

# C T H E R M I S C H E A B F A L L B E H A N D L U N G



Abb. 1: Hausmüll (Quelle: [www.zeit.de](http://www.zeit.de))

## 1 Einleitung

Zweck der thermischen Abfallbehandlung ist es, nicht mehr verwendbare Abfälle und darin vorhandene Schadstoffe stofflich in Rückstände umzuwandeln, die wesentlich weniger Volumen einnehmen. Dabei sollen keine Schadstoffe anfallen.

Die Rückstände sollten wieder verwertbar sein und die beim Prozess frei gewordene Wärme sollte genutzt werden.

Die energetische Nutzung kann eine elektrische Produktion und/oder die Lieferung von Wärme sein.

Was den Hausmüll betrifft, so wird durch die Verbrennung die Masse der Verbrennungsrückstände auf ca. 20% der Müllmasse reduziert. Das Volumen beträgt nur noch 10% des ursprünglichen Volumens.

*In Luxemburg fielen 2021 179 800 Tonnen hausmüllähnliche Abfälle an. Dies entspricht 286 kg/Einwohner.*

*Davon wurden 165 000 Tonnen verbrannt.*

*Die Verbrennung erfolgt bei der Firma SIDOR in Leudelingen. Dies ist eine Müllverbrennungsanlage, die man auch als Müllheizkraftwerke bezeichnet, da sie zusätzlich zur Wärme auch elektrische Energie produziert.*

*Die maximale elektrische Leistung beträgt 17 MW, die Wärmeabgabe in Fernwärmenetz kann maximal 18 MW betragen. Beide Werte beeinflussen sich gegenseitig.*

*2021 wurden 100 000 MWh elektrische Energie produziert.*

## 2 Behandlung der Abfälle

In Abb.2 ist die Grafik eines Müllheizkraftwerkes dargestellt, in der man sämtliche Vorgänge des Prozesses erkennt.

