

ENDBERICHT

„REUQ-Ausweis“ für EBS

Entwicklung eines Ressourcen-, Energie-, Umwelt- und Qualitätsausweises (REUQ) für Ersatzbrennstoffe (EBS)

Auftraggeber:

Verband Österreichischer Entsorgungsbetriebe (VÖEB)

Schwarzenbergplatz 4

A-1030 Wien



Erstellt von:

Univ. Assist. Dipl.-Ing. Dr. mont. Renato Sarc

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

Dipl.-Ing. Stefan Eferdinger



Seiten: 106

Leoben, April 2015

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 EINLEITUNG	3
1.1 Problemstellung	4
1.2 Zielsetzung	6
1.3 Begriffsdefinitionen	7
2 REUQ-AUSWEIS FÜR EBS	13
2.1 Berechnung der Indikatoren für den REUQ-Ausweis für EBS	13
2.2 REUQ-Ausweis für EBS-theoretische Anlage	18
3 RECHTLICHE ASPEKTE	24
3.1 AWG – Abfallwirtschaftsgesetz 2002	24
3.2 Abfallverbrennungsverordnung – AVV	25
3.3 Bundes-Energieeffizienzgesetz – EEEffG	26
4 ERSATZBRENNSTOFFE	27
4.1 Arten von Ersatzbrennstoffen	27
4.2 Herstellung und Qualitätsanforderungen von Ersatzbrennstoffen	27
4.2.1 Technische Grundlagen der Ersatzbrennstoffherstellung	28
4.2.2 Qualitätsanforderungen an Ersatzbrennstoffe	28
4.2.3 Feste Sekundärbrennstoffe – Spezifikation und Klassen (EN 15359:2011)	30
4.3 EBS-Verwerter	32
4.3.1 Zementwerke	32
4.3.2 Verbrennungsanlagen mit Wirbelschichttechnologie	35
5 SYSTEMGRENZEN UND SZENARIEN	37
5.1 Massenbilanz	39
5.2 Energiebilanz	42
5.3 CO ₂ -Äq-Bilanz	57
6 THEORETISCHE BERECHNUNG DER SYSTEME UND SENSITIVITÄTSANALYSE	64
6.1 EBS-Produktion (SG 1)	64
6.1.1 Massenbilanz EBS-Produktion (SG 1)	64
6.1.2 Energiebilanz EBS-Produktion (SG 1)	66
6.1.3 CO ₂ -Äq-Bilanz EBS-Produktion (SG 1)	67

6.2	EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2)	69
6.2.1	Massenbilanz EBS Gesamtsystem (SG 1 + 2)	69
6.2.2	Energiebilanz EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2)	71
6.2.3	CO ₂ -Äq-Bilanz EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2)	74
6.3	Gegenüberstellung SG 1 + 2 zu SG Ref.	77
6.3.1	Massenbilanz-Gegenüberstellung SG 1 + 2 zu SG Ref.	77
6.3.2	Energiebilanz-Gegenüberstellung SG 1 + 2 zu SG Ref.	78
6.3.3	CO ₂ -Äq-Bilanz -Gegenüberstellung SG 1 + 2 zu SG Ref.	79
6.4	Sensitivitätsanalyse	80
6.4.1	Verdoppelung der aussortierten Wertstoffe bzw. keine Ausschleusung von Wertstoffen	81
6.4.2	Erhöhung des ausgeschleusten „Biologisch abbaubarer Siebdurchgang“	85
6.4.3	Veränderung der Massenverteilung im Prozess „Verteilung“	87
6.4.4	Veränderung der thermischen Substitutionsrate im Zementwerk (KET:EBS) ...	89
7	ZUSAMMENFASSUNG	91
8	VERZEICHNISSE	93
8.1	Literatur.....	93
8.2	Abkürzungsverzeichnis	96
8.3	Tabellen.....	97
8.4	Abbildungen.....	100
ANHANG A	I

1 Einleitung

Im Jahr 2000 verständigten sich die Staats- und Regierungschefs in Lissabon darauf, die EU bis 2010 zum wettbewerbsfähigsten und dynamischsten wissensbasierten Wirtschaftsraum der Welt zu machen – einem Wirtschaftsraum, der fähig ist, ein dauerhaftes Wirtschaftswachstum mit mehr und besseren Arbeitsplätzen und einen größeren sozialen Zusammenhalt zu erzielen (Europäischer Rat, 2000) (im Jahr 2010 wurde ein Nachfolgedokument EUROPA 2020 mit ähnlichen Zielen bis 2020 erstellt). (Europäische Kommission, 2010) Die Lissabon-Strategie stellt den langfristigen wirtschaftspolitischen Koordinierungsrahmen der EU dar. Mit strukturpolitischen Maßnahmen sollte die Europäische Union wirtschaftlich, sozial und ökologisch gestärkt werden. Das erste Nationale Reformprogramm (2005 – 2007) legte sieben Schwerpunktbereiche für Strukturreformen vor, wobei eines dieser Programme sich mit effizientem Ressourcenmanagement und Klimaschutz beschäftigt. Vor dem Hintergrund der zu erwartenden klima- und energiepolitischen Herausforderungen werden Maßnahmen in diesen Politikbereichen forciert; d.h. Versorgungssicherheit, Energieeffizienz, Energiesparen, wirtschaftlich sinnvoller Einsatz von effizienten, erneuerbaren Energien und weitere Kyotomechanismen sind die Prioritäten zum Klimaschutz. (Europäisches Parlament, 2012) Um verstärkt auf die Bedeutung der Energieeffizienz hinzuweisen, wurde auch eine neue EU-Energieeffizienzrichtlinie (2012/27/EU vom 25. Oktober 2012) (Europäisches Parlament, 2012) (umgesetzt in das neue österreichische Bundesgesetz über die Steigerung der Energieeffizienz bei Unternehmen und dem Bund (Bundes-Energieeffizienzgesetz – EEffG) (BKAOE, 2014)) veröffentlicht, wo im Artikel 18 (1) folgendes angeführt wird:

„Die Mitgliedsstaaten fördern den Energiedienstleistungsmarkt und den Zugang zu diesem für KMU indem, sie....

*b) die Entwicklung von Gütesiegeln, unter anderem durch Fachverbände, unterstützen;
...“*

Besonders für die KMUs (aber auch für Großunternehmen) bedeutet dies, dass sie bei der abfallwirtschaftlichen Weiterentwicklung unterschiedlichste Maßnahmen zu setzen haben, um die Energieeffizienz zu steigern, dass die Qualität der Produkte (in diesem Fall Ersatzbrennstoffe, die weiterhin als Abfall eingestuft werden) überprüft und auf unterschiedliche Kriterien (d.h. Energiedichte inklusive Heizwert, fossiler Anteil, biogener Anteil, Emissionsfaktoren und stoffliche Verwertung) bewertet werden muss.

Dabei sind Ersatzbrennstoffe (EBS) Abfälle, welche zur Gänze oder in einem relevanten Ausmaß zum Zweck der Energiegewinnung (in der gegenständlichen Arbeit wird Fokus auf die Zementindustrie gelegt) eingesetzt werden und rechtlich vorgeschriebene Qualitätskriterien gemäß Abfallverbrennungsverordnung (BMLFUW, 2010) erfüllen. Ersatzbrennstoffe werden in mechanischen Abfallaufbereitungsanlagen, in denen unterschiedliche Aufbereitungs- und Sortieraggregate zum Einsatz kommen, hergestellt. Dabei werden Abfallfraktionen unterschiedlicher Qualität (d.h. Reinheitsgrad, Störstoffanteil, Heizwert, Korngröße usw. – fraktionsabhängig) hergestellt. Des Weiteren werden im Zuge

der EBS-Produktion unterschiedliche Wertstoffe (Eisen- und Nichteisen-Metalle sowie Kunststoffe usw.) aussortiert und zur stofflichen Verwertung weitergegeben. Der EBS wird aufgrund verschiedener Einflussfaktoren (Qualität, Nachfrage, Preis usw.) an unterschiedliche Abnehmer (d.h. Zementindustrie oder sonstige (Mit-)Verbrennungsanlagen) weitergegeben. Die Zementindustrie substituiert konventionelle Energieträger (d.h. Steinkohle, Braunkohle, Petrolkoks, usw.) durch Ersatzbrennstoffe. Während im Jahr 2005 der Einsatz von EBS in der österreichischen Zementindustrie erstmals über 50 % (50,92 %) war, liegt heute die thermische Substitutionsrate bei über 70 % (72,4 % im Jahr 2013). (Mauschitz, 2014) Somit kann der Einsatz von EBS in der österreichischen Zementindustrie als „Stand der Technik“ bezeichnet werden. Durch die stetig ansteigenden Preise für Primärbrennstoffe und deren österreichische (teilweise 100%-ige) Importabhängigkeit (in der gegenständlichen Arbeit werden Steinkohle, Braunkohle und Petrolkoks betrachtet) bietet die „vor Ort Abfallwirtschaft mit u.a. Brennstoffherstellung“, Vorteile in Bezug auf die Verfügbarkeit von (Roh-)Brennstoffen. In der Darstellung der Vor- und Nachteile werden heutzutage verschiedene Qualitäts- und Gütezeichen wie RAL-Gütezeichen (BGS, 2014) oder Einteilung in die Qualitätsklassen gemäß EN 15359 (fünf Klassen unter Berücksichtigung der Parameter Heizwert, Chlor- und Quecksilbergehalt) verwendet. Auch die österreichische Abfallverbrennungsverordnung (BMLFUW, 2010) legt rechtliche Rahmen und Qualitätskriterien für EBS vor deren Einsatz in der Mitverbrennung fest, betrachtet aber das gesamte EBS-System (d.h. von der Produktion bis hin zur Verwertung) nicht. Aus diesem Grund soll in dieser Arbeit das EBS-Gesamtsystem (d.h. über den rechtlichen Rahmen hinaus) betrachtet werden und dafür ein ressourcen-, energie-, umwelt- und qualitätsorientierter Ausweis (d.h. REUQ-Ausweis für EBS) erstellt werden.

1.1 Problemstellung

Derzeit werden mehrere Bewertungsmethoden mit unterschiedlichem Umfang verwendet, um EBS aber auch andere Abfallarten zu bewerten. Ein EBS-Qualitätsmanagement basierend nur auf Kriterien der EN 15359 (vgl. Tabelle 18) oder der Abfallverbrennungsverordnung (vgl. Tabelle 17) oder ähnlichen Gütezeichen wie RAL-GZ (BGS, 2014) reicht nicht aus, um das gesamte EBS-System (von der Produktion bis hin zur Verwertung) basierend auf material- aber auch anlagentechnischen Aspekten der modernen Abfallwirtschaft zu beschreiben bzw. zu bewerten. Die moderne Abfallwirtschaft und vor allem die EBS-Produktion basiert auf einer Kombination von unterschiedlichen Anlagen und Aggregaten, die notwendig sind, um die Anforderungen des Marktes (neben den rechtlichen Anforderungen, die eigentlich eine Basis darstellen, gibt es vertragstechnische Anforderung zwischen EBS-Hersteller und -verwerter) erfüllen zu können. Die richtige Anordnung von Abfallaufbereitungsanlagen und das Zusammenspiel von mehreren Einflussfaktoren (Markt, Abfallinputqualität und ihre jahreszeitbedingten Schwankungen, EBS-Qualität, EBS-Angebot-Nachfrage) im EBS-System ermöglichen die Produktion von hochqualitativen und qualitätsgesicherten EBS. Deswegen ist eine der Herausforderungen, die in dieser Arbeit

behandelt werden, die Erarbeitung des „richtigen“ Bewertungsmodells, das gleichzeitig alle wichtige Aspekte der modernen EBS-Produktion und –verwertung berücksichtigt.

Des Weiteren soll das System der EBS-Produktion und dessen Verwertung beschrieben und in Form eines Ausweises dargestellt werden. Dabei sollen mithilfe von einem Vergleichsszenario (Referenzsystem), in dem ein Zementwerkbetrieb mit nur fossilen Brennstoffen (d.h. Substitutionsrate = 0 %) berücksichtigt wird, Vor- und Nachteile herausgearbeitet und dargestellt werden. Für die Ausarbeitung der gegenständlichen Arbeit ergeben sich u.a. folgende Fragestellungen:

- **Systemgrenzen:** Wie sollen Systemgrenzen für die Massen-, Energie- und CO₂-Äq-Bilanz festgelegt werden, damit das untersuchte System die österreichische Abfallwirtschaft am besten beschreibt?
- **Massenbilanz:** Welche Stoffströme werden berücksichtigt? Wie kann die Verwertung von EBS, die nicht im Zementwerk zum Einsatz kommen, berücksichtigt werden?
- **Energiebilanz:** Wie können Wertstoffe, die in der EBS-Produktion aussortiert werden, hinsichtlich ihrer stofflichen Verwertung beurteilt werden? Wie können Hilfsstoffe bei der Produktion (d.h. Strom, Diesel, Gas usw.) und der Verwertung (d.h. Zumischung von konventionellen Energieträgern z.B. Steinkohle) berücksichtigt werden?
- **Klimabilanz:** Welche Emissionen entstehen bei der EBS-Produktion und EBS-Verwertung? Wie können die entstehenden Emissionen einheitlich betrachtet und nach ihrer Auswirkung beurteilt werden?
- **Anlagen- und materialspezifische Indikatoren:** Welche Indikatoren können definiert werden, um anlagen- und/oder materialspezifische Gegebenheiten zu beschreiben? Wie viele Indikatoren sind nötig, damit das EBS-Gesamtsystem ausreichend genau beschrieben werden kann.
- **Sensitivitätsanalyse:** Es werden Daten, die aus unterschiedlichen Bereichen, Quellen und Berichten stammen, verwendet. Dies führt zur Notwendigkeit einer genauesten Überprüfung der erstellten Systeme und der daraus gewonnenen Ergebnisse. Welche Einflussfaktoren sollen berücksichtigt werden und welchen Einfluss haben diese auf das System?
- **Anlagenspezifischer Ausweis (REUQ):** Wie können die verschiedenen Indikatoren verständlich und aussagekräftig dargestellt werden? Welche Darstellungsmöglichkeiten eignen sich?

1.2 Zielsetzung

Das Ziel der gegenständlichen Arbeit ist die Erarbeitung und Darstellung der Methoden sowie die Bilanzierung des EBS-Systems in Österreich (von der Aufbereitung bis hin zur Verwertung in der Zementindustrie) basierend auf den anlagen- und materialspezifischen Indikatoren. Die vorgeschlagenen Indikatoren sind: „Energiebarwert“, „Treibhausgaseffekt“, „Schwermetalle“, „Stoffliche Verwertung“ und „Biogener Anteil“. Die erwarteten Ergebnisse dieser Untersuchung sollen eine klare Definition, Quantifizierung und Bewertung von ressourcen-, energie-, umwelt- und qualitätsrelevanten technischen Aspekten bei der EBS-Produktion (Aufbereitungsanlage und produzierte Brennstoffe) und -verwertung (Zementindustrie) im Vergleich zum konventionellen Betrieb mit nur fossilen Brennstoffen in der Zementindustrie (d.h. Referenzsystem) liefern (vgl. Abbildung 1).

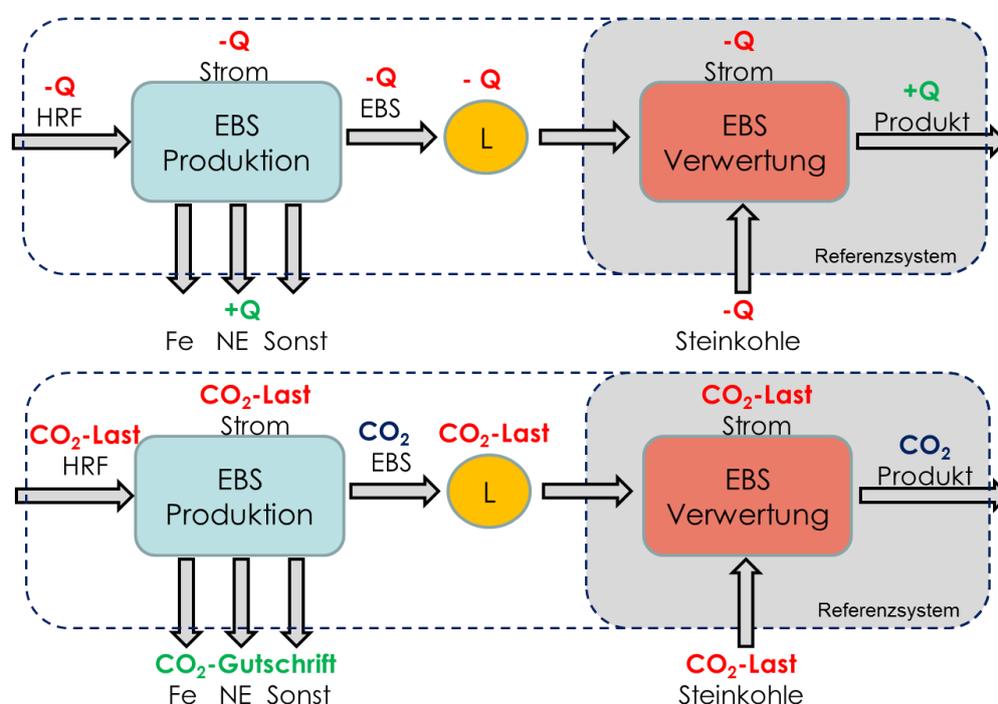


Abbildung 1: Projektidee und Konzeptdarstellung hinsichtlich Energie (Q)- und CO₂-Äq-Bilanz (Anmerkung: -Q für verbrauchte Energie; +Q für erzeugte Energie)

Abschließend soll ein einheitlicher, anlagenspezifischer „REUQ-Ausweis für EBS“ entwickelt werden, welcher die Basis zur Ermittlung der technischen Schwachstellen (und Aufzeigen von Änderungs- bzw. Verbesserungspotenzialen) der Aufbereitungsanlage bzw. des Systems „EBS“ liefert. Das Vorbild für einen REUQ-Ausweis stellt das bekannte und in der Praxis erfolgreich umgesetzte Etikett für Haushaltskühlgeräte zur Energieeffizienzdarstellung gemäß EU Vorgaben (EU, 2010). Das Etikett für Haushaltskühlgeräte ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2: Etikett für Haushaltskühlgeräte gemäß EU Vorgaben (EU, 2010)

1.3 Begriffsdefinitionen

Die wesentlichen Definitionen und Begriffe werden nachfolgend erläutert.

Abfall

Im Abfallwirtschaftsgesetz (AWG 2002) wird der Begriff „Abfall“ als bewegliche Sache definiert, deren sich der Besitzer entledigen will oder entledigt hat bzw. deren Sammlung, Lagerung, Beförderung und Behandlung als Abfall erforderlich ist, um die öffentlichen Interessen nicht zu beeinträchtigen. (BKAOE, 2002)

Altstoffe

Im Sinne des AWG 2002 sind Altstoffe Abfälle, welche getrennt von anderen Abfällen gesammelt werden, oder Stoffe, die durch eine Behandlung aus Abfällen gewonnen werden, um diese Abfälle nachweislich einer zulässigen Verwertung zuzuführen. (BKAOE, 2002)

Altöle

„Altöle, alle mineralischen oder synthetischen Schmier- oder Industrieöle, die für den Verwendungszweck, für den sie ursprünglich bestimmt waren, ungeeignet geworden sind, zum Beispiel gebrauchte Verbrennungsmotoren- und Getriebeöle, Schmieröle, Turbinen- und Hydrauliköle.“ (BKAOE, 2002)

Brennwert (H_0)

Ist die bei der vollständigen Oxidation (Verbrennung) eines Brennstoffs freiwerdende Energiemenge inklusive der Verdampfungswärme für entstehenden Wasserdampf. (Umweltbundesamt, 2013)

CO₂-Äquivalente

Diese sind das Ergebnis der Aggregation von Treibhausgas (THG) nach ihrem Treibhauspotential (THP) und stellen einen Indikator für das Umweltproblemfeld „Klima“ dar. (Umweltbundesamt, 2013)

direkte Emissionen

Direkt bedeutet bei Emissionen, Gewässereinleitungen und Abfällen, dass sie unmittelbar von einem Prozess ausgehen, das heißt die direkten Outputs in die Umwelt darstellen. Dabei ist zu beachten, dass die mittelbar mit einem Prozess verbundenen Umwelteffekte (durch Hilfsenergie, Materialien, Transporte zum bzw. vom Modul/Prozess) hierin nicht enthalten sind. Diese sind erst in der Angabe inkl. Vorkette berücksichtigt. (Umweltbundesamt, 2013)

Energiebarwert

Der Energiebarwert soll die Energieeinsparung der EBS Produktion und Verwertung gegenüber einem rein mit fossilen Brennstoffen betriebenen Zementwerk beschreiben. Die Angabe erfolgt in Prozent. (Sarc et al., 2014)

Ersatzbrennstoffe

Die Abfallverbrennungsverordnung spricht von Abfällen, 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. (BMLFUW, 2010)

Fossiler Kohlenstoff

Kohlenstoff, der über sehr lange Zeiträume entstanden ist.

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, das heißt sie verhalten sich wertmäßig neutral.“ (ASI, 2005)

Gewerbeabfall

Gemischte betriebliche Abfälle, die gemäß ÖNORM S 2100 unter der SN 91101 („Siedlungsabfälle und ähnliche Gewerbeabfälle“) geführt werden. „Gewerbeabfall“ ist ein weit verbreiteter Begriff, der eine Herkunftsbezeichnung für „gemischte Siedlungsabfälle“ aus Gewerbe- und Industriebetrieben darstellt. (Pomberger, 2008)

Heizwert (H_U)

Ist die bei der vollständigen Oxidation (Verbrennung) eines Brennstoffs frei werdende Energiemenge ohne die Verdampfungswärme für entstehenden Wasserdampf. (Umweltbundesamt, 2013)

Inkl. Vorkette

Inklusive Vorkette bedeutet bei Emissionen, Gewässereinleitungen und Abfällen, dass hier der gesamte (soweit im Datensatz abgebildete) Lebensweg miteinbezogen wird, also die direkten Umwelteffekte plus die von den vorgelagerten Prozessketten ausgehenden. Hierbei sind jeweils die Systemgrenzen zu beachten, die je nach Datenquelle unterschiedlich gesetzt sein können (z. B. Berücksichtigung von Herstellung und Entsorgung). (Umweltbundesamt, 2013)

Kumulierter Energie-Aufwand (KEA)

Der Kumulierte Energie-Aufwand ist eine Maßzahl für den gesamten Aufwand an Energieressourcen (Primärenergien) zur Bereitstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung. Im KEA sind auch die Energiemengen enthalten, die mit der Herstellung z. B. von Holz als Baustoff oder Papier verbunden sind, auch wenn die Energie als Heizwert im Produkt noch zur Verfügung steht. Ähnlich umfasst der KEA auch den gesamten Energieaufwand an Rohöl oder Erdgas bei der Kunststoffherstellung. Der KEA wurde mit der VDI-Richtlinie 4600 methodisch beschrieben. (Umweltbundesamt, 2013)

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 welche Ebene (Güter oder Stoffe) eine Untersuchung durchgeführt werden soll. Material schließt Rohmaterialien sowie alle durch biologische, physikalische oder chemische Prozesse veränderten Substanzen ein.“ (ASI, 2005)

Mitverbrennung

„Werden Abfälle nicht in Abfallverbrennungsanlagen, sondern in industriellen Feuerungsanlagen verbrannt, so spricht man von Mitverbrennung.“ (Umweltbundesamt, 2001)

Mitverbrennungsanlage

„Eine Mitverbrennungsanlage ist jede ortsfeste oder nicht ortsfeste Anlage, deren Hauptzweck in der Energieerzeugung oder Produktion stofflicher Erzeugnisse besteht und in der Abfall als Regel- oder Zusatzbrennstoff verwendet wird oder in der Abfall im Hinblick auf die Beseitigung thermisch behandelt wird.“ (Europäisches Parlament, 2000)

Primärmetallurgische Herstellung eines Stoffes

Von Primärmetallurgie spricht man, wenn der Produktionsprozess beim Abbau des dazu benötigten Erzes begonnen hat und inkludiert alles bis hin zur Herstellung des gewünschten Metalls. (Umweltbundesamt, 2013)

Sekundärmetallurgische Herstellung eines Stoffes

Die Sekundärmetallurgie nimmt den Ausgang beim gesammelten Schrott. Die anfallenden Arbeitsschritte zur Herstellung des gewünschten Metalls nennt man Sekundärmetallurgie. (Umweltbundesamt, 2013)

Siedlungsabfall

„Siedlungsabfälle sind Abfälle aus privaten Haushalten und andere Abfälle, die auf Grund ihrer Beschaffenheit oder Zusammensetzung den Abfällen aus privaten Haushalten ähnlich sind; bei der Zuordnung ist das Europäische Abfallverzeichnis im Sinne des Art. 1 der Richtlinie 75/442/EWG, ABI. Nr. L 78 vom 26.3.1991 S 32, und die Entscheidung 96/350/EG, ABI.Nr. L 135 vom 6. 6. 1996 S 32, zu berücksichtigen.“ (BKAOE, 2002)

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. NH₃, CO₂, Kupfersulfat) ist. Keine Stoffe sind z.B. Trinkwasser, da es nicht nur aus reinen Wasser besteht, sondern auch Kalzium und viele Spurenelemente, oder PVC, da es neben polymerisierten 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. Das untersuchte System kann ein Einzelprozess oder eine Verknüpfung vieler Prozesse einschließlich der Unterprozesse sein. Die Stoffflussanalyse kann auch als eine Input-Output-Analyse – im internationalen Sprachgebrauch auch PIOT (physical input output tables) genannt – betrachtet werden. Die Input-Output-Analyse beschreibt die produktionsmäßigen Beziehungen zwischen den Teilbereichen der Wirtschaft und die Untersuchungen der wechselseitigen Zusammenhänge zwischen Inputs und Outputs.“ (ASI, 2005)

Stoffliche Verwertung

„Stoffliche Verwertung ist 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.“ (BKAOE, 2002)

Recycling

Recycling ist 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 zu Verfüllung bestimmt sind. (BKAOE, 2002)

Treibhausgase (THG)

Dies sind gasförmige Emissionen, die zum Treibhauseffekt beitragen. Sie gehören zu den relevanten Umweltindikatoren und lassen sich zum relativen Treibhauspotential (THP) als Summenparameter aggregieren. Wichtige THG sind CO₂, CH₄, und N₂O sowie SF₆, PFC und HFC (sogenannte Kyoto-Gase). (Umweltbundesamt, 2013)

Treibhauspotential (THP)

Das Treibhauspotential (THP) ist das massebezogene Äquivalent der Treibhauswirkung von Treibhausgasen, bezogen auf das Leit-Gas CO₂, daher wird es in CO₂-Äquivalenten angegeben. Das THP ist aufgrund der Wirkungscharakteristik von THG und deren unterschiedlichen atmosphärischen Verweildauern ein zeitliches Integral über einen bestimmten Zeitraum. Üblich sind THP-Angaben über 100 Jahre. (Umweltbundesamt, 2013)

Transferkoeffizient

„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. Dabei sind allfällige Transfers ins Lager (Lageraufbau) bei der Summenbildung als Outputs bzw. aus dem Lager

(Lagerabbau) heraus als Inputs zu berücksichtigen. Je nach Fragestellung kann in Einzelfällen für die Berechnung der Transferkoeffizienten nur ein Teilinput betrachtet werden. Der Transferkoeffizient ist dimensionslos.“ (ASI, 2005)

80er-Perzentil

Das 80er-Perzentil ist derjenige Wert, der die nach ihrer Größe geordnete Wertereihe in zwei Teile zerlegt, sodass 80 % aller Werte kleiner oder gleich und 20 % aller Werte größer oder gleich sind. (Umweltbundesamt, 2011)

2 REUQ-Ausweis für EBS

Im gegenständlichen Kapitel werden nur die zusammenfassenden Ergebnisse dargestellt, die genaue Erklärung und Berechnungen dazu sind in Kapiteln 5 und 6 gegeben.

Um die Ergebnisse zu visualisieren und auf einen Blick zu identifizieren, wurde in der gegenständlichen Arbeit ein Ausweis erstellt, welcher alle Ergebnisse berücksichtigt und widerspiegelt. Dabei soll das Ergebnis ressourcen-, energie-, umwelt- und qualitätsrelevante Aspekte bei der EBS-Produktion und der EBS-Verwertung liefern. Aus dieser Vorgabe heraus wurden Indikatoren, (material- und anlagenspezifische) festgelegt, die dies ermöglichen. Die Indikatoren lauten:

- 1) Energiebarwert,
- 2) Treibhausgaseffekt,
- 3) Stoffliche Verwertung,
- 4) Schwermetalle und
- 5) Biogener Anteil.

Für die Bewertung der Ergebnisse wurde eine siebenstufige Skala gewählt. Die Bezeichnung der einzelnen Klassen folgt dem Alphabet und lautet wie folgt:

- A („best case“)
- B, C, D, E, F
- G („worst case“).

2.1 Berechnung der Indikatoren für den REUQ-Ausweis für EBS

Wie oben erwähnt, werden für den REUQ-Ausweis für EBS Indikatoren beschrieben und mittels Klassen (A-G) in einem linearen Zusammenhang (Ausnahme „Schwermetalle“) gewertet. Nachfolgend werden Indikatoren mit Klassen beschrieben:

- 1) Energiebarwert

Dieser Indikator stellt die Einsparung (Auswertung in %) vom System „EBS Gesamtsystem (SG 1 + 2)“ im Vergleich zum Referenzsystem (SG Ref.) dar, basierend auf den Energiebilanzen beider Systeme. Der Aufbau der Energiebilanzen ist dem Kapitel 5.2 und die theoretische Berechnung dem Kapitel 6.2.2 zu entnehmen.

Die nachfolgende Tabelle 1 zeigt die einzelnen Daten zur Festlegung von Klassen A („best case“) und G („worst case“) für den Indikator Energiebarwert. Klasse A stellt dabei das optimierteste bzw. beste EBS-Produktions- und EBS-Verwertungssystem (SG 1 + 2) dar, während die Klasse G das schlechteste System darstellt. Die verwendeten Daten für Klasse A und G wurden in der Energiebilanz für das System SG 1 + 2 und SG Ref. eingegeben und der Energiebarwert daraus berechnet.

Tabelle 1: Einzelne Daten für die Bestimmung von Klassen A und G für den Indikator Energiebarwert (bezogen auf 1.000 kg HRF)

Daten für Energiebarwert	A	G
Stoffliche Verwertung von Wertstoffen	8 % (FE 5 %; NE 1 %; PET 1 %; PPK 1 %)	1,1 % (FE 1 %; NE 0,1 %; PET 0 %; PPK 0 %)
EBS MB (Heizwert, (Massenanteil von \sum EBS))	23,1 MJ/kg _{OS} , (35 %)	14,7 MJ/kg _{OS} (15 %)
EBS SB (Heizwert, (Massenanteil von \sum EBS))	18,7 MJ/kg _{OS} (30 %)	12,3 MJ/kg _{OS} (22 %)
EBS WS (Heizwert, (Massenanteil von \sum EBS))	12 MJ/kg _{OS} (20 %)	12 MJ/kg _{OS} (55 %)
Anteil in das ZW	65 %	35 %
Anteil in die WS	35%	65%

Basierend auf der Tabelle 1 werden auch weitere Klassen mit den dazugehörigen Werten für den Energiebarwert ermittelt (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Zusammenfassende Darstellung der Klassen (A-G) mit den dazugehörigen Werten für den Indikator Energiebarwert (Anmerkung: Minus (-) steht für eine Einsparung vom System SG 1 + 2 im Vergleich zum SG Ref.)

Energiebarwert	[%]	
A	> -29	
B	-28,9	-25
C	-24,9	-21
D	-20,9	-17
E	-16,9	-13
F	-12,9	-9
G	< -8,9	

2) Treibhausgaseffekt

Der Indikator „Treibhausgaseffekt“ stellt gleich wie der Indikator Energiebarwert die Einsparungen (in %) vom System SG 1 + 2 im Vergleich zum System SG Ref. dar, basiert aber auf der CO₂-Äq-Bilanz (vgl. Kapitel 5.3 und 6.2.3).

Zur Ermittlung der sieben Klassen wird der CO₂-Wert für Steinkohle und für EBS MB herangezogen (vgl. Tabelle 3). (Sarc et al., 2014a)

Tabelle 3. CO₂-Äq-Emissionen für Steinkohle und EBS MB (Sarc et al., 2014a)

Steinkohle	EBS MB
[g _{CO2} /MJ _{DM}]	[g _{CO2} /MJ _{DM}]
98	41 - 65
<i>CO₂-Einsparung = 34 - 58 %</i>	

Basierend auf den Daten aus Tabelle 3 werden die Klassen (A-G) mit Einsparungen (Minus-Vorzeichen) als Treibhausgaseffekt dargestellt. (vgl. Tabelle 4)

Tabelle 4: Zusammenfassende Darstellung der Klassen (A-G) mit dazugehörigen Werten für den Indikator „Treibhausgaseffekt“ (Anmerkung: Minus (-) steht für eine Einsparung vom System SG 1 + 2 im Vergleich zum SG Ref.)

Treibhausgaseffekt	[%]	
A	> -55	
B	-54,9	-48
C	-47,9	-40
D	-39,9	-33
E	-32,9	-25
F	-24,9	-18
G	< -17,9	

3) Stoffliche Verwertungsquote

Hierbei handelt es sich zugleich um einen anlagenspezifischen und materialspezifischen Indikator. Der Anteil der aussortierten Wertstoffe (FE, NE, PET und PPK) in Prozent von der heizwertreichen Fraktion (HRF) stellt den anlagenspezifischen Teil des Indikators dar. Der prozentuelle Anteil (vom Abfallinput) der Asche (d.h. Aschegehalt), welche durch die EBS MB und SB im Zementwerk in den Klinker eingebunden wird, stellt den materialspezifischen Teil des Indikators dar. Diese beiden Prozentwerte werden addiert. Beim anlagenspezifischen Teil ist es derselbe Sachverhalt wie in der Tabelle 1. Der Ascheanteil wurde anhand von Qualitätsanalysen verschiedenster Brennstoffe beurteilt. Dieser bewegt sich zwischen 8,5 und 21 %, bezogen auf die Originalsubstanz. (Sarc et al., 2014a) Die gesamte Aschemasse aus den beiden Brennstoffen EBS MB und EBS SB wird auf die Inputmenge des Stoffstroms Abfall bezogen (d.h. Aschemenge [kg] durch importierte Abfallmenge [kg]). Damit wurde ein Gesamtintervall zwischen 14 % für „A“ und unter 2 % für „G“ festgelegt.

Tabelle 5: Zusammenfassende Darstellung der Klassen (A-G) mit dazugehörigen Werten für den Indikator „Treibhausgaseffekt“

Stoffliche Verwertung	[%]
A	14,0
B	12,0
C	10,0
D	8,0
E	6,0
F	4,0
G	2,0

4) Schwermetalle

Der Indikator Schwermetall soll Informationen über die Qualität der in der österreichischen Zementindustrie eingesetzten EBS liefern. EBS werden anstatt konventioneller Energieträger (Fossil (Mix)) eingesetzt bzw. um diese zu substituieren. Aus diesem Grund spielt die chemische Qualität der eingesetzten Brennstoffe eine wichtige Rolle. Die Festlegung der chemischen Qualität basiert auf der Abfallverbrennungsverordnung (BMLFUW, 2010), die die Vorgaben beim Einsatz von EBS in der Zementindustrie regelt.

Die Schwermetalle der in Österreich eingesetzten Steinkohle sind in der Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Schwermetallgehalt der Steinkohle (Sarc et al., 2014a)

Schwermetalle	[mg/MJ _{DM}]
Sb	0,1
Cd	0,36
Hg	0,101
Pb	10
Cr	2,6
Co	1
Ni	3,3
As	1,3
Summe	18,8

Die Werte für die Klassen (A-G) wurden so festgelegt, dass die Summe der Schwermetalle aus der Abfallverbrennungsverordnung (d.h. Grenzwerte) als Klasse G gilt. Die Summe der Schwermetalle in der Steinkohle wird als C-Klasse bezeichnet, da basierend auf bisherigen Erfahrungen über die Qualität von EBS (Sarc et al., 2014; 2014a) ersichtlich ist, dass EBS auch bessere Qualitäten (z.B. B oder sogar A Klasse) aufweisen können. Die Abstufung in der Skala ist aufgerundet linear, d.h. die Grenze zwischen den Klassen A und B entspricht der Hälfte von Klasse C, und die Klassen D-G wurden entsprechend aufgeteilt, d.h. der Klasse C wird 21 mg/MJ_{DM} (ca. ¼ von 107,3 (G) – 18,8 (C)) dazugerechnet usw.

Tabelle 7: Zusammenfassende Darstellung der Klassen (A-G) mit dazugehörigen Werten für den Indikator „Schwermetalle“

Schwermetalle	[mg/MJ _{DM}]	
A	0	9,4
B	9,5	14,1
C	14,2	18,8
D	18,9	40,9
E	41	63,1
F	63,2	85,2
G	107,3	

5) Biogener Anteil

Der Indikator Biogener Anteil soll Informationen über den biogenen Anteil des in der österreichischen Zementindustrie eingesetzten EBS liefern. Dabei ermöglicht ein hoher biogener Anteil im EBS eine Verringerung der fossilen CO₂-Emission. Der biogene Anteil wurde anhand von Qualitätsanalysen verschiedenster Brennstoffe beurteilt. Dieser bewegte sich zwischen 16 und 51 % Prozent bezogen auf die Originalsubstanz. (Sarc et al., 2014a) Die Abstufung in der Skala ist linear zwischen 15 und 50%.

