

BE-194

**MITVERBRENNUNG VON KLÄRSCHLAMM  
IN KALORISCHEN KRAFTWERKEN**



# **MITVERBRENNUNG VON KLÄRSCHLAMM IN KALORISCHEN KRAFTWERKEN**

**UBA-BE-194**

Wien, November 2001

## **Autoren**

Siegmond Böhmer

Anna Rumpfmayr

Klaus Rapp (Technische Grundlagen)

Armin Baumgartner (Technische Grundlagen)

## **Impressum**

Medieninhaber und Herausgeber: Umweltbundesamt GmbH, Spittelauer Lände 5, A-1090 Wien  
Eigenvervielfältigung

© Umweltbundesamt GmbH, Wien, November 2001  
Alle Rechte vorbehalten (all rights reserved)  
ISBN 3-85457-614-5

## INHALT

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>9</b>
<b>1.1</b>	<b>Ziel der Studie</b> .....	<b>9</b>
<b>1.2</b>	<b>Ausgangssituation</b> .....	<b>9</b>
<b>1.3</b>	<b>Begriffsbestimmung</b> .....	<b>9</b>
<b>1.4</b>	<b>Rechtliche Grundlagen</b> .....	<b>10</b>
1.4.1	Deponierung .....	10
1.4.2	Landwirtschaftliche Verwendung.....	11
1.4.3	Kompostierung .....	11
1.4.4	Stoffliche Verwendung .....	12
1.4.5	Thermische Verwertung und Entsorgung.....	12
1.4.5.1	Luftreinhaltegesetz für Kesselanlagen.....	12
1.4.5.2	Verordnungen über die Verbrennung gefährlicher Abfälle.....	14
1.4.5.3	Mitverbrennung .....	15
1.4.5.4	Elektrizitätswirtschafts- und Organisationsgesetz (ELWOG; BGBl I Nr. 143/1998 idF BGBl I Nr. 100/2000).....	15
1.4.6	Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (BGBl. Nr. 414/1994) .....	16
<b>1.5</b>	<b>Klärschlammaufkommen und –behandlung in Österreich</b> .....	<b>17</b>
1.5.1	Klärschlammaufkommen.....	17
1.5.2	Mitverbrennungskapazitäten in bestehenden Anlagen .....	18
1.5.2.1	Zementindustrie .....	18
1.5.2.2	Keramische Industrie .....	19
1.5.2.3	Zellstoff- und Papierindustrie .....	20
1.5.2.4	Holzverarbeitende Industrie.....	20
1.5.2.5	Kraftwerke.....	21
1.5.2.6	Nicht-Eisen Metallindustrie, Stahlindustrie, Chemische Industrie.....	21
1.5.2.7	Müllverbrennungsanlagen .....	21
1.5.2.8	Übersicht über bestehende Anlagen zur Mitverbrennung von Klärschlamm .....	21
1.5.2.9	Zukünftige Verbrennungskapazitäten .....	23
<b>1.6</b>	<b>Verbrennung von Klärschlamm in Monoverbrennungsanlagen</b> .....	<b>26</b>
<b>1.7</b>	<b>Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken</b> .....	<b>27</b>
<b>1.8</b>	<b>Mitverbrennung von Klärschlamm in Wirbelschichtkesseln der Zellstoff- und Papierindustrie</b> .....	<b>28</b>
<b>2</b>	<b>TECHNISCHE VORAUSSETZUNGEN FÜR DIE MITVERBRENNUNG VON KLÄRSCHLAMM IN KOHLEKRAFTWERKEN</b> .....	<b>30</b>
<b>2.1</b>	<b>Logistik</b> .....	<b>32</b>
2.1.1	Lagerung .....	32
2.1.2	Förderung .....	33
2.1.2.1	Pumpen .....	33
2.1.2.2	Feststoffförderer.....	34
<b>2.2</b>	<b>Vorbehandlung</b> .....	<b>35</b>
2.2.1	Mechanische Entwässerung.....	36

2.2.2	Thermische Trocknung.....	37
2.2.2.1	Direkt- und Indirekttrocknung.....	37
2.2.2.2	Solare Trocknung.....	40
2.2.2.3	Beispiel für Indirekttrocknung: Klärschlamm-trocknung im Kraftwerk Weiher II.....	40
2.2.2.4	Brüden- und Abluftbehandlung aus der Trocknung.....	42
2.2.2.5	Explosions- und Brandgefahr.....	43
<b>2.3</b>	<b>Verbrennung von Klärschlamm.....</b>	<b>45</b>
2.3.1	Klärschlammspezifikation.....	45
2.3.2	Einbringen von Klärschlamm in den Kessel über Kohlemühlen.....	49
2.3.3	Einfluss auf die Prozessführung.....	50
2.3.4	Einfluss auf die Zusammensetzung und das Volumen der Abfälle bzw. Reststoffe.....	51
2.3.4.1	Volumen der Abfälle bzw. Reststoffe.....	51
2.3.4.2	Glühverlust.....	51
2.3.4.3	Ascheschmelzpunkt.....	51
2.3.4.4	Schwermetallgehalt der Abfälle bzw. Reststoffe.....	52
2.3.4.5	Qualität der Abfälle bzw. Reststoffe.....	54
<b>2.4</b>	<b>Vergasung von Klärschlämmen.....</b>	<b>56</b>
<b>2.5</b>	<b>Emissionen und Rauchgasreinigung.....</b>	<b>57</b>
2.5.1	Emissionen.....	57
2.5.2	Bestehende Maßnahmen zur Rauchgasreinigung in Kohlekraftwerken.....	61
2.5.2.1	Entstaubung.....	62
2.5.2.2	Entschwefelung.....	63
2.5.2.3	Entstickung.....	64
2.5.3	Weitere Maßnahmen zur Reduktion der Schadstoffemissionen in die Luft.....	64
2.5.3.1	Nasse Wäscher.....	64
2.5.3.2	Zerstörung von organischen Schadstoffen (Dioxine, Furane).....	64
<b>2.6</b>	<b>Werkstoffwahl.....</b>	<b>65</b>
<b>2.7</b>	<b>Energie- und Massebilanz.....</b>	<b>68</b>
2.7.1	Bilanzierung des Treibhausgases CO <sub>2</sub> .....	69
2.7.2	Bilanzierung der Treibhausgase CH <sub>4</sub> .....	70
<b>2.8</b>	<b>Weitere Möglichkeiten der Mitverbrennung von Klärschlamm.....</b>	<b>72</b>
2.8.1	Mitverbrennung in Asphaltmischgutwerken.....	72
2.8.2	Mitverbrennung in Zementöfen.....	72
2.8.3	Mitverbrennung von Klärschlamm in Abfallverbrennungsanlagen.....	73
<b>2.9</b>	<b>Mitverbrennung von Klärschlamm in Wirbelschichtkesseln der Zellstoff- und Papierindustrie.....</b>	<b>73</b>
<b>3</b>	<b>KOSTENABSCHÄTZUNG.....</b>	<b>74</b>
3.1	Vergleich der Klärschlammtransportkosten.....	74
3.2	Abschätzung der Investitionskosten.....	75
3.3	Abschätzung der Betriebskosten.....	76
<b>4</b>	<b>BEISPIELE FÜR DIE MITVERBRENNUNG VON KLÄRSCHLAMM.....</b>	<b>77</b>
4.1	Erfahrungen zur Mitverbrennung im Verbund.....	77
4.1.1	Biomasse- und Abfallvergasung im Kraftwerk Zellweg.....	77
4.1.2	Versuche zur Mitverbrennung KW St. Andrä 2.....	78

---

<b>4.2</b>	<b>Internationale Erfahrungen .....</b>	<b>84</b>
4.2.1	KW Franken II.....	85
4.2.2	KW Lausward.....	86
4.2.3	KW Heilbronn .....	87
4.2.4	EVT Energie- und Verfahrenstechnik GmbH.....	89
4.2.5	KW Buschhaus.....	90
4.2.6	KW Berrenrath.....	90
4.2.7	KW Weisweiler .....	90
4.2.8	KW Weiher II .....	90
4.2.9	KW Litvinov (Tschechien).....	91
4.2.10	KW Lünen.....	91
4.2.11	KW Farge .....	92
4.2.12	KW Karlsruhe .....	92
4.2.13	STEAG (KW Voerde).....	92
4.2.14	KW Boxberg .....	93
4.2.15	KW Hochfeld .....	94
4.2.16	KW Walheim.....	94
<b>4.3</b>	<b>Analyse der Entsorgungswege von kommunalem Klärschlamm im Raum Baden-Württemberg [Rentz, 1999].....</b>	<b>95</b>
<b>5</b>	<b>POTENTIAL DER KRAFTWERKE DES VERBUND.....</b>	<b>96</b>
<b>6</b>	<b>GLOSSAR.....</b>	<b>98</b>
<b>7</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>100</b>





## ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel dieser Studie ist es, die technischen Voraussetzungen für die Mitverbrennung von Klärschlamm in kalorischen Kraftwerken zu prüfen und das Potential dieses Behandlungsweges zu erheben.

Derzeit fallen in Österreich ungefähr 393.000 t Klärschlamm Trockensubstanz (kommunal und industriell) pro Jahr an. Aufgrund des steigenden Anschlussgrades kommunaler Abwässer an Kläranlagen und eines erhöhten Grades der Stickstoff- und Phosphorabscheidung kann dieses Volumen in den nächsten Jahren auf bis zu 440.000 t TS steigen.

Ungefähr ein Drittel des in Österreich anfallenden industriellen Klärschlammes wird zur Zeit deponiert, während knapp 44 % thermisch behandelt werden. 16,7 % des kommunalen Klärschlammes werden deponiert, 19,7 % landwirtschaftlich genutzt und ungefähr 32 % werden thermisch behandelt.

Für eine Ablagerung von Klärschlamm auf Deponien wird ab 2004 in der Regel eine thermische Behandlung (Verbrennung) mit entsprechender Nachbehandlung der Reststoffe erforderlich sein (Deponieverordnung). Diese gesetzliche Vorgabe erfordert die Schaffung zusätzlicher Kapazitäten für die Vorbehandlung und Entsorgung von Klärschlamm.

In der Studie wird von einem zukünftig zu entsorgendem Klärschlammvolumen von 440.000 t Trockensubstanz (TS) ausgegangen. Zusätzlich wird angenommen, dass die bisherigen Kapazitäten zur Kompostierung, landwirtschaftlichen Verwendung, Verwendung als Bauzuschlagsstoff und andere im wesentlichen gleich bleiben und daher der bisher deponierte Anteil inklusive dem erwarteten gesteigerten Aufkommen thermisch behandelt werden muss. Insgesamt wird dieser Anteil auf ein Volumen von 150.000 t TS pro Jahr geschätzt.

In Österreich wird der kommunale Klärschlamm der Gemeinde Wien in den drei Wirbelschichtkesseln der Abfallverbrennungsanlage des Werkes Simmeringer Haide verbrannt (Monoverbrennung). Kommunale Klärschlämme werden aber auch in einer anderen Abfallverbrennungsanlage (Wirbelschicht) und in einem Wirbelschichtkessel der Holzverarbeitenden Industrie mitverbrannt.

Industrielle Klärschlämme (hauptsächlich aus der Herstellung von Zellstoff und Papier) werden zur Zeit in den Wirbelschichtkesseln der Zellstoff- und Papierindustrie, in den Drehrohröfen der Zementindustrie und in den Öfen der keramischen Industrie thermisch behandelt bzw. stofflich verwertet.

In Österreich werden versuchsweise industrielle und kommunale Klärschlämme in Kohlekraftwerken mitverbrannt, während in Deutschland Klärschlämme bereits im Dauerbetrieb mitverbrannt werden.

Das theoretische Potential der Mitverbrennung in den österreichischen Kohlekraftwerken beträgt bei einem Substitutionsgrad von 5 Gew.-% ungefähr 95.500 t TS Klärschlamm pro Jahr.

Bei der Mitverbrennung in Kohlekraftwerken muss berücksichtigt werden, dass Klärschlamm andere Eigenschaften als Kohle aufweist. Je nach Herkunft kann die Zusammensetzung von Klärschlamm starken Schwankungen unterliegen.

So sind für die Art und den Umfang der Vorbehandlung (Lagerung, Förderung, Dosierung) der hohe Wassergehalt, die Ausgasung und damit verbunden die Geruchsentwicklung und die Gefahr der Methangasbildung entscheidende Faktoren. Klärschlamm aus der Kläranlage hat einen Trockensubstanzgehalt von ungefähr 5 %, mechanisch entwässeter Schlamm von 25 - 35 %, während getrockneter Klärschlamm je nach Art und Umfang der Trocknung Trockensubstanzgehalte zwischen 40 und 95 % aufweist.

Der Stabilisierungsgrad von Schlämmen aus biologischer Abwasserbehandlung ist eine Funktion des Schlammalters. Die übliche Anforderung an kommunale Kläranlagen beträgt

mindestens 25 Tage, wobei Klärwerke, welche dem Stand der Technik nicht entsprechen, diese Anforderung nicht immer erfüllen. Bei diesem Schlammalter sind Schlämme metastabil, d.h. eine der Schlammverwesung folgende Ausgasung erfolgt noch. Völlig stabilisiert sind solche Schlämme erst bei einem Schlammalter von > 45 Tagen. Ebenso sind anaerob stabilisierte Schlämme auch nach 28 – 30 Tagen im Faulturm ( $T = 30 - 32^{\circ}\text{C}$ ) noch nicht restlos stabilisiert.

Um Probleme mit der Geruchsentwicklung zu vermeiden, wird für die Anlieferung in Kraftwerken das „Just-in-time“ Prinzip angewendet. Die praktische Durchführung hängt aber von den Betriebszeiten des Kohlekessels ab, welche auch mittelfristig nicht vorhersehbar sind.

Falls Klärschlamm auf dem Kraftwerksgelände entwässert oder getrocknet wird, muss das anfallende Abwasser einer Abwasserreinigungsanlage oder dem Kessel zugeführt werden, wobei letztere Vorgangsweise den Wirkungsgrad erheblich mindert. Die Gefahr einer Methangasexplosion kann verringert werden, wenn die Abluft aus den Lagerungs- und Vorbehandlungsbehältern permanent abgesaugt und dem Kessel zugeführt wird oder die notwendigen Behandlungsschritte in sauerstoffarmer Atmosphäre durchgeführt werden.

Die Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken erfordert auch die Berücksichtigung folgender Punkte:

Das niedrige Verhältnis von Schwefel zu Chlor und das hohe Alkalichloridpotential von Klärschlamm kann das Korrosionsrisiko beträchtlich erhöhen, der hohe Aschegehalt fördert den Abrieb. Zusätzlich kann es wegen der Erniedrigung des Ascheerweichungspunktes zu Anbackungen im Kessel kommen.

Die Stabilität der Flamme wird vor allem vom Wassergehalt und dem Heizwert beeinflusst. Ausgefaulter Schlamm weist einen geringeren Heizwert auf als Rohschlamm, ist aber aufgrund des geringeren Methangasbildungspotentials sicherer in der Handhabung. Durch den im Vergleich zu Kohle hohen Wassergehalt von entwässertem Klärschlamm kann es zu einer Erhöhung des Abgasvolumenstromes und damit verbunden zu einer Änderung des Wärmeüberganges und der Verweilzeit der Partikel kommen. Weitere wichtige Faktoren sind die Konzentration an flüchtigen Bestandteilen und der Stickstoffgehalt von Klärschlamm.

Die Einrichtungen zur Rauchgasreinigung können durch die geänderte Rauchgaszusammensetzung negativ beeinflusst werden: zu nennen sind hier die erhöhte Flugascheabscheidung am Elektrofilter, die mögliche Deaktivierung des Katalysators zur Stickoxidreduktion (falls vorhanden) durch Alkalimetalle, As, F oder P und eine Beeinträchtigung der Entschwefelungsanlage.

Emissionsseitig wichtige Parameter sind der Gehalt an Schwermetallen und die Konzentration an CO und unverbrannten Kohlenwasserstoffen im Reingas. Der Gehalt an (flüchtigen) Schwermetallen ist wichtig, da Kohlekraftwerke im Unterschied zu Abfallverbrennungsanlagen über keine gesonderten Maßnahmen zur Schwermetallabscheidung verfügen.

Die Qualität der Abfälle bzw. Reststoffe aus der Verbrennung und der Rauchgasreinigung entscheidet über die Art der Verwertung bzw. Entsorgung. Wichtige Größen sind in diesem Fall der Glühverlust, der Schwermetallgehalt, der Gehalt an Alkaliverbindungen und Sulfaten und der Chloridgehalt.

In dem Bericht werden oben genannte Faktoren und Einflussgrößen untersucht und schwerpunktmäßig diskutiert.

Bei den Versuchen zur Mitverbrennung im Kohlekraftwerk St. Andrä wurde Klärschlamm immer in Kombination mit anderen Abfällen und mit Biomasse eingesetzt. Der Klärschlamm stammte zu 90 % aus der Zellstoff- und Papierindustrie. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Emissionswerte im Vergleich zur reinen Kohlefeuerung gleich blieben, bzw. nicht wesentlich erhöht wurden. In der Flugasche und im Abfall aus der Entschwefelung waren die Konzentrationen mancher Schwermetalle in Abhängigkeit vom Input zum Teil stark erhöht,

das Elutionsverhalten blieb aber zum größten Teil unverändert. Zum Glühverlust, einem wichtigen Parameter für die Weiterverwendung und für die Deponierung, wurden keine Angaben gemacht.

Neben der Mitverbrennung in St. Andrä werden auch die Vergasungsanlage im Kraftwerk Zeltweg und die Situation der Mitverbrennung von Klärschlamm in Deutschland beschrieben, wo bereits umfangreiche Erfahrungen vorliegen.

Das theoretische Einsparungspotential von CO<sub>2</sub> aus fossilen Energieträgern durch die Mitverbrennung von Klärschlamm wurde berechnet. Dieses ist aufgrund des hohen Energiebedarfs bei der Klärschlammvorbehandlung eher gering und beträgt unter der Annahme, dass in allen Kohlekraftwerken Österreichs 5 Gew.-% der Kohle durch Klärschlamm ersetzt werden, zwischen 24.800 und 62.500 t CO<sub>2</sub> pro Jahr.

Bezieht man die bei einer Deponierung freigesetzten Methanemissionen, welche durch die Mitverbrennung vermieden werden, in die Berechnungen ein, so beläuft sich das gesamte jährliche CO<sub>2</sub>-Einsparungspotential zwischen 279.000 und 316.000 t CO<sub>2</sub> – Äquivalenten.

## Resümee

Es wird erwartet, dass die Deponieverordnung zu einer Steigerung der thermisch zu behandelnden Klärschlammmenge führen wird. Diese Menge wird unter der Annahme, dass die bisherigen Behandlungs- und Verwendungswege gleich bleiben und unter Berücksichtigung des erwarteten Mehranfalls auf 150.000 t Trockensubstanz pro Jahr geschätzt.

In Österreich wird kommunaler Klärschlamm seit ungefähr 20 Jahren in den Wirbelschichtkesseln des Werkes Simmeringer Haide verbrannt. Ebenso existieren umfangreiche Erfahrungen über die Mitverbrennung von industriellem Klärschlamm in den Wirbelschichtkesseln der Zellstoff- und Papierindustrie, in den Drehrohröfen der Zementindustrie (nur Papierfaser-schlämme), in den Öfen der keramischen Industrie sowie in Wirbelschichtkesseln von Abfallverbrennungsanlagen.

Im Gegensatz zu Deutschland, wo Klärschlamm seit ungefähr 10 Jahren auch im Dauerbetrieb in Kohlekraftwerken (sowohl in Trocken- als auch in Schmelzkammerfeuerungen) mitverbrannt wird, gibt es in Österreich diesbezüglich nur wenige Erfahrungen.

Ein weiterer Unterschied zwischen deutschen und österreichischen Kraftwerken besteht in den jährlichen Betriebszeiten: Die österreichischen Kraftwerke werden hauptsächlich in den Wintermonaten betrieben, wenn die Stromerzeugung durch Wasserkraft niedrig, der Energiebedarf aber hoch ist.

Klärschlamm fällt aber permanent an und ist wegen seiner Gasungsaktivität nur unter hohem technischem Aufwand über längere Zeit lagerbar. Die Frage, inwieweit Kohlekraftwerke derzeit eine ganzjährige thermische Behandlung von Klärschlamm garantieren können, bedarf noch einer Klärung.

Kohlekraftwerke sind für den Einsatz eines festen Brennstofftypus mit bekannter Zusammensetzung konzipiert, welche zudem im Vergleich zu Abfällen nur geringen Schwankungen unterliegt. Im Falle der Mitverbrennung von Klärschlamm müssten entsprechende Maßnahmen für die Lagerung, die innerbetriebliche Förderung sowie für die Einbringung in den Kohlekessel getroffen werden. Je nach eingesetzter Klärschlammart und -menge ist auch eine Adaptierung der Einrichtungen zur Reinigung des Abwassers und des Rauchgases (z.B. flüchtige Schwermetalle) erforderlich.

Bei der Mitverbrennung von Klärschlamm ist auch die erhöhte Gefahr der Erosion von Rohren und Wärmetauscherflächen und der Korrosion von rauchgasberührten, belagbedeckten Außenflächen der Verdampfer- und Überhitzerrohre zu berücksichtigen.

Bei Abfallverbrennungsanlagen werden nach dem Stand der Technik die Schwermetalle aus dem Rauchgas mit nassen Wäschern ausgewaschen, d.h. die Senke für diese Schadstoffe ist letztendlich der Filterkuchen aus der Abwasserreinigungsanlage. Dieser wird als gefährlicher Abfall untertage deponiert.

In Kohlekraftwerken sind im allgemeinen keine Systeme zur Abscheidung von Schwermetallen installiert. Die Senken sind in diesem Fall die Flugasche, die Abfälle aus der trockenen und halbtrockenen Rauchgasentschwefelung oder der Gips aus der nassen Wäsche. Flugasche und Gips werden in der Regel von der Baustoffindustrie weiterverwendet. Es ist zu prüfen, ob die bestehenden Verwendungswege im Falle der Mitverbrennung weiterbeschritten werden können, und inwieweit es zu einer Qualitätsminderung (z.B. hinsichtlich Glühverlust, Schwermetallgehalt, Gehalt an Alkalimetallen, an Sulfaten) von Flugasche und Entschwefelungsprodukt kommt.

Die Emissionen in die Luft von Kohlekraftwerken sind durch das Luftreinhaltegesetz bzw. durch die Luftreinhalteverordnung für Kesselanlagen geregelt. Da Klärschlamm laut Abfallwirtschaftsgesetz Abfall ist, kommt bei der Mitverbrennung die Mischungsregel für Emissionen in die Luft zur Anwendung, das heißt, es werden niedrigere Grenzwerte für  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , CO und Staub und zusätzliche Grenzwerte für Schwermetalle, HCl, HF, Dioxine/Furane und Gesamtkohlenstoff vorgeschrieben.

Anhand der bisher in österreichischen Kohlekraftwerken durchgeführten Versuche kann das Verhalten von Klärschlamm hinsichtlich Korrosion, Emissionen in die Luft und ins Wasser sowie hinsichtlich der Zusammensetzung der Abfälle aus der Verbrennung und der Rauchgasreinigung bei der Mitverbrennung nicht umfassend beurteilt werden. Weitergehende Versuche – unter Einbeziehung von kommunalem Klärschlamm – sollen Klarheit bringen, ob und in welchem Umfang Klärschlamm in österreichischen Kraftwerken mitverbrannt werden kann.

Aufgrund der Marktliberalisierung und des hohen Kohlepreises suchen Betreiber von Kohlekraftwerken nach Möglichkeiten zur Reduktion der Betriebskosten. Eine Möglichkeit, Kohlekraftwerke finanziell attraktiver zu machen bietet die Mitverbrennung von Klärschlamm. Aus technischer Sicht (z.B. Gewährleistung eines hohen Wirkungsgrades) ist die Mitverbrennung von weitgehend trockenem Klärschlamm vorteilhaft, während aus finanzieller Sicht die Übernahme möglichst wasserreicher Klärschlämme favorisiert werden könnte. Damit besteht aber die Gefahr, dass Klärschlämme mit geringem Trockensubstanzgehalt über weite Strecken transportiert werden, was aus ökologischer Sicht abzulehnen ist.

Eine wichtige Frage, welche sich im Zuge der thermischen Behandlung von Klärschlamm erhebt, ist die ökologisch und ökonomisch sinnvolle Mindestgröße einer Monoverbrennungsanlage. In Österreich gibt es neben Wien (wo der gesamte anfallende Klärschlamm bereits thermisch behandelt wird) weitere 15 kommunale Kläranlagen mit einer Kapazität > 150.000 Einwohnerwerten. Daneben existieren 14 Kläranlagen zur biologischen Reinigung industrieller Abwässer mit einer Kapazität > 150.000 Einwohnergleichwerten, wobei aber sieben der Zellstoff- und Papierindustrie zugerechnet werden, welche bereits über thermische Behandlungskapazitäten verfügt. Es bleibt zu prüfen, wo und ob weitere zentrale Monoverbrennungsanlagen (mit aufwendiger Rauchgasreinigung) als Alternative zur Mitverbrennung errichtet werden könnten.

Zusammenfassend kann man sagen, dass in Österreich in einigen Kohlekraftwerken erste Versuche zur Mitverbrennung von Klärschlamm durchgeführt wurden. Allerdings wird ein betreffendes Kraftwerk (Zeltweg) zumindest für die nächsten Jahre konserviert, während bei einem zweiten Kraftwerk (St. Andrä) die Umrüstung zu einer Abfallverbrennungsanlage (der Kohlekessel wird durch eine Wirbelschicht ersetzt) überlegt wurde. Im Kraftwerk Riedersbach wurde im Jahr 1989 ebenfalls Klärschlamm versuchsweise mitverbrannt. Derzeit wird an diesem Standort der Einsatz von Klärschlamm überlegt.

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Ziel der Studie

Das Ziel dieser Studie ist es, die technischen Voraussetzungen für die Mitverbrennung von Klärschlamm in kalorischen Kraftwerken zu prüfen und das Potential dieses Behandlungsweges zu erheben.

Zusätzlich wird versucht, das CO<sub>2</sub>-Minderungspotential durch die Mitverbrennung von Klärschlamm abzuschätzen. Dabei wird sowohl die Substitution fossiler Brennstoffe durch den CO<sub>2</sub> neutralen Klärschlamm als auch die Minderung der Methan Emissionen aus dem bisher deponierten Anteil berücksichtigt. Dieses CO<sub>2</sub>-Einsparungspotential gewinnt vor dem Hintergrund des Kyoto-Protokolls an Bedeutung.

## 1.2 Ausgangssituation

Ungefähr ein Drittel des in Österreich anfallenden industriellen Klärschlammes wird zur Zeit deponiert. Kommunaler Klärschlamm wird zu einem großen Teil (16,7 %) deponiert oder landwirtschaftlich (19,7 %) genutzt [Bundesabfallwirtschaftsplan 2001; Gewässerschutzbericht 1999].

Für eine Ablagerung von Klärschlamm auf Deponien wird ab 2004 in der Regel eine thermische Behandlung (Verbrennung) mit entsprechender Nachbehandlung der Reststoffe erforderlich sein (Deponieverordnung, BGBl 1996/164; Abfallwirtschaftsgesetz idF BGBl I 90/2000).

Obwohl sich die Qualität des kommunalen Klärschlammes (Schwermetall/Wertstoff Verhältnis) in den letzten Jahren stark verbessert hat, und nur in Ausnahmefällen Überschreitungen der gültigen Grenzwerte - auch für AOX, PCB's und Dioxine/Furane - festgestellt werden konnten, ist dennoch eine vermehrte Ausbringung von Klärschlamm in der Landwirtschaft insgesamt nicht zu erwarten. Vor allem in kommunalem Klärschlamm werden erhöhte Konzentrationen von biologisch nicht abbaubaren Tensiden (z.B. Nonyl Phenol, lineare Alkylbenzolsulfonate) gefunden. Beschränkungen für diesen Nutzungsweg ergeben sich aus strengen Auflagen im Rahmen von ÖPUL (Österreichisches Programm zur Förderung einer umweltgerechten, extensiven und den natürlichen Lebensraum schützenden Landwirtschaft) und aus der Ausweitung des biologischen Landbaues.

Die Verbrennung von Klärschlamm in eigens dafür errichteten Anlagen (Wirbelschichtkessel mit mehrstufiger Rauchgasreinigung) wird in Österreich nur in Wien durchgeführt. Hier wird Klärschlamm aus der Hauptkläranlage in drei Wirbelschichtkesseln verbrannt (ca. 68.000 t TS pro Jahr).

Die genannten Rahmenbedingungen machen es notwendig, zusätzliche Verbrennungskapazitäten für Klärschlamm in Österreich zu schaffen.

## 1.3 Begriffsbestimmung

Klärschlamm fällt bei der Reinigung von industriellen und kommunalen Abwässern als dünnflüssiger Schlamm mit hohem Wassergehalt (ca. 95 %) an. Im Sinne des Abfallwirtschaftsgesetz (BGBl 325/1990 idF BGBl I 90/2000) ist Klärschlamm Abfall, wobei zwischen folgenden Schlämmen unterschieden wird (Tabelle 1.1):

Tabelle 1.1: Schlüsselnummern von Klärschlämmen verschiedener Herkunft

Schlüsselnummer (SN)	Art des Schlammes
945	Stabilisierte Schlämme aus mechanisch biologischer Abwasserbehandlung
94501 N	- Anaerob stabilisiert (Faulschlamm)
94502 N	- Aerob stabilisiert
948	Schlämme aus der Abwasserbehandlung
94801 J	- Schlamm aus der Abwasserbehandlung
94802 N	- Schlamm aus der mechanischen Abwasserbehandlung der Zellstoff- und Papierindustrie
94803 N	- Schlamm aus der biologischen Abwasserbehandlung der Zellstoff- und Papierindustrie

In der ÖNORM S 2100 werden noch weitere Schlüsselnummern für Schlämme angeführt (z.B. 943: Nichtstabilisierte Schlämme aus mechanisch-biologischer Abwasserbehandlung, soweit sie nicht in anderen Positionen enthalten sind). Diese werden aber nicht den Klärschlämmen im engeren Sinn zugerechnet und in der vorliegenden Studie nicht besprochen.

Die chemische und physikalische Zusammensetzung von Klärschlamm ist in Kapitel 2.3.1 beschrieben.

Als Verwertungs- bzw. Entsorgungsweg für Klärschlämme stehen derzeit zur Verfügung:

- Deponierung
- Thermische Verwertung/Entsorgung
- Landwirtschaftliche Verwendung
- Kompostierung
- Stoffliche Verwendung
- Sonstige

## 1.4 Rechtliche Grundlagen

In diesem Kapitel sollen die für die Entsorgung und Verwertung von Klärschlamm bundesweit relevanten Gesetze und Verordnungen kurz vorgestellt werden. Zusätzlich existieren landesrechtliche Vorschriften (z.B. über die Bodenqualität, Länderausführungsgesetze zum Elektrizitätswirtschaftsorganisationsgesetz).

### 1.4.1 Deponierung

Ab 2004 (im Ausnahmefall ab 2009) dürfen Abfälle, deren Anteil an organischen Kohlenstoff (TOC) mehr als 5 Masseprozent beträgt oder deren trockensubstanzbezogener Heizwert 6.000 kJ/kg überschreitet, nicht mehr auf Deponien abgelagert werden (Deponieverordnung BGBl 164/1996; Abfallwirtschaftsgesetz idF BGBl I 90/2000). Beide Parameter liegen in der Regel für Klärschlamm deutlich über diesen Werten (siehe Tabelle 2.8). Damit ist eine entsprechende Vorbehandlung von Klärschlamm gesetzlich verpflichtend.

### 1.4.2 Landwirtschaftliche Verwendung

Von Seiten der Europäischen Gemeinschaft sind grundlegende Aussagen zur landwirtschaftlichen Klärschlammverwendung in folgenden Richtlinien angeführt:

- Richtlinie des Rates über den Schutz der Umwelt und insbesondere der Böden bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft (86/278/EWG):

Die Klärschlämme besitzen vielfach agronomisch nutzbringende Eigenschaften; die Förderung ihrer Verwertung in der Landwirtschaft ist deswegen gerechtfertigt, sofern sie ordnungsgemäß verwertet werden.

- Richtlinie des Rates über die Behandlung kommunaler Abwässer (91/271/EWG):

Im Artikel 14 ist angeführt, dass Klärschlamm aus der Abwasserbehandlung nach Möglichkeit wiederzuverwenden ist, wobei die Belastungen der Umwelt auf ein Minimum zu begrenzen sind.

