutlich unter dem Grenzwert von 7 mg/MJ<sub>TM</sub> (vgl. Tabelle 3).

Zusätzlich wurde an jedem Versuchstag eine Korngrößenverteilung des produzierten 2D-EBS-NEW PREMIUM Quality ermittelt. In Abbildung 42 ist die durchschnittliche Korngrößenverteilung aus vier Proben (je eine Probe pro Versuchstag in der EBS Produktionsanlage) dargestellt. Wie ersichtlich, lag die Korngröße ( $d_{95}$ ) des 2D-EBS-NEW PREMIUM Quality bei rd. 26 mm. Zudem wird hier angemerkt, dass der Feinanteil (< 6,3 mm) rd. 15% ausmacht, siehe auch Tabelle 10.

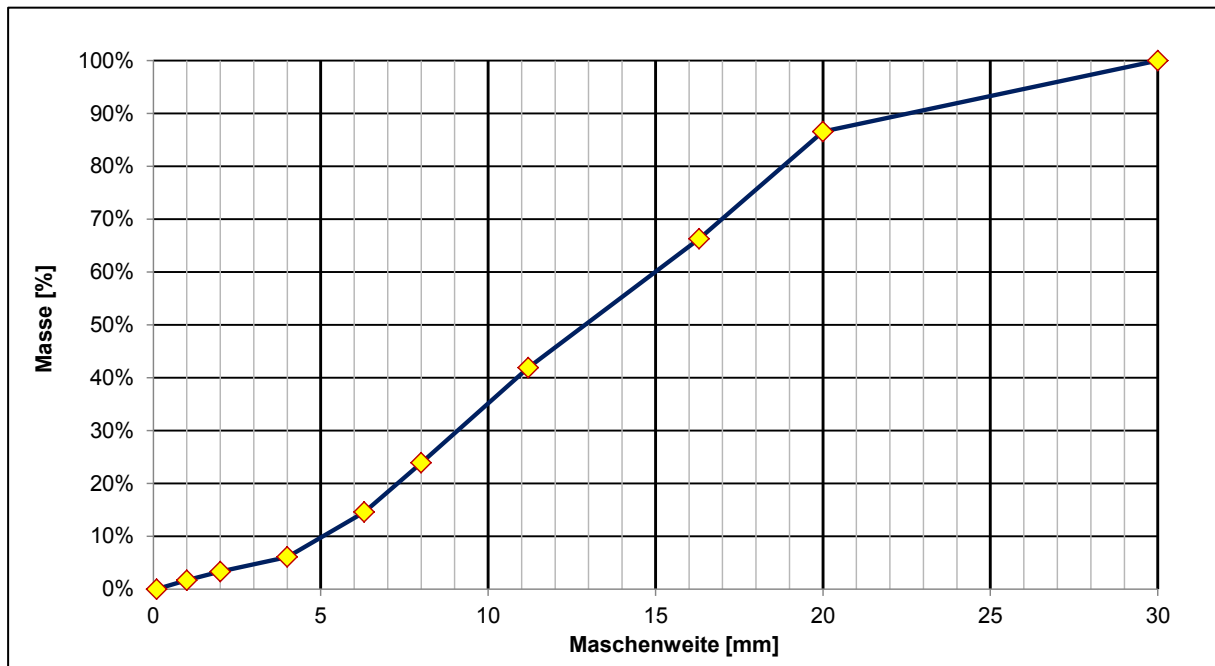


Abbildung 42: Ergebnisse Versuch 1: Durchschnittliche Korngrößenverteilung des hergestellten 2D-EBS-NEW PREMIUM Quality

Tabelle 10: Ergebnisse Versuch 1: Charakterisierung der einzelnen Siebschnitte des 2D-EBS-NEW PREMIUM Quality, nur aus 2D Material hergestellt

Siebschnitt	Anteil	Trocken- substanz (105°C)	Wasser- gehalt	Heizwert	Heizwert	Aschegehalt (815°C)
[mm]	[% <sub>os</sub> ]	[%]	[%]	[MJ/kg <sub>TM</sub> ]	[MJ/kg <sub>os</sub> ]	[% <sub>TM</sub> ]
20-30	13,4	89,8	10,2	27,3	24,2	9,8
16,3-20	20,3	89,2	10,8	27,0	23,8	12,3
11,2-16,3	24,4	88,5	11,5	27,0	24,0	8,5
8-11,2	18,0	84,9	15,1	25,4	21,2	13,3
6,3-8	9,3	82,1	17,9	23,8	19,1	16,4
4-6,3	8,5	84,7	15,3	20,3	16,9	28,1
2-4	2,7	80,7	19,3	19,8	15,5	23,4
1-2	1,7	83,6	16,4	15,0	11,8	38,0
0-1	1,7	89,0	11,0	5,4	4,5	68,2

Wie in Tabelle 10 dargestellt und bereits erwähnt, beträgt der Anteil der Feinfraktion (< 6,3 mm) 14,6%. Diese Fraktion weist im Durchschnitt einen erhöhten Wassergehalt, geringeren Heizwert und höheren Aschegehalt auf. Diese Ergebnisse aus o.a. Untersuchungen zeigen wieder, dass es überlegenswert ist, diese Feinfraktion (< 6,3 mm) aus dem 2D-EBS-NEW PREMIUM Quality abzutrennen und danach in der Sekundärfeuerung als 2D-EBS MEDIUM Quality einzusetzen, wo im Wesentlichen nur hohe Energiemengen aber keine hohen

Flammentemperaturen benötigt werden. Eine Heizwertbetrachtung zeigt, dass dieser für die Feinfraktion (< 6,3 mm) lediglich 14,6 MJ/kg<sub>OS</sub> (Anmerkung: gewichtet) beträgt. Durch die Abtrennung dieser Feinfraktion könnten die beobachteten Heizwert-Schwankungen (d.h. 20-24 MJ/kg<sub>OS</sub>, vgl. Tabelle 9) von 2D-EBS-NEW PREMIUM Quality verringert und im Durchschnitt um ca. 5-10% erhöht werden, d.h. von 21,2 auf 22,3-23,3 MJ/kg<sub>OS</sub>.

### **b) Einsatz von Substitutions-Brennstoffen im Zementwerk Retznei:**

Mit dem Einsatz von speziell für den ersten Versuch hergestelltem 2D-EBS-NEW PREMIUM Quality wurde im Zementwerk Retznei am 14.5.2013 um 19<sup>00</sup> h begonnen. Insgesamt wurden bis zu fünf Substitutions-Brennstoffe als Mix verwendet, und zwar:

1. 2D-EBS-NEW PREMIUM Quality (speziell hergestellt aus 2D Material),
2. Klärschlamm,
3. Lösungsmittel,
4. Tiermehl,
5. Altreifen und
6. Petrolkoks (als herkömmlicher Primärbrennstoff).

Nachfolgende Tabelle 11 gibt einen Überblick über den verwendeten Brennstoffmix, deren minimalen, maximalen und durchschnittlichen Einsatzmengen, sowie über die im Durchschnitt erzielte thermische Substitutionsrate. Anzumerken ist, dass alle Brennstoffe bis auf die Altreifen am Primärbrenner eingesetzt werden.

Tabelle 11: Ergebnisse von Versuch 1: Durchschnittlicher Brennstoffdurchsatz und thermische Substitutionsrate im Zementwerk Retznei

Brennstoffart	Durchschnittlicher Durchsatz		Minimaler Durchsatz	Maximaler Durchsatz
	[kg/h]	[MJ/h]	[kg/h]	[kg/h]
<b>2D-EBS-NEW PREMIUM Quality</b>	3.383	68.465	89	3.798
<b>Klärschlamm</b>	97	1.067	13	98
<b>Lösungsmittel</b>	1.553	33.684	1	1.986
<b>Tiermehl</b>	253	4.558	0	712
<b>Altreifen</b>	1.911	51.588	214	2.066
<b>Petrolkoks</b>	874	26.665	59	3.358
<b>Summe</b>	8.071	186.028		
<b>Durchschnittliche Substitutionsrate (gesamt)</b>			[%]	<b>85,7</b>
<b>Durchschnittliche Substitutionsrate am Primärbrenner</b>			[%]	<b>80,2</b>

Wie aus Tabelle 11 ersichtlich, wurde im Versuchsbetrieb 1 eine durchschnittliche thermische Substitutionsrate von 85,7% erreicht, wobei allein am Primärbrenner (d.h. ohne Altreifen) rd. 80% erreicht werden konnten.

Der durchschnittliche Heizwert des Brennstoffmix am Primärbrenner lag bei  $21,8 \text{ GJ/t}_{\text{Brennstoff}}$ , was im unteren akzeptierbaren Bereich liegt (optimal wäre  $H_u > 22 \text{ GJ/t}_{\text{Brennstoff}}$ ).

Nachfolgend werden der Brennstoffmix inkl. Altreifen (vgl. Abbildung 43) und Brennstoffmix ohne Altreifen (vgl. Abbildung 44) sowie der zeitliche Verlauf des Brennstoffmixinsetzes (vgl. Abbildung 45) präsentiert.

Wie aus Abbildung 43 ersichtlich, wurden beim Versuch 1 im Zementwerk Retznei insgesamt rd. 37% 2D-EBS-NEW PREMIUM Quality eingesetzt. Wird nur der Brennstoffmix am Primärbrenner (d.h. ohne Altreifen) betrachtet, (vgl. Abbildung 44), ergibt dies einen Anteil an 2D-EBS-NEW PREMIUM Quality von rd. 51%.

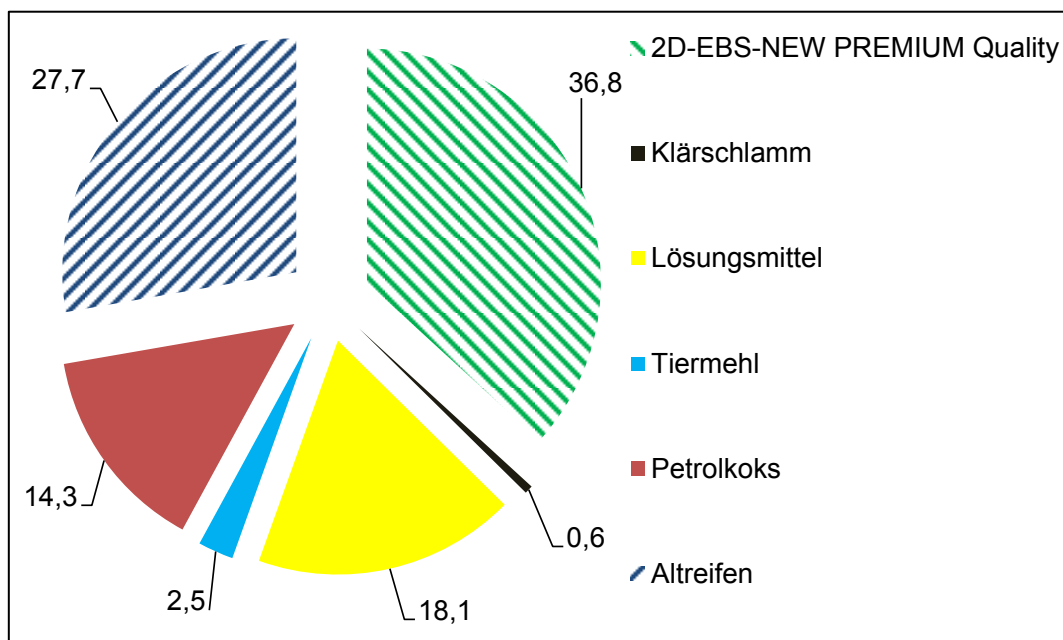


Abbildung 43: Endergebnis Versuch 1: Durchschnittlicher Brennstoffmix inkl. Altreifen (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge)

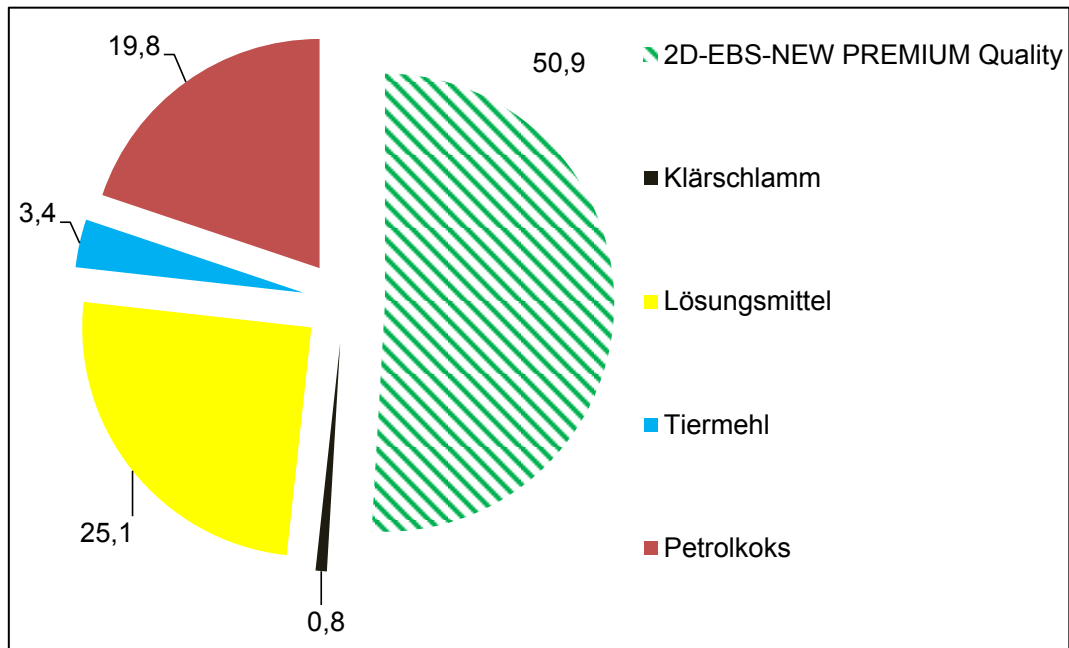


Abbildung 44: Endergebnis Versuch 1: Durchschnittlicher Brennstoffmix am Primärbrenner (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge)

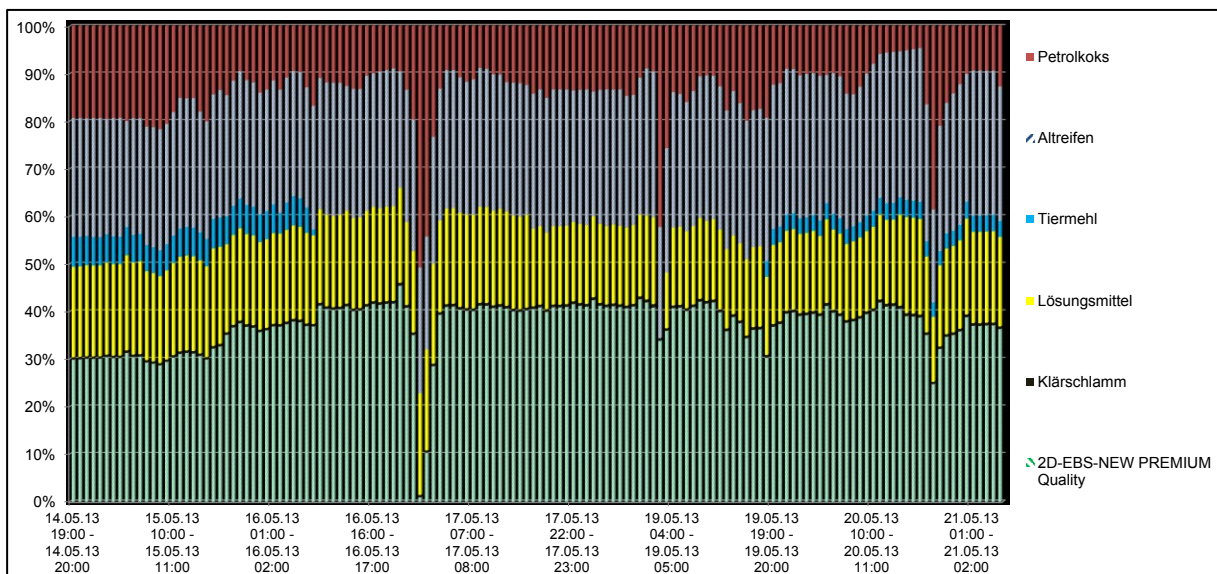


Abbildung 45: Endergebnis Versuch 1: Zeitlicher Verlauf des Brennstoffmix Einsatzes im Zementwerk Retznei (Zeitraum Versuchsbetrieb: 14.5.2013 (19<sup>00</sup> h) bis 21.5.2013 (06<sup>00</sup> h); in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge)

Wie aus Abbildung 45 ersichtlich, konnte im Versuchsbetrieb 1 keine 100%-ige thermische Substitutionsrate erreicht werden, der Maximalwert lag kurzfristig bei 95% (20.05.2013).

- **Versuch 2: 18. November – 2. Dezember 2013**

Wie bereits für den ersten Versuch berichtet, standen auch im Versuch 2 die folgenden zwei Aspekte im Vordergrund:

- a) **Herstellung von neuen EBS PREMIUM Quality durch Zusatzbehandlung in der MBA,**
- b) **Einsatz von Substitutions-Brennstoffen als Mix im Zementwerk Retznei.**

Beim Versuch 2 wurde EBS PREMIUM Quality, der in der EBS Produktionsanlage ThermoTeam im Normalbetrieb produziert wird, zur **biologischen Trocknung** zu einer MBA (biologische Stufe) transportiert und anschließend direkt zum Zementwerk Retznei gebracht und dort energetisch verwertet.

Die wichtigsten Eckdaten des Versuches 2 sehen wie folgt aus:

- EBS PREMIUM Quality Produktion bei ThermoTeam: 18. – 19.11.2013,
- EBS PREMIUM Quality Transport von ThermoTeam zur MBA Frohnleiten: 19. – 21.11.2013,
  - 10 LKWs mit insgesamt 245 Tonnen EBS PREMIUM Quality
- Trocknung von EBS PREMIUM Quality in MBA Frohnleiten und Herstellung von EBS-DRY PREMIUM Quality: 19./21. – 28./29.11.2013,
- Transport von EBS-DRY PREMIUM Quality von MBA Frohnleiten zum Zementwerk Retznei: 28. – 29.11.2013,
  - 15 LKWs mit insgesamt 220 Tonnen EBS-DRY PREMIUM Quality
- Einsatz von EBS-DRY PREMIUM Quality im Zementwerk Retznei: 30.11. (12<sup>00</sup> h) bis 2.12. (21<sup>00</sup> h).