Tabelle 8: Zusammenfassende Darstellung der Klassen (A-G) mit dazugehörigen Werten für den Indikator „Biogener Anteil“

Biogener Anteil	[%]	
A		> 50
B	49,9	43
C	42,9	36
D	35,9	29
E	28,9	22
F	21,9	15
G	< 14,9	

2.2 REUQ-Ausweis für EBS-theoretische Anlage

Es werden nun die einzelnen Indikatoren basierend auf den theoretischen Daten (vgl. Kapitel 6) für eine beispielhafte EBS-Produktions- und Verwertungsanlage ermittelt. Des Weiteren werden die Indikatoren im REUQ-Ausweis aufgenommen und eine REUQ-Klasse für die theoretische Anlage festgelegt. Die Ergebnisse für einzelne Indikatoren werden nachfolgend dargestellt:

1) Energiebarwert

Der Energiebarwert basiert auf der Energiebilanz und ergibt sich durch die prozentuelle Einsparungen des Systems SG 1 + 2 im Vergleich zu SG Ref.. Die Einsparung, d.h. Energiebarwert beträgt 15,5 % im Vergleich zum SG Ref., diesem Energiebarwert wird die Klasse „E“ zugeordnet (vgl. Tabelle 9).

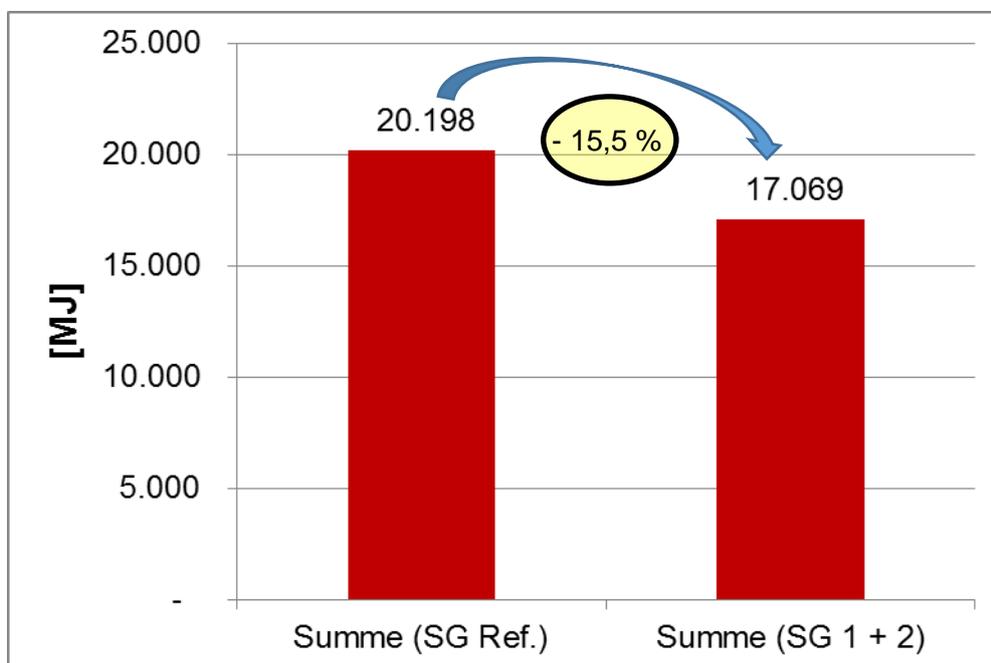


Abbildung 3: Energiebilanz: Ergebnis für die theoretische Anlage

Tabelle 9: Energiebarwert: Klasse und Ergebnis für die theoretische Anlage

Energiebarwert	[%]	
A	> -29	
B	-28,9	-25
C	-24,9	-21
D	-20,9	-17
E	-16,9	-13
F	-12,9	-9
G	< -8,9	
Theoretische Anlage		
	[%]	Klasse
Energiebarwert	- 15,5	E

2) Treibhausgaseffekt

Die Basis für die Berechnung stellt die CO₂-Äq-Bilanz dar. Die Einsparung, d.h. der Treibhausgaseffekt, dargestellt in der Abbildung 54 beträgt 40,1 %. Dieser Wert für den Treibhausgaseffekt wird der Klasse „C“ zugeordnet (vgl. Tabelle 10).

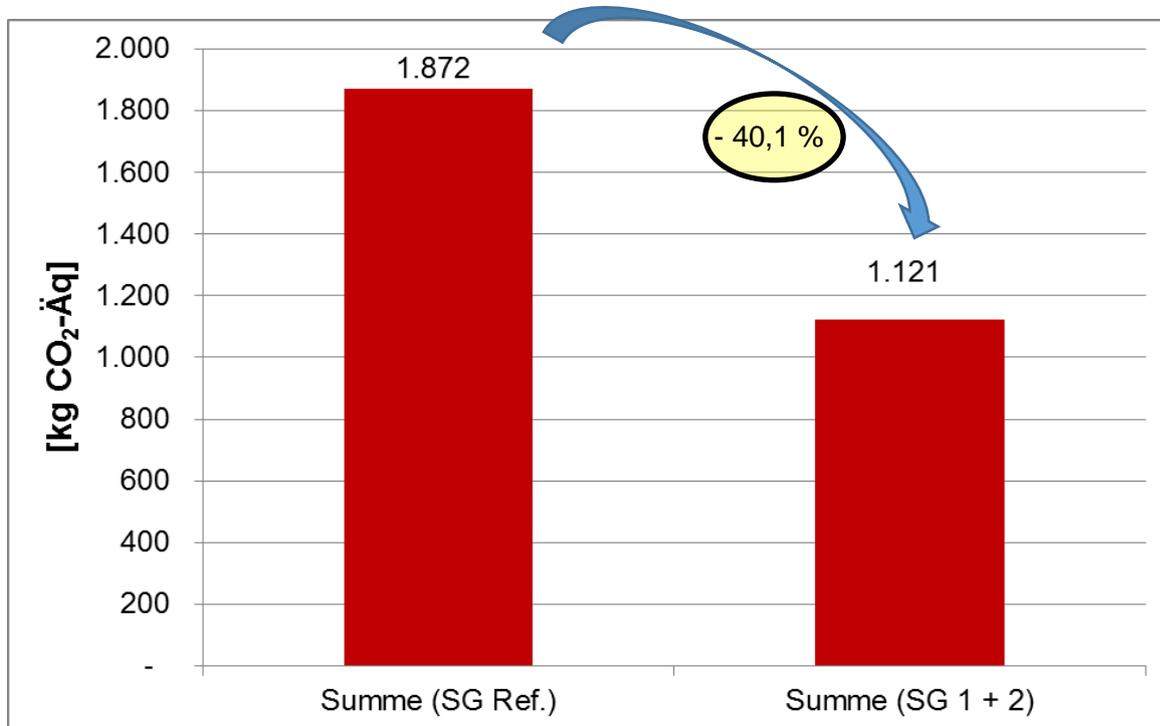


Abbildung 4: CO₂-Äq-Bilanz: Ergebnis für die theoretische Anlage

Tabelle 10: Treibhausgaseffekt: Klasse und Ergebnis für die theoretische Anlage

Treibhausgaseffekt	[%]	
A	< -55	
B	-54,9	-48
C	-47,9	-40
D	-39,9	-33
E	-32,9	-25
F	-24,9	-18
G	> -17,9	
Theoretische Anlage		
	[%]	Klasse
Treibhausgaseffekt	- 40,1	C

3) Stoffliche Verwertungsquote

Für die theoretische Anlage beträgt der Indikator Stoffliche Verwertungsquote 10,9 % und dieses Ergebnis wird der Klasse „C“ zugeordnet (vgl. Tabelle 12). Die einzelnen Daten für diesen Indikator sind in der Tabelle 11 dargestellt. Der Wert für die Asche ergibt sich durch die in das Zementwerk eingebrachte Masse von Asche aus den EBS im Verhältnis zum Abfallinput.

Tabelle 11: Einzelne Daten für die Bestimmung des Indikators Stoffliche Verwertungsquote

	[%]
FE	2,5
NE	1,0
PET	1,0
PPK	1,0
Asche EBS MB	1,5
Asche EBS SB	3,9
Summe	10,9

Tabelle 12: Stoffliche Verwertungsquote: Klasse und Ergebnis für die theoretische Anlage

Stoffliche Verwertungsquote	[%]	
A	14	
B	12	
C	10	
D	8	
E	6	
F	4	
G	2	
Theoretische Anlage		
	[%]	Klasse
Stoffliche Verwertungsquote	10,9	C

4) Schwermetalle

Für die theoretische Anlage beträgt der Indikator Schwermetalle 13,6 mg/MJ_{DM} und diesem Wert wird die Klasse „B“ zugeordnet (vgl. Tabelle 14).

Für die Berechnung des Indikators werden die Schwermetallgehalte aus der Laboranalyse für acht Schwermetalle, jeweils für den EBS MB und SB, aufsummiert. Dieser Wert wird anschließend mit der in das Zementwerk eingebrachten Energie des jeweiligen EBS multipliziert. Die erhaltene Gesamtmasse an Schwermetallen (125.629 mg) wird durch die Gesamtenergie dividiert, daraus ergibt sich der durchschnittliche Schwermetallgehalt für EBS MB und SB. Dieser Rechenweg ist in der Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Berechnung für die Daten zur Bestimmung des Indikators Stoffliche Verwertungsquote

	[mg/MJ _{DM}]	[kg _{OS}]	[kg _{DM}]	[MJ/kg _{DM}]	[MJ _{DM}]	[mg]	[mg/MJ _{DM}]
EBS MB	18,4	150,0	127	25,0	3.184	58.581	
EBS SB	11,1	380,0	285	21,2	6.042	67.048	
Summe					9.226	125.629	
Schwermetallgehalt für EBS MB und SB							13,6

Tabelle 14: Schwermetalle: Ergebnisse für Steinkohle, EBS MB, EBS SB und Zuordnung des Ergebnisses einer Klasse für die theoretische Anlage

	Steinkohle	EBS MB	EBS SB	Schwermetalle	[mg/MJ _{DM}]	
	[mg/MJ _{DM}]	[mg/MJ _{DM}]	[mg/MJ _{DM}]			
Sb	0,1	4,5	1,1	A	0	9,4
Cd	0,36	0,06	0,05	B	9,5	14,1
Hg	0,101	0,04	0,047	C	14,2	18,8
Pb	10	8	4,3	D	18,9	40,9
Cr	2,6	4,8	4,5	E	41	63,1
Co	1	0,2	0,2	F	63,2	85,2
Ni	3,3	0,7	0,8	G	107,3	
As	1,3	0,1	0,1	Theoretische Anlage		
Summe	18,8	18,4	11,1		[mg/MJ _{DM}]	Klasse
Schwermetallgehalt für EBS MB & SB		13,6		Schwermetalle	13,6	B

5) Biogener Anteil

Kürzlich veröffentlichten Daten für EBS MB und EBS SB (Sarc et al., 2014a) ergeben für EBS folgenden biogenen Anteil:

- EBS MB: 44,8 % DM (X_B^{TC}),
- EBS SB: 58,3 % DM (X_B^{TC}).

In der gegenständlichen Arbeit werden diese Daten bezogen auf die Originalsubstanz umgerechnet. Zur Ermittlung des biogenen Anteils werden der Gesamtkohlenstoffgehalt und der biogene Kohlenstoff von EBS MB und EBS SB berechnet. Daraus lässt sich der biogene Anteil im EBS für das Zementwerk berechnen (d.h. Gesamtmasse kg $C_{biog.}$ dividiert durch Gesamtmasse kg C). Die einzelnen Ergebnisse sind in der Tabelle 15 zusammengefasst.

Tabelle 15: Rechenweg für die Daten zur Bestimmung des Indikators Biogener Anteil

	Masse	TC _{OS}	X_B^{TC} _{OS}	[kg C]	[kg C _{biog.}]	[% C _{biog.}]
	[kg _{OS}]	[% OS]	[% OS]			
EBS MB	150	44,8	38,0	67,2	25,6	
EBS SB	380	35,2	43,7	133,7	58,4	
Biogener Anteil						41,8

Für die theoretische Anlage beträgt der Indikator Biogener Anteil 41,8 % und diesem Wert wird die Klasse „C“ zugeordnet (vgl. Tabelle 16).

Tabelle 16: Biogener Anteil: Klasse und Ergebnis für die theoretische Anlage

Biogener Anteil	[%]	
A		> 50
B	49,9	43
C	42,9	36
D	35,9	29
E	28,9	22
F	21,9	15
G	< 14,9	
Theoretische Anlage		
	[%]	Klasse
Biogener Anteil	41,8	C

Die Einzelergebnisse und die Gesamtbeurteilung sind in Form des erstellten REUQ-Ausweises in der nachfolgenden Abbildung 5 dargestellt. Dabei wird die Gesamtbeurteilung als Mittelwert über die einzelnen Ergebnisse ausgedrückt.

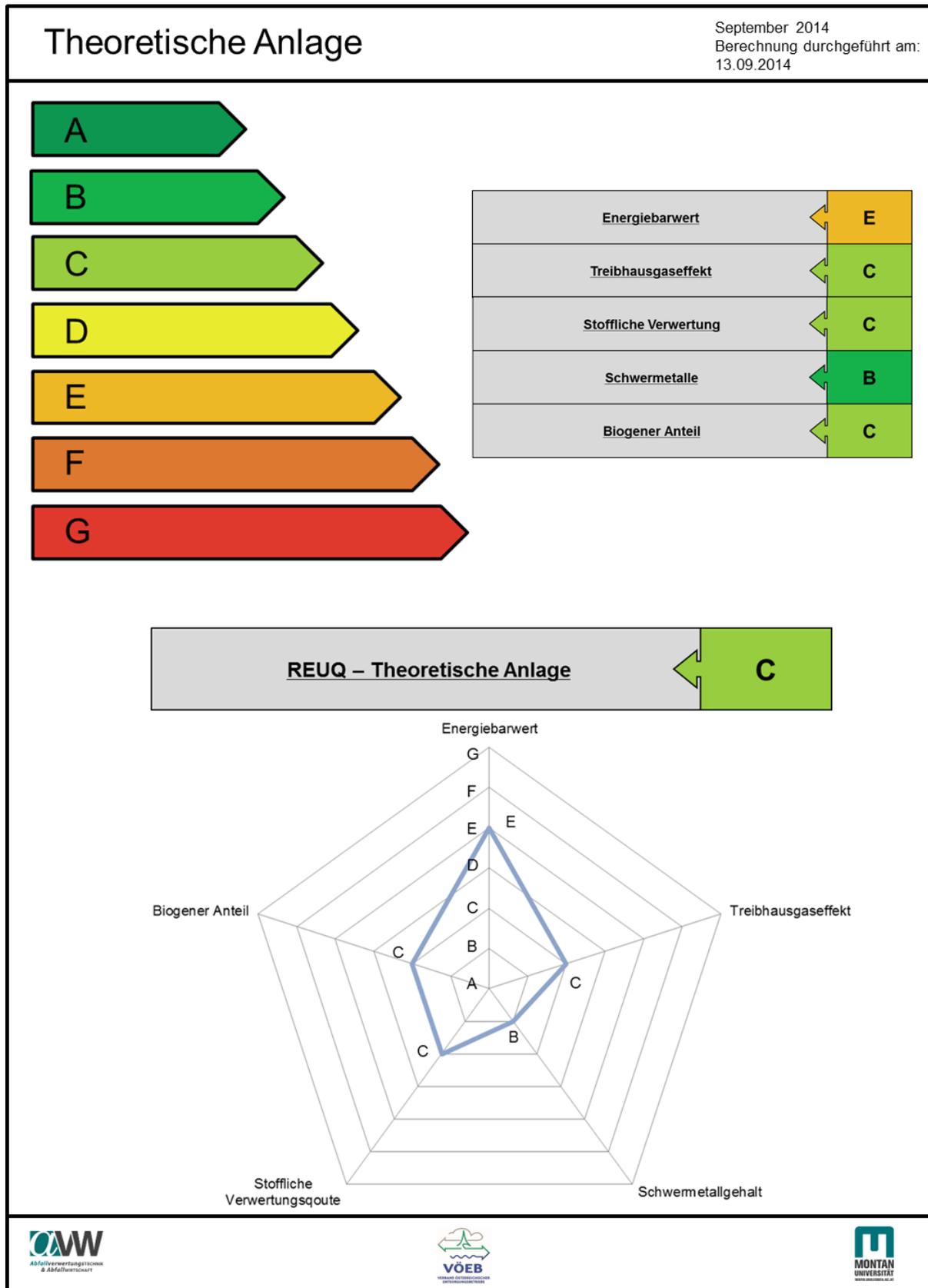


Abbildung 5: REUQ-Ausweis für eine theoretische Anlage

3 Rechtliche Aspekte

In den folgenden zwei Unterkapiteln werden die aktuellen Gesetzgebungen, die für das gegenständliche Thema von Bedeutung sind, beschrieben.

3.1 Abfallwirtschaftsgesetz (AWG) 2002

Das in zehn Abschnitte untergliederte Abfallwirtschaftsgesetz definiert nicht nur Allgemeine Bestimmungen (Abschnitt 1), sondern unter anderem auch Behandlungsanlagen, Allgemeine Pflichten und Ähnliches.

Im § 1, 1 Abschnitt des AWG werden unter anderem Ziele und Grundsätze definiert. Hier ist ebenso die Hierarchie beschrieben, auf die das Gesetz fußt. Im Folgenden wird diese wiedergegeben. (BKAOE, 2002)

„Die Abfallwirtschaft ist danach auszurichten, dass

- 1. schädliche, nachteilige oder sonst das allgemeine menschliche Wohlbefinden beeinträchtigende Einwirkungen auf Menschen sowie auf Tiere, Pflanzen, deren Lebensgrundlagen und deren natürliche Umwelt 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.*

(2) Diesem Bundesgesetz liegt folgende Hierarchie zugrunde:

- 1. Abfallvermeidung;*
- 2. Vorbereitung zur Wiederverwendung;*
- 3. Recycling;*
- 4. sonstige Verwertung, zB energetische Verwertung;*
- 5. Beseitigung.“*

Zum Thema (Mit)Verbrennung verweist das AWG auf die Abfallverbrennungsverordnung (vgl. Kapitel 3.2)

3.2 Abfallverbrennungsverordnung – AVV

Die in fünf Abschnitte untergliederte Abfallverbrennungsverordnung unterliegt dem Ziel, den Schutz des Lebens und der Gesundheit von Menschen vor schädlichen Einwirkungen, die durch die Verbrennung oder Mitverbrennung von Abfällen entstehen könnten, zu sichern. Die dabei zu berücksichtigenden Eckpunkte sind die Effizienz im Einsatz und Verwendung von Energie und die geringstmöglichen Emissionen beim Betrieb solcher Anlagen. (BMLFUW, 2010)

In der Anlage 8 der Abfallverbrennungsverordnung werden die Grenzwerte für Ersatzbrennstoffe, d.h. Qualitätskriterien unter anderem beim Einsatz in Anlagen zur Zementerzeugung aufgelistet. Diese gelten für jene Anlagenteile von Zementerzeugungsanlagen, in denen Zementklinker gebrannt wird. (BMLFUW, 2010). Diese Grenzwerte sind in der Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Grenzwerte für Ersatzbrennstoffe beim Einsatz in Anlagen zur Zementerzeugung (BMLFUW, 2010)

Parameter	Grenzwerte	
	Median [mg/MJ]	80-er Perzentil [mg/MJ]
Sb	7	10
As	2	3
Pb	20 ²⁾	36 ³⁾
Cd	0,23 ¹⁾	0,46 ¹⁾
Cr	25	37
Co	1,5	2,7
Ni	10	18
Hg	0,075 ⁴⁾	0,15 ⁵⁾

¹⁾ 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 und für das 80-er Perzentil ein Grenzwert von 0,7 mg/MJ.
²⁾ Für Holzabfälle gilt ein Grenzwert von 30 mg/MJ.
³⁾ Für Holzabfälle gilt ein Grenzwert von 54 mg/MJ.
⁴⁾ Für Klärschlamm/Papierfaserreststoff gilt ein Grenzwert von 0,15 mg/MJ.
⁵⁾ Für Klärschlamm/Papierfaserreststoff gilt ein Grenzwert von 0,25 mg/MJ.

Die Grenzwerte werden in [mg/MJ_{DM}] angegeben und müssen daher von den Laborwerten (Angaben in [mg/kg_{DM}]) über den Heizwert umgerechnet werden. Dies geschieht anhand folgender Formel (BMLUFW, 2008):

$$\text{Schadstoffgehalt} \left[\frac{\text{mg}}{\text{MJ}} \right] = \frac{\text{Schadstoffgehalt} \left[\frac{\text{mg}}{\text{kg TM}} \right]}{\text{Heizwert} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg TM}} \right]} \quad (1)$$

3.3 Bundes-Energieeffizienzgesetz – EEffG

Das Gesetz ist mit 01.01.2015 in Kraft getreten. Für Lieferanten von EBS bringt dieses Gesetz Veränderungen mit sich, denn nach dem EEffG gilt man als sogenannter Energielieferant, wenn man Energieträger (darunter werden auch Abfälle zur thermischen Verwertung/Behandlung verstanden):

- entgeltlich in Österreich,
- an einen Endenergieverbraucher liefert und
- die Energieabgabemenge im jeweiligen Vorjahr mehr als 25 GWh betragen hat.

Das bedeutet, werden Abfälle zur energetischen Nutzung z.B. an ein Zementwerk in Österreich geliefert, entsteht eine Lieferantenverpflichtung insoweit, die Abfälle entgeltlich verkauft werden. Unentgeltliche Lieferungen bleiben außer Betracht.

Die Lieferantenverpflichtung sieht vor, dass Energielieferanten Energieeffizienzmaßnahmen bei ihren eigenen oder fremden Endkunden oder bei sich selbst, sowie bei Haushalten in einem bestimmten Umfang ihrer Vorjahresenergieabsätze durchzuführen und nachzuweisen haben.

Der verpflichtete Lieferant:

- setzt entweder selbst Maßnahmen,
- er schließt sich einer Branchenverpflichtung an,
- Dritte erfüllen im Auftrag die Verpflichtung (Ausschreibung/Direktvergabe/Zukauf) oder
- er leistet eine Ausgleichszahlung.

4 Ersatzbrennstoffe

Das Interesse der gezielten mechanischen Aufbereitung von Restabfällen zu Ersatzbrennstoffen bzw. Brennstoff aus Müll (BRAM) begann bereits Anfang der 70er Jahre. Unterstützt von den hohen Energiepreisen in den Jahren 1973/74 rückten Abfälle europaweit in den Mittelpunkt des Interesses. Die Überlegungen, durch Aufbereiten der Abfälle hochkalorische Brennstoffe zu gewinnen, basierten Großteils auf energiewirtschaftlichen Erwägungen. Diese Alternativbrennstoffe sollten die Primärenergieträger ergänzen und somit die Last durch die hohen Energiepreise verringern. (Rößiger, 2008)

4.1 Arten von Ersatzbrennstoffen

Ersatzbrennstoffe lassen sich gemäß ihres Arbeitsaufwandes in zwei Gruppen unterscheiden.

Gruppe eins sind Ersatzbrennstoffe, welche bereits als Monofraktion erfasst und ohne aufwendige Aufbereitungsanstrengungen einer Mitverbrennung zugeführt werden können. Dazu gehören zum Beispiel:

- Altöl und Lösungsmittel,
- Klärschlämme,
- Tiermehl und Tierfette und
- Altreifen und Altgummi.

Gruppe zwei sind Abfälle welche ohne Aufbereitungsschritte, wie zum Beispiel Zerkleinerung und Schadstoffentfrachtung, nicht direkt als Brennstoff eingesetzt werden können. Beispiele dafür sind:

- Restabfälle aus Haushalten,
- Restabfälle aus Industrie und Gewerbe und
- Siebüberläufe aus mechanisch-biologischen Anlagen (MBA) usw.

4.2 Herstellung und Qualitätsanforderungen von Ersatzbrennstoffen

Im nachfolgenden Kapitel werden die benötigten technischen Grundlagen zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen erläutert. Dies soll einen allgemeinen Überblick über die bestehenden Anforderungen und dessen Umfang geben. Es ist zu erwähnen, dass diese Modelle eine reine materialspezifische Qualität beschreiben. In dieser Arbeit wird jedoch ein System erstellt und beschrieben, welches neben materialspezifischen auch anlagenspezifische Indikatoren abdeckt. Dennoch sind die Qualitätsbeschreibungen von EBS ein guter Weg sich mit der Grundthematik vertraut zu machen.

4.2.1 Technische Grundlagen der Ersatzbrennstoffherstellung

Die Herstellung eines Ersatzbrennstoffes verlangt eine gezielte Entfrachtung von Störstoffen. Die notwendigen Teilschritte sind abhängig von dem angelieferten Material und den Bedingungen des Käufers des produzierten Brennstoffes. Dabei handelt es sich beim Inputmaterial um Eigenschaften wie:

- Herkunft,
- Zusammensetzung,
- Schadstoffgehalt und
- Störstoffanteil.

Es handelt sich um mehrstufige Verfahren, wobei die Anzahl und Ausstattung der einzelnen Stufen wiederum von den Zielen und dem angelieferten Material abhängig sind. Die Verfahren können aus folgenden Modulen bestehen:

- Abfallannahme,
- mechanische Aufbereitung,
- Trocknung,
- Konfektionierung des Brennstoffes und
- Abluftbehandlung. (Farzaneh, 2004)

4.2.2 Qualitätsanforderungen an Ersatzbrennstoffe

Bei den Anforderungen des Käufers handelt es sich um Eigenschaften aus brennstofftechnischer Sicht. Diese brennstofftechnischen Eigenschaften lassen sich in

- chemische,
- mechanische,
- kalorische und
- reaktionstechnische

Eigenschaften unterteilen. (Beckmann et al., 2007)

Dabei werden zur Beschreibung der chemischen Eigenschaften folgende Parameter ermittelt (Beckmann et al., 2007)

- Anteil an nichtbrennbaren und brennbaren Bestandteilen,
- Anteil an Kunststoffen und sonstiger organischer Bestandteile,
- Elementar- und Spurenzusammensetzungen,
- Anteil von fixem Kohlenstoff,

- Gehalt an flüchtigen Bestandteilen und
- die verschiedenen Ascheerweichungspunkte.

Bei den mechanischen Eigenschaften handelt es sich um folgende Parameter (Beckmann et al., 2007):

- Dichte des Ersatzbrennstoffes,
- Schütteeigenschaften,
- Mahlbarkeit,
- Korngrößenverteilung und
- die allgemeine Handhabung des Brennstoffes im Sinne von Lagerfähigkeit und Transportfähigkeit.

Bei den kalorischen Eigenschaften werden folgende Eigenschaften aufgelistet (Beckmann et al., 2007)

- Heiz- und Brennwert,
- spezifischer Mindestluftbedarf,
- spezifische Mindestabgasmenge,
- adiabate Verbrennungstemperatur,
- Wärmekapazität,
- Wärmeleitfähigkeit und
- Temperaturleitfähigkeit.

Die reaktionstechnischen Eigenschaften sind eng mit dem Zünd- und Ausbrandverhalten verbunden und stellen ein wichtiges Kriterium für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen dar. Das Zünd- und Ausbrandverhalten ist jedoch von einer Vielzahl von Eigenschaften abhängig. Dies ist vergleichbar mit dem Korrosionspotential, welches sich ebenfalls nicht alleine vom Chlorgehalt ableiten lässt. (Beckmann et al., 2007)

Basierend auf diesen Punkten gibt es viele Überlegungen für eine einheitliche Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen. In der nachfolgenden Abbildung 6 ist ein Vorschlag für eine solche umfassende Charakterisierung dargestellt.

Stoffzusammensetzung			Spurenanalyse	
Wasser	Ma.-% r		As	mg/kg d
Asche	Ma.-% d		Be	mg/kg d
Biologisch abbaubare Bestandteile	Ma.-% d		Cd	mg/kg d
			Co	mg/kg d
Kurzanalyse			Cr	mg/kg d
Fixer Kohlenstoff	Ma.-% daf		Cu	mg/kg d
Flüchtige Bestandteile	Ma.-% daf		Hg	mg/kg d
Elementaranalyse			Mn	mg/kg d
C	Ma.-% daf		Ni	mg/kg d
H	Ma.-% daf		Pb	mg/kg d
O	Ma.-% daf		Sb	mg/kg d
N	Ma.-% daf		Se	mg/kg d
S	Ma.-% daf		Sn	mg/kg d
Cl	Ma.-% daf		Te	mg/kg d
F	Ma.-% daf		Tl	mg/kg d
			V	mg/kg d
Mechanische Eigenschaften			Aschezusammensetzung/ Ascheschmelzverhalten	
Schüttdichte	kg/m ³ r		Al	mg/kg d
Korngrößenverteilung	Ma.-%		Ca	mg/kg d
Kalorische Eigenschaften			Fe	mg/kg d
Brennwert	MJ/kg daf		K	mg/kg d
Heizwert	MJ/kg daf		Mg	mg/kg d
spezifischer Mindestluftbedarf	kg/kg daf		Na	mg/kg d
spezifische Abgasmenge	kg/kg daf		P	mg/kg d
adiabate Verbrennungstemperatur	°C		Si	mg/kg d
Reaktionstechnische Eigenschaften			Ti	mg/kg d
Zünd- und Ausbrandverhalten			S (min) oder Sulfatgehalt	mg/kg d
			Erweichungstemperatur	°C
			Halbkugeltemperatur	°C
			Fließtemperatur	°C
r	im Rohzustand			
d	trocken			
daf	trocken und aschefrei			

Abbildung 6: Beispiel für eine umfassende Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen (Beckmann et al., 2007)

4.2.3 Feste Sekundärbrennstoffe – Spezifikation und Klassen (EN 15359:2011)

Diese Norm legt ein Klassifizierungssystem für feste Sekundärbrennstoffe sowie ein Formular für die Spezifikation von deren Eigenschaften fest. Des Weiteren werden Qualitätskriterien beschrieben, die der Brennstoff erfüllen muss, um innerhalb eines Systems klassifiziert werden zu können.

In der nachfolgenden Abbildung 7 wird die Herstellung eines festen Sekundärbrennstoffes vereinfacht dargestellt. Dabei werden die Schnittstellen dargestellt, die zur Überprüfung des EBS dienen.

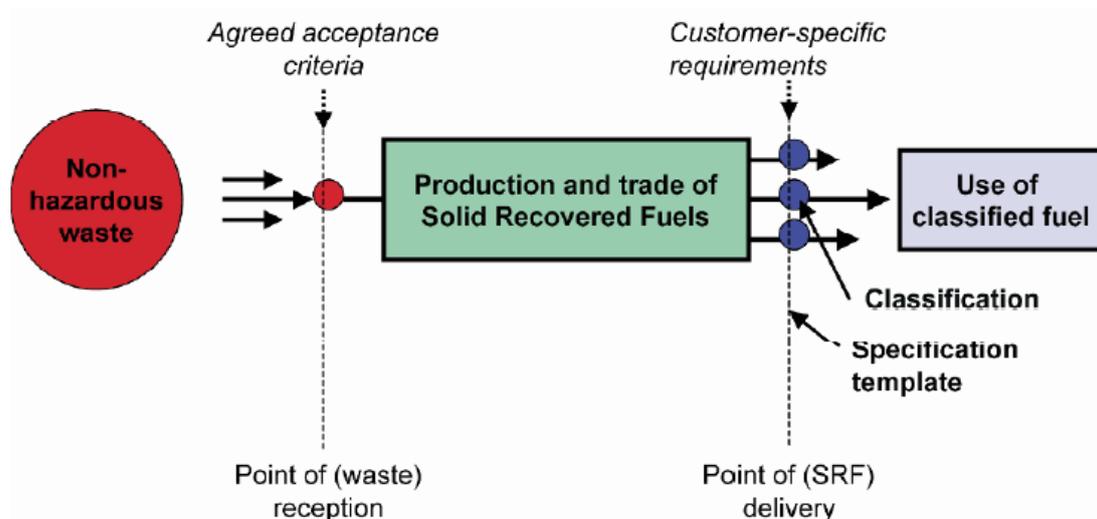


Abbildung 7: Ersatzbrennstoffherstellungskette (CEN, 2011)

Im Kapitel 7 dieser Norm werden drei wichtige Parameter für den Ersatzbrennstoff definiert. Dabei handelt es sich um die Höhe des Heizwertes, den Chlorgehalt und den Quecksilbergehalt. Diese werden in fünf Qualitätsklassen unterteilt, die jeweiligen Anforderungen sind in der Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Klassifizierungsschema für feste Sekundärbrennstoffe (CEN, 2011)

Kenngröße	Einheit	Qualitätsklassen				
		1	2	3	4	5
Heizwert	[MJ/kg _{OS}]	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Chlorgehalt	[M-% OS]	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3
Quecksilbergehalt	[mg/MJ _{OS}] (Median)	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,08	≤ 0,15	≤ 0,50

Auf dem EBS Markt werden heutzutage zwei Aspekte betrachtet. Einerseits ist das EBS-Qualitätsmanagement aus der Sicht von Mitverbrennungsanlagen noch ausbaufähig und andererseits aus Sicht der EBS-Produzenten wird angemerkt, dass aufgrund der Inhomogenität der eingesetzten Abfälle und des Kostendrucks kein besseres EBS-Qualitätssystem möglich ist. Durch die Weiterentwicklung der Sortier- und Aufbereitungstechnologien können z.B. Kunststoffe aussortiert und (teilweise) dem Recyclingprozess zugeführt werden, was eine negative Auswirkung auf einen der Qualitätskriterien (d.h. Heizwert) bei EBS hat.

Zusammenfassend dargestellt bedeutet dies, dass es immer schwieriger wird, EBS in den entsprechenden Qualitäten zu produzieren bzw. dass eine weitere Erhöhung der Substitutionsrate in der Zementindustrie möglicherweise auf verfahrenstechnische Grenzen stoßen wird. Aus diesem Grund muss festgestellt werden, dass ein EBS-Qualitätsmanagement basierend nur auf Kriterien der EN 15359 (vgl. Tabelle 18) oder der

Abfallverbrennungsverordnung (vgl. Tabelle 17) oder ähnlichen Gütezeichen wie RAL-GZ (BGS, 2014) nicht ausreicht, um das gesamte EBS-System (von der Produktion bis hin zur Verwertung) basierend auf material- aber auch anlagentechnischen Aspekten der modernen Abfallwirtschaft zu beschreiben. Die moderne Abfallwirtschaft und vor allem die EBS-Produktion basiert auf einer Kombination von unterschiedlichen Anlagen und Aggregaten, die notwendig sind, um die Anforderungen des Marktes (neben den rechtlichen Anforderungen, die eigentlich eine Basis darstellen) erfüllen zu können. Die richtige Anordnung dieser Anlagen und das Zusammenspiel von mehreren Einflussfaktoren im EBS-System ermöglichen die Produktion von hochqualitativen und qualitätsgesicherten EBS. Deswegen soll bzw. muss in dieser Arbeit das EBS-Gesamtsystem (d.h. Produktion inklusive Einsatz bzw. Verwertung von EBS in der österreichischen Zementindustrie (d.h. thermische Substitutionsrate 72,4 %) im Vergleich zum konventionell betriebenen Zementwerk (d.h. thermische Substitutionsrate = 0 %) dargestellt und diskutiert werden. Die Ergebnisse sollen in Form eines einheitlichen ressourcen-, energie-, umwelt- und qualitätsorientierter Ausweises (d.h. REUQ-Ausweis für EBS), präsentiert werden.

4.3 EBS-Verwerter

Ersatzbrennstoffe aus verschiedenen Fraktionen, z.B. Restabfälle aus Haushalten, Industrie und Gewerbe, können in verschiedensten Industrien verwendet werden. Einige Beispiele dafür sind:

- Zementindustrie,
- Kraftwerke und
- sonstige Mitverbrennungsanlagen. (BMLFUW, 2010)

4.3.1 Zementwerke

Bei der Zementerzeugung sind große Mengen an Brennstoffen notwendig. Dabei werden am Ende eines Drehrohrofens Temperaturen bis zu 2.000°C benötigt. Hierbei spricht man von der Primärfeuerung. Am entgegengesetzten Ende des Ofens, der Sekundärfeuerung, werden Temperaturen zwischen 1.050 und 1.150°C erzeugt. In Abbildung 8 sind die Positionierung der Einbringungsmöglichkeiten im Drehrohrofen abgebildet.