Aus österreichischer Sicht muss man zwischen Bundes- und Länderkompetenz unterscheiden:

Die Ausbringung von Klärschlamm im Wald ist verboten (§ 16 Abs. 1 und 2 Forstgesetz, BGBl 1975/440 idgF).

Gemäß § 32 Abs. 1 Wasserrechtsgesetz bedarf die Klärschlammausbringung dann einer wasserrechtlichen Bewilligung, wenn sie mehr als nur geringfügige Auswirkungen auf die Gewässergüte hat.

Gemäß § 5 Abs. 3 Düngemittelgesetz kann das BMLFUW mit Verordnung unbelastete Klärschlämme und unbelastete Komposte biogenen Ursprungs zur Verwendung in Düngemitteln zulassen. Eine entsprechende Verordnung wurde bisher nicht erlassen.

Für die Ausbringung von Klärschlamm auf landwirtschaftliche Flächen ist der Landesgesetzgeber zuständig. Die meisten Klärschlammkonzepte der Bundesländer geben eine grundsätzliche Zustimmung zur landwirtschaftlichen Verwertung, soweit dies ökologisch und ökonomisch zu vertreten ist.

Aufgrund von strengen Auflagen im Rahmen von ÖPUL (Österreichisches Programm zur Förderung einer umweltgerechten, extensiven und den natürlichen Lebensraum schützenden Landwirtschaft) und des biologischen Landbaues ist eine gesteigerte Verwertung von Klärschlamm in der Landwirtschaft nicht zu erwarten [BMLFUW, 1999].

### 1.4.3 Kompostierung

Bei der Kompostierung wird getrockneter Klärschlamm mit Zuschlagstoffen (Bodenaushub, ungefährliche Abfälle, mineralische Bestandteile) vermischt und kompostiert. Eine diesbezügliche Kompostverordnung ist mit 1. September 2001 in Kraft getreten (Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Qualitätsanforderungen an Komposte aus Abfällen (Kompostverordnung); BGBl II Nr. 292/2001). Darin werden Grenzwerte für Schlämme als Ausgangsmaterial für Kompost und Qualitätskompost festgelegt.

Ein Vergleich dieser Grenzwerte mit den Angaben der Tabelle 2.8 ergibt, dass bei der Herstellung von Kompost die Parameter Pb, Cd und Hg besonders zu beachten sind.

## 1.4.4 Stoffliche Verwendung

In der Zement- und Ziegelindustrie werden Schlämme aus der mechanischen Reinigung der Zellstoff- und Papierindustrie (Papierfaserreststoffe) stofflich und thermisch genutzt. Aufgrund der Anforderungen an das Produkt und an den Produktionsprozess (einschließlich behördlicher Auflagen) unterliegen Roh- und Brennstoffe für die Zementproduktion bestimmten Kriterien seitens der Hersteller.

Vom Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten wurde in Zusammenarbeit mit der Zementindustrie ein internes Papier über die Mitverbrennung von Abfällen ausgearbeitet. Darin wurden unter anderem auch für Papier- und Klärschlamm (SN 945, 94802 und 94803) Grenzwerte für den Einsatz als Wochen- bzw. Monatswert festgelegt (Tabelle 1.2). Eine kurze Diskussion dieser Art „Positivliste“ findet sich in Kapitel 1.5.2.1.

*Tabelle 1.2: Grenzwerte für die Verbrennung von Papier- und Klärschlamm (internes Papier, ausgearbeitet vom Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten und der Zementindustrie)*

Parameter	Einheit	Wochenwert	Monatswert
As	mg/Kg TS	-	5
Sb	mg/Kg TS	-	30
Pb	mg/Kg TS	1000	500
Cd	mg/Kg TS	10	10
Cr	mg/Kg TS	500	500
Co	mg/Kg TS	-	60
Cu	mg/Kg TS	-	600
Ni	mg/Kg TS	-	100*
Hg	mg/Kg TS	5	3 (4)**
Th	mg/Kg TS	-	3
V	mg/Kg TS	-	100*
Zn	Gew.-%	-	0,2
Sn	mg/Kg TS	-	20
Gesamt Chlor	Gew.-%	1	1

\* auf einen Heizwert von 25 MJ/Kg bezogen, lineare Umrechnung bei anderen Heizwerten

\*\* 4 mg/Kg gelten nur für die SN 945

## 1.4.5 Thermische Verwertung und Entsorgung

### 1.4.5.1 Luftreinhaltegesetz für Kesselanlagen

Die Emissionen aus Dampfkesselanlagen in die Luft sind in Österreich nach dem Luftreinhaltegesetz für Kesselanlagen (LRG-K, BGBl 1988/380; idF: BGBl. I Nr. 158/1998) und nach der Luftreinhalteverordnung für Kesselanlagen (LRV-K, BGBl 1989/19; idF: BGBl. II Nr. 324/1997) geregelt. Das Luftreinhaltegesetz gilt dabei für alle ortsfeste Dampfkesselanlagen, welche vor dem 1. Jänner 1989 in Betrieb genommen wurden oder deren Errichtung zu diesem Zeitpunkt bewilligt war. Für Anlagen, welche nach dem 1. Jänner 1989 in Betrieb genommen wurden, gilt die Luftreinhalteverordnung.

In diesen Regelwerken werden unter anderem Grenzwerte für die Verfeuerung konventioneller fester, flüssiger und gasförmiger Brennstoffe, für die Verfeuerung von Holzbrennstoffen, Müll, Krankenhausabfall, Laugen aus der Zellstoffproduktion und von Altöl vorgeschrieben.



Die Angabe der Emissionen in die Luft erfolgt als Halbstundenmittelwert (HMM) unter Standardbedingungen (0°C, 1013 mbar, trocken). Die Werte sind bei festen Brennstoffen auf 6 %, bei der Verbrennung von Müll auf 11 % Sauerstoff im Verbrennungsgas bezogen.

Die Grenzwerte gelten als eingehalten, wenn folgende Kriterien erfüllt sind:

- Kein Tagesmittelwert überschreitet den Emissionsgrenzwert.
- Nicht mehr als drei Prozent der Beurteilungswerte überschreiten den Grenzwert um mehr als 20 Prozent.
- Kein Halbstundenmittelwert überschreitet das Zweifache des Emissionsgrenzwertes. Anfahr- bzw. Abfahrzeiten sind in die Beurteilung einzubeziehen.

In den folgenden Tabellen sind die Grenzwerte für die Verbrennung von Stein- und Braunkohle, sowie für die Verbrennung von Müll angegeben.

*Tabelle 1.3: Grenzwerte für Emissionen aus kohlebefeuerter Großfeuerungsanlagen > 50 MW, bezogen auf 6 % Sauerstoff*

Parameter	LRG-K; Emissionsgrenzwert (mg/m <sup>3</sup> )	LRV-K; Emissionsgrenzwert (mg/m <sup>3</sup> )
Staub	50	50
SO <sub>2</sub>	400-1000 Braunkohle 200-1000 Steinkohle	400 Braunkohle 200 Steinkohle
CO	250	150
NO <sub>x</sub> (als NO <sub>2</sub> )	200-600	200
NH <sub>3</sub>	10 (auf 6 % O <sub>2</sub> im Verbrennungsgas bezogen)	10 (auf 0 % O <sub>2</sub> im Verbrennungsgas bezogen)

*Tabelle 1.4: Grenzwerte für Dampfkesselanlagen zur Müllverbrennung, bezogen auf 11 % Sauerstoff im Verbrennungsabgas (gemäß LRV-K)*

Parameter	Abfallmassenstrom 750-15.000 kg/h (mg/m <sup>3</sup> )	Abfallmassenstrom >15.000 kg/h (mg/m <sup>3</sup> )
Staub	20	15
HCl	15	10
HF	0,7	0,7
CO	50	50
NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub>	300	100
SO <sub>2</sub>	100	50
Pb, Zn, Cr einschließlich ihrer Verbindungen	3,0	2,0
As, Co, Ni einschließlich ihrer Verbindungen	0,7	0,5
Cd und seine löslichen Verbindungen	0,05	0,05
Hg und seine Verbindungen	0,1	0,05
Organische Stoffe als C	20	20
PCDD/PCDF Toxizitätsäquivalent nach I-TEF	0,1 ng/m <sup>3</sup>	0,1 ng/m <sup>3</sup>

In der Luftreinhalteverordnung werden auch Grenzwerte für die Emissionen bei Mischfeuerungen angegeben. Eine Mischfeuerung liegt dann vor, wenn eine Dampfkesselanlage unter gleichzeitiger Verwendung mehrerer Brennstoffarten befeuert wird, und wenn der Anteil des Hauptbrennstoffes 80 % unterschreitet.

#### 1.4.5.2 Verordnungen über die Verbrennung gefährlicher Abfälle

Für die Verbrennung gefährlicher Abfälle existieren zwei Verordnungen:

- Verordnung des Bundesministers für wirtschaftliche Angelegenheiten über die Verbrennung gefährlicher Abfälle in gewerblichen Betriebsanlagen (BGBl II Nr. 32/1999)
- Verordnung des Bundesministers für Umwelt, Jugend und Familie über die Verbrennung von gefährlichen Abfällen (BGBl II Nr. 22/1999)

Die beiden Verordnungen sind seit 1. Februar 1999 in Kraft. Ab 1. Juli müssen bestehende Anlagen, die gefährliche Abfälle thermisch verwerten oder behandeln, die Grenzwerte einhalten. Eine Ausnahme bildet der  $\text{NO}_x$ -Grenzwert, den Mitverbrennungsanlagen erst ab 1. Jänner 2002 einhalten müssen.

Die Definition der Mitverbrennung in diesen Verordnungen ist in Kapitel 1.4.5.3 angeführt. Grenzwerte für die Verbrennung von gefährlichen Abfällen sind in der Tabelle 1.5 aufgelistet.

Tabelle 1.5: Grenzwerte für die Verbrennung gefährlicher Abfälle (als HMW unter Standardbedingungen, bezogen auf 11 %  $\text{O}_2$ )

Parameter	(BGBl II Nr. 22/1999) ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	(BGBl II Nr. 32/1999) ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )
Staub	10	10
HCl	10	10
HF	0,7	0,7
CO	100	100
$\text{NO}_x$ als $\text{NO}_2$	400 ab 5.000 $\text{m}^3/\text{h}$ : 300 ab 10.000 $\text{m}^3/\text{h}$ : 150 (bestehende Anlage) ab 10.000 $\text{m}^3/\text{h}$ : 100 (neue Anlage)	300
$\text{SO}_2$	50	50
Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn einschließlich ihrer Verbindungen	0,5	0,5
Cd und seine löslichen Verbindungen	0,05	0,05
Hg und seine Verbindungen	0,05	0,05
Organische Stoffe als C	10	10
$\text{NH}_3$	10	
PCDD/PCDF Toxizitätsäquivalent nach I-TEF	0,1 $\text{ng}/\text{m}^3$	0,1 $\text{ng}/\text{m}^3$

### 1.4.5.3 Mitverbrennung

Werden Abfälle nicht in Abfallverbrennungsanlagen sondern in industriellen Feuerungsanlagen verbrannt, so spricht man von Mitverbrennung.

In der EU-Richtlinie über die Verbrennung von Abfällen (RL 2000/76/EG) wird in § 3 Abs. 5 eine Mitverbrennungsanlage wie folgt definiert:

Eine Mitverbrennungsanlage ist jede ortsfeste oder nicht ortsfeste Anlage, deren Hauptzweck in der Energieerzeugung oder der 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.

Werden in einer Verbrennungsanlage mehr als 40 % der freigesetzten Wärme mit gefährlichen Abfällen erzeugt, so gelten die Grenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen. Für die Mitverbrennung von nicht gefährlichen Abfällen ist keine derartige Begrenzung vorgesehen. Unter der Schwelle von 40 %, bzw. generell für nicht gefährliche Abfälle werden die Grenzwerte anhand einer Mischungsregel berechnet.

In der Verordnung des Bundesministers für wirtschaftliche Angelegenheiten über die Verbrennung gefährlicher Abfälle in gewerblichen Betriebsanlagen (BGBl II Nr. 32/1999) und in der Verordnung des Bundesministers für Umwelt, Jugend und Familie über die Verbrennung von gefährlichen Abfällen (BGBl II Nr. 22/1999) ist eine Mitverbrennungsanlage als eine Verbrennungsanlage definiert, ...in der Abfälle als Ersatz- oder Zusatzbrennstoff bis zu 40 vH der in einem Kalendervierteljahr tatsächlich zugeführten durchschnittlichen Gesamtbrennstoffwärmeleistung eingesetzt werden. Kommunale Klärschlämme (Schlämme aus der Behandlung kommunaler Abwässer der Schlüsselnummergruppen 943 und 945 der ÖNORM S 2100) gelten bei der Berechnung der 40 vH Grenze nicht als Abfälle, sondern als andere Brennstoffe.

Anlagen, die diese 40-%-Grenze überschreiten, haben die Grenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen einzuhalten. Unter dieser Schwelle werden die Grenzwerte anhand einer Mischungsregel berechnet. Die 40 %-Begrenzung wird auf den Einsatz von gefährlichen Abfällen beschränkt, wenn für eine Verbrennungsanlage eine Positivliste erlassen, bzw. wenn die Richtlinie über die Verbrennung von nicht gefährlichen Abfällen umgesetzt wird, spätestens aber mit Ablauf der Umsetzungsfrist.

### 1.4.5.4 Elektrizitätswirtschafts- und Organisationsgesetz (ELWOG; BGBl I Nr. 143/1998 idF BGBl I Nr. 100/2000)

Dieses Bundesgesetz regelt die Organisation der Elektrizitätswirtschaft neu. Wichtige Ziele dieses Bundesgesetzes sind die Versorgung der österreichischen Bevölkerung und der Wirtschaft mit kostengünstiger elektrischer Energie in hoher Qualität zu gewährleisten, eine Marktorganisation für die Elektrizitätswirtschaft gemäß dem EU Primärrecht und den Grundsätzen des Elektrizitätsbinnenmarktes zu schaffen, sowie einen Ausgleich für gemeinwirtschaftliche Verpflichtungen im Allgemeininteresse zu erzielen, welche den Elektrizitätsunternehmen auferlegt wurden.

Für die vorliegende Studie am wichtigsten ist jedoch das Ziel, den „hohen Anteil erneuerbarer Energie in der österreichischen Elektrizitätswirtschaft weiter zu erhöhen“ (ELWOG §3, Absatz 3).

Im Sinne dieses Bundesgesetzes werden folgende Formen der Energie als erneuerbar definiert (soweit sie für die Erzeugung von elektrischer Energie Verwendung finden; ELWOG § 7, Absatz 11):

- Wasserkraft
- Biomasse
- Biogas
- Geothermische Energie
- Wind
- Sonne

Müll und Klärschlamm gelten im Sinne des ELWOG nicht als erneuerbare Energiequellen.

Unter ELWOG § 4, Absatz 5 (Gemeinwirtschaftliche Verpflichtungen) ist unter anderem angeführt, dass die Netzbetreiber zur „Abnahme elektrischer Energie aus Erzeugungsanlagen, in denen die erneuerbaren Energieträger eingesetzt werden“ verpflichtet sind.

Anlagen, die auf Basis der erneuerbaren Energieträger feste oder flüssige heimische Biomasse, Biogas, Deponie- und Klärgas, geothermische Energie, Wind- und Sonnenenergie betrieben werden, sind als Ökostromanlagen anzuerkennen. Dies gilt ebenso für Mischfeuerungsanlagen mit hohem biogenem Anteil sowie bei Verbrennung von Abfällen mit hohem biogenem Anteil. Sonstige Anlagen, die auf Basis von Müll oder Klärschlamm betrieben werden, sind jedenfalls nicht als Ökoanlagen anzuerkennen. Die Anerkennung hat durch die Landesregierung zu erfolgen. Betreiber von anerkannten Ökostromanlagen sind berechtigt, die Abnahme der von diesen Anlagen erzeugten Energie von jenem Netzbetreiber zu verlangen, an dessen Netz sie angeschlossen sind (ELWOG § 40, Absatz 1).

Seit 1. September sind die diesbezüglichen Länderausführungsgesetze in Kraft. Obwohl sich die Definitionen für erneuerbare Energie, Biomasse, etc. in diesen Länderausführungsgesetzen zum Teil beträchtlich unterscheiden, wird Klärschlamm nicht zu erneuerbaren Energieträgern zugeordnet.

In der EU-Richtlinie 2001/77/EG vom 27. September 2001 zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt wird der Begriff Biomasse in erweiterter Form definiert: „Biomasse: der biologisch abbaubare Anteil von Erzeugnissen, Abfällen und Rückständen der Landwirtschaft (einschließlich pflanzlicher und tierischer Stoffe), der Forstwirtschaft und damit verbundener Industriezweige sowie der biologisch abbaubare Anteil von Abfällen aus Industrie und Haushalten“. Es bleibt abzuwarten, welche Konsequenzen diese Begriffsbestimmung für die Mitverbrennung von Klärschlamm in Österreich haben wird.

#### **1.4.6 Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (BGBl. Nr. 414/1994)**

Österreich hat sich im Zuge des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (BGBl. Nr. 414/1994) und des Kyoto-Protokolles zum Ziel gesetzt, seinen CO<sub>2</sub>-Ausstoß maßgeblich zu verringern. Die jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Zeitraumes 2008-2012 sollen dabei um 13 % niedriger liegen als im Basisjahr 1990. Dieser Wert ist das Ergebnis des sogenannten „burden sharing“ und liegt über dem EU-weiten Durchschnitt von minus 8 %.

Im Jahr 1990 wurden ca. 76 Millionen Tonnen an CO<sub>2</sub> Äquivalenten (Summe von CO<sub>2</sub> global warming potential (GWP) = 1; N<sub>2</sub>O: GWP = 310 und CH<sub>4</sub>: GWP = 21) emittiert (ohne Berücksichtigung der möglichen Senken), sodass sich ein notwendiges Einsparungspotential von knapp 10 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> Äquivalenten ergibt.

Klärschlamm kann aufgrund seiner Herkunft zum überwiegenden Teil als „CO<sub>2</sub>-neutral“ bezeichnet werden.

## 1.5 Klärschlammaufkommen und –behandlung in Österreich

### 1.5.1 Klärschlammaufkommen

Der Gewässerschutzbericht 1999 gibt einen Überblick über den Anfall und die Behandlung von kommunalem und industriellem Klärschlamm (SN 945 und 948; Abbildung 1 und Abbildung 2) [BMLFUW, 1999]. Die Herkunft der Klärschlämme konnte dabei nicht immer zweifelsfrei zugeordnet werden, da viele Industriebetriebe (z.B. einige Betriebe der Zellstoff- und Papierindustrie) ihre Abwässer über kommunale Abwasserverbände entsorgen.

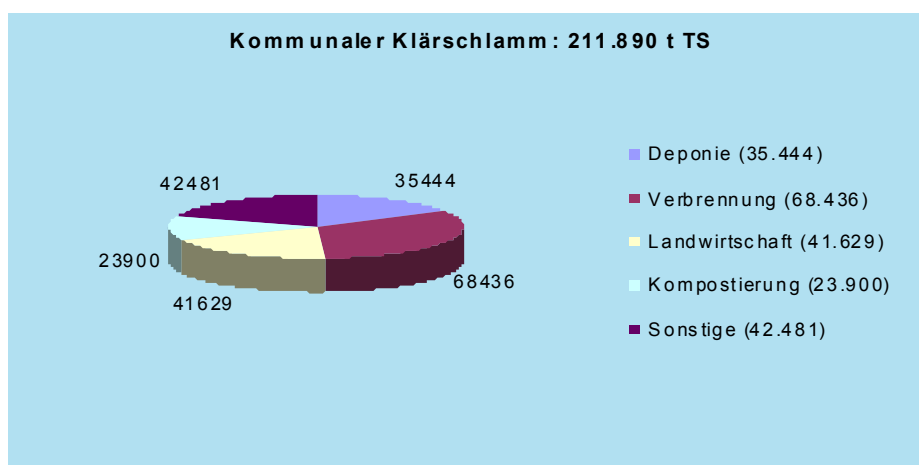


Abbildung 1: Aufkommen von kommunalem Klärschlamm 1999 in Österreich (BMLFUW, 1999)

Der hohe Anteil der Verbrennung an den verschiedenen Verwertungs- und Entsorgungsmöglichkeiten ist fast ausschließlich auf den Raum Wien zurückzuführen. Hier wird der gesamte kommunale Klärschlamm in den Wirbelschichtöfen des Werkes Simmeringer Haide verbrannt (1999: 66.800 t TS). In den anderen Bundesländern überwiegt die Entsorgung über die Deponierung, über die landwirtschaftliche Verwendung, über die Kompostierung und über andere Wege (Bauzuschlagsstoff, Landschaftsbau, Düngemittel, etc).

Abbildung 2 zeigt den Anfall und die Verwertungs- bzw. Entsorgungsweg von industriellem Klärschlamm.

Auch hier überwiegt der Anteil der Verbrennung an den Entsorgungswegen, während die landwirtschaftliche Verwendung und die Kompostierung nur wenig Bedeutung haben. Ein großer Teil (35 %) wird deponiert und ungefähr 20 % werden anderweitig (Bauzuschlagstoff, Landschaftsbau, etc) genutzt.

Der Anschlussgrad von kommunalen Abwässern an Kläranlagen soll in den kommenden Jahren von derzeit 81,5 auf 85 % erhöht werden, was allgemein als Obergrenze angesehen wird [BMLFUW, 1999]. Zusätzlich wird der Grad der Stickstoff- und Phosphorentfernung aus dem Abwasser erhöht werden. Während die Stickstoffentfernung nur geringen Einfluss auf die Schlammproduktion hat, fallen bei der biologischen oder physikalischen Phosphoreliminierung bis zu 25 % höhere Schlammengen an [BMUJF 1997].

In einer Studie des Bundesministeriums für Umwelt wird geschätzt, dass der jährliche Anfall von kommunalem Klärschlamm bis auf 260.000 t Trockensubstanz steigen kann [BMUJF, 1997]. Eine Vorhersage der Entwicklung des Aufkommens von industriellem Klärschlamm (z.B. aus der Zellstoff- und Papierindustrie) ist aufgrund der schlechten Datenlage nur sehr schwer zu treffen.

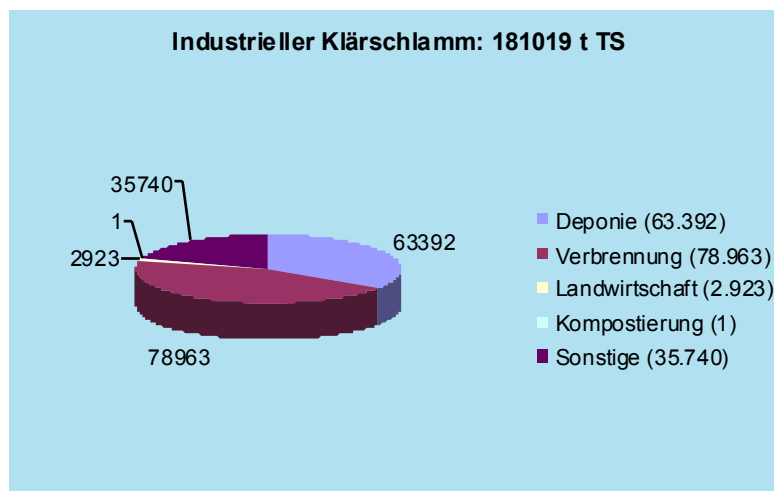


Abbildung 2: Aufkommen von industriellem Klärschlamm 1999 in Österreich (BMLFUW, 1996)

Für die vorliegende Studie wird auf Basis dieser Angaben das zukünftig zu entsorgende Klärschlammvolumen mit etwa 440.000 t TS abgeschätzt.

### 1.5.2 Mitverbrennungskapazitäten in bestehenden Anlagen

In diesem Kapitel wird versucht, das Potential der Mitverbrennung von kommunalem und industriellen Klärschlamm in verschiedenen industriellen Sektoren abzuschätzen. Dabei wird nur von bestehenden bzw. bereits geplanten Anlagen ausgegangen. Es werden folgende Industriezweige untersucht:

- Zementwerke
- Keramische Industrie
- Stahlindustrie
- Nicht-Eisen Metallindustrie
- Zellstoff- und Papierindustrie
- Holzverarbeitende Industrie
- Kraftwerke
- Chemische Industrie

#### 1.5.2.1 Zementindustrie

In der Zementindustrie werden primäre Schlämme der Papier- und Zellstoffindustrie (sogenannte Papierfaserreststoffe) als Energie- und Rohstoffquelle eingesetzt. Die Zusammensetzung der Asche dieser Papierfaserreststoffe entspricht im wesentlichen der Zusammensetzung des Klinkers. Prinzipiell ist der Einsatz von getrocknetem Klärschlamm verfahrenstechnisch und produktionstechnisch möglich.

Papierfaserreststoffe werden aber auch von anderen Industriezweigen (Ziegelindustrie, Papier- und Zellstoffindustrie) thermisch oder stofflich genutzt, sodass ein vermehrter Einsatz dieser Schlämme in der Zementindustrie zu Lasten der anderen Industriesektoren geht, aber keine Verminderung der Gesamtmenge an Klärschlamm im allgemeinen bedeutet.

Kommunaler Klärschlamm hat einen geringeren Energieinhalt und einen höheren Schwermetallgehalt als Papierfaserreststoffe, wobei letzterer stark schwanken kann. Als besonderes Hindernis wird dabei die hohe Konzentration von Hg im kommunalen Klärschlamm angesehen. Daher ist die Verwendung von kommunalem Klärschlamm in der Zementindustrie zur

Zeit nicht beabsichtigt (Persönliche Mitteilung von DI Spaun, Verband österreichischer Zementwerke, 2000).

Die Auswirkungen des internen Papiers („Positivliste“, siehe 1.4.4) auf die Situation der Mitverbrennung von Klärschlamm in Anlagen der Zementindustrie können derzeit noch nicht abgeschätzt werden.

Tabelle 1.6: Vergleich der Grenzwerte des internen Papiers („Positivliste“) mit den tatsächlich gemessenen Konzentrationen

Parameter	Einheit	Wochenwert	Monatswert	Bereich aus Tabelle 2.8
As	mg/Kg TS	-	5	4 – 14,4
Sb	mg/Kg TS	-	30	2,4 – 8,5
Pb	mg/Kg TS	1000	500	15 - 412
Cd	mg/Kg TS	10	10	4 – 6
Cr	mg/Kg TS	500	500	40 – 130
Co	mg/Kg TS	-	60	2 – 13,5
Cu	mg/Kg TS	-	600	30 – 540
Ni	mg/Kg TS	-	100*	30 – 94
Hg	mg/Kg TS	5	3 (4)**	0,2 – 3,6 (48***)
Th	mg/Kg TS	-	3	1,2 – 2
V	mg/Kg TS	-	100*	9 – 35,4
Zn	Gew.-%	-	0,2	0,04 – 0,17
Sn	mg/Kg TS	-	20	10 – 100
Gesamt Chlor	Gew.-%	1	1	0,05 – 0,3

\* auf einen Heizwert von 25 MJ/Kg bezogen, lineare Umrechnung bei anderen Heizwerten

\*\* 4 mg/Kg gelten nur für die SN 945

\*\*\* ein Wert

Aus dem Vergleich der Grenzwerte des internen Papiers mit den gemessenen Schwermetallkonzentrationen (siehe oben) ist ersichtlich, dass sich für die Mitverbrennung von Klärschlämmen in den Anlagen der Zementindustrie kaum Einschränkungen ergeben werden. Mit Ausnahme von As, Hg, Ni und Sn liegen die Grenzwerte weit über den gemessenen Konzentrationen. Die Verschreibung von Wochen- oder Monatsmittelwerten ist insofern verständlich, da Klärschlamm schlecht lagerbar ist und daher in der Regel möglichst bald nach der Lieferung verbrannt werden muss. Eine Angabe der Grenzwerte nach einzelnen Chargen sowie eine Reduktion der Werte (vor allem für die toxischen Schwermetalle Pb, Cd und Hg) wäre aus ökologischer Sicht zu begrüßen bzw. entspräche auch eher der Praxis.

### 1.5.2.2 Keramische Industrie

In der Ziegelindustrie werden Papierfaserschlämme aus der Papierindustrie stofflich und thermisch genutzt. Da dieser Sektor um sein positives Image in der Öffentlichkeit besorgt ist, ist ein gesteigerter Einsatz dieser Abfälle ebenso wenig zu erwarten, wie der Einsatz von kommunalem Klärschlamm [Ragossnig, 1999].

Die Firma Veitsch-Radex AG verfügt über eine Genehmigung für die Mitverbrennung von 3.500 t Klärschlamm (25 % TS). Aufgrund von Protesten der Öffentlichkeit wurde der Probebetrieb aber nicht aufgenommen.

### 1.5.2.3 Zellstoff- und Papierindustrie

In der folgenden Tabelle werden Daten zum Klärschlammaufkommen und dessen Behandlung wiedergegeben:

*Tabelle 1.7: Klärschlammaufkommen und -behandlung in der Zellstoff- und Papierindustrie [Austropapier, 2000]*

Art des Schlammes	Anfall 1999 (t TS)	Behandlung 1999
- Papierfaserschlamm (SN 94802)	85.225	- 47.219 in der Zement- und Ziegelindustrie
- Primärschlamm		- 126.960 interne Verfeue- rung mit Energierückge- winnung
- De-Inking Schlamm		
Biologischer Schlamm (SN 94803)	92.080	- 3.125 Deponie

In der Zellstoff- und Papierindustrie fallen große Mengen an Primär- und Sekundärschlamm an, welche aber zum überwiegenden Teil in den betriebseigenen Kesseln (es verfügen sieben Betriebe über eigene Kessel zur Verfeuerung dieser Abfälle) energetisch verwertet werden. Zur Zeit wird auf dem Betriebsgelände eines Werkes in Niklasdorf eine neue Anlage zur thermischen Behandlung von Reststoffen mit einer Kapazität von 100.000 t/a errichtet, welche zusätzlich auch externen Abfall (kommunaler Klärschlamm) übernehmen soll [Zettl, 2000].

Primärschlamm (Papierfaserreststoff) wird auch extern an Zement- und Ziegelwerke geliefert, welche diesen Abfall sowohl energetisch als auch stofflich nutzen. Nach Auskunft der Vereinigung der österreichischen Papierindustrie ist die Abgabe dieser Abfälle an die Zement- und Ziegelindustrie durch langfristige Verträge gesichert, und eine übermäßige Steigerung der Abfallmengen in naher Zukunft nicht zu erwarten [Zettl, 2000].

Zur Zeit werden 3.125 t Klärschlamm aus der Zellstoff- und Papierindustrie deponiert. Diese Menge kommt eventuell für die Mitverbrennung in anderen Feuerungsanlagen (oder auch für die Verbrennung in einem eigenen Wirbelschichtkessel) in Frage.

Im allgemeinen werden keine außerbetrieblichen Klärschlämme zur thermischen Behandlung übernommen (mit Ausnahme der Wirbelschichtanlage in Lenzing und der EEGV in Steyrermühl; letztere verfeuert aber nur Schlämme aus anderen Papierfabriken). In Zukunft wird auch die Wirbelschichtanlage auf dem Betriebsgelände von Brigl&Bergmeister in Niklasdorf externen Abfall übernehmen.

### 1.5.2.4 Holzverarbeitende Industrie

Die Holzverarbeitende Industrie verfügt über einen Überschuss an innerbetrieblichen Reststoffen, daher wird die Möglichkeit einer Klärschlamm-Mitverbrennung nicht näher geprüft. Einzige Ausnahme bildet die Firma Funder in St. Veit an der Glan, welche in ihren Wirbelschichtöfen (Gesamtkapazität: insgesamt 19.500 t/a) neben anderen Abfällen auch Klärschlamm (SN 94302, 94501, 94802, 94803) thermisch behandeln kann [Ragossnig, 1999; Anlagendatenbank des UBA, 2000].



In den Wirbelschichtkesseln der Firma Funder wird der gesamte Klärschlamm der Abwasserreinigungsanlage St. Veit an der Glan verbrannt (ungefähr 15 t pro Tag mit einer Trockensubstanz von 18-19 %). Die Firma verfügt nur über einen kleinen Klärschlammstilo, sodass größere Mengen wegen allfälliger Geruchsprobleme und daraus resultierender Anrainerbeschwerden nicht gelagert werden können.

Getrockneter Klärschlamm könnte aber zusätzlich gemeinsam mit Altholz über die Feststofffördereinrichtungen aufgegeben werden. Als mögliche Obergrenze wird 5 t getrockneter Klärschlamm pro Tag angegeben [Mitteilung der Firma Funder].

#### **1.5.2.5 Kraftwerke**

In Österreich werden an 10 Standorten kalorische Kraftwerke und Fernheizwerke mit einer Brennstoffwärmeleistung > 50 MW mit dem Brennstoff Kohle (teilweise zusammen mit anderen fossilen Brennstoffen) betrieben. In einigen Kraftwerken wurden versuchsweise bereits Klärschlämme mitverbrannt (siehe Kapitel 1.7 und Kapitel 4).

