

2023

# Alternative Rohmaterialien und Brennstoffe in der Zementherstellung

Ein Verfahren zur Bestimmung  
von Verwertungsraten

eine Studie im Auftrag der cemsuisse, Bern



**Auftraggeber**

Verband der Schweizerischen Cementindustrie (cemsuisse)  
Marktgasse 53  
3011 Bern

**Auftragnehmer**

Empa  
Technology and Society Laboratory<sup>1</sup>  
Lerchenfeldstrasse 5  
9014 St. Gallen

**Autoren**

<sup>1</sup> Martin Gasser  
<sup>1</sup> Rolf Widmer  
<sup>1</sup> Patrick Wäger

**Hinweise**

Diese Studie wurde im Auftrag von cemsuisse verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

St. Gallen, September 2023

Titelbild:

<https://www.veolia.de/leistungen/leistungen-entsorgung/ersatzbrennstoffe>

## Executive Summary

Die Schweizer Zementindustrie substituiert einen wachsenden Anteil ihrer benötigten Primärmaterialien durch alternative Rohmaterialien (ARM) und alternative Brennstoffe (ABS). Ziel der vorliegenden Studie ist es, eine Aussage darüber machen zu können, welcher Anteil dieser abfallbasierten alternativen Materialien (ARM und ABS) beim Einsatz in einem Zementwerk verwertet wird. Dazu wurde ein Verfahren entwickelt, womit die stoffliche und energetische Verwertung material- und Zementwerk-spezifisch bestimmt werden können.

Das Bestimmungsverfahren berücksichtigt die Prozessschritte der Zementherstellung und die dabei stattfindenden Umwandlungen von ARM (z. B. Aushubmaterial) und ABS (z. B. Kunststoffabfälle) in neue Materialfraktionen. Die in einem typischen Zementwerk auftretenden Massen- und Energieflüsse wurden entlang von Rohmaterialaufbereitung, Klinkerproduktion und Zementmahlung untersucht. Nach dieser Methodik wird nur derjenige Massenanteil der eingesetzten alternativen Materialien als *verwertet* angesehen, der im betrachteten Zementwerk auch tatsächlich stofflich oder energetisch *genutzt* wird.

Beim Einsatz von alternativen Materialien in Zementwerken fallen keine zu deponierenden Reststoffe an. Der mineralische Anteil von ARM und ABS, sprich der Aschegehalt, wird in den Zement eingebaut. Im vorliegenden Bestimmungsverfahren wird dieser Anteil als die *stoffliche Verwertungsrate* beschrieben. Die *energetische Verwertungsrate* berechnet sich mithilfe der Energieeffizienz des betrachteten Zementwerks. Der brennbare Masseanteil von alternativen Materialien wird dazu mit dem Netto-Anlagenwirkungsgrad<sup>1</sup> multipliziert. Die beiden Verwertungsraten zusammengezählt ergeben schliesslich die *Gesamtverwertungsrate* der verwendeten ARM bzw. ABS im betrachteten Zementwerk.

Verglichen mit bisherigen Ansätzen, welche den Einsatz von ARM und ABS anhand der substituierten Primärmaterialien beschreiben, ist das vorgeschlagene Bestimmungsverfahren der Verwertungsraten etwas aufwändiger. Es baut jedoch darauf auf, dass in der Zementindustrie ARM und ABS vor ihrer Verwendung bereits intensiv beprobt werden. Um das Verfahren auf andere Verwertungswege anzuwenden, sind gegebenenfalls Anpassungen der Berechnungsmethodik notwendig, welche sicherstellen, dass alle relevanten Massen- und Energieflüsse berücksichtigt werden.

---

<sup>1</sup> Beispielsweise berechnet gemäss Norm 3460 Blatt 2 des Vereins Deutscher Ingenieure.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1.1	HINTERGRUND .....	1
1.2	ZIELSETZUNG .....	1
<b>2</b>	<b>GRUNDLAGEN</b> .....	<b>2</b>
2.1	PROZESSCHRITTE DER ZEMENTHERSTELLUNG .....	2
2.2	ENERGIEBILANZ DER ZEMENTHERSTELLUNG .....	4
2.3	ALTERNATIVE MATERIALIEN IN DER ZEMENTHERSTELLUNG .....	5
<b>3</b>	<b>BESTIMMUNGSVERFAHREN</b> .....	<b>8</b>
3.1	PRINZIP DES BESTIMMUNGSVERFAHRENS .....	8
3.2	STOFFLICHE VERWERTUNGSRATE .....	8
3.3	ENERGETISCHE VERWERTUNGSRATE .....	8
3.4	RECHENBEISPIELE .....	10
<b>4</b>	<b>DISKUSSION</b> .....	<b>12</b>
4.1	EIGENSCHAFTEN DES BESTIMMUNGSVERFAHRENS .....	12
4.2	ANWENDUNGSBEREICH UND GRENZEN .....	13
<b>5</b>	<b>FAZIT</b> .....	<b>14</b>
<b>6</b>	<b>QUELLEN</b> .....	<b>15</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

In Zementwerken wird aus Rohmaterialien, Brennstoffen, Zuschlagstoffen und Umgebungsluft sowie mithilfe von Elektrizität Zement hergestellt. Um die Umweltbelastung zu reduzieren, substituiert die Schweizer Zementindustrie einen wachsenden Anteil dieser eingehenden Stoffe mit alternativen Materialien. Anstelle von natürlichen Rohmaterialien (Kalk, Mergel, etc.) werden – u. a. zur Schliessung von Kreisläufen – vermehrt alternative Rohmaterialien (ARM) verwendet. Zudem nimmt der Anteil von alternativen Brennstoffen (ABS) anstelle fossiler Primärbrennstoffe stetig zu. Bei ARM (Aushubmaterial, Filterkuchen, Giessereialtsand, etc.) und ABS (Kunststoffabfälle, Altreifen, Altholz, etc.) handelt es sich um Abfälle, welche sonst entsorgt werden müssten. Sowohl in der Schweiz, als auch im übrigen Europa ist der Einsatz solcher alternativer Materialien (ARM und ABS) essenzieller Teil der Strategie hin zu einem klimaneutralen Zement (CEMBUREAU, 2020; cemsuisse, 2020).

Die Bewertung derartiger Bemühungen konzentriert sich momentan in erster Linie auf die substituierten Primärmaterialien. Betreffend alternativen Materialien liegt der Fokus der Bewertung auf ARM und ABS als Input für den Zementherstellungsprozess und vernachlässigt die Prozessschritte innerhalb des Zementwerks (stoffliche und energetische Verwertung) sowie den Ausgang von Masse und Energie aus der Anlage. Vor dem Hintergrund des sich in Revision befindlichen Schweizer Umweltschutzgesetzes (USG) wird die Bewertung des Einsatzes von alternativen Materialien gegenwärtig politisch diskutiert. Die vorliegende Studie stellt ein Verfahren zur Bestimmung der Verwertungsraten von einzelnen ARM und ABS in Zementwerken aus wissenschaftlicher Sicht vor. Der Vorschlag setzt dabei den Fokus der Betrachtung auf den Ausgang von Masse und Energie aus dem System Zementwerk, mit dem Ziel die unterschiedlichen Verwertungsarten in der Zementherstellung möglichst objektiv zu beschreiben.

## 1.2 Zielsetzung

Im Folgenden wird für ARM und ABS aufgezeigt, wie deren Einsatz in der Zementherstellung beschrieben werden kann. Ziel ist es, eine Aussage darüber machen zu können, welche Anteile dieser alternativen Materialien stofflich und welche Anteile energetisch *verwertet*<sup>2</sup> werden. Hierbei werden stoffliche und energetische Verwertung separat ausgewiesen.

Als Grundlage werden die wichtigsten Prozessschritte, welche innerhalb eines Zementwerks ablaufen, aufgeschlüsselt und die ausgehenden Massen- und Energieflüsse von ARM und ABS auf ihren Nutzen hin beurteilt. Darauf aufbauend wird der Einsatz von ARM und ABS anhand je eines Rechenbeispiels veranschaulicht.