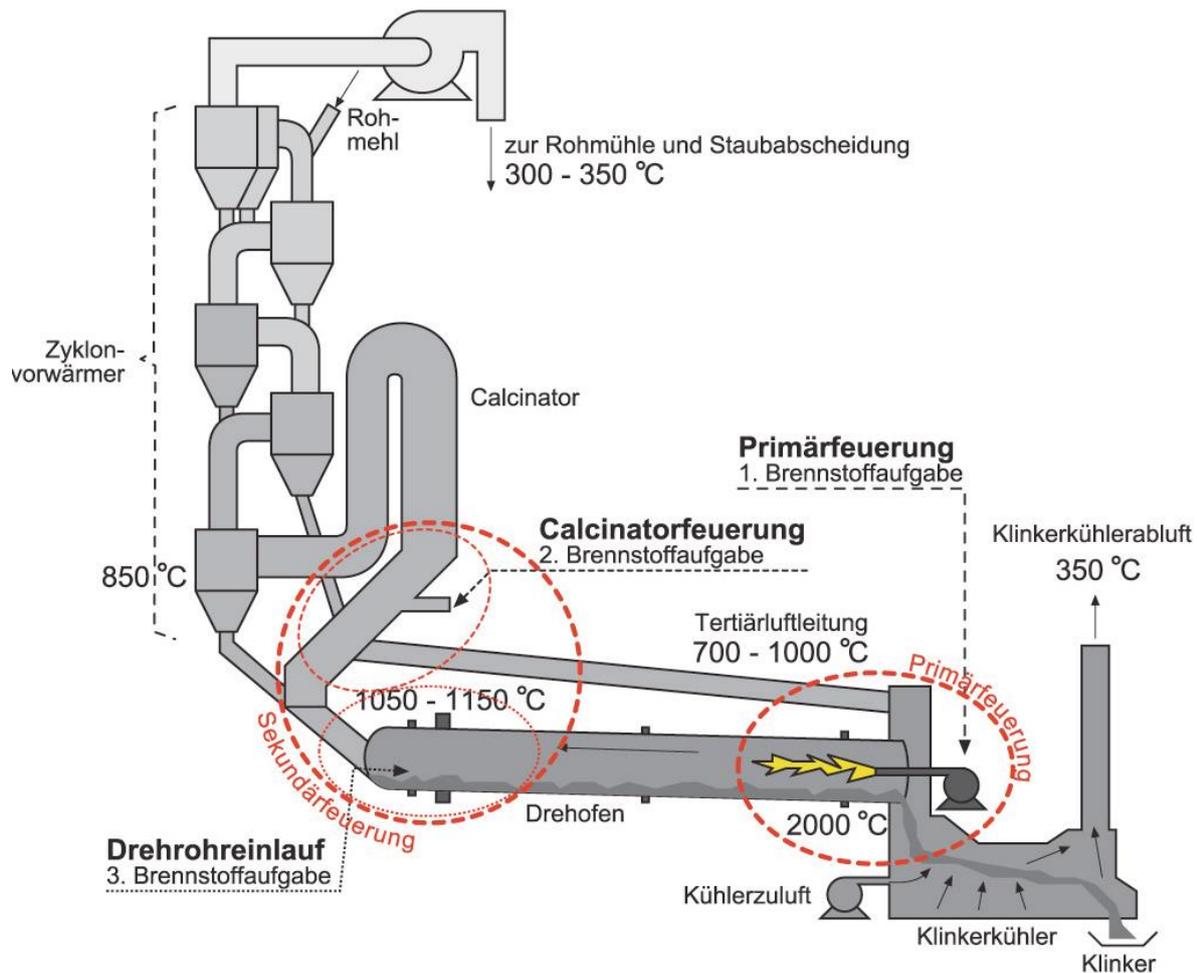


Abbildung 8: Schema der Zementherstellung (Pomberger, 2008)

Bei der Primärfeuerungszone wird der Ersatzbrennstoff mithilfe von Lanzen dem Hauptfeuer zugeführt. Dazu muss dieser in flüssiger oder blasfähiger Form vorliegen, des Weiteren ist eine möglichst homogene Zusammensetzung nötig. Sollte dies nicht gewährleistet sein, besteht die Gefahr von Verklumpungen des Klinkers, was bis zu einem Stillstand führen könnte. Aufgrund der hohen Temperaturen sind besonders hochkalorische Brennstoffe notwendig.

Eine weitere Möglichkeit der Zugabe von Ersatzbrennstoffen ist die Sekundärfeuerungszone. Dabei kann dieser in grobstückiger Form aufgegeben werden. Dies geschieht vor allem mithilfe von Altreifen, welche ein wichtiger Lieferant des Elements Eisen sind. Die Temperaturen betragen $900 - 1.200\text{ °C}$ bei einer Verweilzeit von ein bis fünf Sekunden. (Pomberger, 2008)

Die verschiedenen Möglichkeiten des Einsatzes von Sekundärbrennstoffen sind in der nachfolgenden Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Einsatzgebiet von EBS in Zementwerken (Schmidt et al., 2007)

Fraktion	Primärfeuerung	Sekundärfeuerung	Kalzinator	
			direkt	Vorbrennkammer
Altreifen		X		(X) ¹
Altöl	X			
Lösemittel	X			
Tiermehl	X	X	X	
Kunststoffe	X	X	X	X
Schlämme	(X) ²	X	X	
Heizwertreiche Fraktion Siedlungs- und Gewerbeabfall	X	X	X	X
Mittelkalorische Fraktion Siedlungs- und Gewerbeabfall		X	X	X

- 1) Hot Disk möglich, Wirbelschicht nicht möglich
- 2) Technisch nicht ideal, in der Praxis jedoch anzutreffen

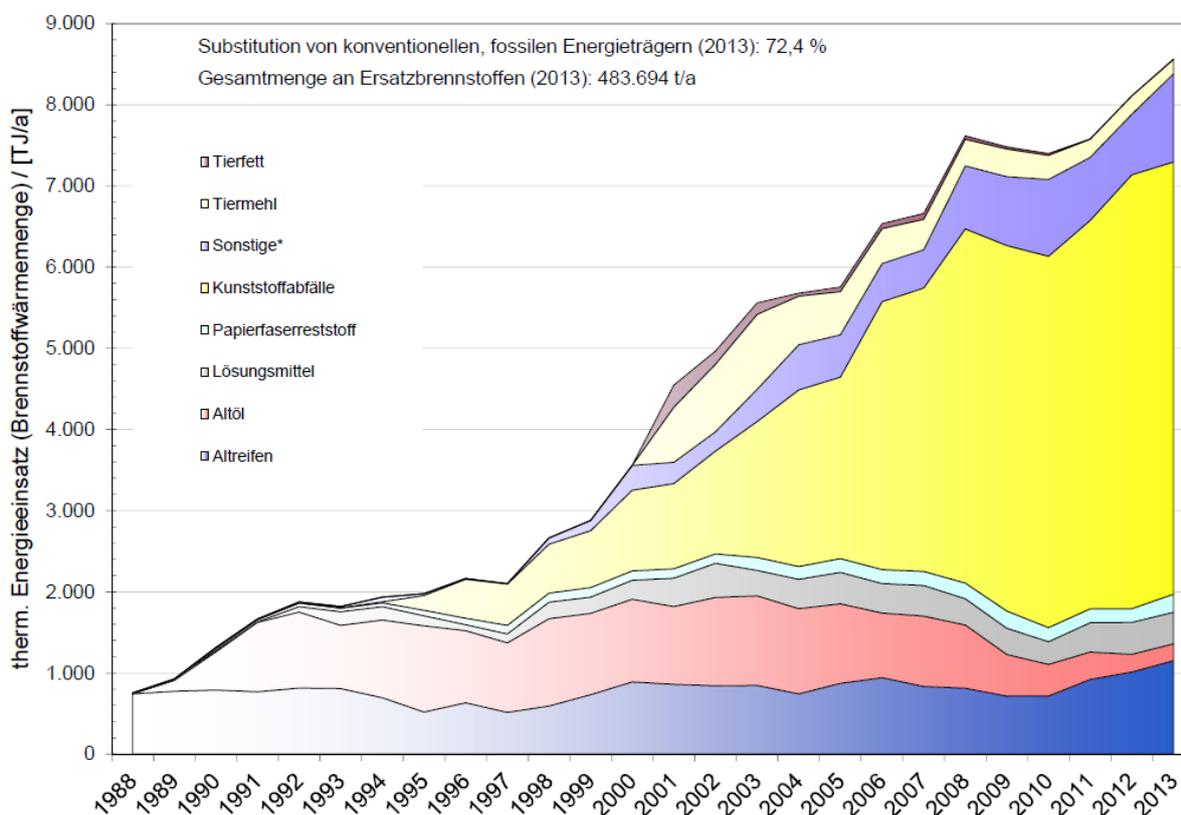
In Österreich sind derzeit neun Zementwerke in Betrieb. Deren Standorte sind in der nachfolgenden Abbildung 9 dargestellt (Anmerkung: Lorüns ist ein Mahlwerk). (Kraussler, 2014)



Abbildung 9: Standorte der österreichischen Zementindustrie im Jahr 2014 (modifiziert aus VÖZ, 2014)

In der österreichischen Zementindustrie wurden im Jahr 2013 insgesamt 483.694 Tonnen (bzw. 8.562.395 GJ) Ersatzbrennstoffe (EBS) und 120.011 (bzw. 3.270.051 GJ) konventionelle Energieträger (KET) eingesetzt. Daraus ergibt sich eine thermische

Substitutionsrate (d.h. KET werden mit EBS substituiert) von 72,4 % (vgl. Abbildung 10). Die in dieser Arbeit betrachteten EBS-Produktionsanlagen stellen den EBS „Kunststoffabfälle“ aus Haushalts-, Gewerbe- und Produktionsabfällen her.



* Sägemehl, Altholz, Gummiabfälle, heizwertreiche Fraktion, landwirtschaftliche Rückstände...

Abbildung 10: Brennstoffwärmemengen aus der Verfeuerung von Ersatzbrennstoffen (EBS) in Anlagen der österreichischen Zementindustrie (ohne Mahlwerke) im Beobachtungszeitraum 1988 bis 2013 (Mauschitz, 2014)

4.3.2 Verbrennungsanlagen mit Wirbelschichttechnologie

Der größte Anteil der heizwertreichen Fraktionen aus der mechanisch-biologischen Aufbereitung wird derzeit in Wirbelschichtanlagen behandelt. Bei diesem Verfahren wird zerkleinertes Brenngut aufgewirbelt, fluidisiert und im Schwebestand verbrannt. Dabei wird in stationäre oder zirkulierende Wirbelschichtfeuerung unterschieden. (Pomberger, 2008)

Die Vorteile solcher Anlagen sind:

- eine intensive Durchmischung,
- gleichmäßige Temperaturverteilung,
- einfacher Transport (fluidähnlich),
- große Austauschfläche (Feststoff-Gas),

- hohe Wärmeübergangszahlen Feststoff-Gas und
- kein thermisches NO_x, durch Verbrennungstemperaturen zwischen 750 – 900°C. (Hollauf, 2009).

Die Nachteile der Wirbelschichtanlage sind:

- die benötigte Abfallaufbereitung,
- Abrieb und Zerkleinerung des Feststoffes,
- aufwendige Rückgewinnung des ausgetragenen Feinanteiles und
- Feststoffe mit Backneigung nicht verwendbar. (Hollauf, 2008)

In Österreich sind im Jahr 2014 fünf Anlagen mit Wirbelschichtfeuerung, die nur Abfälle verbrennen, in Betrieb. Dabei handelt es sich um eine Anlage in Wien (Wirbelschichtofen 4 der Fernwärme Wien), in Lenzing (AVE Reststoffverwertung Lenzing), in Niklasdorf (TRV Niklasdorf), Linz (RHKW Linz) und in St. Veit an der Glan (Funder). Die größte dieser fünf Anlagen ist die AVE Reststoffverwertung Lenzing mit einer Kapazität von 300.000 Tonnen per Jahr. Die Standorte dieser Anlagen sind in der nachfolgenden Abbildung 11 dargestellt.

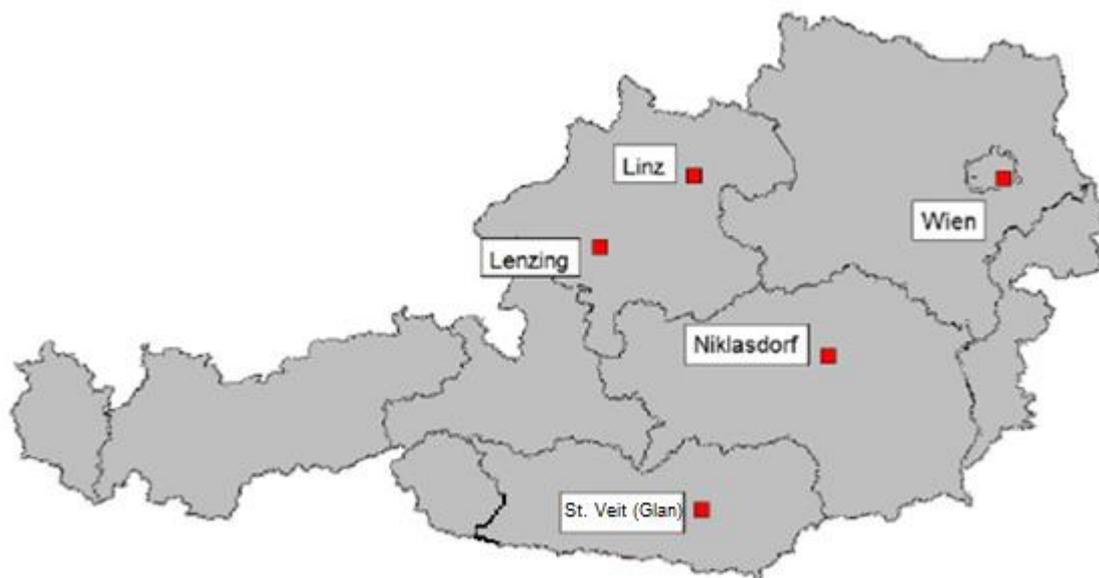


Abbildung 11: Im Jahr 2014 in Betrieb befindliche Verbrennungsanlagen, die nur Abfälle verbrennen, mit Wirbelschichtfeuerung (Kraussler, 2014)

5 Systemgrenzen und Szenarien

Für die Bilanzierung der EBS-Wege in Österreich, ausgehend von der Aufbereitung bis hin zur Verwertung in der Zementindustrie, wurde das EBS-Gesamtsystem erstellt, welches in der Abbildung 12 dargestellt ist. Mit diesem EBS-Gesamtsystem werden anlagenspezifische Indikatoren ermittelt und beschrieben. Die daraus resultierenden Ergebnisse liefern die Grundlagen zur Bewertung von ressourcen-, energie- umwelt- und qualitätsrelevanten (d.h. REUQ) Aspekten bei der Ersatzbrennstoffproduktion und dessen Verwertung im Vergleich zum Betrieb mit ausschließlich fossilen Brennstoffen im Zementwerk.

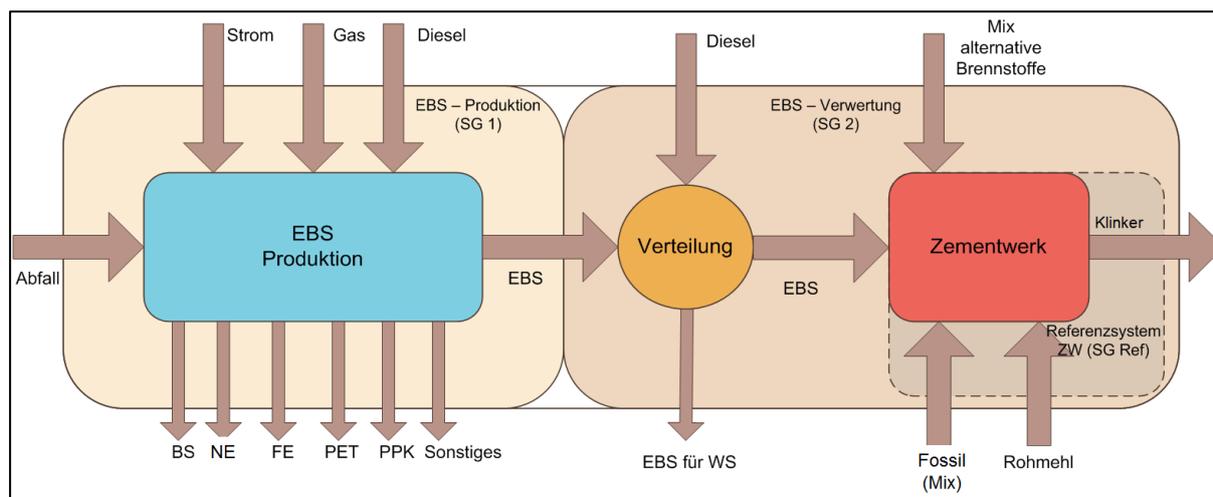


Abbildung 12: Systemgrenzen für betrachtete Systeme (SG 1, SG 2, SG 1 + 2 und SG Ref.)

Das System 1 (SG 1) beschreibt die Aufbereitung des Abfalls (Input in die EBS-Produktion) zum EBS und wird als EBS-Produktion bezeichnet. Dabei werden je nach Anlagentyp biologisch abbaubarer Siebdurchgang (BS), Eisenmetalle (FE), Nichteisenmetalle (NE), Polyethylenterephthalat-Kunststoffe (PET), Papier/Pappe/Karton (PPK) aussortiert. Des Weiteren werden Steine, Glas und Beton aussortiert sowie Verluste unter dem Stoffstrom „Sonstiges“ zusammengefasst. Die für diese Bearbeitungsschritte notwendige Energie wird als Strom, Gas und/oder Diesel zugeführt.

Das System 2 (SG 2) beinhaltet den Prozess „Verteilung“ (d.h. Transport zum Zementwerk bzw. Wirbelschichtanlage), des im SG 1 erzeugten EBS. Die Bezeichnung des Systems lautet EBS-Verwertung. Der produzierte EBS wird in Bezug auf die weiteren Verwertungsmöglichkeiten, die stark vom Heizwert und von der Korngröße abhängen, in drei Kategorien eingeteilt, und zwar:

- EBS Main Burner (MB), Ersatzbrennstoff, der am Primärbrenner der Zementindustrie, eingesetzt wird,
- EBS Sekundärbrenner (SB), Ersatzbrennstoff, der am Sekundärbrenner der Zementindustrie eingesetzt wird,

- EBS Wirbelschicht (WS), Ersatzbrennstoff, der in einer Wirbelschichtanlage eingesetzt wird.

Der für den Transport benötigte Diesel wird im Prozess „Verteilung“ berücksichtigt. Der Anteil des produzierten EBS, der zum Zementwerk transportiert wird, wird mit weiteren Brennstoffen zur Klinkerherstellung verbrannt. Dabei handelt es sich um den Stoffstrom „Fossil (Mix)“ und den Stoffstrom „Mix alternative Brennstoffe“. Der „Fossil (Mix)“ setzt sich aus den Brennstoffen Steinkohle, Braunkohle und Petrolkoks zusammen, die in einem bestimmten Verhältnis zueinander verwendet werden. Der „Mix alternative Brennstoffe“ besteht aus Altreifen, Altöl und Lösungsmittel, die ebenfalls in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen (vgl. Kapitel 5.1). Das Zementwerk wird mit Rohmehl beliefert, welches nach dem Brennvorgang als Klinker das Zementwerk verlässt. Bei der Betrachtung des SG 2, wird der Stromverbrauch im Zementwerk ebenfalls berücksichtigt.

Die Systemgrenzen 1 und 2 werden für die Bewertung zu einem EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) zusammengefasst. Dieses System dient als Basis zur Ermittlung von ressourcen-, energie-, umwelt- und qualitätsrelevanten Aspekten. Die beiden Systeme, SG 1 und SG 2 sind mit Hilfe eines Prozesses „Verteilung“ verbunden. In der Praxis bedeutet dies, dass abhängig von der Qualität, Marktlage usw. der EBS-Hersteller seine Ersatzbrennstoffe entweder zur Zementindustrie oder zu sonstigen Anlagen (im gegenständlichen Fall wird die Verwertung in Wirbelschichtanlagen angenommen) transportiert (vgl. Abbildung 12).

Das Referenzsystem (SG Ref.) beschreibt nur das mit konventionellen Energieträgern (d.h. Steinkohle, Braunkohle und Petrolkoks; thermische Substitutionsrate = 0 %) betriebene Zementwerk. Der verbrauchte Strom, das benötigte Rohmehl und der daraus gebrannte Klinker werden auch mitbetrachtet.

Nachfolgend werden die Massen-, Energie- und CO₂-Äquivalenz-Bilanz für das EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) und Referenzsystem (SG Ref.) beschrieben.

5.1 Massenbilanz

Die am Anfang des Kapitels erklärten Systemgrenzen für die einzelnen Systeme werden in diesem Kapitel hinsichtlich ihrer Massenströme erklärt. Dabei werden Stoffströme, welche sich aus unterschiedlichen Gütern und bestimmten Verhältnissen zusammensetzen, genau beschrieben.

Fossil (Mix): Der Stoffstrom „Fossil (Mix)“ setzt sich aus Steinkohle, Braunkohle und Petrolkoks zusammen. In der gegenständlichen Arbeit werden diese drei Brennstoffe als Mix für die konventionellen Energieträger berücksichtigt, da sie den wesentlichen Anteil (d.h. 96 % aller fossilen Energieträger) in der österreichischen Zementindustrie im Jahr 2013 ausgemacht haben. (Mauschitz, 2014) Die massenbezogene Verteilung ist in Tabelle 20 angeführt. Der Zusammenhang vom eingesetzten EBS aus der mechanischen Abfallaufbereitungsanlage und dem „Fossil (Mix)“ ist von dem Energieinhalt des EBS abhängig. Dieser Wert kann daher nur gemeinsam mit der Energiebilanz bestimmt werden (vgl. Kapitel 5.2).

Tabelle 20: Massenbezogene Verteilung der verwendeten fossilen Brennstoffe für den Fluss „Fossil (Mix)“ (Mauschitz, 2014)

Fossil (mix)	Jahresmenge 2013	Massenverteilung
	[t/a]	[%]
Steinkohle	34.233	30
Braunkohle	49.615	43
Petrolkoks	31.465	27

Mix alternative Brennstoffe: Der Stoffstrom „Mix alternative Brennstoffe“ setzt sich aus unterschiedlichen Ersatzbrennstoffen zusammen. Diese sind Altreifen, Altöl, und Lösungsmittel und decken insgesamt 19 % der verbrauchten Menge an Ersatzbrennstoffen in der Zementindustrie ab. (Mauschitz, 2014) Der EBS aus der mechanischen Abfallaufbereitungsanlage stellt dabei die restlichen 81 % der gesamten Masse der in dieser Arbeit betrachteten Ersatzbrennstoffe dar. Weitere Ersatzbrennstoffe wie Klärschlamm, Tiermehl usw. werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Bei einer ausschließlichen Betrachtung der Massenströme wird bei einem Input von 0,81 kg EBS gleichzeitig 0,19 kg „Mix alternative Brennstoffe“ (mit 0,12 kg Altreifen, 0,02 kg Altöl und 0,05 kg Lösungsmittel) in das Zementwerk eingesetzt. Diese Verteilung und die in der österreichischen Zementindustrie eingesetzten Massen im Jahr 2013 sind in Tabelle 21 angeführt.

Tabelle 21: Massenbezogene Verteilung der verwendeten alternativen Brennstoffe für den Fluss „Mix alternative Brennstoffe“ (Mauschitz, 2014)

Mix alternative Brennstoffe	Jahresmenge 2013	Massenverteilung
	[t/a]	[%]
Altreifen	40.245	12
Altöl	5.935	2
Lösungsmittel	17.370	5

Rohmehl: Der Stoffstrom Rohmehl wird über die in das Zementwerk gelieferte thermische Energie berechnet (vgl. Kapitel 5.2).

Klinker: Der Stoffstrom Klinker wird über die in das Zementwerk gelieferte Masse an Rohmehl ermittelt. Im Drehrohr des Zementwerkes, wird Rohmehl als Ausgangsstoff für den Klinker eingesetzt. Durch den Brennvorgang sind Massenverluste zu beobachten, diese betragen 65 % der Masse des Rohmehls. Das bedeutet, dass in der Massenbilanz berücksichtigter Zusammenhang zwischen Rohmehl und Klinker mit dem Faktor $1,539 \cdot t_{RM}$ pro t_{KI} (vgl. Tabelle 22) definiert ist. (Mauschitz, 2014)

Tabelle 22: Rohmehl, Klinker und Zementproduktionsmenge im Jahr 2013 (Mauschitz, 2014)

	Jahresmenge 2013	
	[t/a]	$[t_{RM}/t_{KI}]$
Rohmehleinsatzmenge (RM)	4.858.175	
Klinkerproduktionsmenge (KI)	3.156.286	
Zementproduktionsmenge (Ze)	4.384.876	
Rohmehlfaktor		1,539

Das EBS-Gesamtsystem ist in der Abbildung 13 und das Referenzsystem in der Abbildung 14 dargestellt.

Das Referenzsystem (SG Ref.) soll zum Vergleich dienen. Dieses System beinhaltet lediglich zwei Inputströme und einen Outputstrom. Im Gegensatz zum EBS-Gesamtsystem in der Abbildung 13 wird beim Referenzsystem der gesamte Energiebedarf des Zementwerkes mit dem Stoffstrom „Fossil (Mix)“ abgedeckt. Bei den Flüssen Rohmehl und Klinker wird ebenfalls der Rohmehlfaktor aus der Tabelle 22 mitberücksichtigt. Daraus lassen sich verschiedene Interpretationen der Vor- und Nachteile der Ersatzbrennstoffe hinsichtlich der Massenbilanz beschreiben.

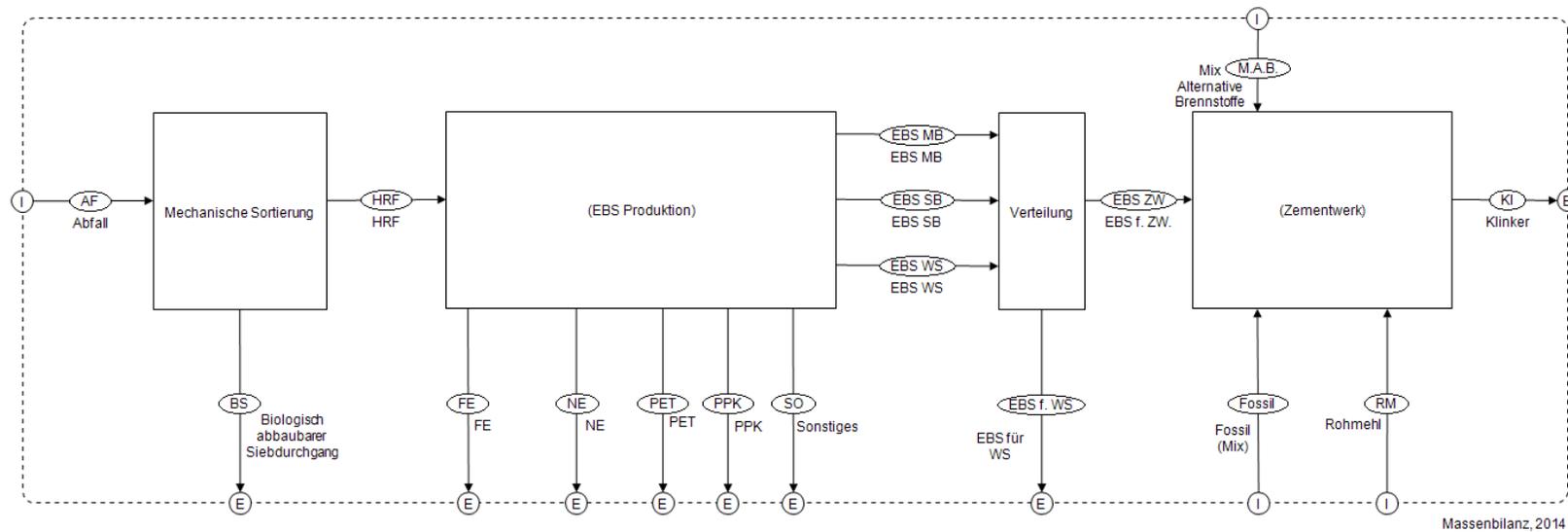


Abbildung 13: Massenbilanz: EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2)

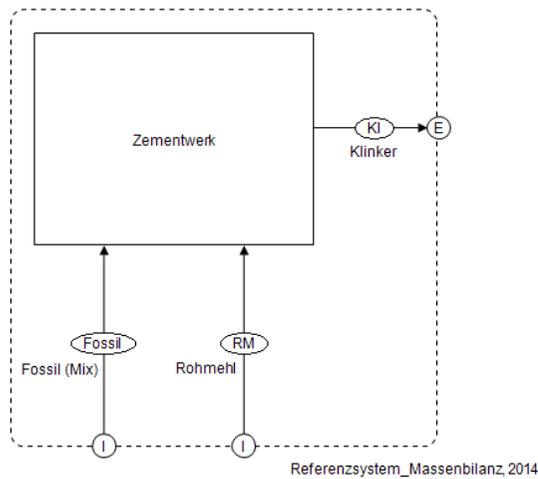


Abbildung 14: Massenbilanz: Referenzsystem (SG Ref.)

5.2 Energiebilanz

Im Kapitel Energiebilanz werden die einzelnen Stoffströme hinsichtlich kumulierter Energieaufwand und/oder Energieinhalte erklärt. Bei der anschließenden Bilanzierung werden jeweils Gutschriften (mit negativem Vorzeichen) oder Lastschriften (mit positivem Vorzeichen) gebildet. Damit kann ein schneller und einfacher Überblick des EBS-Gesamtsystems hinsichtlich der Energiebilanz geschaffen werden. Welche Werte als Gutschriften und welche als Lastschriften gewertet werden, wird bei den einzelnen Stoffströmen erwähnt und am Ende des Kapitels in Tabelle 30 zusammenfassend dargestellt.

Biologisch abbaubarer Siebdurchgang: Der Stoffstrom „Biologisch abbaubarer Siebdurchgang“ (BS) wird im Prozess Mechanische Sortierung aus dem EBS-Gesamtsystem exportiert (vgl. Abbildung 26). Der weitere Behandlungsweg dieses Materials ist eine teilgeschlossene Kompostierung. Diese benötigt pro Tonne biologisch abbaubarem Siebdurchgang 70 kWh an Energie. (Umweltbundesamt, 2011a) Des Weiteren, wird der in dem ausgeschleusten BS steckender Energieinhalt, ebenfalls betrachtet. Auf Basis des in der Deponieverordnung 2008 (BMLFUW, 2010a) angeführten maximalen Brennwertes von 6.600 kJ/kg TS für eine Deponierung wurde für die Bilanzierung ein Heizwert für den aussortierten Siebdurchgang von 6.000 kJ/kg OS angenommen. (BMLFUW, 2011) Somit wird für jedes Kilogramm „BS“ ein Energieaufwand von 6,25 MJ angenommen (siehe Tabelle 23). Der „BS“ stellt eine Aufwendung dar und wird daher bei Bilanzierungen als positiver Wert (Lastschrift) angeführt.

Tabelle 23: Energiebilanz: Ausgangswerte für den biologisch abbaubaren Siebdurchgang

Ausgangswerte für die Energiebilanz	[MJ/kg OS]	[kWh/kg OS]
Biologisch abbaubarer Siebdurchgang (Energieinhalt)	6	1,7
Biologisch abbaubarer Siebdurchgang (Energieaufwand Behandlung)	0,25	0,07

Wertstoffe: Es werden vier verschiedene Wertstoffe (d.h. Eisenmetalle (FE), Nichteisenmetalle (NE), PET-Kunststoffe (PET) und Papier/Pappe/Karton (PPK)) bei der EBS-Produktion dargestellt und beschrieben. In der Energiebilanz wird die Primär- und Sekundär-Herstellung betrachtet. Dabei werden die jeweilig nötigen Energieaufwendungen bis zum Vorliegen des selben Produktes verglichen. Die daraus resultierenden Einsparungen werden als negativer Wert (Gutschrift) bei den Bilanzierungen angeführt. Die Energiedaten der einzelnen Produktionswege (primär und sekundär) sowie die daraus resultierenden Einsparungen, sind in Tabelle 24 sowie in Abbildung 23 zusammenfassend dargestellt.

1) Eisenmetalle (FE):

Der Energiewert für den Stoffstrom metallische Wertstoffe (FE) beinhaltet somit die Differenz zweier unterschiedlicher Produktionswege. Der erste Produktionsweg ist die Erzeugung des Roheisens aus Erzen. Dabei wurde für die notwendigen Energiewerte auf die ProBas-Daten

zurückgegriffen. (Umweltbundesamt, 2013) Der Prozessweg ist in Abbildung 15 dargestellt. Jeder Teil dieser Prozesskette stellt einen Energieaufwand für die Erzeugung dar.