#### **1.5.2.6 Nicht-Eisen Metallindustrie, Stahlindustrie, Chemische Industrie**

In den Feuerungsanlagen dieser Sektoren wird Klärschlamm nicht eingesetzt.

#### **1.5.2.7 Müllverbrennungsanlagen**

Neben den bereits erwähnten Abfallverbrennungsanlagen des Werkes Simmeringer Haide und der RVL Lenzing werden in Österreich noch drei Anlagen zur Müllverbrennung betrieben (MVA Flötzersteig, Spittelau und Wels). In diesen Anlagen wurde bisher kein Klärschlamm eingesetzt.

#### **1.5.2.8 Übersicht über bestehende Anlagen zur Mitverbrennung von Klärschlamm**

In der nachstehenden Tabelle sind bestehende Anlagen in Österreich, in welchen Klärschlämme verbrannt oder mitverbrannt werden, angeführt. Diese Daten wurden im Jahr 2001 aus vorhandenen Studien, aus der Anlagendatenbank des Umweltbundesamtes und teilweise anhand von direkten Anfragen ermittelt. Die Angabe der Kapazitäten bezieht sich auf eine Trockensubstanz von 25 %.

Zur Situation bei den Kohlekraftwerken ist anzumerken, dass seit Beginn des Jahres 2001 einige Kraftwerke über die Genehmigung zur Verbrennung von Tiermehl verfügen (z.B. Kraftwerk Dürnrohr, Mellach, Riedersbach). In manchen Fällen wurde die Genehmigung auch auf andere Abfallarten ausgedehnt.

Tabelle 1.8: Übersicht über Anlagen, welche über eine Genehmigung zur Mitverbrennung von Klärschlamm verfügen

<b>Industriesektor Papier und Zellstoff</b>			
<b>Firma</b>	<b>Standort</b>	<b>Kapazität (t/a)</b>	<b>Abfallarten</b>
W. Hamburger AG	2823 Pitten	Keine Angabe	Kohle, Klärschlamm, Faserreject
KNP Leykam	8600 Bruck a.d.Mur	76.000	Rinde, Faserreststoffe (Delinking), Klärschlamm (mech.-biol.)
SAPPI	8101 Gratkorn	130.000	Rinde, Faserschlamm, Klärschlamm (mech.-biol.)
RVL Lenzing GmbH	4860 Lenzing	150.000	Packstoffe, Siebüberlauf, Altholz, Rejecte, Klärschlamm, Rechengut – derzeit Versuchsbetrieb
Patria Papier und Zellstoff AG	9413 Frantschach	10.000	Rinde, Klärschlamm (eigen, kom.)
Neusiedler AG	3363 Ulmerfeld-Hausmening	Keine Angabe	Verbrennung von Klärschlamm im Laugenerbrennungskessel
EEVG GmbH	4662 Laakirchen	280.000	Rinde, Klärschlamm, Holz, Papier, Pappe
<b>Klärschlammverbrennungsanlagen</b>			
<b>Firma</b>	<b>Standort</b>	<b>Kapazität (t/a)</b>	<b>Abfallarten</b>
Entsorgungsbetriebe Simmering	1110 Wien	200.000	Klärschlamm SN: 943 (1998: 66.800 t TS)
<b>Industriesektor Baustoffindustrie</b>			
<b>Firma</b>	<b>Standort</b>	<b>Kapazität (t/a)</b>	<b>Abfallarten</b>
Veitsch-Radex AG	9545 Radenthein	5.000	Kunststoffe, Klärschlamm (SN 945) - genehmigt
Pexider Herbert GmbH	8833 Teufenbach	Keine Angabe	Rückstände aus der Altpapierverarbeitung
<b>Industriesektor Holzverarbeitende Industrie</b>			
<b>Firma</b>	<b>Standort</b>	<b>Kapazität (t/a)</b>	<b>Abfallarten</b>
Funder Industrie GmbH	9300 St. Veit a.d.Glan	10.000	Rinde, Altpapier, Holzabfälle, Klärschlamm (SN 945)
Funder Industrie GmbH	9300 St. Veit a.d.Glan	19.950	Papier, Rückstände aus der Altpapierherzeugung, Altreifen, Klärschlamm (SN 943, 948)

<b>Dampfkraftwerke</b>			
<b>Firma</b>	<b>Standort</b>	<b>Kapazität (t/a)</b>	<b>Abfallarten</b>
ATP Voitsberg	8570 Voitsberg	ca. 35.000	Papier, Kunststoffe, Klärschlämme (SN 945) – Versuchsbetrieb
ATP Zeltweg	8740 Zeltweg	10.000	Diverse Abfälle und Klärschlamm (SN 945) – Versuchsbetrieb
ATP St. Andrä	9433 St. Andrä	ca. 35.000	Diverse Abfälle, Klärschlamm (SN 943, 945, 948) – Versuchsbetrieb

In den Drehrohröfen der Zementindustrie wurden und werden verschiedene Abfallfraktionen, darunter Schlämme aus der Zellstoff- und Papierindustrie eingesetzt. In der freiwilligen Selbstbeschränkung („Positivliste“ siehe 1.4.4) werden bestimmte Abfallkategorien zusammen mit deren maximalen Schadstoffgehalten eigens aufgezählt. Zusätzlich zu den in Tabelle 1.9 aufgezählten Abfällen werden noch Papier- und Klärschlamm sowie Altholz genannt.

*Tabelle 1.9: Übersicht über Anlagen der Zementindustrie, in welchen Abfälle mitverbrannt werden [Hackl, 2001]*

<b>Industriesektor Zementindustrie</b>		
<b>Firma</b>	<b>Standort</b>	<b>Abfallarten (t/a)</b>
Lafarge Perlmöser AG	2452 Mannersdorf	Altöl: 26.607
Wopfinger Baustoffindustrie GmbH	2754 Waldegg	Lösungsmittel: 7.530 Altreifen: 26.949
Kirchdorf Zementwerk Hofmann GmbH	4560 Kirchdorf	Petrolkoks: 24.021 Kunststoffabfälle: 25.128
Gmundner Zement Produktions- und Handels AG	4810 Gmunden	Papierfaserreststoff (60 % TS): 37.927
Zementwerke Leube GmbH	5083 Grödig	Sonstige: 10.339
Schretter und Cie	6682 Vils	
Wietersdorfer und Peggauer Zementwerke GmbH	8120 Peggau	
Lafarge Perlmöser AG	8461 Retznei	
Wietersdorfer und Peggauer Zementwerke GmbH	9373 Klein St. Paul	

### 1.5.2.9 Zukünftige Verbrennungskapazitäten

In diesem Kapitel wird die Möglichkeit, zusätzliche Kapazitäten für die Mitverbrennung von Klärschlamm zu schaffen, untersucht. Dabei wird auf die Daten des vorangegangenen Kapitels zurückgegriffen.

- Papier- und Zellstoffindustrie – Substitution von Steinkohle

Es wird angenommen, dass die bestehenden Wirbelschichtkessel zur Mitverbrennung von Klärschlamm ausgelastet sind, d.h. dass kein zusätzliches Potential vorhanden ist.

In der Papierindustrie wurden 1999 ca. 150.000-200.000 t Steinkohle als konventioneller Brennstoff eingesetzt [Umweltbericht Austropapier 2000]. Theoretisch könnte ein Teil davon durch Klärschlamm substituiert werden. Eine neue Möglichkeit bietet die Technik, Klärschlamm im Ablaugekessel der Zellstofffabrik mit zu verbrennen, welche in der Papierfabrik Neusiedler in Kematen zur Anwendung kommt.

- Geplante und in Bau befindliche Anlagen für die Abfallverbrennung

In der Tabelle 1.10 werden geplante Anlagen zur Verbrennung von Abfällen aufgelistet (UBA, 2001).

Tabelle 1.10: Geplante Anlagen zur Verbrennung von Abfällen (UBA, 2001)

Betreiber	Standort	Kapazität (t/a)	Brennstoff
A.S.A. Abfall Service AG	Zistersdorf	130.000	Abfälle; Klärschlamm 10.000 t (25 % TS)
Abfallverwertung NÖ PlanungsgesmbH	Zwentendorf/Dürnrohr	300.000	20.000 t Klärschlamm
Welser Abfallverwertung BetriebsgmbH	Wels	230.000	Abfälle
Kärntner RestmüllverwertungsgmbH	Arnoldstein	80.000	Restmüll, Verfeuerung von Klärschlamm ist nicht geplant
ENAGES	Niklasdorf	100.000	Klärschlamm und Papierfaserschlamm
Simmeringer Haide, Wirbelschichtofen 4	Wien	90.000	Klärschlamm
Glanzstoff St. Pölten	St. Pölten	Keine Angabe	Keine Angabe

Es ist der Bau von sieben Anlagen zur Abfallverbrennung geplant, wobei für die Verbrennung von Klärschlamm eine Kapazität von 220.000 t (25 % TS, siehe Tabelle 1.10) vorgesehen ist.

- Kalorische Kraftwerke

Eine Abschätzung der Mitverbrennungskapazität wird im Kapitel 5 getroffen. In den Kraftwerken des Verbund können theoretisch 62.500 t TS mitverbrannt werden. Unter Berücksichtigung der Kapazitäten aller Kohlekraftwerke in Österreich (Substitutionsgrad: 5 %) beträgt das Potential zur Klärschlamm-Mitverbrennung 95.500 t TS (entsprechend 382.000 t mit 25 % TS).

- Zement- und Ziegelindustrie

In der Zement- und Ziegelindustrie werden bevorzugt Papierfaserschlämme eingesetzt, da diese einen relativ hohen Heizwert aufweisen und deren Aschezusammensetzung der des Produktes ähnelt. Papierfaserschlämme werden aber wegen ihrer Eigenschaften zunehmend auch von der Zellstoff- und Papierindustrie selbst eingesetzt, sodass sich insgesamt kein

gesteigertes Potential für die Mitverbrennung dieser Schlämme ergibt. Es wird angenommen, dass zumindest kurzfristig die Mitverbrennung von anderen Klärschlämmen (z.B. kommunaler Klärschlamm, De-Inking Schlamm) in der Zement- und Ziegelindustrie nicht realisiert werden wird. Die Auswirkungen des internen Papiers („Positivliste“) können nicht abgeschätzt werden.

- Zusammenfassende Darstellung

In der nächsten Tabelle wird versucht, eine Abschätzung der zukünftigen Kapazitäten zur Mitverbrennung von Klärschlamm wiederzugeben. Die Trockensubstanz wird – falls keine anderen Angaben vorliegen – mit 25 % abgeschätzt, bzw. auf diesen Gehalt umgerechnet.

*Tabelle 1.11: Zusammenfassende Abschätzung der zukünftig möglichen Kapazitäten zur Mitverbrennung von Klärschlamm*

Sektor	Zusätzliche Kapazität (t/a; 25 % TS)	Bemerkung
Geplante Anlagen zur Abfallverbrennung	220.000	90.000 t sind für die erwartete erhöhte Klärschlammproduktion im Wiener Raum geplant
Zellstoff- und Papierindustrie	20.000	Mögliche Substitution der Steinkohle
Zementindustrie	-	Bevorzugt Papierfaserreststoffe
Fa. Funder	6.000	Aufgabe nur in getrockneter Form möglich
Kalorische Kraftwerke	250.000 132.000	Kraftwerke des Verbund Andere Kraftwerke (Substitutionsgrad: 5 %)
Summe	628.000	

Aus Kapitel 1.5.1 geht hervor, dass derzeit etwa 100.000 t TS deponiert werden. Unter der Annahme, dass die landwirtschaftliche Verwertung (ca. 44.500 t/a TS), die Kompostierung (ca. 23.900 t/a TS) und die sonstigen Verwertungswege (Landschaftsbau, Bauzuschlagstoff, andere; ca. 78.000 t/a TS) des Klärschlammes keine wesentlichen Änderungen erfahren werden, und der bisher deponierte Anteil zur Gänze thermisch verwertet oder entsorgt wird, müssen daher neue Verbrennungskapazitäten im Ausmaß von ca. 100.000 t Trockensubstanz pro Jahr geschaffen werden.

Berücksichtigt man zusätzlich noch die erwartete gesteigerte Produktion von kommunalem Klärschlamm, so erhöht sich diese Summe auf ungefähr 150.000 t Trockensubstanz im Jahr.

100.000 - 150.000 t TS entsprechen 400.000 - 600.000 t Klärschlamm mit 25 % Trockensubstanz. Für 220.000 t sind bereits Verbrennungskapazitäten in Abfallverbrennungsanlagen eingeplant (Tabelle 1.11). Daraus folgt, dass für ungefähr 180.000 - 380.000 t Klärschlamm (TS 25 %) zusätzliche Verbrennungsmöglichkeiten geschaffen werden müssen.

Klärschlämme könnten in geeigneten Abfallverbrennungsanlagen verbrannt oder mitverbrannt werden. Kapazitäten zur Mitverbrennung bestehen noch in Kohlekraftwerken, wobei das theoretisch mögliche Volumen mit 382.000 t (25 % TS) abgeschätzt wird.

## 1.6 Verbrennung von Klärschlamm in Monoverbrennungsanlagen

Bei der Monoverbrennung wird der Klärschlamm hauptsächlich in Öfen mit stationärer Wirbelschicht – ohne Ascheumlauf – verbrannt, vereinzelt werden Etagen- und Etagenwirbelöfen eingesetzt. Wichtige Prozessbedingungen sind dabei

- Verbrennungstemperatur: mindestens 850°C.
- Verweilzeit der Rauchgase bei dieser Temperatur: mindestens 2 Sekunden.
- Mindestsauerstoffgehalt im Rauchgas: 6 Vol %

Zur selbstgängigen Verbrennung muss der Klärschlamm entwässert und teiltrocknet werden (nicht stabilisierter Schlamm kann bei 28 – 30 % TS, Faulschlamm ab 40 % TS selbstgänglich verbrannt werden).

Die Trocknung kann durch Abhitzenutzung energieautark ausgeführt werden; dies geschieht mit integrierten Trocknungs- und Verbrennungsanlagen. Eine vollständige Trocknung wird bei einigen Verfahren nicht angestrebt, da die Verbrennungstemperatur durch die Kühlung bei der Wasserverdampfung auf 950°C begrenzt werden kann.

Die Abgasreinigung erfolgt durch Elektro- oder Schlauchfiltern, mehrstufigen nassen Wäschern, SCR oder SNCR und gegebenenfalls durch Aktivkohlefilter. Emissionsmesswerte der Wirbelschichtöfen sind in der Tabelle 1.12 dargestellt.

Tabelle 1.12: Emissionsmesswerte der Wirbelschichtöfen 1999 (Angaben in mg/Nm<sup>3</sup> [Dioxine in ng/Nm<sup>3</sup>] bezogen auf 11 % O<sub>2</sub> und trockenes Abgas) (WIESER 2000).

Parameter	Emissionsmessung (mg/Nm <sup>3</sup> )	Grenzwert lt. LRG-K 1988 (Altanlagen) (mg/Nm <sup>3</sup> )	Grenzwert lt. LRV-K 1989 (mg/Nm <sup>3</sup> )	Grenzwert lt. Bescheid (mg/Nm <sup>3</sup> )
Staub	< 0,4	25,0	15,0	10
HCl	0,9	15,0	10,0	15
HF	< 0,09	0,7	0,7	0,1
SO <sub>2</sub>	3	100,0	50,0	100
CO	3	100,0	50,0	
NO <sub>2</sub>	105	100,0	100,0	350
Pb	< 0,094			1,3
Zn	< 0,094			1,3
Cr	0,016			0,2
Σ Pb + Cr + Zn	<0,11	4	2,0	
As	<0,074			0,2
Co	< 0,020			
Ni	< 0,019			
Σ As + Co + Ni	< 0,113	1,0	0,5	
Cd	< 0,011	0,1	0,05	0,05
Hg	< 0,002	0,1	0,05	0,05
Σ KW	< 1	20,0	20,0	20
NH <sub>3</sub>	1,4	-	10,0	10
PCDD + PCDF	0,06	0,1	0,1	0,1

In Österreich wird in den drei Wirbelschichtöfen (stationäre Wirbelschicht) der Entsorgungsbetriebe Simmering GmbH der Klärschlamm aus der Hauptkläranlage verbrannt. Die Verbrennungsanlage liegt in unmittelbarer Nähe zur Kläranlage, sodass die Transportwege kurz sind und Abwasser aus der Entwässerung problemlos zurückgeführt werden kann. Dünnschlamm mit einer TS von 4,5 % wird mittels Zentrifugen auf 30 % TS entwässert und in das Wirbelbett aufgegeben.

Der stündliche Durchsatz liegt bei jeweils 3,8 t TS in den Wirbelschichtöfen 1 und 2 und bei 5,2 t TS im Ofen 3. Die Verbrennungsluft wird vorgewärmt, die Brennkammern sind mit Ölbrennern (Heizöl in den Wirbelschichtöfen 1 und 2, Altöl im Wirbelschichtofen 3).

Die Rauchgase werden einem Abhitzeessel zugeführt und mittels Elektrofilter vom Staub befreit. Anschließend werden sie mittels Kreuzstromwäschern, Venturiwäscher, SNCR und Aktiv-Koksfilter weiter gereinigt.

Die entstehenden Rückstände aus der Rauchgasreinigung sind laut ÖNORM S 2100 als gefährlicher Abfall eingestuft und müssen deponiert werden. Abwasser wird in der Hauptkläranlage gereinigt.

Die Verbrennung von Klärschlamm in eigens dafür errichteten Anlagen ist nach ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten nur in Ballungsgebieten mit einer gewissen Mindestgröße sinnvoll. In Deutschland erfolgt der Einsatz der zentralen Klärschlammmonoverbrennung auf Kläranlagen > 300.000 Einwohnern (> 5.000 t TS/a).

In Österreich gibt es außerhalb von Wien weitere 14 Kläranlagen mit einer Kapazität > 150.000 Einwohnern. Inwieweit hier der Einsatz von Monoverbrennungsanlagen ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist, bleibt zu prüfen.

Die derzeit vergleichsweise hohen Kosten der zentralen Monoverbrennung sind zum Teil darauf zurückzuführen, dass eine Verbrennungslinie nur als Reserveeinheit genutzt wird. Sollten neue Anlagen gebaut werden, so ist aller Wahrscheinlichkeit nach nicht mit der Errichtung von Reservelinien und mit entsprechend niedrigeren Behandlungskosten zu rechnen [Wiebusch, 1997]. Bei Abfallverbrennungsanlagen werden neben den Luftschadstoffen SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und Staub noch Dioxine/Furane und andere organische Verbindungen sowie Schwermetalle (vor allem Cd, Hg) abgeschieden. Zusätzlich wird das Abwasser in mehrstufigen Reinigungsanlagen behandelt und die Abfälle aus der Verbrennung und der Rauchgasreinigung werden (teilweise untertage) deponiert. Diese Maßnahmen zur Emissionsminderung sind ebenfalls mit höheren Kosten verbunden.

## 1.7 Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken

Die thermische Verwertung/Entsorgung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken kann aus folgenden Gründen vorteilhaft sein:

- Es kann auf die bestehende Infrastruktur zurückgegriffen werden.
- Die installierten Rauchgasreinigungssysteme für SO<sub>2</sub>, Staub und NO<sub>x</sub> entsprechen dem Stand der Technik für die Verbrennung von Stein- bzw. Braunkohle. Eine Erweiterung der Systeme zur Abscheidung von z.B. Schwermetallen und organischen Schadstoffen ist möglich.
- Klärschlamm ist ein Rückstand aus einem kurzzeitigen Kreislauf, weshalb das bei der Mitverbrennung entstehende CO<sub>2</sub> zum größten Teil als klimaneutral betrachtet werden kann.
- Es bestehen im Ausland (Deutschland) umfangreiche Erfahrungen zur Mitverbrennung von Klärschlamm. In Österreich wurde Klärschlamm versuchsweise mitverbrannt.
- Die Mitverbrennung von Klärschlamm kann eine energetische Verwertung sein.

- Die Mitverbrennung von Klärschlamm in bestehenden Kraftwerken ist gegenüber der Monoverbrennung in neu zu errichtenden Anlagen als kostengünstig anzusehen.

Nach SPLIETHOFF & HEIN (1997) sind sowohl Trockenfeuerungen als auch Schmelzkammerfeuerungen zur Mitverbrennung von Klärschlamm geeignet. In Braunkohlekraftwerken kommt ausschließlich die Trockenfeuerung zur Anwendung. Der Anteil der Schmelzkammerfeuerungen bei Kohlekraftwerken ist aufgrund wirtschaftlicher und betrieblicher Überlegungen rückläufig.

Bei der Mitverbrennung von Klärschlamm in Kraftwerken ist jedoch auf folgende Punkte Beachtung zu nehmen:

- Erhöhung des Brennstoffvolumenstromes aufgrund des vergleichsweise niedrigeren Heizwertes von Klärschlamm.
- Erhöhung des Abgasvolumenstromes (Änderung des Wärmeüberganges).
- Verweilzeiten der Partikel im Kessel.
- Erniedrigung des Ascheerweichungspunktes und dadurch entstehende Anbackungen im Kessel.
- Erhöhte Erosion der Heizflächen durch den erhöhten Aschegehalt und durch erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten.
- Hochtemperaturkorrosion durch erhöhte Chlorgehalte des Klärschlammes.
- Auswirkungen auf die Rauchgasreinigungseinrichtungen durch Änderung der Rauchgaszusammensetzung (z. B. Deaktivierung der DeNO<sub>x</sub> Anlage durch As, P, F oder Alkalimetalle; erhöhte Flugascheabscheidung am Elektrofilter; Beeinträchtigung der REA).
- Emissionen von Schwermetallen in die Luft (die Emissionen flüchtiger Schwermetalle wie Hg können sich bei der Mitverbrennung erhöhen).
- Mehrbelastung der Abwasserreinigung durch Entwässerung und Trocknung des Klärschlammes.
- Einfluss auf die Qualität der bei der Verbrennung und Rauchgasreinigung anfallenden Abfälle bzw. Reststoffe, insbesondere durch deren Gehalt an Alkalien, Sulfaten, Chloriden, Silikaten, unverbranntem Kohlenstoff und Schwermetallen.
- Die bestehenden Verwertungs- und Entsorgungswege der Flugasche, Grobasche und des Output aus der Rauchgasentschwefelung müssen neu überprüft werden.
- Zusätzlicher Aufwand durch Transport, Lagerung und Aufbereitung.

In Österreich sind die kohlebefeuernden kalorischen Kraftwerke hauptsächlich in den Wintermonaten in Betrieb. Falls die Mitverbrennung von Klärschlamm in kalorischen Kraftwerken realisiert wird, ist es erforderlich, diese Kraftwerke ganzjährig zu betreiben. Die ökonomischen Folgen sind zu überprüfen.

Zusätzlich muss garantiert sein, dass bei Ausfall des Kessels die Entsorgungssicherheit (Klärschlamm ist schlecht lagerbar) weiterhin gewährleistet ist. Diese kann zum Beispiel dadurch gegeben sein, dass sich mehrere Anlagen zu einem System zusammenschließen.

## **1.8 Mitverbrennung von Klärschlamm in Wirbelschichtkesseln der Zellstoff- und Papierindustrie**

In der Zellstoff- und Papierindustrie werden Wirbelschichtfeuerungen zur Verwertung und Entsorgung innerbetrieblicher Abfälle eingesetzt. Diese Kessel können mit konventionellen Brennstoffen (Kohle, Heizöl) als auch mit Abfällen (z.B. Klärschlamm) und Biomasse (z.B. Rinde) beschickt werden. Wirbelschichtfeuerungen sind stabil gegenüber wechselnden



Brennstoffzusammensetzungen (z.B. Heizwert) und ermöglichen einen guten Ausbrand. Unter geeigneten Bedingungen können Schwefel und Halogenide durch Kalksteinzugabe zum Wirbelbett gut abgeschieden werden, die NO<sub>x</sub> Emissionen können mit geeigneten Primärmaßnahmen auf einem niedrigen Niveau gehalten werden (< 200 mg/Nm<sup>3</sup>), der Einbau eines Katalysators zur sekundären Stickoxidminderung ist möglich.

Ein Nachteil dieser Feuerungen ist die Notwendigkeit, die Teilchengröße der eingesetzten Brennstoffe und Abfälle in einem eng begrenzten Bereich zu halten.

Zur Zeit werden in den Wirbelschichtkesseln der österreichischen Zellstoff- und Papierindustrie hauptsächlich im Betrieb anfallende Schlämme (zusammen mit Biomasse und fossilen Brennstoffen) eingesetzt. Diese Klärschlämme sind als innerbetrieblich anfallende Abfälle eingestuft, sodass die betreffenden Kesseln nicht dem Abfallwirtschaftsgesetz unterliegen. Dementsprechend sind die gesetzlich vorgeschriebenen Anforderungen an die einzelnen Verbrennungsanlagen sehr unterschiedlich (z.B. werden nicht für alle Anlagen Grenzwerte für Schwermetallemissionen vorgeschrieben).

Diese Kessel sind in der Regel mit Schlauchfiltern und einem Trockenadditivverfahren zur SO<sub>2</sub>-Abscheidung ausgestattet.

## 2 TECHNISCHE VORAUSSETZUNGEN FÜR DIE MITVERBREN- NUNG VON KLÄRSCHLAMM IN KOHLEKRAFTWERKEN

Neben dem Hauptziel einer Nutzung des Klärschlamm-Energieinhaltes werden bei der thermischen Verwertung und Entsorgung vom Kraftwerksbetreiber die in URBAN & FRIEDEL (1994) angeführten Ziele angestrebt:

- Mengen- und Volumenreduzierung,
- Zersetzung organischer Schadstoffe,
- Erzeugung verwertbarer Produkte und/oder
- Erzeugung inerter Rückstände zur Ablagerung.

Grundsätzlich läuft die thermische Verwertung/Entsorgung nach Abbildung 2.1 ab [URBAN & FRIEDEL, 1994]. Die thermische Klärschlammbehandlung erfordert Stabilisierungs-, Entwässerungs- und Trocknungsverfahren, weshalb die Verbrennung selbst nicht von der Vorbehandlung abzukoppeln ist.

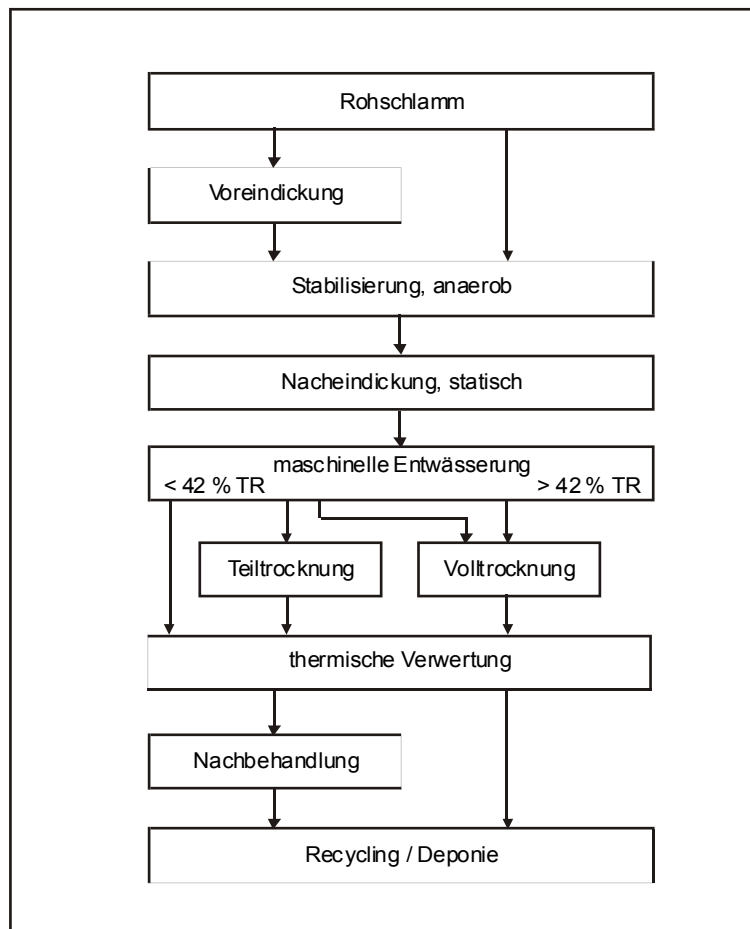


Abbildung 2.1: Hauptverfahrenswege der thermischen Klärschlammbehandlung

Verfahrenstechnisch eignen sich folgende Systeme zur Mitverbrennung:

- Steinkohlestaubbefeuerte Kraftwerke mit trockenem oder flüssigem Staubabzug (z.B. KW Weiher II in Deutschland).
- Braunkohlestaubbefeuerte Kraftwerke (z.B. KW Boxberg in Deutschland).
- Zirkulierende Wirbelschichtfeuerungen für Braun- und Steinkohle (z.B. KW Berrenrath in Deutschland).
- Vergasung von Klärschlamm und Unterfeuerung des Kraftwerkskessels (z.B. KW Zeltweg).

Ziel der Mitverbrennung ist es, den Klärschlamm ohne technisch aufwendige und kostenintensive Zwischenschritte in die Feuerung zu integrieren. Für die Beurteilung der Eignung von Klärschlämmen zur Mitverbrennung sind vor allem die in BIERBAUM & GREIF (1996) angeführten Punkte maßgebend:

- Förder-, Lager- und Dosierverhalten.
- Konsistenz, Körnung, Wassergehalt.
- Heizwert.
- Ascheschmelzverhalten.
- Schadstoffe / Emissionen.
- Eigenschaften der anfallenden Abfälle aus der Rauchgasreinigung und aus der Verbrennung.

Im Falle der Mitverbrennung größerer Mengen an Klärschlamm können zusätzliche Installationen an der Kraftwerksanlage erforderlich sein. Hier sind vor allem Einrichtungen zur Lagerung und zum innerbetrieblichen Transport, Einrichtungen zur Entwässerung und Trocknung, Aufgabeeinrichtungen sowie - in Abhängigkeit von der Technik und Kapazität der bereits installierten Rauchgasreinigungsanlage - zusätzliche Maßnahmen zur Reinigung der Rauchgase (z.B. Aktivkohlefilter) zu nennen. Da bei der Mitverbrennung zusätzliche Schadstoffe im Rauchgas (z.B. Schwermetalle) zum Teil auch kontinuierlich zu messen sind, erhöht sich auch der messtechnische Aufwand. Der dafür notwendige technische Aufwand und die Kosten werden vom Kraftwerksbetreiber in Anbetracht des wirtschaftlichen Nutzens als gering eingestuft.

Wird die Mitverbrennung von Klärschlamm in Kraftwerken geplant, sind deshalb nachstehende Aspekte zu untersuchen.

#### **Technische Voraussetzungen der Mitverbrennung:**

- Eigenschaften der Klärschlämme.
- Vorbehandlung und Lagerung der Klärschlämme.
- Aufgabe der Klärschlämme in die Feuerung.
- Eignung der Feuerung, des Kessels, der Rauchgasreinigung und der Überwachungs- und Kontrollgeräte.

#### **Technische Auswirkungen der Mitverbrennung**

- Anlagenverfügbarkeit (Stunden pro Jahr).
- Standzeit einzelner Anlagenkomponenten.
- Reparatur und Wartung.
- Qualität der Abfälle aus der Verbrennung und der Rauchgasreinigung.

### **Genehmigungsrechtliche Fragen der Mitverbrennung**

- Genehmigungsverfahren.
- Änderung der Genehmigungssituation (Genehmigung nach Abfallwirtschaftsgesetz).

### **Kosten der Mitverbrennung**

- Kosten pro Tonne Klärschlamm.
- Zusatzinvestitionen vor / in / hinter Feuerung und Kessel.
- Betriebs mehr-/Minderkosten.
- Instandhaltungskosten.

## **2.1 Logistik**

Logistische Maßnahmen lassen sich prinzipiell in innerbetriebliche (Lagern und Fördern), sowie in außerbetriebliche Maßnahmen (Transport) unterteilen. Einrichtungen zur innerbetrieblichen Logistik sind Bunker, Silos, Lagerplätze sowie diverse Förderaggregate.

Zwei besonders wichtige Punkte müssen beachtet werden:

- Schwankungen in der angelieferten Klärschlamm mengen müssen durch den Bau von geeigneten Silos ausgeglichen werden.
- Bei Ausfall oder Stillstand des Kessels muss die Entsorgungssicherheit von Klärschlamm weiterhin gewährleistet sein. Das erfordert die Bereitstellung alternativer Entsorgungswegen (z.B. Verband mehrerer Kraftwerke).