**a) Herstellung von EBS PREMIUM Quality und EBS-DRY PREMIUM Quality:**

In der Anlage von ThermoTeam wurde das Inputmaterial am 18. und 19. November im Normalbetrieb behandelt. Zur Untersuchung wurde der produzierte EBS PREMIUM Quality beim Beladen der LKWs mittels automatischer Probenahmeschleuse nach der letzten Metallabscheidung (vgl. Abbildung 28) beprobt. Die pneumatisch betriebene Probenahmeschleuse wurde auf ein Öffnungsintervall von 200 Sekunden mit einer Öffnungsdauer von jeweils zwei Sekunden eingestellt, vgl. Abbildung 46. Der gesamte Beladungsvorgang für rd. 25 t EBS PREMIUM Quality pro LKW dauerte rd. 35 Minuten. Somit konnten pro LKW zehn Stichproben genommen und zu einer qualifizierten Stichprobe pro LKW vereint werden. Die Probemenge einer Stichprobe betrug im Durchschnitt rd.



1.000 g. Insgesamt wurden acht von zehn LKWs beprobt und dadurch acht qualifizierte Stichproben (je 10 kg) gewonnen.

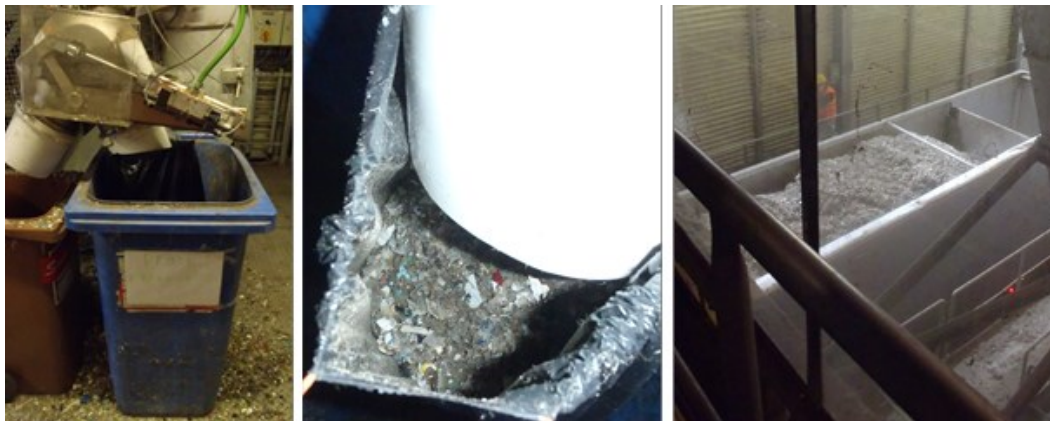


Abbildung 46: Versuch 2: Probenahme von EBS PREMIUM Quality mittels automatischer Probenahmeschleuse (20.11.2013)

In Tabelle 12 wird eine umfangreiche Charakterisierung des in der Anlage ThermoTeam produzierten EBS PREMIUM Quality und in Tabelle 13 des in der MBA Frohnleiten getrockneten EBS-DRY PREMIUM Quality gegeben.

Tabelle 12: Ergebnisse Versuch 2: Charakterisierung des in der Anlage von ThermoTeam produzierten EBS PREMIUM Quality vor der Trocknung (P1-P8: Probennummern)

Parameter	Einheit	EBS PREMIUM Quality (vor der Trocknung)								Median	80-er Perzentil	Mittelwert	Standardabweichung
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8				
H <sub>o</sub>	[MJ/kg <sub>TM</sub> ]	27,5	27,9	28,5	29,6	29,9	29,6	27,6	27,1	28,2	29,6	28,5	1,1
H <sub>u</sub>	[MJ/kg <sub>TM</sub> ]	25,3	25,7	26,2	27,3	27,5	27,2	25,4	24,9	26,0	27,3	26,2	1,0
H <sub>u</sub>	[MJ/kg <sub>OS</sub> ]	20,8	21,2	21,1	22,1	22,1	23,1	19,9	19,3	21,2	22,1	21,2	1,2
TC	[% <sub>TM</sub> ]	50,0	47,5	51,1	53,1	51,1	49,7	52,7	49,0	50,6	52,7	50,5	1,9
X <sub>B</sub> <sup>TC</sup>	[% <sub>TM</sub> ]	33,9	25,9	31,4	21,2	24,6	27,5	45,3	14,6	26,7	33,9	28,1	9,2
X <sub>nB</sub> <sup>TC</sup>	[% <sub>TM</sub> ]	66,1	74,1	68,6	78,8	75,4	72,5	54,7	85,4	73,3	78,8	72,0	9,2
X <sub>B</sub>	[% <sub>TM</sub> ]	39,6	37,7	39,1	33,7	34,5	41,1	40,1	36,5	38,4	40,1	37,8	2,7
X <sub>nB</sub>	[% <sub>TM</sub> ]	44,5	45,3	45,8	51,2	50,9	47,3	45,0	45,5	45,7	50,9	46,9	2,7
Spezifische gesamt CO <sub>2</sub> -Emission	[g <sub>CO2</sub> /MJ <sub>TM</sub> ]	72,3	67,6	71,4	71,2	68,0	66,9	75,9	72,0	71,3	72,3	70,7	3,0
Spezifische fossile CO <sub>2</sub> -Emission	[g <sub>CO2</sub> /MJ <sub>TM</sub> ]	47,8	50,1	49,0	56,1	51,3	48,5	41,5	61,5	49,5	56,1	50,7	5,9
TS	[%]	83,7	84,2	82,2	82,6	88,3	86,0	80,3	79,5	83,2	86,0	83,4	2,9
WG	[%]	16,3	15,8	17,8	17,4	11,7	14,0	19,7	20,5	16,9	19,7	16,7	2,9
AG (815°C)	[% <sub>TM</sub> ]	15,8	14,9	15,6	13,8	14,0	10,9	16,5	17,5	15,3	16,5	14,9	2,0
AG (815°C)	[% <sub>OS</sub> ]	13,2	12,6	12,8	11,4	12,3	9,4	13,2	13,9	12,7	13,2	12,4	1,4
Cl	[mg/kg <sub>TM</sub> ]	9.800	10.200	10.000	11.300	7.100	12.500	14.600	13.800	10.750	13.800	11.163	2.427
Cl	[mg/kg <sub>OS</sub> ]	8.203	8.588	8.220	9.334	6.269	10.750	11.724	10.971	8.961	10.971	9.257	1.805
S	[mg/kg <sub>TM</sub> ]	1.700	1.900	1.500	1.200	1.400	1.900	1.700	1.700	1.700	1.900	1.625	243
H	[% <sub>TM</sub> ]	8,0	8,5	8,7	8,7	8,8	8,9	8,4	8,2	8,6	8,8	8,5	0,3
N	[% <sub>TM</sub> ]	0,7	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,04
Sb	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	3,2	3,3	4,2	4,0	13,1	4,8	3,9	3,5	4,0	4,8	5,0	3,3
As	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,1
Pb	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	30,8	28,0	18,7	17,2	9,8	6,6	5,9	11,6	14,4	28,0	16,1	9,4
Cd	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	0,17	0,28	0,20	0,17	0,20	1,36	0,13	0,20	0,20	0,28	0,34	0,42
Cr	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	3,7	3,6	3,8	4,8	4,7	3,5	3,1	10,0	3,7	4,8	4,7	2,3
Co	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	2,0	2,9	2,7	1,2	0,6	0,6	0,5	0,7	1,0	2,7	1,4	1,0
Ni	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	1,7	2,1	2,0	1,7	1,2	1,0	1,3	1,7	1,7	2,0	1,6	0,4
Hg	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	0,015	0,023	0,021	0,015	0,010	0,014	0,010	0,019	0,015	0,021	0,016	0,005

Wie aus Tabelle 12 ersichtlich, lag der durchschnittliche Heizwert für EBS PREMIUM Quality vor der Trocknung bei 21,2 MJ/kg<sub>OS</sub>.

In der MBA Frohnleiten wurde das Material von 21. bis 28.11.2013 durch Belüften biologisch getrocknet, nachdem an der Oberfläche der Kunststoffe und sonstigen (Verpackungs-) Materialien biologisch abbaubares Material (d.h. Biomüll wie z.B. Nahrungsmittel-Reste) anhaftet. Die biologische Trocknung von EBS allgemein und die Probenahmen von EBS-DRY PREMIUM Quality in der MBA Frohnleiten werden von Ruhri (2014) beschrieben. In Abbildung 47 wird der zeitliche Verlauf der in der MBA Frohnleiten online gemessenen Parameter bei der Trocknung von EBS PREMIUM Quality dargestellt. Wie aus Abbildung 47 ersichtlich, wurde am 21.11.2013 mit der Trocknung begonnen und bereits am 22. bzw. 23. am Nachmittag konnten Temperaturspitzen (Mittelwerte, rote strichlierte Linie) von rd. 40°C beobachtet werden. Nach drei Tagen (d.h. am 24.11.2013) biologischer Trocknung mit Belüftung begann die Temperatur des behandelten EBS PREMIUM Quality zu sinken, bis schließlich am 28.11.2013 (Beladung und Abtransport nach Retznei) die Temperatur im getrockneten EBS-DRY PREMIUM Quality etwa der Umgebungstemperatur in der Anlage entsprach.

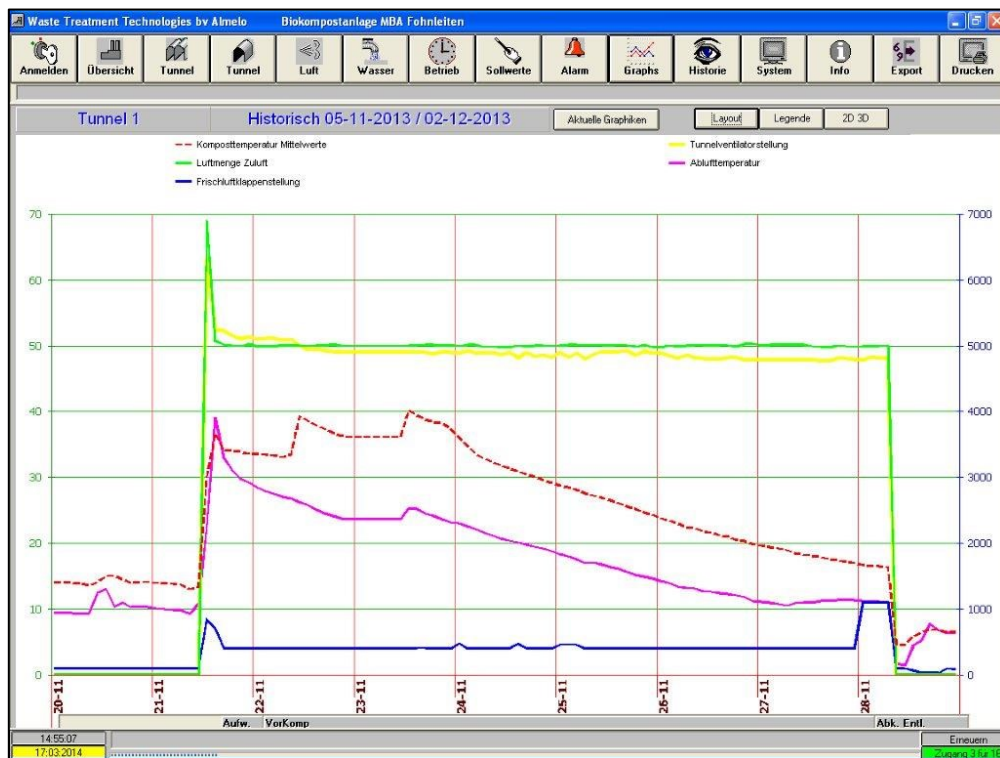


Abbildung 47: Ergebnisse Versuch 2: Zeitlicher Verlauf der in der MBA Frohnleiten online gemessenen Parameter bei der Trocknung von EBS PREMIUM Quality (Drawetz, 2013/2014)

Tabelle 13: Ergebnisse Versuch 2: Charakterisierung des in der MBA Frohnleiten getrockneten EBS-DRY PREMIUM Quality (P1-P8: Probennummern)

Parameter	Einheit	EBS PREMIUM Quality (nach der Trocknung)								Median	80-er Perzentil	Mittelwert	Standard-abweichung
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8				
H <sub>o</sub>	[MJ/kg <sub>TM</sub> ]	33,4	31,2	30,4	30,5	32,4	30,6	31,2	30,5	30,9	32,4	31,3	1,1
H <sub>u</sub>	[MJ/kg <sub>TM</sub> ]	30,7	28,7	28,0	28,1	29,8	28,1	28,7	28,0	28,4	29,8	28,8	1,0
H <sub>u</sub>	[MJ/kg <sub>OS</sub> ]	27,5	22,5	24,7	24,5	26,8	22,9	25,2	25,0	24,9	26,8	24,9	1,7
TC	[% <sub>TM</sub> ]	60,4	54,3	53,6	57,3	62,0	55,1	54,3	54,3	54,7	60,4	56,4	3,2
X <sub>B</sub> <sup>TC</sup>	[% <sub>TM</sub> ]	30,0	20,7	19,9	35,9	29,3	23,8	23,2	23,6	23,7	30,0	25,8	5,5
X <sub>nB</sub> <sup>TC</sup>	[% <sub>TM</sub> ]	70,0	79,3	80,1	64,1	70,7	76,2	76,8	76,4	76,3	79,3	74,2	5,5
X <sub>B</sub>	[% <sub>TM</sub> ]	31,8	32,4	32,2	35,0	31,2	32,4	32,8	32,0	32,3	32,8	32,5	1,1
X <sub>nB</sub>	[% <sub>TM</sub> ]	58,4	56,5	54,0	51,9	59,2	55,6	54,5	54,5	55,1	58,4	55,6	2,4
Spezifische gesamt CO <sub>2</sub> -Emission	[g <sub>CO2</sub> /MJ <sub>TM</sub> ]	72,0	69,2	70,1	74,6	76,1	71,8	69,2	71,0	71,4	74,6	71,8	2,5
Spezifische fossile CO <sub>2</sub> -Emission	[g <sub>CO2</sub> /MJ <sub>TM</sub> ]	50,4	54,9	56,1	47,8	53,8	54,7	53,2	54,2	54,0	54,9	53,2	2,7
TS	[%]	90,2	80,1	89,2	88,4	90,6	83,0	88,6	90,0	88,9	90,2	87,5	3,8
WG	[%]	9,8	19,9	10,8	11,6	9,4	17,0	11,4	10,0	11,1	17,0	12,5	3,8
AG (815°C)	[% <sub>TM</sub> ]	8,9	10,0	13,6	11,7	10,3	11,7	10,9	13,0	11,3	13,0	11,3	1,6
AG (815°C)	[% <sub>OS</sub> ]	8,1	8,0	12,1	10,4	9,3	9,7	9,6	11,7	9,7	11,7	9,9	1,5
Cl	[mg/kg <sub>TM</sub> ]	14.300	11.500	11.800	11.400	13.700	12.300	15.800	12.800	12.550	14.300	12.950	1.548
Cl	[mg/kg <sub>OS</sub> ]	12.899	9.212	10.526	10.078	12.412	10.209	13.999	11.520	11.023	12.899	11.357	1.636
S	[mg/kg <sub>TM</sub> ]	1.100	1.600	1.500	1.600	1.000	1.200	1.600	1.700	1.550	1.600	1.413	270
H	[% <sub>TM</sub> ]	9,6	9,4	9,0	8,9	9,7	9,2	9,2	9,2	9,2	9,6	9,3	0,3
N	[% <sub>TM</sub> ]	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,04
Sb	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	1,4	2,6	4,3	4,6	15,1	11,0	2,8	2,9	3,6	11,0	5,6	4,8
As	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	0,0
Pb	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	8,5	8,7	20,7	14,9	12,1	17,1	6,3	6,8	10,4	17,1	11,9	5,3
Cd	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	0,33	0,14	0,17	0,19	0,29	0,15	0,07	0,19	0,18	0,29	0,19	0,08
Cr	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	1,9	2,8	4,6	2,6	7,4	2,0	1,8	1,4	2,3	4,6	3,0	2,0
Co	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	0,6	0,8	1,4	1,8	0,7	1,9	0,4	0,4	0,8	1,8	1,0	0,6
Ni	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	0,4	0,8	1,8	1,4	3,1	1,1	0,7	0,5	1,0	1,8	1,2	0,9
Hg	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	0,008	0,011	0,014	0,014	0,008	0,010	0,009	0,009	0,010	0,014	0,010	0,002

Wie beim Vergleich von Tabelle 12 mit Tabelle 13 hervorgeht, konnte durch die biologische Trocknung eine (geringe) Veränderung der EBS PREMIUM Quality erzielt werden. Dabei konnte z.B. der Heizwert (Mittelwert H<sub>u</sub> [MJ/kg<sub>OS</sub>]) um 17% auf 24,9 MJ/kg<sub>OS</sub> erhöht (Anmerkung: Standardabweichung liegt bei 7%) und der Wassergehalt (Mittelwert WG [%]) um 25% von 16,7% auf 12,5% (Anmerkung: Standardabweichung liegt bei 30%) verringert werden. Die präsentierten Werte zeigen einmal mehr, wie heterogen die Abfallzusammensetzung und damit die Verteilung der Parameter bzw. Stoffe ist.

Wie bereits erwähnt, wurde der EBS PREMIUM Quality nach der Trocknung zum Zementwerk Retznei transportiert und dort als EBS-DRY PREMIUM Quality eingesetzt.

**b) Einsatz von Substitutions-Brennstoffen als Mix im Zementwerk Retznei:**

Mit dem Einsatz von speziell für den Versuch 2 hergestellten EBS-DRY PREMIUM Quality wurde im Zementwerk Retznei am 30.11.2013 (12<sup>00</sup> h) begonnen. Insgesamt wurden fünf Brennstoffe als Mix verwendet, davon vier zur Substitution, vgl. Tabelle 14.