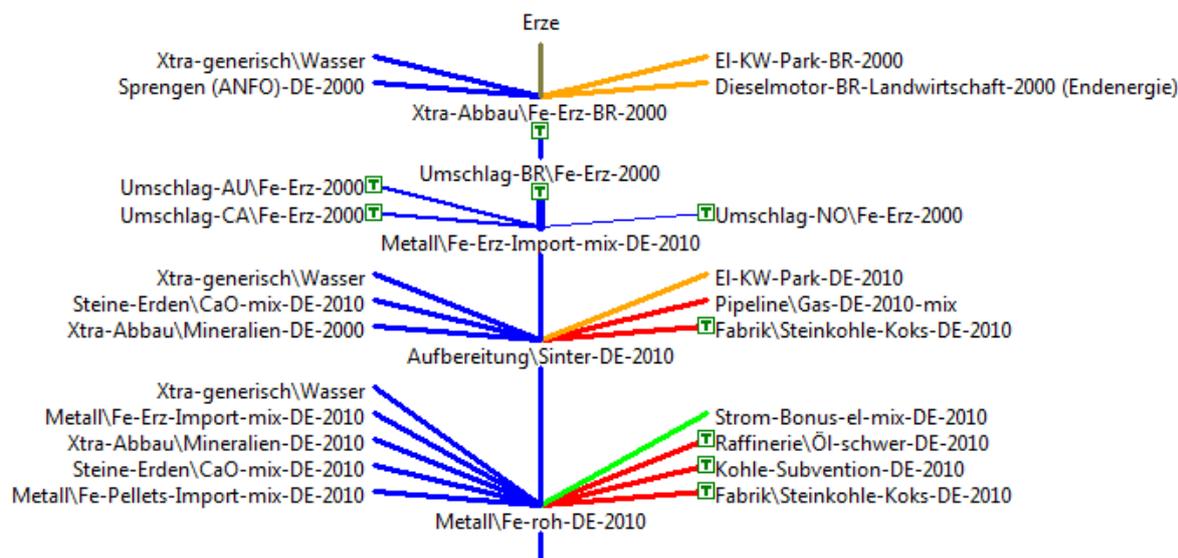


Abbildung 15: Prozesskette für die primär-metallurgische Roheisenherstellung (Umweltbundesamt, 2013)

Die Daten für den Erzabbau wurden hier für mehrere Länder wie Brasilien, Australien und Kanada gemittelt. Es wird ein Tagebau betrachtet, dabei wurde angenommen, dass das aufbereitete Erz mit einem ungefähren Eisenanteil von 65 % verschifft wird. Bei der nächsten Aufbereitungsstufe, dem Sintern, wurden die Daten und Zuschlagsstoffe für einen Standort in Deutschland veranschlagt. Dieser Prozess dient der Einstellung der Korngröße und der Zusammensetzung des Eisenerzes vor dem Einsatz im Hochofen. Dieser Teil ist ein integrierter Prozess in einem Hüttenwerk. Als Hilfsstoffe werden Branntkalk (CaO), Mineralstoffe und Wasser eingesetzt. Zur Roheisenherstellung wurde der Hochofenprozess herangezogen. Hierbei wird über mehrere Teilstufen metallisches Eisen gewonnen. Der nicht erneuerbare KEA ist in dieser Prozesskette 20,1 MJ/kg Roheisen. (Umweltbundesamt, 2013)

Bei der Sekundär-Metallurgie wird der gesammelte Eisenschrott in einem Elektrolichtbogenofen eingeschmolzen. Dabei werden Kalk und Koks als Hilfsmaterial verwendet. Bei diesem Prozess wird rund 974 kg Schrott pro Tonne Elektro-Stahl eingesetzt. Die zusätzlichen Eisenträger sind Roheisen, Eisenschwamm und Legierungsbestandteile. Wie in Tabelle 24 ersichtlich, wird bei diesem Produktionsweg ca. 72 % an nicht erneuerbaren Energieträgern eingespart. Der Prozessweg ist in Abbildung 16 dargestellt. (Umweltbundesamt, 2013)

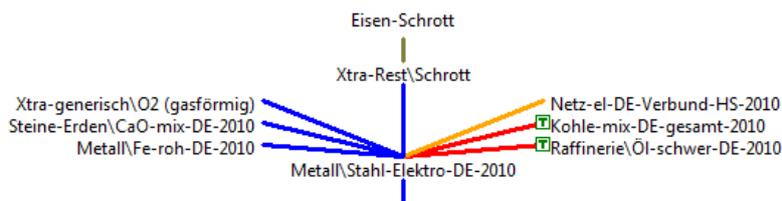


Abbildung 16: Prozesskette für die Sekundärstahl-Erzeugung im Elektrolichtbogenofen (Umweltbundesamt, 2013)

2) Nichteisenmetalle (NE):

Der Stoffstrom Nichteisenmetalle (NE) setzt sich aus Aluminium und Kupfer zusammen. Es wird die Primär- und Sekundärproduktion beider Nichteisenmetalle gesondert erklärt und die daraus resultierenden Einsparungen angeführt.

a) Aluminium:

Die Primärproduktion von Aluminium ist in Abbildung 17 dargestellt. Diese umfasst die gesamte Bauxitgewinnung, welche vor allem in Australien, in der Karibik (Jamaika, Surinam, Guyana) und in den Tropen (vor allem Brasilien, Guinea) stattfindet. Der Abbau findet im Tagebau statt. Der Anteil an Aluminiumoxid am Bauxit schwankt zwischen 37 Gewichtsprozent und 59 Gewichtsprozent je nach Lagerstätte. Zur Aufbereitung von einer Tonne Bauxit werden Heizöl Schwer (528 MJ), elektrischer Strom (2 kWh) und Prozesswasser (125 kg) benötigt. Diese Daten stammen aus der australischen Bauxitgewinnung in Gove und wurden auch für andere Länder bei der Datenerhebung verwendet. (Umweltbundesamt, 2013)

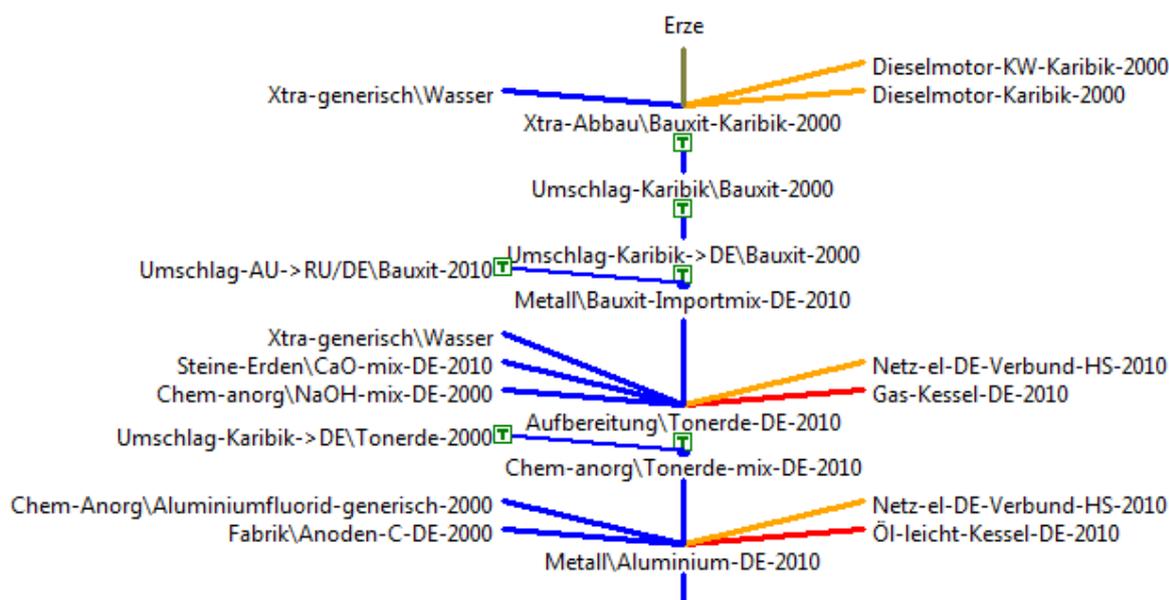


Abbildung 17: Prozesskette für die Primärproduktion von Aluminium (Umweltbundesamt, 2013)

Die Tonerdeherstellung bezieht sich beim Energiemix auf Deutschland. Die Aufarbeitung des aluminiumhaltigen Bauxiterzes erfolgt nach dem Bayer-Verfahren durch Zermahlen und Aufschluss in 50 %-iger Natronlauge. Die Mischung wird in Druckbehältern bei Temperaturen bis zu 270°C mehrere Stunden verrührt. Die unlöslichen Bestandteile des Bauxit fallen als sogenannter Rotschlamm an. Die entstehende Natriumaluminatlauge wird verdünnt und abgekühlt. Das sich in Rührbehältern abscheidende Aluminiumhydroxid wird auf Vakuumfiltern abgetrennt und mit Wasser gewaschen. Anschließend erfolgt die Kalzination (= Wasserentzug) in Drehrohr- oder Wirbelschichtöfen bei 1.000 bis 1.300°C zu reiner Tonerde. Beim letzten Schritt handelt es sich um die Schmelzflusselektrolyse (Hall-Heroult-Prozess), in einer Kryolithschmelze (Na_3AlF_6). Dabei erniedrigt das Kryolith den Schmelzpunkt auf ca. 950°C. Das gebildete Aluminium setzt sich am Boden der Elektrolysezelle ab. Es werden pro Tonne Aluminium 1.900 kg Tonerde, 430 kg Anode (Kohlenstoff), 18 kg Aluminiumfluorid und 3.825 MJ Heizöl verbraucht. Summiert ergibt sich somit der in Tabelle 24 angegebene Wert von 132 MJ/kg Aluminium. Wobei es sich dabei nur um die eingesetzten nicht erneuerbaren Brennstoffe handelt. (Umweltbundesamt, 2013)

Bei der Aufbereitung des gesammelten Aluminiumschrottes (Aluminium sekundär) bis zur Bereitstellung des reinen Aluminiums ist diese Prozesskette bedeutend kürzer. Dies ist in der nachfolgenden Abbildung 18 dargestellt. Auch hier wird für die Erstellung einer Energiebilanz der nicht erneuerbare KEA verwendet. Ein großer Anteil der eingesparten Energie ergibt sich durch die veränderten Prozessbedingungen beim Recycling-Prozess. Die größten Energieverbraucher sind dabei Gas für die Prozesswärme und notwendige Elektrizität. Als Hilfsmaterial werden Kalisalz und Chlor eingesetzt. Summiert ergibt sich ein Energieaufwand von 24,9 MJ/kg Aluminium. (Umweltbundesamt, 2013)

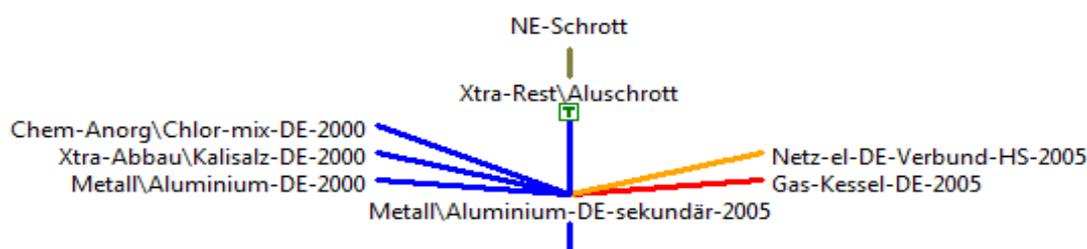


Abbildung 18: Prozesskette für das Recycling von Aluminium (Umweltbundesamt, 2013)

b) Kupfer:

Zur Kupfererzeugung basieren die Zahlen von Probas auf einer Studie der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. In dieser werden die verschiedenen Minentypen nach ihrer Häufigkeit gewichtet. Die Verhüttung und Raffination von Primärkupfer umfasst die Verarbeitung vom Erzkonzentrat zum Reinmetall nach der Elektrolyse. Im ersten Schritt werden die Konzentrate im Schwebeschmelzverfahren (Outokumpu-Verfahren) pyrometallurgisch behandelt. Anschließend erfolgen die

Konverterarbeit und das Raffinieren des Rohmetalls (Blisterkupfer). Nach nochmaligem Aufschmelzen in Anoden- bzw. Anodenschachtofen erfolgt die Raffinationselektrolyse zum Reinmetall. Insgesamt ergibt sich ein KEA-Wert (nicht erneuerbar) von 56,1 MJ/kg Primärkupfer. Der Prozessweg ist in der nachfolgenden Abbildung 19 dargestellt. (Umweltbundesamt, 2013)

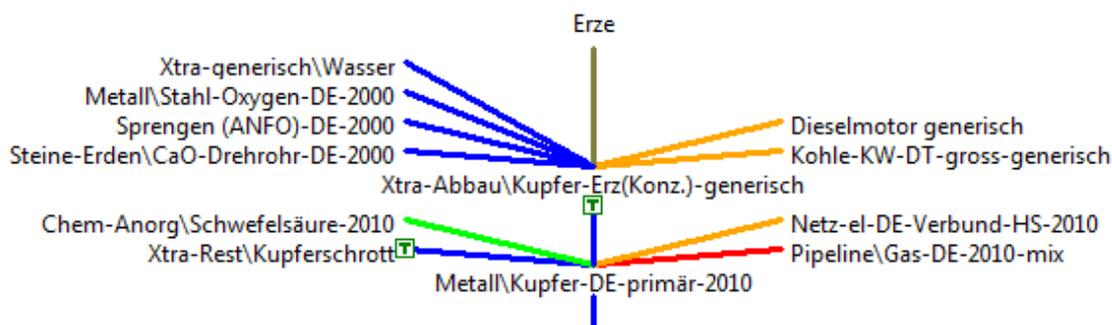


Abbildung 19: Prozesskette für die Primärkupfer-Herstellung (Umweltbundesamt, 2013)

Als Sekundärkupfer wird das Reinmetall verstanden, das aus Sekundärrohstoffen gewonnen wird. Diese können metallischer Art sein (Kupfer, Messing-, Bronze- und Rotgußschrotte) oder aus kupferhaltigen Zwischenprodukten wie Schlämmen, Krätzen und Schlacken bestehen. Eine mittlere Zusammensetzung der Materialien kann aufgrund der enormen Heterogenität nicht angegeben werden. Die Sekundärkupfer-Herstellung wird auf pyrometallurgischem Wege bilanziert. Überwiegend wird dazu das sogenannte Schachtofen-Konverter-Verfahren angewendet. Metallisches Einsatzmaterial wird dabei im Konverter oder Anodenofen eingesetzt, die sonstigen sekundären Rohstoffe werden zusammen mit den Schlacken im Schachtofen oder Elektroofen unter reduzierenden Bedingungen eingeschmolzen. Die Weiterverarbeitung läuft dann wie auch beim Primärkupfer. Der Energieaufwand ist 64 % niedriger als bei der Primär-Metallurgie. Der zugehörige Prozessweg ist in der Abbildung 20 dargestellt. (Umweltbundesamt, 2013)

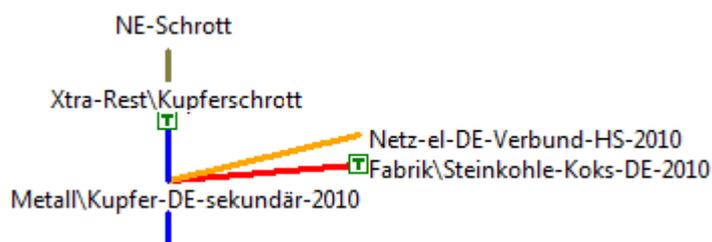


Abbildung 20: Prozesskette für die Sekundärkupfer-Herstellung (Umweltbundesamt, 2013)

3) Polyethylenterephthalat (PET):

Der Stoffstrom Polyethylenterephthalat-Kunststoffe (PET) beinhaltet in der Energiebilanz ebenfalls die Differenz aus Primärproduktion und Sekundärproduktion.

PET ist ein durch Polykondensation hergestellter thermoplastischer Kunststoff aus der Familie der Polyester und bei Temperaturen von 250°C formbar. Die Molekülketten werden so beweglich, dass der Kunststoff schmilzt und eine zähflüssige Masse entsteht, die in nahezu jede beliebige Form gebracht werden kann. Beim Erkalten frieren die Molekülketten ein und der Kunststoff nimmt die gewünschte Form an. (Umweltbundesamt, 2010) Die Kunststoffherstellung aus Erdöl ist wie in der Abbildung 21 dargestellt ein langwieriger Prozess. Da die Rohmaterialien, Ethylenglykol und Terephthalsäure, aus der Erdölaufbereitungskette gewonnen werden, steckt darin ein großer Energieaufwand. Dabei muss das Erdöl von Wasser und Gasen gereinigt werden, was mit einem relativ hohen Energieaufwand verbunden ist. Zur Kunststoffproduktion wird vorwiegend die Naphta-Fraktion aus der Raffination übernommen. Diese Fraktion ist reich an Cycloalkanen und daher gut geeignet für die Kunststoffindustrie. Aus dieser Fraktion wird durch Steamcracken Ethylen gewonnen, woraus wiederum das Ethylenglykol gewonnen wird. In der Prozesskette von Probas, siehe Abbildung 21, erfolgt die Herstellung über Dimethylterephthalat (DMT), Terephthalsäure (TPA) und Ethylenglykol. Das PET-Granulat ist die Ausgangsbasis für vielfältigste Verwendungsmöglichkeiten des PET. Einige Beispiele dafür sind Textilfasern, Folien, Gefäßprothesen und die allgemein bekannten Getränkeflaschen. (Umweltbundesamt, 2010)

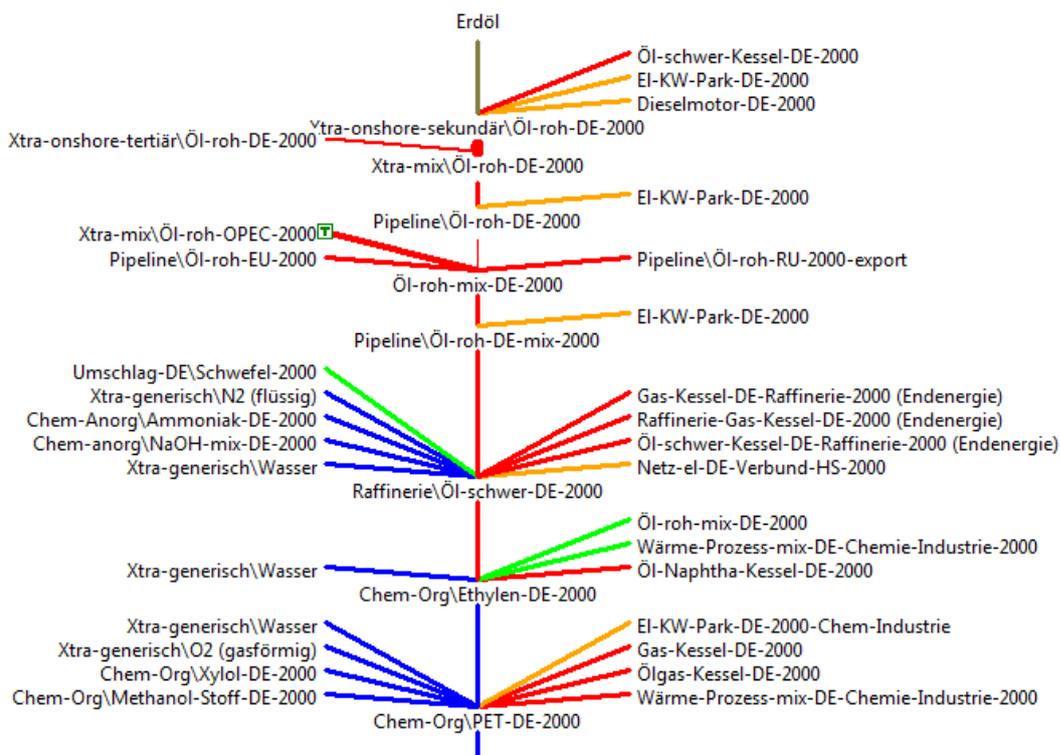


Abbildung 21: Prozesskette für die PET-Herstellung aus Erdöl (Umweltbundesamt, 2013)

Für die Sekundärproduktion von PET-Granulat muss zuerst eine reine PET-Fraktion gesammelt und hergestellt werden. Zur Herstellung von Getränkeflaschen (welche in diesem Prozess betrachtet werden) können bis zu 30 % rezykliertes PET beigemischt werden. In Österreich stellen zwei Betriebe lebensmitteltaugliches PET-Rezyklat (PET-Granulat) her. Dabei handelt es sich um die Kruschitz GmbH (Vacurema-Verfahren) und die PET-to-PET Recycling Österreich GmbH (URRC-Verfahren). Der Unterschied besteht in der letzten Reinigung vor Herstellung des Granulates. Für diesen Prozess wurde ein Energieverbrauch von ca. 50 kWh/t ermittelt. Der Transport des Granulates, welcher hier mit rund 200 km angesetzt wurde, ist aufgrund des hohen Energiebedarfs in der Produktion vernachlässigbar klein (< 0,3 %). Die restlichen Prozesse in der Produktion von PET sind wiederum ident mit der Primärproduktion. Das rezyklierte Material wird einfach dem Primärmaterial beigemischt und durch sogenanntes Streckblasen zu Flaschen weiterverarbeitet. (Umweltbundesamt, 2010)

Der Energieverbrauch durch die Sekundärproduktion ist um 26 % niedriger (bei 30 %igem Einsatz von Sekundärmaterial). Dies entspricht einer Einsparung von 27 MJ/kg PET. Die Energieverbräuche der Primär- und Sekundär-Herstellung von PET werden in Tabelle 24 nochmals zusammengefasst dargestellt. (Umweltbundesamt, 2010)

4) Papier, Pappe und Karton (PPK):

Der Stoffstrom Papier, Pappe und Karton (PPK) beinhaltet in der Energiebilanz ebenfalls die Differenz aus Primärproduktion und Sekundärproduktion. Dabei wird die Herstellung von Kopierpapier betrachtet und verglichen.

Die Daten für diese Herstellungsverfahren wurden aus einer Studie vom Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH übernommen. (IFEU, 2006). Es wurde ausschließlich die Papierproduktion in Deutschland betrachtet.

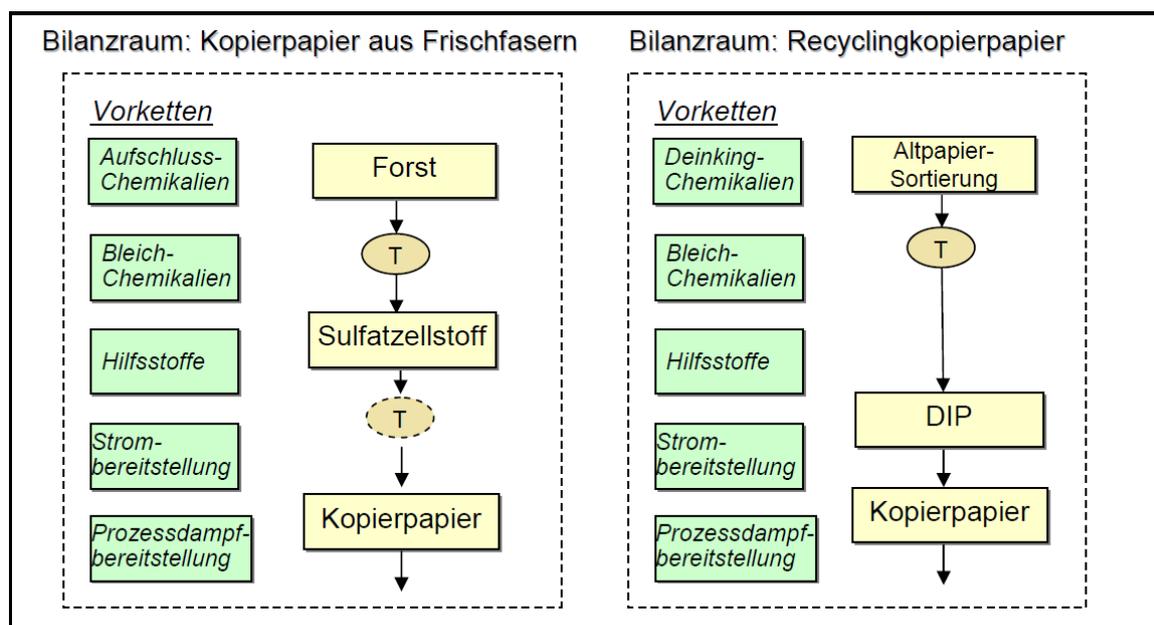


Abbildung 22: Bilanzgrenzen für die Umweltbewertung von Kopierpapier (IFEU, 2006)

In der Studie (IFEU, 2006) wurde die Herstellung von Frischfaserpapier und Recyclingpapiers jeweils separat betrachtet und bis zum fertigen Kopierpapier am Ende des Produktionsweges durchgeführt. Die Chemikalien- und Energievorketten sowie die entlang der Prozesskette erforderlichen Transporte wurden mitberücksichtigt. Dies soll Abbildung 22 vereinfacht darstellen. Dabei umfasste die Primärproduktion die Prozesse der forstwirtschaftlichen Holzbereitstellung, Markt-Sulfatzellstoff, Mahlung des Zellstoffes und die Büropapierherstellung. Die Sekundärproduktion umfasst die Altpapiersortierung und Anlieferung zur Altpapieraufbereitung, Altpapieraufbereitung (DIP) und die Büropapierherstellung. Die Einsparungen bei der Sekundärproduktion betragen 23 % der Primärproduktion, dies ist in der Tabelle 24 dargestellt. (IFEU, 2006)

Tabelle 24: Zusammengefasste Gegenüberstellung der Energiebilanzdaten für Primär- und Sekundärherstellung von Metallen, Kunststoffen und PPK, gereiht nach Einsparungspotential

	[MJ/kg _{OS}]	[kWh/kg _{OS}]	Einsparungspotential	
			[%]	[MJ/kg OS]
Nichteisenmetalle (80 % Al; 20 % Cu)			80	
Aluminium (Primär) *)	132,0	36,7		
Aluminium (Sek.) *)	20,8	5,8	84	111,2
Kupfer (Primär) *)	56,1	15,6		
Kupfer (Sek.) *)	20	5,6	64	36,1
Eisen (Primär) *)	20,1	5,6		
Eisen (Sek.) *)	5,5	1,5	72	14,6
Polyethylenterephthalat (Primär) **)	105,7	29,4		
Polyethylenterephthalat (Sek.) **)	78,7	21,9	26	27,0
Papier/Pappe/Karton (Primär) ***)	16,7	4,6		
Papier/Pappe/Karton (Sek.) ***)	13,0	3,6	23	3,8
*).....(Umweltbundesamt, 2013) **).....(Umweltbundesamt, 2010) ***).....(IFEU, 2006)				

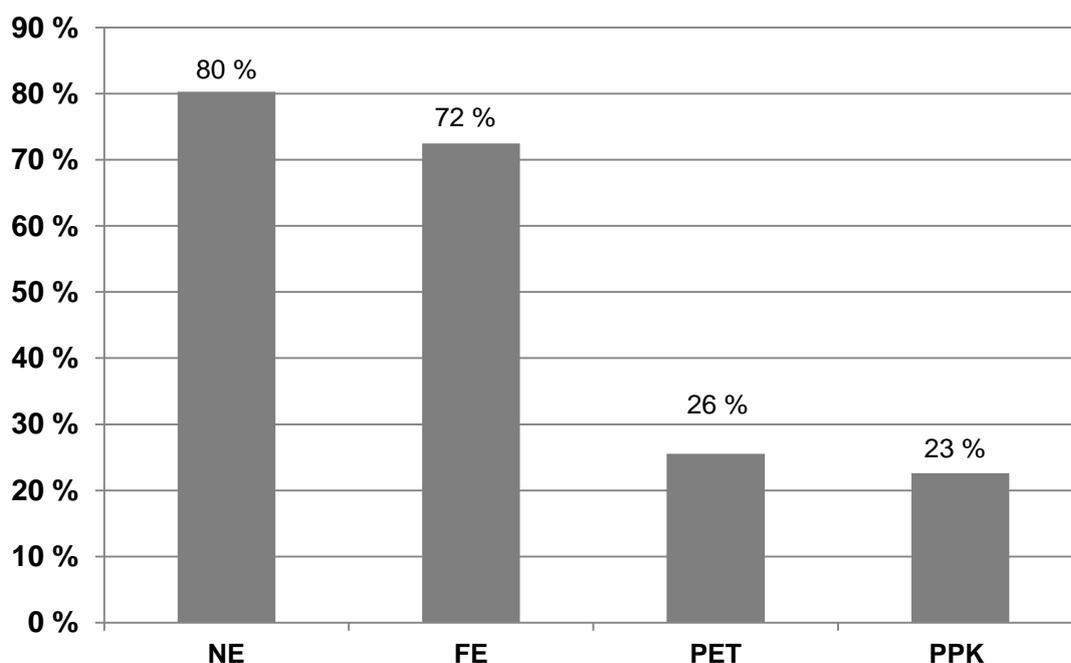


Abbildung 23: Energieeinsparungspotential bei der Sekundärproduktion im Vgl. zur Primärproduktion

Sonstiges: Der Stoffstrom „Sonstiges“ wird in der Energiebilanz mit dem Wert 0 betrachtet, da es sich um geringe Mengen handelt und auch keine stoffliche Verwertung oder eine andere Energiegewinnung damit durchgeführt wird.

Fossil (Mix): Der Stoffstrom „Fossil (Mix)“ setzt sich aus Steinkohle, Braunkohle und Petrolkoks zusammen und sieht im Bezug auf die Verteilung der Energie wie folgt aus: 33 % Steinkohle, 35 % Braunkohle und 32 % Petrolkoks (vgl. Tabelle 25). (Mauschitz, 2014) Der Heizwert wird in Abbildung 24 dargestellt. Bei der Bilanzierung wird der Fluss „Fossil (Mix)“ als positiver Wert (Lastschrift) angegeben.

Tabelle 25: Energiebezogene Verteilung der verwendeten Brennstoffe für den Fluss „Fossil (Mix)“ (Mauschitz, 2014)

Fossile Energieträger	Energie	Energieverteilung
	[GJ/a]	[%]
Steinkohle	1.006.012	33
Braunkohle	1.085.133	35
Petrolkoks	967.791	32

Mix alternative Brennstoffe: Der Stoffstrom „Mix alternative Brennstoffe“ setzt sich aus Altreifen, Altöl und Lösungsmittel zusammen. Der Stoffstrom „Mix alternative Brennstoffe“ liefert 25 % der Energie, die durch Ersatzbrennstoffe bereitgestellt wird (Verhältnis ist in Tabelle 26 ersichtlich). Die restlichen 75 % der Energie werden aus den aufbereiteten Haus- und Industrieabfällen aus mechanischen Abfallaufbereitungsanlagen bereitgestellt. (Mauschitz, 2014) Der „Mix alternative Brennstoffe“ wird, da er zu den Ersatzbrennstoffen zu zählen ist, als negativer Wert (Gutschrift) in der Bilanzierung angeführt.

Tabelle 26: Energiebezogene Verteilung der verwendeten Brennstoffe für den Fluss „Mix alternative Brennstoffe“ (Mauschitz, 2014)

Mix alternative Brennstoffe	Energie	Energieverteilung
	[GJ/a]	[%]
Altreifen	1.152.389	16
Altöl	206.304	3
Lösungsmittel	390.480	6

Strom ZW: Der Stoffstrom „Strom ZW“ beschreibt den Stromverbrauch im Zementwerk. Dieser wird in der gegenständlichen Arbeit in Abhängigkeit mit der Menge an verbrannten Brennstoffen betrachtet. Im Bezugsjahr 2013 wurden insgesamt 603.705 Tonnen Brennstoffe in der österreichischen Zementindustrie verbrannt. Der Stromverbrauch im selben Jahr betrug 1.849 TJ, der spezifische Verbrauch betrug 0,85 kWh/kg. (Mauschitz, 2014) Der Stromverbrauch wird in der Bilanzierung als positiver Wert (Lastschrift) bewertet.

Strom EBS, Gas, Diesel: Die Stoffströme „Strom EBS“, „Gas“ und „Diesel“ werden in Tabelle 27 und in Abbildung 24 bezüglich ihrer Energiedaten dargestellt. Die drei Energieträger werden in der EBS-Produktion (Stapler, LKWs am Standort usw.) eingesetzt. Alle drei Hilfsstoffe werden in der Bilanzierung als positiver Wert (Lastschrift) dargestellt.

Diesel Transport: Der Stoffstrom „Diesel Transport“ berücksichtigt den Dieserverbrauch für den Prozess „Verteilung“ (d.h. LKW-Transport). Beim Transport des produzierten EBS ist ein Energieaufwand von 0,162 kWh/(t und km) nötig. Dies entspricht einem Dieserverbrauch von 0,3 l/km. Das durchschnittliche Ladegewicht wird mit 22 t berücksichtigt. Dies ergibt einen spezifischen Verbrauch von 1,4 l/(t x 100 km). Der Dieserverbrauch für den Transport wird in der Bilanzierung als positiver Wert (Lastschrift) bewertet. (Steiermärkische Landesregierung, 2010)

Tabelle 27: Zusammenfassende Daten für die Energiebilanz

Ausgangswerte für die Energiebilanz					
	[kWh/h]	[MJ/kg _{os}]	[kWh/kg _{os}]	[kWh/Nm ³]	[kWh/l]
Strom	1,0				
Diesel ^{*)}		43,1	12,0		10,1
Erdgas ^{*)}		46,0	12,8	9,9	
Steinkohle ^{**)}		29,3	8,1		
Braunkohle ^{*)}		19,8	5,5		
Petrolkoks ^{**)}		33,8	9,4		
Altreifen ^{**)}		28,6	8,0		
Lösungsmittel ^{**)}		22,5	6,2		
Altöl ^{**)}		34,8	9,7		
* (Umweltbundesamt, 2013)					
** (Mauschitz, 2014)					

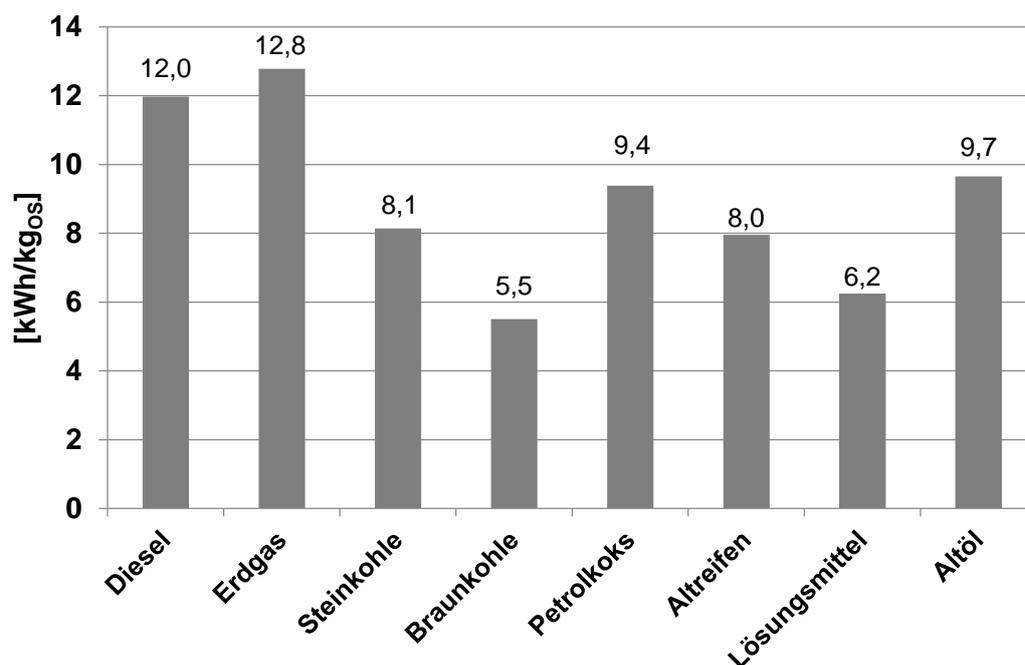


Abbildung 24: Heizwerte der Brenn- und Hilfsstoffe (Angaben in kWh/kg_{0S})

EBS für WS: Der Stoffstrom „EBS für WS“ stellt den Anteil an Ersatzbrennstoffen aus der EBS-Produktion dar, welche in einer Wirbelschichtanlage verwertet werden. Die Anlagenwirkungsgrade in Österreich sind je nach Anlagentyp sehr verschieden. Bei einer vorwiegenden Stromgewinnung weist eine Anlage einen Nettoanlagenwirkungsgrad von etwa 20 % bis 25 % auf. Im Vergleich dazu können Anlagen, welche überwiegend Prozesswärme zur ganzjährigen Nutzung von Strom und Wärme (Kraft-Wärme-Kopplung) erzeugen, Wirkungsgrade von 70 bis 80 % erreichen. (BMLFUW, 2009) Die jeweiligen Wirkungsgrade österreichischer Anlagen sind in Tabelle 28 dargestellt. Für die Bilanzierung wird in dieser Arbeit ein Wirkungsgrad von 70 % für den Stoffstrom „EBS für WS“ als Gutschrift (negativer Wert) übernommen.

Tabelle 28: Abfallverbrennungsanlagen und deren Wirkungsgrade (BMLFUW, 2009)

Anlage (2013)	Technik	Brennstoff	Wirkungsgrad [%]
RVL (AVE, Lenzing)	Wirbelschicht	heizwertreiche Fraktion, Klärschlamm	79
RHKW (Linz AG)	Wirbelschicht	heizwertreiche Fraktion, Klärschlamm	59
TRV (Niklasdorf ENAGES)	Wirbelschicht	heizwertreiche Fraktion, Klärschlamm	80

Energieverluste: Der Stoffstrom „Energieverluste“ soll die thermischen Verluste eines Zementwerkes aufzeigen. Der Wirkungsgrad des Zementwerkes beträgt 70 %. Bei der Bilanzierung werden 30 % der thermischen Energie als Stoffstrom „Energieverluste“ als

positiver Wert (Lastschrift) dargestellt. Dieser Wert wird jedoch nicht zur Summe der Lastschriften hinzuaddiert, da er über die produzierte Klinkermenge bereits berücksichtigt wird. Der hier verwendete Wirkungsgrad basiert auf einer Umwelterklärung zweier Zementwerke (Beckum und Rüdersdorf) aus dem Jahre 2013. (Cemex, 2012)

Dieser Wirkungsgrad des Zementwerkes kann jedoch nicht direkt mit dem Wirkungsgrad der Wirbelschichtanlage verglichen werden. Beim Zementwerk wird der Verbrennungsprozess zur Umwandlung des Rohmehls in Klinker verwendet. Diese Umwandlung ist nicht in Form eines Wirkungsgrades beschreibbar. Eine einfache Darstellung dieses Verbrennungsprozesses im Drehrohrofen und dessen In- und Outputs wird in der Abbildung 25 dargestellt. Der Wirkungsgrad für die Verbrennung in einer Wirbelschichtanlage beinhaltet die Energieumformung d.h. daraus gewonnene elektrische und thermische Energie für verschiedenste Zwecke. Somit sind diese Werte nicht direkt vergleichbar jedoch für die Bilanzierung ausreichend.

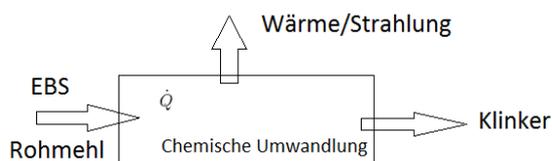


Abbildung 25: Umwandlung im Drehrohrofen

Klinker (Energie): Der Stoffstrom „Klinker (Energie)“ beinhaltet die gesamte thermische Energie die in das Zementwerk gelangt minus dem Energieinhalt des Stoffstroms „Energieverluste“.

EBS für ZW und Mix alternative Brennstoffe in Form von Substitution: Bezogen auf die Summe aller Energieträger, die in das Zementwerk eingebracht werden, werden 72,4 % der Gesamtenergie aus Ersatzbrennstoffen und 27,6 % aus Fossil (Mix) produziert. Der Anteil an EBS wird als thermische Substitutionsrate bezeichnet und in der österreichischen Zementindustrie im Jahr 2013 betrug sie 72,4 %. (Mauschitz, 2014) Daraus ergibt sich ein prozentueller Anteil einzelner Brennstoffe. Dieser wird in der Tabelle 29 dargestellt. Dies soll den hohen Anteil (54 %) an Abfällen aus der EBS-Produktion verdeutlichen.

Tabelle 29: Brennstoffverteilung der Energieträger in der österreichischen Zementindustrie im Jahr 2013 und Zusammensetzung Fossil (Mix) und EBS für die gegenständliche Arbeit (Mauschitz, 2014)

Brennstoff Verteilung			
	Gesamt	Fossil (Mix)	EBS
	[%]	[%]	[%]
Braunkohle	10	35	
Steinkohle	9	33	
Petrolkoks	9	32	
Altreifen	12		16
EBS f. ZW	54		75
Altöl	2		3
Lösungsmittel	4		6
Gesamt	100	27,6	72,4

Das nachfolgend abgebildete Referenzsystem (SG Ref.), siehe Abbildung 27, dient zum Vergleich mit dem EBS-Gesamtsystem (vgl. Abbildung 26). Für die Energiebilanz werden hier nur zwei Inputströme betrachtet, zum einem Strom und zum anderen Fossil (Mix). Wie in diesem Kapitel beschrieben, wird auch hier ein Energieverlust des Zementherstellungsprozess von 30 % angesetzt. Daraus lassen sich verschiedene Interpretationen der Vor- und Nachteile der Ersatzbrennstoffe hinsichtlich der Energiebilanz ableiten.

Nachfolgend werden alle Gut- und Lastschriften aufgezählt die in der Energiebilanz Verwendung finden (vgl. Tabelle 30).

Tabelle 30: Zusammenfassende Auflistung der jeweiligen Gut- und Lastschriften in der Energiebilanz

Gutschriften	Lastschriften
Stoffstrom	Stoffstrom
FE (Eisenmetalle)	Abfall
NE (Nichteisenmetalle: Cu und Al)	Biologisch abbaubarer Siebdurchgang
PET (Polyethylenterephthalat)	Strom EBS
PPK (Papier, Pappe, Karton)	Diesel EBS
EBS für WS	Gas EBS
Mix alternative Brennstoffe	Diesel Transport
	Strom ZW
	Fossil (Mix)
	Energieverluste ^{*)}
*)Wird nicht zur Summe der Lastschriften hinzuaddiert.	