Neben den Vorrichtungen zum Handling des Klärschlammvolumens sind auch Vorkehrungen zur Sicherung der Klärschlammqualität (z.B. Heizwert, Schwermetalgehalt) notwendig. Diese umfassen die Analyse der eingegangenen Klärschlämme, die Auswertung und Aufbewahrung der Analyseergebnisse sowie die Möglichkeit, Klärschlamm unzureichender Spezifikation zurückzuweisen. Die chemische und physikalische Zusammensetzung von Klärschlamm ist im Kapitel 2.3.1 angegeben.

### **2.1.1 Lagerung**

Klärschlämme können in Lagereinrichtungen (z.B. Behälter oder Bunker), welche mit Aus-tragseinrichtungen (z.B. Zellenradschleusen oder Schnecken) ausgestattet sind, am Kraftwerksstandort gelagert werden.

Lagereinrichtungen dienen zur:

- Aufnahme der angelieferten Klärschlämme,
- Pufferung von Anlieferungsschwankungen (Wochenendbetrieb),
- Verhinderung von Geruchs- und Staubemissionen.

Die Lagereinrichtungen sind so zu konzipieren, dass der Klärschlamm in Reihenfolge der Anlieferung dem Kessel zugeführt wird („first in – first out“). Entwässerte Klärschlämme gasen je nach Schlammalter weiter aus, was zu erheblichen Geruchsbelästigungen führen kann.

Der Stabilisierungsgrad von Schlämmen aus biologischer Abwasserbehandlung ist eine Funktion des Schlammalters. Die übliche Anforderung an kommunale Kläranlagen beträgt mindestens 25 Tage, wobei Klärwerke, welche dem Stand der Technik nicht entsprechen, diese Anforderung nicht immer erfüllen. Bei diesem Schlammalter sind Schlämme metastabil, d.h. eine der Schlamm-entwässerung folgende Ausgasung erfolgt noch. Völlig sta-

bilisiert sind solche Schlämme erst bei einem Schlammalter von > 45 Tagen. Ebenso sind anaerob stabilisierte Schlämme auch nach 28 – 30 Tagen im Faulturm ( $T = 30 - 32^{\circ}\text{C}$ ) noch nicht restlos ausstabilisiert.

Eine längere offene Lagerung entwässerter metastabiler Schlämme in Nahelage zu einem Siedlungsgebiet muss daher als problematisch angesehen werden.

Aufgrund der hohen Kosten der Klärschlamm Lagerung und des erheblichen Genehmigungsaufwandes ist es vorteilhaft, das Lagervolumen zu minimieren. Hier wird nach Möglichkeit das „just in time“ -Prinzip angestrebt. Allerdings hängt diese Art der Einbringung von der Betriebsperioden des Kohlekessels ab, welche auf längere Sicht nicht vorhersehbar ist.

Bei der Lagerung von Nassklärschlamm in geschlossenen Behältern muss auch die Möglichkeit einer Methangasexplosion beachtet werden. Nach THOMÉ-KOZMIENSKY (1998) können diesbezüglich folgende Maßnahmen getroffen werden:

- Vermeidung von  $\text{CH}_4$ -Ansammlungen in den Schlammsilos und dem Annahmehunker durch Luftaustausch sowie
- Überwachung der  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen.

Der Luftaustausch kann durch Ansaugen der Verbrennungsluft für den Kessel aus dem Schlammsilo erzielt werden. Im Falle des Kraftwerkstillstandes ist die Aufrechterhaltung der Durchlüftung durch Gebläse zu bewerkstelligen. Eine geeignete Behandlung der Abluft muss in diesem Fall ebenfalls gewährleistet sein.

Entwässerte Schlämme können aufgrund ihrer krümeligen Konsistenz auch auf Schlamm Lagerplätzen gelagert werden. Diese müssen überdacht sein, abfließendes Wasser muss erfasst und entsprechend gereinigt werden.

URBAN & FRIEDEL (1994) weisen darauf hin, dass die längere Lagerung eines Klärschlammes mit hoher TS aufgrund seines hygroskopischen Verhaltens nicht sinnvoll ist.

## 2.1.2 Förderung

Die Wahl des geeigneten Fördermittels zur innerbetrieblichen Klärschlammförderung hängt sehr stark von den chemischen und physikalischen Eigenschaften des Schlammes ab. Prinzipiell wird hier zwischen Pumpen und Feststoffförderern unterschieden.

### 2.1.2.1 Pumpen

Pumpen eignen sich zum Transport entwässerter Klärschlämme, wobei Pumpsysteme folgende Vorteile bieten [THOMÉ-KOZMIENSKY, 1998]:

- Keine Geruchsbelästigung.
- Keine Verschmutzung des Umfeldes.
- Ideal an die baulichen Gegebenheiten anpassbar.
- Geringer Platzbedarf der Rohrleitungen.

Mittels Doppelkolbenpumpen können hochentwässerte Klärschlämme bis über 50 % TR gefördert werden. Die Pumpen sind als Zwei-Zylinder-Kolbenpumpen ausgeführt, in denen zwei gegenläufige Kolben das Material ansaugen und in eine Förderleitung pressen. Exzenter-schneckenpumpen eignen sich für TR-Werte bis 45 %.

Die Einsatzgrenzen von Pumpentechnologien werden durch den Druckverlust in den Rohrleitungen bestimmt, der wiederum abhängig vom Trockenrückstand des Klärschlammes ist (Abbildung 2.2).

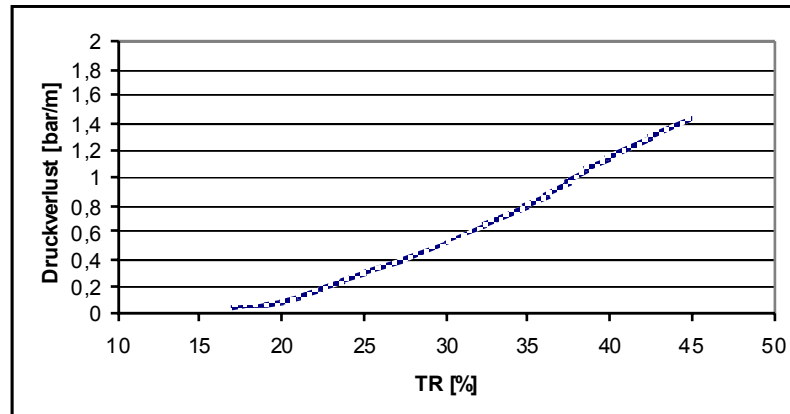


Abbildung 2.2: Abhängigkeit des Druckverlustes vom Trockenrückstand nach THOMÉ-KOZMIENSKY (1998)

Aufgrund des oftmals höheren TS-Wertes der angelieferten Klärschlämme sind Pumpen im Zusammenhang mit der Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken von untergeordneter Bedeutung.

### 2.1.2.2 Feststoffförderer

Trockener Klärschlamm mit fester, krümeliger Konsistenz wird vor allem mittels Stetigförderern transportiert.

Zum Transport von Klärschlamm werden vorwiegend nachstehende Anwendungen eingesetzt [THOMÉ-KOZMIENSKY, 1998]:

- Gurtbandförderer  
Diese bestehen aus einem Endlosband (Gummi mit Textileinlage, Neopren) sowie Umlenk- und Tragrollen. Das Fördergut liegt während des Transports ruhend in den Gurten. Zur Vermeidung von Rutschvorgängen sind Steigungswinkel bis lediglich 25° möglich. Durch Einbau von Rippen und Stollen kann der Steigungswinkel stark erhöht werden.
- Trogkettenträger  
Diese sind mitnehmerbestückte Endlosketten, die in jeder Ebene geführt werden können, wobei die Mitnehmer als eigentliches Förderorgan dienen. Die Ketten werden in Stahlblechtrögen geführt.
- Schneckenförderer  
Klärschlamm wird durch die Steigung der Wendeln einer rotierenden Förderschnecke gefördert.
- Rohrkettenförderer  
Rohrkettenträger sind mechanische Stetigförderer mit umlaufenden Zugmitteln zur Förderung von Schüttgütern. Das Schüttgut wird durch Mitnehmerscheiben, die durch Kettenglieder miteinander verbunden sind, in Rohren transportiert. Das Fördersystem ist in sich geschlossen, weshalb eine staubfreie Förderung ermöglicht wird.

- **Becherwerke**  
Als Förderelemente dienen an einer umlaufenden Kette oder Band einzeln befestigte Becher.
- **Pneumatische Förderer**  
Das Fördergut wird mit Hilfe eines Gasstromes durch Rohrleitungen gefördert.

## 2.2 Vorbehandlung

Unter der Vorbehandlung von Klärschlämmen zur thermischen Verwertung/Entsorgung wird im allgemeinen die mechanische Entwässerung und/oder die thermische Trocknung verstanden. Der Wassergehalt typischer Klärschlämme nach der Kläranlage liegt zwischen 93 und 99,5 %. Aufgrund großer Unterschiede im Wasserbindevermögen bestehen zwischen Schlämmen verschiedener Herkunft große Unterschiede in der Eindickfähigkeit und in der Möglichkeit zur Entwässerung. Letztere hängt im wesentlichen vom Anteil des Feststoffes (TS), dem organischen Anteil, der Art und dem Grad der Stabilisierung und von der Abwasserreinigungsanlage ab.

Abbildung 2.3 zeigt die Eigenschaften des Klärschlammes in Abhängigkeit vom Wassergehalt, sowie die eingesetzten Verfahren zur Entwässerung [BEVER, 1994].

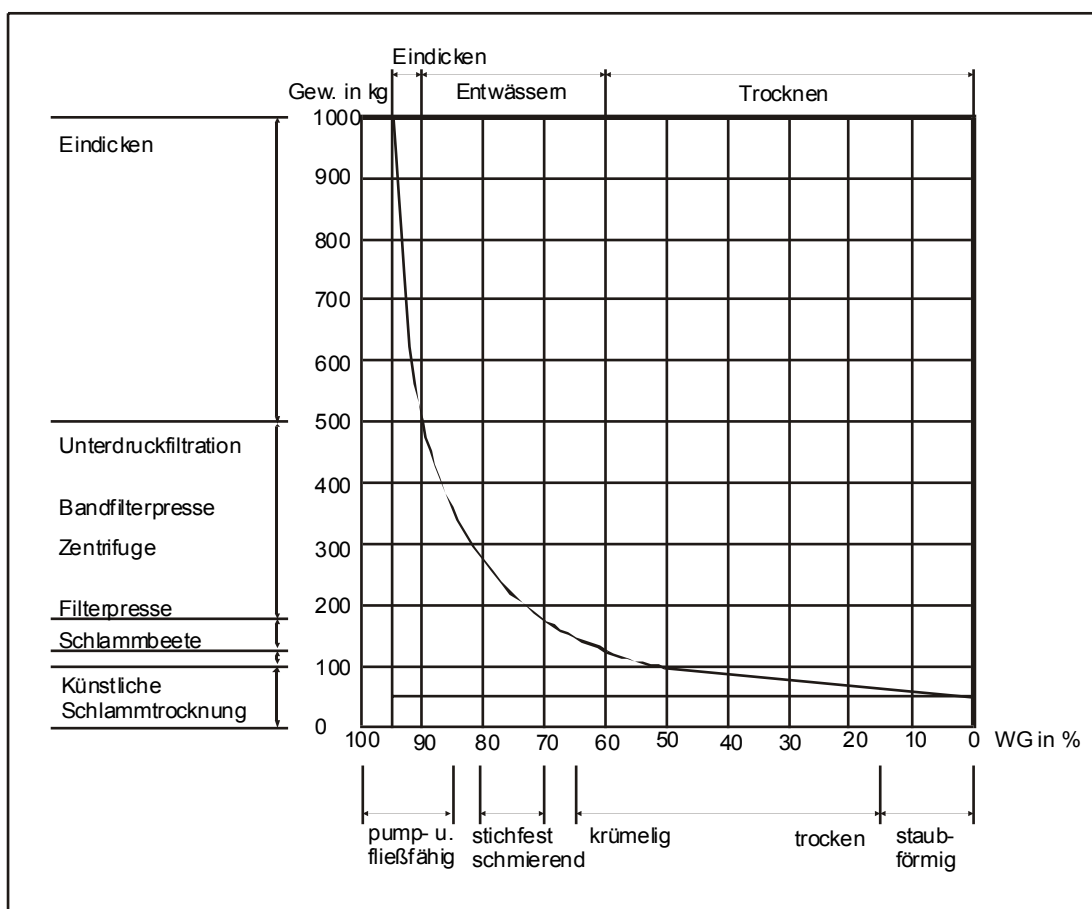


Abbildung 2.3: Entwässerung und thermische Trocknung von Klärschlämmen

In Kläranlagen fällt der Schlamm im allgemeinen mit einer Feststoffkonzentration von ca. 0,5 bis 7 % an und wird mit Siebbandpressen, Zentrifugen oder Kammerfilterpressen bis auf ei-

nen TR-Gehalt von 20 bis 35 % entwässert. Der entwässerte Klärschlamm enthält somit noch zwischen 2.000 und 4.000 Liter Wasser je Tonne Trockensubstanz.

Durch den Entwässerungs- und den nachfolgenden Trocknungsprozess kommt es zu den in THOMÉ-KOZMIENSKY (1998) angeführten Eigenschaftsänderungen des Klärschlammes:

- Verringerung des Klärschlammvolumens durch Wasserabgabe.
- Aufkonzentrierung der Schwermetalle im Trockengut.
- Herstellung eines granularen Trockengutes.
- Trockengut wird ab einem TR-Gehalt > 85 % lagerungsfähig.
- Erhöhung des Heizwertes durch Wasserentzug.

Neben der Trocknung von Klärschlamm kann zur Verbesserung des Förder-, Lager- und Dosierverhaltens eine zusätzliche Aufbereitung erforderlich werden. Als spezielle Möglichkeit wird in BIERBAUM & GREIF (1996) die Pelletierung mit Wirbelschichtbraunkohle angeführt. Die Pelletierung erspart die aufwendige und teure Trocknung, bringt den Schlamm in einen gut lager- und transportfähigen Aggregatzustand, vermindert die Geruchsentwicklung durch anaerobe Prozesse und ermöglicht die Verbrennung in Rost-, Wirbelschicht- und nach vorhergehender Aufmahlung in Staubfeuerungen.

### 2.2.1 Mechanische Entwässerung

Die thermische Trocknung von Klärschlamm ist weitaus energieaufwendiger und damit mit höheren Kosten verbunden als die mechanische Entwässerung. Aus diesem Grund soll, um die Durchsatzleistung der Trocknungsanlage bei gleichem Energieeinsatz zu steigern, der Grad der Entwässerung möglichst hoch sein.

Für die mechanische Wasserabtrennung stehen zwei Grundoperationen zur Verfügung:

- Abtrennung des Wassers durch Filtration mit Hilfe von Unter- bzw. Überdruck.
- Abtrennung des Wassers durch maschinell erzeugte Schwerefelder.

Der spezifische Arbeitsaufwand für die Abtrennung von einem Kubikmeter Schlammwasser mittels statischer Eindickung liegt bei etwa  $10^{-3}$  bis  $10^{-2}$  kWh, während für die maschinelle Entwässerung 1 bis 10 kWh benötigt werden [BEVER, 1994].

Allen Entwässerungsverfahren ist gemeinsam, dass das abgeschiedene Wasser (Filtrat- bzw. Dekantatwasser) in unterschiedlichem Ausmaß, insbesondere bei Entwässerung unter erhöhten Temperaturbedingungen, belastet ist und eine erhebliche Mehrbelastung der Abwasserreinigungsanlage darstellt.

Von THIEMANN (1992) wurden Entwässerungsversuche mit bereits einmal entwässertem Klärschlamm durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass mittels Siebbandpressen (kontinuierlich und quasikontinuierlich) eine Zweientwässerung möglich ist, hingegen Kammerfilterpressen sich als ungeeignet herausstellten. Grund dafür ist, dass zur Befüllung der einzelnen Kammern der Kammerfilterpresse der Klärschlamm wieder aufgeschlämmt werden muss. Die Versuche zeigten eine Erhöhung des Trockenrückstandes von durchschnittlich 27 auf 43 % TR. Die Trocknungsanlage kann dadurch die doppelte Menge verarbeiten, was vor allem Kostenvorteile hat.

Durch die Konditionierung des Schlammes kann der Grad der Entwässerung ebenfalls erhöht werden. Eine Möglichkeit ist die Zugabe von feingemahlener Kohle als Filterhilfsmittel bis zu einem Anteil von 50 % des Trockensubstanzgehaltes des Klärschlammes.



## 2.2.2 Thermische Trocknung

Der Einsatz von Klärschlämmen in der Schmelzkammerfeuerung erfordert eine vorhergehende Trocknung der Schlämme auf einen Trockensubstanzgehalt von etwa 90 % [GERHARDT et al., 1996].

Bei der Trocknung wird zwischen einem TS-Gehalt von 45 und 60 % die Laimphase durchschritten, welche durch hohe Scherfestigkeit gekennzeichnet ist und eine mechanische Durchmischung in einem Trockner unmöglich macht. Aus diesem Grund soll diese Phase durch Anhebung auf TS-Gehalte von über 60 % im Eingangsstrom durch Trockengutrückführung umgangen werden. Ab diesem TS-Gehalt wird das Trockengut rieselfähig und ab 90 % TS verhält sich das Produkt stabil, d.h. es tritt keine Verpilzung mehr auf. Aufgrund des hohen Staubanteiles des Trockenschlammes besteht jedoch eine erhöhte Explosionsgefahr [BEVER, 1994].

Die direkte thermische Trocknung von Flüssigschlamm hat praktisch keine Bedeutung. Grund dafür sind die etwa 100 mal höheren Energiekosten der thermischen Trocknung gegenüber der mechanischen Entwässerung. Der Energieeinsatz zur thermischen Trocknung beträgt ungefähr 3.000 - 3.500 MJ/t entzogenen Wassers [BEVER, 1994].

Der getrocknete Klärschlamm kann entweder ohne weitere Aufbereitung oder nach gemeinsamer Aufmahlung mit der Kohle in den Kessel eingeblasen werden. Im letzteren Fall ist die Korngrößenverteilung von Kohle und Klärschlamm gleich, weshalb es zu einer homogenen Verteilung der Schlammteilchen in der Kohle kommt [GERHARDT et al., 1996].

### 2.2.2.1 Direkt- und Indirekttrocknung

Für die verschiedenen Trocknungsverfahren gibt es hinsichtlich der Eingangs- und Ausgangsfeststoffgehalte kaum Einschränkungen. Man unterscheidet zwischen der Direkttrocknung (Konvektionstrocknung) und der Indirekttrocknung (Kontaktstrocknung).

Abbildung 2.4 stellt das Prinzip der beiden Trocknungsvarianten dar [KREBS, 1994].

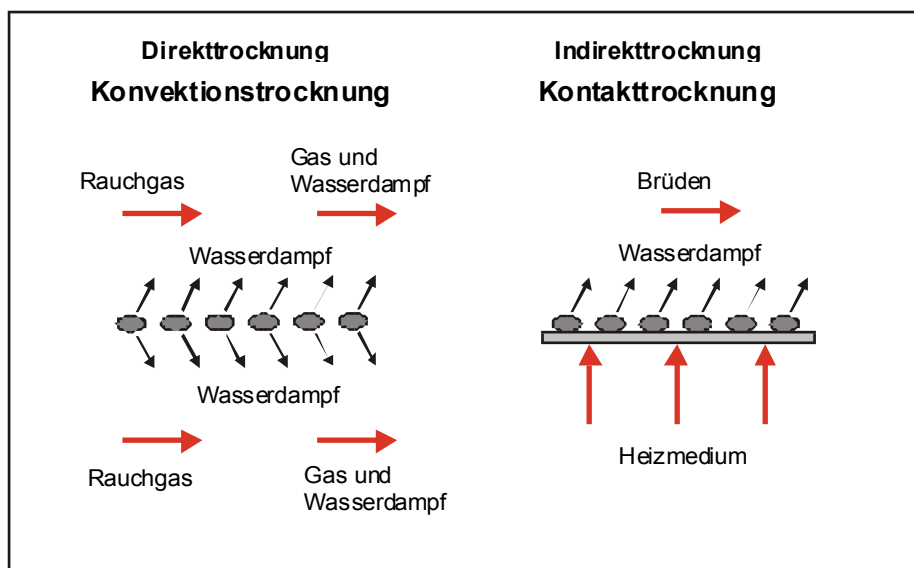


Abbildung 2.4: Trocknungsprinzip

In Tabelle 2.1 werden verschiedenen Bauformen der Trocknungsvarianten dargestellt [BEVER, 1994].

Tabelle 2.1: Einteilung von Trocknern

Direktrockner (Konvektionstrockner)	Indirektrockner (Kontaktrockner)
Bandrockner	Schneckenrockner
Etagentrockner	Scheibentrockner
Trommelrockner	Dünnschichtrockner
Wirbelschichtrockner	Knetrockner
Stromrockner	
Mahlrockner	

### Direktrocknung (Konvektionstrocknung)

Das Prinzip der Direktrocknung basiert auf dem gemeinsamen Eintrag von Klärschlamm und Heißgas in den Trockner. Zur Vermeidung von Verschmelzungen wird die Heißgastemperatur durch Zumischung von Abgas auf 200 bis 500 °C herabgesetzt. Am Ende des Trockners wird das Trockengut abgezogen; das Trockengas ist bereits so weit abgekühlt, dass keine Wärmenutzung mehr möglich ist. Die Trockengase werden anschließend in der Brennkammer desodoriert.

In KRONE et al. (1992) wird im speziellen auf die Eignung von Wirbelschichtrocknern zur Klärschlammrocknung hingewiesen. Dabei wird das Einsatzgut in einer stationären Wirbelschicht durch einen Dampfstrom fluidisiert. Die zur Trocknung erforderliche Wärme wird indirekt über Wärmetauscher in den Wirbelraum eingebracht. Voraussetzung dafür ist die Granulierung des Klärschlammes zu einem wirbelfähigen Rohgranulat (60 % TS). Das Rohgranulat kann durch Pflugscharmischer unter Zumischung bereits getrocknetem, staubförmigem Klärschlamm hergestellt werden.

Abbildung 2.5 zeigt eine mögliche Schaltung eines Direktrockners. Dabei kommt es zu keinem direkten Kontakt der Rauchgase mit dem Klärschlamm; als Übertragungsmedium dient überhitzter Wasserdampf, der im Kreislauf geführt wird und über Wärmetauscher die Umluft erhitzt. Die überschüssige Abluft wird zur Behandlung in den Brenner rückgeführt.

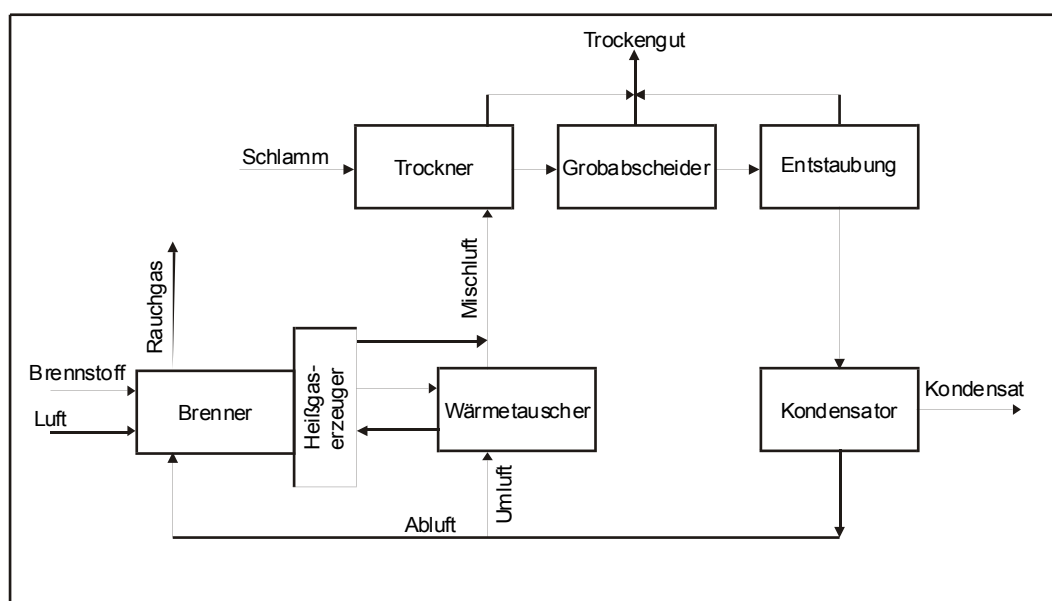


Abbildung 2.5: Typische Schaltung eines Direktrockners [BEVER, 1994]

Nachteilig dabei ist vor allem, dass das Wärmeübertragungsmedium durch den Kontakt mit dem Schlamm mit organischen Dämpfen und feinem Staub beladen wird und daher einer Reinigung bedarf (Kapitel 2.2.2.4).

Direkttrockner sind nach THOMÉ-KOZMIENSKY (1998) gekennzeichnet durch:

- Robuste Konzeption mit wenigen beweglichen Teilen.
- Trocknung von Schlämmen mit wechselnder Konsistenz.
- Großen Brüdenstrom.
- Geruchs- und Staubemissionen infolge hoher mitgeführter Staubanteile.

### Indirekttrocknung (Kontaktrocknung)

Bei der indirekten Trocknung wird die Wärmeenergie der Verbrennungsgase über Heizflächen und einen zwischengeschalteten Wärmeträger an den Schlamm übertragen (Abbildung 2.6).

Bei Indirekttrocknern wird die Wärme in einem Kessel separat erzeugt; die Wärmezufuhr an den Schlamm erfolgt dabei über die Wände. Dies hat den Vorteil, dass es zu keiner Durchmischung von Wärmeträger und Schlamm kommt, die Brüden deshalb hauptsächlich aus Wasserdampf mit geringen Anteilen an Leckluft und aus dem Schlamm ausgetriebenen Gasen bestehen. Der Wasserdampf wird nach BEVER (1994) auskondensiert; der übrigbleibende kleine Gasstrom kann problemlos im Kessel desodoriert werden (Kapitel 2.2.2.4).

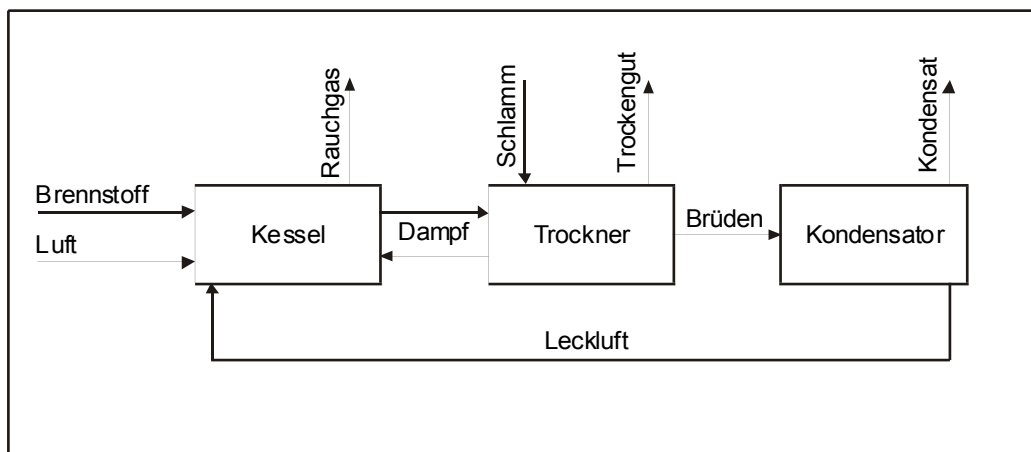


Abbildung 2.6: Typische Schaltung eines Indirekttrockners [BEVER, 1994]

Kontaktrockner sind nach THOMÉ-KOZMIENSKY (1998) gekennzeichnet durch:

- Niedrige Temperatur des Heizmediums.
- Überwindung der Lamphase ohne Rückführung von Trockengut.
- Erhöhter Verschleiß durch mechanische Bewegung des Trockengutes.
- Aufwendige Trocknerkonstruktion durch Trennung von Heizmedium und Schlamm.
- Hoher Platzbedarf.

### 2.2.2.2 Solare Trocknung

Eine Alternative zur Klärschlamm-trocknung mittels Heißgasen stellt die solare Trocknung dar. Durch Sonneneinstrahlung verdunstet das Wasser im Klärschlamm und wird über einen Kamin abgeführt. Häufiges Wenden beschleunigt diesen Vorgang wesentlich. Das Endprodukt ist ein lockeres geruchloses Granulat mit einem unter Idealbedingungen erreichbaren TS-Gehalt von 90 % [LUBOSCHIK, 1995]. Bei dieser Art der Trocknung werden keine fossilen Energieträger verwendet, sodass der volle Energieinhalt des Klärschlammes für die Substitution fossiler Brennstoffe zur Verfügung steht. In Deutschland existieren 14 Anlagen zur solaren Trocknung, in Österreich wurde Mitte Oktober 2001 in Bramberg die erste Anlage eröffnet. Der Nachteil dieser Trocknungsart ist der hohe Platzbedarf (1 m<sup>2</sup> pro m<sup>3</sup> entwässertes Schlamm) und die fehlende Möglichkeit der Abluftbehandlung [KERN, 2001].

### 2.2.2.3 Beispiel für Indirekttrocknung: Klärschlamm-trocknung im Kraftwerk Weiher II

In JOHÄNNTGEN (1992) wird auf das Steinkohlekraftwerk Weiher II verwiesen, welches in Kombination mit einer Klärschlamm-trocknungsanlage betrieben wird. Das Kraftwerk Weiher II besteht aus zwei Blöcken mit einer elektrischen Bruttoleistung von jeweils 150 MW, und basiert auf dem System der Schmelzkammerfeuerung.

In diesem Zusammenhang weist JOHÄNNTGEN (1992) darauf hin, dass auch nach dem Faulprozess in der Kläranlage eine Gasbildung durch den entwässerten Schlamm nicht ausgeschlossen ist (erhöhte Explosionsgefahr im Nassschlammsilo). Im Falle des Kraftwerkes Weiher II wurden die Silos entsprechend adaptiert. Dabei wurden nachstehende Maßnahmen zur Verhinderung von Explosionsschäden getroffen:

- Luftabsaugung aus dem Silo
- Überwachung der Absaugmenge
- Überwachung der Methankonzentration in der Abluft
- Möglichkeit der Inertisierung mit Stickstoff.

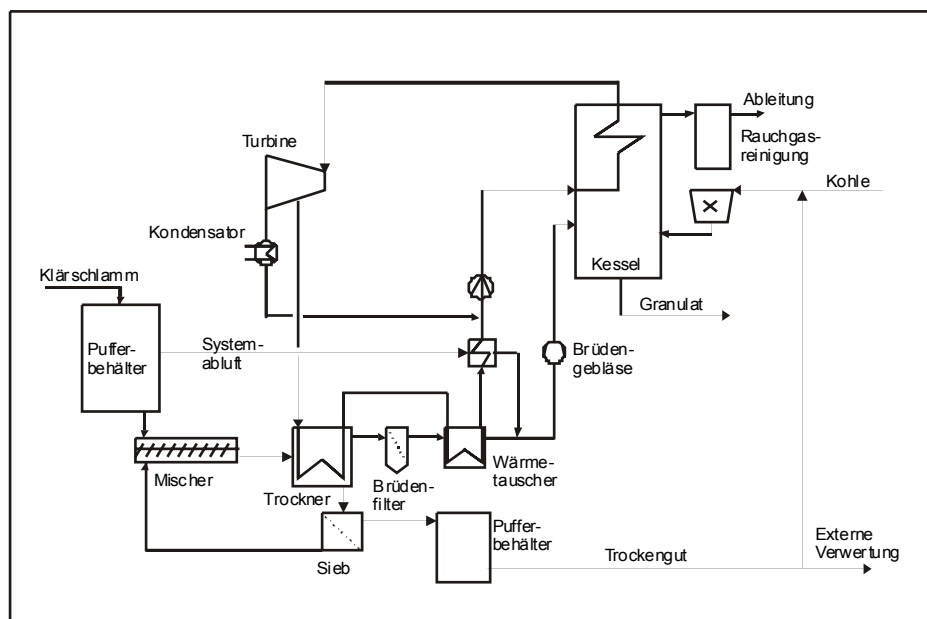


Abbildung 2.7: Verbund von Kraftwerk und Klärschlamm-trocknung

Klärschlamm mit einem Wassergehalt von 60 bis 80 % wird nach der Stabilisierung und mechanischen Entwässerung von den Klärwerken übernommen. Die für den Trocknungsvorgang benötigte thermische Energie wird unter Ausnutzung der Kraft-Wärme-Kopplung aus dem Entnahmedampf des Kraftwerksprozesses aufgebracht (Abbildung 2.7).