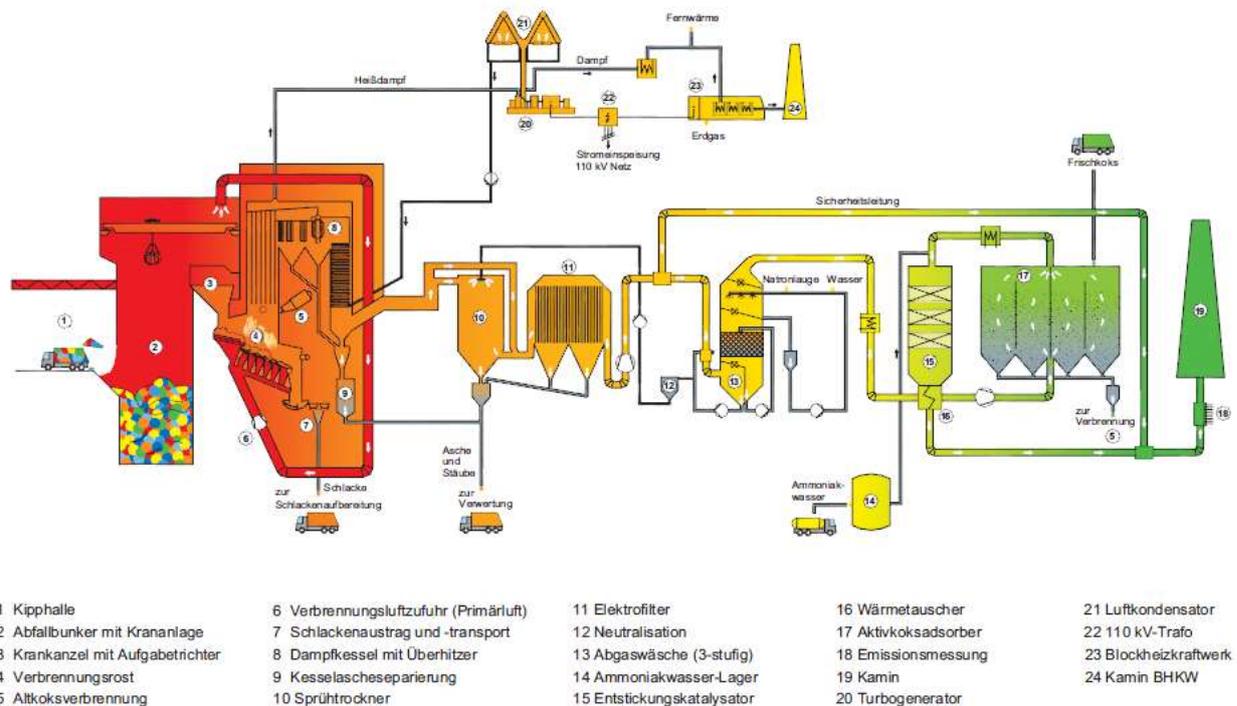


Abb.2: Müllheizkraftwerk (Quelle: [www.aez-asdonkshof.de](http://www.aez-asdonkshof.de), überarbeitet)

### 2.1 Aufbereitung

Die angelieferten Abfälle, volkstümlich als Müll oder Restmüll bezeichnet, werden zunächst auf eine Halde oder in einen Bunker entladen (Abb.3) und bis zur weiteren Verarbeitung gelagert.

Mit einem Greifarm werden die Abfälle dann der weiteren Behandlung zugeführt.

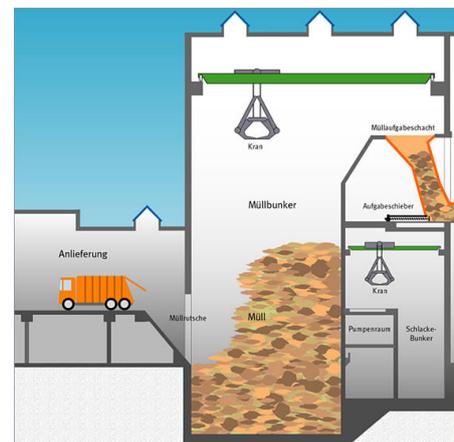


Abb.3: Müllanlieferung und -bunker (Quelle: [evo-ag.de](http://evo-ag.de))

## 2.2 Thermische Behandlung

Man unterscheidet grundsätzlich drei verschiedene Verfahren der Wärmbehandlung: die **Verbrennung**, die **Pyrolyse** und die **Vergasung**.

### 2.1.1 Verbrennung

Bei dieser am häufigsten verwendeten thermischen Behandlung werden die Abfälle unter der Zugabe von Luft verbrannt. Hierzu gibt es verschiedene Apparate/Bauformen der Verbrennungsräume.

#### ○ Rostfeuerung

Bei **Hausmüll** verwendet man meistens eine so genannte **Rostfeuerung**.

Auf einem schräg angeordneten Gitterrost (Abb.4) wird der Müll aufgelockert und vergleichmäßig. Die warme Verbrennungsluft trocknet den Müll und zündet ihn.

Teilweise werden zusätzlich Brennstoffe wie Kohle, Erdgas oder Öl verbrannt, um die Anlage vorzuheizen bzw. eine gesetzlich vorgeschriebene Mindesttemperatur von 850°C zu erreichen.

Der Müll wird auf dem Gitterrost weiterbewegt, die zur Verbrennung erforderliche Luft strömt von unten nach. Teilweise wird der Glut von oben so genannte Sekundärluft zugeführt.

Die durch die Verbrennung anfallenden **Schlacke** und ein Teil der **Asche** werden nach dem Rost ausgetragen.

Die zur Trocknung und zum Verbrennen benötigte Verweilzeit des Brenngutes wird über die Bewegungsgeschwindigkeit auf den Rosten gesteuert.

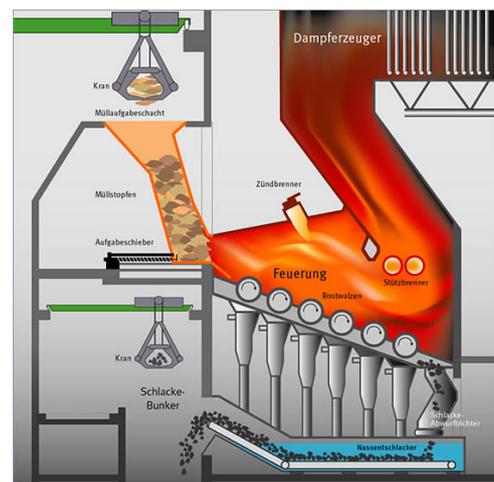


Abb.4: Rostfeuerung (Quelle: evo-ag.de)

#### ○ Drehrohröfen

Daneben verwendet man **Drehrohröfen** (Abb.5), insbesondere wenn zusätzlich zum **Hausmüll Schlämme** oder **Abfälle** aus der **Industrie** verbrannt werden sollen. In ihnen können neben Feststoffen auch Flüssigkeiten und unterhalb der Zündtemperatur schmelzende Abfälle verbrannt werden.