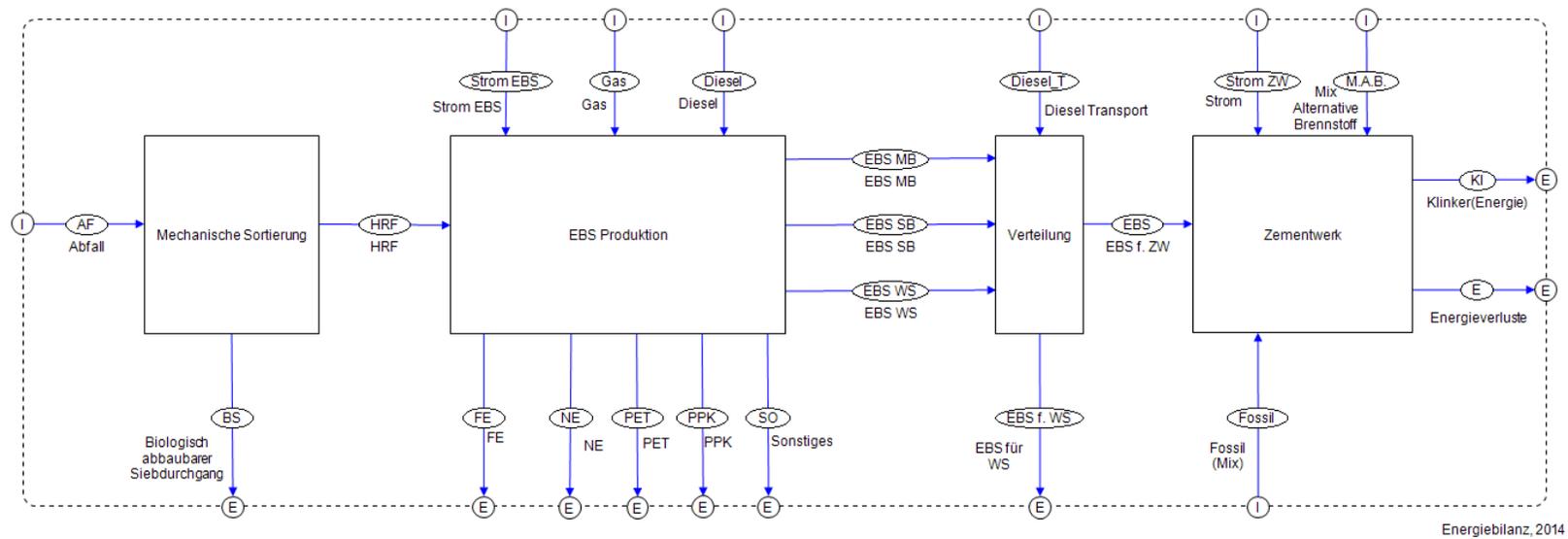


Abbildung 26: Energiebilanz EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2)

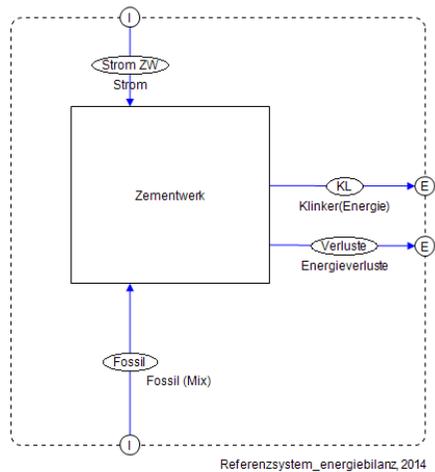


Abbildung 27: Energiebilanz Referenzsystem (SG Ref.)

5.3 CO₂-Äq-Bilanz

Im Kapitel CO₂-Äq-Bilanz werden die einzelnen Stoffströme hinsichtlich CO₂-Äq-Emissionen erklärt. Bei der CO₂-Äq-Bilanzierung werden (auch wie in der Energiebilanz) Gutschriften (negativer Wert) oder Lastschriften (positiver Wert) gebildet. Damit kann ein schneller und einfacher Überblick des EBS-Gesamtsystems hinsichtlich der CO₂-Äq-Bilanz geschaffen werden. Welche Werte als Gutschriften und welche als Lastschriften gewertet werden, wird bei den einzelnen Stoffströmen erwähnt und am Ende des Kapitels in Tabelle 34 zusammenfassend dargestellt. Bei den CO₂-Äq-Emissionen werden drei Treibhausgase, Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) betrachtet. Die Wirksamkeit des jeweiligen Treibhausgases bezüglich des Treibhauseffekts wird in der Tabelle 31 dargestellt. Dabei wird das jeweilige Gas über den Äquivalenzfaktor auf CO₂-Äq umgerechnet.

Tabelle 31: Treibhausgaspotential von CO₂, CH₄ und N₂O (IPPC, 2007)

Treibhausgas	Äquivalenzfaktor
Kohlendioxid (CO ₂)	1
Methan (CH ₄)	21
Lachgas (N ₂ O)	310

Biologisch abbaubarer Siebdurchgang: Der Stoffstrom „Biologisch abbaubarer Siebdurchgang“ wird im Prozess Mechanische Sortierung aus dem EBS-Gesamtsystem entfernt. Die Datengrundlage basiert auf einer Umweltbundesamtstudie (Umweltbundesamt, 2011a), welche bereits bei der Energiebilanz Verwendung fand (vgl. Kapitelt 5.2). Dabei wird ebenfalls eine teilgeschlossene Kompostierung berücksichtigt. Bei dieser Art der Behandlung entsteht eine Lastschrift von 36 gCO₂-Äq/kg. Dieser Wert wird bei der Bilanzierung als positiv (Lastschrift) angeführt.

Wertstoffe: Es werden vier verschiedene Wertstoffe (d.h. Eisenmetalle (FE), Nichteisenmetalle (NE), PET-Kunststoffe (PET) und Papier/Pappe/Karton (PPK)) bei der EBS-Produktion dargestellt und beschrieben. In der Energiebilanz wurde die jeweilige Primär- und Sekundärproduktion beschrieben (vgl. Kapitelt 5.2). Anhand der benötigten Energie und des jeweiligen verwendeten Energieträgers bei der Herstellung, ergeben sich die CO₂-Äq-Emissionen. Die Emissionswerte sind in Tabelle 32 und die Einsparungen in Abbildung 28 dargestellt. Die größten Einsparungen ergeben sich bei Nichteisenmetallen, die geringsten bei PET. Jeder Wertstoff wird bei der Bilanzierung als negativ (Gutschrift) angeführt.

Tabelle 32: CO₂-Äq-Werte für die aussortierten Wertstoffe

	Emissionen [kg _{CO2-Äq} /kg]	Einsparung	
		[%]	[kg _{CO2-Äq} /kg]
Nichteisenmetalle (80 % Al; 20 % Cu)		81	
Aluminium (Primär) ^{*)}	12,1		
Aluminium (Sek.) ^{*)}	1,6	87	10,5
Kupfer (Primär) ^{*)}	5,0		
Kupfer (Sek.) ^{*)}	2,0	60	3
Eisen (Primär) ^{*)}	1,7		
Eisen (Sek.) ^{*)}	0,5	71	1,2
Polyethylenterephthalat (Primär) ^{**)}	3,5		
Polyethylenterephthalat (Sek.) ^{**)}	2,7	23	0,8
Papier/Pappe/Karton (Primär) ^{***)}	1,3		
Papier/Pappe/Karton (Sek.) ^{***)}	0,9	30	0,4
^{*)}(Umweltbundesamt, 2013) ^{**)}(Umweltbundesamt, 2010) ^{***)}(IFEU, 2006)			

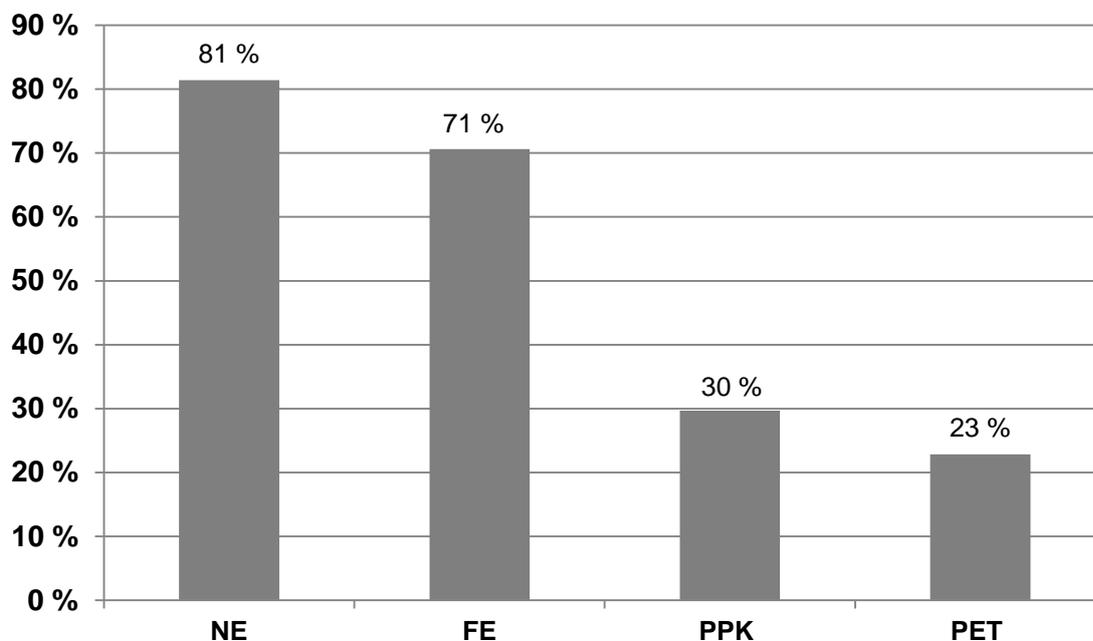


Abbildung 28: Einsparung von CO₂-Äq-Emissionen aus der Sekundärherstellung im Vgl. zur Primärherstellung

Sonstiges: Der Stoffstrom „Sonstiges“ wird in der CO₂-Äq-Bilanz (gleich wie bei der Energiebilanz) mit dem Wert 0 betrachtet.

Fossil (Mix): Es werden die Emissionen für jeden einzelnen Brennstoff (Steinkohle, Braunkohle und Petrolkoks) berechnet. Die dafür verwendeten Daten sind in Tabelle 33 angeführt. Der Gesamtemissionswert wird in der Bilanzierung als positiv (Lastschrift) angeführt.

Mix alternative Brennstoffe: Ebenso wie beim Stoffstrom „Fossil (Mix)“ werden die Emissionen für die einzelnen alternativen Brennstoffe (Altreifen, Altöl und Lösungsmittel) berechnet. Dabei ist beim Brennstoff Altreifen ein 25 %-iger biogener Anteil zu berücksichtigen, welcher zu den fossilen CO₂-Emissionen nicht addiert wird. Der Gesamtemissionswert wird in der Bilanzierung als positiv (Lastschrift) angeführt.

Strom EBS, Gas, Diesel: Die Stoffströme „Strom EBS“, „Gas“ und „Diesel“ werden in der Tabelle 33 bezüglich ihrer CO₂-Äq-Bilanzdaten dargestellt. Alle drei Hilfsstoffe werden in der Bilanzierung als positiver Wert (Lastschrift) dargestellt.

Diesel Transport: Nach Berechnung des Dieserverbrauchs für den Transport (vgl. Kapitel 5.2) können daraus die jeweiligen Emissionen mit den Daten aus Tabelle 33 berechnet werden. Für die Bilanzierung wird dieser Wert als positiv (Lastschrift) dargestellt.

EBS für WS: Der Stoffstrom „EBS für WS“ wird im Prozess „Verteilung“ in zwei Flüsse aufgeteilt. Dabei wird zum einen der biogene Anteil am Kohlenstoffgehalt für den Stoffstrom „EBS für WS“ betrachtet und beim anderen der fossile Anteil. Hier wird nur der biogene Anteil zur Bilanzierung herangezogen. Es werden die daraus resultierenden Emissionen bei der Verbrennung berechnet und in der Bilanzierung als negativ (Gutschrift) dargestellt, da der fossile Anteil über die CO₂-Äq-Emissionen des Flusses „Abfall“ bereits berücksichtigt wird.

Strom ZW: Es handelt sich dabei um den im Zementwerk verbrauchten Strom und die daraus resultierenden Emissionen. Die Werte für die CO₂-Äq-Bilanz basieren auf dem österreichischen Stromkennzeichnungsbericht (Energie Control GmbH, 2013). Dieser ist in Abbildung 29 dargestellt. Für die Bilanzierung wird dieser Wert als positiv (Lastschrift) dargestellt.

STROMKENNZEICHNUNG GEM § 78 ABS. 1 UND EIWOG 2010 FÜR DEN ZEITRAUM 1. JANUAR BIS 31. DEZEMBER 2012	
Bekannte erneuerbare Energieträger	74,53%
Wasserkraft	65,26%
Windenergie	4,29%
festе oder flüssige Biomasse	3,76%
Biogas	0,96%
Sonnenenergie	0,19%
Deponie- und Klärgas	0,06%
geothermische Energie	0,00%
Bekannte fossile Energieträger	17,91%
Erdgas	13,22%
Erdöl und dessen Produkte	0,04%
Kohle	4,66%
Bekannte Nuklearenergie	0,00%
Bekannte sonstige Primärenergieträger	0,31%
Unbekannter Herkunft ENTSO-E-Mix (2012)	7,25%
(europäischer Strommix aus 63,83% fossile Brennstoffe, 35,70% Nuklearenergie 00,49% Sonstige Primärenergieträger)	
Summe	100,00%
Umweltauswirkungen der Stromproduktion	
CO ₂ -Emission	129,27 g/kWh
Radioaktiver Abfall	0,05 mg/kWh

Quelle: E-Control

Abbildung 29: Stromkennzeichnungsbericht 2013 für Österreich (Energie Control GmbH, 2013)

„CO₂ EBS“: Dieser Stoffstrom berücksichtigt den Kohlenstoffgehalt vom EBS aus der mechanischen Aufbereitung. Dabei werden die Emissionen, welche aus dem biogenen Anteil stammen, als negativ (Gutschrift) bewertet.

Tabelle 33: Zusammenfassende Daten für die CO₂-Äq-Bilanz

Ausgangswerte für die CO ₂ -Bilanz				
	[gCO ₂ -Äq/kWh]	[kgCO ₂ -Äq/kg]	[kgCO ₂ -Äq/l]	[kgCO ₂ -Äq/Nm ³]
Strom ^{*)}	129			
Diesel ^{**)}	268	3,2	2,7	
Erdgas ^{**)}	202	2,6		2,0
Steinkohle ^{**)}	356	2,9		
Braunkohle ^{**)}	366	3,2		
Petrolkoks ^{**)}	352	3,0		
Altreifen ^{***)}	317	2,5		
Lösungsmittel ^{****)}	304	1,9		
Altöl ^{**)}	271	2,6		

^{*)}..... (Energie Control GmbH, 2013)
^{**)} (IPPC, 2006)
^{***)} (VDZ, 2007)
^{****)} (Seyler, 2003)

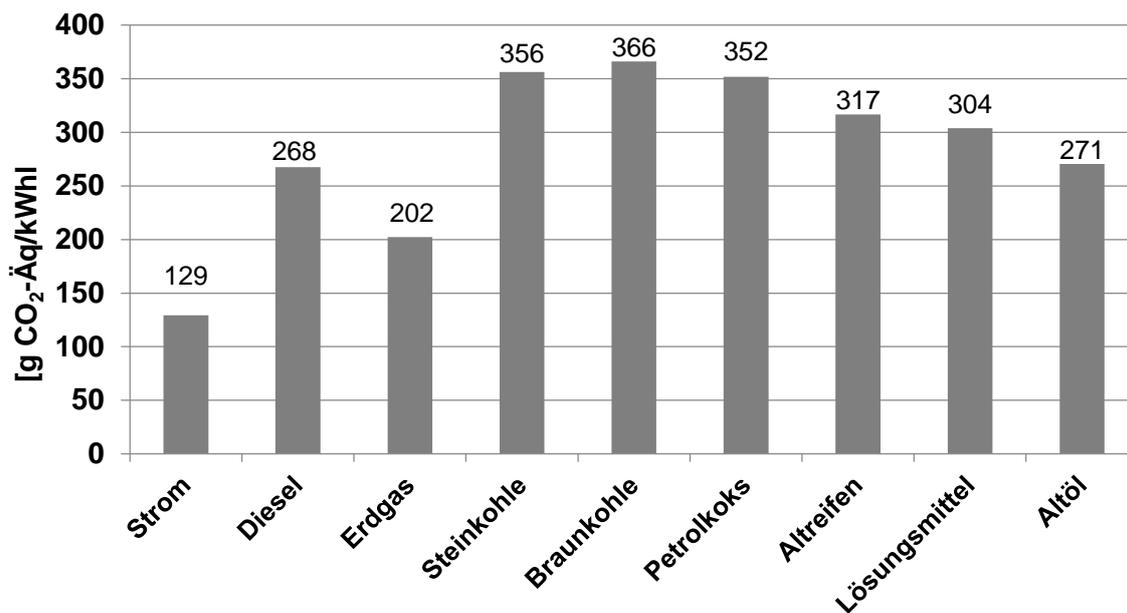


Abbildung 30: CO₂-Äq der Brennstoffe und Energieträger

Beim Referenzsystem (vgl. Abbildung 32) werden nur die Emissionen aus dem Fossil (Mix) und dem Stromverbrauch betrachtet. Damit soll der Vergleich zwischen einem rein mit fossilen Brennstoff und einem im Mischbetrieb (EBS und konventionelle Energieträger) betriebenen Zementwerk gezogen werden.

Tabelle 34: Zusammenfassende Auflistung der jeweiligen Gut- und Lastschriften bei der CO₂-Äq-Bilanz

Gutschriften	Lastschriften
Stoffstrom	Stoffstrom
FE (Eisenmetalle)	Abfall (biogen und fossil)
NE (Nichteisenmetalle: Cu und Al)	Biologisch abbaubarer Siebdurchgang
PET (Polyethylenterephthalat)	Strom EBS
PPK (Papier, Pappe, Karton)	Diesel EBS
EBS für WS (biogener Anteil)	Gas EBS
CO ₂ EBS (biogener Anteil)	Diesel Transport
	Strom ZW
	Fossil (Mix)
	Mix alternative Brennstoffe (fossiler Anteil)

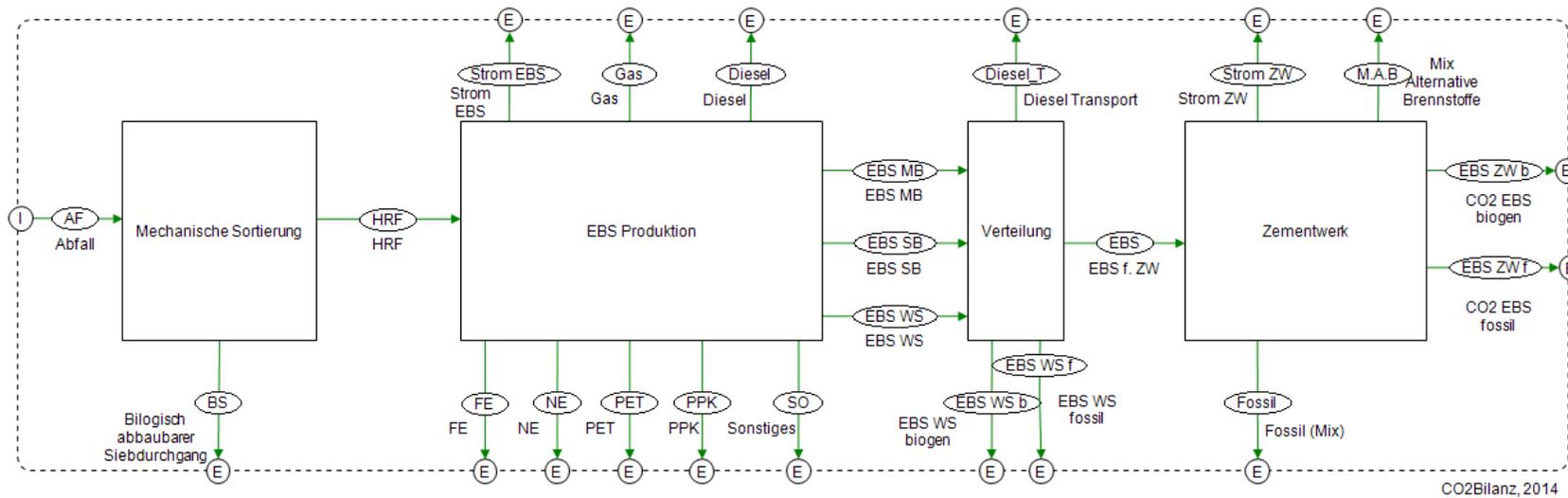


Abbildung 31: CO₂-Äq-Bilanz EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2)

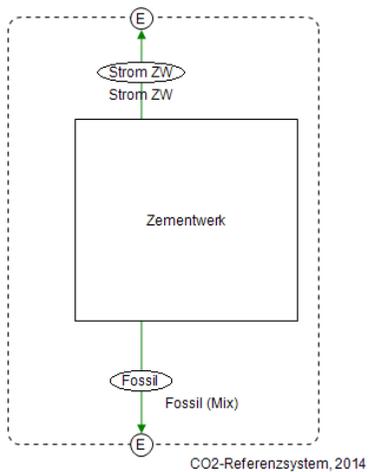


Abbildung 32: CO₂-Äq-Bilanz Referenzsystem (SG Ref.)

6 Theoretische Berechnung der Systeme und Sensitivitätsanalyse

Ausgehend von den drei erstellten Bilanzen (d.h. Massenbilanz, Energiebilanz, CO₂-Äq-Bilanz) werden in diesem Kapitel theoretische Berechnungen des EBS-Gesamtsystems sowie Referenzsystems bezogen auf 1.000 kg Abfall bzw. 1.000 kg HRF durchgeführt. Des Weiteren wird eine Sensitivitätsanalyse basierend auf unterschiedlichen Szenarien durchgeführt.

6.1 EBS-Produktion (SG 1)

Im folgenden Unterkapitel wird die EBS-Produktion (SG 1) hinsichtlich Masse-, Energie- und CO₂-Äq-Bilanz betrachtet.

6.1.1 Massenbilanz EBS-Produktion (SG 1)

Beim Aufbau und der theoretischen Berechnung des Systems SG 1 werden 2 Szenarien dargestellt:

- 1) Input in das System, d.h. Fluss „Abfall“ wird mit 1.000 kg (bzw. 100 %) angesetzt und alle restlichen Flüsse werden auf den Fluss „Abfall“ bezogen,
- 2) Fluss „heizwertreiche Fraktion“ (HRF) wird mit 1.000 kg (bzw. 100 %) angesetzt.

Da es in Österreich mechanische Abfallaufbereitungsanlagen gibt, welche u.a. nichtaufbereitete Abfälle annehmen und behandeln und beim ersten Klassierverfahren (d.h. Sortieren) den biologischen Anteil des Abfalls (hier als „Biologisch abbaubarer Siebdurchgang (BS)“) abtrennen und HRF selbst weiter behandeln, wird Szenario 1 herangezogen. Es gibt aber Anlagen, die dieses Klassierverfahren und die Abtrennung von „BS“ nicht haben. Für diese Anlage ist, die Menge an Abfall gleichzeitig die Menge an HRF. In diesem Fall wird Szenario 2 herangezogen. Die Auswertung für beide Szenarien (d.h. Sz. 1 ist 1.000 kg Abfall und Sz. 2 ist 1.000 kg HRF) ist in der Tabelle 35 gegeben.

Ausgehend von 1.000 kg Abfall bzw. von 1.000 kg HRF, welcher in das Massenbilanzsystem (SG 1) beschickt wird, werden, wie in der folgenden Tabelle 35 aufgeschlüsselt, Wertstoffe, biologischer Siebdurchgang und andere Stoffe abgetrennt.

Tabelle 35: Theoretische Daten basierend auf Erfahrungen aus der Praxis für die Massenbilanz der EBS-Produktion (SG 1) mit 1.000 kg Abfall (Szenario 1) und 1.000 kg HRF (Szenario 2)

Name	Jahr	Kurzzeichen	1.000 kg Abfall		1.000 kg HRF	
			[kg]	[%]	[kg]	[%]
Abfall	2014	AF	1.000	100,0	1.250	125,0
Biologisch abbaubarer Siebdurchgang	2014	BS	200	20,0	250	25,0
HRF	2014	HRF	800	80,0	1.000	100,0
FE	2014	FE	20	2,0	25	2,5
NE	2014	NE	8	0,8	10	1,0
PET	2014	PET	8	0,8	10	1,0
PPK	2014	PPK	8	0,8	10	1,0
Sonstiges	2014	SO	52	5,2	65	6,5
EBS MB	2014	EBS MB	120	12,0	150	15,0
EBS SB	2014	EBS SB	304	30,4	380	38,0
EBS WS	2014	EBS WS	280	28,0	350	35,0

Werden die Daten auf 1.000 kg HRF bezogen, so werden 25 % der HRF als Biologisch abbaubarer Siebdurchgang ausgewiesen. Des Weiteren werden 15 % EBS MB und 38 % EBS SB ausgewiesen.

Von den aussortierten Wertstoffen werden 2,5 % FE, 1% NE, 1 % PET, 1 % PPK und 6,5 % Sonstiges angenommen. Im Stoffstrom „Sonstiges“ werden, wie bereits im Kapitel 5 erklärt, u.a. Wasserverluste ebenfalls berücksichtigt.

Die Bestimmung von Fluss EBS WS erfolgt auf Basis der Differenzrechnung, d.h. von 1.000 kg HRF werden alle angenommenen Mengen an FE, NE, PET, PPK, Sonstiges sowie EBS MB und EBS SB abgezogen und als EBS WS dargestellt (Anmerkung: Massenerhaltungsgesetz, da die Dampf- sowie biologische Abbauverluste unter Sonstiges zusammengefasst sind).

Die grafische Darstellung und Auswertung des Systems „EBS-Produktion (SG 1) ist aus Abbildung 33 zu entnehmen.

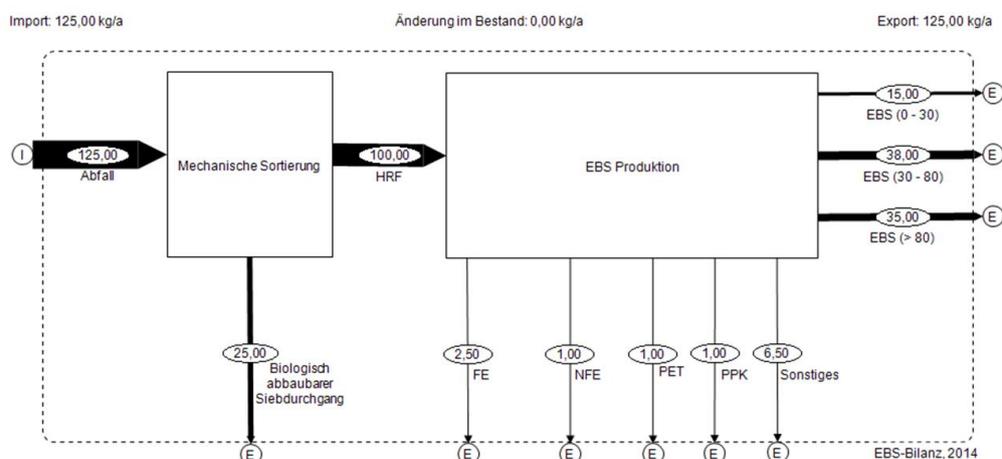


Abbildung 33: Massenbilanz mit theoretischen Daten für das System EBS-Produktion (SG 1) bezogen auf 1.000 kg HRF (Angaben in Prozent)

6.1.2 Energiebilanz EBS-Produktion (SG 1)

Die Energiebilanz für das System „EBS-Produktion (SG 1)“ wird wie für die Massenbilanz auf 1.000 kg HRF bezogen. Die Grundlagen zur Berechnung sind im Kapitel 5.2 dargestellt, wobei für die theoretische Auswertung die Daten publiziert für das Jahr 2013 verwendet werden (vgl. Tabelle 36). (Sarc et al., 2014a)

Die Daten (Gesamtkohlenstoffgehalt (TC_{OS}) und fossilen Kohlenstoffgehaltes ($X_{NB}^{TC_{OS}}$) für EBS WS basieren auf Erfahrungswerten (Sarc et al., 2014) und wurden geschätzt. Die Daten für EBS MB und EBS SB stammen aus einem 2014 veröffentlichten Artikel. (Sarc et al., 2014) Die Strom und Dieselverbräuche wurden basierend auf Erfahrungswerten einer steirischen EBS-Produktionsanlage definiert.

Tabelle 36: Parameter (Heizwert, Kohlenstoffgehalt usw.) für die produzierten EBS-Typen (Sarc et al., 2014a)

	Heizwert OS	TC_{DM}	$X_{NB}^{TC_{DM}}$	CO_2 -Äq	Heizwert DM	Aschegehalt	DM
	[MJ/kg _{OS}]	[% DM]	[% DM]	[g _{CO2} / MJ _{DM}]	[MJ/kg _{DM}]	[% _{DM}]	[% OS]
EBS MB	19,3	52,8	55,2	43,2	25	14,2	84,9
EBS SB	15,5	46,9	41,7	34,5	21,2	17,2	75
EBS WS	12	35,5	28,0	27,4	17,7	-----	75

Eine zusammenfassende Darstellung der Gutschriften (d.h. Einsparungen bzw. produzierter Energie) sowie Lastschriften (d.h. verbrauchter Energie) ist der Tabelle 37 zu entnehmen.

Tabelle 37: Energiebilanz mit theoretischen Daten für das System EBS-Produktion (SG 1) bezogen auf 1.000 kg HRF

Name	Jahr	Kurzzeichen	[MJ]
Lastschrift			
Abfall	2014	AF	14.548
Biologisch abbaubarer Siebdurchgang	2014	BS	1.563
Strom EBS	2014	Strom	79
Diesel EBS	2014	Diesel	36
Summe Lastschrift			16.226
Gutschrift			
FE	2014	FE	-364
NE	2014	NE	-962
PET	2014	PET	-270
PPK	2014	PPK	-38
EBS	2014	EBS	-12.985
Summe Gutschrift			-14.619

Wie aus den Daten der Tabelle 37 ersichtlich, werden die Stoffe, die nach der Aussortierung zu einer stofflichen Verwertung (FE, NE, PET, PPK) zugeführt werden und der produzierte EBS als „Gutschrift“ bezeichnet. Der BS wird als Lastschrift angegeben, weil 1.563 MJ sich auf die darin enthaltenen und die für die weitere Aufbereitung (teilgeschlossene Kompostierung) benötigte Energie beziehen. Die andere Lastschriften, Strom und Diesel,

werden bei dem Betrieb der Anlage benötigt. Nach Aufsummierung der Gut- und Lastschriften zeigt sich, dass rund 1.607 MJ Energielastschriften im System EBS-Produktion (SG 1) entstehen. Bezogen auf den Energieinput (d.h. 1.000 kg HRF bzw. 14.548 MJ) ergibt sich eine Lastschrift von 11 %.

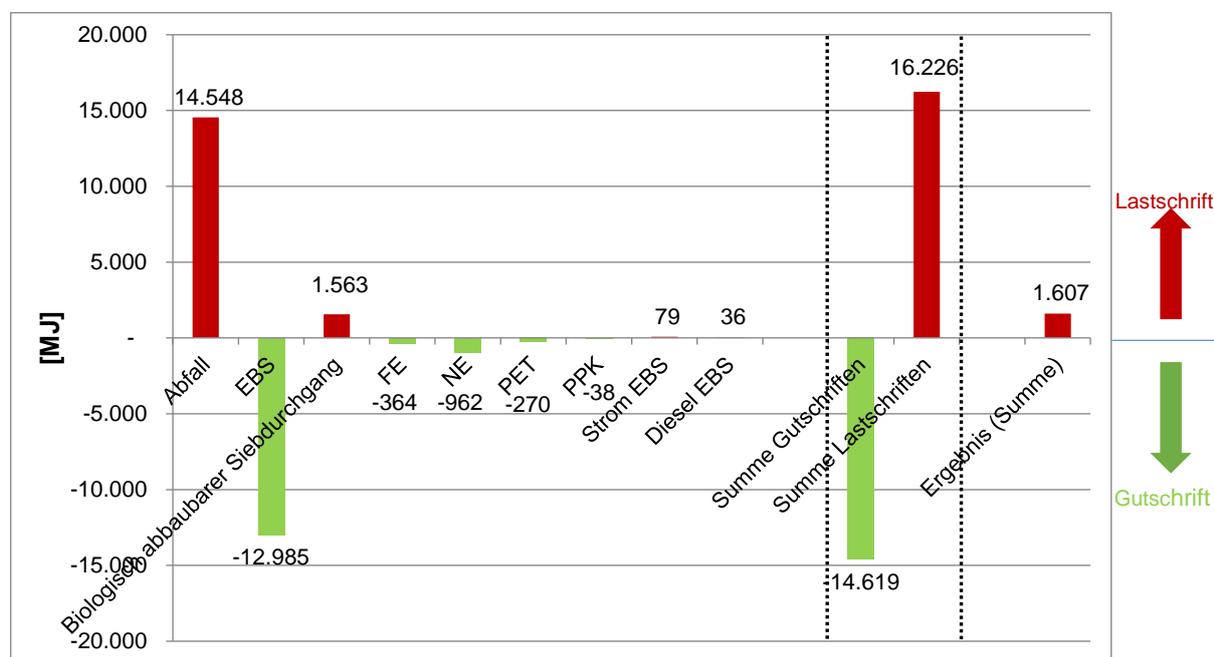


Abbildung 34: Theoretische Auswertung (Gut- und Lastschriften) der Energiebilanz für das System EBS-Produktion (SG 1) bezogen auf 1.000 kg HRF

6.1.3 CO₂-Äq-Bilanz EBS-Produktion (SG 1)

Basierend auf der Vorgehensweise aus Kapitel 5.3 (Daten aus Tabelle 36) und bezogen auf 1.000 kg HRF wird eine CO₂-Äq-Bilanz erstellt. Die theoretische Auswertung der CO₂-Äq-Bilanz bezogen auf 1.000 kg HRF ist der Tabelle 38 und der Abbildung 35 zu entnehmen.

Tabelle 38: CO₂-Äq-Bilanz mit theoretischen Daten für das System EBS-Produktion (SG 1) bezogen auf 1.000 kg HRF

Name	Jahr	Kurzzeichen	[kg _{CO2-Äq}]
Lastschrift			
Abfall	2014	AF	1.115
Biologisch abbaubarer Siebdurchgang	2014	BS	37
Strom EBS	2014	Strom	3
Diesel EBS	2014	Diesel	3
Summe Lastschrift			1.157
Gutschrift			
FE	2014	FE	-30
NE	2014	NE	-90
PET	2014	PET	-8
PPK	2014	PPK	-4
EBS	2014	EBS	-737
Summe Gutschrift			-869

Anzumerken ist, dass EBS als „Gutschrift“ dargestellt sind, weil nur der biogene Kohlenstoff (d.h. klimaneutral) berücksichtigt wird, der fossile Anteil des Kohlenstoffs bleibt als Lastschrift und ist in der HRF mitberücksichtigt. Beim „Biologisch abbaubaren Siebdurchgang“ handelt es sich um die CO₂-Äq-Emissionen (d.h. Lastschrift), die bei der Behandlung in einer teilgeschlossenen Kompostierung entstehen (siehe Kapitel 5.3), bei den Wertstoffen um Einsparungen (d.h. Gutschriften) zwischen Primär- und Sekundärherstellung. Gesamt betrachtet, ergibt sich eine CO₂-Äq-Lastschrift von 288 kg CO₂-Äq. Bezogen auf CO₂-Äq-Wert für 1.000 kg HRF sind es 25 %.

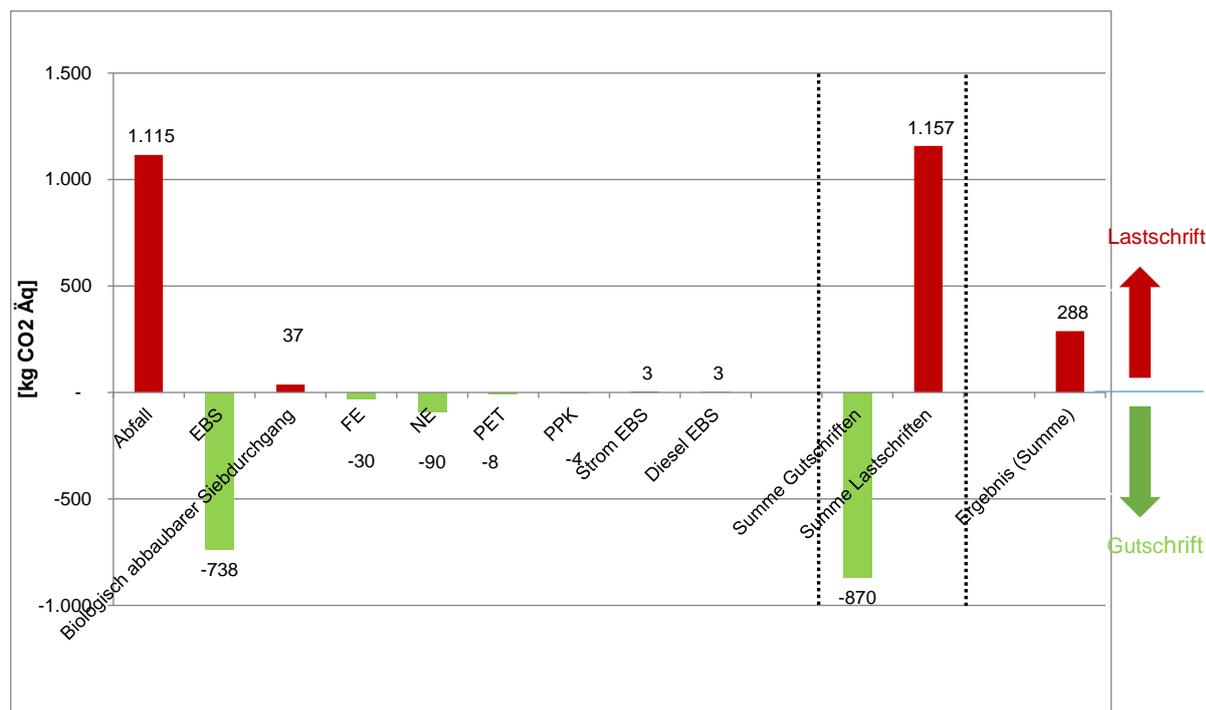


Abbildung 35: Theoretische Auswertung (Gut- und Lastschriften) der CO₂-Äq-Bilanz für das System EBS-Produktion (SG 1) bezogen auf 1.000 kg HRF

6.2 EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2)

Das System SG 1 wird im folgenden Kapitel um das EBS-Verwertungssystem (SG 2) erweitert.