Tabelle 14: Ergebnisse Versuch 2: Durchschnittlicher Brennstoffdurchsatz und thermische Substitutionsrate im Zementwerk Retznei

Brennstoffart	Durchschnittlicher Durchsatz		Minimaler Durchsatz	Maximaler Durchsatz
	[kg/h]	[MJ/h]	[kg/h]	[kg/h]
<b>EBS-DRY PREMIUM Quality</b>	3.020	61.130	1.932	3.299
<b>Lösungsmittel</b>	1.584	34.342	1.431	1.817
<b>Tiermehl</b>	979	17.629	0	1.318
<b>Altreifen</b>	1.948	52.585	1.136	2.084
<b>Petrolkoks</b>	829	25.277	301	2.681
<b>Summe</b>	8.360	190.963		
<b>Durchschnittliche Substitutionsrate (gesamt)</b>			[%]	<b>86,8</b>
<b>Durchschnittliche Substitutionsrate am Primärbrenner</b>			[%]	<b>81,7</b>

Wie aus Tabelle 14 ersichtlich, konnte im Versuchsbetrieb 2 eine durchschnittliche thermische Substitutionsrate von 86,8% erreicht werden, wobei am Primärbrenner (d.h. ohne Altreifen) rd. 82% erreicht wurde.

Der durchschnittliche Heizwert am Primärbrenner lag bei 21,6 GJ/t<sub>Brennstoff</sub>, ein Wert der im unteren akzeptierbaren Bereich liegt (optimal wäre  $H_u > 22$  GJ/t<sub>Brennstoff</sub>). Der spezifische Energieverbrauch lag bei 3.530 MJ/t<sub>Klinker</sub>.

Nachfolgend werden der Brennstoffmix inkl. Altreifen (vgl. Abbildung 48) und der Brennstoffmix ohne Altreifen (vgl. Abbildung 49) sowie der zeitliche Verlauf des Brennstoffmischeinsatzes (vgl. Abbildung 50) präsentiert.

Wie aus Abbildung 48 ersichtlich, wurden im Versuchsbetrieb 2 im Zementwerk Retznei rd. 32% getrockneter EBS-DRY PREMIUM Quality eingesetzt. Wenn dabei nur die Brennstoffzusammensetzung am Primärbrenner betrachtet wird (d.h. ohne Altreifen, vgl. Abbildung 49), ergibt der Anteil an EBS-DRY PREMIUM Quality rd. 44%.

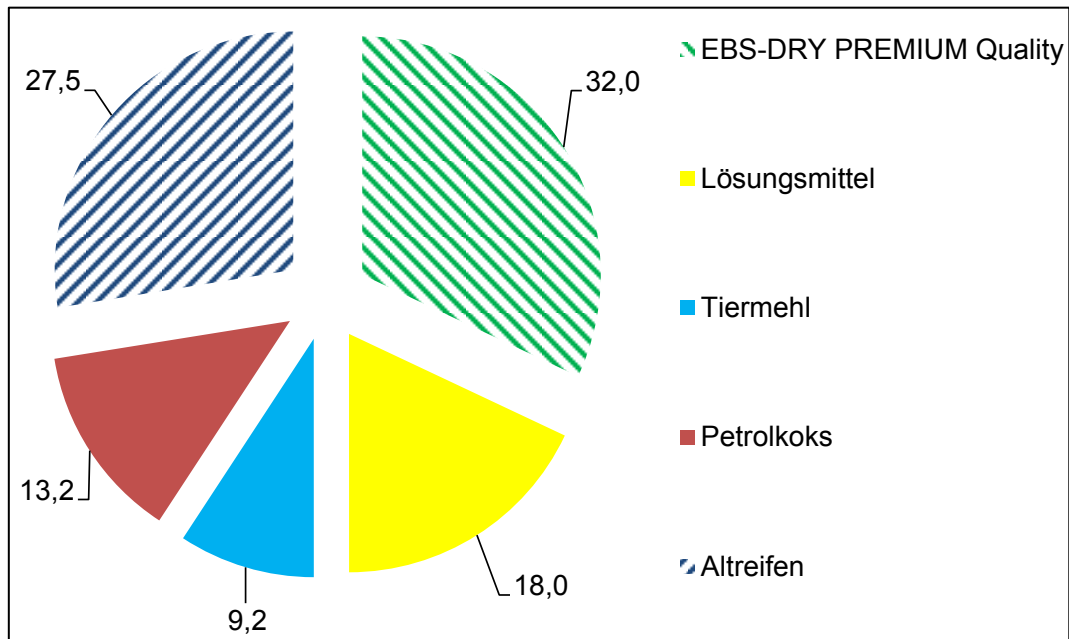


Abbildung 48: Endergebnis Versuch 2: Durchschnittlicher Brennstoffmix inkl. Altrefen (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge)

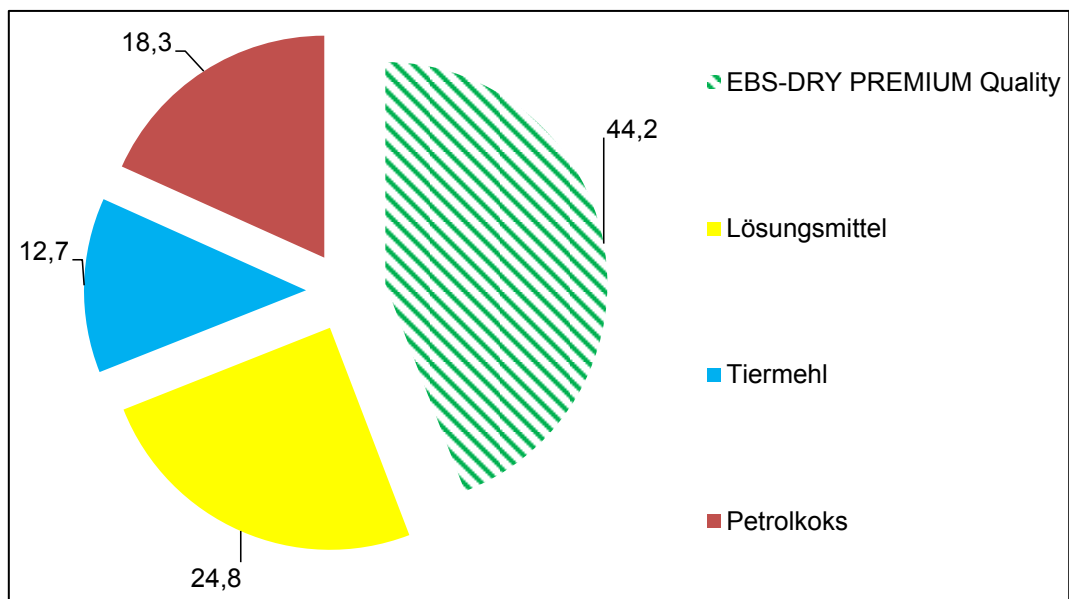


Abbildung 49: Endergebnis Versuch 2: Durchschnittlicher Brennstoffmix am Primärbrenner (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge)

In Abbildung 50 wird der zeitliche Verlauf des Brennstoffmix im Zementwerk Retznei dargestellt. Dabei werden zuerst die Daten aus dem Normalbetrieb (Zeitraum 28.11.2013 (06<sup>00</sup> h) bis 30.11.2013 (12<sup>00</sup> h) dargestellt und dann in weiterer Folge die Daten aus dem Versuchsbetrieb 2 (Zeitraum Versuchsbetrieb: 30.11.2013 (12<sup>00</sup> h) bis 2.12.2013 (21<sup>00</sup> h).

Wie ersichtlich, konnte im Versuchsbetrieb keine 100%-ige Substitution erzielt werden. Eine signifikante Änderung zum Normalbetrieb ist auch nicht zu erkennen.

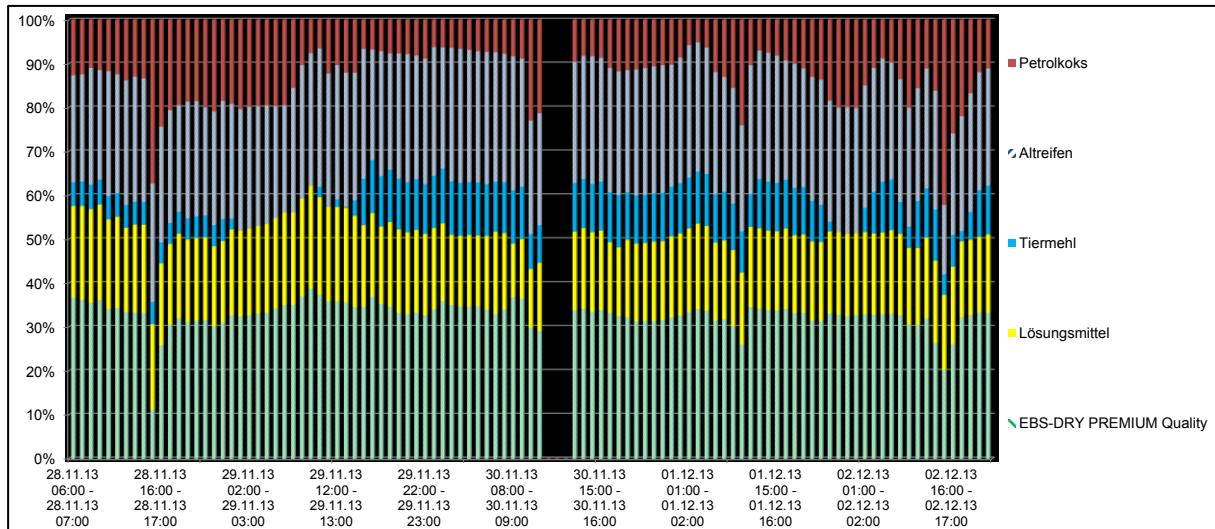


Abbildung 50: Endergebnis Versuch 2: Zeitlicher Verlauf des Brennstoffmischeinsatzes im Zementwerk Retznei (Zeitraum Normalbetrieb: 28.11.2013 (06<sup>00</sup> h) bis 30.11.2013 (12<sup>00</sup> h); Zeitraum Versuchsbetrieb: 30.11.2013 (12<sup>00</sup> h) bis 2.12.2013 (21<sup>00</sup> h); (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge)

- **Versuch 3: 12. Mai – 22. Juni 2014**

Bei der Erfassung und Auswertung der Daten aus dem Versuchsbetrieb 3 stand ausschließlich der Einsatz von Brennstoffen im Zementwerk Retznei im Vordergrund des Interesses, es wurden keine zusätzlichen Untersuchungen an der Anlage von ThermoTeam durchgeführt, sondern der übliche EBS PREMIUM Quality aus dem Normalbetrieb eingesetzt. Die Qualität vom EBS PREMIUM Quality, produziert im Normalbetrieb, ist in Kapitel 6.3 und in Tabelle 12 umfangreich beschrieben.

### **Einsatz von Substitutions-Brennstoffen als Mix im Zementwerk Retznei:**

Im Versuchsbetrieb 3 wurden zwischen fünf (vgl. Tabelle 15) und sechs (vgl. Tabelle 16) unterschiedliche Brennstoffe eingesetzt. Die Ergebnisse aus den vorhergehenden Versuchen haben gezeigt, dass für die Erreichung einer 100%-igen Substitutionsrate ein zusätzlicher Substitutions-Brennstoff benötigt wird, der stabile kalorische und brenntechnische Eigenschaften aufweist, die mit einem Regelbrennstoff (d.h. Kohle oder Petrolkoks) vergleichbar sind. Aus diesem Grund wurde ein neuer Ersatzbrennstoff (d.h. Reifenflusen) erstmalig im Versuch eingesetzt, der die Aufgabe eines Flammentemperatur- und Energiestabilisators übernimmt und damit anstatt von primären Energieträgern

verwendet werden kann. Vereinfacht dargestellt, bedeutet dies, dass die immer vorhandenen Schwankungen von EBS PREMIUM Quality und ähnlichen Ersatzbrennstoffen durch einen „stabilen“ Ersatzbrennstoff mit hohem und gleichmäßigem Heizwert ausgeglichen werden müssen.

Tabelle 15: Ergebnisse Versuch 3: Durchschnittlicher Brennstoffdurchsatz und thermische Substitutionsrate im Zementwerk Retznei im betrachteten Zeitraum von sechs Wochen (12.05. – 22.06.2014)

Brennstoffart	Durchschnittlicher Durchsatz		Minimaler Durchsatz	Maximaler Durchsatz
	[kg/h]	[MJ/h]	[kg/h]	[kg/h]
<b>EBS PREMIUM Quality</b>	2.591	52.436	80	3.399
<b>Lösungsmittel</b>	1.668	36.164	0	2.374
<b>Tiermehl</b>	598	10.763	0	996
<b>Reifenflusen</b>	820	23.834	0	2.024
<b>Altreifen</b>	1.672	45.131	1.122	1.882
<b>Petrolkoks</b>	624	19.030	0	3.687
<b>Summe</b>	7.972	187.359		
<b>Durchschnittliche Substitutionsrate (gesamt)</b>			[%]	<b>89,8</b>
<b>Durchschnittliche Substitutionsrate am Primärbrenner</b>			[%]	<b>86,6</b>

Wie aus Tabelle 15 ersichtlich, konnte über die gesamte Versuchszeit (d.h. 6 Wochen) eine durchschnittliche Substitutionsrate von rd. 90% erzielt werden, wobei an mehreren Tagen sogar eine **100%-ige Substitutionsrate** möglich war, wie aus dem „minimalen Durchsatz von Petrolkoks gleich Null“ hervorgeht. In den betrachteten 6 Wochen lag der durchschnittliche Heizwert am Primärbrenner bei  $22,6 \text{ GJ/t}_{\text{Brennstoff}}$ .

Nachfolgend werden der Gesamt-Brennstoffmix inkl. Altreifen (vgl. Abbildung 51) und der Brennstoffmix am Primärbrenner ohne Altreifen (vgl. Abbildung 52) dargestellt.

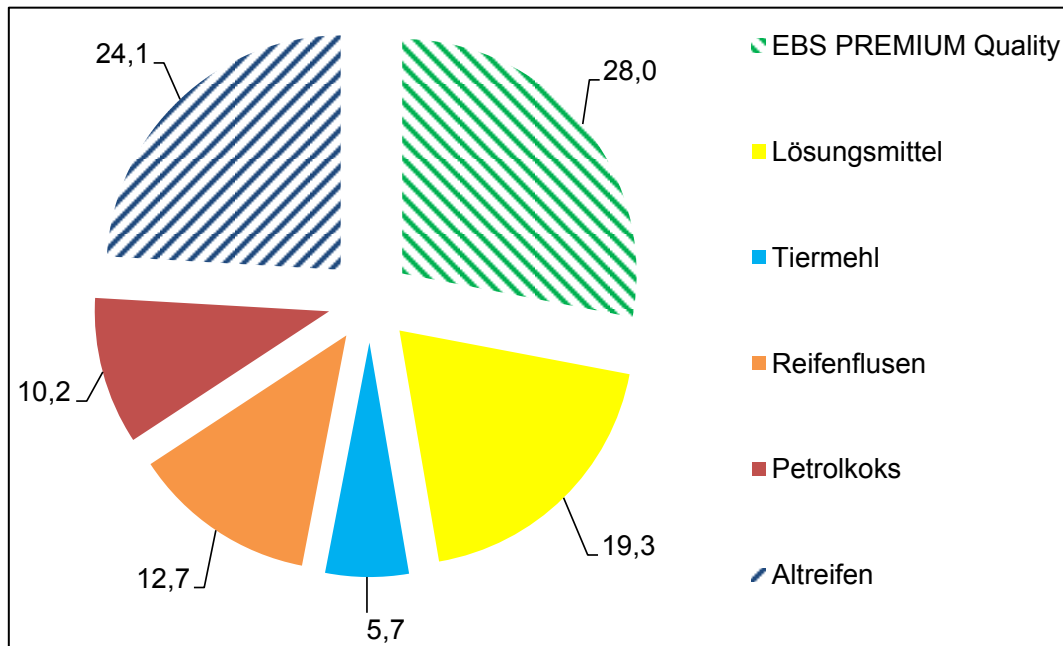


Abbildung 51: Endergebnis Versuch 3: Durchschnittlicher Brennstoffmix inkl. Altreifen (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge)

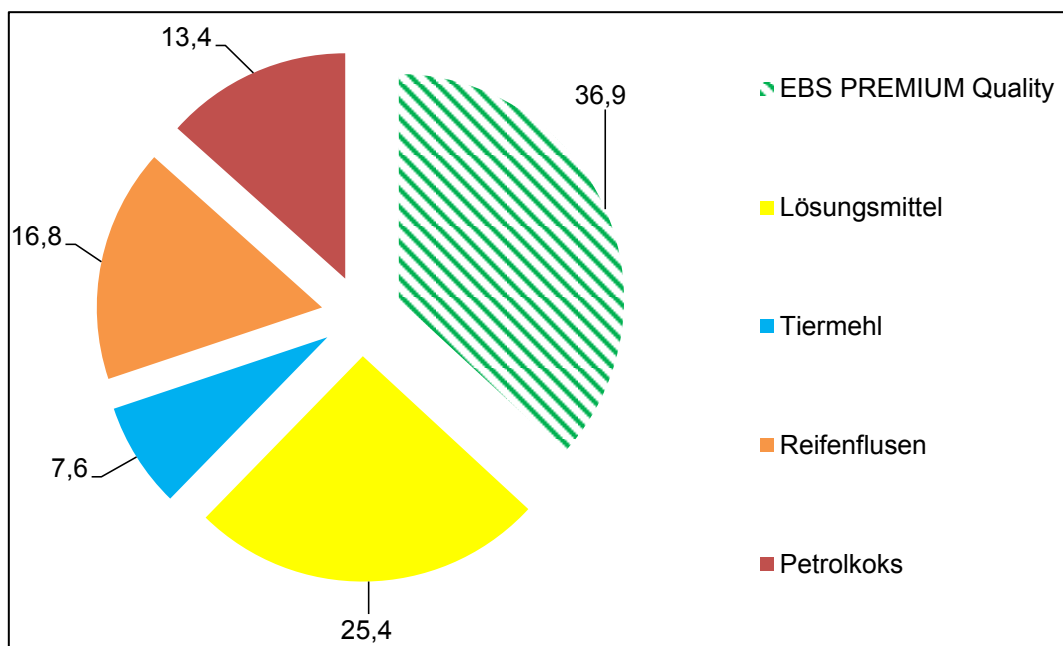


Abbildung 52: Endergebnis Versuch 3: Durchschnittlicher Brennstoffmix am Primärbrenner (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge)

Wie aus Abbildung 51 ersichtlich, wurden beim Versuch 3 energetisch betrachtet rd. 28% EBS PREMIUM Quality und rd. 13% Reifenflusen eingesetzt. Wenn nur der Brennstoffmix am Primärbrenner betrachtet wird, betrug der Anteil an EBS PREMIUM Quality rd. 37% und der energetische Anteil an Reifenflusen rd. 17% (vgl. Abbildung 52).