Die Drehgeschwindigkeit und die Neigung beeinflussen die Verweilzeit des Brenngutes im Ofen. Sie kann somit angepasst werden.

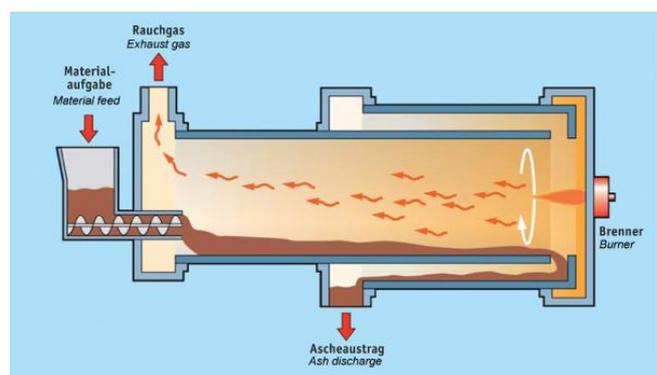


Abb.5: Drehrohröfen (Quelle: evo-ag.de)

### ○ Etagenöfen

**Etagenöfen** werden vorwiegend für **Klärschlamm** und Abfälle mit hohem Wassergehalt verwendet.

Das Brenngut wird in einem vertikal angeordneten Stahlzylinder über mehrere Etagen (Abb.6) von oben nach unten bewegt. Bei relativ geringen Temperaturen im Eingangsbereich (ca. 100°C) trocknet das Gut, im unteren Bereich verbrennt es.

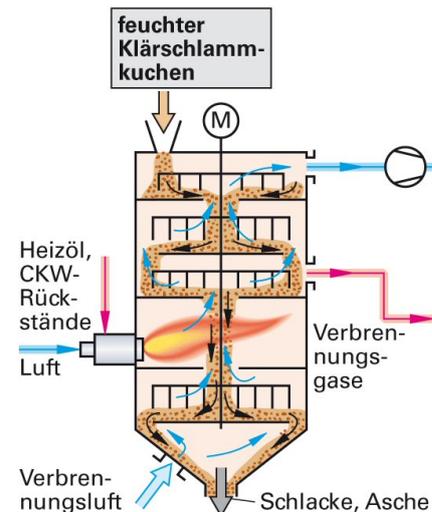


Abb.6: Etagenofen (Quelle: Chemietechnik (Ignatowitz), überarbeitet)

### ○ Wirbelschichtreaktoren

Zusätzlich gibt es noch die **Wirbelschichtreaktoren**, bei denen das Brenngut einem Fließbett (einer Wirbelschicht) aus inertem Material (z.B. Sand oder Asche) zugeführt wird. Darin verbrennt es schwebend. Hierbei müssen allerdings alle Partikel des Brenngutes eine ähnliche Partikelgröße haben. Außerdem dürfen keine zu großen Lastschwankungen stattfinden.

Wirbelschichtreaktoren sind für Hausmüll weniger geeignet, man verwendet sie beispielsweise für flüssige, pastöse und feste **Abfälle** aus der **Industrie**.

### 2.1.2 Pyrolyse

Als Pyrolyse oder Verschwelung bezeichnet man den Vorgang, bei dem die Abfälle sich bei hohen Temperaturen unter Luftausschluss zersetzen.

Daraus entsteht brennbares Pyrolysegas und brennbarer Pyrolysekoks. Durch Verbrennen dieser Stoffe kann die Wärme erzeugt werden, die zur Pyrolyse oder zu nachfolgenden Verbrennungsvorgängen erforderlich ist.

### 2.3 Dampferzeuger

Die heißen Verbrennungsgase bezeichnet man als **Rauchgase**, da sie noch feine Aschepartikel enthalten. Diese verlassen den Feuerungsraum und müssen abgekühlt werden, um bestmöglich gereinigt werden zu können.