6.2.1 Massenbilanz EBS Gesamtsystem (SG 1 + 2)

Die theoretische Ausweitung des Systems „EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2)“ wird wie im Kapitel 6.1 auf 1.000 kg Abfall und 1.000 kg HRF bezogen. Die Beziehungen zueinander basieren auf den bereits in den Kapitel 5.1 beschriebenen Zusammenhängen. Die Daten bis zur Produktion des EBS, dargestellt im Kapitel 6.1.1 bleiben unverändert. Bei der Systemgrenze 2 wird beim Prozess „Verteilung“ angenommen, dass 70 % des produzierten EBS (15 % EBS MB, 38 % EBS SB und 8,6 % EBS WS) ins Zementwerk gelangen und die restlichen 30 % (d.h. 26,4 % EBS WS) in die Wirbelschichtenanlagen (vgl. Abbildung 36).

Des Weiteren werden die Flüsse „Fossil (Mix)“, „Mix alternative Brennstoffe“ in einem bestimmten Verhältnis zu den 616 kg EBS (vgl. Abbildung 36), d.h. vom produzierten EBS (880 kg x 0,7 = 616 kg), bezogen auf 1.000 kg HRF, in das Zementwerk geliefert. In Bezug auf 100 % HRF werden 740 % (d.h. 7,4 Mal mehr) an Rohmehl in das Zementwerk geliefert, woraus nach dem Brennvorgang rund 4.800 kg Klinker produziert werden können. Dafür werden insgesamt 929 kg (d.h. 616 kg EBS, 196 kg Fossil (Mix) und 117 kg Mix alternative Brennstoffe) an Energieträger verbrannt. Die theoretische Auswertung der beiden Betrachtungen, 1.000 kg Abfall oder 1.000 kg HRF, werden in Tabelle 39 dargestellt.

Tabelle 39: Theoretische Daten basierend auf Erfahrungen aus der Praxis für die Massenbilanz der EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) mit 1.000 kg Abfall (Szenario 1) und 1.000 kg HRF (Szenario 2)

Name	Jahr	Kurzzeichen	1.000 kg Abfall		1.000 kg HRF	
			[kg]	[%]	[kg]	[%]
Abfall	2014	AF	1.000,0	100,0	1.250,0	9,6
Biologisch abbaubarer Siebdurchgang	2014	BS	200,0	20,0	250,0	25,0
HRF	2014	HRF	800,0	80,0	1.000,0	100,0
FE	2014	FE	20,0	2,0	25,0	2,5
NE	2014	NE	8,0	0,8	10,0	1,0
PET	2014	PET	8,0	0,8	10,0	1,0
PPK	2014	PPK	8,0	0,8	10,0	1,0
Sonstiges	2014	SO	52,0	5,2	65,0	6,5
EBS MB	2014	EBS MB	120,0	12,0	150,0	15,0
EBS HD	2014	EBS HD	304,0	30,4	380,0	38,0
EBS WS	2014	EBS WS	280,0	28,0	350,0	35,0
EBS f. ZW.	2014	EBS f. ZW	492,8	49,3	616,0	61,6
Mix Alternative Brennstoffe	2014	M.A.B.	93,7	9,4	117,2	11,7
Fossil (mix)	2014	Fossil	157,0	15,7	196,3	19,6
Rohmehl	2014	RM	5.919,9	592,0	7.399,9	740,0
Klinker	2014	KI	3.846,1	384,6	4.807,6	480,8

In der nachfolgenden Abbildung 36 ist der hohe Anteil an Rohmehl (d.h. 7,4 fache Menge im Vergleich zu 1.000 kg HRF) ersichtlich. Die im Prozess „Zementwerk“ abgebildete „Lagerveränderung“ von 352 % soll zeigen, wie viel Rohmehl durch thermische und chemische Vorgänge (z.B. CO₂ Entstehung aus Carbonaten) nicht in Klinker umgesetzt wird.

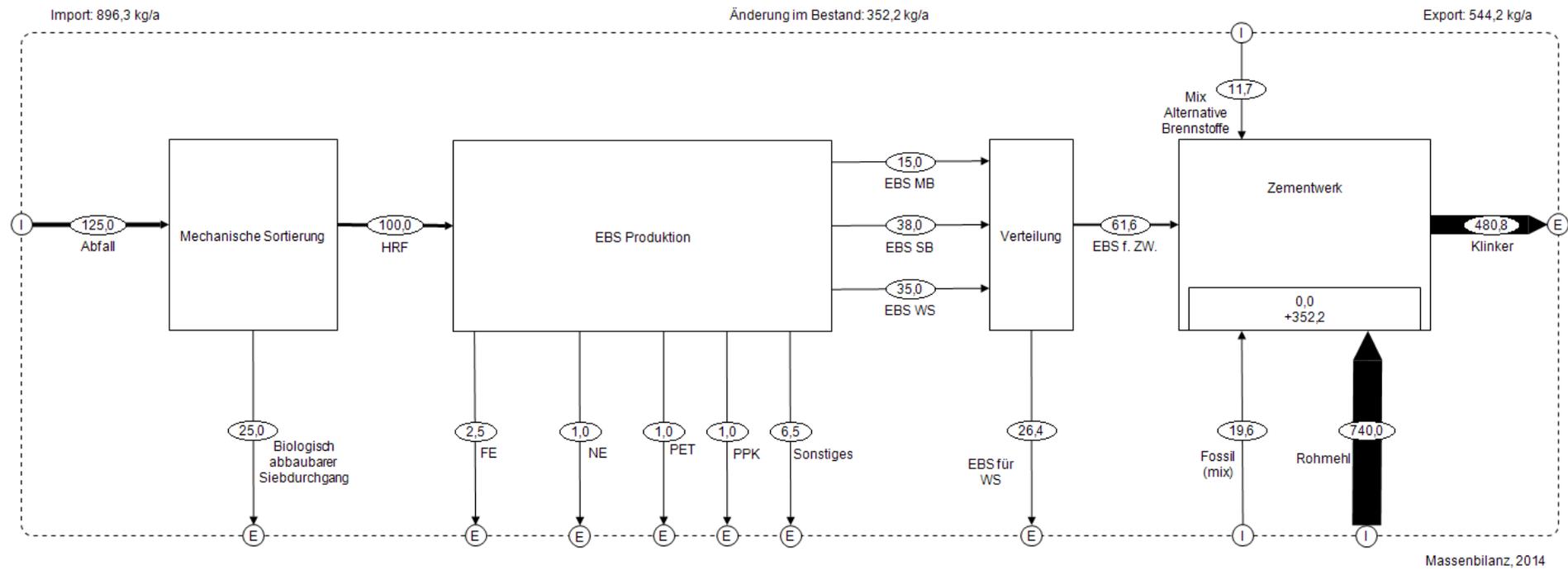


Abbildung 36: Massenbilanz mit theoretischen Daten für das System EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) bezogen auf 1.000 kg HRF (Angaben in Prozent)

6.2.2 Energiebilanz EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2)

Die Daten für die EBS-Produktion (SG 1) sind unverändert zum Kapitel 6.1.2. Die Beziehungen und Verteilungen sind wiederum auf Basis von Kapitel 5.2. Basierend auf diesen Daten lässt sich die Energiebilanz für SG 1 + 2 darstellen, siehe Abbildung 37 und Abbildung 38.

Anzumerken ist, dass der Exportstrom „Klinker (Energie)“ die Summe aller Inputströme (d.h. Summe thermische Energie ohne Strom) in den Prozess „Zementwerk“ minus die Energieverluste (d.h. 100 % - Wirkungsgrad von 70 %, siehe Kapitel 5.2) darstellt.

Wie aus Abbildung 38 ersichtlich, wurden die Wertstoffe und die Energieinhalte des EBS WS als Gutschrift bewertet. Des Weiteren wurden die Energieverluste, welche als Lastschrift dargestellt sind, für die Berechnung der Summe der Lastschriften nicht hinzuaddiert, da diese Energie bereits ins System (über alle Energieträger) importiert wurde. Abschließend muss noch angemerkt werden, dass in diesem System (SG 1 + 2) auch der Klinker produziert wird, der aber nicht in die Energiebilanz einfließt. Es werden insgesamt 4.800 kg Klinker (vgl. Tabelle 39) produziert, in dem rund 12.616 MJ an chemischer Energie gespeichert sind.

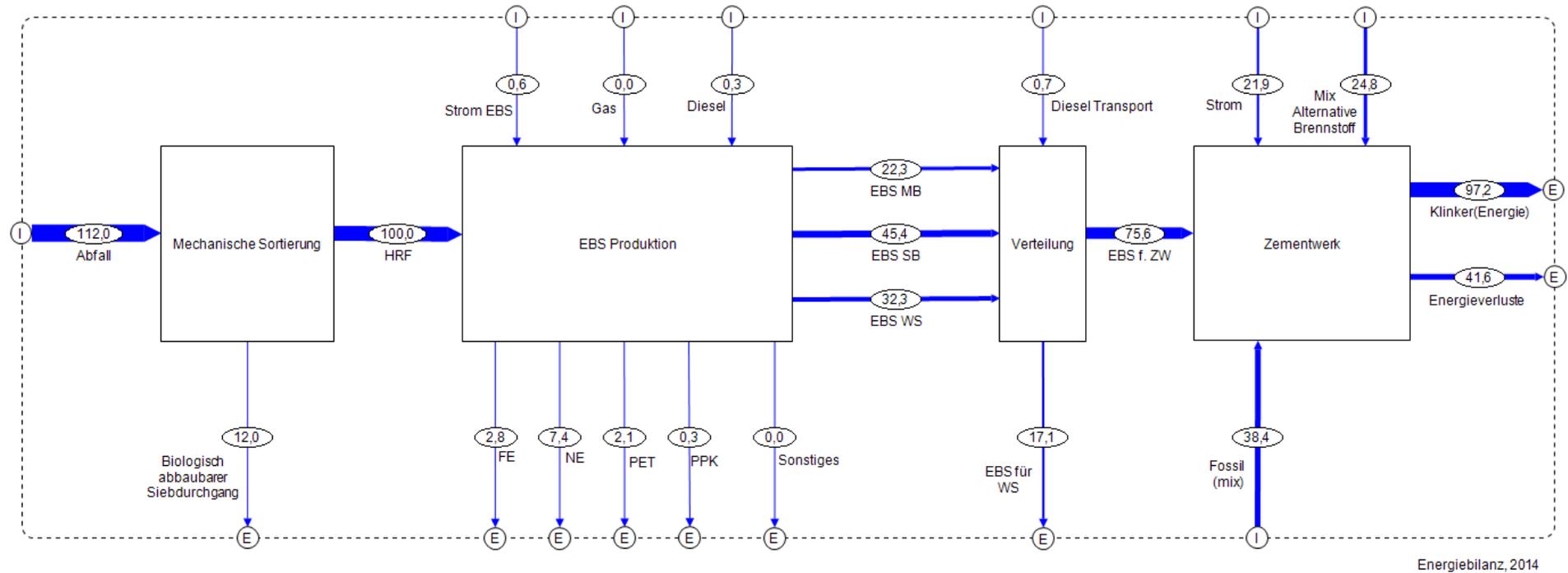


Abbildung 37: Energiebilanz mit theoretischen Daten für das System EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) bezogen auf 1.000 kg HRF (Angaben in Prozent)

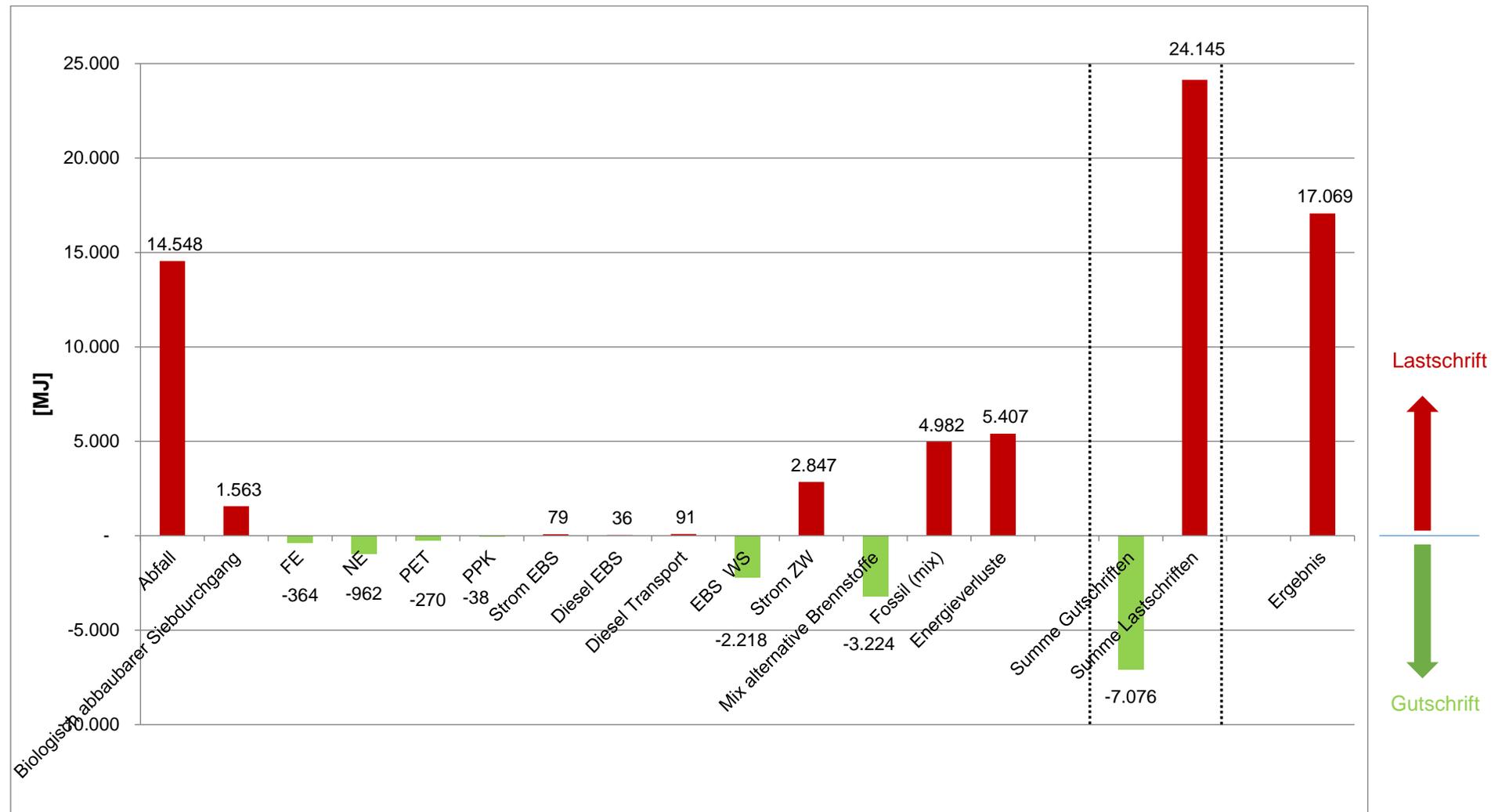


Abbildung 38: Theoretische Auswertung (Gut- und Lastschriften) der Energiebilanz für das System EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) bezogen auf 1.000 kg HRF

6.2.3 CO₂-Äq-Bilanz EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2)

Wie bereits im Kapitel 6.1.3 für die EBS-Produktion (SG 1) dargestellt, verändert sich dieser Teil auch mit der Erweiterung der Systemgrenzen (d.h. SG 1 + 2) nicht. In Abbildung 39 wird gezeigt, dass die größten CO₂-Äq-Lastschriften im Zementwerk durch den Einsatz von fossilen Energieträgern (im gegenständlichen Fall Fossil (Mix) entstehen. Betrachtet man die CO₂-Äq-Emissionen aus EBS f. ZW, so betragen diese 76,2 % der Emissionen, die in HRF enthalten sind. Hierzu muss aber angemerkt werden, dass EBS f. ZW auch einen biogenen, d.h. klimaneutralen Anteil beinhaltet, der als Export (CO₂ EBS biogen) aus dem Prozess Zementwerk dargestellt wird. Basierend auf dieser Tatsache betragen die fossilen CO₂-Äq-Emissionen eigentlich nur 26,5 % der in HRF enthaltenen CO₂-Äq-Emissionen. Damit wird auch der große Anteil (49,5 %) an biogenem Kohlenstoff verdeutlicht und somit die Vorteile gegenüber fossilen Brennstoffen hervorgehoben.

Wie aus Abbildung 40 ersichtlich, ergeben die gesamten Gutschriften einen Wert von 869 kg CO₂-Äq bezogen auf 1.000 kg HRF (bzw. 1.115 kg CO₂-Äq). Die Gutschriften, die dabei generiert werden können, betragen 44 % von den gesamten Lastschriften. Dies verbessert die gesamte Betrachtung des EBS-Gesamtsystems auf einen Wert von 1.121 kg CO₂-Äq. Die CO₂-Äq-Emissionen vom Stoffstrom „Mix alternative Brennstoffe“ haben im Vergleich zum „Fossilen (Mix)“ 65 % dessen Energieaufkommen, aber nur 46 % dessen Emissionen. Dieser niedrigere Wert basiert auf dem Anteil an klimaneutralem CO₂ bei den Altreifen und den allgemein niedrigeren CO₂-Äq-Werten (siehe Abbildung 30).

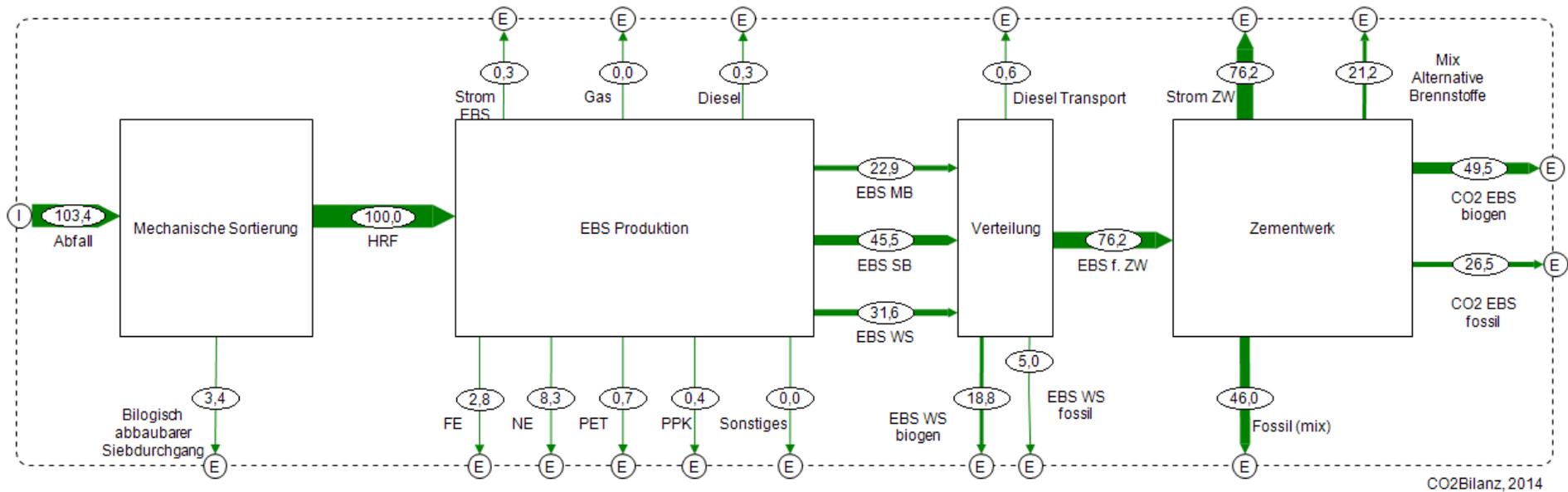


Abbildung 39: CO₂-Äq-Bilanz mit theoretischen Daten für das System EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) bezogen auf 1.000 kg HRF (Angaben in Prozent)

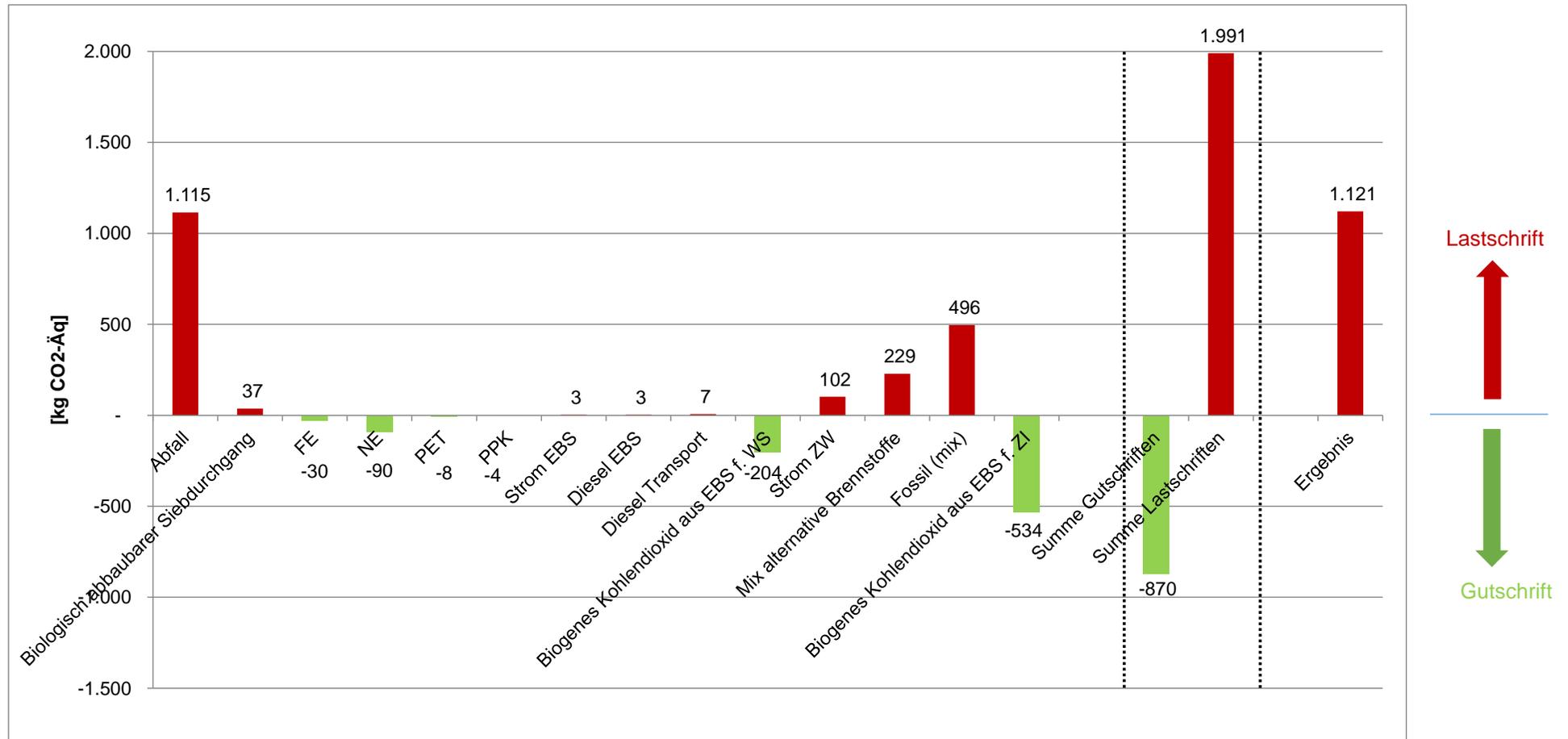


Abbildung 40: Theoretische Auswertung (Gut- und Lastschriften) der CO₂-Äq-Bilanz für das System EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) bezogen auf 1.000 kg HRF

6.3 Gegenüberstellung SG 1 + 2 zu SG Ref.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse aus den verschiedenen Bilanzen des SG 1 + 2 mit dem SG Ref. verglichen.

6.3.1 Massenbilanz-Gegenüberstellung SG 1 + 2 zu SG Ref.

Aufbauend auf den Ergebnissen im Kapitel 6.2.1 werden die Massen für das Referenzsystem dargestellt. Dabei wird abhängig von der Masse an EBS, welches in das Zementwerk importiert wird, die Masse berechnet, welche notwendig wäre, für ein rein mit konventionellen Brennstoffen betriebenes Zementwerk. Dafür wird der Energieinhalt, der in dem EBS steckt, vom fossilen Brennstoff ersetzt. Durch die höheren Energieinhalte in den fossilen Brennstoffen (siehe Tabelle 27 und Abbildung 41) verringert sich die Masse, mit der das Zementwerk beliefert wird, um 23,6 %. Aus der Tabelle 40 lässt sich auch noch erkennen, dass die Massen für Rohmehl und Klinker für das jeweilige Szenario unverändert bleiben. Dies beruht auf demselben Energieeintrag in beiden Systemen.

Tabelle 40: „Massenbilanz“ für das EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) und das Referenzsystem (SG Ref.) bezogen auf 1.000 kg HRF

	1.000 kg HRF (SG 1 + 2)	SG Ref.	Veränderung
	[kg]	[kg]	[%]
EBS f. ZW	616		
Mix alternative Brennstoffe	117		
Fossil (Mix)	196	710	
Summe	929	710	-23,6

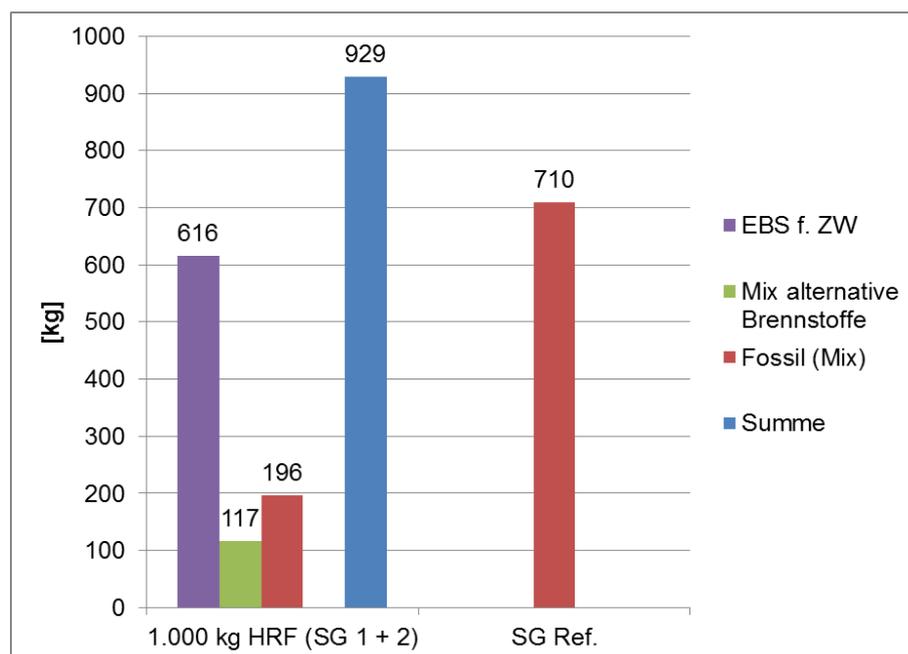


Abbildung 41: „Massenbilanz“ für das EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) und das Referenzsystem (SG Ref.) bezogen auf 1.000 kg HRF

6.3.2 Energiebilanz-Gegenüberstellung SG 1 + 2 zu SG Ref.

Im nun beschriebenen Referenzsystem wird der gesamte benötigte Energieinhalt durch den Einsatz fossiler Brennstoffe (d.h. Steinkohle, Braunkohle, Petrolkoks) zur Verfügung gestellt. Das Referenzsystem mit dazugehörigen Daten für die Energiebilanz, ist in der Abbildung 42 als Sankey-Diagramm dargestellt.

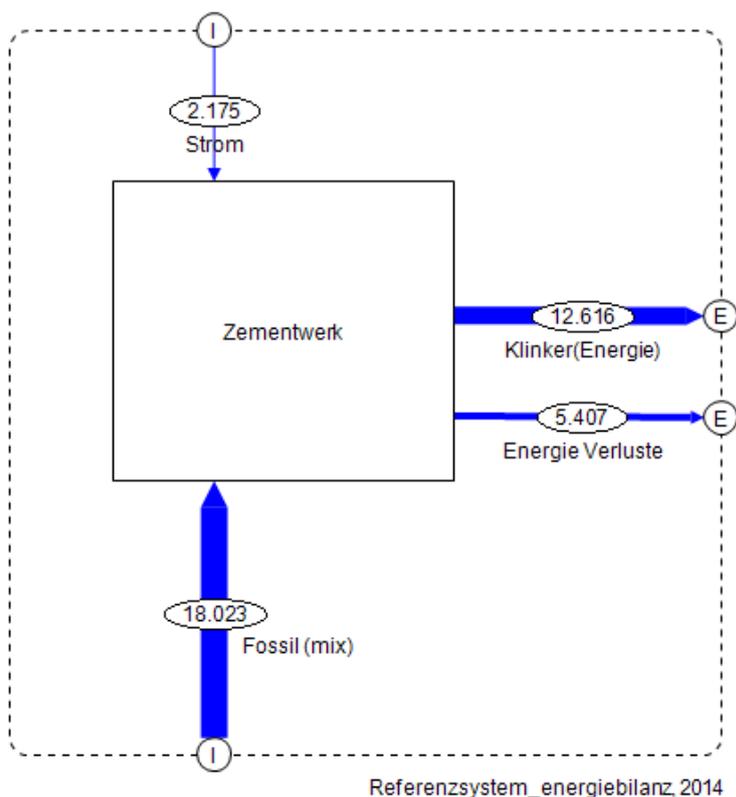


Abbildung 42: „Energiebilanz“ für das Referenzsystem (energetisch bezogen auf 1.000 kg HRF) (Angaben in MJ)

Für den Vergleich beider Systeme, d.h. SG 1 + 2 mit SG Ref. sind die Summen aus den jeweiligen Gut- und Lastschriften in der Abbildung 43 dargestellt.

Der Gesamtenergieaufwand im EBS-Gesamtsystem, welcher 24.145 MJ beträgt, wird durch die Gutschriften um 29 % auf 17.069 MJ gesenkt. Im Referenzsystem werden keine Gutschriften generiert. Der Vergleich beider Systeme zeigt, dass die Energiebilanz beim EBS-Gesamtsystem um ca. 3.129 MJ niedriger ist als im Referenzsystem. Die Gesamtersparnis vom SG 1 + 2 gegenüber dem SG Ref. beträgt 15 %.

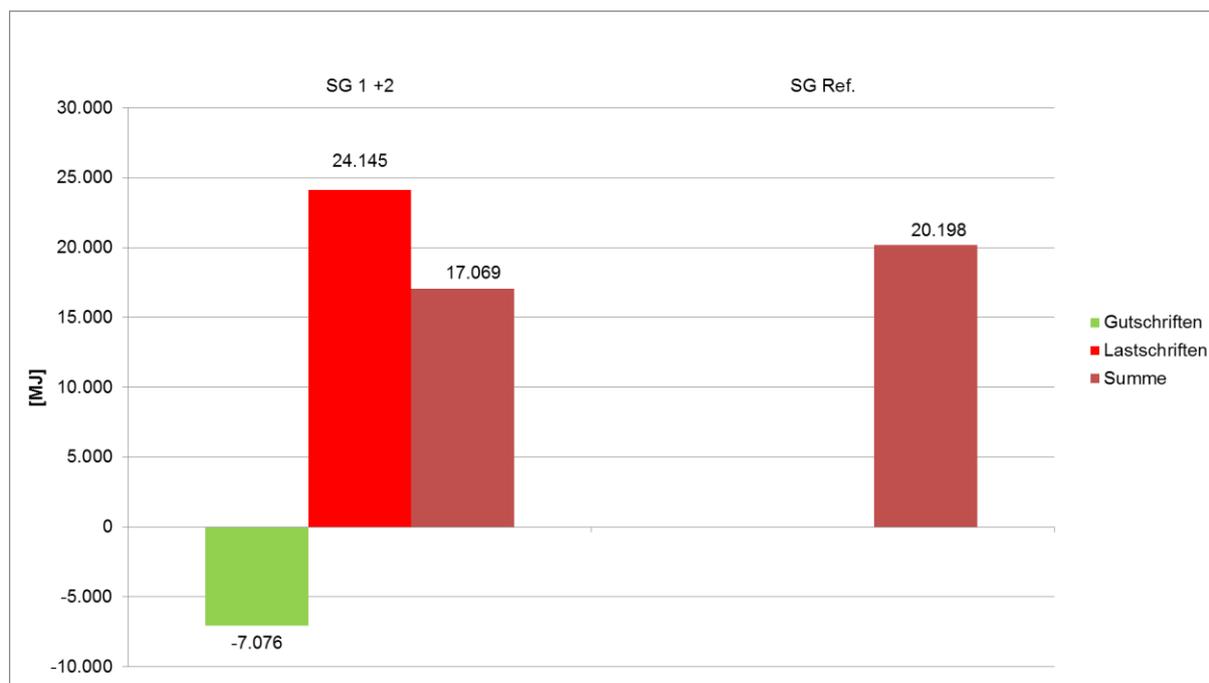


Abbildung 43: „Energiebilanz“ für das EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) und das Referenzsystem (SG Ref.) (energetisch bezogen auf 1.000 kg HRF) (Angaben in MJ)

6.3.3 CO₂-Äq-Bilanz -Gegenüberstellung SG 1 + 2 zu SG Ref.

In der Abbildung 44 ist das Referenzsystem abgebildet. Gegenüber dem Gesamtsystem (SG 1 + 2) ergibt sich ein niedrigerer Stromverbrauch. Dieser begründet sich mit der Verringerung der Massen, welche durch das Zementwerk transportiert werden. Der niedrigere Stromverbrauch wirkt sich ebenfalls in den Emissionen positiv aus. Insgesamt ergeben sich im Referenzsystem 1.871 kg an CO₂-Äq-Emissionen.

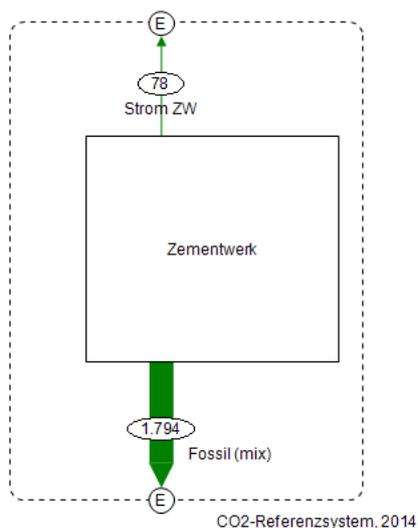


Abbildung 44: „CO₂-Äq-Bilanz“ für Referenzsystem (bezogen auf 1.000 kg HRF) (Angaben in kg CO₂-Äq)

Der zusammenfassende Vergleich der CO₂-Äq-Emissionen aus dem EBS-Gesamtsystem und dem Referenzsystem ist in der nachfolgenden Abbildung 45 dargestellt. Im Vergleich des EBS-Gesamtsystems zum Referenzsystem können 40 % an Emissionen eingespart werden.