Das Dampfcondensat wird wieder in den Kreislaufprozess rückgeführt. Die beim Trocknen des Klärschlammes anfallenden Brüden und die Systemabluft werden zur Verbrennung in den Kessel geleitet. Zur Vermeidung der Kondensation werden die Brüden auf etwa 140°C durch einen Wärmetauscher aufgeheizt. Aufgrund der hohen Kesseltemperaturen (Schmelzkammerfeuerung) wird eine vollständige Zerstörung der organischen Schadstoffe erreicht.

Nach DRESCHER & MARTIN (1994) waren die in Tabelle 2.2 angeführten Randbedingungen für die Anlagenauslegung vorgegeben.

Tabelle 2.2: Auslegungsdaten für Klärschlammrocknung KW Weiher II

<b>Klärschlamm</b>	aus verschiedenen Kläranlagen, stabilisiert und entwässert
<b>Durchsatz</b>	30.000 t/a mit 18 bis 40 % TS
<b>Endprodukt</b>	Trockengut > 90 % TS
<b>Logistik</b>	Nassschlammereich (Input): 600 t/d Trockengutbereich (Output): 240 t/d
<b>Verfügbarkeit</b>	> 6.000 h/a – 5 t/h (Sollleistung)
<b>Verfügbare Energie</b>	Dampf mit 200°C bei 7 bar

Die Trocknungsanlage selbst ist als zweistrassige Scheibentrocknungsanlage für einen maximalen Anlagendurchsatz von 30.000 t entwässertem Schlamm pro Jahr ausgelegt. Tabelle 2.3 führt die dazu notwendigen Anlagenteile an [DRESCHER & MARTIN, 1994].

Tabelle 2.3: Anlagenteile zur Klärschlammrocknung KW Weiher II

<b>Annahmehunker</b>	2 x 30 m <sup>3</sup>
<b>Dickstoffpumpen (Annahmehunker zu Lagersilo)</b>	2 x 20 t/h
<b>Lagersilo</b>	2 x 300 m <sup>3</sup>
<b>Dickstoffpumpen (Lagersilo zu Mischer)</b>	2 x (0,6 – 5 t/h)
<b>Mischer</b>	2 x 20 t/h
<b>Trockner</b>	2 x 250 m <sup>2</sup> Heizfläche; 2 x 1,75 t H <sub>2</sub> O/h Verdampferleistung
<b>Becherwerk</b>	2 x 18 t/h
<b>Siebanlage</b>	2 x 20 t/h
<b>Feingutbunker</b>	2 x 6 m <sup>3</sup>
<b>Trockengutsilo</b>	2 x 130 m <sup>3</sup>
<b>Brüdengebläse</b>	2 x 7.500 m <sup>3</sup> /h zum Kraftwerk; 2 x 1.500 m <sup>3</sup> /h im Kreislauf
<b>Abluft-Notgebläse</b>	

Die Investitionskosten für die Trocknungsanlage Weiher II belaufen sich auf etwa 196 Mio. ATS bzw. 14,3 Mio. € (inkl. Mehrwertsteuer). Als spezifische Trocknungskosten im

KW Weiher II werden nach DRESCHER & MARTIN (1994) etwa 4.550 ATS/t TS bzw. 332,1 €/t TS angeführt.

Das entstehende Trockengut kann einer externen Verwertung bzw. dem Kessel zur Mitverbrennung zugeführt werden.

#### 2.2.2.4 Brüden- und Abluftbehandlung aus der Trocknung

Die Verdampfungstemperatur im Trockner soll, um den Anteil an flüchtigen Komponenten in den Brüden gering zu halten, so tief wie möglich liegen. Falls die Brüden kondensiert werden, wird ein Großteil der zumeist organischen Stoffe im Kondensator abgeschieden. Die Belastung der Kondensate ist sehr stark verfahrensabhängig und weist zwischen den einzelnen Trocknungsvarianten hohe Schwankungsbreiten auf (Tabelle 2.4).

Tabelle 2.4: Belastung der Brüdenkondensate [BEVER, 1994]

Parameter	Gehalt [mg/l]
CSB	180 – 5.000
BSB <sub>5</sub>	35 – 3.000
NH <sub>4</sub> -N	230 – 880
P <sub>ges</sub>	ca. 20
Chlorid	10 – 20

Im ersten Behandlungsschritt der Brüdenbehandlung werden die in den Brüden mitgeführten Feststoffpartikel abgeschieden. Dazu werden Fliehkraftabscheider (Zyklone) sowie filternde Abscheider verwendet.

Nach der Entstaubung können die Brüden kondensiert werden, wobei sie durch direkten Kontakt mit einem Kühlmedium bzw. indirekt über gekühlte Oberflächen unter den Taupunkt abgekühlt werden. Durch Rückgewinnung von Wärme aus der Kondensationsstufe kann die Wärmebilanz der thermischen Trocknung etwa verbessert werden.

Qualität und Quantität von Brüdenkondensaten sind abhängig von den mit dem Schlamm eingebrachten Schadstoffen sowie der Verfahrenstechnik des Trockners. Bei der Wirbelschichttrocknung ist die Belastung der Kondensate am höchsten, da durch die hohe Kreislaufgeschwindigkeit feinste Staubpartikel mitgerissen werden, die auch im Zyklon nicht abgeschieden werden und dadurch im Kondensat anfallen. Die bei der Trocknung anfallenden Kondensate müssen einer Kläranlage zugeführt werden [THOMÉ-KOZMIENSKY, 1998].

Die Menge an anfallenden Brüden kann als das Produkt des Klärschlamm durchsatzes und der Differenz aus Eingangs- und Ausgangswassergehalt des Klärschlammes abgeschätzt werden.

Die schlechte Wasserlöslichkeit und der geringe Partialdruck der geruchsintensiven Stoffe (10.000 bis 70.000 Geruchseinheiten) erfordert eine Behandlung der Abluft. Einfachste Variante ist die Zerstörung dieser geruchsintensiven Stoffe im Kessel.

Beispielhaft zeigt THOMÉ-KOZMIENSKY (1998) die Konzentrationen an Schadstoffen in der Abluft eines Trommeltrockners nach der Abluftreinigung mittels E-Filter, Kondensator und Biofilter (Tabelle 2.5).

Tabelle 2.5: Emissionen einer Trommel Trocknungsanlage nach E-Filter, Kondensator und Biofilter [THOMÉ-KOZMIENSKY, 1998]

Parameter	Gehalt [mg/Nm <sup>3</sup> ]
Hg	< 0,0004
Cd	< 0,0002
Pb	0,0038
Cr	0,0018
PCDD/DF	< 0,003
Staub	0,2
C ohne CH <sub>4</sub>	40
CO	56
NO <sub>2</sub>	22
SO <sub>2</sub>	< 0,001
HCl	< 0,2
HF	< 0,1
Geruch	535 GE

### 2.2.2.5 Explosions- und Brandgefahr

Durch den hohen Anteil flüchtiger Bestandteile im Klärschlamm kann es bei der Trocknung und Mahlung zu Explosionen kommen. Das Explosionsverhalten von gemahlenem Klärschlamm ist wegen des niedrigen Wassergehaltes im Fertiggut und der geringen Korngröße ähnlich dem von gemahlener Braunkohle [GERHARDT et al., 1996].

Klärschlämme sind nach THOMÉ-KOZMIENSKY (1998) explosionsfähig, wenn gleichzeitig folgende Bedingungen vorliegen:

- Staubgehalt mindestens 50 g/m<sup>3</sup>.
- Mindestens 14 Vol.-% Sauerstoff.
- Zündquelle in ausreichender Stärke.

Zur Vermeidung von Staubexplosionen bieten sich folgende Möglichkeiten an:

- Der Sauerstoffgehalt im Trockner wird durch Brüdenrückführung verringert (Inertisierung).
- Maximale Umlaufgeschwindigkeit von beweglichen Teilen: 1 m/s.
- Trockner und Förderer werden zur Verhinderung des Staubaustritts luftdicht ausgeführt.
- Der Methangasgehalt im Nassbereich wird durch Luftabsaugung verringert.
- Zündquellen werden in der gesamten Anlage vermieden.
- Der Kohlenmonoxidgehalt wird überwacht, um Brände frühzeitig zu erkennen und die Anlage gegebenenfalls zu inertisieren.
- Die Verwendung filternder Abscheider wird vermieden.
- Der Sauerstoffgehalt wird überwacht.

In Tabelle 2.6 werden die Explosions- und Brandschutzmaßnahmen und die zu beachtenden Kenngrößen nach SCHOLL (1989) dargestellt.

Tabelle 2.6: Zuordnung von Kenngrößen zu Explosions- und Brandschutzmaßnahmen

Schutzmaßnahme	Kenngröße
Konzentrationsbegrenzung (Staub)	Explosionsgrenzen
Inertisierung	Sauerstoffgrenzkonzentration
Vermeidung von Zündquellen	Glimmtemperatur, Zündtemperatur, Zersetzungstemperatur, Selbstentzündungstemperatur, Schwelppunkt, Mindestzündtemperatur, Schlagempfindlichkeit, elektrostatisches Verhalten
Explosionsdruckfeste Bauweise	Maximaler Explosionsdruck
Explosionsdruckentlastung	Maximaler zeitlicher Druckanstieg und maximaler Explosionsdruck
Explosionsunterdrückung	Maximaler zeitlicher Druckanstieg und maximaler Explosionsdruck

Ab einer Temperatur von 110°C besteht die Gefahr der Selbstentzündung des getrockneten Klärschlammes. Aus diesem Grund soll das aus dem Trockner ausgetragene Gut vor der Zwischenlagerung gekühlt werden. Eine Möglichkeit bietet sich durch die Kombination von Förderung und Kühlung in Kühlschnecken. Die Wendeln der Austragsschnecke sind hier als Wärmetauscher ausgeführt.

In WITTE (1994) wird darauf hingewiesen, dass Kornanteile mit einem Durchmesser < 0,05 mm zur Selbstentzündung führen, wenn ein Gehalt von 1 % überschritten wird. Als Explosionsschutzmaßnahme wird eine Begrenzung des Korngrößenbereiches < 0,4 mm auf maximal 5 % vorgeschlagen.



## 2.3 Verbrennung von Klärschlamm

### 2.3.1 Klärschlammspezifikation

Der Heizwert von Klärschlamm hängt vom Anteil der organischen Substanz (= Glühverlust) der Trockenmasse ab. Rohschlämme weisen gegenüber Faulschlämmen einen höheren Glühverlust (65 %) bei höherem Wassergehalt auf. Die organische Substanz im Klärschlamm besitzt einen Heizwert von etwa 23 MJ/kg [BEVER, 1994]. Als Hauptkomponenten gelten Proteine (20 bis 30 %), Kohlenhydrate (10 bis 15 %) sowie Fette (10 bis 30 %), die mit 39 MJ/kg Brennwert den energieintensivsten Anteil darstellen [GERHARDT, 1998].

Durch die Faulung wird ein großer Teil der organischen Bestandteile mineralisiert, wodurch sich der Heizwert entsprechend verringert.

Eine selbstgängige Verbrennung ohne Zuführung von Fremdenergie ist theoretisch möglich, wenn der Heizwert über dem Energiebedarf zum Verdampfen des Wassers im Klärschlamm liegt. In der Praxis liegt die Grenze für eine selbstgängige Verbrennung bei einem Heizwert von 5.000 kJ/kg. Dies bedeutet einen erforderlichen TS-Gehalt von etwa 40 % [THOMÉ-KOZMIENSKY, 1998].

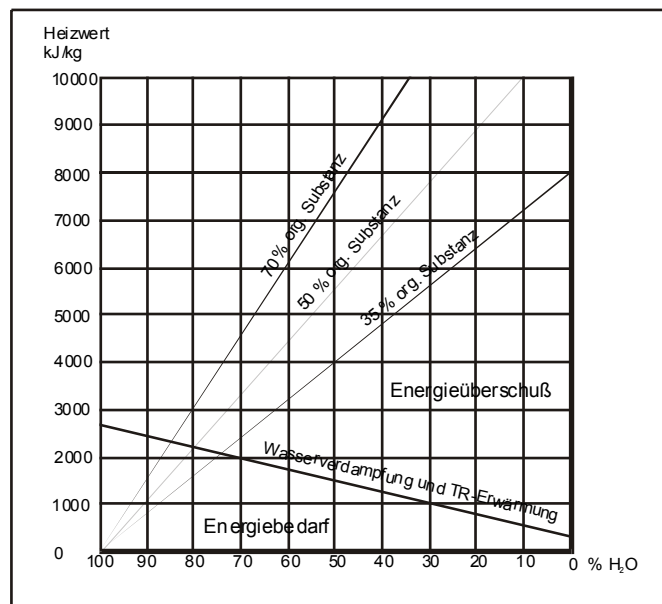


Abbildung 2.8: Energiebedarf und -Überschuss bei der Verbrennung von Klärschlamm [BEVER, 1994]

Abbildung 2.8 stellt den Energiebedarf zum Verdampfen von Wasser und der Energiegewinnung bei vollständiger Verbrennung, in Abhängigkeit vom Wassergehalt und dem Glühverlust, gegenüber. Die Darstellung geht dabei von einer vollständigen Verbrennung aus.

Die Mitverbrennung von entwässertem Klärschlamm gemeinsam mit Rohbraunkohle (Wassergehalt 50 bis 60 %) in einer Wirbelschicht- bzw. Staubfeuerung stellt sich aus verfahrenstechnischer Sicht als unproblematisch heraus. Grundsätzlich ist es günstig, wenn der Wassergehalt des Hauptbrennstoffes dem des Ersatzbrennstoffes ähnlich ist. Bei Kohlen mit niedrigen Wassergehalten sollte daher bei der Mitverbrennung getrockneter Klärschlamm eingesetzt werden [MEYER, 1998].

Der nutzbare Energieinhalt eines Brennstoffes wird durch den unteren Heizwert charakterisiert. Die Ermittlung kann einerseits über die Bestimmung des Brennwertes mittels Kalorimeter, andererseits durch rechnerische Bestimmung nach Boie erfolgen (Gleichung 2.1).

$$H_u = 35 \cdot c + 94,3 \cdot h + 10,4 \cdot s + 6,3 \cdot n - 10,8 \cdot o - 2,44 \cdot w$$

$H_u$ : unterer Heizwert [MJ/kg]  
 $c, h, s, n, o$ : Konzentration der Elemente Kohlenstoff, Wasserstoff, Schwefel, Stickstoff, Sauerstoff [kg/kg]  
 $w$ : Wassergehalt [kg/kg]

Gleichung 2.1: Heizwertbestimmung aus der Elementaranalyse [GERHARDT, 1998]

Das Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart, untersuchte gemahlene Klärschlämme im Vergleich mit Steinkohle/Göttelborn (Abbildung 2.9).

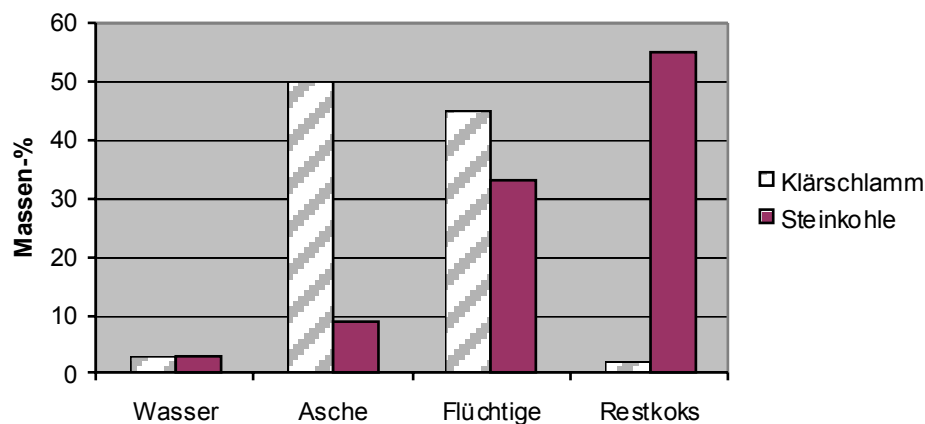


Abbildung 2.9: Vergleich: Gemahlener Klärschlamm – Steinkohle Göttelborn [GERHARDT et al., 1996]

Unter Berücksichtigung der Heizwerte

$$H_u (\text{Klärschlamm}) = 10 \text{ MJ/kg TS sowie}$$

$$H_u (\text{Steinkohle}) = 30 \text{ MJ/kg TS}$$

konnten folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Der Heizwert von getrocknetem Klärschlamm liegt etwa zwei Drittel unter dem der eingesetzten Steinkohle.
- Der Aschegehalt ist etwa fünfmal größer als der von Steinkohle.
- Der Heizwert von Klärschlamm wird überwiegend durch die flüchtigen Bestandteile eingebracht.
- Der Restkoksanteil von Klärschlamm ist gegenüber dem der Kohle sehr gering.

In THOMÉ-KOZMIENSKY (1998), MEYER (1998), UBA (1995), BMUJF (1997) und MAIER et al. (1989) werden die Stoffdaten von Klärschlamm und Steinkohle angeführt (Tabelle 2.7 und Tabelle 2.8), wobei obige Aussagen bestätigt werden. Außerdem ist aus den Daten ersichtlich, dass der Schwermetallgehalt im Klärschlamm um ein Vielfaches (bis zum Faktor 90) höher liegen kann als der in Stein- oder Braunkohle. Der Gehalt an Schwermetallen hängt stark von der Art und Herkunft des Klärschlammes ab und ist im Einzelfall zu untersuchen.

Tabelle 2.7: Kenndaten von Braun- und Steinkohle

Parameter	Rohbraunkohle (1)	Braunkohle Rheinland (2)	Braunkohle Böhmen (2)	Braunkohle Köflach (3)	Steinkohle (1)	Bereich	Einheit
Wassergehalt	10 – 60	-	-	-	3 – 10	3 - 60	Gew.-%
Heizwert H <sub>u</sub>	7 - 29	-	-	-	30 - 38	7 – 38	MJ/kg TS
Aschegehalt	3 - 17	-	-	-	10	3 – 17	Gew.-% (wf)
Flüchtige	45 - 60	-	-	-	17 - 45	17 - 60	Gew.-% (wf)
Fixer C	19	-	-	-	-	19	Gew.-% (wf)
C	60 – 80	-	-	-	80 - 93	60 – 80	Gew.-% (wf)
H	5 - 9	-	-	-	3 - 6	3 - 9	Gew.-% (wf)
N	0,5 - 2	-	-	-	1 - 2	0,5 - 2	Gew.-% (wf)
S	0,5 - 3	-	-	-	0,5 - 2	0,5 - 3	Gew.-% (wf)
Cl	300	-	-	-	200	200 - 300	mg/kg TS
F	16	-	-	-	20	16 – 20	mg/kg TS
As	-	0,4	18	10,8	-	0,4 – 18	mg/kg TS
Be	-	0,1	-	-	-	0,1	mg/kg TS
Pb	0,45	0,4	21	6,7	50	0,4 – 50	mg/kg TS
Cd	< 0,02	0,02	5	0,07	0,8	0,02 – 5	mg/kg TS
Co	-	0,6	21	-	-	0,6 – 21	mg/kg TS
Cr	1,6	1,4	-	39,1	21	1,4 – 39,1	mg/kg TS
Cu	1,1	1	25	16,0	33	1 – 33	mg/kg TS
Mn	-	160	88	-	-	88 – 160	mg/kg TS
Ni	1,8	1,6	38	40,5	30	1,6 – 40,5	mg/kg TS
Hg	0,11	0,1	0,3	0,28	0,3	0,1 – 0,3	mg/kg TS
Sb	-	5	1	-	-	1 – 5	mg/kg TS
Th	-	0,1	0,3	-	-	0,1 – 0,3	mg/kg TS
V	-	1	105	41,3	-	1 – 105	mg/kg TS
Sn	-	-	4	-	-	4	mg/kg TS
Zn	5,7	5	-	26,1	60	5 – 60	mg/kg TS

(1) THOMĚ-KOZMIENSKY (1998)

(2) MEYER (1998)

(3) MAIER et al. (1989)

Tabelle 2.8: Kenndaten von Klärschlamm

Parameter	Klärschlamm (1)	Klärschlamm (2)	Klärschlamm (5)	Klärschlamm (3)	Faulschlamm (4)	Bereich	Einheit
Wassergehalt	65 - 75	-	-	-	95	65 - 95	Gew.-%
Heizwert H <sub>u</sub>	9 - 12	-	-	-	-	9 - 12	MJ/kg TS
Aschegehalt	40 - 60	-	-	-	39,2 - 62,8	40 - 62,8	Gew.-% (wf)
Flüchtige	13 - 47	-	-	-	-	13 - 47	Gew.-% (wf)
Fixer C	1	-	-	-	-	1	Gew.-% (wf)
C	33 - 50	-	19,8 - 31	-	26,8	33 - 50	Gew.-% (wf)
H	4 - 7	-	-	-	-	4 - 7	Gew.-% (wf)
N	2 - 3	-	3 - 9,4	-	5,6	2 - 9,4	Gew.-% (wf)
S	0,5 - 2	-	-	0,85 - 0,95	-	0,5 - 2	Gew.-% (wf)
Cl	900	-	-	500 - 3.000	-	500 - 3.000	mg/kg TS
F	350	-	-	100 - 300	-	100 - 350	mg/kg TS
As	-	9,2	1,3 - 14,4	4 - 5	5	4 - 14,4	mg/kg TS
B	-	-	28 - 130	30 - 55	30	30 - 130	mg/kg TS
Ba	-	-	-	300 - 500	-	300 - 500	mg/kg TS
Be	-	0,9	< 0,2 - 0,6	< 2	0,2	0,9 - 2	mg/kg TS
Pb	300	231	40 - 290	15 - 100	109	15 - 412	mg/kg TS
Cd	4	5,5	0,2 - 3,4	2 - 6	1,5	4 - 6	mg/kg TS
Co	-	13,4	2,2 - 13,5	2 - 5	5,9	2 - 13,5	mg/kg TS
Cr	80	108,6	25 - 130	40 - 100	62	40 - 130	mg/kg TS
Cu	350	254	170 - 540	30 - 210	264	30 - 540	mg/kg TS
K	-	-	-	1.500 - 2.300	3.900	1.500 - 3.900	mg/kg TS
Mn	-	398	80 - 620	210 - 1.000	313	210 - 1.000	mg/kg TS
Na	-	-	-	1.100 - 4.400	2.519	1.100 - 4.400	mg/kg TS
Ni	40	41	14 - 94	30 - 50	39	30 - 94	mg/kg TS
Hg	3	2,25	1,4 - 3,6 (48*)	0,2 - 3	5,1	0,2 - 48	mg/kg TS
Se	-	-	< 0,5 - 4,5	< 5	1,9	<5	mg/kg TS
Sb	-	2,4	-	5 - 8,5	-	2,4 - 8,5	mg/kg TS
Th	-	1,2	< 0,5	< 2	-	1,2 - 2	mg/kg TS
V	-	35,4	8 - 30	9 - 12	15	9 - 35,4	mg/kg TS
Sn	-	51	-	10 - 30	39	10 - 100	mg/kg TS
Zn	1.600	1.205	800 - 1.700	420 - 1.080	1.188	420 - 1.700	mg/kg TS
AOX	350	-	65 - 406		172	172 - 406	mg/kg TS
PCDD+ PCDF	35	-	8,8 - 38,1		3.364,3	35 - 3.364,3	ng/kg TS

(1) THOMÉ-KOZMIENSKY (1998)

(3) VERBUNDGESELLSCHAFT (2000)

(5) UBA (1995) \* ein Wert v on 17 Proben

(2) MEYER (1998): kommunal, stabilisiert

(4) BMUJF (1997): nicht stabilisiert

### 2.3.2 Einbringen von Klärschlamm in den Kessel über Kohlemühlen

Allgemein wird Klärschlamm über die Kohlemühlen in den Kessel eingebracht, wodurch es zur vollkommenen Durchmischung des Klärschlamm-Kohle-Gemisches sowie zur Aufmahlung und Trocknung des Einsatzgutes kommt.

Durch Mahlen des Brennstoffes wird die spezifische Oberfläche des Brennstoffes vergrößert, was eine Voraussetzung für eine rasche Verbrennung innerhalb weniger Millisekunden ist. Durch die Mahlung in der Kohlemühle wird auch der Wassergehalt reduziert. Die dazu erforderliche Wärmeenergie ergibt sich aus dem Wassergehalt des Brennstoffes und der gewünschten Restfeuchte im Brennstaub und wird über das Trocknungsgas zugeführt. Bei sehr feuchten Brennstoffen (Wassergehalt 45 bis 65 %) müssen 11 % bis 19 % der Brennstoffwärme für die Trocknung durch rezirkulierende Rauchgase aufgewendet werden [VGB-KRAFTWERKSTECHNIK, 1995].

Die Rauchgase für die Trocknung werden oberhalb der Verbrennungszone bei etwa 1000 °C aus dem Feuerraum entnommen. Die Vortrocknung des Brenngutes beginnt dabei bereits im Fallschacht zur Kohlemühle. Die sauerstoffarmen Rauchgase verhindern gleichzeitig eine Explosion des gemahlten Brennstoffes.

Bedingt durch die unterschiedliche Betriebsweise bei Trocken- und Schmelzkammerfeuerung ergeben sich unterschiedliche Anforderungen für den Klärschlammeinsatz.

Bei der Trockenfeuerung ist die Zugabe von mechanisch entwässertem Schlamm mit 35 % TS möglich, wobei die maximale Zugabemenge hauptsächlich von der Mahltrocknungsleistung der Kohlemühle abhängt.

Abbildung 2.10 stellt die maximale Zugabemenge an Klärschlamm bei einer Steinkohletrockenfeuerung in Abhängigkeit vom Wassergehalt der Kohle und vom TS-Gehalt des Klärschlammes am Beispiel des KW Farge dar [URBAN & FRIEDEL, 1994]. Die maximale Mahltrocknungsleistung beträgt hier 16 t Wasser je Stunde.

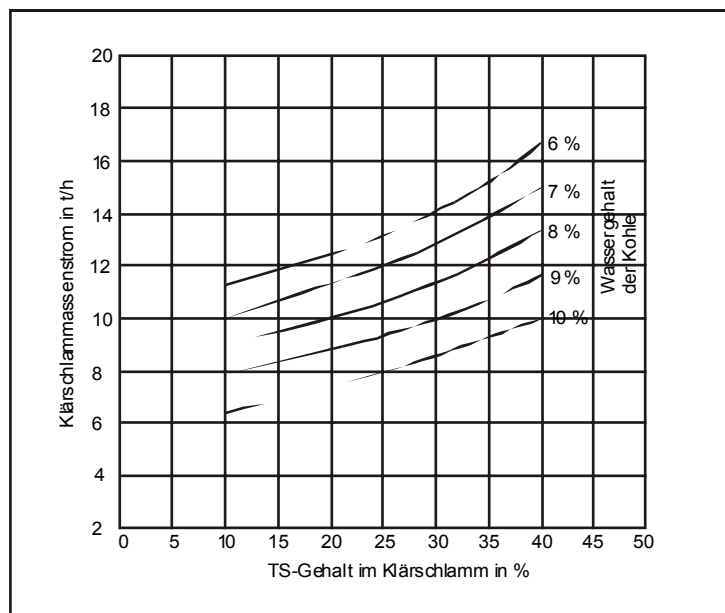


Abbildung 2.10: Maximale Klärschlammzugabemenge bei einer Steinkohletrockenfeuerung

Bei der Schmelzkammerfeuerung muss der Klärschlamm eine Trockensubstanz von mindestens 90 % aufweisen, um die Feuerung nicht zu beeinträchtigen. Die mengenmäßige Be-

grenzung liegt bei etwa 25 Gew.-% trockenem Klärschlamm an der Gesamtaufgabe [URBAN & FRIEDEL, 1994].

In den Kraftwerken des Verbund werden Schüsselmühlen, im KW Voitsberg 3 Schlagradmühlen zur Kohleaufbereitung verwendet.

In Schüsselmühlen rollen in der Regel drei Walzen ortsfest auf einer rotierenden Mahlschüssel ab. Der erforderliche Anpressdruck für die Vermahlung erfolgt durch hydraulische Vorspannung. Die Zerkleinerung des Brennstoffes findet auf der Innenfläche der rotierenden Mahlschüssel statt. Das Mahlgut wird während des Mahlens mit Heißluft getrocknet, durch einen Sichter klassifiziert und direkt in die Feuerung eingeblasen [SCHLESSING, 1995]. Nach THOMÉ-KOZMIENSKY (1998) wird dabei die eingesetzte Kohle von etwa 6 bis 12 % Anfangsfeuchte auf eine Restfeuchte von 0,5 bis 1 % getrocknet. Trocknungs- und Transportmedium ist der Primärluftstrom. Die maximal einsetzbare Klärschlammmenge wird in erster Linie durch die vorhandene Mahltrocknungskapazität und die betrieblichen Randbedingungen bestimmt. Wesentliche Einflussfaktoren sind:

- Trockensubstanz des Klärschlammes.
- Heizwert und Wassergehalt der Kohle.
- Maximale Temperatur des Trockenmediums (Heißluft).
- Zulässige Absenkung der Sichterempemperatur.

Die Mitverbrennungsversuche im Kraftwerk Weiher II haben gezeigt, dass trotz des im Vergleich zu Steinkohle höheren Aschegehaltes von Klärschlamm der Verschleiß der Kohlemühlen nicht wesentlich erhöht ist [GERHARDT, 1989]. Der durchschnittliche Anteil des Klärschlammes beträgt in diesem Fall 5 Gew.-%.

Neben der Aufgabe über die Kohlenmühle kann Klärschlamm auch separat zugegeben werden. Dies geschieht über eigene Brenner bzw. über Lanzen.

### **2.3.3 Einfluss auf die Prozessführung**

Der Verbrennungsvorgang lässt sich in folgende Teilschritte unterteilen, welche sich teilweise überlagern:

- Trocknung
- Pyrolyse
- Zündung und Verbrennung der flüchtigen Bestandteile
- Zündung und Verbrennung des fixen Kohlenstoffes.

Der Verbrennungsvorgang beginnt mit dem Einbringen des Brennstoffes in die Brennkammer. Die Partikel nehmen dabei die Temperatur der Primärluft (80 bis 100 °C) an, und der geringe Anteil an Restwasser wird ausgetrieben. Durch weitere Aufheizung werden flüchtige Bestandteile freigesetzt, welche bei ausreichend hoher Temperatur zünden. Nach weiterer Temperaturerhöhung kommt es schließlich zum Ausbrand des Restkohlenstoffes.

Die Annahme, dass Klärschlamm durch den hohen Ascheanteil später zündet als Steinkohle, konnte durch Messungen des Sauerstoffgehaltes nach dem Brenner widerlegt werden [GERHARDT et al. (1996) sowie SPLIETHOFF & HEIN (1997)]. Beim Klärschlamm-Kohle-Gemisch konnte im gleichen Abstand vom Brenner ein viel geringerer Sauerstoffgehalt als bei der Verfeuerung von reinem Steinkohlestaub nachgewiesen werden.

Durch den schnellen Sauerstoffverbrauch sind hohe Temperaturspitzen im Flambereich zu erwarten; der hohe Aschegehalt spricht auf der anderen Seite für eine Absenkung der Verbrennungstemperatur. Durch Versuche konnte gezeigt werden, dass sich die Kessel-

wandtemperatur bei der Klärschlamm-Mitverbrennung auf einem um etwa 100 °C niedrigerem Niveau einpendelt; die Gastemperatur jedoch um etwa 100 °C höher ist als bei der reinen Steinkohlefeuerung. Der Grund für die niedrige Temperatur der Kesselwand liegt in der starken Eintrübung der Brennkammeratmosphäre durch den hohen Aschegehalt, was zu einer Behinderung des Strahlungswärmeaustausches führt. Die Energie verbleibt dadurch im Rauchgasstrom und erhöht die Temperatur [GERHARDT et al., 1996]. Wie am Beispiel KW Farge gezeigt werden konnte, ergeben sich trotz der höheren Temperaturen (begünstigte Bildung von thermischem NO<sub>x</sub>) bei der Mitverbrennung von Klärschlamm keine signifikant höheren NO<sub>x</sub>-Emissionen.