---

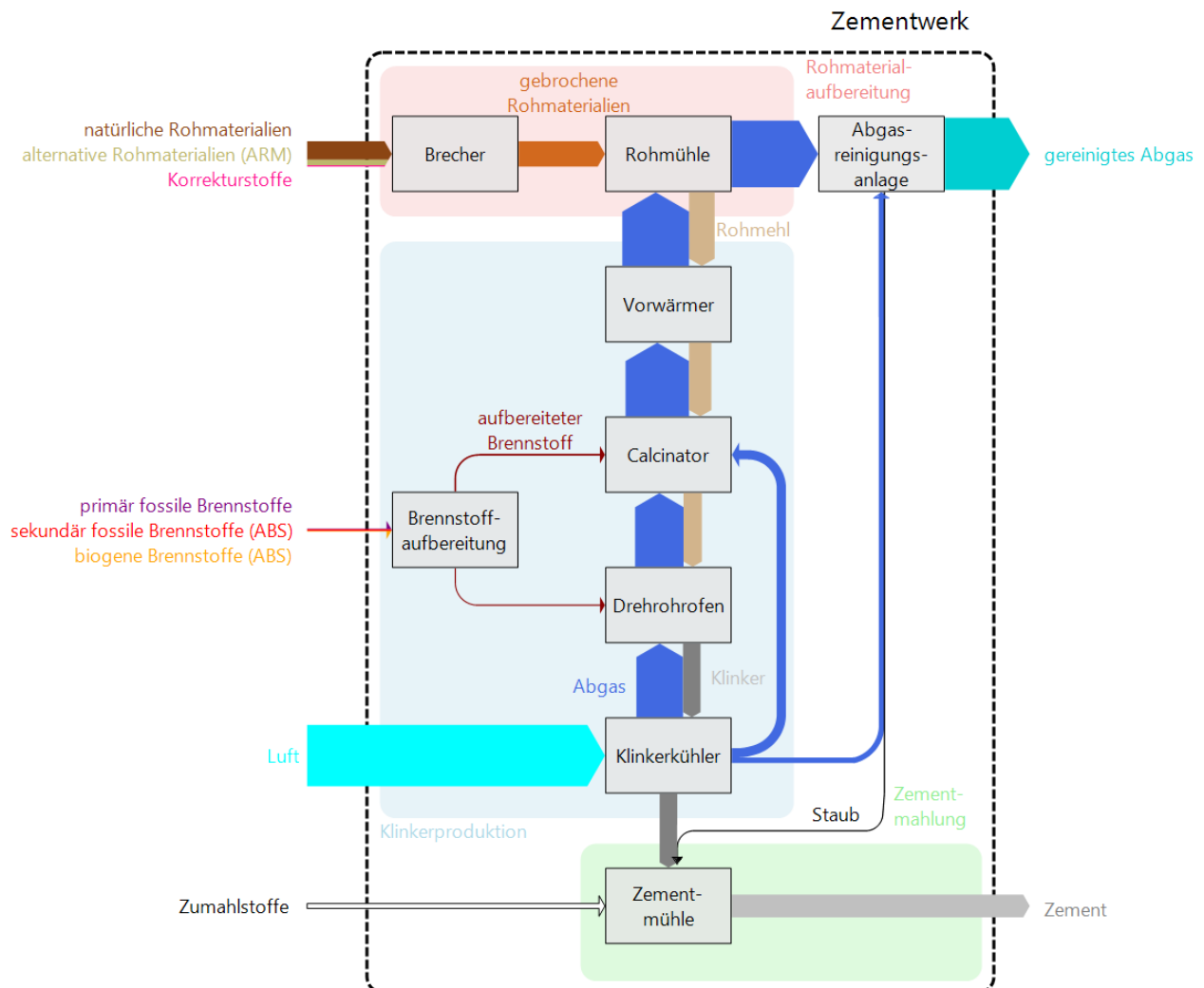
<sup>2</sup> Definition der Verwertung gemäss der EU-Richtlinie 2008/98/EG:

*"[...] jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis Abfälle innerhalb der Anlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie andere Materialien ersetzen, die ansonsten zur Erfüllung einer bestimmte Funktion verwendet worden wären, oder die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen."*

## 2 Grundlagen

### 2.1 Prozessschritte der Zementherstellung

Zementwerke sind komplexe Anlagen, in welchen durch eine Vielzahl verknüpfter Prozessschritte Zement hergestellt wird. Grundsätzlich unterscheidet man bei der Zementherstellung zwischen Trocken-, Halbtrocken-, Halbnass- und Nassverfahren, womit der Feuchtegehalt der benutzten Rohmaterialien beschrieben wird. Von den sechs Schweizer Zementwerken produzierten 2021 fünf nach dem energieeffizientesten Trockenverfahren und eines nach dem Halbtrockenverfahren (Obrist et al., 2021). Die Zementherstellung gliedert sich dabei grob in Rohmaterialaufbereitung, Klinkerproduktion und Zementmahlung (Gao et al., 2016). Diese Bereiche sind weiter in einzelne Prozessschritte unterteilt und werden nachfolgend kurz beschrieben. Abbildung 1 stellt die Prozessschritte mit den auftretenden Massenflüssen schematisch dar. Bemerkenswert ist dabei die Dominanz der in den Prozessschritten erforderlichen Luftmassen, gegenüber allen anderen benötigten Materialien (Engin & Ari, 2005; Gao et al., 2016).



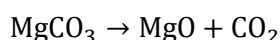
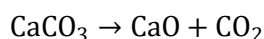
**Abbildung 1** Eigene Darstellung der wichtigsten Prozessschritte der Zementherstellung und der dazwischen auftretenden Massenflüsse (Masse pro Zeiteinheit). Die Pfeilbreiten im vorliegenden Sankey-Diagramm geben einen ungefähren Anhaltspunkt für die Massenflussrelationen. Anlagenschemata bestehender Zementwerke zeigen gewisse Abweichungen von dieser Darstellung und sind grundsätzlich detaillierter. Hier wurde versucht, die für alle Anlagen grundlegenden Prozesse aufzuzeigen. Der Einfachheit und Übersicht halber wurden Lagersilos und Homogenisierungsprozesse sowie Hilfsstoffflüsse für die Abgasreinigung nicht abgebildet.

## Rohmaterialaufbereitung

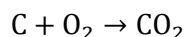
In der Rohmaterialaufbereitung werden Kalk, Mergel und Ton sowie ARM gebrochen und anschliessend zusammen mit Korrekturstoffen zermahlen. Die Ausgangsstoffe werden dabei so miteinander kombiniert, dass das entstehende Rohmehl die für die Klinkerproduktion passende Zusammensetzung an Calcium (Ca), Silicium (Si), Aluminium (Al) und Eisen (Fe) aufweist (Zeschmar-Lahl et al., 2020). Heisse Abgase aus der Klinkerproduktion werden dabei durch die Rohmühle geleitet, um das Rohmehl zu erwärmen.

## Klinkerproduktion

Im Vorwärmer wird das Rohmehl anschliessend in mehreren hintereinander geschalteten Zyklonen weiter erwärmt. Bei 750-850 °C beginnt die endotherme Entsäuerung (Calcinierung) der CaCO<sub>3</sub>- und MgCO<sub>3</sub>-Anteile des Rohmehls, wodurch das Abgas mit geogenem CO<sub>2</sub> angereichert wird. Insgesamt entsäuern im Vorwärmer bereits etwa 40-50 % der Karbonate gemäss untenstehenden Reaktionen (Zeschmar-Lahl et al., 2020):

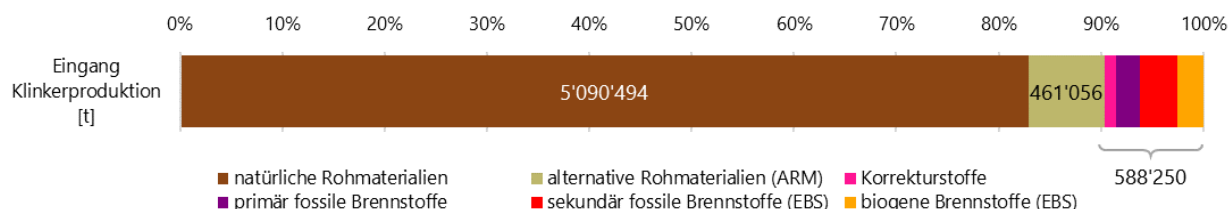


Parallel hierzu fängt die im Rohmehl enthaltene Feuchte an zu verdampfen und organische Anteile beginnen zu oxidieren. Insgesamt beträgt der Glühverlust von Rohmehl 32-36 % (Schulze, 2019). Im Calcinator werden ca. 60 % des aufbereiteten Brennstoffs zugegeben, wodurch die im Vorwärmer eingesetzten Prozesse beschleunigt werden. Hier calciniert der Hauptteil des Rohmehls. Die eingesetzten Brennstoffe oxidieren mit Luft, wodurch weiteres CO<sub>2</sub> freigesetzt wird (Zeschmar-Lahl et al., 2020):



Im Drehrohrföfen werden ca. 40 % des aufbereiteten Brennstoffs hinzugegeben. Übriggebliebene Karbonate calcinieren zu den entsprechenden Erdalkalioxiden. Bei einer Maximaltemperatur des Brennguts von ca. 1'450 °C bilden sich Klinkermineralien. Deren Temperatur wird im Klinkerkühler anschliessend rasch gesenkt, um eine Stabilisierung der Mineralienphasen zu erreichen (Zeschmar-Lahl et al., 2020).