**100%-ige thermische Substitutionsrate im Zementwerk Retznei:**

Nachfolgend werden nur die Tage und Stunden des Versuchszeitraums (d.h. insgesamt 6 Wochen) betrachtet, an denen eine 100%-ige thermische Substitutionsrate im Zementwerk Retznei erzielt werden konnte. Dabei wurden insgesamt fünf Ersatzbrennstoffe verwendet mit denen am Primärbrenner die 100%-ige thermische Substitution erzielt werden konnte (vgl. Tabelle 16).

Tabelle 16: Ergebnisse Versuch 3: Durchschnittlicher Substitutions-Brennstoffdurchsatz für 100%-ige thermische Substitutionsrate im Zementwerk Retznei

Brennstoffart	Durchschnittlicher Durchsatz		Minimaler Durchsatz	Maximaler Durchsatz
	[kg/h]	[MJ/h]	[kg/h]	[kg/h]
<b>EBS PREMIUM Quality</b>	2.683	54.305	1.646	3.399
<b>Lösungsmittel</b>	1.657	35.932	1.237	2.227
<b>Tiermehl</b>	687	12.366	0	996
<b>Reifenflusen</b>	1.250	36.349	605	2.024
<b>Altreifen</b>	1.670	45.090	1.122	1.849
<b>Petrolkoks</b>	0	0	0	0
<b>Summe</b>	7.947	184.042		
<b>Durchschnittliche Substitutionsrate (gesamt)</b>			[%]	<b>100,0</b>
<b>Durchschnittliche Substitutionsrate am Primärbrenner</b>			[%]	<b>100,0</b>

Zum Zeitpunkt der 100%-igen thermischen Substitution lag der durchschnittliche Heizwert am Primärbrenner bei  $23,2 \text{ GJ/t}_{\text{Brennstoff}}$ , d.h. im optimalen Betriebsbereich, der bereits ab  $\geq 22 \text{ GJ/t}_{\text{Brennstoff}}$  vorliegt.

Nachfolgend werden der Gesamtbrennstoffmix inkl. Altreifen (vgl. Abbildung 53) bzw. Brennstoffmix am Primärbrenner ohne Altreifen (vgl. Abbildung 54) dargestellt.

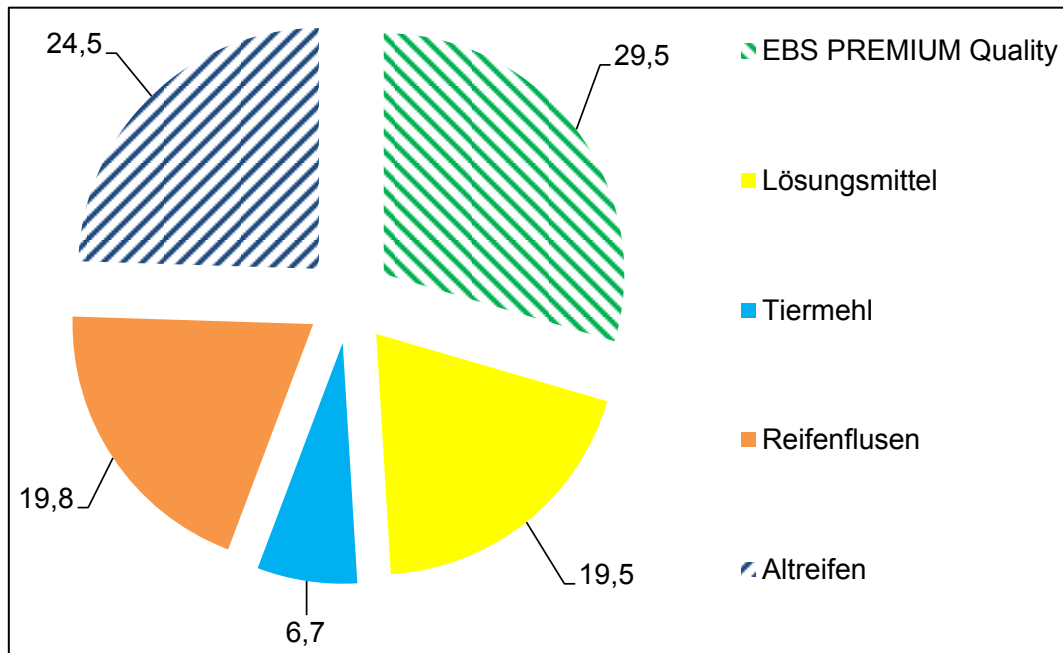


Abbildung 53: Endergebnis Versuch 3: Durchschnittlicher Brennstoffmix inkl. Altreifen bei der 100%-igen thermischen Substitution von primären Energieträgern (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge)

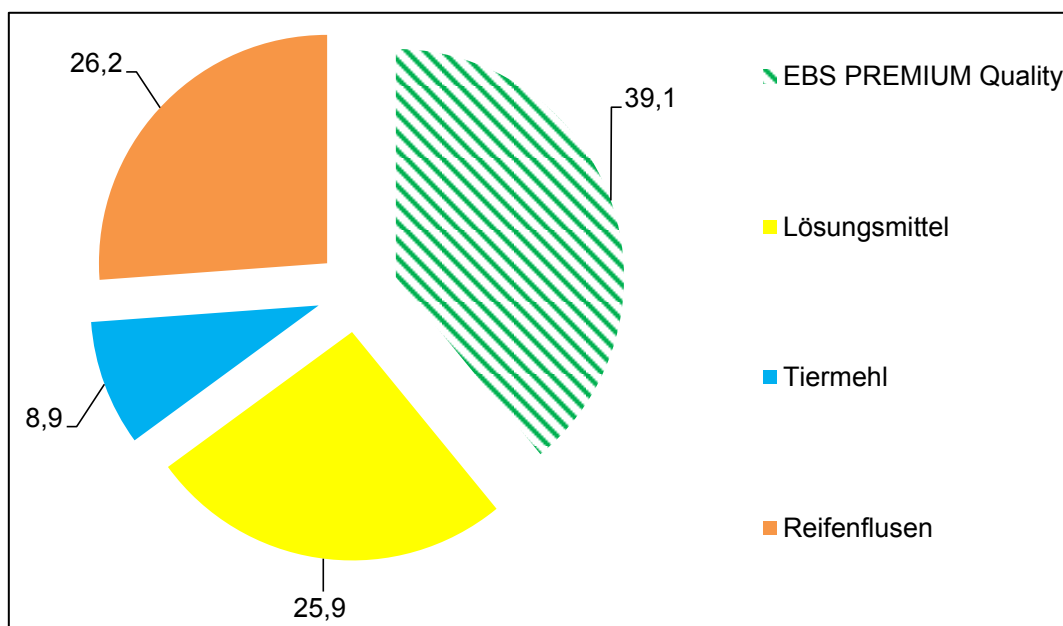


Abbildung 54: Endergebniss Versuch 3: Durchschnittlicher Brennstoffmix am Primärbrenner bei der 100%-igen thermischen Substitution von primären Energieträgern (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge)

Wie aus Abbildung 53 ersichtlich, wurde beim Betrieb mit 100%-iger thermischer Substitutionsrate die benötigte Energie zu 29,5% aus EBS PREMIUM Quality, zu 19,5% aus

Lösungsmittel, zu 6,7% aus Tiermehl, sowie zu 19,8% aus Reifenflusen und zu 24,5% aus Altreifen bereitgestellt.

Wird nur die Energiemenge am Primärbrenner betrachtet, so konnten 39,1% der Gesamtenergie aus EBS PREMIUM Quality (vgl. Abbildung 54) bereitgestellt werden.

In Abbildung 55 wird der zeitliche Verlauf des Brennstoffmixeinsatzes im Zementwerk Retznei für den betrachteten Zeitraum (12.05. (6<sup>00</sup> h) bis 22.5. (24<sup>00</sup> h) dargestellt. Wie ersichtlich, konnte im Versuchsbetrieb an mehreren Tagen die 100%-ige thermische Substitutionsrate erzielt werden. Die Richtigkeit der Überlegung, dazu einen neuen energiereichen Ersatzbrennstoff mit konstanter Zusammensetzung und stabilen Eigenschaften – d.h. wie hier gezeigt „Reifenflusen“ – einzusetzen, der einem konventionellen Regelbrennstoff in allen Aspekten gleichwertig ist, konnte damit in der Praxis erfolgreich bestätigt werden. Ob eine 100%-ige thermische Substitutionsrate in der Praxis im Dauerbetrieb auch wirtschaftlich sinnvoll ist, ist eine andere Frage.

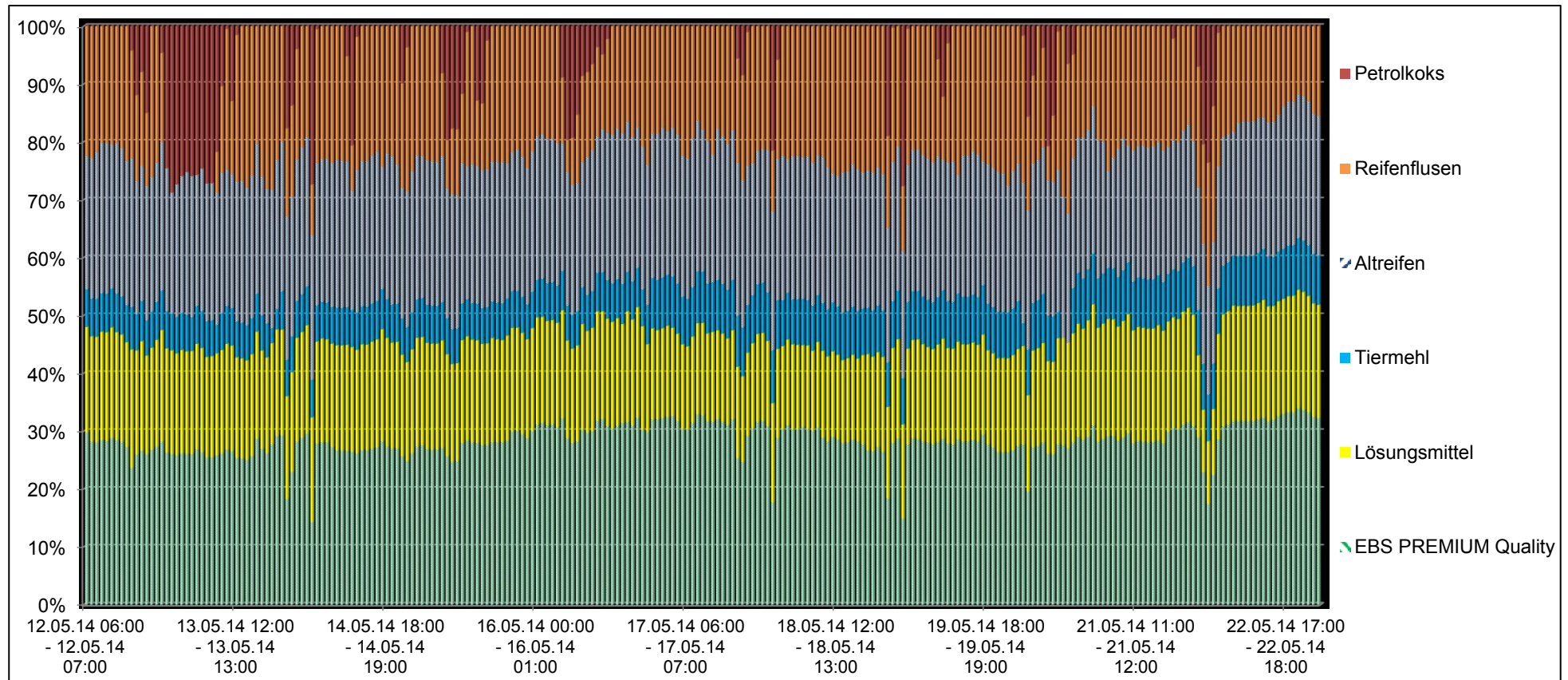


Abbildung 55: Endergebnis Versuch 3: 100%-ige thermische Substitutionsrate: Zeitlicher Verlauf des Brennstoffmixeinsatzes im Zementwerk Retznei (betrachteter Versuchsbetrieb-Zeitraum: 12.5.2014 (6<sup>00</sup> h) bis 22.5.2014 (24<sup>00</sup> h); in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge)

## 7 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Ersatzbrennstoffe (EBS) sind Abfälle, die zur Gänze oder in einem relevanten Ausmaß zum Zweck der Energiebereitstellung eingesetzt werden und die die Qualitätskriterien der österreichischen Abfallverbrennungsverordnung (AVV) erfüllen. Diese Qualitätskriterien sind die statistischen Grenzwerte, d.h. ausgedrückt als Median und 80-er Perzentil, für acht ausgewählte Schwermetalle (d.h. Sb, As, Pb, Cd, Cr, Co, Ni und Hg), deren Gehalt auf den Nettoheizwert [mg/MJ<sub>TM</sub>] des Brennstoffes bezogen ist.

Die Qualitätssicherung, u.a. zur Festlegung der EBS-Qualität, wird auch über die AVV geregelt, wobei zusätzlich auf ausgewählte Normen (z.B. ÖNORM EN 15442 „Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Probenahme“), die dadurch rechtsverbindlich gemacht werden, verwiesen wird. Diese Normen werden vom europäischen Technischen Komitee CEN/TC 343 – „Solid Recovered Fuels“ bzw. „Feste Sekundärbrennstoffe“ erarbeitet und vom Austrian Standards Institute in angepasster Form übernommen und veröffentlicht.

In Anlagen der Abfallwirtschaft werden unterschiedliche Arten, Mengen und Qualitäten von sekundären Roh- und Brennstoffen hergestellt. Ein wichtiger Bereich dieser Brennstoffe sind die oben beschriebenen qualitätsgesicherten EBS, die von der industriellen Produktionswirtschaft (im gegenständlichen Fall wird die Zementindustrie betrachtet) zur Substitution von primären Energieträgern eingesetzt werden. Neben den branchenspezifischen Risiken aber auch Chancen stellt die Festlegung und Absicherung der in der Praxis unter realen Bedingungen von der Abfallwirtschaft erreichbaren und von der industriellen Produktion geforderten EBS Qualität eine der wichtigsten Herausforderung dar.

In der Dissertation werden die Herstellung, Qualität, Qualitätssicherung und energetische Verwertung von EBS in Anlagen zur Zementerzeugung untersucht, beschrieben und diskutiert. Es werden drei Hauptarten von Ersatzbrennstoffen – „EBS LOW Quality“, „EBS MEDIUM Quality“ und „EBS PREMIUM Quality“ – betrachtet. Diese werden aus Siedlungsabfällen und/oder sonstigen nicht gefährlichen Abfällen (wie z.B. für das Recycling nicht geeignete Rückstände aus Sortieranlagen) in mechanischen Aufbereitungs- und EBS Herstellungsanlagen produziert. Die in dieser Arbeit betrachtete energetische Verwertung von „EBS LOW Quality“ erfolgt in einer Verbrennungsanlage mit Wirbelschichttechnologie und von „EBS MEDIUM Quality“ sowie „EBS PREMIUM Quality“ in einer Drehrohrofenanlage zur Zementerzeugung.

Neben den theoretischen Überlegungen wurden auch praxisbezogene wissenschaftliche Forschungsarbeiten an mehreren mechanischen Abfallaufbereitungsanlagen, einer spezialisierten EBS Produktionsanlage, einer Wirbelschichtverbrennungsanlage und zwei

Anlagen zur Zementerzeugung durchgeführt. Dazu wurden drei gezielte Forschungsfelder definiert und im Rahmen der gegenständlichen Dissertation näher untersucht:

1. Qualität und Qualitätssicherung von Ersatzbrennstoffen,
2. Technisches Konzept von EBS Produktionsanlagen,
3. 100%-ige Substitution von primären Energieträgern im Zementdrehrohrofen.

Des Weiteren wurden zu jedem o.a. Forschungsfeld dazugehörige Forschungsfragen formuliert (vgl. Kapitel 2.3.), denen nachfolgend die Antworten mit erzielten Ergebnissen gegenübergestellt werden.

## 7.1 Qualität und Qualitätssicherung von Ersatzbrennstoffen

Dazu werden im Rahmen der vorliegenden Dissertation folgende Fragen (1.1 und 1.2) untersucht, diskutiert und beantwortet:

### **Frage 1.1 Welche Qualität erreichen die fein- und grobkörnigen Ersatzbrennstoffe in der Praxis und ist diese Qualität vergleichbar mit der Qualität eines primären Energieträgers?**

In gegenständlicher Arbeit wurden insgesamt drei Ersatzbrennstoffarten – EBS LOW Quality, EBS MEDIUM Quality und EBS PREMIUM Quality – betrachtet.

Die Charakterisierung von einzelnen EBS kann zusammenfassend und vereinfacht über den Heizwert ( $H_u$  [MJ/kg<sub>OS</sub>], vgl. Tabelle 1) und die dazugehörige Korngröße ( $d_{95}$  [mm], vgl. Abbildung 17) erfolgen.

#### **EBS LOW Quality:**

EBS LOW Quality wird in einer Verbrennungsanlage mit Wirbelschichttechnologie eingesetzt und hat üblicherweise einen Heizwert von 8-12 MJ/kg<sub>OS</sub> und eine Korngröße ( $d_{95}$ ) bis 120 mm. Wie im Kapitel 6.1 dargestellt, sieht die Qualität (Mittelwerte) von EBS LOW Quality in der Praxis folgendermaßen aus:

Heizwert	( $H_u$ )	9,0 MJ/kg <sub>OS</sub> ,
Trockensubstanz	(TS)	73%,
Aschegehalt	(AG)	41%,
Chlorgehalt	(Cl)	9.300 mg/kg <sub>TM</sub> (d.h. 0,93% <sub>TM</sub> ).

Des Weiteren werden auch Schwermetallgehalte präsentiert, die aber zur Beantwortung von Frage 1.1 in der Praxis nicht relevant sind, da für den Einsatz von EBS LOW Quality

in einer Wirbelschichtverbrennungsanlage keine Qualitätskriterien gemäß AVV (vgl. Tabelle 3) einzuhalten sind.

#### **EBS MEDIUM Quality:**

EBS MEDIUM Quality wird in einer Drehrohrofenanlage zur Zementerzeugung in der **Sekundärfeuerung** eingesetzt und hat in der Praxis üblicherweise einen Heizwert von 12-18 MJ/kg<sub>OS</sub> und eine Korngröße ( $d_{95}$ ) bis 80 mm. In gegenständlicher Arbeit wurde ein EBS MEDIUM Quality untersucht und beschrieben, der in einer speziellen Vorbrennkammer (Hot Disc) eingesetzt wird und eine Korngröße ( $d_{95}$ ) bis 300 mm aufweist (vgl. Kapitel 6.2).