Eine Kenngröße für die Güte einer Verbrennung ist der Ausbrand, welcher nach Gleichung 2.2 bestimmt wird [GERHARDT et al., 1996]:

$A_u = \frac{V_{Br}}{V_{Br,max}} \times 100$	$A_u$	...	Ausbrand [%]
$V_{Br,max} = 1 - W_{Br} - A_{Br}$	$V_{Br}$	...	verbrannter Brennstoffanteil [%]
$V_{Br} = 1 - W_{Br} - \frac{A_{Br}}{A_{FI}}$	$V_{Br,max}$	...	maximal möglicher verbrennbarer Anteil [%]
	$W_{Br}$	...	Wasseranteil des Brennstoffes [%]
	$A_{Br}$	...	Ascheanteil des Brennstoffes [%]
	$A_{FI}$	...	Ascheanteil der Flugasche [%]

Gleichung 2.2: Ausbrand

Die unter GERHARDT et al. (1996) angeführten Untersuchungen ergaben oftmals Ausbrandwerte von über 99 %, welche eine hohe Verbrennungsgüte bescheinigen.

### 2.3.4 Einfluss auf die Zusammensetzung und das Volumen der Abfälle bzw. Reststoffe

#### 2.3.4.1 Volumen der Abfälle bzw. Reststoffe

Für die Substitution von Steinkohle ist die Aufgabe einer bis zu dreimal höheren Menge an Klärschlamm erforderlich, um den gleichen Heizwert zu erreichen. Durch den etwa fünfmal höheren Aschegehalt können sich die Aschemengen daher bis zu einem Faktor von 15 erhöhen, wenn die Steinkohle vollständig durch Klärschlamm ersetzt werden würde. [GERHARDT et al., 1996].

Werden zwischen 5 bis 25 % Klärschlamm mitverbrannt, kann es im Vergleich zur reinen Kohlefeuerung zu einer Verdoppelung bis Verfünffachung der Aschenmenge kommen.

#### 2.3.4.2 Glühverlust

Im Hinblick auf die Deponierung und Verwertung der Abfälle aus der Rauchgasreinigung und der Verbrennung ist der Glühverlust eine wesentliche Kenngröße. Dieser wird z.B. in der österreichischen Norm ON EN 450 (Flugasche für Beton) mit maximal 5 % begrenzt.

#### 2.3.4.3 Ascheschmelzpunkt

Generell kann gesagt werden, dass der Ascheschmelzpunkt bei der Mitverbrennung von Klärschlamm um rund 85 °C sinkt, wodurch bei Schmelzkammerfeuerungen der Schlackenfluss verbessert wird [GERHARDT et al., 1996]. Bei Trockenfeuerungen können niedrig-

schmelzende Aschen zur Verschlackung und Verschmutzung der Wärmetauscher-Heizflächen führen.

Zur Beurteilung des Ascheschmelzverhaltens werden nachstehende Kenngrößen herangezogen:

Erweichungstemperatur: Erste Anzeichen einer Verformung

Halbkugeltemperatur: Probekörper schmilzt zu einer halbkugelförmigen Masse zusammen. Die Höhe des Probekörpers ist halb so groß wie die Länge der Grundlinie.

Fließtemperatur: Probekörper besitzt ein Drittel der Ausgangshöhe.

Für die Verschlackungsneigung eines Brennstoffes sind der Erweichungspunkt und der Halbkugelpunkt von Bedeutung, da ab dieser Temperatur die Gefahr der Anhaftung von Partikeln steigt.

Laut MAIER et al. (1997) konnte bei Mitverbrennungsversuchen in der Staubfeuerung des KW Heilbronn (Kapitel 4.2.3) gezeigt werden, dass keine Veränderungen der Kugelgestalt der Glasmatrix von Flugaschen festzustellen sind.

#### 2.3.4.4 Schwermetallgehalt der Abfälle bzw. Reststoffe

Voraussagen über die Qualität der Rückstände sind nur bei genauer Kenntnis der Eingangsstoffe zielführend. Besonders der stark schwankende Schwermetallgehalt von Klärschlämmen macht es unmöglich, generelle Aussagen zu treffen (siehe auch Tabelle 2.8).

In der Tabelle 2.9 werden Schwermetallgehalte von Abfällen aus der Klärschlammmonoverbrennung (Wirbelschichtöfen des Werkes Simmeringer Haide bzw. Etagenöfen deutscher Anlagen) angeführt. Diese Abfälle werden durchwegs deponiert. (siehe auch Kapitel 4.1.2).

Tabelle 2.9: Zusammensetzung der Abfälle aus der Klärschlammverbrennung [Gerhardt, 1996; Thome-Kozmiensky, 1998; Seifl, 2001]

Parameter	Wirbelschicht Simmeringer Haide (Flug- asche)	Asche <sup>1</sup>	Flugasche (Wirbelschicht)	Flugstaub- salzgemisch (Wirbelschicht)	Asche (Etagenöfen)
Glühverlust (% TS)	0,97				30
Al	4,2 %		6,2-13 %	0,25-1,83 %	2.550 mg/kg
As (mg/kg)	11,6				11
Fe	17,9 %		7,4-13,4 %	0,21-1,66 %	43.000 mg/kg
Hg (mg/kg)	0,76		0,04-0,16	140-223	0,35
Cd (mg/kg)	10,4	9,2	5,5-6,4	0,18-0,9	0,49
Ni (mg/kg)	87	106			145
Cu (mg/kg)		698			18
Cr (mg/kg)	108	262			140
Pb (mg/kg)	378	404			12
Dioxine/Furane (mg/kg)			11	7	
Zn (mg/kg)	2.738	2.892			430

<sup>1</sup> aus Gerhardt et al., 1996



Tabelle 2.10 zeigt die Verteilung von Schwermetallen auf die festen Rückstände des Kraftwerkes Voitsberg. Die Rauchgase dieses mit Braunkohle befeuerten Kraftwerkes werden mittels Elektrofilter, SCR und nasser Kalksteinwäsche gereinigt [Maier, 1989]. Einem Input von 263,9 - 266,4 t Braunkohle pro Stunde stehen die Bildung von 24,5 - 31,2 t/h Flugasche, 1,3 - 1,6 t/h Grobasche und 5,4 - 7 t/h Gips gegenüber.

Tabelle 2.10: Verteilung der Schwermetalle auf die festen Rückstände eines Kraftwerkes

Element	Input		Output					
	Kohle (ppm)	Kohle <sup>1</sup> (%)	Flugasche (ppm)	Flugasche (%)	Grobasche (ppm)	Grobasche (%)	Gips (ppm)	Gips (%)
As	12,6	100,0	106,0	99,1	8,8	0,4	1,8	0,4
Cu	8,6	98,9	88,4	94,3	63,2	3,6	3,2	0,8
Pb	5,3	99,6	45,2	98,0	9,9	1,1	0,8	0,4
Cd	0,09	100,0	0,74	95,5	0,0	0,0	0,01	0,4
Hg	0,16	99,1	0,86	50,2	0,0	0,0	0,39	5,0
Se	0,65	100,0	2,8	51,7	0,6	0,6	6,8	27,9
Cr	19,9	99,6	194,9	91,2	204,7	5,1	35,4	3,6
Ni	11,6	97,3	90,0	88,7	214,9	10,8	1,1	0,2
V	31,5	99,7	263,6	97,8	96,6	1,8	4,2	0,3
Zn	28,5	99,5	236,1	97,7	38,9	0,8	6,7	0,6

<sup>1</sup> Die Differenz zu 100 % wird durch den Kalk eingebracht

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass der Eintrag der Schwermetalle hauptsächlich über den Brennstoff Kohle erfolgt, und nur zu einem geringen Teil über den Kalk. Bis auf die flüchtigen Schwermetalle Hg und Se reichern sich die Schadstoffe in der Flugasche an, Cr, Cu und Ni finden sich zu geringen Anteilen auch in der Grobasche, während im Gips noch Anteile von Hg, Se und Cr nachgewiesen werden können.

Beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen mit höheren Schwermetallgehalten als Kohle kann davon ausgegangen werden, dass sich die Schwermetalle prozentuell ähnlich auf die Rückstände verteilen.

Für St. Andrä wurden - basierend auf den Gesamtgehalten an Elementen in den einzelnen festen Abfällen aus der Verbrennung und der Rauchgasreinigung und im Reingas – Transferkoeffizienten bestimmt (Tabelle 2.11).

Allerdings lagen die Wiederfindungsraten teilweise sehr niedrig (z.B. Cd: 25 %; Hg: 65 %), sodass diese Transferkoeffizienten nur eine grobe Annäherung darstellen können.

Neben den Gesamtgehalten an Schwermetallen ist deren Eluierbarkeit (Umweltverfügbarkeit) von Bedeutung. Erste Untersuchungen zeigten bei Abfällen aus der Mitverbrennung von Abfällen einhergehend mit höheren Gesamtgehalten eine Verschlechterung der Eluatqualität [VERBUND, 2001].

Tabelle 2.11: Transferkoeffizienten für verschiedene Elemente anhand eines vereinfachten Ansatzes für qualitative Erstabschätzungen [VERBUND, 2001]

Element	Transferkoeffizient Grobasche	Transferkoeffizient Flugasche und Trockensorptionsprodukt	Transferkoeffizient Reingas
Cu	52,7	46,8	0,6
Cl	0,4	97,5	2,1
F	1,9	95,9	2,2
Pb	15,3	84,4	0,2
Cd	3,3	93,1	3,6
Cr	17,0	82,4	0,6
Co	8,7	90,1	1,1
Ni	14,7	83,7	1,6
Hg	1,8	77,8	20,3
Zn	24,7	75,2	0,1
Sb	9,8	87,3	2,8
As	3,0	95,0	2,0
Mn	17,0	82,9	0,1
V	6,0	93,4	0,5
Sn	27,4	64,7	7,9

Bei Versuchen zur Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen im KW St. Andrä 2 wurden erhöhte Konzentrationen mancher Schwermetalle in den Rückständen festgestellt. Die Mobilisierbarkeit der Schwermetalle blieb jedoch auf niedrigem Niveau. Nach Anfeuchtung und Verfestigung der Rückstände wird die Elution von Schwermetallen weiter vermindert (siehe Kapitel 4.1.2).

DÜLMER & SCHMITT-RIEGRAF (1998) weisen auf ein Forschungsprojekt des Institutes für Mineralogie an der Universität Münster zur Beurteilung des Emissionsverhaltens von Kraftwerksrückständen hin. Es wurde festgestellt, dass Rückstände (Kesselasche, Flugasche) aus der Mitverbrennung von Klärschlamm gegenüber Aschen aus der reinen Braunkohlefeuerung teilweise erhöhte Schwermetallkonzentrationen enthalten. Auslaugversuche nach DEV S4 zeigen jedoch, dass die deutschen Grenzwerte der TA Siedlungsabfall eingehalten werden. Lediglich Elutionsversuche mit 0,8 molarer Essigsäure zeigten Grenzwertüberschreitungen für Kupfer und Zink. Nach der Verfestigung der Asche durch hydraulische Abbindereaktionen werden die Schadstoffe jedoch hinreichend fixiert, sodass keine Grenzwertüberschreitungen nachgewiesen werden konnten.

#### 2.3.4.5 Qualität der Abfälle bzw. Reststoffe

Die Zusammensetzung von Flugasche und Grobasche aus der Kohlestaubfeuerung ist für die weitere Verwertung von großer Bedeutung. Die für die Baustoffindustrie relevanten Konzentrationen an Alkalien und Sulfaten nehmen mit steigendem Klärschlammanteil ab (unerwünschter Effekt); der MgO-Gehalt bleibt gleich. Weitere wichtige Parameter sind der Gehalt an unverbranntem Kohlenstoff (je höher dieser ist, desto mehr Energie kann die Baustoffindustrie daraus gewinnen) und der Gehalt an Chloriden (soll möglichst niedrig sein). Die

Korngrößenverteilung wird durch Klärschlamm-Mitverbrennung nicht beeinflusst [SPLIETHOFF & HEIN, 1997].

Aschen aus der Verbrennung von Kohle werden vor allem in der Baustoffindustrie (Zement- und Betonindustrie) eingesetzt. Bei einem Einsatz von Klärschlamm ist insbesondere darauf zu achten, dass die technologischen Eigenschaften der entstehenden Aschen weiterhin das Beschreiten dieser Verwertungswege erlauben.

In Deutschland dürfen Flugaschen aus Kohlekraftwerken nur dann für die Betonherstellung verwendet werden, wenn der Anteil an mitverbranntem Klärschlamm 5 Gew. % TS nicht übersteigt (Norm DIN EN 450).

BORN (1999) vergleicht die Zusammensetzung ausgewählter Brennstoffe sowie die bei deren Verbrennung entstehenden Aschen (Tabelle 2.12, siehe dazu auch Tabelle 2.7, Tabelle 2.8, Tabelle 4.4 und Tabelle 4.6).

Tabelle 2.12: Vergleich von Braunkohle- und Klärschlammaschen [Massen-%]

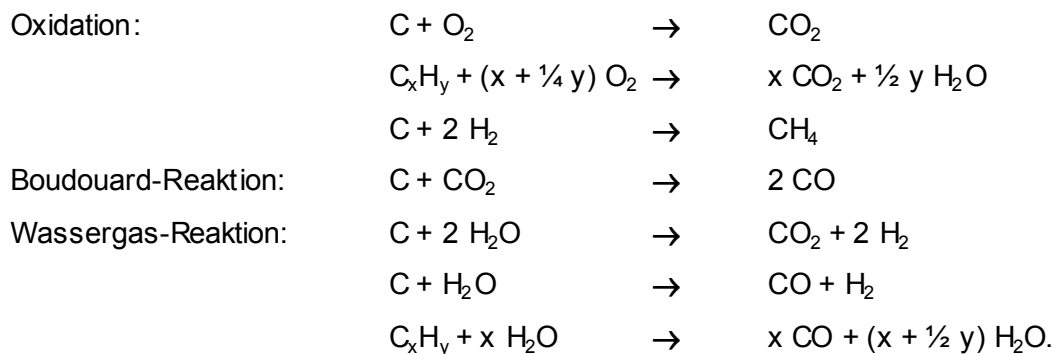
	Rheinische Braunkohle	Mitteldeutsche Braunkohle	Klärschlamm
<b>INPUT = Brennstoff</b>			
Organische Substanz	38,1	37,5	50,8
Wasser	60,2	54,2	7,8
Asche	1,7	8,3	41,4
<i>Elementaranalyse (wf)</i>			
C	65,4	71,2	48,6
H	4,5	5,9	6,9
N	1,0	0,8	6,3
O	28,8	17,8	36,7
S <sub>Verbindungen</sub>	0,26	4,27	1,10
Cl <sub>ges</sub>	0,04	0,03	0,39
<b>OUTPUT = Asche</b>			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,90	11,10	15 – 35
CaO	22,70	31,40	1 – 30
CO <sub>2</sub>	-	-	7,20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,00	8,90	2 – 30
K <sub>2</sub> O	0,90	0,02	1 – 5
MgO	9,30	4,10	3,30
Na <sub>2</sub> O	2,70	0,10	0,2 – 2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	7,70
SO <sub>3</sub>	14,10	32,50	1,90
SiO <sub>2</sub>	33,70	10,70	30 – 40
TiO <sub>2</sub>	n.b.	0,60	-

## 2.4 Vergasung von Klärschlämmen

Eine andere Möglichkeit der thermischen Behandlung von Klärschlämmen ist die Vergasung in separaten Reaktoren und die anschließende Verbrennung des entstehenden Gases im Kessel.

Bei der Vergasung werden kohlenstoffhaltige Brennstoffanteile durch Zugabe eines Vergasungsmittels in gasförmigen Brennstoff und Asche umgesetzt. Als Vergasungsmittel dienen Dampf, Sauerstoff oder Luft. Die für die Vergasung benötigte Energie stammt dabei aus der simultan ablaufenden Verbrennung eines Teils des organischen Materials.

In Abhängigkeit vom Vergasungsmittel laufen folgende Reaktionen ab [THOMÉ-KOZMIENSKY, 1998]:



Die Zusammensetzung der bei der Vergasung entstehenden Brenngase ist abhängig von der Vergasungstemperatur und vom Vergasungsmittel.

Zur Vergasung von Klärschlämmen eignet sich vor allem die Wirbelschichttechnologie.

Bei der Gaserzeugung nach Lurgi in einer zirkulierenden Wirbelschicht kommt es durch die hohe Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Brennstoff und Produktgas zu einer intensiven Durchmischung und damit zu einem hohen Stoff- und Wärmeaustausch. Als Vergasungsmittel dient Luft bei atmosphärischem Druck.

Vergasungsversuche wurden mit den Brennstoffen Kohle, Holz, Papier- und Gummiabfällen sowie Klärschlamm erfolgreich durchgeführt [GREIL & HIRSCHFELDER, 1999].

Nach GREIL & HIRSCHFELDER (1999) eignen sich Brenngase aus der Wirbelschichtvergasung zur Unterfeuerung von Kohlekraftwerken (Abbildung 2.11).

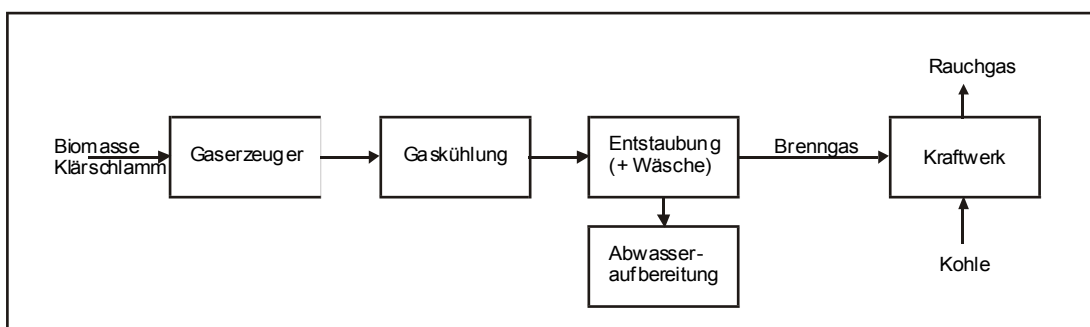


Abbildung 2.11: Unterfeuerung von Kohlekraftwerken

In diesem Fall muss das Brenngas bestimmte Anforderungen hinsichtlich der Konzentration einiger Gaskomponenten erfüllen. Zu nennen sind hier Staub, HCl und NH<sub>3</sub>. In einem ersten Reinigungsschritt wird das Brenngas in einem Schlauchfilter bei Temperaturen um 230 °C bis auf < 5 mg/Nm<sup>3</sup> entstaubt. Anschließend wird in einer Nasswäsche HCl und NH<sub>3</sub> entfernt.

Der Grad der  $\text{NH}_3$ -Abscheidung hängt davon ab, ob das Kraftwerk mit einer DENOX-Anlage ausgerüstet ist. Gegebenenfalls kann auf die Nasswäsche verzichtet werden.

In Österreich betreibt der Verbund am Standort des KW Zeltweg eine Biomassevergasanlage, in der versuchsweise auch Klärschlämme vergast wurden (vergleiche Kapitel 4.1.1). Das Kraftwerk Zeltweg wird allerdings für die kommenden Jahre konserviert.

## 2.5 Emissionen und Rauchgasreinigung

### 2.5.1 Emissionen

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen der Mitverbrennung von Klärschlamm auf die Emissionen in die Luft dargestellt. Konkrete Emissionsdaten aus der versuchsweisen Mitverbrennung von Klärschlamm im steinkohlebefeuerten KW St. Andrä 2 werden im Kapitel 4.1.2 angeführt.

Untersuchungsergebnisse nach GERHARDT (1998) zeigen die typischen Verhältnisse der heizwertspezifischen Inhaltstoffe von Klärschlamm (hier aus der Trocknungsanlage des Abwasserzweckverbandes Saar sowie aus der Kläranlage Biel/Kanton Bern) zu typischer Kohle (Tabelle 2.13). In der zweiten Spalte werden die Daten aus der Tabelle 2.7 und Tabelle 2.8 für einen Vergleich zwischen Klärschlamm (mittlerer Heizwert: 10 MJ/kg TS) und Steinkohle (mittlerer Heizwert: 35 MJ/kg TS) herangezogen.

Tabelle 2.13: Heizwertspezifisches Verhältnis der Inhaltstoffe von Klärschlamm und Kohle

Parameter	Einheit	Klärschlamm/Kohle [GERHARDT, 1998]	Klärschlamm/Steinkohle [Tabelle 2.7/Tabelle 2.8]
C	[(%/MJ) / (%/MJ)]	0,95 – 0,96	1,4 – 1,9
S	[(%/MJ) / (%/MJ)]	2,4 – 2,9	3,5
N	[(%/MJ) / (%/MJ)]	6,1 – 6,3	5,3 – 12
Cl	[(ppm/MJ) / (ppm/MJ)]	0,92 – 1,1	8,8 – 52
F	[(ppm/MJ) / (ppm/MJ)]	17,9	17,5 – 61
Hg	[(ppm/MJ) / (ppm/MJ)]		2,3 – 51 (450*)
Pb	[(ppm/MJ) / (ppm/MJ)]		1 – 29
Cd	[(ppm/MJ) / (ppm/MJ)]		18 – 28

\* Dieser Wert wurde bei einer Klärschlammprobe gemessen

Klärschlamm enthält durchwegs höhere Konzentrationen an S, N, Cl, F und Schwermetallen als die zum Vergleich herangezogene Steinkohle (Tabelle 2.13). Die Unterschiede können in manchen Fällen beträchtlich sein (z. B. maximaler Faktor für Hg: 450).

Tabelle 2.14 vergleicht die Schadstoffemissionen bei der Klärschlamm-Mitverbrennung (2 - 3 % Klärschlamm bezogen auf den Brennstoff-Massenstrom) mit den Emissionen aus der reinen Kohlefeuerung (KW Farge - Steinkohletrockenfeuerung). Das Kraftwerk Farge ist nach GERHARDT (1998) mit einer SCR-Anlage, einem Elektrofilter und einer Kalk-Nassentschwefelung zur Rauchgasreinigung ausgerüstet.

Tabelle 2.14: Abgasemissionen bei der Mitverbrennung von Klärschlamm aus dem KW Farge [URBAN & FRIEDEL, 1994]

Komponente*		Kohlebetrieb	Mitverbrennung
Gesamtstaub	mg/Nm <sup>3</sup> <sub>tr</sub>	3,00	3,80
CO	mg/Nm <sup>3</sup> <sub>tr</sub>	3,50	3,50
SO <sub>x</sub> (als SO <sub>2</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup> <sub>tr</sub>	110,00	116,00
Organik (als C <sub>ges</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup> <sub>tr</sub>	6,90	7,42
PCDD/PCDF	pg/Nm <sup>3</sup> <sub>tr</sub>	1,05	0,32
anorg. gasf. Fluorverbindungen (als HF)	mg/Nm <sup>3</sup> <sub>tr</sub>	1,15	0,92
anorg. gasf. Chlorverbindungen (als HCl)	mg/Nm <sup>3</sup> <sub>tr</sub>	4,90	3,70
Cd, Tl	mg/Nm <sup>3</sup> <sub>tr</sub>	0,001	0,001
Hg	mg/Nm <sup>3</sup> <sub>tr</sub>	0,005	0,007
Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn	mg/Nm <sup>3</sup> <sub>tr</sub>	0,057	0,063

\* Die Emissionswerte beziehen sich bei Kohlebetrieb auf 6,0 Vol.-% O<sub>2</sub> bei der Mitverbrennung auf 6,2 Vol.-% O<sub>2</sub>. NO<sub>x</sub> Emissionen wurden in der angeführten Publikation widersprüchlich angegeben, sodass sie in der Tabelle nicht aufscheinen

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass sich die Schadstoffemissionen bei der Mitverbrennung nur geringfügig ändern. Allerdings werden die Emissionen als Konzentrationen (in mg/Nm<sup>3</sup>) angegeben, sodass die Erhöhung des Rauchgasvolumenstromes durch die Mitverbrennung nicht berücksichtigt wird.

### Kohlenmonoxid

GERHARDT et al. (1996) verweist auf die hohe Güte der Verbrennung des Kohle-Klärschlammgemisches mit einem Ausbrand von über 99 %. Mitverbrennungsversuche im KW St. Andrä 2 (siehe Kapitel 4.1.2) zeigten einen geringen Anstieg der CO-Emissionen (Nullversuch: 12 mg/Nm<sup>3</sup>; Mitverbrennungsversuche: 15 bis 16 mg/Nm<sup>3</sup>).

### Schwefeldioxid

Die Emissionen an Schwefeldioxid sind stark abhängig vom Schwefelgehalt der Brennstoffe, wobei der heizwertspezifische Vergleich (Tabelle 2.13) einen deutlich höheren Schwefelanteil des Klärschlammes gegenüber Steinkohle zeigt. Klärschlammasche enthält höhere CaO-Gehalt als Kohlenasche. Dennoch konnte eine Reduktion der SO<sub>2</sub>-Emissionen aufgrund einer Reaktion mit dem CaO nicht beobachtet werden. Grund dafür ist die Inaktivierung des Calciumoxides durch die Versinterung der Oberflächen bei den hohen Temperaturen im Kessel. Allgemein kann gesagt werden, dass sich - bei einer Wiederrfindungsrate von 80 bis 90 % - etwa 75 % des Schwefels im ungereinigten Rauchgas und 10 % in der Asche wiederfinden [GERHARDT et al., 1996]. Kohlekraftwerke verfügen meist über ein effektives System zur Entschwefelung der Rauchgase, sodass die Mitverbrennung nicht zu einer Erhöhung der SO<sub>2</sub> Emissionen führen muss.

## Stickoxide

Stickoxide werden nach drei verschiedenen Varianten gebildet:

- **Thermisches NO<sub>x</sub>**  
Ein Teil des Luftstickstoffes wird bei der Verbrennung zu Stickoxiden oxidiert. Diese Reaktion findet in höherem Ausmaß erst ab einer Temperatur von 1300 °C statt. Die Reaktionsrate hängt exponentiell von der Temperatur ab und ist proportional dem Sauerstoffgehalt.
- **Brennstoff-NO<sub>x</sub>**  
Ein Teil des im Brennstoff enthaltenen Stickstoffes wird bei der Verbrennung zu Stickoxiden oxidiert.
- **Promptes NO<sub>x</sub>**  
Luftstickstoff wird nicht nur über die Reaktion mit Sauerstoffatomen, sondern kann auch durch CH-Radikale über Zwischenbildung von HCN zu Stickoxiden oxidiert werden. Der Anteil an prompten Stickoxiden ist sehr gering.

Beim Stickstoffgehalt stellt sich der heizwertspezifische Unterschied zwischen Klärschlamm und Steinkohle als noch größer heraus als beim Schwefelgehalt (Tabelle 2.13). Dieser höhere Stickstoffgehalt wirkt sich jedoch bei Anwendung geeigneter feuerungstechnischer Maßnahmen nicht proportional mit dem Einsatz an Klärschlämmen auf die Bildung von Stickoxiden aus [GERHARDT et al., 1996].

## Organische Halogenverbindungen

Die heizwertspezifischen Konzentrationen von Chlor und Fluor können im Klärschlamm um ein Vielfaches höher sein als die von Kohle (Tabelle 2.13). Dies kann einerseits zu Hochtemperatur- und Chloridkorrosion (insbesondere bei der Bildung von Chlorstrahlen) führen und andererseits die Emissionen von HF, HCl und Dioxinen/Furanen erhöhen.

Nach BALLSCHMITER & BACHER (1996) sind Dioxine und Furane bei üblichen Flammentemperaturen (> 1000 °C) thermisch instabil. Dies bedeutet, dass bei einer ausreichend langen Verweilzeit in diesem Temperaturbereich eine vollständige Zerstörung möglich ist.

Die Quelle für Dioxine/Furane in den Verbrennungsrückständen ist der Abkühlungsweg der Rauchgase. Dioxine bilden sich im Temperaturbereich von 250 bis 450 °C, wobei die Bildungsreaktion bevorzugt auf Feststoffoberflächen, katalysiert durch Metallchloride, abläuft. Durch Maßnahmen im Feuerraum (hohe Feuerraumtemperatur und Verweilzeit, gute Durchmischung, vollständiger Ausbrand, Begrenzung des Luftüberschusses), sowie bei der Rauchgasabkühlung (schnelle Abkühlung, Rauchgasreinigung bei Temperaturen unter 250 °C) kann Dioxin- und Furanbildung vermieden werden [MEYER, 1998].

Neben den optimalen Verbrennungsbedingungen ist nach GERHARDT (1998) vor allem der Gehalt an Chlor im Abgas entscheidend. Bei Vorhandensein katalytisch wirkender Stoffe (z.B. Kupfer in der Flugasche) besteht die Möglichkeit der Dioxinbildung. Dies muss bei der Mitverbrennung von Klärschlamm berücksichtigt werden.

Die Emissionen an Dioxinen und Furanen lassen sich nicht allein an ihren Inputströmen abschätzen, da es bei der Verbrennung zu einer Zerstörung dieser Verbindungen kommt.

MAIER et al. (1997) gibt für das KW Heilbronn Emissions-Werte für Dioxine und Furane in der Größenordnung von 5 pg/Nm<sup>3</sup> an. Im Kraftwerk St. Andrä wurden Dioxin/Furan Emissionen von 2 pg/Nm<sup>3</sup> bei der Mitverbrennung von Biomasse und Klärschlamm gemessen (siehe auch Kapitel 4.1.2).

### **Anorganische Halogenverbindungen**

Der größte Teil der im Brennstoff eingebrachten Halogene wird in Form von HCl und Cl<sub>2</sub> freigesetzt, wobei man praktisch von einer vollständigen Wiederfindungsrate des Inputs im Rauchgas ausgeht. Bei der Abkühlung des Gases wird ein Teil der Halogene am Flugstaub abgeschieden. Insbesondere ist bei chlorhaltigen Brennstoffen die Möglichkeit der Hochtemperatur-Chlor-Korrosion zu berücksichtigen [MEYER, 1998].

Nach RÖMER (1991) sind HCl und HF immer Bestandteile von Rauchgasen aus der Klärschlammverbrennung (hier für Monoverbrennung), weshalb die Hochtemperaturkorrosion einen zu beachtenden Faktor darstellt.

### **Polyaromatische Kohlenwasserstoffe**

Polyaromatische Kohlenwasserstoffe sind thermisch stabile Verbindungen, die als Abbauprodukte hochmolekularer aromatischer Verbindungen oder durch Neubildung aus Radikalen entstehen. Bei ausreichend guten Ausbrandbedingungen erfolgt eine vollständige Oxidation. PAH werden vorwiegend an Partikel adsorbiert [MEYER, 1998].

### **Schwermetalle**

Die Konzentrationen an Schwermetallen sind in den Input- und Outputströmen eines Kohlekraftwerkes gering. Durch den Einsatz von Klärschlamm kann es zu einer beträchtlichen Steigerung des Schwermetalleintrages kommen (siehe Tabelle 2.7 und Tabelle 2.13).

Mit Hilfe thermodynamischer Berechnungen lassen sich Gleichgewichtskonzentrationen der Schwermetalle während der Abkühlung der Gase vorhersagen.

Schwermetalle werden bei der Verbrennung in metallischer Form sowie in Form von Chloriden, Oxiden, Sulfiden usw. flüchtig. Ein großer Teil dieser Schwermetalle wird bei Temperaturen bis 300°C kondensiert und gemeinsam mit der Flugasche abgeschieden. Eine Ausnahme bilden die leichter flüchtigen Schwermetalle Hg, Se, Cd und As, welche auch zu beträchtlichen Anteilen im Reingas zu finden sind. Quecksilber passiert als elementares Hg die Rauchgasreinigung von Kohlekraftwerken ungehindert, wird in der ionischen Form (Hg<sup>2+</sup>) aber fast vollständig abgeschieden. In welcher Form Hg vorliegt, wird durch die Art und Erscheinungsform der Bindungspartner (S, Halogene), der Temperatur und den Betriebsbedingungen im Kessel beeinflusst [HOCQUEL, SPLIETHOFF & HEIN, 1999].

HOCQUEL, SPLIETHOFF & HEIN (1999) weisen darauf hin, dass die Emissionen von leichtflüchtigen Spurenelementen wie Arsen, Selen und Quecksilber bei der Klärschlamm-Mitverbrennung vom Einzelfall abhängen. Das bedeutet, dass in jedem einzelnen Fall geprüft werden muss, ob die vorhandenen Einrichtungen zur Rauchgasreinigung geeignet sind, die für die Abfallverbrennung geforderten Grenzwerte garantiert einzuhalten.

Bei der Klärschlamm-Monoverbrennung im Werk Simmeringer Haide ist neben der mehrstufigen Nasswäsche zur Abtrennung saurer Gase eine zusätzliche Reinigungsstufe zur Abtrennung von Quecksilber und Dioxinen/Furanen (Aktivkohlefilter, Adsorption mit Koks) vorhanden.

Bei der nassen Entschwefelung werden unter anderem auch die Schwermetalle effektiv abgeschieden, wobei sie sich zu unterschiedlichen Anteilen im Gips, im Abwasser und im Schlamm verteilen (siehe auch Tabelle 2.10). Zwischen 20 % und 50 % des Inputs von Se und Hg wurden im Reingas gefunden [MEIJ, 1997].