Abbildung 2 zeigt eine Übersicht der Rohstoffmengen welche von der Schweizer Zementindustrie 2021 für die Klinkerproduktion eingesetzt wurden.



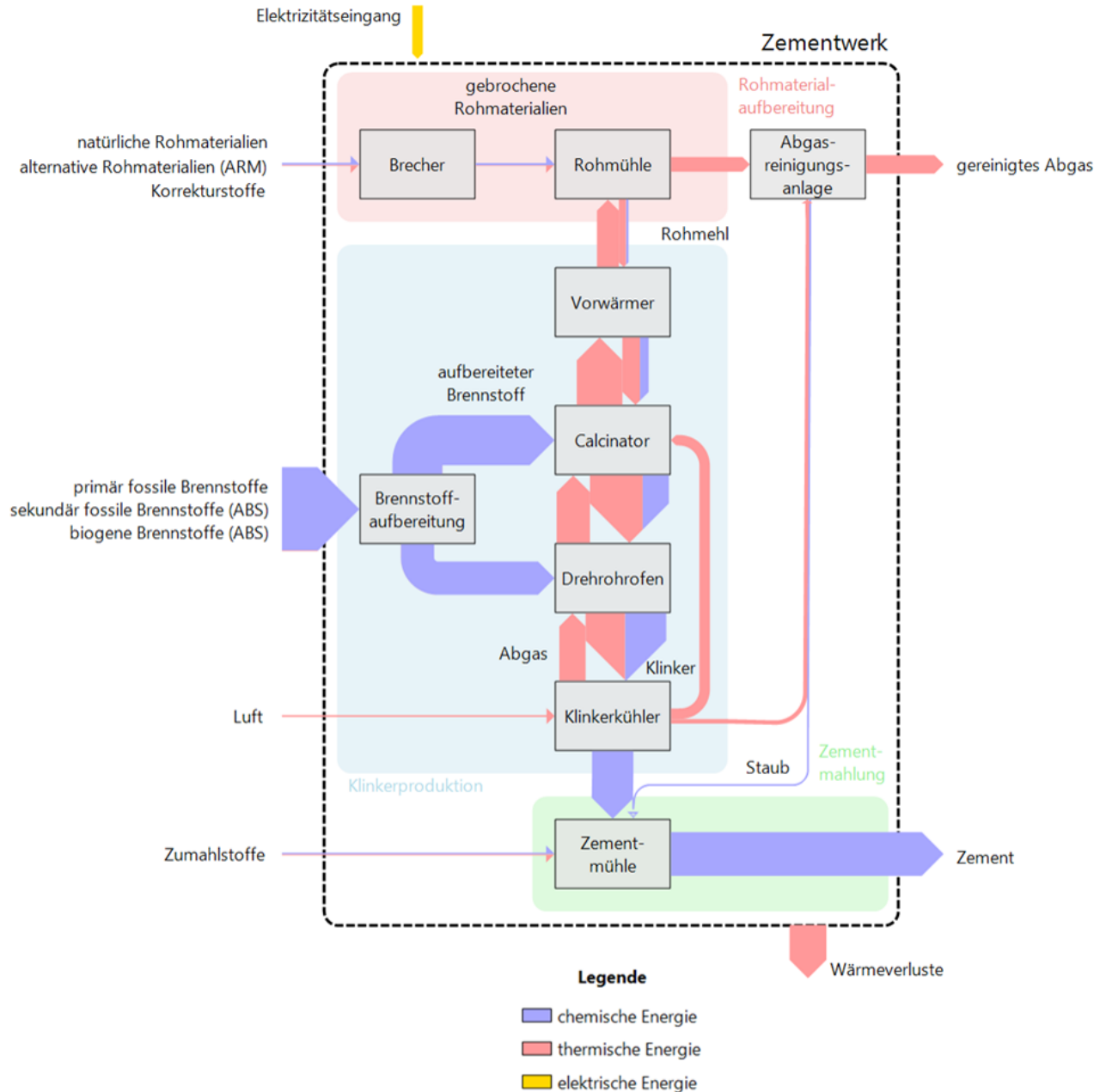
**Abbildung 2** Aufsummierte Mengen der 2021 in der Schweizer Zementindustrie für die Klinkerproduktion eingesetzten Rohstoffe (Datenquelle: cemsuisse). Nicht aufgeführt sind hier die für die Klinkerproduktion benötigten Luftmassen.

## Zementmahlung

In der Zementmühle wird das abgekühlte Klinkergranulat mit Zumahlstoffen zermahlen. Die in der Schweiz mittlerweile meistproduzierte Zementart CEM II/B besteht nur noch zu 67 % aus Klinker – den Rest machen gemahlener Kalkstein, gebrannter Schiefer, Gips, Hüttensand und Flugasche aus (cemsuisse, 2016, 2021). Zudem wird hier auch in der Abgasbehandlung herausgefilterter Staub zurückgeführt (Zeschmar-Lahl et al., 2020).

## 2.2 Energiebilanz der Zementherstellung

Die Zementherstellung ist einer der energieintensivsten industriellen Prozesse. Bei der Beschreibung des Einsatzes von ARM und ABS sind deswegen nebst den Massen- auch die Energieflüsse zu berücksichtigen. Auftretende Energieflüsse können dabei grundsätzlich in chemische, thermische und elektrische Energie unterteilt werden. Eine Übersicht hierzu gibt Abbildung 3.



**Abbildung 3** Eigene Darstellung der wichtigsten Prozessschritte der Zementherstellung und der dazwischen dominierenden Energieflüsse (Energie pro Zeiteinheit). Die Pfeilbreiten im vorliegenden Sankey-Diagramm geben einen ungefähren Anhaltspunkt für die Energieflussrelationen. Die Darstellung wurde gemäss dem Beschrieb von Abbildung 1 erstellt. Unterschiedliche Energieformen sind farblich unterschieden.

Der Zementherstellungsprozess wird durch die Verbrennung von Brennstoffen sowie den Einsatz von Elektrizität angetrieben. Ein zusätzlicher, wenn auch verhältnismässig sehr kleiner Energieeingang stellt die sensible Wärme der Rohmaterialien, Korrekturstoffe, Brennstoffe, Luft und Zumahlstoffe dar. Zusätzlich bringen Rohmaterialien, Korrekturstoffe und Zumahlstoffe auch geringe Mengen chemisch gebundene Energie in das Zementwerk ein (Engin & Ari, 2005).

Insgesamt wird der Grossteil der benötigten Energie durch den Energieinhalt der Brennstoffe bereitgestellt. In Schweizer Zementwerken betrug dieser Anteil am Gesamtenergiebedarf in den letzten Jahren knapp 90 % (cemsuisse, 2021). Entsprechend den Massenflüssen wird die chemische Energie der Brennstoffe im Calcinator und Drehrohrofen in Wärme umgewandelt. Diese Wärme dient dort zur endothermen Calcinierung und Klinkerbildung und wird in vorgeschalteten Prozessschritten zudem zur Trocknung und Erwärmung der Ausgangsstoffe verwendet.