Die zusammenfassende Darstellung der realen Qualität von EBS MEDIUM Quality in der Praxis erfolgt in Tabelle 17, wobei Daten aus sieben unterschiedlichen Anlagen statistisch ausgewertet werden.

#### **EBS PREMIUM Quality:**

EBS PREMIUM Quality wird wie EBS MEDIUM Quality in einer Drehrohrofenanlage zur Zementerzeugung eingesetzt, aber nicht in der Sekundärfeuerung sondern in der **Primärfeuerung**. Üblicherweise hat dieser höherwertigere EBS in der Praxis einen Heizwert von 18-25 MJ/kg<sub>OS</sub> und eine Korngröße ( $d_{95}$ ) bis 30 (35) mm.

Die reale Qualität von EBS PREMIUM Quality in der Praxis geht aus Tabelle 17 hervor (Daten aus fünf unterschiedlichen Anlagen sind gezeigt). Des Weiteren werden in Tabelle 17 zum Vergleich auch zusammenfassende Daten aus den durchgeführten Untersuchungen in der EBS Produktionsanlage ThermoTeam (vgl. Tabelle 12) berichtet und ergänzend gezeigt.

Tabelle 17: Beantwortung Frage 1.1 – Zusammenfassende Darstellung der Qualität von EBS MEDIUM Quality und EBS PREMIUM Quality in der Praxis

Parameter	Einheit	EBS MEDIUM Quality		EBS PREMIUM Quality		EBS PREMIUM Quality ThermoTeam	
		vgl. Kapitel 6.2		vgl. Kapitel 6.2		vgl. Tabelle 12	
		Median	80-er Perzentil	Median	80-er Perzentil	Median	80-er Perzentil
<b>Energieinhalt und CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>							
H <sub>o</sub>	[MJ/kg <sub>TM</sub> ]	23,0	23,3	27,2	29,1	28,2	29,6
H <sub>u</sub>	[MJ/kg <sub>TM</sub> ]	21,2	21,4	25,0	26,6	26,0	27,3
H <sub>u</sub>	[MJ/kg <sub>OS</sub> ]	15,5	16,8	19,3	22,8	21,2	22,1
TC	[% <sub>TM</sub> ]	46,9	48,6	52,8	58,3	50,6	52,7
X <sub>B</sub> <sup>TC</sup>	[% <sub>TM</sub> ]	58,3	60,2	44,8	47,5	26,7	33,9
X <sub>NB</sub> <sup>TC</sup>	[% <sub>TM</sub> ]	41,7	49,5	55,2	68,2	73,3	78,8
X <sub>B</sub>	[% <sub>TM</sub> ]	53,6	55,8	46,2	48,7	38,4	40,1
X <sub>NB</sub>	[% <sub>TM</sub> ]	27,0	29,8	35,4	53,9	45,7	50,9
Spezifische gesamt CO <sub>2</sub> -Emissionen	[g <sub>CO2</sub> /MJ <sub>TM</sub> ]	83,9	86,3	80,9	82,3	71,3	72,3
Spezifische fossile CO <sub>2</sub> -Emissionen	[g <sub>CO2</sub> /MJ <sub>TM</sub> ]	34,5	41,3	43,2	55,7	49,5	56,1
<b>Brennstofftechnik und Massenbilanz</b>							
TS	[%]	75,0	81,2	84,9	89,1	83,2	86,0
WG	[%]	25,0	29,1	15,1	29,3	16,9	19,7
AG (815°C)	[% <sub>TM</sub> ]	17,2	19,5	14,2	16,6	15,3	16,5
AG (815°C)	[% <sub>OS</sub> ]	12,7	13,8	12,4	13,2	12,7	13,2
Cl	[mg/kg <sub>TM</sub> ]	10.800	22.200	13.800	17.100	10.750	13.800
Cl	[mg/kg <sub>OS</sub> ]	7.700	17.800	11.700	15.200	9.000	11.000
S	[mg/kg <sub>TM</sub> ]	3.400	4.600	3.300	4.500	1.700	1.900
H	[% <sub>TM</sub> ]	-	-	-	-	8,6	8,8
N	[% <sub>TM</sub> ]	-	-	-	-	0,8	0,8
<b>Rechtliche Anforderungen (AVV)</b>							
Sb	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	1,1	3,6	4,5	5,9	4,0	4,8
As	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	0,1	0,3	0,1	0,2	0,3	0,4
Pb	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	4,3	9,5	8,0	11,7	14,4	28,0
Cd	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	0,05	0,28	0,06	0,25	0,20	0,28
Cr	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	4,5	8,5	4,8	7,7	3,7	4,8
Co	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	0,2	0,4	0,2	0,4	1,0	2,7
Ni	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	0,8	1,9	0,7	1,2	1,7	2,0
Hg	[mg/MJ <sub>TM</sub> ]	0,047	0,052	0,040	0,072	0,015	0,021

Nachfolgend wird die Qualität von EBS MEDIUM Quality und EBS PREMIUM Quality mit der durchschnittlichen Qualität von Steinkohle verglichen und diskutiert.

- **Energieinhalt und CO<sub>2</sub>-Emissionen:**

Der Heizwert von **EBS MEDIUM Quality** liegt in der Praxis bei 15,5 MJ/kg<sub>OS</sub> (vgl. Tabelle 17), d.h. 1.000 kg EBS MEDIUM Quality sind vom Energieinhalt vergleichbar mit rd. 550 kg Steinkohle (Heizwert von Steinkohle beträgt 28,04 MJ/kg<sub>TM</sub>).

Während die **spezifischen fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen** von Steinkohle bei 98,3 g<sub>CO2</sub>/MJ<sub>TM</sub> liegen, werden durch die energetische Verwertung von EBS MEDIUM Quality nur rd. 35 g<sub>CO2</sub>/MJ<sub>TM</sub> an fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen freigesetzt, da der Anteil von biogenem, klimaneutralem Kohlenstoff (X<sub>B</sub><sup>TC</sup>) rd. 58%<sub>TM</sub> vom gesamten Kohlenstoff (TC) ausmacht.



Der Heizwert von **EBS PREMIUM Quality** liegt in der Praxis bei 19,3 bzw. in der Anlage ThermoTeam sogar bei 21,2 MJ/kg<sub>OS</sub> (vgl. Tabelle 17). Somit kann eine Tonne EBS PREMIUM rd. 700 kg Steinkohle energetisch ersetzen. Die spezifischen fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen von EBS PREMIUM Quality liegen zwischen 43 und 61 g<sub>CO2</sub>/MJ<sub>TM</sub>, was weiterhin eine Einsparung an fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber Steinkohle mit sich bringt.

- **Brennstofftechnik und Massenbilanz:**

Brennstofftechnik- und Massenbilanz-relevante Parameter sind vor allem: Wasser- (WG), Asche- (AG) und Chlorgehalt (Cl).

Der Wassergehalt beim EBS MEDIUM Quality liegt in der Praxis bei rd. 25% und beim EBS PREMIUM Quality bei rd. 15%. Interessant ist, dass bei beiden EBS Arten der Aschegehalt im selben Bereich, d.h. bei 15-17%<sub>TM</sub> liegt.

Der technische (Grenz-)Richtwert für die Chlorbelastung von EBS in der Zementindustrie liegt bei 1%<sub>OS</sub>. In der Praxis werden durchschnittliche Chlorgehalte in EBS MEDIUM Quality und EBS PREMIUM Quality zwischen 0,6 und 1,2%<sub>OS</sub> erreicht. Es muss dazu aber angemerkt werden, dass die vom Abfall-Input abhängigen Höchstwerte bei rd. 2-3%<sub>OS</sub> liegen und dass aus diesem Grund Maßnahmen, wie die Installation von NIR Sortiergeräten, zur Ausschleusung der PVC Fraktion sinnvoll sind und für jede EBS Produktionsanlage empfohlen werden können (vgl. Kapitel 6.3).

- **Rechtliche Anforderungen:**

Unter rechtliche Anforderungen werden hier die Grenzwerte nach AVV für Schwermetalle beim Einsatz von EBS in der Zementindustrie verstanden (vgl. Tabelle 3). Dazu ist in Abbildung 56 eine zusammenfassende Darstellung aller relevanten und in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse (vgl. Kapitel 6.2, 6.3 und 6.4) gegeben. Wie ersichtlich, beinhalten auch primäre Energieträger Lagerstätten-abhängig (im geg. Fall wird Steinkohle betrachtet) bestimmte Schwermetallgehalte, die durch energetische Verwertung bzw. den Klinkerherstellungsprozess in das System „Zementwerk“ eingetragen werden. Gleiches gilt für EBS MEDIUM Quality und EBS PREMIUM Quality, die abhängig vom Abfall-Input und Herstellungsprozess, einen bestimmten Anteil an Schwermetallen aufweisen. An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass nur der Einsatz von EBS in der Zementindustrie mit Qualitätskriterien bzw. Grenzwerten für Input und Output (Emissionen im Abgas und Schadstoffgehalte im Klinker) begrenzt ist, während der Einsatz von konventionellen primären Energieträgern wie Kohle nur Output-seitig begrenzt ist.

Ein direkter Vergleich der Schwermetallbelastung von Steinkohle und den betrachteten EBS (vgl. Abbildung 56) zeigt, dass die Höhe der Schadstoffbelastung weitgehend ähnlich ist bzw. in der gleichen Größenordnung liegt. Es gibt Schwermetalle, die einen deutlich höheren Gehalt in EBS haben (z.B. Sb und Cr), aber es gibt wiederum auch andere Schwermetalle (z.B. As, Cd, Hg), die stärker in Steinkohle vertreten sind. Die leicht- und mittelflüchtigen Schwermetalle (wie Sb, Cd, Hg und Pb), die einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Abgasemissionen haben können, liegen bei den konventionellen primären Energieträgern und bei EBS (mit Ausnahme von Sb) in vergleichbarer Größenordnung. Somit kann festgestellt werden, dass die Qualität von Substitutionsbrennstoffen wie EBS MEDIUM Quality und EBS PREMIUM Quality in Bezug auf Schwermetallgehalt vergleichbar mit der Qualität primärer Energieträger ist.

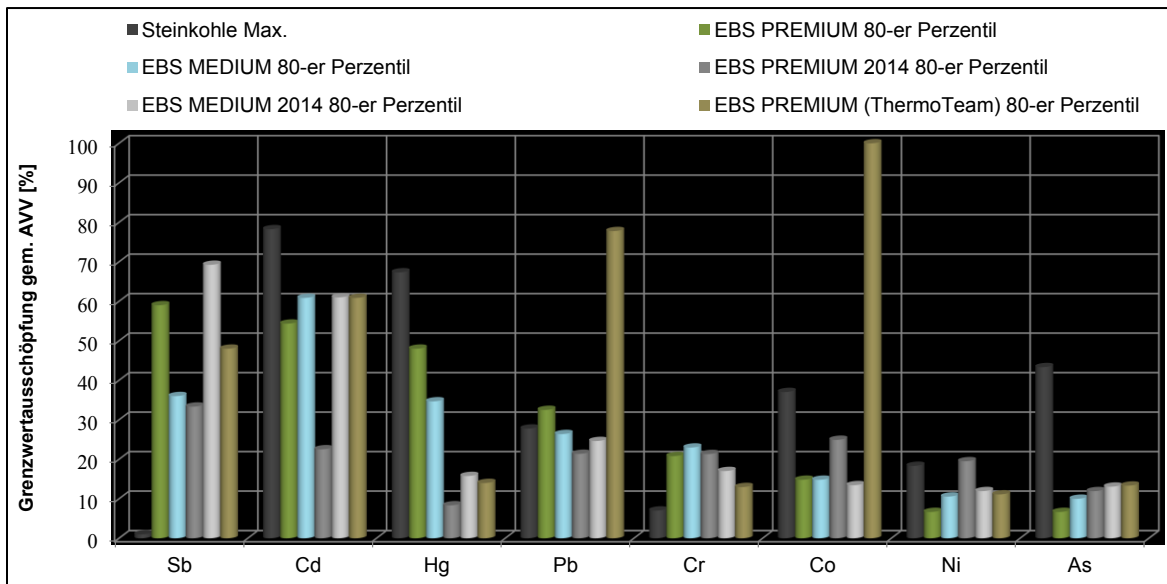


Abbildung 56: Beantwortung Frage 1.1 – Vergleichende Gegenüberstellung von Schwermetallgehalten in Steinkohle und in EBS MEDIUM Quality und EBS PREMIUM Quality (dargestellt als Grenzwertausschöpfung gemäß AVV (vgl. Tabelle 3), in [%])

### **Frage 1.2 Kann die reale Qualität von Ersatzbrennstoffen die derzeit gültigen rechtlichen Anforderungen erfüllen?**

Die derzeit in Österreich gültigen rechtlichen Anforderungen gemäß AVV (BMLFUW, 2002) sind die statistischen Grenzwerte, d.h. ausgedrückt als Median und 80-er Perzentil, für acht ausgewählte Schwermetalle (d.h. Sb, As, Pb, Cd, Cr, Co, Ni und Hg), deren Gehalt auf den Nettoheizwert [mg/MJ<sub>TM</sub>] des Brennstoffes bezogen ist. Die Untersuchungen im Rahmen der Dissertation zeigen, dass die Qualität von produzierten EBS im Wesentlichen von Herkunft und Art der Abfälle, die in die Behandlung gelangen, abhängt und im geringeren Ausmaß vom Umfang und Tiefe der mechanischen Aufbereitung beeinflusst wird. Der Vergleich von Schadstoffgehalten und Grenzwerten (vgl. Abbildung 56) verdeutlicht, dass die in der Zementindustrie eingesetzten EBS MEDIUM Quality und EBS PREMIUM Quality die derzeit gültigen rechtlichen Anforderungen erfüllen können.

Auch wenn die rechtlichen Anforderungen, statistisch gesehen, in der Praxis in den meisten Fällen erfüllt werden können, muss an dieser Stelle eine Besonderheit der Abfallwirtschaft erwähnt werden. Es ist allgemein bekannt, dass die Streuung von Analysewerten in Abfallproben aufgrund der inhomogenen Zusammensetzung bzw. Dissipation von Schwermetallen usw. teilweise bis zu 100% und mehr betragen kann, was durch die dargestellten Ergebnisse in Tabelle 7 und Tabelle 12 bekräftigt wird. Den wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Streuung hat die Repräsentanz der Probenahme, insbesondere von grobstückigen EBS. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle dringend empfohlen, die Qualitätssicherung (insbesondere von grobstückigen EBS, d.h. EBS MEDIUM Quality) in der Praxis in einem umfangreichen Ausmaß und gemäß Stand der Technik durchzuführen.

## 7.2 Technisches Konzept von EBS Produktionsanlagen

**Frage 2.1** Kann die Qualität von Ersatzbrennstoffen weiter gesteigert werden, um die thermische Substitutionsrate von EBS in der Zementindustrie in Richtung 100% zu erhöhen?

Die im Rahmen der gegenständlichen Arbeit erzielte Qualitätssteigerung von EBS PREMIUM Quality wird auf drei wichtigste Aspekte zurückgeführt:

- **Energieinhalt und Wassergehalt:**

Der energetische Anteil von EBS PREMIUM Quality an der gesamten thermischen Substitutionsrate am Primärbrenner lag bei den durchgeführten Versuchen (vgl. Kapitel 6.4) zwischen 37 und 51% (vgl. Tabelle 18). Wie in Tabelle 18 dargestellt, betrug der durchschnittliche Heizwert von EBS PREMIUM Quality etwa 21 bis 22 MJ/kg<sub>OS</sub> bzw. nach der biologischen Trocknung (Versuch 2) ca. 25 MJ/kg<sub>OS</sub>. Der durchschnittliche Wassergehalt lag bei 15%. Aufgrund der Tatsache, dass am Primärbrenner der Heizwert des eingesetzten Brennstoffmix mindestens 22 MJ/kg<sub>OS</sub> betragen muss, ist ersichtlich, dass ohne einer weiteren Behandlung (z.B. Trocknung zur Verringerung des Wassergehaltes, weitere Nachzerkleinerung mit Absiebung der Feinfraktion (< 6,3 (5) mm)) oder Einsatzes eines energiereicheren Mix (z.B. Zusatz von Reifenflusen mit höherem Heizwert) der in der Praxis vorhandene EBS PREMIUM Quality dieser Anforderung alleine nicht nachkommen kann.

Tabelle 18: Beantwortung Frage 2.1 – Zusammenfassende Darstellung der wichtigsten Kennzahlen von EBS PREMIUM Quality aus den 100% - Substitutionsversuchen 1-3

Versuchsnummer	EBS PREMIUM Quality			Heizwert des Brennstoffmix am PB [MJ/kg <sub>OS</sub> ]
	Heizwert (Mittelwert) [MJ/kg <sub>OS</sub> ]	Wassergehalt (Mittelwert) [%]	Energetischer Anteil am EBS Mix am PB [%]	
<b>Versuch 1 (2D-EBS-NEW PREMIUM Quality)</b>	21,2	15,5	51	21,8
<b>Versuch 2 (EBS-DRY PREMIUM Quality)</b>	24,9	12,5	44	21,6
<b>Versuch 3* (EBS PREMIUM Quality)</b>	21,2	16,7	37	22,6
<b>Versuch 3* – 100%</b>	21,2	16,7	39	23,2

\*Anmerkung: Reifenflusenzusatz im Versuch 3

- **Chlorgehalt:**

Der Chlorgehalt im EBS stellt eine kritische Größe im Klinkerherstellungsprozess dar. Die in dieser Arbeit erzielten und berichteten Ergebnisse aus großtechnischen Versuchen (vgl. Tabelle 6) zeigen eindeutig, dass durch die Installation von NIR Sortiergeräten zur Ausschleusung der PVC Fraktion bei der EBS Herstellung der durchschnittliche Chlorgehalt im Output (d.h. EBS PREMIUM Quality) um rd. 25-30% verringert werden kann. Eine weitere festgestellte Tatsache ist, dass dabei gleichzeitig auch das 95% Konfidenzintervall um rd. 30-35% verringert wird. Somit kann in der Praxis gewährleistet werden, dass die Häufigkeit der auftretenden Chlorspitzenwerte verringert bzw. diese gekappt werden und dass dadurch die thermische Substitutionsrate am Primärbrenner mittels EBS PREMIUM Quality erhöht werden kann.