Nach URBAN & FRIEDEL (1994) kommt es bei Schmelzkammerfeuerungen zu einer deutlich besseren Einbindung von Schwermetallen in die Verbrennungsrückstände (Elutionsverhalten) als bei der Trockenfeuerung.

Daten zu Schwermetall-Emissionen aus Versuchen zur Mitverbrennung von Klärschlamm und Biomasse im Kraftwerk St. Andrä werden im Kapitel 4.1.2 angeführt.

## 2.5.2 Bestehende Maßnahmen zur Rauchgasreinigung in Kohlekraftwerken

In modernen Großfeuerungsanlagen werden sowohl primäre als auch sekundäre Maßnahmen zur Emissionsminimierung getroffen (Tabelle 2.15).

Tabelle 2.15: Emissionsminderungsmaßnahmen [MEYER, 1998]

Schädliche Inhaltsstoffe		Maßnahmen
Schwefeldioxid	primär	In situ-Entschwefelung
	sekundär	Rauchgasentschwefelungsanlage
Chloride, Fluoride	primär	-
	sekundär	Einbindung in Flugasche und Sorbentien bzw. Abscheidung in REA
Stickoxide	primär	Luft-/Brennstoffstufung
	sekundär	Katalysator
Organische Schadstoffe	primär	thermische Zersetzung, Oxidation, Reduktion
	sekundär	Vermeidung der Denovosynthese, Einbindung in Flugasche und Sorbentien

Die Rauchgasreinigung in Kohlekraftwerken besteht im allgemeinen aus Entstaubung, Entstickung und Entschwefelung (Abbildung 2.12). Zusätzlich kann ein Aktivkohlefilter zur Nachreinigung (z.B. im KW Lausward) installiert sein (Kapitel 4.2.2).

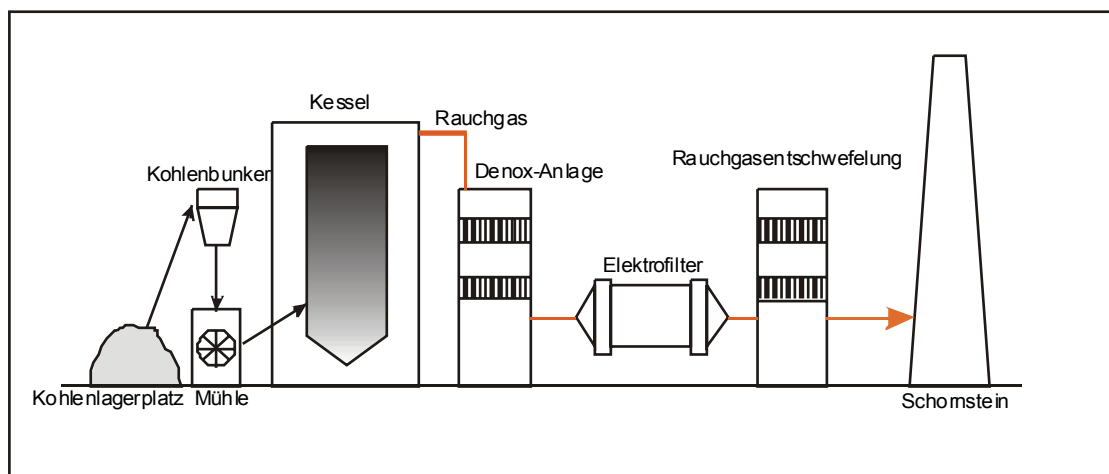


Abbildung 2.12: Rauchgasreinigung am Beispiel des Kraftwerkes Voitsberg 3

Als Folge der oben angeführten Emissionsminderungsmaßnahmen kann ein Großteil der im Rohgas enthaltenen Schadstoffe abgeschieden bzw. zerstört werden. Beispielhaft stellt Tabelle 2.16 die Emissionskennzahlen für die Kraftwerke des Verbund dar.

Tabelle 2.16: Emissionskennzahlen der Kraftwerke des Verbund [VERBUNDGESELLSCHAFT, 1997 & VERBUNDGESELLSCHAFT, 1998]

	Grenzwert	Emissionen		
	mg/Nm <sup>3</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>	t/a	g/kWh
<b>Voitsberg 3</b>				
Staub	50	10	35	0,04
Schwefeldioxid	400	230	1.005	0,84
Stickoxide	200	180	621	0,63
Kohlenmonoxid	250	180		0,67
Kohlendioxid*			1.009	0,98
<b>St. Andrä 2</b>				
Staub	50	10	5	0,03
Schwefeldioxid	200	170	61	0,56
Stickoxide	450	250	137	0,82
Kohlenmonoxid	250	50		0,17
Kohlendioxid*			125	0,88
<b>Zeltweg</b>				
Staub	50	10	6	0,04
Schwefeldioxid	200	170	50	0,60
Stickoxide	300	270	139	0,96
Kohlenmonoxid	250	20		0,07
Kohlendioxid*			106	0,91
<b>Dürnröhr 1</b>				
Staub	50	5	21	0,02
Schwefeldioxid	200	130	217	0,42
Stickoxide	200	140	391	0,45
Kohlenmonoxid	250	10		0,03
Kohlendioxid*			106	0,81

\*in 1000 t/a bzw. kg/kWh.

### 2.5.2.1 Entstaubung

Bei Kraftwerken kommen zur Entstaubung filternde Abscheider, elektrische Abscheider und nassarbeitende Abscheider zum Einsatz.

In Kohlekraftwerken kommen Elektrofilter und Gewebefilter bevorzugt zum Einsatz:

- Elektrofilter (z.B. KW Voitsberg 3)

Das Prinzip des Elektrofilters ist die Abscheidung von Staubpartikeln durch ein elektrisches Feld. Dabei wird der Rauchgasstrom durch Gassen, welche aus elektrisch geladenen Metallplatten (Niederschlagselektroden) gebildet werden, geleitet. In der Mitte der Gassen befinden sich Sprühelektroden. Zwischen den Elektroden wird ein elektrostatisches Feld aufgebaut, wodurch die Staubpartikel aufgeladen und von den Niederschlagselektroden angezogen werden. Die sich festsetzenden Staubpartikel müssen in regelmäßigen Abständen abgeklopft werden und können am Fuß des Filters über Sammeltrichter abgezogen werden.

Elektrofilter bestehen aus einem gasdicht verschweißten Stahlblechgehäuse, in dem die Niederschlags- und Sprühelektroden in Form von Gassen angeordnet sind. Die gleichmäßige Verteilung des Rauchgases wird durch Leit- und Lochbleche erreicht. Unterhalb des Gehäuses befinden sich die Staubbunker. Zur Verhinderung von Kondensatbildung werden die kühleren Teile (Bunkerspitzen) beheizt. Elektrofilter sind robust, unempfindlich gegen Temperaturspitzen und günstig in den Betriebs- und Investitionskosten.

- Schlauchfilter (z.B. KW St. Andrä 2)

Schlauchfilter sind filternde Abscheider die aus einem über einen Stützkorb gezogenem Gewebe bestehen. Das Rohgas durchströmt das Gewebe, wobei die Staubpartikel festgehalten werden. Die Abreinigung erfolgt über Druckstöße.

Wegen der verwendeten Filtermaterialien ist der Einsatz von Gewebefiltern auf eine Temperatur von etwa 250 °C begrenzt.

### 2.5.2.2 Entschwefelung

Die Rauchgasentschwefelung basiert auf dem Prinzip der Überführung von gasförmigem Schwefeldioxid in einen Feststoff, welcher abgezogen und abgelagert bzw. verwertet werden kann. Die Rauchgasentschwefelung erfordert den Einsatz von Additiven, welche mit dem  $\text{SO}_2$  reagieren.

Prinzipiell werden dabei unterschieden:

- Nasse Verfahren

Die Entschwefelung erfolgt durch eine Waschlösung, in der die Reaktionsprodukte in wässriger Form vorliegen.

- Quasi-trocken Verfahren

Die Waschlösung verdampft im Abgasstrom; die Reaktionsprodukte werden trocken abgeschieden.

- Trockene Verfahren

Sowohl Additive als auch Reaktanden werden trocken zu bzw. abgeführt.

Beispielhaft sind die Maßnahmen zur Rauchgasentschwefelung der kohlebefeuerter Kraftwerke des Verbund dargestellt:

- Kalksteinwäsche (z.B. KW Voitsberg 3)

Das Rauchgas wird in Waschtürmen mit einer Absorbenssuspension (feingemahlene Kalksteinmehl  $\text{CaCO}_3$  und Wasser) in Kontakt gebracht. Das  $\text{SO}_2$  reagiert dabei zu Gips  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ , welcher vornehmlich in der Baustoffindustrie (Zement) verwertet werden kann.

- Kalk-Additiv-Verfahren

Kalksteinmehl (bzw. Dolomit) wird direkt in den Feuerraum eingeblasen wobei es zur Bildung von Anhydrit  $\text{CaSO}_4$  kommt. Durch das direkte Einbringen in den Kessel kommt es zu einer gemeinsamen Abscheidung von Flugasche, schwefelhaltigen Feststoffen und nicht umgesetzten Additivstoffen in der nachgeschalteten Staubabscheidung. Dieses Gemisch wird in der Regel stabilisiert und deponiert.

- Trockensorption mit Kalkhydrat (z.B. KW Zeltweg, KW St. Andrä 2)

Trockenes, gelöstes Kalkhydrat wird mit dem Rauchgasstrom in Kontakt gebracht. Die Abscheidung erfolgt über die nachgeschaltete Entstaubungsstufe. Der entstehende Abfall muss deponiert werden.

- Sprühabsorption (z.B. KW Dürnrohr)

Zur Schwefelabscheidung aus dem Rauchgas dient eine fein zerstäubte Kalkmilchsuspension. Das  $\text{SO}_2$  reagiert aufgrund reduzierender Bedingungen vorwiegend zu Calciumsulfid  $\text{CaS}$ , welches deponiert werden muss.

### 2.5.2.3 Entstickung

Es besteht die Möglichkeit einer Verringerung der Stickoxidbildung durch geeignete feuerungstechnische Maßnahmen (Primärmaßnahmen).

- Gestufte Luftzufuhr.
- Gestufte Zufuhr von Kohle und Klärschlamm.
- Geeignete Mischung von Klärschlamm und Kohle.
- Zufuhr von Klärschlamm und Kohle in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt.

Unter Sekundärmaßnahmen versteht man die Verringerung von Stickoxiden  $\text{NO}_x$  im Rauchgasstrom. Dies geschieht durch Reduktion der Stickoxide mittels Ammoniak bzw. Harnstoff:

- Selektive nicht katalytische Reduktion SNCR (z.B. KW Zeltweg)  
Ammoniak, bzw. Harnstoff wird bei Temperaturen um  $1000\text{ °C}$  in den Rauchgasstrom eingedüst. Das Ammoniak reagiert ohne Verwendung eines Katalysators mit den Stickoxiden zu atmosphärischen Stickstoff  $\text{N}_2$  und Wasser. Da das Reduktionsmittel überstöchiometrisch zugegeben werden muss, kommt es zu geringen Emissionen an  $\text{NH}_3$ .
- Selektive katalytische Reduktion SCR (z.B. KW Dürnrohr)  
Ammoniak, bzw. ein Reaktionsmittel welches Ammoniak produziert, reduziert unter Zuhilfenahme eines Katalysators die im Rauchgasstrom enthaltenen Stickoxide zu atmosphärischen Stickstoff  $\text{N}_2$  und Wasser.

### 2.5.3 Weitere Maßnahmen zur Reduktion der Schadstoffemissionen in die Luft

In Abfallverbrennungsanlagen werden für die Abscheidung von Schadstoffen weitergehende Maßnahmen getroffen. Diese können grundsätzlich auch in bestehenden Kohlekraftwerken eingesetzt werden, was jedoch mit erhöhten Kosten verbunden wäre.

#### 2.5.3.1 Nasse Wäscher

Diese sind zumeist mehrstufig ausgeführt. Das Rauchgas wird mit Waschlösungen in engen Kontakt gebracht, wobei in der ersten Stufe die Abscheidung von  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ , zum Teil von Schwermetallen und ionischem Quecksilber erfolgt. In der zweiten Stufe wird  $\text{SO}_2$  aus dem Rauchgas entfernt, während die dritte Stufe der Abscheidung von Feinstaub dient. Mit nassen Wäschern können alle genannten Luftschadstoffe effektiv abgetrennt werden.

#### 2.5.3.2 Zerstörung von organischen Schadstoffen (Dioxine, Furane)

Diese Schadstoffe werden in Abfallverbrennungsanlagen entweder katalytisch (zusammen mit Stickoxiden) zu  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{HCl}$  zerlegt, oder mittels Aktivkohlefilter aus dem Rauchgas entfernt. Aktivkohlefilter dienen auch der effektiven Abscheidung von Schwermetallen und besonders von metallischem Quecksilber.

## 2.6 Werkstoffwahl

In Abhängigkeit der Prozessstufen Entwässerung, Trocknung, Verbrennung und Abgasreinigung werden unterschiedliche Anforderungen an den eingesetzten Werkstoff gestellt [THOMÉ-KOZMIENSKY, 1998].

- Entwässerungsstufe

Für die Werkstoffwahl ausschlaggebend ist der Chloridgehalt, der pH-Wert und die Temperatur des aufzubereitenden Schlammes.

Für die im allgemeinen wenig korrosiven Bedingungen werden austenitische Stähle mit leicht erhöhtem Molybdängehalt verwendet.

Bei höheren Chloridgehalten des Klärschlammes werden die Entwässerungsaggregate zur Vermeidung von Loch- und Spaltkorrosion aus hochmolybdänhaltigen Edelstählen gefertigt.

- Trocknungsstufe

Aufgrund der höheren Temperaturen werden in der Trocknungsstufe die Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit des Werkstoffes erhöht.

Mit zunehmender Temperatur kommen höherlegierte Sonderedelstähle bzw. Nickellegierungen mit hohem Chrom- und Molybdängehalt zum Einsatz.

Nach DRESCHER & MARTIN (1994) wurde bei der Trocknungsanlage KW Weiher II (Kapitel 2.2.2.3) auf den Einsatz von Edelstählen im Heißbereich verzichtet. Diese Vorgangswiese hat sich nicht bewährt, da es durch wiederholtes An- und Abfahren zu einer Kondensation der Brüden kommt.

- Verbrennungsstufe

Werkstoffe für den Kessel müssen korrosionsbeständig gegenüber komplexen Gasatmosphären sein, sowie ausreichende Warm- und Zeitstandsfestigkeit besitzen.

Die Werkstoffe sind der Chlorierung, Aufschwefelung, Aufkohlung, Aufstickung, Oxidation, Sulfatierung und Fluorierung ausgesetzt.

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass bei Anlagen zur reinen Klärschlamm- und Abfallverbrennung bevorzugt hochlegierte Sonderwerkstoffe auf Nickelbasis eingesetzt werden.

- Rauchgasreinigungsstufe

Bei Anwendung von Waschverfahren zur Rauchgasreinigung kann die Waschlösung durch eingetragene Chloride und Fluoride, durch aus dem Schwefeldioxid gebildete schwefelige und Schwefelsäure sowie durch sich bildende Dünnsäuren (Salzsäure, Flusssäure) zu einem extrem korrosiven Medium werden. Als Werkstoff eignen sich deshalb hochkorrosionsbeständige mit Chrom und Molybdän legierte Nickelwerkstoffe.

Am Beispiel der Klärschlamm-trocknungsanlage Weiher II (Kapitel 2.2.2.3) werden in Tabelle 2.17 die Erfahrungen mit der Wahl der Werkstoffe dargestellt.

Tabelle 2.17: Beurteilung der Werkstoffe – Klärschlamm-trocknung KW Weiher II

Anlagenteil	T [°C]	Werkstoff	Korrosion	Abrieb
<b>Mischer</b>	40 bis 110			
Mantel		St 37	--	-
		1.4541	(+)	(+)
Rotor		C 45	-	+
		1.4541	(+)	(+)
Schaufeln		St 52	--	--
		1.4541 u. Erzpanzer	(+)	(+)
<b>Querförderer (Kette)</b>	40 bis 70	St 37	--	0
<b>Trockner</b>	> 100			
Mantel		H II	+	+
Welle		St 52	+	+
1. Scheibe u. Mitnehmer		H II	=	--
		Panzerung	(+)	(+)
Scheiben		H II	+	+
<b>Becherwerk</b>	30 bis > 100			
Gehäuse		St 37	--	0
Kette		St 52	0	0
Becher		St 52	0	0
<b>Siebanlage</b>	30 bis > 100			
Siebe		1.4301	+	+
Gehäuse		St 37	--	0
		1.4541	(+)	(+)
<b>Annahmehunker</b>	0 bis 25	St 37	+	+
<b>Lagersilo (naß)</b>	5 bis 30	St 37	+	+
<b>Schnecke</b>	5 bis 30	St 37	+	+
Kühlschnecken	< 70	St 37	0	0
<b>Trockengut</b>	< 60			
Silos		St 37	+	+
Zellräder		1.4301	+	--
Zellradgehäuse		GGG 40	+	--
Leisten		St 52	+	+

+ ausreichender Schutz; (+) erwarteter ausreichender Schutz; 0 Beurteilung nicht möglich; - deutliche erkennbare Einwirkung; -- Materialdurchbruch

Bezüglich der Werkstoffwahl spielt die Hochtemperatur- und Chlorwasserstoffkorrosion eine wesentliche Rolle. Hierbei wird unter sauerstoffarmen Bedingungen und hohen Temperaturen die schützende Oxidschicht (Magnetit, Hämatit) des Wärmetauschermaterials zu Eisenoxid (FeO) reduziert. Das im Rauchgas enthaltene Kohlenmonoxid bildet zusätzlich reaktives Eisencarbid. Eisenoxid und Eisencarbid reagieren mit Chlor zu Eisen-II-chlorid (FeCl<sub>2</sub>).

Daneben ist die Chloridkorrosion zu beachten: Alkalichloride sublimieren an Rohrwänden, reagieren mit  $\text{SO}_3$  zu Sulfaten und setzen Chlor frei, welches den Eisenwerkstoff angreift.

Korrosionsfördernd sind vor allem Brennstoffmischungen mit hohem K-, Na-, Cl- und niedrigen S-Gehalten. Bei Klärschlämmen ist in vielen Fällen das Verhältnis S zu Cl eher niedrig ( $< 4$ ) und das Alkalichloridpotential sehr hoch. Beide Parameter erhöhen das Risiko eines Korrosionsangriffes wesentlich [VERBUND, 2001].

Nach GERHARDT (1998) muss bei der Mitverbrennung von Klärschlamm sichergestellt sein, dass kein erhöhter Eintrag von Chlorid in die Feuerung stattfindet. Trotz des im Vergleich zu Kohle höheren Cl-Gehaltes von Klärschlamm sind die Auswirkungen der Hochtemperatur- und Chloridkorrosion gering. Dies bestätigen auch von KRAUSE angeführte Untersuchungen.

## 2.7 Energie- und Massenbilanz

Abbildung 2.13 stellt die Energie- und Massenströme der Klärschlamm-Mitverbrennung im Kohlekraftwerk unter Einbeziehung aller Verfahrensschritte (Faulung, Entwässerung, Trocknung ...) dar. Eine eventuelle Abwärmenutzung des Kraftwerkes zur Klärschlamm-trocknung bleibt hier unberücksichtigt. Als Bezugsgröße dient eine Tonne TS eines ausgefaulten Schlammes.

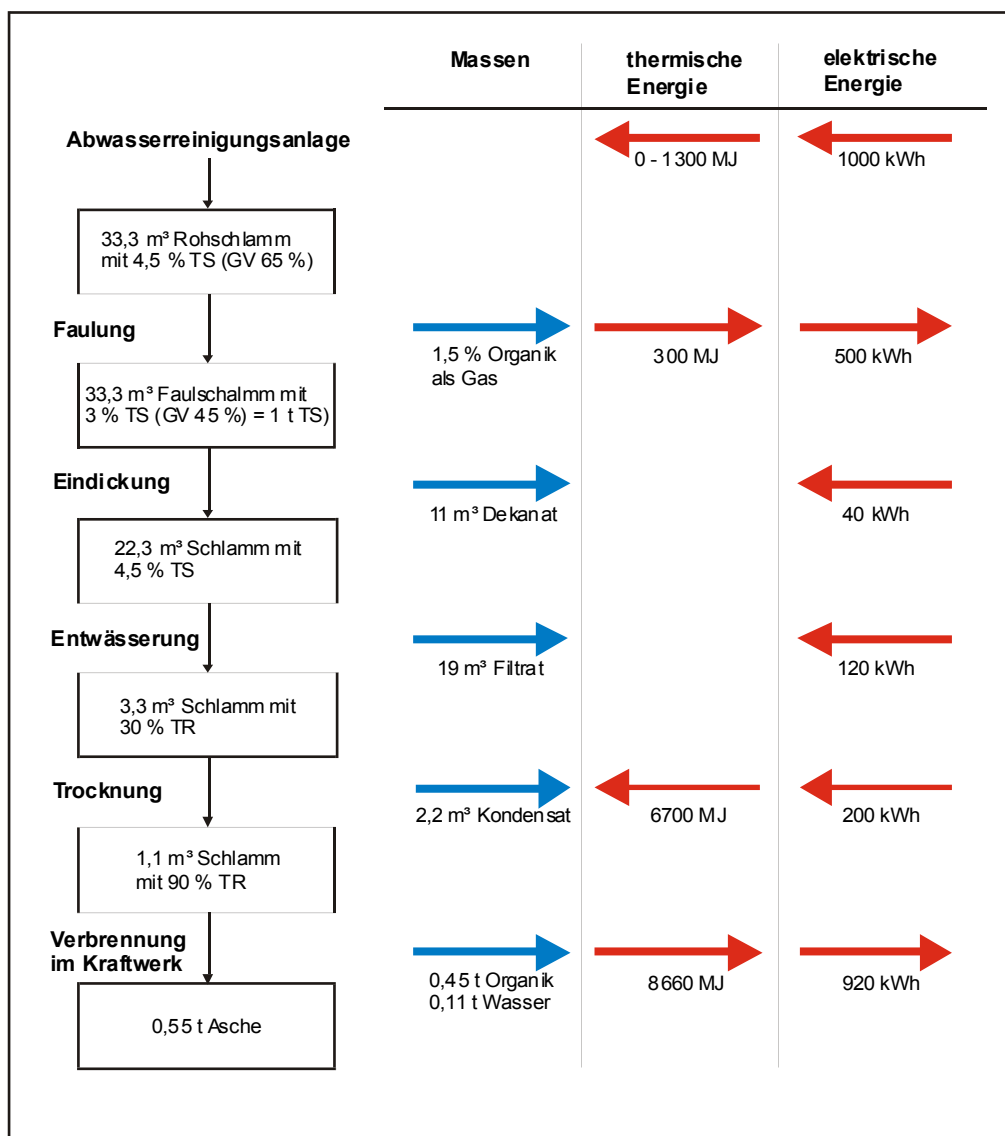


Abbildung 2.13: Energie- und Massenströme bei der Mitverbrennung von Klärschlamm im Steinkohlekraftwerk [BEVER, 1994]

Laut BEVER (1994) werden bei der Mitverbrennung einer Tonne Klärschlamm – ausgehend von einem Heizwert von 10.000 MJ/t TS und nach Abzug der Wärmeverluste bei der Verbrennung - 8660 MJ/t TS an thermischer Energie gewonnen, wenn die vorhergehenden Prozesse nicht berücksichtigt werden. Bei einem Wirkungsgrad von 38 % können daraus 920 kWh elektrischer Energie erzeugt werden. In diesem Fall substituiert eine Tonne Trockensubstanz Klärschlamm etwa 290 kg an Steinkohle.



Wird dagegen die Trocknung in die Bilanzierung einbezogen (Energieaufwand laut BEVER (1994) etwa 6700 MJ/t TS), so verringert sich die Ausbeute an elektrischer Energie auf etwa 200 kWh und die Menge an substituierter Steinkohle auf 65 kg/t TR.

Mit diesen Daten lässt sich das maximale theoretische CO<sub>2</sub>-Einsparungspotenzial durch die Mitverbrennung von Klärschlamm (62.500 t TS pro Jahr) in den Verbund-Kraftwerken bzw. in den österreichischen Kohlekraftwerken (95.500 t TS pro Jahr; siehe 1.5.2.9) errechnen. Zugrundegelegt wird ein Heizwert der Steinkohle von 30 MJ/kg und die Emission von 93.000 kg/TJ CO<sub>2</sub> bei der Verfeuerung von Steinkohle.

Unter diesen Annahmen könnten in den Verbund Kraftwerken je nach Szenario zwischen 11.300 und 50.400 t CO<sub>2</sub> pro Jahr eingespart werden. Werden alle österreichischen Kohlekraftwerke für die Klärschlamm-Mitverbrennung herangezogen, so erhöht sich dieser Wert auf 17.300 t CO<sub>2</sub> (unter Einbeziehung der Trocknung) bzw. 77.3000 t CO<sub>2</sub> (ohne Trocknung). Da die energieintensive Trocknung in die Bilanzierung einbezogen werden muss, ist der niedrigere Wert praxisnäher. Wird dagegen die Abwärme des Kraftwerkes für die Trocknung genutzt, kann unter Umständen auch ein höherer Wert realisiert werden.

Das tatsächliche Potential der Mitverbrennung hängt aber von vielen rechtlichen, technischen und wirtschaftlichen Einflussgrößen ab, welche vom Kraftwerksbetreiber im Einzelfall zu prüfen ist. Daher können oben angestellte Berechnungen nur als Anhaltspunkte verstanden werden.

Derzeit befinden sich Systeme zur solaren Klärschlamm-trocknung in Entwicklung, bzw. werden in Österreich an einem Standort (Bramberg) und in Deutschland an 14 Standorten bereits eingesetzt. Mit der solaren Klärschlamm-trocknung können im Jahresmittel Trockensubstanzgehalte von 70 % erzielt werden. Der Energieeinsatz beträgt etwa 20 – 30 kWh pro Tonne entzogenem Wasser, was in etwa 2 – 3 % des in der Abbildung 2.13 angegebenen Energiebedarfs entspricht (KERN, 2001).

Bei der Verbrennung von 1,11 t Klärschlamm mit einem TR von 90 % entstehen 0,4 t Asche und ca. 280 Nm<sup>3</sup> Rauchgas. Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß beläuft sich auf etwa 5,4 Nm<sup>3</sup>, kann aber als klimaneutral angesehen werden.

### 2.7.1 Bilanzierung des Treibhausgases CO<sub>2</sub>

Die Substitution von fossilen Energieträgern durch CO<sub>2</sub> neutralen Klärschlamm führt zu einer Verminderung der CO<sub>2</sub> Emissionen. Das Minderungspotenzial hängt im wesentlichen vom Wassergehalt des Klärschlammes, dem Gehalt an organischen Bestandteilen in der Trockensubstanz und vom Wirkungsgrad der Klärschlamm-Mitverbrennung ab.

In der folgenden Tabelle werden Minderungspotenziale für verschiedene Szenarien berechnet. Als Basis dient dabei entwässertes Klärschlamm mit 25 % Trockensubstanz, wobei ein organischer Bestandteil von 45 % bzw. 65 % angenommen wurde. Die substituierte Menge Steinkohle wurde mit Hilfe folgender Parameter errechnet:

- Heizwert von Steinkohle: 30 MJ/kg
- CO<sub>2</sub> Emission durch die Verfeuerung von Steinkohle: 93.000 kg CO<sub>2</sub>/TJ
- Elektrischer Nettowirkungsgrad bei der Mitverbrennung von Klärschlamm: 31,6 %
- Elektrischer Nettowirkungsgrad bei der Verfeuerung von Steinkohle: 39,4 %

Der niedrige Wirkungsgrad bei der Klärschlamm-Mitverbrennung lässt sich durch höhere Wärmeverluste durch das Abgas und durch die Schlacke, sowie durch den höheren Anteil an Unverbranntem erklären [RENTZ, 1999].

In der Tabelle 2.18 werden folgende Szenarien berücksichtigt:

- Verbrennung der bisher deponierten Menge plus des angenommenen gesteigerten Anfalls von Klärschlamm: 600.000 t mit 25 % TS pro Jahr.
- Zusätzliche Mitverbrennung eines Teils des bisher in der Landwirtschaft oder sonstwie verwerteten Klärschlammes: 800.000 t mit 25 % TS pro Jahr.
- Mitverbrennungspotenzial der österreichischen Kohlekraftwerke: 382.000 t mit 25 % TS pro Jahr.

Tabelle 2.18: CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial bei der Klärschlamm-Mitverbrennung

Klärschlamm-aufkommen (25 % TS)	organischer Bestandteil der TS (%)	Energiegehalt nach Abzug des Wassers (TJ) <sup>1</sup>	elektr. Netto-Wirkungsgrad: 39,4 %		elektr. Netto-Wirkungsgrad: 31,6 %	
			Substitution Steinkohle (t)	CO <sub>2</sub> Ersparnis (t)	Substitution Steinkohle (t)	CO <sub>2</sub> Ersparnis (t)
600.000	65	1.145	38.150	106.439	35.174	98.136
600.000	45	455	15.150	42.269	13968	38972
800.000	65	1.526	50.867	141.918	46.899	130.848
800.000	45	606	20.200	56.358	18624	51962
382.000	65	729	24.289	67.766	23.394	62.480
382.000	45	289	9.646	26.911	8.893	24.812

<sup>1</sup> Der Energiegehalt wurde nach folgender Formel errechnet:

$$E \text{ (TJ)} = (\text{Tonne TS [t]} * \text{org. Bestandteil} / 100 * 0,023 \text{ [TJ/t]}) - (\text{Wassergehalt [t]} * 0,00244 \text{ [TJ/t]})$$

Wegen des hohen Wassergehaltes und des niedrigen Gehaltes an organischen Bestandteilen in der Trockensubstanz (rund 45 % nach der Ausfäulung) ist das CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial bei der Mitverbrennung von Klärschlamm gering. Selbst unter der Annahme, dass neben dem deponierten Anteil auch bisher in der Landwirtschaft genutzter Klärschlamm mitverbrannt wird, können jährlich nur zwischen 52.000 t und 130.000 t CO<sub>2</sub> eingespart werden.

Das theoretische Einsparungspotenzial durch die Mitverbrennung von Klärschlamm in österreichischen Kohlekraftwerken ist mit 24.800 – 62.500 t dementsprechend geringer.

Durch die Nutzung der Abwärme des Kraftwerkes lässt sich dieser Wert sicherlich erhöhen. Allerdings sind damit auch wesentliche Investitionskosten verbunden. Eine andere Möglichkeit zur Verbesserung der Energiebilanz wäre die solare Trocknung des Klärschlammes.

## 2.7.2 Bilanzierung der Treibhausgase CH<sub>4</sub>

Das Bildungspotenzial von Methan (CH<sub>4</sub>) bei der Deponierung wurde in mehreren Studien untersucht [BAUMELER et al, 1998]. In der Tabelle 2.19 wird diejenige Menge Methan berechnet, welche bei der Deponierung der in der Tabelle 2.18 angegebenen Klärschlammengen freigesetzt werden kann.

Dabei wird ein Deponiegaserfassungsgrad von 15 % und eine Methanoxidation von 10 % vorausgesetzt. Weiters wird in der Studie angenommen, dass sich das Klärschlammvolumen

über die Zeit nicht ändert, d.h. die Methangasbildungsraten werden direkt aus dem Methangasbildungspotential errechnet. Der Klärschlamm wird ohne weitere Vorbehandlung (z.B. Ausfäulung, Trocknung, etc.) deponiert.

Tabelle 2.19: Bildung von Methan bei der Deponierung von Klärschlamm

Abfall im Sinne § 3 (7) AWG Stoffbezeichnung gemäß ÖNORM S 2100	Menge – 25 % TS (t/a)	Menge – 34 % TS (t/a) <sup>1</sup>	Methangasbildungsrate (m <sup>3</sup> /t*a) <sup>2</sup>	Methangasbildung gesamt (m <sup>3</sup> /a)	Methangasbildung gesamt (t/a) <sup>3</sup>	CO <sub>2</sub> Äquivalente (t/a) <sup>4</sup>
SN 945: Stabilisierte Schlämme aus mechanisch-biologischer Abwasserbehandlung; SN 948: Schlämme aus der Abwasserbehandlung	600.000	441.176	69,05	30.463.202	21.842	388.619
	800.000	588.235	69,05	40.617.626	29.123	531.495
	382.000	280.882	69,05	19.394.870	13.906	253.790

<sup>1</sup> Als Basis für die Berechnungen dient in der Studie von Baumeler eine Trockensubstanz von 34 %. Daher wurden die entsprechenden Werte aus der Tabelle 2.18 ebenfalls auf 34 % umgerechnet.