Elektrizität wird in allen Prozessschritten für den Betrieb von Steuerungselementen benötigt. Den grössten Bedarf haben Mahl- und Mischprozesse, insbesondere der Betrieb des Brechers, der Rohmühle und der Zementmühle. Je nach verbauter Prozesstechnologie bestehen hier Einsparungspotenziale. So benötigen *best available technologies* (BAT) tendenziell weniger Energie bzw. können Energie aus der Klinkerproduktion zurückgewinnen. Zur Rückgewinnung von Elektrizität bietet sich hier insbesondere die Installation eines *Organic Rankine Cycle* (ORC) an (European Commission. Joint Research Centre., 2019).<sup>3</sup> In den letzten Jahren betrug der Anteil von elektrischer Energie am Gesamtenergieverbrauch von Zementwerken gut 10 % (cemsuisse, 2021).

Ein Teil der Eingangsenergie verlässt das Zementwerk als chemisch gebundene Energie im Zement. Dies ist in der Zementherstellung die gewünschte Endform der eingesetzten Energie. In Relation zur Eingangsenergie erlaubt dies die Berechnung der Energieeffizienz des Zementwerks (Kapitel 3.3). Unerwünschte bzw. unvermeidbare Energieverluste verlassen das Zementwerk über die thermische Energie im gereinigten Abgas, sowie als Konvektions- und Strahlungsverlust (Zeschmar-Lahl et al., 2020).

Im Durchschnitt benötigten Schweizer Zementwerke 2020 3.09 GJ Energie um eine Tonne Zement zu produzieren (cemsuisse, 2021).<sup>4</sup>

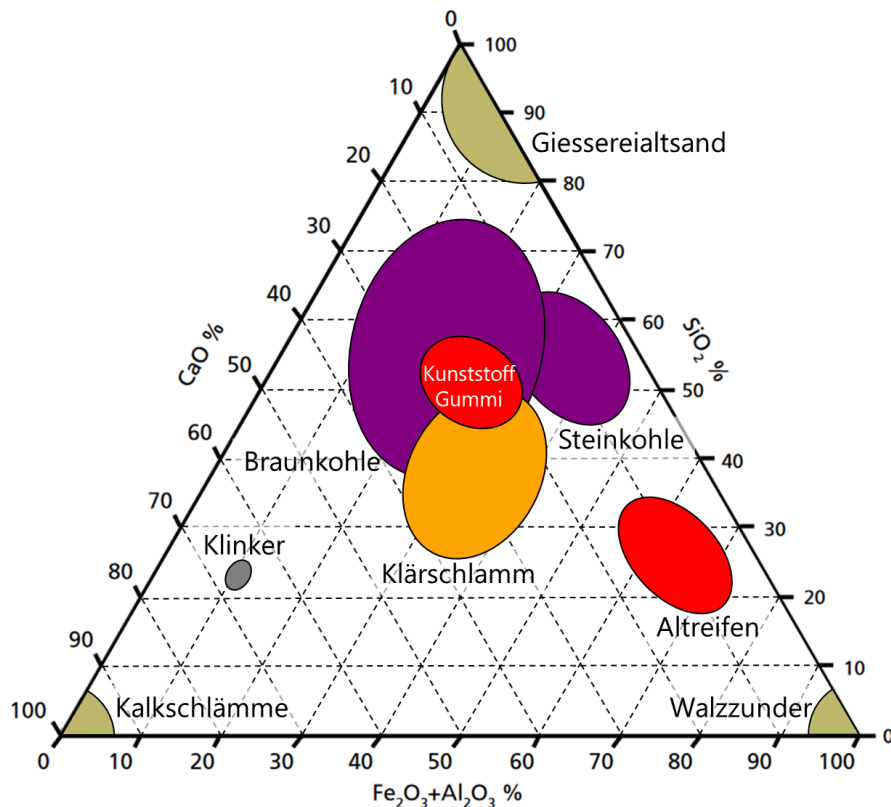
### 2.3 Alternative Materialien in der Zementherstellung

Um natürliche Rohmaterialvorkommen zu schonen und um den CO<sub>2</sub>-Ausstoss aus primär fossilen Brennstoffen zu reduzieren, greift die Zementindustrie vermehrt auf alternative Materialien zurück. Auch bei zunehmendem Einsatz von alternativen Materialien bleibt das erklärte Hauptziel der Zementindustrie die Herstellung von qualitativ hochwertigem Zement. ARM und ABS können deshalb nicht in beliebigen Mengen miteinander kombiniert werden. Es gilt stattdessen die alternativen Materialien so zu dosieren, dass die Zusammensetzung des gemischten Rohmehls (Aschen, ARM und natürliche Rohmaterialien) für die Klinkerherstellung stimmt (Abbildung 4).

---

<sup>3</sup> Als ORC beschreibt man ein Verfahren des Betriebs von Dampfturbinen mit einem anderen Arbeitsmedium als Wasserdampf (bspw. mit Abgas).

<sup>4</sup> Gesamtenergieverbrauch der Zementwerke geteilt durch die gesamte Zementproduktion: 12.823 PJ / 4.15 Mt = 3.09 GJ/t



**Abbildung 4** Eigene Darstellung des Ternärdiagramms nach Sarc et al. (2020). In der Klinkerproduktion muss die elementare Zusammensetzung des Aschengemischs der eingehenden Materialien derjenigen von Klinker (hier grau dargestellt) entsprechen. Alternative Materialien müssen nach diesem Grundsatz dem Zementherstellungsprozess zugemischt werden. Beispielfhaft sind hier verschiedene ARM (olivgrün) sowie fossile ABS (rot) und biogene ABS (orange) dargestellt. Fossile Primärbrennstoffe sind violett markiert. Die hier dargestellten ARM substituieren aufgrund ihrer Zusammensetzung primäre Korrekturstoffe.

Rechtliche Voraussetzung bei der Verwendung von alternativen Materialien in der Zementherstellung ist zudem, dass das entsprechende Zementwerk über eine Annahmewilligung für den jeweiligen Abfallcode verfügt. In der Schweiz müssen ARM zudem die Anforderungen gemäss Anhang 4 Satz 1 VVEA und ABS die Anforderungen gemäss Anhang 4 Satz 2 VVEA einhalten.<sup>5</sup> Der Einsatz von ABS in Zementwerken gilt in der EU als R1-Verwertungsverfahren gemäss Anhang II der EU-Richtlinie 2008/98/EG (Sarc et al., 2020).<sup>6</sup> Dies bedeutet, dass der gesamte Eingang von ABS gemäss den heutigen Bestimmungen somit als *verwertet* gilt.

### Alternative Rohmaterialien

Als ARM werden Rohmaterialien bezeichnet, welche man anstelle der natürlichen Rohmaterialien (Kalk, Mergel, Ton) als Ausgangsstoff für die Klinkerherstellung einsetzt. ARM können zudem auch teilweise die Zuschlagstoffe in die Zementmühle ersetzen. 2020 betrug der Substitutionsgrad von natürlichen Rohmaterialien durch ARM in der Schweizer Zementindustrie 13.7 % (cemsuisse, 2021). Gemäss cemsuisse waren 2021 kontaminierte Erde, Aushub und Ausbruchmaterial, Papierasche und Strassensammlerschamm die meistgenutzten ARM in der Schweiz. Diese Materialien haben alle einen stark mineralischen Charakter, weshalb sie sich für eine Verwertung in Zementwerken anbieten.

<sup>5</sup> Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (VVEA)

<sup>6</sup> Bzw. in der Schweiz als R104-Verwertungsverfahren (eine Unterkategorie von R1) gemäss Anhang 2 Teil B LVA.

Obwohl der Gehalt an organischem Material im Allgemeinen gering ist, weisen gewisse ARM allerdings vergleichsweise hohe Werte auf (z. B. Strassensammlerschlamm).

Grundsätzlich können ARM an verschiedenen Orten im Zementwerk zugeführt werden. Ein wichtiges Kriterium ist hierbei, wie fein gemahlen das Material bereits vorliegt. Grobkörnige ARM werden zusammen mit den natürlichen Rohmaterialien in den Brecher gegeben und anschliessend zur Rohmühle geleitet. Flugfähige ARM werden hingegen erst später dem Zementherstellungsprozess beigegeben. Wichtig ist bei allen Aufgabeorten eine homogene Durchmischung mit den natürlichen Rohmaterialien. Damit wird eine gute Klinkerqualität gewährleistet und eine vollständige Zersetzung der organischen Bestandteile sichergestellt (Hoenig et al., 2015).