Der untere Heizwert  $H_u$  von Hausmüll liegt je nach Zusammensetzung zwischen 7 und 12 MJ/kg.

Die Wärme wird teilweise (ca. zu einem Drittel) für den Eigenbedarf der Anlage verbraucht. Die restliche Wärme sollte sinnvoller Weise zu Heizzwecken (Fernwärmenetz) oder zur Stromproduktion verwendet werden.

Die heißen Rauchgase strömen im Dampferzeuger entlang der kilometerlangen Kühlrohre, in denen Wasser die Wärme aufnimmt und dadurch verdampft.

## 2.4 Stromerzeugung

Die Stromerzeugung bei einer Müllverbrennungsanlage funktioniert ähnlich wie in einem Kohlekraftwerk.

Deutschland ist weltweit die Nation, die am meisten Energie aus thermischer Abfallbehandlung gewinnt. Der Anteil am gesamten Energiebedarf beträgt knapp 0,5%.

In Abb.7 ist die Energieerzeugung in einem Müllheizkraftwerk dargestellt.

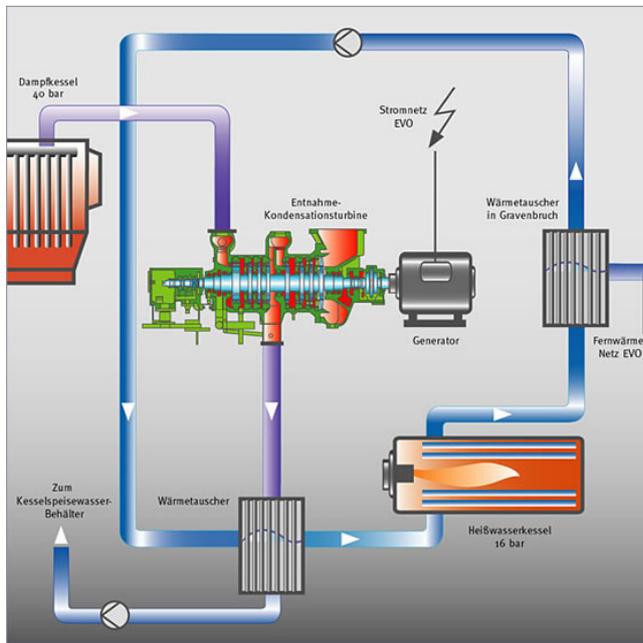


Abb.7: Strom- und Wärmeproduktion  
(Quelle:evo-ag.de)

## 3 Behandlung der Rückstände

### 3.1 Rauchgasreinigung

Die thermische Behandlung von einer Tonne Müll produziert ca. 4000 bis 7000 m<sup>3</sup> Rauchgas. Dieses enthält neben dem **Luftstickstoff** und den Verbrennungsprodukten **Kohlenstoffdioxid** CO<sub>2</sub> und **Wasser** H<sub>2</sub>O viele Schadstoffe.

Die **Art** und **Menge** der Schadstoffe hängt von dem **Abfall**, dem **Verbrennungsprozess** und den **Verbrennungstemperaturen** ab.

Die Konzentrationen schwanken häufig und auch sehr schnell, da die Zusammensetzung des angelieferten Mülls stark variieren kann. Man kann nachfolgende Stoffe im Rauchgas vorfinden:

○ Anorganische, gasförmige Verbindungen:

- **Kohlenmonoxid** CO,
- Schwefeloxide (**Schwefeldioxid** SO<sub>2</sub> und **Schwefeltrioxid** SO<sub>3</sub>),
- Stickoxide NO<sub>x</sub> (90 bis 95 % schlecht wasserlösliches **Stickstoffmonoxid** NO, 5 bis 10 Prozent **Stickstoffdioxid** NO<sub>2</sub>),
- **Chlorwasserstoff** HCl, **Fluorwasserstoff** HF.