- **Schwermetallgehalt:**

Bei der Qualitätsverbesserung von EBS durch Ausschleusung bzw. Absiebung von Fraktionen, die erhöhte Schwermetallgehalte aufweisen, sind zwei Aufbereitungsschritte zu betrachten:

- **Sortierung** durch gezielte Ausschleusung von PVC und PET Fraktion zur Verringerung des Antimongehaltes:

Die Ergebnisse aus großtechnischen Versuchen und Untersuchungen (vgl. Tabelle 6) zeigen, dass durch die Ausschleusung der PVC und PET Fraktion mittels NIR Sortiergeräten eine rd. 20%-ige Verringerung der Antimonkonzentration im produzierten EBS PREMIUM Quality erzielt werden kann.

- **Klassierung** durch Absiebung der Feinfraktion (< 6,3 mm) zur allgemeinen Verringerung des durchschnittlichen Gehalts an Schwermetallen:

Basierend auf Ergebnissen aus labortechnischen Untersuchungen (vgl. Tabelle 7 und Abbildung 37) wird in gegenständlicher Arbeit erstmalig eine Abschätzung von Transferkoeffizienten für unterschiedliche Parameter vorgenommen, die bei der Klassierung der EBS-Originalprobe einerseits in die Fraktion < 6,3 mm und andererseits in die Fraktion > 6,3 mm übergehen. Für den Parameter Schwermetalle (d.h. Mittelwert der acht ausgewählten Schwermetallen, die gemäß AVV begrenzt sind) wird der Transferkoeffizient mit rd. 50% abgeschätzt, d.h. durch Absieben der Feinfraktion (< 6,3 mm), die einen durchschnittlichen Massenanteil von 25-30% (vgl. Abbildung 37) hat, kann der verbleibende EBS-(6,3-30 mm) PREMIUM Quality um rd. 50% der relevanten Schwermetalle entfrachtet werden.

Abschließend kann mit Sicherheit festgestellt werden, dass die Qualität von EBS PREMIUM Quality durch zusätzliche Aufbereitungsschritte an der EBS Produktionsanlage innerhalb bestimmter Grenzen weiter gesteigert werden kann, was durch neue Ergebnisse, die im Rahmen dieser Arbeit gewonnen wurden, bestätigt wird.

### **Frage 2.2      Wie kann die erzielte Qualitätssteigerung konkret in einer EBS-Produktionsanlage nachgewiesen werden?**

In der Dissertation wurden umfangreiche praxisbezogene Untersuchungen an konkreten EBS PREMIUM Quality produzierenden Anlagen durchgeführt. Diese Untersuchungen fanden im Zeitraum 2011 bis August 2014 statt. Dabei wurden sowohl Massen- und Stoffbilanzen für einzelne Prozessschritte erstellt, als auch Qualitätssicherungskonzepte entwickelt und umgesetzt und dadurch umfangreiches Datenmaterial generiert. Aufgrund der bereits in der Antwort auf Frage 1.2 erwähnten Streuung der Analysewerte in Proben aus der Abfallwirtschaft ist es wichtig, umfangreiche Datensätze von Ergebnissen über längere Zeit zu generieren, damit eine statistisch abgesicherte, zuverlässige Auswertung der Daten und Interpretation der Ergebnisse möglich ist. Ein für die Praxis tauglicher Nachweis der Qualitätssteigerung in einer EBS Produktionsanlage kann erfahrungsgemäß mittels

- Qualitätssicherung nach dem Stand der Technik,
- Massenbilanzen,
- Stoffflussanalysen zur Bilanzierung der einzelnen Stoffe (z.B. Cl, Sb usw.) und
- statistischen Analysen

im ausreichenden Maße qualitativ erbracht werden.

Diese konkrete Vorgehensweise zum Nachweis einer Qualitätssteigerung von produziertem EBS wurde in gegenständlicher Arbeit angewendet. Die dabei erzielten Ergebnisse lassen den Rückschluss zu, dass die angewendeten Methoden als ein praktikables Mittel zum Nachweis einer Qualitätssteigerung von EBS gelten können.

## 7.3 100%-ige Substitution von primären Energieträgern im Zementdrehrohrofen

### Frage 3.1 Kann bzw. wie kann eine 100%-ige Substitutionsrate von primären Energieträgern im Zementdrehrohrofen erreicht werden, wenn vorrangig feste EBS eingesetzt werden?

Die großtechnischen Versuche zur 100%-igen Substitution wurden im Zementwerk der Lafarge Zementwerke GmbH am Standort Retznei durchgeführt. Der Einsatz von EBS im Zementwerk Retznei erfolgt am ofenauslaufseitig situierten Primärbrenner und über eine spezielle Aufgabeneinrichtung beim Ofeneinlauf (für die Aufgaben von ganzen Altreifen).

Die im Versuchsbetrieb 3 erzielten Ergebnisse (vgl. Abbildung 53, Abbildung 54 und Abbildung 55) bestätigen, dass eine 100%-ige thermische Substitution im Zementdrehrohrofen mit vorrangig festen EBS prinzipiell erreicht werden kann, ohne einer beobachteten negativen Auswirkung auf die Qualität des produzierten Klinkers oder auf die Emissionen im Abgas. Dazu wurden im Versuchsbetrieb 3 bei der erzielten 100%-igen thermischen Substitution von primären Energieträgern folgende Ersatzbrennstoffe (Angaben bezogen auf Gesamtenergiemenge) verwendet:

- **Feste Ersatzbrennstoffe:**
  - EBS Premium Quality: 29,5%,
  - Tiermehl: 6,7%,
  - Reifenflusen: 19,8%,
  - Altreifen: 24,5%.
  - Gesamt: 80,5%**
  
- **Flüssige Ersatzbrennstoffe:**
  - Lösungsmittel: 19,5%

Der **Anteil an festen EBS** bei der erzielten 100%-igen thermischen Substitutionsrate lag demnach bei **80,5%**.

Die im o.a. Versuchsbetrieb erzielte 100%-ige thermische Substitution muss noch aus unterschiedlichen Sichtweisen diskutiert werden, bevor ein Einsatz im Routinebetrieb erfolgen kann. So ist festzustellen, dass ein Zementwerk ab ca. 80%-iger Gesamtsubstitution (inkl. > 30% EBS PREMIUM Quality) mit dem Problem „Wassergehalt“ in EBS PREMIUM Quality zu kämpfen hat, das auch in gegenständlicher Arbeit aufgetreten ist. Der Wassergehalt im EBS PREMIUM Quality hat eine direkte

Auswirkung auf den Heizwert und somit auch auf die Flammentemperatur (und deren Schwankungen) sowie die eingebrachte Energiemenge pro Tonne Brennstoff ( $[\text{GJ}/t_{\text{Brennstoff}}]$ ). Zudem ist festzustellen, dass auch die Korngröße und -form eine wesentliche Rolle beim Ausbrandverhalten von EBS spielen und aus diesem Grund insbesondere 3D Materialien im EBS PREMIUM Quality ausreichend zerkleinert ( $< 10 \text{ mm}$ ) werden müssen.

Unmissverständlich muss angemerkt werden, dass die 100%-ige thermische Substitution unter den angeführten Bedingungen im Werk Retznei nicht durch eine weitere Erhöhung des Anteiles an EBS PREMIUM Quality erreicht worden ist, so wie es am Anfang der Arbeit geplant war, sondern durch eine Optimierung des eingesetzten Mix an verschiedenen Substitutionsbrennstoffen. Im Zementwerk Retznei wird als primärer Energieträger Petrolkoks mit einem durchschnittlichen Heizwert von  $30,5 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{OS}}$  verwendet. D.h. ab einer thermischen Substitutionsrate von 90-95% musste dieser hochkalorische primäre Energieträger mit einem (hinsichtlich Heizwert und Homogenität) vergleichbaren Ersatzbrennstoff (z.B. Lösungsmittel, Altöl, Reifenflusen usw.) substituiert werden, damit letztendlich die Substitutionsrate 100% zu erreichen war. Dazu wurden im Versuchsbetrieb erfolgreich Reifenflusen eingesetzt, die sich durch geringe Korngröße ( $d_{95} < 5 \text{ mm}$ ), hohen und stabilen Heizwert ( $> 29 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{OS}}$ ) sowie sehr niedrigen Wassergehalt ( $< 3\%$ ) auszeichnen. Die Versuchsergebnisse und die daraus gewonnenen neuen Erkenntnisse zeigen, dass die letzten Prozente zur Erreichung der 100%-igen thermischen Substitution im Klinkerherstellungsprozess nur durch den Einsatz hochwertiger Substitutionsbrennstoffe realisiert werden können, damit alle Qualitätsschwankungen, die mit dem Einsatz von EBS PREMIUM Quality verbunden sind, kompensiert und stabilisiert werden können. Dazu wird ein hochwertiger Ersatzbrennstoff (d.h. Reifenflusen) als „Flammentemperatur- und Energiestabilisator“ des primärenergieträgerfreien Klinkerherstellungsprozesses benötigt.



## 8 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Auf Basis der Erkenntnisse dieser Dissertation werden nachfolgend weitere Forschungsfragen gestellt bzw. weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt:

- **EBS Herstellung:**

- Weitere Optimierungen der Aufbereitungstechnologie zur Qualitätsverbesserung und Homogenisierung der EBS Qualität:

EBS MEDIUM bzw. EBS PREMIUM Quality weisen derzeit zwar eine relativ hohe Qualität auf, die aber trotz moderner Produktionsanlagen immer noch große Schwankungen zeigt. Weiterer Forschungsbedarf liegt im Bereich der Aufbereitungstechnologie, damit diese EBS-spezifischen Schwankungen auf ein akzeptables Niveau gebracht werden können, ähnlich wie bei herkömmlichen primären Brennstoffen.

- Trocknung von EBS:

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass die biologische Trocknung leider nur marginale Auswirkungen auf die Qualitätsverbesserung von EBS PREMIUM Quality hat. Weiterer Forschungsbedarf liegt im Bereich der biologischen Trocknung von EBS LOW und EBS MEDIUM Quality sowie im Bereich der mechanisch-physikalischen Trocknung von EBS zur Verbesserung der brenntechnischen Eigenschaften. Im Rahmen der Trocknungsversuche soll das Verhalten und Abscheiden von leichtflüchtigen Verbindungen wie Quecksilber mituntersucht werden.

- Nachzerkleinerung von EBS:

Der Einsatz von EBS PREMIUM Quality am Primärbrenner in der Zementindustrie ist weiterhin mit unterschiedlichen Herausforderungen (z.B. Brennverhalten) verbunden. Eine bessere und vollständigere Verbrennung könnte erwartungsgemäß mit feinerem (< 15 (20) mm) Fluff-artig aufbereiteten (d.h. große spezifische Oberfläche) EBS PREMIUM Quality Sorten erfolgen. Weiterer Forschungsbedarf liegt im Bereich der Aufschlusszerkleinerung und Konfektionierung.

- **Qualität von Ersatzbrennstoffen:**

- Klassierung von EBS PREMIUM Quality durch Absieben der Feinfraktion:

In gegenständlicher Arbeit sind erste Ergebnisse vorgestellt worden, die zu einer ersten Abschätzung von Transferkoeffizienten herangezogen wurden. Weiterer Forschungsbedarf liegt in der exakten Bestimmung von Transferkoeffizienten für verschiedene Korngrößen-Fraktionen und deren Verwertungsmöglichkeiten sowie der Berechnung der Wirtschaftlichkeit bei großtechnischer Umsetzung.

- Zusammenhänge und Korrelationen zwischen Schad- bzw. Störstoffen und brennstofftechnischen Parametern:

Wie in der Arbeit extensiv dargestellt, sind in EBS unterschiedliche Schad- bzw. Störstoffe (z.B. Schwermetalle, Chlor, Schwefel usw.) vorhanden. Weiterer Forschungsbedarf liegt in der Untersuchung und im Verstehen von (möglichen) Zusammenhänge bzw. Korrelationen (z.B. Chlorgehalt und Heizwert), die bei der Optimierung und Konfektionierung von EBS zu berücksichtigen sind.
- **EBS Qualitätssicherung:**
  - Automatisierung der Qualitätssicherung:

Ein aufzuzeigender Forschungsbedarf im Bereich der Qualitätssicherung von EBS liegt mit Sicherheit in der Modernisierung, d.h. Automatisierung der Qualitätssicherungsprozesse (insbesondere Probenahme, Verjüngung bis hin zur Gewinnung der Testprobe). Der Bedarf einer automatisierten Standardanlage in der Praxis ist groß, da häufig mehrere unterschiedliche Lieferanten ein und dasselbe Zementwerk beliefern.
  - „On-line-Analytik“:

Ein weiterer Aspekt, der zu untersuchen wäre, ist der Einsatz einer modernen, digitalen „On-line-Analytik“ für EBS, mit der z.B. ausgewählte Parameter direkt vor dem Einsatz im Verbrennungsprozess gemessen werden können, wodurch der Verbrennungs- aber auch Klinkerherstellungsprozess besser gesteuert und optimiert werden kann.
- **EBS Verwertung in der Zementindustrie:**
  - Transferkoeffizienten von Schwermetallen, Cl, S usw.:

Wie in der Arbeit gezeigt, beinhalten EBS unterschiedliche Schadstoffe, die durch die energetische Verwertung in das System „Zementwerk“ eingebracht werden. Wie sich dabei die Schadstoffe im Klinkerherstellungsprozess verhalten, ist nach wie vor nicht ausreichend untersucht und bekannt. Daher gibt es Forschungsbedarf im Bereich Bestimmung von prozessspezifischen Transferkoeffizienten mit deren Hilfe Verteilungsverhalten und Verbleib (Klinker, Abgas etc.) in Abhängigkeit von Prozess-Parametern berechnet werden kann.
  - 100%-ige thermische Substitution:

Wenn im Rahmen der gegenständlichen Arbeit eine 100%-ige Substitution erreicht werden konnte, wird dadurch „nur“ gezeigt, dass es technisch prinzipiell möglich ist, mit einem geeigneten EBS-Mix hochwertigen Klinker herzustellen. Hier besteht aber weiterhin Forschungsbedarf, damit der Versuchsbetrieb schlussendlich in einen

Routinebetrieb übergeführt werden kann, wobei die Optimierung des EBS-Mix einen wichtigen Schritt darstellt.

○ „Neuer“ Brenner für die Primärfeuerung:

Da die derzeit im Einsatz befindlichen Brenner der Primärfeuerung in der Zementindustrie für den Einsatz von konventionellen Energieträgern (und einigen wenigen EBS Sorten) ausgelegt sind, besteht akuter Forschungsbedarf im Bereich der Entwicklung eines „neuen“ Brenners für einen EBS-Mix zur 100%-igen Substitution.

Abschließend kann festgestellt werden, dass das Thema: „EBS Herstellung, Qualität, Qualitätssicherung und Verwertung in der Zementindustrie“ bei weitem noch nicht abgeschlossen ist. Trotz der in dieser Arbeit erzielten neuen Ergebnisse und Erkenntnisse wird dieses Thema auch in Zukunft ein spannendes Forschungsfeld in Wissenschaft und Praxis bleiben.

## 9 Verzeichnisse

### 9.1 Literatur

- ASI (Austrian Standards Institute) (2005) ÖNORM S 2096-1:2005 01 01 – Stoffflussanalyse – Teil 1: Anwendung in der Abfallwirtschaft – Begriffe. Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2010) ÖNORM EN 15401: 2010 08 15 – Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung der Schüttdichte. Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2011a) ÖNORM EN 15357: 2011 05 01 – Feste Sekundärbrennstoffe – Terminologie, Definitionen und Beschreibungen. Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2011b) ÖNORM EN 15358: 2011 05 15 – Feste Sekundärbrennstoffe – Qualitätsmanagementsysteme – Besondere Anforderungen für die Anwendung bei der Herstellung von festen Sekundärbrennstoffen. Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2011c) ÖNORM EN 15359: 2011 12 15 – Feste Sekundärbrennstoffe – Spezifikationen und Klassen. Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2011d) ÖNORM EN 15400: 2011 05 15 – Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung des Brennwertes. Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2011e) ÖNORM EN 15402: 2011 05 15 – Feste Sekundärbrennstoffe – Bestimmung des Gehaltes an flüchtigen Substanzen. Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2011f) ÖNORM EN 15403: 2011 05 15 – Feste Sekundärbrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes. Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2011g) ÖNORM EN 15407: 2011 05 01 – Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung des Gehaltes an Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Stickstoff (N). Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2011h) ÖNORM EN 15408: 2011 05 01 – Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung des Gehaltes an Schwefel (S), Chlor (Cl), Fluor (F) und Brom (Br). Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2011i) ÖNORM EN 15410: 2011 12 15 – Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung des Gehaltes an Hauptelementen (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, Si, Ti). Wien, Österreich.

- ASI (Austrian Standards Institute) (2011j) ÖNORM EN 15411: 2011 10 15 – Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung des Gehalts an Spurenelementen (As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Ti, V und Zn). Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2011k) ÖNORM EN 15413: 2011 10 15 – Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Herstellung der Versuchsprobe aus der Laboratoriumsprobe. Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2011l) ÖNORM EN 15414-3: 2011 05 01 – Feste Sekundärbrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes unter Verwendung des Verfahrens der Ofentrocknung – Teil 3: Wassergehalt in gewöhnlichen Analysenproben. Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2011m) ÖNORM EN 15415-1: 2011 10 15 – Feste Sekundärbrennstoffe – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung – Teil 1: Siebverfahren für kleine Partikel. Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2011n) ÖNORM EN 15440: 2011 12 15 – Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung des Gehaltes an Biomasse. Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2011o) ÖNORM EN 15442: 2011 05 01 – Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Probenahme. Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2011p) ÖNORM EN 15443: 2011 05 15 – Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Herstellung von Laboratoriumsproben. Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2011q) ÖNORM EN 15590: 2011 10 15 – Feste Sekundärbrennstoffe – Bestimmung des aktuellen Grades der aeroben mikrobiellen Aktivität mittels des realen dynamischen Respirationsindexes. Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2012a) ÖNORM EN 15415-2: 2012 05 15 – Feste Sekundärbrennstoffe – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung – Teil 2: Manuelles Verfahren zur Bestimmung der größten projizierten Länge für große Partikel. Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2012b) ÖNORM EN 15415-3: 2012 05 15 – Feste Sekundärbrennstoffe – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung – Teil 3: Bildanalysenverfahren für große Partikel. Wien, Österreich.
- ASI (Austrian Standards Institute) (2015) Online im WWW unter URL: <https://www.austrian-standards.at/home/>. Abgerufen am 5.1.2015.