Ein grosser Teil der mineralischen Bestandteile von ARM fliesst in das Klinkergranulat mit ein, während die Oxidation der organischen Bestandteile Energie für die Zementherstellung freisetzt. Enthaltene Karbonate calcinieren, geogenes CO<sub>2</sub> entweicht und bei steigenden Prozesstemperaturen bilden sich Klinkerphasen. Anfänglich in ARM enthaltene Feuchte wird dabei unter Energieaufwand verdampft (Hoenig et al., 2015). Tatsächlich in der Zementherstellung verwertet werden somit der mineralische Anteil der Aschen und die energiereiche Organik von ARM.

### **Alternative Brennstoffe**

Als ABS werden alternative Energieträger bezeichnet, welche anstelle fossiler Primärbrennstoffe eingesetzt werden. In der Schweizer Zementindustrie betrug der Energiesubstitutionsgrad durch ABS 2020 69 % (cemsuisse, 2021). ABS werden hierbei in sekundär fossile (Kunststoffabfälle, Lösungsmittel, Altpneus, etc.) und biogene (Trockenklärschlamm, Altholz, Tiermehl, etc.) Brennstoffe unterteilt, wobei sekundär fossile ABS teilweise auch biogene Anteile enthalten. ABS haben hohe organische Anteile und ihre Elementarzusammensetzung besteht grösstenteils aus Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O). Dies führt dazu, dass ABS einen hohen Heizwert aufweisen (ca. 15-40 MJ/kg) (Nhuchhen et al., 2021).

ABS werden in der Brennstoffaufbereitung wenn nötig zerkleinert und dann in eine Brennstoffmischung homogenisiert. Bei diesem Prozess werden ABS in Fraktionen unterschiedlicher Qualität eingeteilt (Sarc et al., 2016). Diese können sowohl im Calcinator- als auch im Drehrohrofenbrenner verwendet werden. Für den Einsatz im Drehrohrofen muss der durchschnittliche Heizwert der Brennstoffmischung grösser 22 MJ/kg sein, um eine gute Klinkerqualität zu gewährleisten (Zeschmar-Lahl et al., 2020). Aufgrund der teilweise schlechteren Brennstoffqualität von ABS verglichen mit fossilen Primärbrennstoffen werden bei ihrem Einsatz allgemein mehr Brennstoffmasse, Luft und Energie zur Verdampfung des Wassers benötigt. Die Kohlenstoffdioxidintensität (kg/GJ) der meisten ABS liegt hierbei im Bereich fossiler Primärbrennstoffe (CO<sub>2</sub>-Emissionen für Steinkohle: 94.6 kg/GJ (Nhuchhen et al., 2021; Quaschning, 2015)).

Während der Verbrennung trocknen ABS unter Energieverlust und pyrolysieren. Das Pyrolysegas zündet bei entsprechender Umgebungstemperatur und verbrennt exotherm bis Kohlenstoff und Wasserstoff verbraucht sind (Baier & Horix, 2014). Die dabei freigesetzte Energie wird für die Klinkerproduktion verwendet. Die Reaktionsprodukte, welche nicht über die Abgase entweichen, verbleiben im Drehrohrofen als Asche und werden direkt in den Klinker eingebunden.

### 3 Bestimmungsverfahren

#### 3.1 Prinzip des Bestimmungsverfahrens

Zur Bestimmung der Verwertungsraten von einzelnen alternativen Materialien in Zementwerken müssen die Prozessschritte der Zementherstellung sowie die Ausgänge aus dem System analysiert werden. Die vorliegende Methodik betrachtet diejenigen Massenanteile von ARM und ABS als *verwertet*, welche beim Einsatz im Zementwerk auch tatsächlich stofflich und/oder energetisch *genutzt* werden. Im vorliegenden Bestimmungsverfahren beschreibt die stoffliche Verwertungsrate  $SV_a$  die Einbindung von alternativen Materialien  $a$  in das Endprodukt Zement. Die energetische Verwertungsrate  $EV_{a,x}$  zeigt auf, welcher Massenanteil der betrachteten ARM bzw. ABS im Zementwerk  $x$  nutzbare Energie für den Zementherstellungsprozess liefert. Diese beiden Verwertungsraten zusammengezählt ergeben die Gesamtverwertungsrate  $V_{a,x}$ :

$$V_{a,x} = SV_a + EV_{a,x}$$

Je höher die Gesamtverwertungsrate ausfällt, desto grösser ist der Anteil des betrachteten alternativen Materials welcher im entsprechenden Zementwerk tatsächlich genutzt werden kann.

#### 3.2 Stoffliche Verwertungsrate

Wie in Kapitel 2.3 ausgeführt, werden ARM und ABS bei ihrem Einsatz in der Zementherstellung in unterschiedliche Materialfraktionen umgewandelt. Die Bestimmung der Verwertungsraten von alternativen Materialien ist vom Nutzen dieser Fraktionen im Hinblick auf die Zementqualität sowie vom Nutzen der bei der Umwandlung freigewordenen Energie abhängig.

Für ARM und ABS wird deshalb vorgeschlagen, den in Klinker eingebauten Anteil der alternativen Materialien (die genutzten Materialfraktionen) als stofflich verwertet zu betrachten. Dieser Teil des Bestimmungsverfahrens basiert auf der Arbeit von Aldrian et al. (2020). Folglich berechnet sich die stoffliche Verwertungsrate  $SV_a$  als Anteil des alternativen Materials  $a$  im Eingang, welcher bei einer Verbrennung als Asche übrigbleibt, sprich dem Aschegehalt  $w_{\text{Asche},a}$ <sup>7</sup>:

$$SV_a = \frac{m_a^{\text{in}} w_{\text{Asche},a}}{m_a^{\text{in}}} = w_{\text{Asche},a}$$

#### 3.3 Energetische Verwertungsrate

Zur Bestimmung der energetischen Verwertungsrate von ARM und ABS muss zunächst die Energieeffizienz des betrachteten Zementwerks ermittelt werden. Diese bestimmt, welcher Anteil des energetischen Inhalts von alternativen Materialien dem Zementherstellungsprozess zur Verfügung steht. Je grösser die Energieeffizienz der Anlage, desto grösser ist der Anteil der brennbaren Masse, welcher auch tatsächlich den Zementherstellungsprozess antreibt.

---

<sup>7</sup> Aschegehalt = 100 % - Glühverlust

Aus diesem Grund schlagen wir vor, die Energieeffizienz einer Anlage bei der Bestimmung der energetischen Verwertungsraten von ARM und ABS zu berücksichtigen.<sup>8</sup> Die Energieeffizienz eines Zementwerks  $x$  wird dabei durch den Anlagenwirkungsgrad  $\eta_x$  beschrieben. Um auszudrücken, wie hoch die energetische Verwertungsrate  $EV_{a,x}$  eines alternativen Materials  $a$  in einem Zementwerk  $x$  ist, wird der brennbare Massenanteil des alternativen Materials mit  $\eta_x$  multipliziert:

$$EV_{a,x} = \frac{m_{a,brennbar}^{in} \eta_x}{m_a^{in}}$$

Der Anlagenwirkungsgrad  $\eta_x$  beschreibt die Effizienz einer technischen Einrichtung mit dem Verhältnis der Nutzenergie zur zugeführten Energie. Für Zementwerke wird hierzu im Prinzip die chemisch im Zement gebundene Energie durch die total zugeführte Energie geteilt. Dieses Verhältnis unterscheidet sich je nach Anlagentechnik, Standort, Betriebsweise und verwendeten Materialien und muss deswegen für jedes Zementwerk einzeln bestimmt werden.