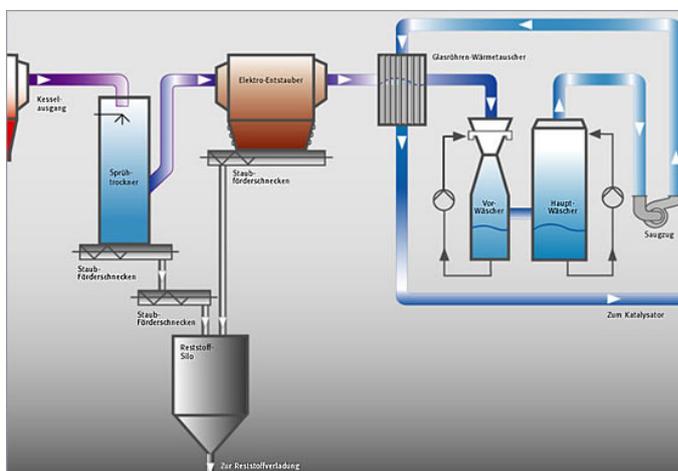
- Anorganische, feste Verbindungen:
  - feine Staubpartikel, sogenannte **Flugasche**.
  - giftige, **schwermetallhaltige** Stäube (die Quecksilber, Cadmium, Thallium u.a. enthalten).
- Giftige **Schwermetalle** im elementaren Zustand.
- Hochtoxische, **organische Verbindungen** wie **Dioxine** und **Furane** (genauer gesagt Verbindungen aus der Familie der polychlorierten Dibenzodioxine und Dibenzofurane.)

Zur Rauchgasreinigung werden mehrere Verfahrensschritte verwendet. Grundsätzlich werden Filtrationen (mechanisch, z.B. Schlauchfilter, oder elektrostatisch), Wäscher, Sprühtrockner, katalytische Reaktionen und Absorption eingesetzt.

Einzelne Rauchgasreinigungsanlagen unterscheiden sich im Aufbau und teilweise in den eingesetzten Verfahrensschritten. Hier soll am Beispiel der in Abb.2 dargestellten Anlage die Funktionsweise erklärt werden.

### 3.1.1 Sprühtrockner

Im Sprühtrockner werden die neutralisierten Abwässer aus der Nasswäsche versprüht. Da die Rauchgase nach dem Dampfkessel noch recht warm sind (Temperaturen um 230°C), verdampft der Wasseranteil des Abwassers. Es entstehen **getrocknete Salze**, die sich teilweise abscheiden und teilweise als trockene Rückstände im Gas bleiben.



Der Sprühtrockner und die nachfolgenden Apparate Elektrofilter und Wäscher sind in Abb.8 dargestellt.

Abb.8: Sprühtrockner, Elektrofilter und Wäscher Müllheizkraftwerk (Quelle: evo-ag.de)

### 3.1.2 Elektrofilter

Die im Rauchgas enthaltenen **feine Staubpartikel**, die so genannte **Flugasche**, wird mit hohem Abscheidegrad (>99%) im Elektrofilter vom Gastrom getrennt.

Die getrockneten Salze aus dem Sprühtrockner werden ebenso abgeschieden.

Durch Abklopfen in regelmäßigen Abständen fallen die abgeschiedenen Partikel nach unten und sammeln sich in einem Silo.

### 3.1.3 Wäscher

Die meisten **anorganischen Schadstoffe** werden durch Waschverfahren von der Gasphase in die flüssige Phase gebracht. Man unterscheidet dabei verschiedene Verfahren.

Häufig wird das Rauchgas zunächst mit Natronlauge besprüht. Die so entstandenen Tropfen sammeln sich unten im Wäscher. Diese Lösung wird anschließend neutralisiert, bevor sie zum Sprühtrockner gepumpt wird.

In Abb.8. ist ein zweistufiger Wäscher dargestellt.

### 3.1.4 Katalysatoren

#### ○ Stickoxidkatalysator

Hauptsächlich das schwer wasserlösliche Stickstoffmonoxid NO wird katalytisch aus dem Rauchgas entfernt.

In der DeNO<sub>x</sub>-Anlage findet diese so genannte **Entstickung** statt. Als Reduktionsmittel wird Ammoniak verwendet. Daher wird flüssiges Ammoniakwasser in den Katalysator eingespritzt. Die Stickstoff-Sauerstoff-Verbindungen aus dem Rauchgas werden mit dem Ammoniak an der Katalysatoroberfläche zu Wasserdampf und Stickstoff reduziert.