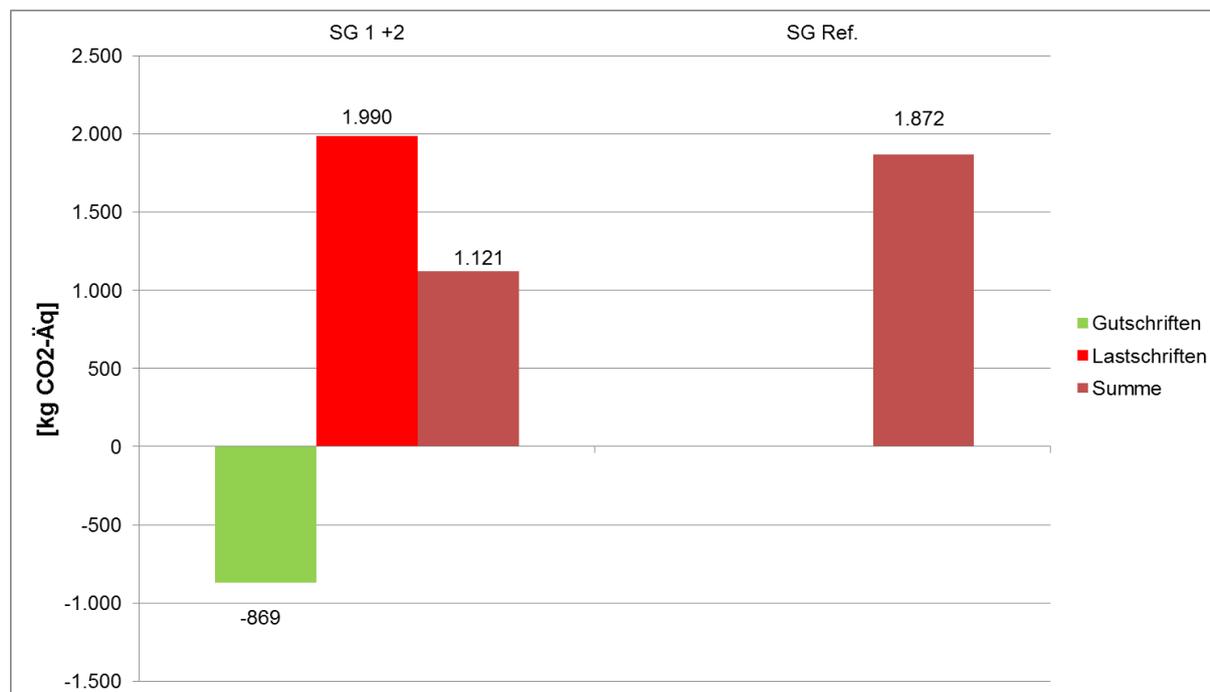


Abbildung 45: „CO₂-Äq-Bilanz“ für das EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) und das Referenzsystem (SG Ref.) (bezogen auf 1.000 kg HRF) (Angaben in kg CO₂-Äq)

6.4 Sensitivitätsanalyse

Zur Überprüfung des erstellten Systems und zur Analyse der Belastbarkeit der Ergebnisse wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei werden vier Szenarien definiert und die dazugehörigen Parameter verändert. Die Einflüsse dieser Änderungen auf alle Systeme (SG 1, SG 1 + 2 und SG Ref.) werden anhand von Gegenüberstellungen zum unveränderten System grafisch verdeutlicht. Die Szenarien lauten wie folgt:

- 1) Verdoppelung der aus der EBS-Produktion aussortierten Wertstoffe bzw. keine Ausschleusung von Wertstoffen,
- 2) Erhöhung des ausgeschleusten „Biologisch abbaubarer Siebdurchgang“,
- 3) Veränderung der Massenverteilung an EBS im Prozess „Verteilung“ (Zusammenhang zw. EBS f. ZW und EBS f. WS),

- 4) Veränderung der thermischen Substitutionsrate im Zementwerk (konventionelle Energieträger (KET):Ersatzbrennstoffe (EBS)).

Bei allen vier Szenarien werden die Daten auf 1.000 kg HRF bezogen.

6.4.1 Verdoppelung der aussortierten Wertstoffe bzw. keine Ausschleusung von Wertstoffen

Die Veränderungen (sowohl Verdoppelung (Szenario 1a) als auch keine Ausschleusung(Szenario 1b)) für das erste Szenario in der Sensitivitätsanalyse sind in Tabelle 41 dargestellt. Als erstes wird hier die Verdoppelung (d.h. Szenario 1a) der in der EBS-Produktion aussortierten Wertstoffe untersucht. Als zweites wird keine Ausschleusung von Wertstoffen (d.h. Szenario 1b) betrachtet. In beiden Fällen werden die Daten der Basis, d.h. dem Ausgangsszenario, welches im Kapitel 6.1 beschrieben wurde, gegenübergestellt und diskutiert.

Tabelle 41: Daten für das Szenario 1a) „Verdoppelung“ und Szenario 1b) „keine Ausschleusung“ von Wertstoffen

	Basis	Szenario 1a	Szenario 1b
	[%]	[%]	[%]
FE	2,5	5,0	0
NE	1,0	2,0	0
PET	1,0	2,0	0
PPK	1,0	2,0	0
Sonstiges	6,5	6,5	6,5

Die Verdoppelung der aussortierten Wertstoffe wirkt sich vor allem in der Summe der Gutschriften (sowohl in der Energie- als auch in der CO₂-Äq-Bilanz) positiv aus. Im System SG 1 werden 5 % mehr Energiegutschriften generiert, und im SG 1 + 2 zeigt sich ein Zuwachs von 18,1 %. Es lässt sich daraus schließen, dass eine sorgfältige Aussortierung dieser Stoffe für das Energiebilanzsystem ein wesentliches Kriterium ist. Im Vergleich SG 1 + 2 zu SG Ref. zeigt sich auch eine Erhöhung der Energieersparnisse. Diese steigen von - 15,4 % auf - 23,5 %. Die Änderung der Lastschriften im SG Ref. bei Szenario 1 im Vergleich zu dem Basisszenario ist damit zu erklären, dass mit der Verdoppelung, der aussortierten Wertstoffe eine Verringerung der produzierten EBS-Menge verbunden ist. Da SG Ref. und SG 1 + 2 immer auf den gleichen Energieeintrag in das Zementwerk bezogen sein müssen, werden auch SG Ref. Daten geändert. Die zusammengefassten Ergebnisse sind in Abbildung 46 dargestellt.

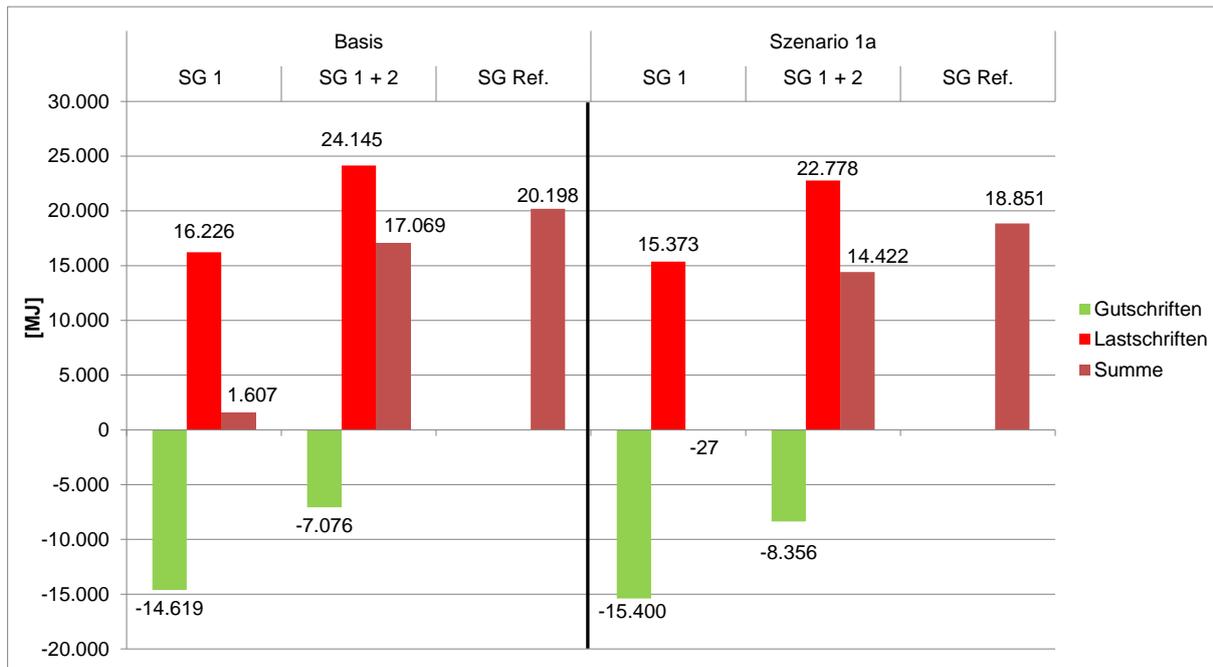


Abbildung 46: Szenario 1a: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die Energiebilanz (Angaben in MJ)

Bei der Betrachtung der CO₂-Äq-Bilanz zeigen sich ähnliche Ergebnisse. Durch den höheren Anteil an aussortierten Wertstoffen kann in der EBS-Produktion (SG 1) der Wert an Gutschriften um 8,7 % erhöht werden. Beim Vergleich SG 1 + 2 mit SG Ref. zeigt sich ebenfalls eine Erhöhung der Einsparungen, diese beträgt 7,7 %. Die zusammengefassten Ergebnisse sind in Abbildung 47 dargestellt.

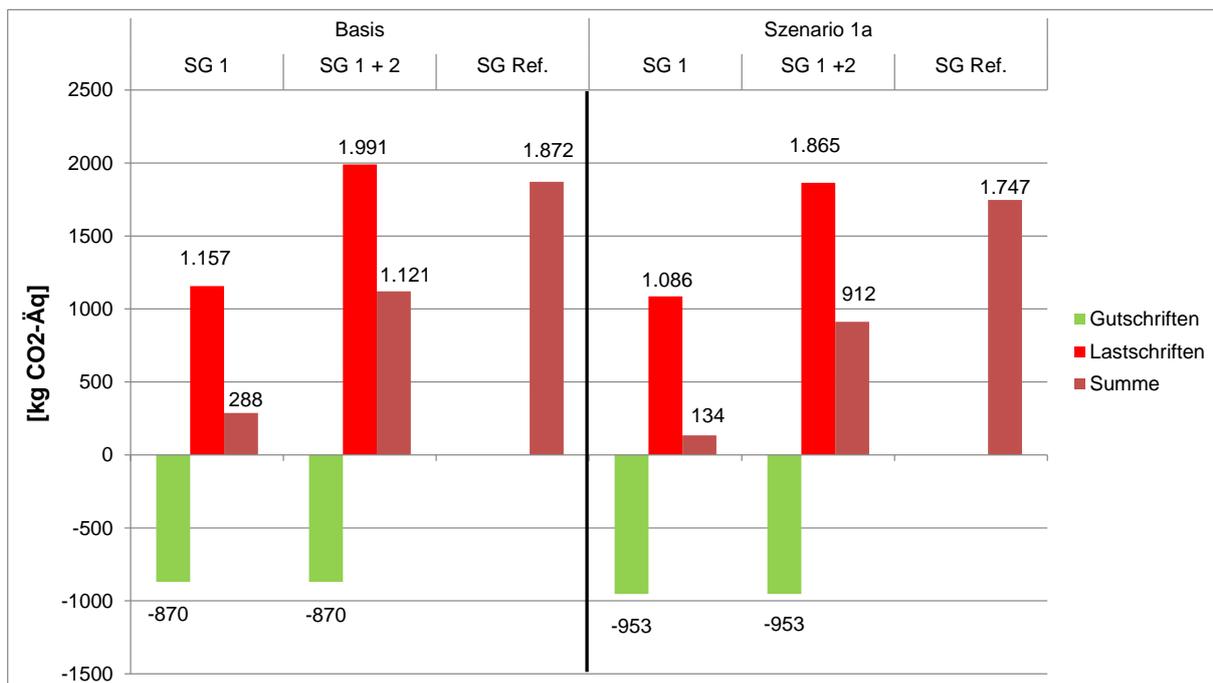


Abbildung 47: Szenario 1a: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die CO₂-Äq-Bilanz (Angaben in kg CO₂-Äq)

Betrachtet man den zweiten Teil des ersten Szenarios, d.h. keine Ausschleusung von Wertstoffen, wird sofort ersichtlich, dass sich die Gutschriften (in beiden Bilanzen) verringern. Dieses Ergebnis war auch zu erwarten, weil, wie bereits mehrmals angeführt, für die betrachteten Wertstoffe das Recycling Vorteile bzw. Einsparungen aufweist. In der energetischen Gesamtbewertung (vgl. Szenario 1b, Abbildung 48), d.h. im direkten Vergleich SG Ref. zu SG 1 + 2 ergibt sich weiterhin eine Gesamteinsparung von rd. 8,5 %.

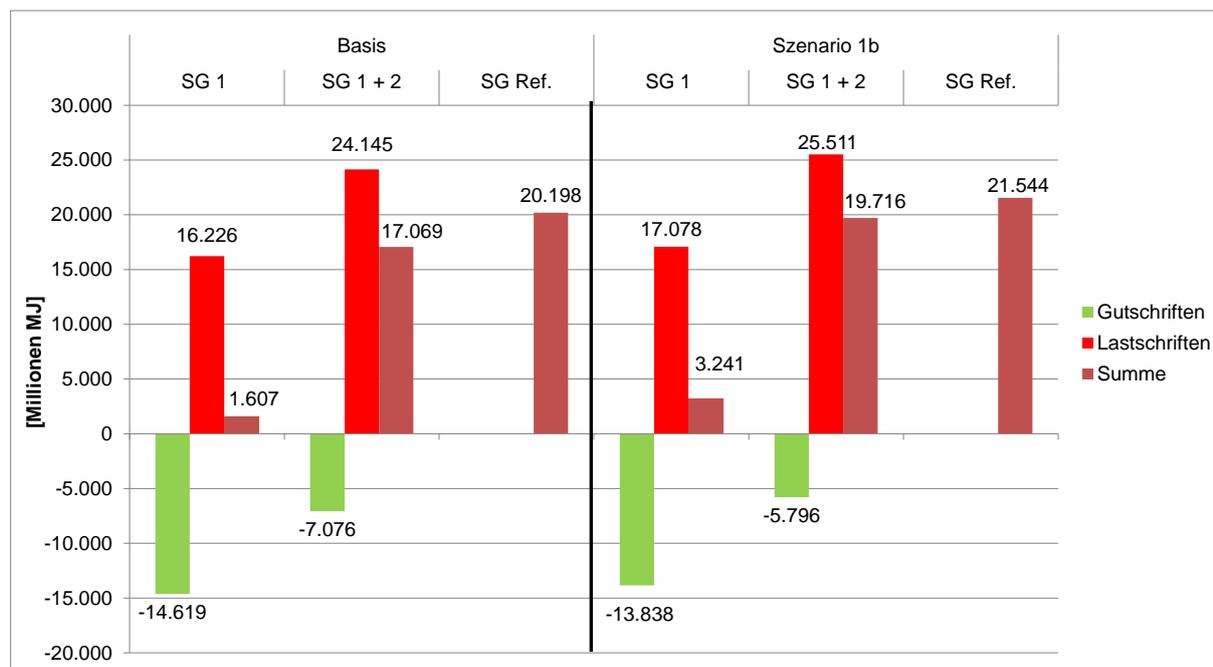


Abbildung 48: Szenario 1b: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die Energiebilanz (Angaben in MJ)

Wie aus der nachfolgenden Abbildung 49 ersichtlich, betragen die Gesamteinsparungen (vgl. SG Ref. mit SG 1 + 2) im Basisszenario rd. 40 %. Im Szenario 1b werden diese Einsparungen zwar geringer, betragen aber trotzdem noch rd. 33%.

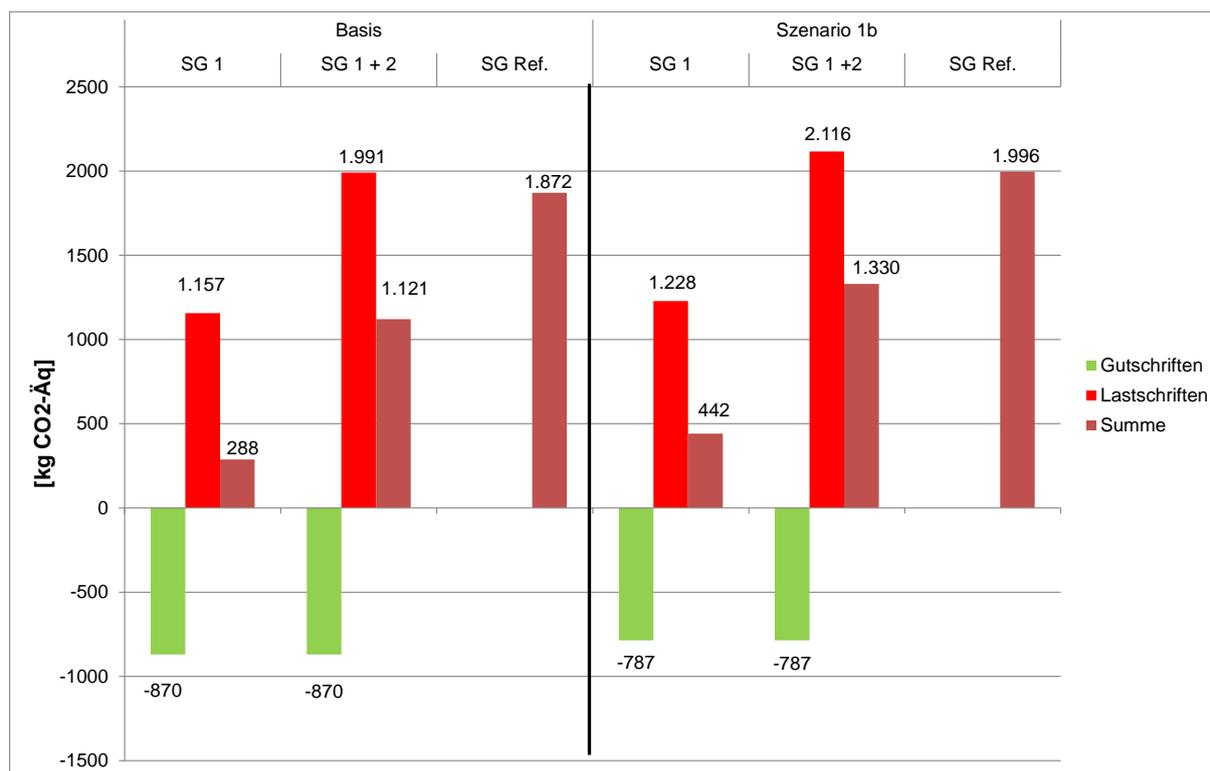


Abbildung 49: Szenario 1b: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die CO₂-Äq-Bilanz (Angaben in kg CO₂-Äq)

Abschließend kann für beide Veränderungen im Szenario 1 festgehalten werden, dass die Ausschleusung von Wertstoffen, die in der österreichischen Abfallwirtschaftspraxis auch umgesetzt wird, einen positiven Beitrag sowohl aus energetischer als auch treibhausgasrelevanter Sicht leistet. Da das Ziel der in dieser Arbeit betrachteten Abfallaufbereitungs- und EBS Produktionsanlagen die Herstellung von qualitätsgesicherten Ersatzbrennstoffen ist, sind und müssen die gewonnenen EBS positiv, d.h. als Gutschriften im Gesamtsystem bewertet werden. Bis wann die EBS als Gutschriften zu bewerten sind, hängt primär aus energetischer Sicht mit dem Energiegehalt, d.h. Heizwert eng zusammen, und zwar:

Ersatzbrennstoffe müssen einen Heizwert von mindestens 12 MJ/kg_{OS} bzw. 14 MJ/kg_{DM} aufweisen.

Im Fall, dass EBS einen geringeren Heizwert als o.a. aufweisen, ist einerseits deren Einsatzmöglichkeit in der Zementindustrie fraglich und andererseits bezogen auf die vorgestellten Daten das SG 1 + 2 würde keine Vorteile aus energetischer Sicht im Vgl. zu SG. Ref. ergeben (Anmerkung: unter dem Aspekt, dass keine Ausschleusung von Wertstoffen stattfindet).

6.4.2 Erhöhung des ausgeschleusten „Biologisch abbaubarer Siebdurchgang“

Als Szenario 2 wird eine Erhöhung des Siebdurchgangs (BS) untersucht. Dieser wird von 20 auf 50 % erhöht.

Tabelle 42: Erhöhung des ausgeschleusten „Biologisch abbaubarer Siebdurchgang“

	Basis	Szenario 2
	[%]	[%]
Heizwertreiche Fraktion	80	50
Biologisch abbaubarer Siebdurchgang	20	50

Die Erhöhung der Abtrennung vom „Biologisch abbaubarer Siebdurchgang“ verringert alle nachfolgenden Massenströme. Dies führt zu einer Verringerung der Gutschriften (generiert aus den aussortierten Wertstoffen) um 37,5 %. Der Energieinhalt des „Biologisch abbaubaren Siebdurchgang“, welcher als Lastschrift bilanziert wird, erhöht sich um 150 %. Daraus ergibt sich beim SG 1 die Erhöhung der Summe (d.h. Gutschriften minus Lastschriften) um 330 %.

Bei der Betrachtung des EBS-Gesamtsystems (SG 1 + 2) zeigen sich dieselben Entwicklungen. Da in weiterer Folge weniger Masse an EBS in die Wirbelschichtanlage kommt wird auch diese Gutschrift geringer. Dasselbe gilt für den Stoffstrom „Mix alternative Brennstoffe“. Die Summe der Lastschriften verringert sich jedoch nur um 13 % auf 16.605 MJ. Der Vergleich SG 1 + 2 mit dem SG Ref. zeigt im Szenario 2, dass die „Summe“ für SG Ref. um 24 % geringer ist als die „Summe“ für SG 1 + 2. Somit wäre ein Betrieb mit fossilen Brennstoffen in diesem Fall (d.h. aus energetischer Sicht) sinnvoller. Daraus ergibt sich, dass für das erstellte System eine bestimmte Menge (d.h. Energieinhalt) an EBS erzeugt werden muss, damit sich der Gesamtaufwand positiv bewerten lässt. Dabei zeigen die beiden „Summen“ von SG Ref (Szenario 2 im Vergleich zu Basis) eine Verringerung vom Energieeintrag (- 37,5 %) in das Zementwerk. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in Abbildung 50 zusammengefasst dargestellt.

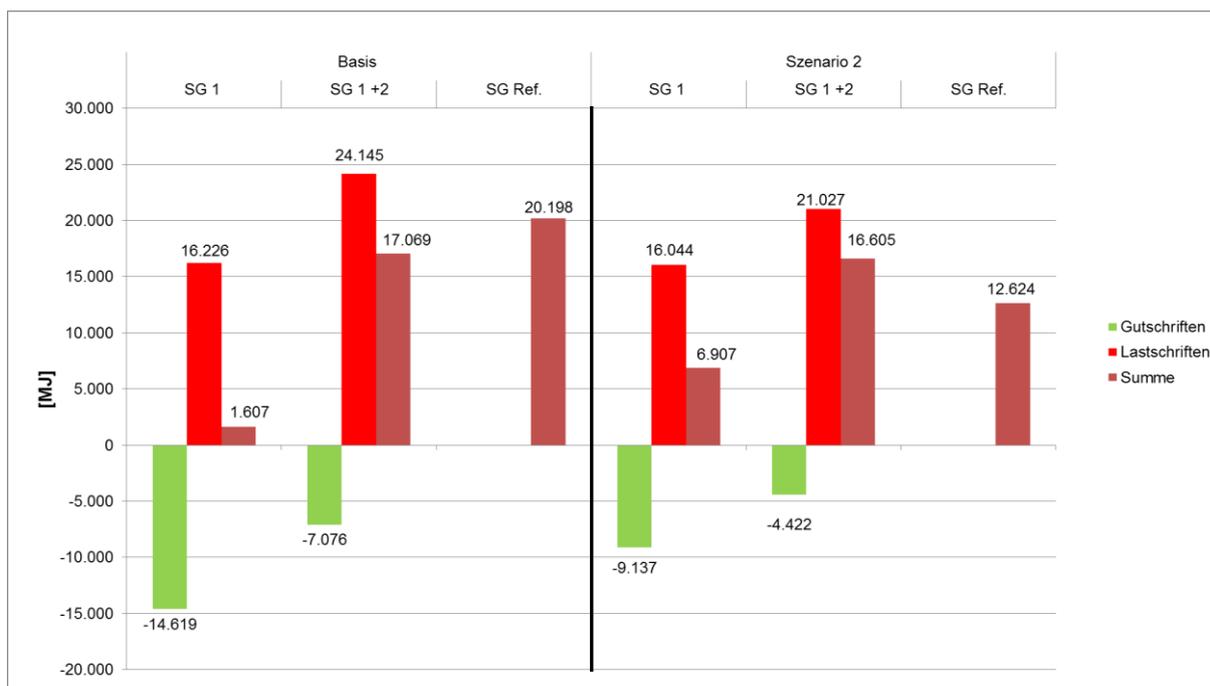


Abbildung 50: Szenario 2: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die Energiebilanz (Angaben in MJ)

Bei der CO₂-Äq-Bilanz verringern sich ebenfalls die Gutschriften wegen der geringeren Massenströme. Beim Vergleich beider Szenarien für das EBS-Gesamtsystems zeigt sich die Verringerung der Lastschriften im Szenario 2, da weniger Masse durch das System transportiert wird. Beim Vergleich SG 1 + 2 mit SG Ref. zeigt sich, dass ein Einsatz von Ersatzbrennstoffen emissionsverringern wirkt. Der Vergleich Basis (d.h. „Summe“ SG 1 + 2 „Summe“) zu SG Ref. zeigt eine Einsparung von 40 %. Derselbe Vergleich beim Szenario 2 (d.h. „Summe“ SG 1 + 2 mit „Summe“ SG Ref.) zeigt eine Einsparung von 28 % der Emissionen. Die zusammenfassenden Ergebnisse sind in Abbildung 51 dargestellt.

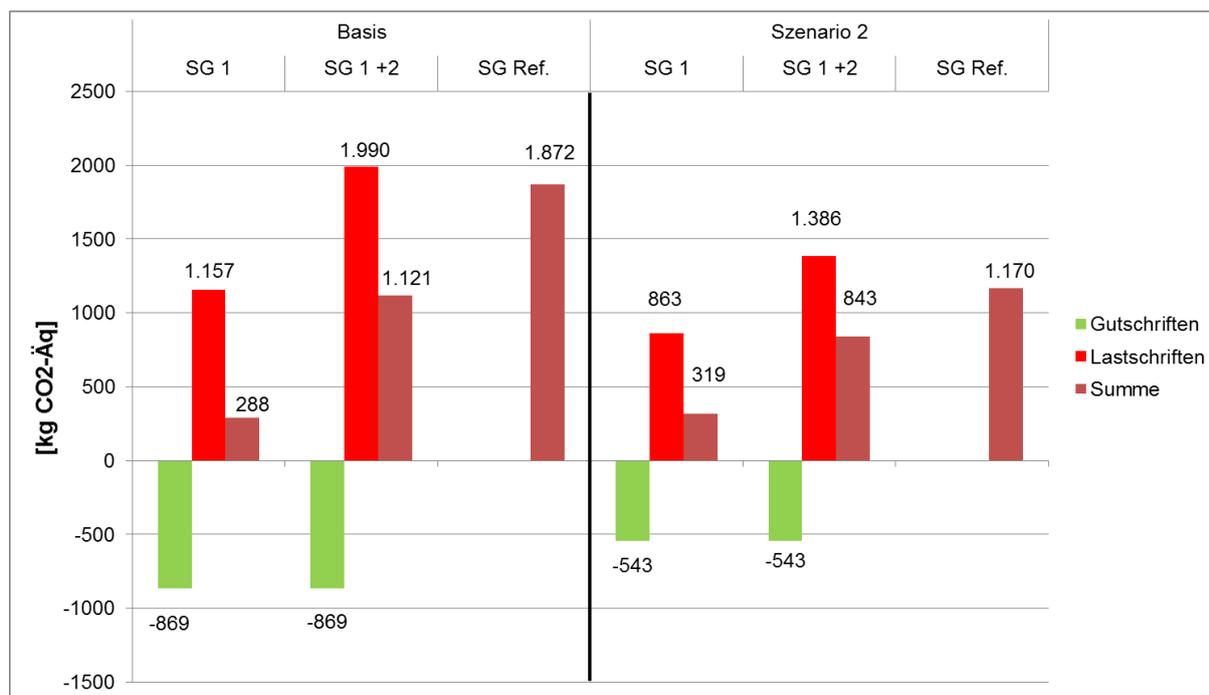


Abbildung 51: Szenario 2: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die CO₂-Äq-Bilanz (Angaben in kg CO₂-Äq)

6.4.3 Veränderung der Massenverteilung im Prozess „Verteilung“

Im Szenario 3 wird die Veränderung der Massenverteilung im Prozess „Verteilung“, wie in der Tabelle 43 dargestellt, vollzogen.

Tabelle 43: Veränderung der Massenverteilung im Prozess „Verteilung“

	Basis	Szenario 3
	[%]	[%]
EBS f. Zementwerk	70,0	50,0
EBS für WS	30,0	50,0

Szenario 3 hat auf SG 1 keine Einwirkung, da die Verteilung der produzierten EBS erst nach dem SG 1, d.h. außerhalb der Systemgrenze geschieht. Wird im Prozess „Verteilung“ der EBS-Anteil, welcher in das ZW gelangt verringert, verringern sich damit die Werte für die SG Ref. Da weniger Energie in das Zementwerk gelangt, wird auch im EBS-Referenzsystem weniger Energie benötigt. In diesem Fall verringern sich die Werte um 25 %. Beim SG 1 + 2 (vgl. Szenario 3 zu Basis) erhöhen sich die Gutschriften und führen damit zu einer Verringerung der „Summe“ um 17 %. Dies geschieht, da im erstellten System die Verwertung in Wirbelschichtanlagen keine Beimengung von fossilen Energieträgern benötigt.

Beim Vergleich SG 1 + 2 mit SG Ref. zeigt sich beim Basisszenario eine Energieeinsparung von 15 % zu Gunsten des EBS-Gesamtsystems. Bei der Aufteilung WS/ZW = 50/50 sinkt dieser Wert auf 6,9 %. Es zeigt sich also, dass mit einer Verringerung der gelieferten Energie in das ZW auch weniger Energie im Verhältnis zu einem mit fossilen Brennstoffen befeuerten Zementwerk eingespart werden kann. Dies ist im Gesamten nochmals in Abbildung 52 dargestellt.

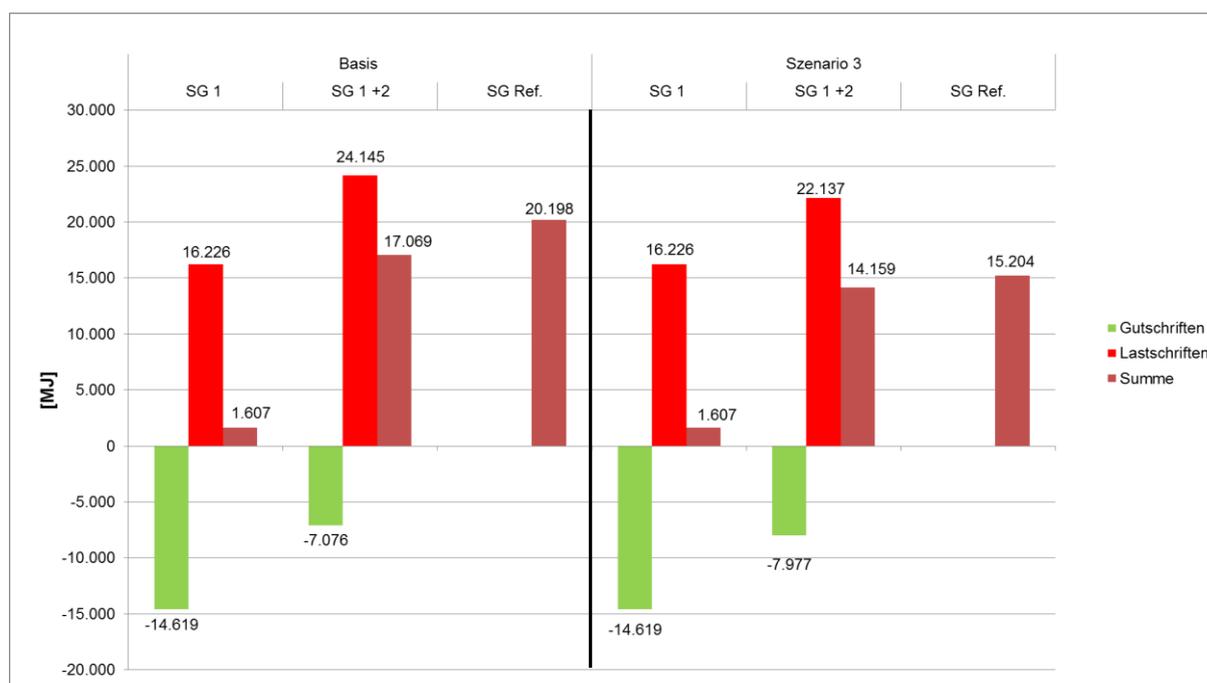


Abbildung 52: Szenario 3: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die Energiebilanz (Angaben in MJ)

Bei der Betrachtung der CO₂-Äq-Bilanz ist wie bei der Energiebilanz keine Änderung in der SG 1 festzustellen. Im SG 1 + 2 verringern sich die Gesamtemissionen gleich wie bei der SG Ref. Die Einsparungen im direkten Vergleich dieser zwei SG (d.h. SG 1 + 2 / SG Ref.) verringern sich um 5 %. Somit zeigt sich zwar eine geringere Gesamtbelastung (im Szenario 3) aus SG 1 + 2, jedoch geringere Einsparung im Vergleich zum Referenzsystem. Die Ergebnisse und Werte sind in Abbildung 53 dargestellt.

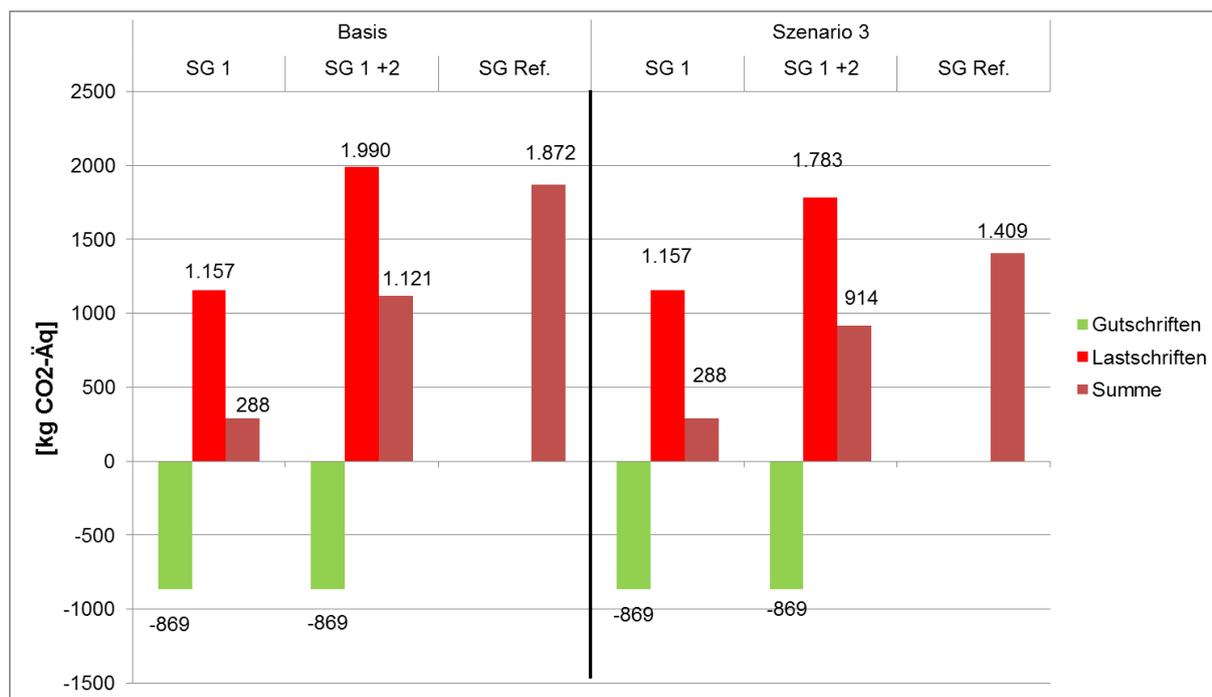


Abbildung 53: Szenario 3: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die CO₂-Äq-Bilanz (Angaben in kg CO₂-Äq)

6.4.4 Veränderung der thermischen Substitutionsrate im Zementwerk (KET:EBS)

Im Szenario 4 wird die Veränderung der thermischen Substitutionsrate im Zementwerk betrachtet (vgl. Tabelle 44)

Tabelle 44: Veränderung der thermischen Substitutionsrate im Zementwerk (KET:EBS)

	Basis	Szenario 4
	[%]	[%]
KET	27,6	20,0
EBS	72,4	80,0

Szenario 4 hat auf SG 1 keine Einwirkung, da die Substitutionsrate nur das Verhältnis von Ersatzbrennstoffen zu den konventionellen Energieträgern –KET– (Fossil (Mix) im Zementwerk festlegt. Für das EBS Gesamtsystem SG 1 + 2 zeigt sich, dass die Lastschriften um 8 % geringer werden. Dies resultiert aus der geringeren Menge an Fossil (Mix), welcher im Zementwerk beigemischt wird. Der Vergleich des EBS-Gesamtsystems mit SG Ref im Szenario 4 zeigt, dass die Einsparungen mit 17,1 % um 1,6 % höher sind als in der Basisbetrachtung. Es zeigt sich, dass eine Erhöhung der thermischen EBS-Substitutionsrate eine Einsparung bei den Energiebetrachtungen nach sich zieht. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 54 zusammengefasst.