Es gibt eine Vielzahl von Berechnungsverfahren, welche den Anlagenwirkungsgrad  $\eta_x$  annähern. Hoenig und Harrass (2016) beispielsweise entwickelten den *energy performance index*  $\varepsilon$ , welcher die für die Herstellung von Klinker benötigte Energie durch den Brennstoffenergieinput abzüglich der Wärmeverluste teilt. Dieses Berechnungsverfahren widerspricht der grundsätzlichen Berechnungsmethodik für Wirkungsgrade. Für die technisch korrekte Bilanzierung wird von Weiss (2012) empfohlen, den Anlagenwirkungsgrad von Abfallverbrennungsanlagen anhand der Norm 3460 Blatt 2 des Vereins Deutscher Ingenieure zu berechnen (VDI, 2014).

Zur Beschreibung des Einsatzes von ARM und ABS in Zementwerken macht es Sinn, den in VDI-Norm 3460 Blatt 2 beschriebenen Netto-Anlagenwirkungsgrad  $\eta_{x,Netto}$  zu verwenden. Dieser berücksichtigt, dass Energieflüsse anlagenintern zirkulieren (beispielsweise thermische Energie die vom Klinkerkühler zum Vorwärmer strömt) und zieht somit einen Bilanzkreis wie skizziert in Abbildung 3.

Für Zementwerke bedeutet dies, die Netto-Zielenergie (chemische Energie des ausgehenden Zements) durch die insgesamt dem Bilanzkreis (Zementwerk) zugeführte Einsatzenergie (alle in das Zementwerk eingehenden Energieflüsse in Abbildung 3) zu teilen. Die Netto-Zielenergie setzt sich dabei aus der chemischen Energie des ausgehenden Klinkers und seiner Zumahlstoffe zusammen. Die chemische Energie des Klinkers kann mit der Energiemenge angenähert werden, welche für die endotherme chemisch-mineralogische Klinkerbildung bei 1'450 °C nötig ist. Diese Energiemenge ist in erster Linie von den verwendeten Rohmaterialien abhängig und kann mit dem *VDZ Code of practice Vt 10 on the Execution and Evaluation of Clinker Kiln Performance Tests* berechnet werden. Typische Werte für Klinker liegen hierfür im Bereich von 1.59-1.84 GJ/t (Hoenig & Harrass, 2016).

Eine Übersichtsrechnung mit dem durchschnittlichen Wärmeenergieverbrauch der Schweizer Klinkerproduktion 2021 (3.1 GJ/t (cemsuisse, 2021)) ergibt, dass der Netto-Anlagenwirkungsgrad  $\eta_{CH,Netto}(2021)$  ungefähr im Bereich von 51-59 % liegt.<sup>9</sup> Diese Bandbreite ist lediglich als Anhaltspunkt zu verstehen. Für eine abschliessende Beurteilung, müssen anlagenspezifische Werte verwendet werden.

<sup>8</sup> Dieses Vorgehen wird von der *Critical Materials and Resource Efficiency Group* der Empa seit Jahren verwendet, um den energetisch verwerteten Anteil von brennbarem Material aus dem Elektroaltgerätrecycling zu bestimmen.

<sup>9</sup>  $\eta_{CH,Netto}(2021) \approx \frac{1.59 \frac{GJ}{t}}{3.1 \frac{GJ}{t}} = 51 \% \text{ bzw. } \frac{1.84 \frac{GJ}{t}}{3.1 \frac{GJ}{t}} = 59 \%$

(bezogen auf Klinker – unter Vernachlässigung der chemischen Energie der Zumahlstoffe und der elektrischen Energie)

Um nun die energetische Verwertungsrate zu bestimmen, muss vom Anteil welcher nicht als Asche übrigbleibt, der trockene, entsäuerte Anteil des alternativen Materials  $a$  (sprich der brennbare Massenanteil) mit dem Netto-Anlagenwirkungsgrad  $\eta_{x,Netto}$  des Zementwerks  $x$  multipliziert werden. Der Ascheanteil wird subtrahiert, da dieser schon bei der stofflichen Verwertung berücksichtigt wurde. Der Feuchtegehalt wird abgezogen, da die Trocknung von ARM und ABS einen Energieaufwand darstellt. Geogenes  $\text{CO}_2$  entweicht während der endothermen Calcinierung aus Karbonaten ins Abgas und wird somit nicht als verwertet gezählt. Entsprechend berechnet sich die energetische Verwertungsrate  $EV_{a,x}$  folgendermassen:

$$EV_{a,x} = \frac{m_a^{\text{in}} (1 - w_{\text{H}_2\text{O},a} - w_{\text{CO}_2 \text{ geogen},a} - w_{\text{Asche},a}) \eta_{x,Netto}}{m_a^{\text{in}}} = (1 - w_{\text{H}_2\text{O},a} - w_{\text{CO}_2 \text{ geogen},a} - w_{\text{Asche},a}) \eta_{x,Netto}$$

Der Anteil an während der Klinkerproduktion aus alternativem Material entsäuertem geogenem  $\text{CO}_2$  kann stöchiometrisch über den Anteil an Karbonaten in ARM und ABS abgeschätzt werden. Alternativ ist auch eine stöchiometrische Annäherung über den Anteil an Erdalkalioxiden in der Asche des alternativen Materials möglich.

### 3.4 Rechenbeispiele

Zur Veranschaulichung des Bestimmungsverfahrens werden nachfolgend für das ARM Strassensammlerschlamms (SSS) und den ABS Altreifen (AR) jeweils die verwerteten Anteile ausgerechnet. In diesem Beispiel wird von einem Zementwerk  $z$  ausgegangen, welches einen Netto-Anlagenwirkungsgrad  $\eta_{z,Netto}$  von 70 % aufweist. Dieser Wert liegt etwas über dem in Kapitel 3.3 abgeschätzten durchschnittlichen Netto-Anlagenwirkungsgrad von Schweizer Zementwerken  $\eta_{\text{CH},Netto}$  (2021), als grobe Abschätzung für ein Zementwerk auf dem neusten Stand der Technik. Die zur Bestimmung der Verwertungsdaten benötigten Daten der alternativen Materialien sind in Tabelle 1 aufgeführt.

**Tabelle 1** Materialspezifische Parameter des Strassensammlerschlamms und der Altreifen. Der Feuchtegehalt der SSS und der Aschegehalt der AR stammt aus einem von cemsuisse erhaltenen Datensatz. Die übrigen Parameter stammen von Beckmann & Ncube (2007) bzw. wurden eigens abgeschätzt.

	<b>ARM</b> <b>Strassensammlerschlamms (SSS)</b>	<b>ABS</b> <b>Altreifen (AR)</b>
Aschegehalt <sup>10</sup>	60 %	13 %
Feuchtegehalt <sup>11</sup>	29 %	2 %
CaCO <sub>3</sub> -Anteil	10 %	1 %
MgCO <sub>3</sub> -Anteil	2 %	0 %

<sup>10</sup> Für die Bestimmung des Aschegehalts kann gemäss der Probenvorbereitung der Norm EN 196-2 vorgegangen werden (Aldrian et al., 2020): Das zu untersuchende Material wird auf < 0.5 mm gebrochen und anschliessend für 2 h bei 950 °C in einem Muffelofen behandelt. Die Veraschung bei 1450 °C würde präzisere Werte liefern, da dies die Bedingungen im Drehrohrofen realistischer abbildet. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der Aschegehalt sich über 950 °C nicht mehr stark verändert (Sarc et al., 2020).

<sup>11</sup> Der Feuchtegehalt kann beispielsweise thermogravimetrisch bestimmt werden.