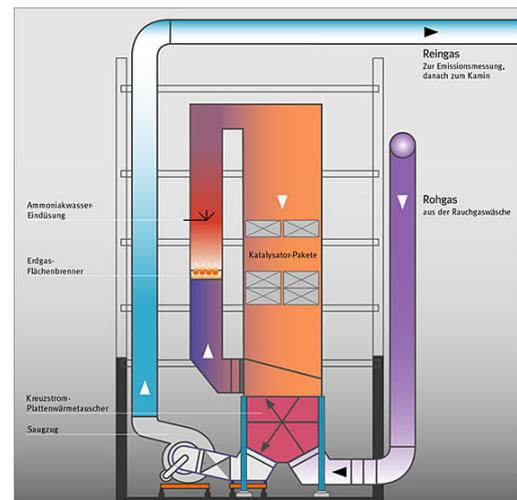
Der Vorgang entspricht dem bei den Kohlekraftwerken.

#### ○ Oxidationskatalysator

Eine Möglichkeit, die **Dioxine** und **Furane** aus dem Rauchgas zu entfernen, besteht in einer katalytischen Oxidation.

In Abb.9 ist ein Kombi-Katalysator zu Entstickung und Oxidation dargestellt.

Abb.9: Kombi-Katalysator (Quelle:evo-ag.de)



### 3.1.5 Aktivkohlefilter

Im Rauchgas enthaltene **Dioxine** und **Furane** können auch an Aktivkohle (Aktivkoks) **adsorbiert** werden.

Schwermetalle werden ebenfalls an Aktivkohle absorbiert.

*In der luxemburgischen Müllverbrennungsanlage werden Natriumhydrogencarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ) bzw. Hochofenkoks zugegeben, um die gasförmigen, anorganischen Verbindungen zu neutralisieren bzw. Schwermetalle und organische Verbindungen (Dioxine/Furane) zu absorbieren.*

*Diese Verbindungen werden mit Schlauchfiltern vom Gasstrom getrennt.*

### 3.2 Behandlung der festen Rückstände

Den größten Anteil an Rückständen (ca. 18% der Müllmasse) stellt die **Schlacke** dar, die durch die Verbrennung entsteht. Im Falle der Rostfeuerung wird dieses Brenngut in einem Wasserbad gelöscht und dann in einen Schlackenbunker befördert.

Die Schlacke wird beispielsweise zum Auffüllen von stillgelegten Stollen in Bergwerken oder im Straßenbau verwendet.

**Staub** (ca. 3% der Müllmasse) aus den Filteranlagen (mineralische Stoffe) kann bei der Zementherstellung beigemischt werden. Er wird dadurch chemisch gebunden und es werden später weniger Schadstoffe herausgewaschen.

Die Verbrennungsreste (Schlacke, Asche oder Rückstände aus den Reinigungsverfahren), die nicht wiederverwertet werden können, müssen auf Deponien gelagert werden. Dies sind beispielsweise Schwermetallsalze (aus der Rauchgaswäsche).

*Bei der Sidor entstehen ca. 17,7% Schlacke aus der Müllmasse, die im Ausland nach Abtrennung der metallischen Anteile im Straßenbau verwendet werden.*

*Der Staub aus der Rauchgasreinigungsanlage (3% der Müllmasse) wird in Halle (D) in ca. 800 m Tiefe endgelagert.*

## 4 Ökologische Gesichtspunkte

Grundsätzlich ist das energetische Nutzen des Mülls natürlich dem Deponieren vorzuziehen, da somit fossile Brennstoffe zur Gewinnung von Wärme oder Elektrizität eingespart werden kann. Dabei darf natürlich keine Umweltbelastung durch die Emission von Schadstoffen entstehen.

Besser als jede thermische Behandlung von Müll ist natürlich das **Vermeiden** von Müll. Da dies nicht ausschließlich möglich ist, gilt es neben dem Vermeiden von Müll diesen getrennt zu sammeln. Dann können die einzelnen Stoffe besser wiederverwertet (rezykliert) werden. Ein Nachteil der Mülltrennung liegt jedoch darin, dass der Heizwert des Hausmülls fällt. Insbesondere die Verbrennung von Kunststoffen (Erdölprodukte) liefert viel Wärme.

Bei einer guten Mülltrennung sind wenig Kunststoffreste und Papier im Hausmüll. Dies kann dazu führen, dass Zusatzstoffe verbrannt werden müssen, damit die benötigten Verbrennungstemperaturen erreicht werden, bei denen sich wenige Schadstoffe bilden.

Die elektrische Energiegewinnung kann ebenfalls schwierig werden.