- Beckmann, M. & Horeni, M. (2002) Bewertungskriterien für den Einsatz von Sekundärbrennstoffen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung, 7. Fachtagung. Berlin, 2002. Neuruppin: TK-Verlag Thomé-Kozmiensky, 2002. S. 154-174. ISBN 3-934253-09-1.
- Beckmann, M., Horeni, M., Scholz, R. & Rüppel, F. (2003) Notwendigkeit der Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen. In: Ersatzbrennstoffe 3 – Immissions- und Gewässerschutz, Qualitätssicherung, Logistik und Verwertung, Deponierung der Schwerfraktion. S. 213-230. ISBN 3-935317-15-8.
- Beckmann, M., Pohl, M. & Ncube, S. (2007) *Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen hinsichtlich brennstofftechnischer Eigenschaften*. In: Thomé-Kozmiensky, K. und Beckmann, M.; Energie aus Abfall, Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Seite 203 – 218. ISBN 978-3-935317-30-6.
- Beckmann, M., Pohl, M., Bernhardt, D. & Gebauer, K. (2012) Criteria for solid recovered fuels as a substitute for fossil fuels – a review. In: Waste Management & Research 30 (4). DOI: 10.1177/0734242X12441237. S. 354-369.
- BGS (Gütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz e.V.) (2015) Online im WWW unter URL: <http://www.bgs-ev.de/index.php?id=9>. Abgerufen am 19.1.2015.
- BKAOE (Bundeskanzleramt Österreich) (2002) Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002). Wien. Fassung vom 5.1.2015.
- BMLFUW (2002) Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend über die Verbrennung von Abfällen (Abfallverbrennungsverordnung – AVV), StF: BGBl. II Nr. 389/2002. Fassung vom 5.1.2015.
- BMLFUW (2008a) Deponieverordnung (Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (DVO 2008)). StF: BGBl. II Nr. 39/2008.
- BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft) (2008b) Richtlinie für Ersatzbrennstoffe. Wien: BMLFUW.
- BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft) (2009) Bundesabfallwirtschaftsplan 2006 – Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich – Statusbericht 2009. Wien, Österreich.
- BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft) (2011) Bundesabfallwirtschaftsplan 2011. Wien, Österreich.

- BMLFUW (2014) Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich – Statusbericht 2013. Wien, Österreich.
- BZL & DPU (BZL Kommunikation und Projektsteuerung GmbH / DPU-Deutsche Projekt Union GmbH) (2000) Abschlussbericht-Anforderungen an Ersatzbrennstoffe aus Abfällen für die Zementindustrie. Im Auftrag von Ministerium für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg. Oytten.
- CEN (European Committee for Standardization) (2006) CEN/TR 15508:2006 Key properties on solid recovered fuels to be used for establishing a classification system. Technical report. Brussels, Belgium: CEN.
- CEN (2010) CENprEN 15359:2010 Solid recovered fuels – Specifications and classes, Brussels, Belgium: CEN.
- CEN (2015) CEN/TC 343 – Feste Sekundärbrennstoffe. Online im WWW unter URL: [http://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:7:0::::FSP\\_ORG\\_ID,FSP\\_LANG\\_ID:407430,22&cs=1E0A74CFAA9B03975C339D8BFAD77415C](http://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:7:0::::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:407430,22&cs=1E0A74CFAA9B03975C339D8BFAD77415C). Brüssel, Belgien. Abgerufen am 5.1.2015.
- David, R. (2014) Materialanalyse und Verwertungsmöglichkeiten einer aus der Ersatzbrennstoff-Produktion ausgeschleusten Polyvinylchlorid-Fraktion. Masterarbeit im Studiengang „Technisches Umweltmanagement und Ökotoxikologie“ an der Fachhochschule Technikum Wien.
- Deditz, J., Pinkel, M. & Pomberger, R. (2014) Concepts for Processing Solid Recovered Fuels of Different Waste Origins for Waste-to-Energy Plants. In: Thomé-Kozmiensky, K. & Thiel, S. (Hrsg.): Waste Management, Band 4. Waste-to-Energy. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014. ISBN: 978-3-944310-15-2.
- DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs) (2011) Waste Data Overview.
- Denner, M. & Kügler, I. (2006) Erarbeitung eines Beprobungskonzeptes für Ersatzbrennstoffe. In: Umweltbundesamt, Endbericht Projekt ERSA, Wien, Österreich.
- Drawetz, M.R. (2013/2014) Persönliche Mitteilungen und übermittelte Daten per Mail im Zeitraum von 2013 bis 2014. Mitarbeiter bei der MBA Frohnleiten.
- Dorn, T., Flamme, S. & Nelles, M. (2012) A review of energy recovery from waste in China. In: Waste Management & Research 30 (4). DOI: 10.1177/0734242X12440484. S. 432-441.

- EC (European Commission) (2000) Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the council of 4 December 2000 on the incineration of waste. Brussels, Belgium: European Commission.
- EC (European Commission) (2003) Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the council of 13 October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC. Brussels, Belgium: European Commission.
- EC (European Commission) (2010) Reference document on best available techniques in the cement, lime and magnesium oxide manufacturing industries. Brussels, Belgium: European Commission.
- EPA (Environmental Protection Agency) (2002) European Waste Catalogue and Hazardous Waste List. Ireland.
- EU (European Union) (1999) Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste. Brussels, Belgium.
- EU (Europäische Union) (2008) RICHTLINIE 2008/98/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, kurz Abfallrahmenrichtlinie.
- FA 19D (Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung 19D) (2008) Kriterien zur Trennung von Siedlungsabfall aus Industrie und Gewerbe als Voraussetzung zur Zuordnung zu Behandlungsverfahren (KRIGEZ). Österreich.
- Flamme, S. & Geiping, J. (2012) Quality standards and requirements for solid recovered fiels: a review. In: Waste Management & Research 30 (4). DOI: 10.1177/0734242X12440484. S. 335-353.
- FLSmidth (2011) HOTDISC™ combustion device. Report: C 03–11 400-13-ENG. Online im WWW unter URL: [www.flsmidth.com](http://www.flsmidth.com).
- Fricke, K., Münnich, K., Heußner, C., Wanka, S., Rettenberger, G., Krüger, M. & Schulte, B. (2012) Landfill Mining – ein Beitrag der Abfallwirtschaft für die Ressourcensicherung. In: K. E. Lorber et al. (Hrsg.): DepoTech 2012 Tagungsband, S. 575 – 584. ISBN: 978-3-200-02821-0.
- Grech, H. (2013) Ersatzbrennstoffe und das Abfallende – Praxisleitfaden zur Umsetzung der Abfallverbrennungsverordnung – inkl. Kommentar zur Anwendung der österreichischen und europäischen Normen. Austrian Standards plus Publishing (Hrsg.). ISBN: 978-3-85402-288-6. Wien, Österreich.



- Hämäläinen, J. (2004) Experiences on multifuel operation and cofiring of biomass with other fuels. Bioenergy 2005, Nordic Bioenergy Conference, 25.-27. October 2005. Radisson SAS, Royal Garden Hotel, Trondheim, Norway//Fluidized bed combustion in praxis. In: IV International Slovak biomass forum. Bratislava 2004.
- Hodecek, P. (2012) Public-Private-Partnership (PPP) – Modelle in Zentral- und Osteuropa. In: K. E. Lorber et al. (Hrsg.): DepoTech 2012 Tagungsband, S. 123-126. ISBN: 978-3-200-02821-0.
- Holliber, T., Milicev, D., Reiterer, H. & Miklau, G. (2015) Persönliche Mitteilungen und übermittelte Daten per Mail im Zeitraum von 2013 bis 2015. Mitarbeiter beim Zementwerk Retznei.
- Karrahe, A. (2014) HOTDISC™ – a perfect combustion device for coarser alternative fuels. In: Zement, Kalk, Gips international (ZKG international), ISSUE 6. ISSN: 0949-0205. S. 68-71.
- Klampfl-Pernold, H. & Gelbmann, U. (2006) Quantensprünge in der Abfallwirtschaft – Entwicklung eines innovationsorientierten Phasenmodells der europäischen Abfallwirtschaft.
- Klampfl-Pernold, H., Pomberger, R. & Schmidt, G. (2011) Decoding interdependencies between primary and secondary raw material markets by means of the Capacity Model. In: Waste-to-Resources 2011, 4. Internationale Tagung MBA und Sortieranlagen. In: Kühle-Weidemeier (ed.), Cuvillier Verlag Göttingen, Germany.
- Kranert, M. & Cord-Landwehr, K. (2010) Einführung in die Abfallwirtschaft. 4. Vollständig aktualisierte und erweiterte Auflage 2010: Vieweg + Teubner Verlag, ISBN: 978-3-8351-0060-2.
- Kreindl, G. (2007) Schwermetallherkunft in den Inputfraktionen einer Alternativbrennstoffverwertungsanlage. Diplomarbeit am Institut für Nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik. Montanuniversität Leoben.
- Lorber, K.E. & Sarc, R. (2012) Waste to Energy by Preparation of Quality Controlled SOLID RECOVERED FUELS (SRF). In: Proceedings of the 4<sup>th</sup> international conference on Environmental Technology and Knowledge Transfer (eds. Nelles, M. et al.). Hefei, P.R. China, May 24-25, 2012. ISBN: 978-3-86009-125-8.
- Lorber K.E. & Sarc, R. (2014) Recovery of Heat, Power and Secondary Materials by Incineration of Mixed Municipal Solid Waste (MSW). In: Proceedings of the 5<sup>th</sup> international conference on Environmental Technology and Knowledge Transfer (eds. Nelles, M. et al.). Hefei, P.R. China, May 15-16, 2014. ISBN: 978-3-86009-411-2.

- Lorber, K.E., Sarc, R. & Aldrian, A. (2012) Design and quality assurance for solid recovered fuel. In: Waste Management & Research 30 (4). DOI: 10.1177/0734242X12440484. S. 370-380.
- Lorber, K.E., Sarc, R. & Pomberger, R. (2010) Österreichische Erfahrungen zum Einsatz verschiedener Abfälle als Ersatzbrennstoffe und mögliche Anwendungsprobleme. In: TAKAG 2010 Türkisch-Deutsche Abfalltage. Dokuz Eylül Üniversitesi, Universität Stuttgart, Ege Üniversitesi (Hrsg.). ISBN: 978-3-8356-3228-8. S. 327-348.
- Lorber, K.E., Sarc, R. & Pomberger, R. (2011) Herstellung und Einsatz von Ersatzbrennstoffen (EBS) in Österreich. In: Waste-to-Resources 2011, 4. Internationale Tagung MBA und Sortieranlagen. In: Kühle-Weidemeier (ed.), Cuvillier Verlag Göttingen, Germany.
- Mauschitz, G. (2012) Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie; Berichtsjahr 2011. Wien: Technische Universität Wien, Österreich.
- Mauschitz, G. (2014) Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie, Berichtsjahr 2013. Wien: Technische Universität Wien, Österreich.
- Mitterwallner, J., Himmel, W., Pomberger, R. & Sarc, R. (2012) Deponierückbau in der Steiermark. In: K. E. Lorber et al. (Hrsg.): DepoTech 2012 Tagungsband, S. 585-588. ISBN: 978-3-200-02821-0.
- Nelles, M. (1998) Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung zur Umsetzung der Deponieverordnung. Dissertation am Institut für Entsorgungs- und Deponietechnik, Montanuniversität Leoben. Leoben, Österreich.
- Nelles, M., Morscheck, G. & Grünes, J. (2012) MBA in Deutschland und Europa: Entwicklung, Stand und Perspektiven. In: 9. Recyclingtage 2012. Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung ASA.
- Pieber, S., Ragossnig, A.M., Sommer, M., et al. (2011) Trennung heterogener Abfälle durch sensorgestützte Sortierung zur Optimierung materialspezifischer Abfallbehandlung. In: Waste-to-Resources 2011, 4. Internationale Tagung MBA und Sortieranlagen. In: Kühle-Weidemeier (ed.), Cuvillier Verlag Göttingen, Germany.
- Pieber, S., Ragossnig, A.M., Pomberger, R. & Curtis, A. (2012) Biogenic carbon enriched and pollutant depleted SRF from commercial and pretreated heterogeneous waste generated by NIR sensor based sorting. In: Waste Management & Research 30 (4). DOI: 10.1177/0734242X12440484. S. 381-391.
- Pomberger, R. (2004) Umsetzung der Deponie-VO-Kombination von Anlagen für Splitting, Ersatzbrennstoffproduktion und thermische Verwertung. In: K.E. Lorber et al. (Hrsg.)

- DepoTech 2004. Tagungsband, Leoben, 24-26 November, pp. 443-450. Essen, Germany: Verlag Glückauf GmbH. ISBN: 3-7739-5993-1.
- Pomberger, R. (2008) Entwicklung von Ersatzbrennstoff für das HOTDISC-Verfahren und Analyse der abfallwirtschaftlichen Relevanz. Dissertation am Institut für Nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik, Montanuniversität Leoben. Leoben, Österreich.
- Pomberger, R. & Curtis, A. (2012) Neue Entwicklungen bei der Produktion und Verwertung von Ersatzbrennstoffen in Österreich. In: Thomé-Kozmiensky, K. & Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 9. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012. ISBN: 978-3-935317-78-8.
- Pomberger, R., Klampfl-Pernold, H. & Abl, C. (2012) Current issues on the production and utilization of medium-calorific solid recovered fuel: a case study on SRF for the HOTDISC technology. In: Waste Management & Research 30 (4). DOI: 10.1177/0734242X12440484. S. 413-420.
- Pomberger, R. & Sarc, R. (2012) The future of solid recovered fuels (SRF). In: Rohstoffe sind Zukunft / Raw Materials are the Future; Band 2 Eumicon – European Mineral Resources Conference 2012, Montanuniversitaet Leoben, Austria. ISBN: 978-3-901074-35-6. S. 387-408.
- REDWAVE (2015) Online im WWW unter URL: <http://www.redwave.at/download/case-studies/>. Abgerufen am 07.02.2015.
- Rotter, V.S., Lehmann, A., Marzi, T., Möhle, E., Schingnitz, D. & Hoffmann, G. (2011) New techniques for the characterization of refuse derived fuels and solid recovered fuels. In: Waste Management & Research 29 (2). DOI: 10.1177/0734242X10364210. S. 229-236.
- Ruhri, M. (2014) Trocknung von Ersatzbrennstoffen. Masterarbeit am Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Montanuniversität Leoben.
- Sarc, R. & Aldrian, A. (2011) Report Part A – Recommendation on the Development of a Sampling Plan and its Implementation for AFR at a Cement Plant. Endbericht zum Projekt am Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik. September 2011, Montanuniversität Leoben.
- Sarc, R. & Aldrian, A. (2012) Report Part A incl. Sieving Analysis Results – Recommendation on the Development of a Sampling Plan and its Implementation for AFR at a Cement Plant. Endbericht zum Projekt am Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik. September 2012, Montanuniversität Leoben.

- Sarc, R. & Lorber, K.E. (2013) Production, quality and quality assurance of Refuse Derived Fuels (RDFs). In: Waste Management 33 (2013). ISSN: 0956-053X. S. 1825-1834.
- Sarc, R., Pomberger, R. & Lorber, K.E. (2013) Perspektive der Verwertung von Ersatzbrennstoffen in Zementwerken. In: Thomé-Kozmiensky, K. & Versteyl, A.; Strategie, Planung, Umweltrecht., Band 7, Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013. S. 139-162.
- Sarc, R., Adam, J. & Curtis, A. (2014a) Qualitätssicherung von Ersatzbrennstoffen für die Zementindustrie am Beispiel der Produktionsanlage ThermoTeam. In Pomberger, R. et al. (Hrsg.): DepoTech 2014 Tagungsband, ISBN: 978-3-200-03797-7. S. 313-318.
- Sarc, R., Lorber, K.E., Pomberger, R., Rogetzer, M. & Sipple, E.M. (2014b) Design, Quality and Quality Assurance of Solid Recovered Fuels (SRF) for the Substitution of Fossil Feedstock in the Cement Industry. In: Waste Management & Research 32 (7). DOI: 10.1177/0734242X14536462. S. 565-585.
- Sarc, R., Pomberger, R., & Chauhan, I. (2014c) Möglichkeiten und Machbarkeit einer anlagenspezifischen Ersatzbrennstoff Produktion, Verwertung und Vermarktung. Endbericht zum Projekt am Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Montanuniversität Leoben.
- Schmidt, G. (2014) Zusammenarbeit im Rahmen des Projektes „Möglichkeiten und Machbarkeit einer anlagenspezifischen Ersatzbrennstoff Produktion, Verwertung und Vermarktung“. Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Montanuniversität Leoben.
- Schürmann, H. (2014) Alternative fuels in the cement manufacturing process. In: Zement, Kalk, Gips international (ZKG international), ISSUE 6. ISSN: 0949-0205. S. 56-63.
- Thiel S (2013) Im Ländervergleich: Über Gemeinsamkeiten, Unterschiede und Kapazitäten von Ersatzbrennstoff-Kraftwerken in Deutschland und Österreich liegen aktuelle Daten vor. In: ReSource Vol.1, 2013, ISSN 1868-9531, S. 4-10.
- Thomanetz E (2012) Solid recovered fuels in the cement industry with special respect to hazardous waste. In: Waste Management & Research 30 (4). DOI: 10.1177/0734242X12440484. S. 404-412.
- Thomé-Kozmiensky, K.J. (2013) Verbrennung in Wirbelschichtreaktoren. In: Thomé-Kozmiensky, K. & Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 10. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013. ISBN: 978-3-935317-92-4. S. 3-94
- UBA (Umweltbundesamt) (2006) Ist-Stand der Mechanisch-Biologischen Abfallbehandlung (MBA) in Österreich – Zustandsbericht 2006. Wien, Österreich.

- UBA (Umweltbundesamt) (2007) Abfallverbrennung in Österreich – Statusbericht 2006. Wien, Österreich.
- UBA (Umweltbundesamt) (2008) Mechanische Abfallbehandlung (MA) von gemischten Siedlungs- und Gewerbeabfällen in Österreich. Wien, Österreich.
- VDZ (2012-2015) Online im WWW unter URL: <http://www.vdz-online.de/vdz.html>.
- VÖZ (2012-2015) Online im WWW unter URL: <http://www.zement.at>.
- Winter, F & Szentannai, P. (2009) Energieträger und Brennstoffe für Wirbelschichtanlagen – Charakterisierung, aktuelle Situation und Limitierungen. In: Beckmann, M. & Hurtado, A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik – Sichere und nachhaltige Energieversorgung, Band 1. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009. ISBN: 978-3-935317-42-9 S. 441-451.
- Zahrnhofer, M. (2013) Statistische Analyse – Einbau einer Nahinfrarotausschleusungsanlage. Endbericht am Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Montanuniversität Leoben.