Gemäss den in Kapitel 3.2 und 3.3 vorgestellten Formeln ergeben sich hiermit für die stoffliche Verwertungsrate folgende Werte:

$$SV_{SSS} = w_{Asche,SSS} = 60 \%$$

$$SV_{AR} = w_{Asche,AR} = 13 \%$$

Zur Berechnung der energetischen Verwertungsrate muss zunächst das in SSS und AR enthaltene geogene CO<sub>2</sub> mittels dem Karbonatanteil stöchiometrisch bestimmt werden. Dabei wird angenommen, dass der gesamte Karbonatanteil mit der Summe des CaCO<sub>3</sub>- und MgCO<sub>3</sub>-Anteils angenähert werden kann und komplett entsäuert wird. Dafür wird die nachfolgende Formel verwendet:

$$w_{CO_2 \text{ geogen},a} = w_{CaCO_3,a} \frac{M_{CO_2}}{M_{CaCO_3}} + w_{MgCO_3,a} \frac{M_{CO_2}}{M_{MgCO_3}} = w_{CaCO_3,a} \frac{44.01 \frac{g}{mol}}{100.09 \frac{g}{mol}} + w_{MgCO_3,a} \frac{44.01 \frac{g}{mol}}{84.31 \frac{g}{mol}}$$

$$= 0.4397 w_{CaCO_3,a} + 0.5220 w_{MgCO_3,a}$$

Unter Anwendung dieser Formel und der in Kapitel 3.3 vorgestellten Formel lässt sich die energetische Verwertungsrate berechnen:

$$EV_{SSS,z} = (1 - w_{H_2O,SSS} - w_{CO_2 \text{ geogen},SSS} - w_{Asche,SSS}) \eta_{z,Netto}$$

$$= (1 - w_{H_2O,SSS} - (0.4397 w_{CaCO_3,SSS} + 0.5220 w_{MgCO_3,SSS}) - w_{Asche,SSS}) \eta_{z,Netto}$$

$$= (1 - 0.29 - (0.4397 \times 0.10 + 0.5220 \times 0.02) - 0.60) \times 0.70$$

$$= (1 - 0.29 - 0.05 - 0.60) \times 0.70 = 0.06 \times 0.70 = 0.04 = 4 \%$$

$$EV_{AR,z} = (1 - w_{H_2O,AR} - w_{CO_2 \text{ geogen},AR} - w_{Asche,AR}) \eta_{z,Netto}$$

$$= (1 - w_{H_2O,AR} - (0.4397 w_{CaCO_3,AR} + 0.5220 w_{MgCO_3,AR}) - w_{Asche,AR}) \eta_{z,Netto}$$

$$= (1 - 0.02 - (0.4397 \times 0.01 + 0.5220 \times 0) - 0.13) \times 0.70$$

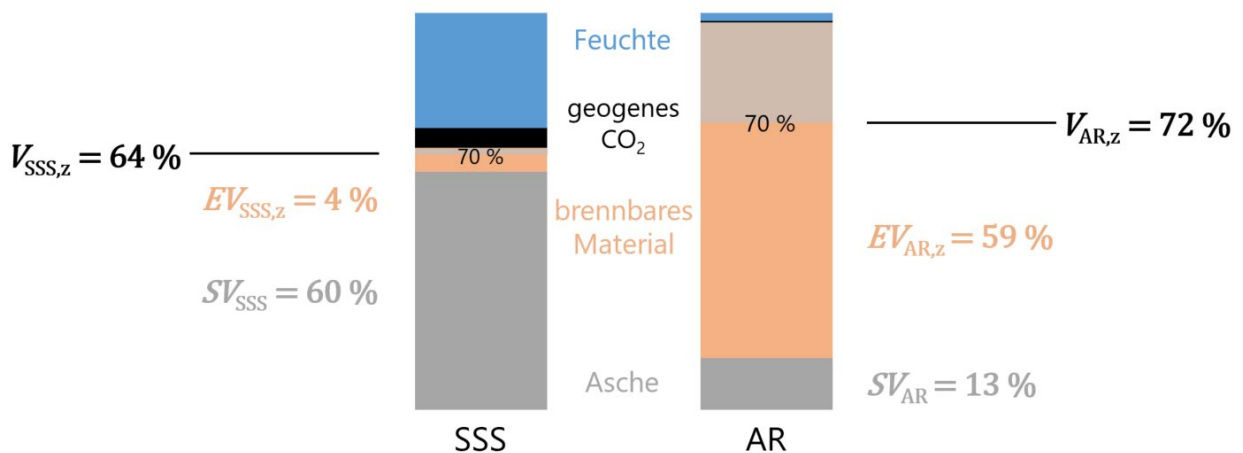
$$= (1 - 0.02 - 0.00 - 0.13) \times 0.70 = 0.85 \times 0.70 = 0.59 = 59 \%$$

Die Gesamtverwertungsrate ergibt sich aus der Summe der stofflichen und energetischen Verwertungsrate des betrachteten Materials:

$$V_{SSS,z} = SV_{SSS} + EV_{SSS,z} = 60 \% + 4 \% = 64 \%$$

$$V_{AR,z} = SV_{AR} + EV_{AR,z} = 13 \% + 59 \% = 72 \%$$

Somit können bei Strassensammlerschamm 60 % der Masse im Zementwerk z als stofflich und 4 % der Masse als energetisch verwertet beurteilt werden. Bei Altreifen können 13 % als stofflich und 59 % als energetisch verwertet beurteilt werden. In Abbildung 5 wird das hier vorgestellte Rechenbeispiel grafisch veranschaulicht.



**Abbildung 5** Visualisierung des hier vorgestellten Bestimmungsverfahrens am Beispiel des Einsatzes von Strassensammlerschamm (SSS) und Altreifen (AR) in einem Zementwerk z mit einem Netto-Anlagenwirkungsgrad von 70 %. Die Gesamtverwertungsrate der betrachteten Materialien ist die die Summe ihrer stofflichen und energetischen Verwertungsrate.

## 4 Diskussion

### 4.1 Eigenschaften des Bestimmungsverfahrens

Das hier vorgestellte Verfahren zur Bestimmung der Verwertungsraten für den Einsatz von ARM und ABS in Zementwerken berücksichtigt die während der Zementherstellung ablaufenden Prozessschritte. Der Fokus liegt dabei auf dem tatsächlichen stofflichen und energetischen Nutzen, welche alternative Materialien dem Zementherstellungsprozess beisteuern. Die Methodik ermöglicht es, das Ausmass an stofflicher und energetischer Verwertung einzeln aufzuschlüsseln. Im Gegensatz zum gegenwärtig vorherrschenden Ansatz, wonach Eingänge von ARM und ABS, welche in den Zementherstellungsprozess eingehen, generell als verwertet gelten, ist das hier vorgeschlagene Verfahren zwar komplexer, erlaubt aber eine differenzierte Betrachtung. Wichtige Eigenschaften des Verfahrens werden nachfolgend erläutert:

- Die Berechnung der Verwertungsraten lässt sich in wenigen Formeln zusammenfassen. Diese sind **für beliebige alternative Materialien und Zementwerke anwendbar**.
- Zementwerke verwerten ARM und ABS vollständig im Sinne, dass es keine zu deponierenden Rückstände gibt. In unserem Bestimmungsverfahren wird zusätzlich **die Energieeffizienz des jeweils betrachteten Zementwerks explizit mitberücksichtigt**, um die physikalische Wirklichkeit möglichst präzise zu beschreiben.
- Bereits jetzt werden ARM und ABS vor ihrer Verwendung eingehend auf ihre Zusammensetzung und ihr Abbrandverhalten untersucht. Wichtig für das hier vorgestellten Verfahren ist insbesondere die Bestimmung des Feuchte- und des Aschegehalts. Das Bestimmungsverfahren **baut somit auf ohnehin erhobenen Daten auf**.
- Das Verfahren **erlaubt Vergleiche** zwischen verschiedenen alternativen Materialien und Zementwerken bezüglich dem verwerteten Anteil. Für Vergleiche mit anderen industriellen Verbrennungsanlagen als Zementwerken sind gegebenenfalls Anpassungen der Berechnungsmethodik notwendig (Kapitel 4.2).

Wie in Kapitel 3.2 ausgeführt, entspricht für ein alternatives Material  $a$  die stoffliche Verwertungsrate  $SV_a$  dem Aschegehalt  $w_{Asche,a}$ . Aldrian et al. (2020) schlagen nebst diesem Ansatz auch vor, nur denjenigen Anteil der Asche als stofflich verwertet anzurechnen, welcher tatsächlich für die Zementherstellung benötigt wird (sprich Ca, Fe, Al und Si, aber nicht Pb oder Cd beispielsweise (Abbildung 4)). Im vorliegenden Bestimmungsverfahren wurde auf eine gesonderte Betrachtung der verschiedenen Aschebestandteile verzichtet. Bei ausreichender Datenlage kann dies jedoch berücksichtigt und die stoffliche Verwertungsrate  $SV_a$  dahingehend angepasst werden.