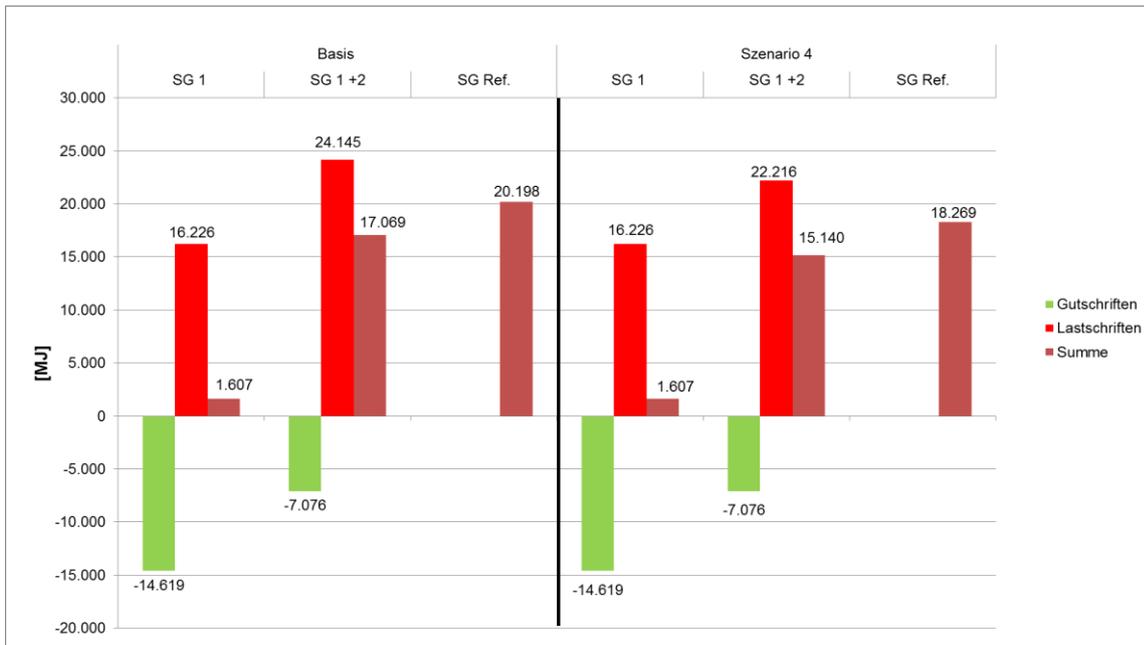


Abbildung 54: Szenario 4: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die Energiebilanz (Angaben in MJ)

Bei der Betrachtung der CO₂-Äq-Bilanz ist wie bei der Energiebilanz keine Änderung im SG 1 festzustellen. Im SG 1 + 2 verringern sich die Emissionen ebenso wie im SG Ref.. Der Vergleich zwischen SG 1 + 2 und SG Ref. zeigt beim Basisszenario eine Emissionseinsparung von 40,1 %, diese steigt im Szenario 4 auf 44,4 %. Somit zeigt sich, dass die Erhöhung von EBS im Zementwerk einen großen Beitrag zur Verringerung der Emissionen darstellt. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 55 zusammenfassend dargestellt.

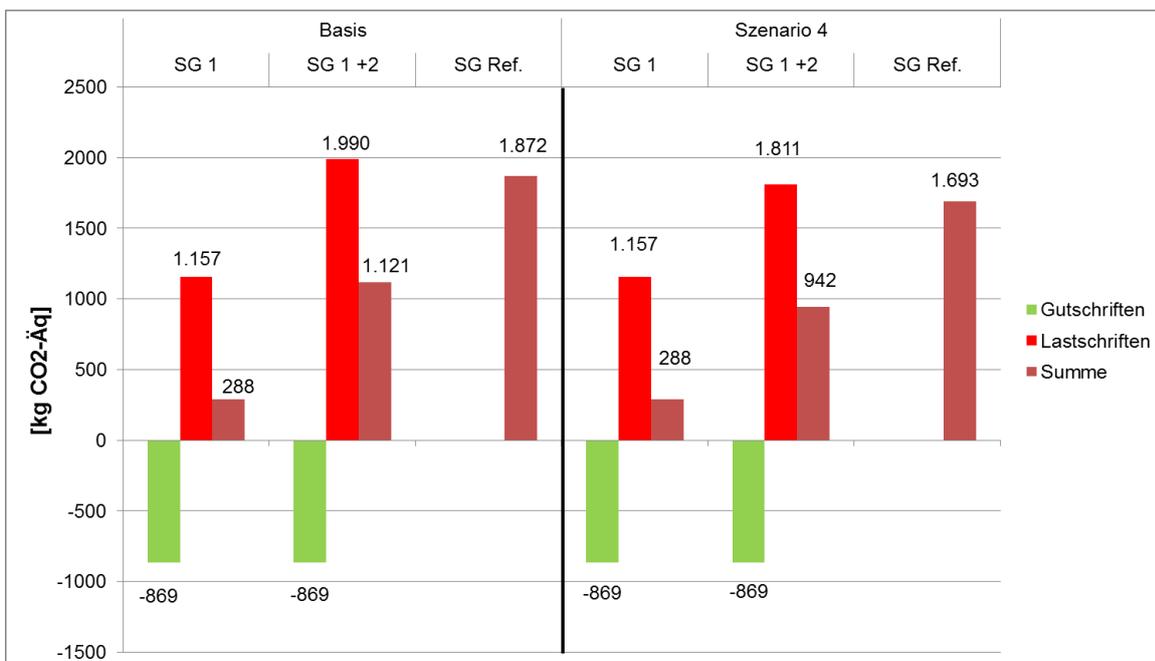


Abbildung 55: Szenario 4: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die CO₂-Äq-Bilanz (Angaben in kg CO₂-Äq)

7 Zusammenfassung

Im Jahr 2010 wurde das Nachfolgedokument der Lissabon-Strategie, EUROPA 2020 von der Europäischen Kommission unterzeichnet. Dabei sollen mit strukturpolitischen Maßnahmen die Europäische Union wirtschaftlich, sozial und ökologisch gestärkt werden. Vor dem Hintergrund der zu erwartenden klima- und energiepolitischen Herausforderungen werden Maßnahmen in diesen Politikbereichen forciert; d.h. Versorgungssicherheit, Energieeffizienz, Energiesparen, wirtschaftlich sinnvoller Einsatz von effizienten, erneuerbaren Energien und weitere Kyotomechanismen sind die Prioritäten zum Klimaschutz. Um verstärkt auf die Bedeutung der Energieeffizienz hinzuweisen, wurde die neue EU-Energieeffizienzrichtlinie veröffentlicht. Im Sommer 2014 wurde diese Richtlinie mit dem Bundes-Energieeffizienzgesetz – EEEffG ins nationale Recht eingegliedert.

Für die EBS-Hersteller bedeutet dies, dass sie bei der abfallwirtschaftlichen Weiterentwicklung unterschiedlichste Maßnahmen zu setzen haben, um die Energieeffizienz hinsichtlich der Behandlungsschritte bei der Erzeugung der EBS-Fraktionen zu steigern. Daraus resultiert dass die Qualität der Fraktionen überprüft und auf unterschiedliche Kriterien (z.B. Energiedichte inklusive Heizwert, fossiler Anteil, biogener Anteil, Emissionsfaktoren usw.) bewertet werden muss. Der Rahmen dafür wird in der Abfallverbrennungsverordnung beschrieben. In dieser wird der rechtlichen Rahmen (Mindestkriterien) und Qualitätskriterien für EBS vor deren Einsatz in der Mitverbrennung festgelegt. Hierbei werden jedoch keine gesamtheitlichen Betrachtungen (d.h. Qualitätsänderungen, Marktlage usw.) miteinbezogen.

Für eine gesamtheitliche Betrachtung wird im Kapitel 4 der gegenständlichen Arbeit ein Gesamtsystem beschrieben welches von der Produktion bis zur Verwertung den gesamten EBS-Weg darstellt. Dabei wird im System 1 (SG 1) die Aufbereitung des Abfalls (Input in die EBS-Produktion) zum EBS beschrieben und als EBS-Produktion bezeichnet. Das System 2 (SG 2) beinhaltet den Prozess „Verteilung“ (d.h. Transport zum Zementwerk bzw. Wirbelschichtanlage), des im SG 1 erzeugten EBS. Die Bezeichnung des Systems lautet EBS-Verwertung. Der produzierte EBS wird in Bezug auf die weiteren Verwertungsmöglichkeiten, die stark vom Heizwert und von der Korngröße abhängen, in drei Kategorien eingeteilt, und zwar in EBS Main Burner (MB), EBS Sekundärbrenner (SB) und EBS Wirbelschicht (WS). Diese drei Fraktionen werden im System 2, zur Verwertung im Zementwerk oder in einer Wirbelschichtanlage, transportiert. Die Systemgrenzen 1 und 2 werden für die Bewertung zu einem EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) zusammengefasst. Dieses System dient als Basis zur Ermittlung von ressourcen-, energie-, umwelt- und qualitätsrelevanten Aspekten. Für die Bewertung der Ergebnisse, aus SG 1 + 2, wurde ein Referenzsystem erstellt. Darin wird ein Zementwerk beschrieben, das nur mit konventionellen Energieträgern (d.h. Steinkohle, Braunkohle und Petrolkoks; thermische Substitutionsrate = 0 %) betrieben wird. Diese Systeme (d.h. SG 1, SG 2, SG 1 + 2 und SG Ref.) wurden für drei verschiedene Bilanzen (Massen-, Energie- und CO₂-Äquivalenz-Bilanz) verwendet.

Es wurde ausgehend von den erstellten System (SG 1, SG 1 + 2 und SG Ref.) eine theoretische Berechnung durchgeführt. Dabei wurden zwei unterschiedliche Szenarien

angenommen, im Szenario 1 wurde der Abfall Input mit 100 % angesetzt und alle restlichen Flüsse darauf bezogen, im Szenario 2 wurde der Fluss „heizwertreiche Fraktion“ HRF mit 100 % angesetzt. Dies soll zwei österreichische Anlagentypen beschreiben, zum einen Anlagen welche u.a. nichtaufbereitete Abfälle annehmen und behandeln und beim ersten Klassierverfahren (d.h. Sortieren) den biologischen Anteil des Abfalls (hier als „Biologisch abbaubarer Siebdurchgang (BS)“) abtrennen und zum anderen Anlagen, die dieses Klassierverfahren und die Abtrennung von „BS“ nicht haben. Zur Überprüfung des erstellten Systems wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei wurden vier verschiedene Szenarien angenommen (Verdoppelung der aussortierten Wertstoffe bzw. keine Ausschleusung von Wertstoffen, Erhöhung des ausgeschleusten „BS“, Veränderung der Massenverteilung, Veränderung der thermischen Substitutionsrate) und berechnet. Anhand der Ergebnisse wurde das erstellte System auf Plausibilität überprüft.

Um die Ergebnisse zu visualisieren und auf einen Blick zu identifizieren, wurde in der gegenständlichen Arbeit ein Ausweis erstellt, welcher alle Ergebnisse berücksichtigt und widerspiegelt. Dies wird mithilfe der Indikatoren Energiebarwert, Treibhausgaseffekt, Schwermetalle, stoffliche Verwertung und biogener Anteil ermöglicht. Der Indikator Energiebarwert stellt die Einsparung (Auswertung in %) vom System „EBS Gesamtsystem (SG 1 + 2)“ im Vergleich zum Referenzsystem (SG Ref.) dar, basierend auf den Energiebilanzen beider Systeme. Der Indikator Treibhausgaseffekt vergleicht dieselben Systeme, bezogen auf entstehende Emissionen. Beide Indikatoren sind anlagenspezifisch. Beim Indikator stoffliche Verwertung handelt es sich zugleich um einen anlagenspezifischen und materialspezifischen Wert. Der Anteil der aussortierten Wertstoffe (FE, NE, PET und PPK) in Prozent von der heizwertreichen Fraktion (HRF) stellt den anlagenspezifischen Teil des Indikators dar. Der prozentuelle Anteil (vom Abfallinput) der Asche (d.h. Aschegehalt), welche durch die EBS MB und SB im Zementwerk in den Klinker eingebunden wird, stellt den materialspezifischen Teil des Indikators dar. Der Indikator Schwermetall liefert Informationen über die Qualität der in der österreichischen Zementindustrie eingesetzten EBS. Der Indikator Biogener Anteil liefert Informationen über den biogenen Anteil des in der österreichischen Zementindustrie eingesetzten EBS. Aus den Ergebnissen (siebenstufige Skala, A-G) dieser fünf Indikatoren wird ein Mittelwert gebildet, dieser stellt das Gesamtergebnis für die Anlage dar.

8 Verzeichnisse

8.1 Literatur

Austrian Standards Institute (2005) *Teil 1 Stoffflussanalyse; Teil 1: Anwendung in der Abfallwirtschaft – Begriffe*, ÖNORM S 2096. Wien: ASI.

Beckmann M, Pohl M, Ncube S (2007) *Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen hinsichtlich brennstofftechnischer Eigenschaften*. In: Thomé-Kozmiensky KJ und Beckmann M Energie aus Abfall, Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Seite 203 – 218. ISBN 978-3-935317-30-6.

Bundeskanzleramt Österreich (2002) *Abfallwirtschaftsgesetz 2002*. Wien: BKAÖE.

Bundeskanzleramt Österreich (2014): *Bundesgesetz über die Steigerung der Energieeffizienz bei Unternehmen und dem Bund (Bundes-Energieeffizienzgesetz – EEffG)*. Wien: BKAÖE.

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2008) *Richtlinie für Ersatzbrennstoffe*. Wien: BMLFUW.

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2009) *Klimarelevanz der Abfallwirtschaft IV*. Wien: BMLFUW

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2010) *Verordnung über die Verbrennung von Abfällen Abfallverbrennungsverordnung – AVV*. Wien: BMLFUW.

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2010a) *Deponieverordnung-DVO*. Wien: BMLFUW.

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2011): *Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2011 – Band 1*. Wien: BMLFUW.

CEMEX (2012) *Gemeinsame Umwelterklärung 2013 Zementwerke Beckum und Rüdersdorf*. Düsseldorf.

CEN EN 15359:2011 (2011) *Solid recovered fuels – specifications and classes*, EN 15359:2011. Brüssel: CEN.

Energie Control GmbH (2013) *Stromkennzeichnungsbericht 2013*. Wien. Online unter: <http://www.e-control.at/de/publikationen/oeko-energie-und-energie-effizienz/berichte/stromkennzeichnungsbericht>.

Europäische Kommission (2010) *Europa 2020 – Eine Strategie für intelligentes nachhaltiges und integratives Wachstum*. Brüssel, 03.03.2010.

- Europäischer Rat (2000) *Schlussfolgerungen des Vorsitzes des Europäischen Rates von Lissabon*. Lissabon, 23 – 24.03.2000.
- Europäisches Parlament (2000) *Richtlinie 2000/76/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Dezember 2000 über die Verbrennung von Abfällen*. Brüssel.
- Europäisches Parlament (2012) *Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz*. Brüssel.
- Europäische Union (2010) *Delegierte Verordnung (EU) Nr. 1060/2010 der Kommission vom 28. September 2010 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Kennzeichnung von Haushaltskühlgeräten in Bezug auf den Energieverbrauch*. Brüssel.
- Farzaneh S (2004) *Modell zur Vorkalkulation von mechanisch-biologischen Restabfallbehandlungsanlagen zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen*; Dissertation. Berlin: Technische Universität Berlin.
- Gütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz (2014) *RAL-GZ 724, Sekundärbrennstoffe aus heizwertreichen Abfällen*. Münster: BGS. Online unter: <http://www.bgs-ev.de>.
- Hollauf B (2009) *Thermische Abfallverwertung, Feuerungsanlagen*. Vorlesung an der Montanuniversität Leoben. Leoben
- IFEU (2006) *Ökologischer Vergleich von Büropapieren in Abhängigkeit vom Faserrohstoff*. Heidelberg.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2006) *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories; Chapter 2, Stationary combustion*. Cambridge: IPCC. Online unter: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) *Climate Change 2007 the physical science Basis*. Cambridge: IPCC. Online unter: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm.
- Kraussler A (2014) *Lastverschiebung in der österreichischen Zementindustrie*. Tagung: 13. Symposium Energieinnovation, Graz, 12 – 14.02.2014.
- Mauschitz G (2014) *Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie, Berichtsjahr 2013*. Wien: Technische Universität Wien.
- Pomberger R (2008) *Entwicklung von Ersatzbrennstoff für das HOTDISC-Verfahren und Analyse der abfallwirtschaftlichen Relevanz*. Dissertation an der Montanuniversität Leoben. Leoben: Montanuniversität Leoben.

- Rößiger D (2008) *Chemische Analyse von Ersatzbrennstoffen*, Diplomarbeit. Glauchau: Staatliche Studienakademie Glauchau.
- Sarc R, Schmidt G, Herzer S, et al. (2014) *Besprechung REUQ*. Leoben
- Sarc R; Lorber KE, Pomberger R, et al. (2014a) *Design, quality, and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry*. In: Waste Management & Research (2014, Vol. 32, Issue 7).
- Schelch M (2007) *Qualitätssicherung bei der thermischen Verwertung von Ersatzbrennstoffen*. Dissertation an der Montanuniversität Leoben. Leoben: Montanuniversität Leoben.
- Schmidt G, Pomberger R, Heigl M (2007) *Keine Fossilen Energieträger für die Zementindustrie mehr – von der Vision zu Verwirklichung*. Tagung: International Conference "Waste Management, Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development, Ljubljana, 28 – 30.08.2007.
- Seyler C (2003) *Ein inputabhängiges Ökoinventar-Modell für die thermische Verwertung von Abfall-Lösungsmittel in der chemisch-pharmazeutischen Industrie*, Dissertation. Zürich: Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich.
- Steiermärkischen Landesregierung (2010): *Landes-Abfallwirtschaftsplan*. Graz.
- Umweltbundesamt (1995) *Behandlung von Abfällen in der Zementindustrie*. Wien.
- Umweltbundesamt (2001) *Mitverbrennung von Klärschlamm in kalorischen Kraftwerken*. Wien.
- Umweltbundesamt (2010) *Klimarelevanz ausgewählter Recycling-Prozesse in Österreich*. Wien.
- Umweltbundesamt (2011) *AVV-Novelle 2010 – Leitfaden zur Umrechnung der Grenzwerte – AVV Leitfaden*. Wien.
- Umweltbundesamt (2011a) *Klimarelevanz und Energieeffizienz der Verwertung Biogener Abfälle*. Wien
- Umweltbundesamt (2013) *ProBas (Projektorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente)*. Dessau-Roßlau.
- Verband Österreichischer Entsorgungsbetriebe (2014) *Betreff: EEffG im Nationalrat beschlossen*. Mail vom 17.09.2014. Leoben: VÖEB.
- Verein deutscher Zementwerke (2007) *Tätigkeitsbericht 2005 – 2007*. Düsseldorf: VDZ.
Online unter: <http://www.vdz->

online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Taetigkeitsbericht07/VDZ_Kap_II.pdf.

Vereinigung der österreichischen Zementindustrie (2014) *Zementerzeugung in Österreich*. Wien: VÖZ. Online unter: <http://www.zement.at/services/archiv/186-zementerzeugung-in-oesterreich>.

World Business Council for Sustainable Development (2011) *CO₂ and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry*. Genf: WBCSD.

8.2 Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
°C	Grad Celsius
a	Jahr
abh.	abhängig
ARR	Abfallrahmenrichtlinie
Äq	Äquivalenz
As	Arsen
AVV	Abfallverbrennungsverordnung
B	Bor
Ba	Barium
Be	Beryllium
BS	Biologischer Siebüberlauf
C	Kohlenstoff
Cd	Cadmium
Cl	Chlor
Co	Kobalt
CO ₂	Kohlendioxid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
d.h.	das heißt
EBS	Ersatzbrennstoffe
etc.	et cetera
F	Flour
H	Wasserstoff
Hg	Quecksilber
HRF	Heizwertreiche Fraktion
KET	Konventionelle Energieträger
kg	Kilogramm
km	Kilometer
l	Liter
MB	Main Burner

MBA	Mechanisch Biologische Aufbereitungsanlage
mg	Milligramm
MJ	Megajoule
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
N	Stickstoff
NE	Nichteisenmetalle
Ni	Nickel
O	Sauerstoff
OS	Originalsubstanz
Pb	Blei
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PET	Polyethylenterephthalat
PPK	Papier Pappe Karton
rd.	Rund
S	Schwefel
SB	sekundär Brenner
Sb	Antimon
Se	Selen
SG	Systemgrenze
SO	Sonstiges
Sz	Szenario
t	Tonne
TC	Total Carbon (Gesamtkohlenstoffgehalt)
TI	Thallium
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
u.a.	Unter anderem
usw.	und so weiter
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
V	Vanadium
v. a.	vor allem
vgl.Vgl.	Vergleiche/Vergleich
WS	Wirbelschicht
z. Z.	zurzeit
Zn	Zink
ZW	Zementwerk
X_B^{TC}	Biogener Anteil des Gesamtkohlenstoffes

8.3 Tabellen

Tabelle 1: Einzelne Daten für die Bestimmung von Klassen A und G für den Indikator Energiebarwert (bezogen auf 1.000 kg HRF)	14
---	----

Tabelle 2: Zusammenfassende Darstellung der Klassen (A-G) mit den dazugehörigen Werten für den Indikator Energiebarwert (Anmerkung: Minus (-) steht für eine Einsparung vom System SG 1 + 2 im Vergleich zum SG Ref.).....	14
Tabelle 3. CO ₂ -Äq-Emissionen für Steinkohle und EBS MB	14
Tabelle 4: Zusammenfassende Darstellung der Klassen (A-G) mit dazugehörigen Werten für den Indikator „Treibhausgaseffekt“ (Anmerkung: Minus (-) steht für eine Einsparung vom System SG 1 + 2 im Vergleich zum SG Ref.)	15
Tabelle 5: Zusammenfassende Darstellung der Klassen (A-G) mit dazugehörigen Werten für den Indikator „Treibhausgaseffekt“	15
Tabelle 6: Schwermetallgehalt der Steinkohle	16
Tabelle 7: Zusammenfassende Darstellung der Klassen (A-G) mit dazugehörigen Werten für den Indikator „Schwermetalle“	16
Tabelle 8: Zusammenfassende Darstellung der Klassen (A-G) mit dazugehörigen Werten für den Indikator „Biogener Anteil“	17
Tabelle 9: Energiebarwert: Klasse und Ergebnis für die theoretische Anlage	18
Tabelle 10: Treibhausgaseffekt: Klasse und Ergebnis für die theoretische Anlage	19
Tabelle 11: Einzelne Daten für die Bestimmung des Indikators Stoffliche Verwertungsquote	20
Tabelle 12: Stoffliche Verwertungsquote: Klasse und Ergebnis für die theoretische Anlage	20
Tabelle 13: Berechnung für die Daten zur Bestimmung des Indikators Stoffliche Verwertungsquote	21
Tabelle 14: Schwermetalle: Ergebnisse für Steinkohle, EBS MB, EBS SB und Zuordnung des Ergebnisses einer Klasse für die theoretische Anlage	21
Tabelle 15: Rechenweg für die Daten zur Bestimmung des Indikators Biogener Anteil	21
Tabelle 16: Biogener Anteil: Klasse und Ergebnis für die theoretische Anlage	22
Tabelle 17: Grenzwerte für Ersatzbrennstoffe beim Einsatz in Anlagen zur Zementerzeugung	25
Tabelle 18: Klassifizierungsschema für feste Sekundärbrennstoffe	31
Tabelle 19: Einsatzgebiet von EBS in Zementwerken	34
Tabelle 20: Massenbezogene Verteilung der verwendeten fossilen Brennstoffe für den Fluss „Fossil (Mix)“	39
Tabelle 21: Massenbezogene Verteilung der verwendeten alternativen Brennstoffe für den Fluss „Mix alternative Brennstoffe“	40
Tabelle 22: Rohmehl, Klinker und Zementproduktionsmenge im Jahr 2013	40
Tabelle 23: Energiebilanz: Ausgangswerte für den biologisch abbaubaren Siebdurchgang..	42

Tabelle 24: Zusammengefasste Gegenüberstellung der Energiebilanzdaten für Primär- und Sekundärherstellung von Metallen, Kunststoffen und PPK, gereiht nach Einsparungspotential.....	50
Tabelle 25: Energiebezogene Verteilung der verwendeten Brennstoffe für den Fluss „Fossil (Mix)“	51
Tabelle 26: Energiebezogene Verteilung der verwendeten Brennstoffe für den Fluss „Mix alternative Brennstoffe“	51
Tabelle 27: Zusammenfassende Daten für die Energiebilanz	52
Tabelle 28: Abfallverbrennungsanlagen und deren Wirkungsgrade	53
Tabelle 29: Brennstoffverteilung der Energieträger in der österreichischen Zementindustrie im Jahr 2013 und Zusammensetzung Fossil (Mix) und EBS für die gegenständliche Arbeit.....	55
Tabelle 30: Zusammenfassende Auflistung der jeweiligen Gut- und Lastschriften in der Energiebilanz	55
Tabelle 31: Treibhausgaspotential von CO ₂ , CH ₄ und N ₂ O	57
Tabelle 32: CO ₂ -Äq-Werte für die aussortierten Wertstoffe.....	57
Tabelle 33: Zusammenfassende Daten für die CO ₂ -Äq-Bilanz	61
Tabelle 34: Zusammenfassende Auflistung der jeweiligen Gut- und Lastschriften bei der CO ₂ -Äq-Bilanz.....	62
Tabelle 35: Theoretische Daten basierend auf Erfahrungen aus der Praxis für die Massenbilanz der EBS-Produktion (SG 1) mit 1.000 kg Abfall (Szenario 1) und 1.000 kg HRF (Szenario 2)	65
Tabelle 36: Parameter (Heizwert, Kohlenstoffgehalt usw.) für die produzierten EBS-Typen	66
Tabelle 37: Energiebilanz mit theoretischen Daten für das System EBS-Produktion (SG 1) bezogen auf 1.000 kg HRF.....	66
Tabelle 38: CO ₂ -Äq-Bilanz mit theoretischen Daten für das System EBS-Produktion (SG 1) bezogen auf 1.000 kg HRF.....	67
Tabelle 39: Theoretische Daten basierend auf Erfahrungen aus der Praxis für die Massenbilanz der EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) mit 1.000 kg Abfall (Szenario 1) und 1.000 kg HRF (Szenario 2).....	69
Tabelle 40: „Massenbilanz“ für das EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) und das Referenzsystem (SG Ref.) bezogen auf 1.000 kg HRF.....	77
Tabelle 41: Daten für das Szenario 1a) „Verdoppelung“ und Szenario 1b) „keine Ausschleusung“ von Wertstoffen.....	81
Tabelle 42: Erhöhung des ausgeschleusten „Biologisch abbaubarer Siebdurchgang“	85

Tabelle 43: Veränderung der Massenverteilung im Prozess „Verteilung“87

Tabelle 44: Veränderung der thermischen Substitutionsrate im Zementwerk (KET:EBS)89

8.4 Abbildungen

Abbildung 1: Projektidee und Konzeptdarstellung hinsichtlich Energie (Q)- und CO ₂ -Äq-Bilanz (Anmerkung: -Q für verbrauchte Energie; +Q für erzeugte Energie)	6
Abbildung 2: Etikett für Haushaltskühlgeräte gemäß EU Vorgaben	7
Abbildung 3: Energiebilanz: Ergebnis für die theoretische Anlage	18
Abbildung 4: CO ₂ -Äq-Bilanz: Ergebnis für die theoretische Anlage.....	19
Abbildung 5: REUQ-Ausweis für eine theoretische Anlage.....	23
Abbildung 6: Beispiel für eine umfassende Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen.....	30
Abbildung 7: Ersatzbrennstoffherstellungskette	31
Abbildung 8: Schema der Zementherstellung	33
Abbildung 9: Standorte der österreichischen Zementindustrie im Jahr 2014.....	34
Abbildung 10: Brennstoffwärmemengen aus der Verfeuerung von Ersatzbrennstoffen (EBS) in Anlagen der österreichischen Zementindustrie (ohne Mahlwerke) im Beobachtungszeitraum 1988 bis 2013.....	35
Abbildung 11: Im Jahr 2014 in Betrieb befindliche Verbrennungsanlagen mit Wirbelschichtfeuerung.....	36
Abbildung 12: Systemgrenzen für betrachtete Systeme (SG 1, SG 2, SG 1 + 2 und SG Ref.)	37
Abbildung 13: Massenbilanz: EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2).....	41
Abbildung 14: Massenbilanz: Referenzsystem (SG Ref.)	41
Abbildung 15: Prozesskette für die primär-metallurgische Roheisenherstellung	43
Abbildung 16: Prozesskette für die Sekundärstahl-Erzeugung im Elektrolichtbogenofen.....	44
Abbildung 17: Prozesskette für die Primärproduktion von Aluminium	44
Abbildung 18: Prozesskette für das Recycling von Aluminium.....	45
Abbildung 19: Prozesskette für die Primärkupfer-Herstellung	46
Abbildung 20: Prozesskette für die Sekundärkupfer-Herstellung	46
Abbildung 21: Prozesskette für die PET-Herstellung aus Erdöl	48
Abbildung 22: Bilanzgrenzen für die Umweltbewertung von Kopierpapier	49
Abbildung 23: Energieeinsparungspotential bei der Sekundärproduktion im Vgl. zur Primärproduktion.....	50
Abbildung 24: Heizwerte der Brenn- und Hilfsstoffe (Angaben in kWh/kg _{OS})	53

Abbildung 25: Umwandlung im Drehrohrofen	54
Abbildung 26: Energiebilanz EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2).....	56
Abbildung 27: Energiebilanz Referenzsystem (SG Ref.).....	56
Abbildung 28: Einsparung von CO ₂ -Äq-Emissionen aus der Sekundärherstellung im Vgl. zur Primärherstellung	58
Abbildung 29: Stromkennzeichnungsbericht 2013 für Österreich (Energie Control GmbH, 2013).....	60
Abbildung 30: CO ₂ -Äq der Brennstoffe und Energieträger	61
Abbildung 31: CO ₂ -Äq-Bilanz EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2)	63
Abbildung 32: CO ₂ -Äq-Bilanz Referenzsystem (SG Ref.)	63
Abbildung 33: Massenbilanz mit theoretischen Daten für das System EBS-Produktion (SG 1) bezogen auf 1.000 kg HRF (Angaben in Prozent)	65
Abbildung 34: Theoretische Auswertung (Gut- und Lastschriften) der Energiebilanz für das System EBS-Produktion (SG 1) bezogen auf 1.000 kg HRF	67
Abbildung 35: Theoretische Auswertung (Gut- und Lastschriften) der CO ₂ -Äq-Bilanz für das System EBS-Produktion (SG 1) bezogen auf 1.000 kg HRF	68
Abbildung 36: Massenbilanz mit theoretischen Daten für das System EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) bezogen auf 1.000 kg HRF (Angaben in Prozent).....	70
Abbildung 37: Energiebilanz mit theoretischen Daten für das System EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) bezogen auf 1.000 kg HRF (Angaben in Prozent).....	72
Abbildung 38: Theoretische Auswertung (Gut- und Lastschriften) der Energiebilanz für das System EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) bezogen auf 1.000 kg HRF	73
Abbildung 39: CO ₂ -Äq-Bilanz mit theoretischen Daten für das System EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) bezogen auf 1.000 kg HRF (Angaben in Prozent).....	75
Abbildung 40: Theoretische Auswertung (Gut- und Lastschriften) der CO ₂ -Äq-Bilanz für das System EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) bezogen auf 1.000 kg HRF	76
Abbildung 41: „Massenbilanz“ für das EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) und das Referenzsystem (SG Ref.) bezogen auf 1.000 kg HRF	77
Abbildung 42: „Energiebilanz“ für das Referenzsystem (energetisch bezogen auf 1.000 kg HRF) (Angaben in MJ)	78
Abbildung 43: „Energiebilanz“ für das EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) und das Referenzsystem (SG Ref.) (energetisch bezogen auf 1.000 kg HRF) (Angaben in MJ)	79
Abbildung 44: „CO ₂ -Äq-Bilanz“ für Referenzsystem (bezogen auf 1.000 kg HRF) (Angaben in kg CO ₂ -Äq).....	80

Abbildung 45: „CO ₂ -Äq-Bilanz“ für das EBS-Gesamtsystem (SG 1 + 2) und das Referenzsystem (SG Ref.) (bezogen auf 1.000 kg HRF) (Angaben in kg CO ₂ -Äq)	80
Abbildung 46: Szenario 1a: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die Energiebilanz (Angaben in MJ)	82
Abbildung 47: Szenario 1a: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die CO ₂ -Äq-Bilanz (Angaben in kg CO ₂ -Äq)	83
Abbildung 48: Szenario 1b: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die Energiebilanz (Angaben in MJ)	83
Abbildung 49: Szenario 1b: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die CO ₂ -Äq-Bilanz (Angaben in kg CO ₂ -Äq)	84
Abbildung 50: Szenario 2: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die Energiebilanz (Angaben in MJ)	86
Abbildung 51: Szenario 2: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die CO ₂ -Äq-Bilanz (Angaben in kg CO ₂ -Äq)	87
Abbildung 52: Szenario 3: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die Energiebilanz (Angaben in MJ)	88
Abbildung 53: Szenario 3: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die CO ₂ -Äq-Bilanz (Angaben in kg CO ₂ -Äq)	89
Abbildung 54: Szenario 4: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die Energiebilanz (Angaben in MJ)	90
Abbildung 55: Szenario 4: Sensitivitätsanalyse und zusammengefasste Ergebnisse für die CO ₂ -Äq-Bilanz (Angaben in kg CO ₂ -Äq)	90

Anhang A



Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
 Department für Umwelt- und Energieverfahrenstechnik, Montanuniversität Leoben
 Franz-Josef-Straße 18 (Umweltschutzgebäude) A-8700 Leoben

Tel.: +43 (0) 3842 / 402-5101, Fax: -5102, E-Mail: avaw@unileoben.ac.at, Homepage: avaw.unileoben.ac.at

FRAGEBOGEN ZUM PROJEKT REUQ – AUSWEIS

Erhebung von EBS-Aufbereitungsanlagen-spezifischen Daten für das Jahr 2013

Bearbeiter	
Datum der Bearbeitung	
<i>Allgemeine Daten</i>	
Firmenname	
Adresse	
Ansprechpartner	

<i>Daten für die Massenbilanz – Bezugsjahr 2013</i>	
Behandelte Abfallarten	
Behandelte Abfallmenge gesamt [t]	
Siebdurchgang zur biologischen Behandlung [t]	
Ausgeschleuste bzw. gewonnene Wertstoffe	
Nichteisenfraktion gesamt [t]	
<i>Kupfer [t] (falls getrennt erfasst)</i>	
<i>Aluminium [t] (falls getrennt erfasst)</i>	
Eisen [t]	
PET-Kunststoffe [t]	
Papier, Pappe, Kartonagen [t]	
Sonstiges (Inert) [t]	
...	
Produzierte EBS	
EBS (Main Burner (MB))	
EBS (sekundär Burner (SB))	
EBS (Wirbelschicht (WS))	

Anhang-Abb. 1: Fragebogen zum Projekt REUQ-Ausweis

EBS Verwertung (Achtung: Summe muss gleich der Summe „Produzierte EBS“ sein)	
Verwertung im Zementwerk [t]	
Sonstige Verwertung, z.B. WtE [t]	

Energiebilanz – Bezugsjahr 2013	
Stromverbrauch [kWh]	
Gasverbrauch [m ³]	
Dieserverbrauch [l]	

EBS Charakterisierung	
Siebkurven vorhanden	JA falls Ja, bitte beilegen NEIN
Sortieranalyseergebnisse	JA falls Ja, bitte beilegen NEIN
<i>Chemische Charakterisierung – Mittelwert für 2013 - EBS (0 - 30 mm)</i>	
Trockensubstanz (TS) [%]	
Heizwert [MJ/kg _{TS}]	
Heizwert [MJ/kg _{OS}]	
Aschegehalt (815°C) [Gew.-% _{TS}]	
TC [Gew.-% _{TS}]	
X _{BTC} (Biogener Kohlenstoffanteil im Gesamtkohlenstoff) [%]	
Schwermetalle gem. AVV [mg/kg _{TS}]	Sb
	As
	Pb
	Cd
	Cr
	Co
	Ni
Hg	
<i>Chemische Charakterisierung – Mittelwert für 2013 - EBS (30 - 80 mm)</i>	
Trockensubstanz (TS) [%]	
Heizwert [MJ/kg _{TS}]	
Heizwert [MJ/kg _{OS}]	

Anhang-Abb. 2: Fragebogen zum Projekt REUQ-Ausweis



Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
 Department für Umwelt- und Energieverfahrenstechnik, Montanuniversität Leoben
 Franz-Josef-Straße 18 (Umweltschutzgebäude) A-8700 Leoben

Tel.: +43 (0) 3842 / 402-5101, Fax: -5102, E-Mail: avaw@unileoben.ac.at, Homepage: avaw.unileoben.ac.at

Aschegehalt (815°C) [Gew.-% _{TS}]		
TC [Gew.-% _{TS}]		
X _{BTC} (Biogener Kohlenstoffanteil im Gesamtkohlenstoff) [%]		
Schwermetalle gem. AVV [mg/kg _{TS}]	Sb	
	As	
	Pb	
	Cd	
	Cr	
	Co	
	Ni	
	Hg	
<i>Chemische Charakterisierung – Mittelwert für 2013 - EBS (> 80 mm)</i>		
Trockensubstanz (TS) [%]		
Heizwert [MJ/kg _{TS}]		
Heizwert [MJ/kg _{OS}]		
Aschegehalt (815°C) [Gew.-% _{TS}]		
TC [Gew.-% _{TS}]		
X _{BTC} (Biogener Kohlenstoffanteil im Gesamtkohlenstoff) [%]		
Schwermetalle gem. AVV [mg/kg _{TS}]	Sb	
	As	
	Pb	
	Cd	
	Cr	
	Co	
	Ni	
	Hg	

Anhang-Abb. 3: Fragebogen zum Projekt REUQ-Ausweis