## 9.2 Abkürzungsverzeichnis

2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
°C	Grad Celsius
a	Jahr
abh.	abhängig
Al	Aluminium
AG	Aschegehalt
As	Arsen
AVV	Abfallverbrennungsverordnung
AWG	Abfallwirtschaftsgesetz
Ba	Barium
Be	Beryllium
C	Kohlenstoff
Cd	Cadmium
Cl	Chlor
Co	Kobalt
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom

Cu	Kupfer
d <sub>95</sub> bzw. d <sub>90</sub>	95% bzw. 90%-Perzentil der Korngröße
d.h.	das heißt
DRO	Drehrohrofen
EBS	Ersatzbrennstoff€
etc.	et cetera
F	Fluor
Fe	Eisen
FE	Eisenfraktion aus Magnetabscheider
g	Gramm
GA	Gefährlicher Abfall
GJ	Gigajoule
H	Wasserstoff
HDF	Hot Disc Fuel
Hg	Quecksilber
H <sub>u</sub>	Heizwert
inkl.	Inklusive
Kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
MB	Main Burner (Primärbrenner)
MBA	Mechanisch Biologische Abfallbehandlungsanlage
MB(RS)	Mechanische Behandlung (Restabfallsplitting)
MBF	Main Burner Fuel
Min.	Minuten
MJ	Megajoule
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
MW	Mittelwert
N	Stickstoff
NE	Nichteisenmetalle
Ni	Nickel
O bzw. O <sub>2</sub>	Sauerstoff
o.a.	oben angeführt
OS	Originalsubstanz
Pb	Blei
PB	Primärbrenner
PBF	Primary Burner Fuel
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
QS	Qualitätssicherung

QSTP	Qualifizierte Stichprobe
RDF	Refuse Derived Fuel
Rost	Rostfeuerung
RS	Restabfallsplitting
S	Schwefel
Sb	Antimon
Se	Selen
Sek.	Sekunden
SRF	Solid Recovered Fuel
STP	Stichprobe
t	Tonne (Mg)
TC	Total Carbon (Gesamtkohlenstoffgehalt)
TI	Thallium
TM	Trockenmasse
TM	Teilmenge
TS	Trockensubstanz
u.a.	unter anderem
usw.	und so weiter
V	Vanadium
v. a.	vor allem
vgl.	vergleiche
WG	Wassergehalt
WS	Wirbelschicht
$X_B$	Gehalt an Biomasse
$X_B^{TC}$	Biogener Kohlenstoffanteil bezogen auf TC
$X_{nB}$	Gehalt an Nicht-Biomasse
$X_{nB}^{TC}$	Nicht-biogener Kohlenstoffanteil bezogen auf TC
z.B.	zum Beispiel
ZI	Zementindustrie
z.Z.	zurzeit
Zn	Zink
ZW	Zementwerk

### 9.3 Tabellen

Tabelle 1: Zusammenfassende Darstellung der Heizwerte für EBS LOW, EBS MEDIUM und EBS PREMIUM Quality .....	7
Tabelle 2: Statistische Grenzwerte für Ersatzbrennstoffe beim Einsatz in Anlagen zur Zementerzeugung (BMLFUW, 2002).....	14
Tabelle 3: Statistische Grenzwerte für Ersatzbrennstoffe beim Einsatz in Anlagen zur Zementerzeugung (BMLFUW, 2002).....	28
Tabelle 4: Für „Feste Sekundärbrennstoffe“ (SRF) bzw. Ersatzbrennstoffe (EBS) relevante Normen (ASI, 2015) .....	31
Tabelle 5: Grundverfahren in Anlagen zur EBS Herstellung (Pomberger, 2008).....	83
Tabelle 6: Zusammenfassende Auswertung der Ergebnisse (Mittelwerte) aus 15 kundenspezifischen Untersuchungen.....	156
Tabelle 7: Auswertung der Ergebnisse aus Untersuchungen von fünf Originalproben zur Bestimmung der Qualität der EBS Fraktionen < 6,3 mm und > 6,3 mm.....	163
Tabelle 8: Verwendete Brennstoffarten und Mengen im Zementwerk Retznei, Zeitraum 2011 bis 2013 (Holliber et al., 2015).....	167
Tabelle 9: Ergebnisse Versuch 1: Charakterisierung des 2D-EBS-NEW PREMIUM Quality, ausschließlich hergestellt aus 2D Material.....	171
Tabelle 10: Ergebnisse Versuch 1: Charakterisierung der einzelnen Siebschnitte des 2D-EBS-NEW PREMIUM Quality, nur aus 2D Material hergestellt.....	172
Tabelle 11: Ergebnisse von Versuch 1: Durchschnittlicher Brennstoffdurchsatz und thermische Substitutionsrate im Zementwerk Retznei .....	173
Tabelle 12: Ergebnisse Versuch 2: Charakterisierung des in der Anlage von ThermoTeam produzierten EBS PREMIUM Quality vor der Trocknung (P1-P8: Probennummern)....	177
Tabelle 13: Ergebnisse Versuch 2: Charakterisierung des in der MBA Frohnleiten getrockneten EBS-DRY PREMIUM Quality (P1-P8: Probennummern).....	179
Tabelle 14: Ergebnisse Versuch 2: Durchschnittlicher Brennstoffdurchsatz und thermische Substitutionsrate im Zementwerk Retznei .....	180
Tabelle 15: Ergebnisse Versuch 3: Durchschnittlicher Brennstoffdurchsatz und thermische Substitutionsrate im Zementwerk Retznei im betrachteten Zeitraum von sechs Wochen (12.05. – 22.06.2014) .....	183
Tabelle 16: Ergebnisse Versuch 3: Durchschnittlicher Substitutions-Brennstoffdurchsatz für 100%-ige thermische Substitutionsrate im Zementwerk Retznei .....	185
Tabelle 17: Beantwortung Frage 1.1 – Zusammenfassende Darstellung der Qualität von EBS MEDIUM Quality und EBS PREMIUM Quality in der Praxis .....	192



Tabelle 18: Beantwortung Frage 2.1 – Zusammenfassende Darstellung der wichtigsten Kennzahlen von EBS PREMIUM Quality aus den 100% - Substitutionsversuchen 1-3196

## 9.4 Abbildungen

Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung des österreichischen „Restmüll-Splitting“ Konzeptes (Lorber et al., 2010, modifiziert).....	12
Abbildung 2: Grafische Darstellung der Einflüsse auf die einzelnen Branchen und auf die Zusammenarbeit zwischen der Abfallwirtschaft und der industriellen Produktion im Bereich EBS.....	19
Abbildung 3: Integrierte Systemgrenzen des Forschungskonzeptes für die gegenständliche Dissertation (Anmerkung: Kapitel 6.1/2/3/4 steht für 1.-4. Unterkapitel im 6. Kapitel dieser Arbeit).....	23
Abbildung 4: Struktur der gegenständlichen Arbeit (Anmerkung: K 1-K 8 werden für die Kapiteln in der Arbeit und Bezeichnungen V1-V5 für Veröffentlichungen verwendet) ....	25
Abbildung 5: Anwendungsbereich der Normen des CEN/TC 343 – „Solid Recovered Fuels“ (ASI, 2011c; Grech, 2013).....	30
Abbildung 6: Schematische Darstellung der grundlegenden MBA-konzepte (MBR (VD) – Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung (vor der Deponierung); MB (RS) – Mechanische Behandlung (Restabfallsplitting); MBR (VV) – Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung (vor der Verbrennung)) (Nelles, 1998).....	80
Abbildung 7: Vereinfachte Darstellung der grundlegenden MBA-Konzepte, die die derzeit gültigen rechtlichen Anforderungen (BMLFUW, 2008a) erfüllen (Nelles et al., 2012).....	81
Abbildung 8: Zusammenhang und Abgrenzung der heizwertreichen Fraktion vom Ersatzbrennstoff in Bezug auf Qualität und Anforderungen (Pomberger, 2008).....	82
Abbildung 9: (Mit-)Verbrennungsanlagen mit Wirbelschichttechnologie und mit EBS Einsatz in Österreich (Anmerkung: (GA) steht für gefährliche Abfälle) (Sarc et al., 2014c; Schmidt, 2014).....	86
Abbildung 10: Schichtverhältnisse bei der Wirbelschicht – ausgehend vom Festbett über die stationäre und zirkulierende Wirbelschicht bis zur pneumatischen Förderung – in Abhängigkeit von der Druckdifferenz (Thomé-Kozmiensky, 2013).....	87
Abbildung 11: Zusammenhang zwischen verwendeten Brennstoffen und technischen Herausforderungen in der Wirbelschichttechnik (leicht modifiziert aus Hämäläinen, 2004; Winter & Szentannai, 2009; Thomé-Kozmiensky, 2013).....	88
Abbildung 12: Brennstoffwärmemengen aus der Verfeuerung von EBS in Anlagen der österreichischen Zementindustrie (Mauschitz, 2014).....	89
Abbildung 13: Thermische Substitutionsrate von konventionellen Energieträgern in der österreichischen Zementindustrie (Zeitraum: 2008 – 2013) (Mauschitz, 2014).....	90

Abbildung 14: Feuerungsmöglichkeiten (d.h. Primär- und Sekundärfeuerung) im Klinkerherstellungsprozess (Pomberger, 2008).....	91
Abbildung 15: Verlauf von Temperatur [°C], Sauerstoffgehalt [Vol.-%O <sub>2</sub> ], sowie Abgasverweilzeit (Sek.) und Materialverweilzeit (Min.) im Klinkerherstellungsprozess (Schürmann, 2014, leicht modifiziert) .....	92
Abbildung 16: Zementwerke mit genehmigtem Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Österreich (Sarc et al., 2014c; Schmidt, 2014) .....	92
Abbildung 17: Zusammenfassende Darstellung der betrachteten EBS-Qualitäten (beschrieben durch den Heizwert [MJ/kg <sub>OS</sub> ] und die Korngröße [mm]) und deren Verwertungsmöglichkeiten (Lorber & Sarc, 2013; 2014; Sarc et al., 2014b; 2014c; Schmidt, 2014).....	93
Abbildung 18: Ergebnisse aus Siebanalysen zur Bestimmung der Korngröße (d <sub>95</sub> ) für den am Standort Zementwerk Rohožnik untersuchten HDF (Sarc & Aldrian, 2011; 2012, modifiziert) .....	96
Abbildung 19: Zusammenfassende Darstellung der Probenahmenvorschriften gemäß AVV (BMLFUW, 2002, modifiziert) .....	97
Abbildung 20: Probenahmekonzept für den untersuchten HDF (Bedingungen: Liefermenge ≤ 40.000 t/a, Untersuchung des ersten Loses.) (Lorber et al., 2012) .....	97
Abbildung 21: Fotodokumentation von EBS PREMIUM Quality (PBF) (Sarc & Aldrian, 2011; 2012).....	99
Abbildung 22: Fotodokumentation von EBS MEDIUM Quality (HDF) (Sarc & Aldrian, 2011; 2012).....	99
Abbildung 23: Durchschnittliche morphologische Zusammensetzung des extern aufbereiteten „EBS LOW Quality extern“ (modifiziert aus Sarc & Lorber (2013) – Table 3, Mittelwerte aus den Ergebnissen der Sortieranalysen A1, A2 und B) .....	114
Abbildung 24: Durchschnittliche morphologische Zusammensetzung des „EBS LOW Quality intern“ nach der zusätzlichen internen Aufbereitung (modifiziert aus Sarc & Lorber (2013) – Table 5, Mittelwerte aus den Ergebnissen der Sortieranalysen) .....	115
Abbildung 25: Sortieranalysen – Ergebnis: Durchschnittliche morphologische Zusammensetzung von EBS MEDIUM Quality (modifiziert aus Sarc et al. (2014b) – Table 6).....	128
Abbildung 26: Sortieranalysen – Ergebnis: Durchschnittliche morphologische Zusammensetzung von EBS PREMIUM Quality (modifiziert aus Sarc et al. (2014b) – Table 4).....	128
Abbildung 27: Schwermetallgehalte in Steinkohle, RDF EU, EBS PREMIUM Quality, EBS MEDIUM Quality sowie EBS PREMIUM Quality 2014 und EBS MEDIUM Quality 2014 verglichen mit rechtlich festgelegten Qualitätskriterien (Grenzwerte gemäß AVV, vgl.	

Tabelle 3, ausgewiesen als 100%) (modifiziert aus Sarc et al. (2014b) und ergänzt mit weiteren Analysedaten für das Jahr 2014) .....	129
Abbildung 28: Fließbild der EBS PREMIUM Quality Produktionsanlage ThermoTeam (modifiziert aus Sarc et al., 2014a).....	154
Abbildung 29: Positionierung von REDWAVE NIR Sortiergeräten zur Ausschleusung von PET und PVC in der EBS Produktionsanlage ThermoTeam (REDWAVE, 2015).....	155
Abbildung 30: Massenbilanz der EBS Produktionsanlage ThermoTeam (Angaben in [% <sub>TM</sub> ]) .....	157
Abbildung 31: Energiebilanz der EBS Produktionsanlage ThermoTeam (Angaben in [%])	158
Abbildung 32: Chlorbilanz für die EBS Produktionsanlage ThermoTeam (Angaben in [%])	159
Abbildung 33: Ergebnisse aus der statistischen Analyse des Chlorgehaltes im EBS PREMIUM Quality vor der Installation der NIR Sortieranlage (n = 0-65) und nach der Installation der NIR Sortieranlage (n = 66-88). Verringerung des 95% Konfidenzintervalls .....	160
Abbildung 34: Zusammensetzung und sortenspezifische Charakterisierung der PVC Fraktion nach vier Eigenschaftskriterien (David, 2014).....	160
Abbildung 35: Sortenspezifische Verteilung von Chlor in PVC. Durchschnittlicher Chlorgehalt inkl. Standardabweichung [% <sub>TM</sub> ] der PVC Fraktion und der einzelnen Unterfraktionen (David, 2014).....	161
Abbildung 36: Antimonbilanz für die EBS Produktionsanlage ThermoTeam (Angaben in [%]) .....	162
Abbildung 37: Abgeschätzte Transferkoeffizienten [%] für verschiedene Parameter (auf der X-Achse) von Originalproben in die Fraktion > 6,3 mm und < 6,3 mm .....	163
Abbildung 38: Technisches Fließbild des Zementwerkes Retznei der Lafarge Zementwerke GmbH (Holliber et al., 2015).....	166
Abbildung 39: Entwicklung der thermischen Substitutionsrate (blau-strichliert) am Standort Retznei der Lafarge Zementwerke GmbH im Zeitraum 1982 bis 2013 (Holliber et al., 2015).....	167
Abbildung 40: Entwicklung des EBS-Mix im Werk Retznei der Lafarge Zementwerke GmbH im Zeitraum 2000 bis 2013 (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge) (Holliber et al., 2015).....	168
Abbildung 41: Versuch 1: Fotodokumentation – ThermoTeam (14.5.2013). Herstellung von „2D-EBS-NEW PREMIUM Quality“ .....	170
Abbildung 42: Ergebnisse Versuch 1: Durchschnittliche Korngrößenverteilung des hergestellten 2D-EBS-NEW PREMIUM Quality .....	172
Abbildung 43: Endergebnis Versuch 1: Durchschnittlicher Brennstoffmix inkl. Altreifen (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge) .....	174

Abbildung 44: Endergebnis Versuch 1: Durchschnittlicher Brennstoffmix am Primärbrenner (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge) .....	175
Abbildung 45: Endergebnis Versuch 1: Zeitlicher Verlauf des Brennstoffmix Einsatzes im Zementwerk Retznei (Zeitraum Versuchsbetrieb: 14.5.2013 (19 <sup>00</sup> h) bis 21.5.2013 (06 <sup>00</sup> h); in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge) .....	175
Abbildung 46: Versuch 2: Probenahme von EBS PREMIUM Quality mittels automatischer Probenahmeschleuse (20.11.2013).....	177
Abbildung 47: Ergebnisse Versuch 2: Zeitlicher Verlauf der in der MBA Frohnleiten online gemessenen Parameter bei der Trocknung von EBS PREMIUM Quality (Drawetz, 2013/2014).....	178
Abbildung 48: Endergebnis Versuch 2: Durchschnittlicher Brennstoffmix inkl. Altreifen (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge) .....	181
Abbildung 49: Endergebnis Versuch 2: Durchschnittlicher Brennstoffmix am Primärbrenner (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge) .....	181
Abbildung 50: Endergebnis Versuch 2: Zeitlicher Verlauf des Brennstoffmixeinsatzes im Zementwerk Retznei (Zeitraum Normalbetrieb: 28.11.2013 (06 <sup>00</sup> h) bis 30.11.2013 (12 <sup>00</sup> h); Zeitraum Versuchsbetrieb: 30.11.2013 (12 <sup>00</sup> h) bis 2.12.2013 (21 <sup>00</sup> h); (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge) .....	182
Abbildung 51: Endergebnis Versuch 3: Durchschnittlicher Brennstoffmix inkl. Altreifen (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge) .....	184
Abbildung 52: Endergebnis Versuch 3: Durchschnittlicher Brennstoffmix am Primärbrenner (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge) .....	184
Abbildung 53: Endergebnis Versuch 3: Durchschnittlicher Brennstoffmix inkl. Altreifen bei der 100%-igen thermischen Substitution von primären Energieträgern (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge).....	186
Abbildung 54: Endergebnis Versuch 3: Durchschnittlicher Brennstoffmix am Primärbrenner bei der 100%-igen thermischen Substitution von primären Energieträgern (in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge) .....	186
Abbildung 55: Endergebnis Versuch 3: 100%-ige thermische Substitutionsrate: Zeitlicher Verlauf des Brennstoffmixeinsatzes im Zementwerk Retznei (betrachteter Versuchsbetrieb-Zeitraum: 12.5.2014 (6 <sup>00</sup> h) bis 22.5.2014 (24 <sup>00</sup> h); in [%], bezogen auf Gesamtenergiemenge).....	188
Abbildung 56: Beantwortung Frage 1.1 – Vergleichende Gegenüberstellung von Schwermetallgehalten in Steinkohle und in EBS MEDIUM Quality und EBS PREMIUM Quality (dargestellt als Grenzwertausschöpfung gemäß AVV (vgl. Tabelle 3), in [%]) .	194