Bei der Anwendung des Bestimmungsverfahrens kommt der Berechnung der Energieeffizienz des jeweils betrachteten Zementwerks eine zentrale Rolle zu. Um möglichst konsistent alle relevanten Energieflüsse zu berücksichtigen, sollten hier wenn möglich standardisierte Verfahren verwendet werden. Wie in Kapitel 3.3 erwähnt, wird in der Literatur empfohlen den Anlagenwirkungsgrad anhand der VDI-Norm 3460 Blatt 2 zu berechnen. Diese Norm gilt gemäss ihrem Einleitungskapitel ausdrücklich auch für die Bilanzierung von Zementwerken, wurde jedoch bis anhin in erster Linie auf Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) angewandt. Eine Anwendung auf Zementwerke bedarf grösster Sorgfalt, insbesondere bezüglich der Berücksichtigung der chemischen Energie der Ausgänge.

## 4.2 Anwendungsbereich und Grenzen

Das hier vorgestellte Verfahren weist Material- und Zementwerk-spezifische Verwertungsraten von alternativen Materialien aus. Hierbei wird der Fokus auf den tatsächlich verwerteten Massenanteil von alternativen Materialien gelegt. Bei ausreichender Datenlage können dabei sowohl der Einsatz unterschiedlicher alternativer Materialien in einem Zementwerk wie auch der Einsatz eines alternativen Materials in verschiedenen Zementwerken untereinander verglichen werden.

In der vorliegenden Form ist das Bestimmungsverfahren auf Zementwerke ausgelegt. Die Beschreibung des Einsatzes von alternativen Materialien in anderen industriellen Verbrennungsanlagen (KVA, Industriefeuerungen, etc.) setzt gegebenenfalls Anpassungen der Methodik voraus. Wie bei der vorliegenden Methodik für Zementwerke ist darauf zu achten, dass Aufbau und Funktionsweise sowie alle relevanten Massen- und Energieflüsse (thermisch, elektrisch sowie chemisch) für den jeweiligen Anlagentyp berücksichtigt werden (Systemgrenzen). Allfällige Vergleiche zwischen verschiedenen Typen von Verbrennungsanlagen erfordern zudem eine repräsentative Auswahl von Anlagen und alternativen Materialien.

Durch die Bestimmung der Verwertungsraten beschreibt das Verfahren den Einsatz von alternativen Materialien in Zementwerken. Priorisierungen des Einsatzes von alternativen Materialien in *verschiedenen* Verwertungsanlagen sollten im Rahmen eines gesellschaftlichen Diskurses erfolgen. Generell sollte sich dieser an ökologischen, ökonomischen und sozialen Kriterien ausrichten.

In der hier beschriebenen Methodik werden stoffliche Verwertungsrate  $SV_a$  und energetische Verwertungsrate  $EV_{a,x}$  ohne jegliche Gewichtung zu einer Gesamtverwertungsrate  $V_{a,x}$  addiert. Beurteilt man aus gesellschaftlicher Sicht in erster Linie nach der Kreislauffähigkeit von Materialien, kann es jedoch Sinn machen, dass die stoffliche Verwertungsrate  $SV_a$  höher gewichtet werden – bei einem Fokus auf maximale Energienutzung die energetische Verwertungsrate  $EV_{a,x}$ .

## 5 Fazit

In dieser Studie wurde ein Verfahren zur Bestimmung der Verwertungsraten von ARM und ABS in Zementwerken entwickelt. Dieses berücksichtigt die Prozessschritte innerhalb von Zementwerken und ermöglicht das Ausweisen einer Material- und Zementwerk-spezifischen Gesamtverwertungsrate. Letztere setzt sich aus stofflicher und energetischer Verwertungsrate zusammen, wobei für die Berechnung der energetischen Verwertungsrate die Energieeffizienz des betrachteten Zementwerks herangezogen wird.

Die Methode gewichtet die stoffliche und energetische Verwertung je gleich stark. Je nach untersuchtem Teilaspekt kann eine stärkere Gewichtung der stofflichen Verwertung (Kreislauffähigkeit von Materialien) bzw. der energetischen Verwertung (maximale Energienutzung) aber sinnvoll sein. Eine Priorisierung des Einsatzes von alternativen Materialien in verschiedenen Verwertungsanlagen würde einen gesellschaftlichen Diskurs auf der Grundlage weitergehender ökologischer Analysen sowie der ökonomischen und sozialen Aspekte der Nachhaltigkeit erfordern.

Das hier vorgestellte Bestimmungsverfahren kann sowohl für Betreiber von Zementwerken und Behörden, als auch in der politischen und wissenschaftlichen Diskussion potenziell von Nutzen sein. Ein mit der erforderlichen Dekarbonisierung einhergehendes, steigendes Interesse für alternative Materialien kann die Nachfrage nach ARM und ABS noch verstärken. Vor diesem Hintergrund kann das Verfahren wertvolle Informationen zum Einsatz von alternativen Materialien in Zementwerken liefern.

## 6 Quellen

- Aldrian, A., Viczek, S. A., Pomberger, R., & Sarc, R. (2020). Methods for identifying the material-recyclable share of SRF during co-processing in the cement industry. *MethodsX*, 7, 100837. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100837>
- Baier, H., & Horix, M. (2014). Moderne Zementwerke und strategische Ansätze zur Aufbereitung von Ersatzbrennstoffen. In *Energie aus Abfall—Band 11* (S. 13).
- Beckmann, M., & Ncube, S. (2007). *Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen hinsichtlich brennstofftechnischer Eigenschaften* (1. Aufl). Witzhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie.
- CEMBUREAU. (2020). *Cementing the European Green Deal*.
- cemsuisse. (2016). *Schweizer Zement CEM II/B - Umweltdeklaration nach SN EN 15804*.
- cemsuisse. (2020). *Roadmap 2050—Klimaneutraler Zement als Ziel*.
- cemsuisse. (2021). *Kennzahlen 2021*.
- Engin, T., & Ari, V. (2005). Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems—A case study. *Energy Conversion and Management*, 12.
- European Commission. Joint Research Centre. (2019). *Best Available Techniques (BAT) reference document for waste incineration: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/761437>
- Gao, T., Shen, L., Shen, M., Liu, L., & Chen, F. (2016). Analysis of material flow and consumption in cement production process. *Journal of Cleaner Production*, 112, 553–565. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.054>
- Hoenig, V., & Harrass, R. (2016). *Evaluation of the energy performance of cement kilns in the context of co-processing*. European Cement Research Academy (ecra).
- Hoenig, V., Seiler, C., Bodendiek, N., & Hoppe, H. (2015). *Einsatz alternativer Rohstoffe im Zementherstellungsprozess—Hintergrundwissen, technische Möglichkeiten und Handlungsempfehlungen*. VDZ.
- Nhuchhen, D. R., Sit, S. P., & Layzell, D. B. (2021). Alternative fuels co-fired with natural gas in the precalciner of a cement plant: Energy and material flows. *Fuel*, 295, 120544. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120544>
- Obrist, M. D., Kannan, R., Schmidt, T. J., & Kober, T. (2021). Decarbonization pathways of the Swiss cement industry towards net zero emissions. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125413. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125413>
- Quaschnig, V. (2015). *Regenerative Energiesysteme: Technologie—Berechnung—Simulation*. Carl Hanser.
- Sarc, R., Lorber, K. E., & Pomberger, R. (2016). Manufacturing of Solid Recovered Fuels (SRF) for Energy Recovery Processes. In *Waste Management, Volume 6* (S. 17).
- Sarc, R., Viczek, S. A., Aldrian, A., Lorber, K. E., & Pomberger, R. (2020). Stoffliche Verwertung bei der energetischen Nutzung von Ersatzbrennstoffen in der Zementindustrie. In *Energie aus Abfall, Band 17* (S. 14).
- Schulze, S. (2019). *Clinker formation and characterisation Part I*.
- VDI. (2014). *VDI 3460-2\_2014\_06*.
- Weiss, V. (2012). *Vorgaben zur Anwendung des R1-Kriteriums der Abfallrahmenrichtlinie*. 19.
- Zeschmar-Lahl, B., Schönberger, H., & Waltisberg, J. (2020). *Abfallmitverbrennung in Zementwerken* (S. 138).