<sup>2</sup> Für die SN945 wird ein Wert von 52,2 m<sup>3</sup>/t\*a bei einem jährlichen Anfall von 240.000 t, für die SN 948 werden 87,3 m<sup>3</sup>/t\*a bei einem Anfall von 225.000 t/a angegeben; der in der Tabelle angeführte Wert stellt einen Mittelwert dar.

<sup>3</sup> Dichte Methan: 0,717 kg/m<sup>3</sup>

<sup>4</sup> Äquivalenzfaktor: 21; von den Werten wurde bereits die Menge CO<sub>2</sub> abgezogen, welche aus der organischen Substanz durch Verbrennung freigesetzt worden wäre, statt zur Methanbildung beizutragen.

Bei der Deponierung werden beträchtliche Mengen Methan gebildet, welche bei der Mitverbrennung von Klärschlamm vermieden werden könnten. Das Potenzial bewegt sich je nach der mitverbrannten Menge zwischen 254.000 und 530.000 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. Bei der Bewertung dieser Ergebnisse ist aber zu berücksichtigen, dass der Gaserfassungsgrad möglicherweise zu gering angenommen wurde und die Bildungsrate von Methan durch geeignete Vorbehandlungsschritte herabgesetzt werden kann.

Bei der Mitverbrennung von 382.000 t Klärschlamm (25 % TS) beträgt das gesamte CO<sub>2</sub> Einsparungspotenzial (= Summe aus Substitution der Kohle und Vermeidung der Methangasbildung, siehe Tabelle 2.18 und Tabelle 2.19) zwischen 279.000 t/a und 316.000 t/a.

Im Maßnahmenkatalog zur Minderung der Treibhausgasemissionen Österreichs sind u.a. Reduktionspotentiale für die Sektoren Energieerzeugung und Abfallwirtschaft aufgelistet. Im Bereich der Abfallwirtschaft wird davon ausgegangen, dass die Deponieverordnung bis 2010 eine Reduktion um 0,84 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten gegenüber 1990 bewirkt. Durch Erhöhung des in Müllverbrennungsanlagen behandelten Anteils auf 60 % (1996: 34 %) und einer optimierten energetischen Nutzung sowohl bei Müllverbrennungsanlagen als auch bei bestehenden Deponien (Deponiegas) lässt sich dieser Wert um 0,2 Mio t CO<sub>2</sub>-Äquivalente steigern. Durch zusätzliche Maßnahmen bei Reaktordeponien (Deponiegaserfassung) können noch einmal rund 0,1 Mio t CO<sub>2</sub>-Äquivalente eingespart werden.

## 2.8 Weitere Möglichkeiten der Mitverbrennung von Klärschlamm

Neben der Verbrennung in eigens dafür gebauten Wirbelschichtkesseln (Abfallverbrennungsanlagen) und der Zufeuerung in Wirbelschichtkesseln der Zellstoff- und Papierindustrie und in Kohlekraftwerken bieten sich weitere Möglichkeiten der thermischen Verwertung und/oder Entsorgung von Klärschlämmen.

### 2.8.1 Mitverbrennung in Asphaltmischgutwerken

Es wurden Überlegungen angestellt, Klärschlamm in Asphaltmischgutwerken einzusetzen.

Asphaltmischgutwerke dienen der Herstellung von Belagmaterialien für den Straßenbau unter Verwendung von Bitumen und mineralischen Stoffen. Dies geschieht durch Zumischung der Mineralstoffe, die in Trockentrommeln auf etwa 150 bis 170 °C erhitzt werden. Das trockene Gemisch wird danach reklassiert und in Silos gelagert; die Mischgutchargen werden dann durch Zugabe von bituminösen Bindemitteln zusammengestellt.

Dabei dient getrockneter Klärschlamm als Substituent des Heizöls in der Trockentrommel. Wenn man von einem Energieverbrauch von etwa 0,25 bis 0,29 GJ pro t Mischgut ausgeht, errechnet sich bei einem Klärschlammanteil von 90 % an der Verbrennung ein Verbrauch von etwa 22 bis 26 kg. Durch die Einbindung von 12 kg Klärschlammasche in das Fertigprodukt ergeben sich keine negativen Auswirkungen auf das Produkt; die Auswaschung von Schwermetallen kann durch die gute Einbindung in das Produkt als vernachlässigbar angesehen werden. Die Trocknung des Klärschlammes erfolgt extern.

Eine Substitution von Heizöl führt jedoch zu einer Erhöhung der Schadstoffemissionen (Stickoxide, Schwefeldioxid, Cadmium, Quecksilber) über die Abluft [BEVER, 1994].

Der Einsatz von Klärschlamm in Asphaltmischgutwerken wird sich in absehbarer Zeit nicht realisieren lassen. Das hat seinen Grund darin, dass ein Teil des Asphaltmischgutes in mobilen Anlagen erzeugt wird, welche nicht für den Klärschlammeinsatz geeignet sind. Andererseits müssen auch in stationären Anlagen umfangreiche Zusatzeinrichtungen installiert werden, sodass ein großtechnischer Einsatz nicht sinnvoll erscheint [RENTZ, 1999].

### 2.8.2 Mitverbrennung in Zementöfen

Zur Herstellung von Zement wird eine Rohmischung aus Kalkstein und Ton unter Verwendung heißer Ofenabgase getrocknet und gleichzeitig gemahlen. Das entstehende Rohmehl wird nach einer Vorwärmstufe in einem Drehrohrofen, mittels einer Kohlestaubflamme bei 1450 °C, zu Zementklinker gesintert. Der Brennstoff wird in der Vorwärmstufe (etwa 20 % des Gesamtbrennstoffes) und in der Hauptbrennstufe (Drehrohr) eingesetzt.

Die Klinkerqualität und die bautechnischen Eigenschaften des Zementes werden durch die Mitverbrennung von max. 5 % Klärschlamm-TS nicht wesentlich beeinflusst. Untersuchungen zeigten nach BEVER (1994) erhöhte Gehalte an Zink, Blei und Cadmium im Klinker. Durch die gute Einbindung in den Klinker ergeben sich dadurch jedoch keine Einschränkungen hinsichtlich der Verwendbarkeit des Zement.

Problematisch sind aber die für eine Abfall-Mitverbrennung meist unzureichenden Einrichtungen zur Rauchgasreinigung, sodass erhöhte Emissionen von Schwermetallen, Dioxinen/Furanen und anderer Schadstoffe zu erwarten sind (siehe auch Kapitel 1.5.2.1).

Derzeit wird in den Anlagen der Zementindustrie kein kommunaler Klärschlamm eingesetzt. Möglicherweise kommt es hier aber im Zuge der ausgearbeiteten „Positivliste“ (siehe 1.4.4) zu Änderungen.

### 2.8.3 Mitverbrennung von Klärschlamm in Abfallverbrennungsanlagen

Klärschlamm kann in Müllverbrennungsanlagen mit Rostfeuerung mitverbrannt werden, wobei sich die in THOMÉ-KOZMIENSKY (1998) angeführten Möglichkeiten der Aufgabe ergeben:

- Trocknung des Klärschlammes in einer vorgeschalteten Trocknungsstufe und Einblasen in die Brennkammer.
- Der Klärschlamm wird durch Wurfbeschicker auf den Verbrennungsrost aufgebracht. Der Trocknung des Schlammes kann dabei entfallen.
- Der Klärschlamm wird nach mechanischer Vorentwässerung im Bunker mit dem Hausmüll gemischt, wobei eine gute Durchmischung erforderlich ist.

Müllverbrennungsanlagen verfügen in der Regel über äußerst effiziente primäre und sekundäre Einrichtungen zur Rauchgasreinigung, welche aus Entstaubung, mehrstufiger nasser Wäsche, DeNO<sub>x</sub> und zusätzlicher Abscheideeinrichtung für Dioxine/Furane und Hg bestehen. Dadurch ist unabhängig von der Zusammensetzung des Klärschlammes die Einhaltung der Grenzwerte möglich.

Die Abfälle aus der Rauchgasreinigung und der Verbrennung müssen in der Regel deponiert werden.

### 2.9 Mitverbrennung von Klärschlamm in Wirbelschichtkesseln der Zellstoff- und Papierindustrie

In der Regel sind die bestehenden Kessel der Zellstoff- und Papierindustrie mit der Verbrennung betriebsintern anfallender Biomasse und Klärschlämmen ausgelastet.

Falls in einer solchen Verbrennungsanlage (siehe Kapitel 1.8) auch betriebsfremder Klärschlamm mitverbrannt werden würde, würde das in den meisten Fällen eine Verschärfung der Grenzwerte nach sich ziehen. Es wird daher angenommen, dass in bestehenden Kessel auch weiterhin kein externer Schlamm verfeuert werden wird.

Auf dem Betriebsgelände der Lenzing AG wurde eine eigene Abfallverbrennungsanlage errichtet, in welcher verschiedene Abfälle (darunter Klärschlamm) thermisch behandelt werden. Auf dem Standort der Papierfabrik Brigl & Bergmeister ist ebenfalls der Bau einer eigenen Abfallverbrennungsanlage geplant.

### 3 KOSTENABSCHÄTZUNG

#### 3.1 Vergleich der Klärschlamm Entsorgungskosten

In nachstehender Übersicht (Tabelle 3.1) werden die Kosten (inkl. Kosten für Transport, zusätzlich MWSt.) der verschiedenen Entsorgungswegen im Vergleich dargestellt.

Tabelle 3.1: Vergleich der Entsorgungskosten für Klärschlamm für Deutschland [STEIRER, 1999]

Entsorgungsweg	TS-Gehalt	Mechanische Entwässerung		Thermische Trocknung		Entsorgung		Gesamtkosten	
		[ATS/t TS]	[€/t TS]	[ATS/t TS]	[€/t TS]	[ATS/t TS]	[€/t TS]	[ATS/t TS]	[€/t TS]
Deponierung	> 35	2.310 – 3.920	169 – 286	0	0	2.030 – 7.980	148 – 583	4.200 – 11.900	307 – 869
Landwirtschaft	ca. 4,5	0	0	0	0	1.540 – 6.230	112 – 455	1.400 – 6.300	102 – 460
	ca. 30	1.540 – 3.080	112 – 225	0	0	210 – 910	15 – 66	2.100 – 4.200	153 – 307
Rekultivierung	ca. 30	1.540 – 3.080	112 – 225	0	0	1.610 – 3.010	118 – 220	3.500 – 6.300	256 – 460
	> 90	1.540 – 3.080	112 – 225	2.310 – 5.810	169 – 424	560 – 980	41 – 72	4.200 – 9.800	307 – 715
Mitverbrennung	ca. 30	1.540 – 3.080	112 – 225	0	0	3.500 – 11.690	256 – 853	4.900 – 14.700	358 – 1.073
MVA	> 90	1.540 – 3.080	112 – 225	2.310 – 5.810	169 – 424	1.190 – 3.920	87 – 286	4.900 – 12.600	358 – 920
Mitverbrennung	ca. 30	1.540 – 3.080	112 – 225	0	0	2.450 – 4.690	179 – 342	4.200 – 7.700	307 – 562
Kohlekraftwerk	> 90	1.540 – 3.080	112 – 225	2.310 – 5.810	169 – 424	630 – 1.190	46 – 87	4.200 – 9.800	307 – 715
Monoverbrennung	> 40	1.540 – 3.080	112 – 225	490 – 2.310	36 – 169	4.410 – 7.000	322 – 511	6.300 – 12.600	460 – 920
	> 90	1.540 – 3.080	112 – 225	2.310 – 5.810	169 – 424	2.310 – 3.080	169 – 225	6.300 – 11.900	460 – 869

In STEIRER (1999) werden die Annahmepreise für Klärschlamm in kalorischen Kraftwerken mit

- 665.- ATS/t (48,5 €/t) für mechanisch entwässerten Klärschlamm mit einem TS-Gehalt von etwa 30 %, sowie
- 525.- ATS/t (38,3 €/t) für thermisch getrockneten Klärschlamm mit einem TS-Gehalt > 90 %

angegeben.

SCHEURER & RICHERS (2000) beziffern die üblichen Annahmepreise für getrockneten Klärschlamm zwischen 420 und 700 ATS/t TS (entspricht 30,7 und 51,1 €/t TS).

Abbildung 3.1 gibt einen Vergleich der durchschnittlichen Kosten für verschiedene Klärschlamm Entsorgungspfade unter Berücksichtigung des Transportes und der Mehrwertsteuer für Deutschland.

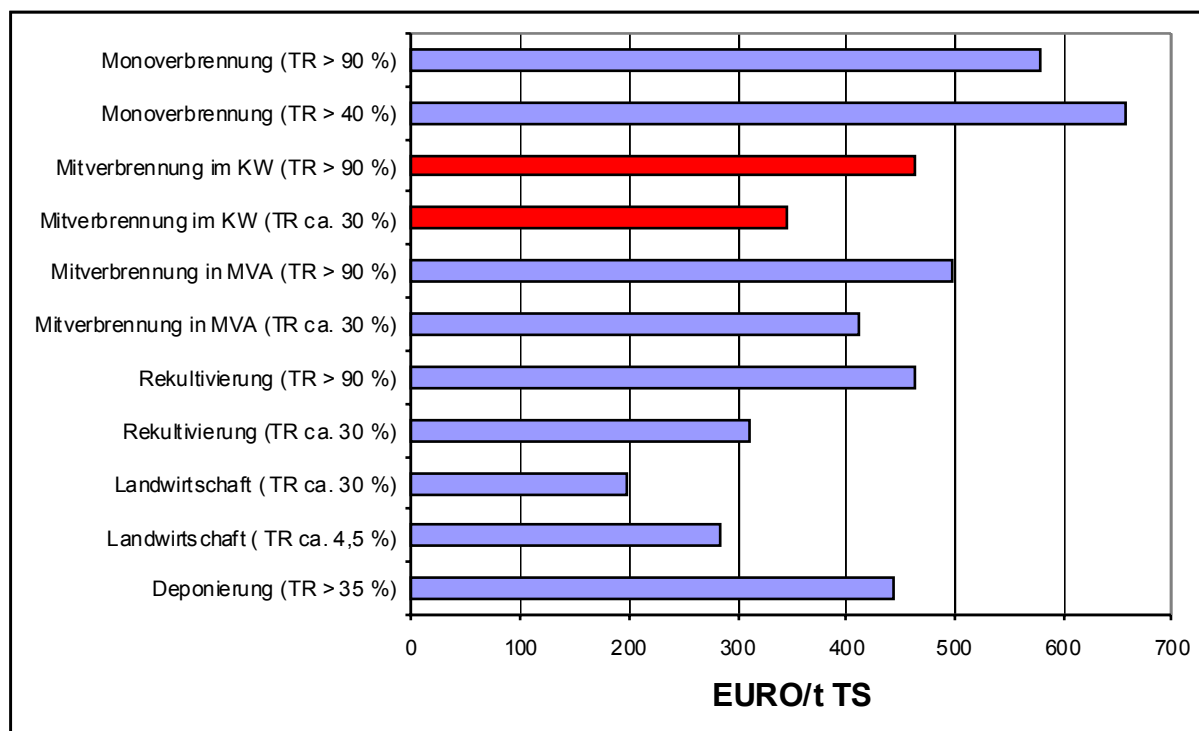


Abbildung 3.1: Vergleich der aktuellen Kosten der Klärschlamm Entsorgung [STEIRER, 1996]

Monoverbrennungsanlagen (Abfallverbrennungsanlagen) müssen wesentlich strengere Vorschriften bezüglich Luft- und Wasseremissionen einhalten als Kohlekraftwerke zur Mitverbrennung. Darüber hinaus müssen bei Ersteren die Abfälle aus der Rauchgasreinigung und der Verbrennung in jedem Fall deponiert werden. In den meisten Fällen sind Abfallverbrennungsanlagen zur Gewährleistung der Entsorgungssicherheit in mehreren Linien gebaut, wodurch ebenfalls höhere Kosten resultieren. Ein Vergleich zwischen Mono- und Mitverbrennung ist daher in keinem Fall leicht zu ziehen.

Nach GERHARDT et al. (1996) fallen für den Betreiber einer Kläranlage für Entwässerung, Verfestigung, Transport und Deponierung der Klärschlämme Entsorgungsgebühren von 2.450 bis 5.250 ATS/t TS (194 bis 383 €/t TS) an. Wird der Klärschlamm im Kraftwerk ungetrocknet (mechanisch entwässert) eingesetzt, können die Deponiekosten vom Kraftwerksbetreiber als Entsorgungsgebühren berechnet werden. Der so angelieferte Klärschlamm hat einen geringen Heizwert und muss getrocknet werden. Die Kosten für die thermische Trocknung am Standort der Kläranlage würden etwa 1.050 bis 2.450 ATS/t TS (77 bis 179 €/t TS) betragen.

Die angegebenen Zahlen können nur als Richtwerte gelten. Die Höhe der tatsächlichen Kosten für die Mitverbrennung ist von der vorhandenen Infrastruktur des Kraftwerkes, den notwendigen Zusatzeinrichtungen für Lagerung, Trocknung, Klärschlammförderung und -Aufgabe, Rauchgasreinigung, Entsorgung der Rückstände u.a. und von einer Vielzahl externer Faktoren abhängig.

### 3.2 Abschätzung der Investitionskosten

In SPLIETHOFF & HEIN (1997) wird auf die geringen Investitionskosten für die Nachrüstung von Kohlekraftwerken zur Mitverbrennung von Biomasse im Vergleich zum Bau einer Bio-

masseverbrennungsanlage hingewiesen. Danach ergeben sich für den Neubau einer dezentralen Biomasseverbrennungsanlage Investitionskosten zwischen 5.600 bis 10.500 ATS je kW (entspricht 409 bis 767 €/kW) thermischer Leistung; für eine Nachrüstung zur Mitverbrennung fallen hingegen Zusatzinvestitionen von 1.050 bis 2.100 ATS/kW (entspricht 77 bis 153 €/kW) an, wobei der Hauptanteil auf die Brennstoffaufbereitung entfällt.

Nach GERHARDT et al. (1996) müssen zur Klärschlamm-Mitverbrennung Anlagen zur Lagerung, Förderung und Dosierung adaptiert werden. Der Investitionsaufwand richtet sich hier hauptsächlich nach den Eigenschaften des eingesetzten Klärschlammes. Einfluss auf die Investitionskosten haben die Größe des notwendigen Speichervolumens in Abhängigkeit des Restwassergehaltes, Einrichtungen zur Verhinderung von Geruchs- und Staubemissionen sowie Einrichtungen zur Verhinderung von Selbstentzündungen und Staubexplosionen.

Nach GERHARDT et al. (1996) ist die Zugabe von stabilisiertem, getrocknetem Klärschlamm in Granulat- oder Pelletform auf das Zuteilerband direkt vor der Kohlemühle die kostengünstigste Variante. Falls der Partikelausbrand es erlaubt ist auch eine direkte, unzerkleinerte Aufgabe in den Brennraum als kostengünstig anzusehen. Durch unzerkleinerte Aufgabe wird die Gefahr einer Explosion verringert.

Zusätzlich sind die Rauchgasreinigungseinrichtungen an den erhöhten Schadstoffinput anzupassen und gegebenenfalls deren Abscheidekapazität zu erhöhen.

Daneben sind zusätzliche Vorrichtungen zur Messung der Emissionen an Schwermetallen, Dioxine/Furane, PAK und chlorierte Verbindungen zu installieren.

Je geringer sich die Investitionskosten darstellen, desto flexibler kann das Verfahren eingeführt, verändert und bei gegenläufiger Marktentwicklung auch eingestellt werden.

Alternativ zur Verbrennung von Klärschlamm im Kessel bietet sich die Möglichkeit der externen Vergasung an (Kapitel 4.1.1). Als Beispiel sei hier der Biomassevergaser (10 MW<sub>th</sub>) am Kraftwerksstandort Zeltweg angeführt, dessen Installierung eine Investition von 65 Mio. ATS (entspricht 4,7 Mio. €) erforderte.

### 3.3 Abschätzung der Betriebskosten

Die Kosten der Klärschlamm-Mitverbrennung können in folgende Gruppen gegliedert werden [MEYER, 1998]:

- Vorbehandlung / Entwässerung,
- Logistik,
- Mitverbrennung im Kraftwerk.

Dabei ist der Kostenblock für die Mitverbrennung deutlich kleiner als bei der Monoverbrennung. Die Kosten für die Vorbehandlung und Logistik sind höher. Durch eine Substitution des Primärenergieträgers können ebenfalls Betriebskosten eingespart werden.

Laut THOMÉ-KOZMIENSKY (1998) betragen die geschätzten Kosten für die Mitverbrennung im Kraftwerk 350 bis 1.750 ATS/t TR (25 bis 128 €/t TR).



## 4 BEISPIELE FÜR DIE MITVERBRENNUNG VON KLÄRSCHLAMM

### 4.1 Erfahrungen zur Mitverbrennung im Verbund

#### 4.1.1 Biomasse- und Abfallvergasung im Kraftwerk Zeltweg

Im Kraftwerk Zeltweg wurden versuchsweise Biomasse und Abfälle vergast und die erzeugten Gase als Brennstoff im Kohlekessel (Trockenstaubfeuerung) verbrannt.

Das Verfahren beruht auf der Vergasung von Biomasse und Abfällen unter Sauerstoffmangel in einer Wirbelschicht. Die für die Vergasung erforderliche Wärme entsteht durch das Verbrennen eines Teiles der eingesetzten Biomasse und Abfälle. Das entstehende Gas wird ohne weitere Reinigung dem Kessel als Brennstoff zugeführt.

Der Vergaser ist als zirkulierende Wirbelschicht ausgeführt und arbeitet bei einer Temperatur von ca. 850 °C. Biomasse und Abfälle, welche in den unteren Teil des Vergasers eingeführt werden, trocknen im Wirbelbett und werden zur Erreichung der erforderlichen Gastemperaturen teilweise verbrannt. Die getrockneten und bereits teilweise entgasten Teilchen besitzen eine geringe Dichte und werden mit dem Gasstrom in den oberen Teil des Vergasers geführt und dort vergast. Große, nicht vollständig entgaste Teilchen werden über ein Zyklon wieder in den Prozess zurückgeführt. Das entstehende Brenngas wird gemeinsam mit den feinkörnigen Teilchen (Holzkohlestaub und Asche) in den Kessel geführt und dort in der Kohleflamme mitverbrannt [TAUSCHITZ et al., 1999]. Eine Trocknung und Reinigung des Gases ist nicht erforderlich. Abbildung 4.1 stellt den prinzipiellen Aufbau des Biomassevergasers am Kraftwerksstandort Zeltweg dar.

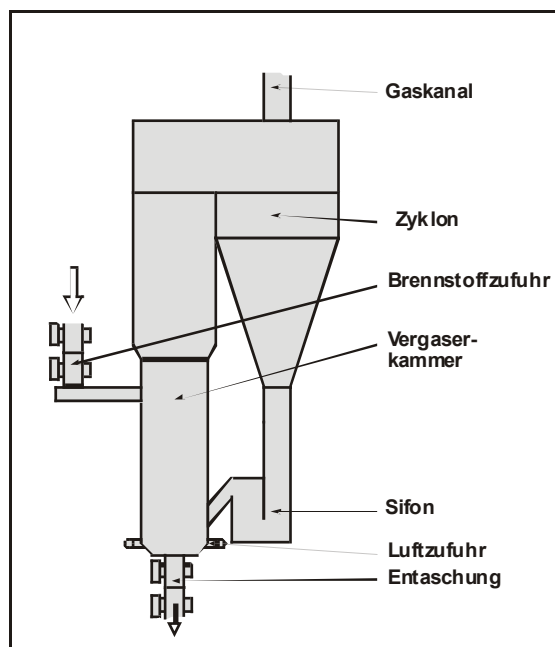


Abbildung 4.1: Biomassevergasers KW Zeltweg

In der ersten Versuchsperiode wurde als Brennstoff vorwiegend Biomasse (Rinde, Holzschnitt, Hackgut, Sägespäne) eingesetzt; in der zweiten Demonstrationsperiode wurden zusätzlich auch Abfälle (u.a. Klärschlamm) in einem max. Mischungsverhältnis von 50 % mit Rinde und Hackgut verfeuert. Tabelle 4.1 zeigt die typischen Kennwerte dieser Mischung.

Tabelle 4.1: Kennwerte einer Mischung aus Rinde, Hackgut und Klärschlamm

<b>Feuchte</b>	Massen-%	46
<b>Heizwert</b>	$\text{kJ/kg}_{\text{feucht}}$	8.500
<b>Dichte</b>	$\text{kg/m}^3$	350
<b>Energieinhalt</b>	$\text{kWh/m}^3$	830

Aus marktwirtschaftlichen Gründen wird das Kraftwerk Zeltweg für die nächsten Jahre vorerst stillgelegt.

In diesem Zusammenhang ist die in THOMÉ-KOZMIENSKY (1998) angeführte Reststoffvergasung der Zementwerke Rüdersdorf (D) in einer zirkulierenden Wirbelschicht nach dem Lurgi-Konzept anzuführen. In einer zirkulierenden Wirbelschicht werden die eingetragenen Stoffe (Altholz, Leichtfraktion aus Abfallsortierung, Klärschlamm) vergast und das dabei entstehende Schwachgas wird dem Zementofen als Brennstoff zugeführt.

#### 4.1.2 Versuche zur Mitverbrennung KW St. Andrä 2

Im Kraftwerk St. Andrä (Abbildung 4.2 und Tabelle 4.2) wurden im Februar und März 2000 in einem Versuchsbetrieb Biomasse und Abfälle eingesetzt. Dabei wurde u.a. auch Klärschlamm einer Mitverbrennung zugeführt. Ergänzende Versuche sind in der Betriebsaison 2000/2001 geplant.

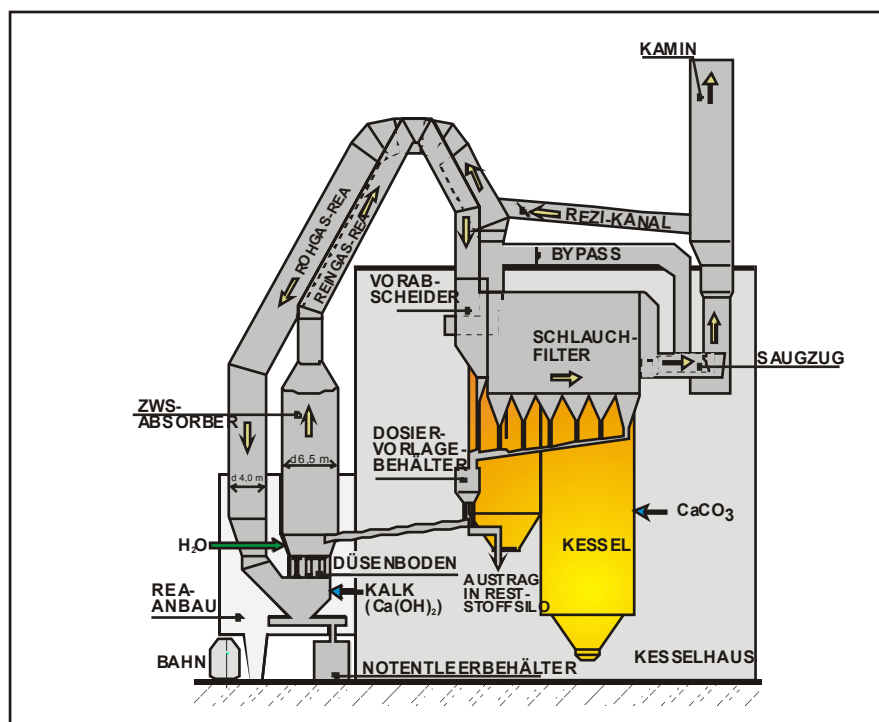


Abbildung 4.2: Schnitt durch das KW St. Andrä

Tabelle 4.2: Basisdaten des KW St. Andrä [VERBUNDGESELLSCHAFT, 1998]

Inbetriebnahme	1985	
Brennstoff	Steinkohle	
Brennstoffwärmeleistung	284	MW
Generatorleistung	124	MW
Fernwärmeleistung	17	MW
Durchschn. Brennstoffverbrauch	37	t/h
Staubabscheidung	Gewebefilter	
Entschwefelung	Kalkadditivverfahren Trockensorptionsverfahren	
Entstickung	Feuerungstechnische Maßnahmen	

Tabelle 4.3 zeigt die bei den Mitverbrennungsversuchen in St. Andrä eingesetzten Mengen an Regelbrennstoffen (Steinkohle, Braunkohle und Biomasse), Klärschlamm und anderen Abfällen (wie Holzabfälle und Kunststoffe) im Überblick.

Tabelle 4.3: Eingesetzte Klärschlamm- und Ersatzbrennstoffmengen im KW St. Andrä

	Nullversuch [t/h]	Mitverbrennungsversuche [t/h] <sub>roh</sub>
<b>Regelbrennstoffe</b>		
Steinkohle	25	25 – 27
Braunkohle	12	10
Biomasse	4,5	0 - 7,7
<b>Klärschlamm*</b>	<b>0</b>	<b>2,2 - 3,1</b>
<b>Weitere Ersatzbrennstoffe</b>	0	2,0 – 6,1

\* 90 % Klärschlamm aus der Papier- und Zellstoffindustrie (70 % TS); 10 % anaerob stabiler Klärschlamm (60 % TS)

Die Klärschlämme wurden gemeinsam mit der Kohle in der Braunkohlemühle getrocknet. Die Trocknung erfolgte durch rückgeführtes Rauchgas, wodurch gleichzeitig die Explosionsgefahr in der Mühle gebannt wurde. Die Beimengung von Klärschlamm lag in der Größenordnung von ca. 10 Gew.-% vom Regelbrennstoff.

Klärschlamm wurde dabei in Kombination mit anderen Abfällen eingesetzt. Das prinzipielle Verhalten unterschiedlicher (Schad-)Stoffe bei der Mitverbrennung in einem kalorischen Kraftwerk lässt sich durch Messung einzelner Parameter im Rauchgas bzw. durch Untersuchungen der Reststoffe ableiten.

Basis für diese Untersuchungen ist die Zusammensetzung der in den Versuchen eingesetzten Klärschlämme und der Regelbrennstoffe Braun- und Steinkohle (Tabelle 4.4.9).

Tabelle 4.4: Vergleich der im KW eingesetzten Klärschlämme mit Braun- und Steinkohle

Parameter			Braunkohle	Steinkohle	Klärschlamm
Wassergehalt		[%]	36	12	30 - 40
Heizwert		[MJ/kg]	12,9	26	10
Asche		[Gew.-% <sub>TS</sub> ]	19,90	8,90	28
Kohlenstoff	C	[Gew.-% <sub>TS</sub> ]	56,20	76,80	38 - 40
Stickstoff	N	[Gew.-% <sub>TS</sub> ]	0,87	1,70	2 - 5
Gesamtschwefel	S	[Gew.-% <sub>TS</sub> ]	0,82	0,71	0,4 - 1,0
Chloridgehalt	Cl	[Gew.-% <sub>TS</sub> ]	0,03	0,14	0,2 - 0,3
Fluoridgehalt	F	[Gew.-% <sub>TS</sub> ]	0,022	0,014	0,01 - 0,02
Sauerstoff	O	[Gew.-% <sub>TS</sub> ]	18,10	7,00	20 - 25
Wasserstoff	H	[Gew.-% <sub>TS</sub> ]	4,20	4,90	4,6 - 5,2
Aluminium	Al	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	17.200,0	9.600,0	10.000 - 15.000
Antimon	Sb	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	3,0	3,0	5 - 7
Arsen	As	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	11,0	3,0	4,5 - 5
Barium	Ba	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	140,0	107,0	300 - 400
Beryllium	Be	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	2,0	2,0	2
Blei	Pb	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	8,7	44	16 - 58
Bor	B	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	29,0	25,0	44 - 54
Cadmium	Cd	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	2,0	2,0	4 - 6
Chrom gesamt	Cr	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	36,0	23,0	60 - 70
Cobalt	Co	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	6,4	10,0	2 - 3,5
Kupfer	Cu	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	25,0	23,0	30 - 120
Mangan	Mn	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	104,0	34,0	600 - 1000
Molybdän	Mo	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	2,0	2,0	5 - 6
Nickel	Ni	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	38,0	26,0	30 - 40
Quecksilber	Hg	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	0,15	0,15	0,2 - 1,6
Selen	Se	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	3,0	3,0	4,5 - 5,0
Thallium	Tl	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	1,0	1,0	2
Vanadium	V	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	36,0	29,0	9 - 11
Zink	Zn	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	35,0	48,0	400 - 750
Zinn	Sn	[mg/kg <sub>TS</sub> ]	2,0	3,0	10 - 20

Zum Vergleich der Emissionen und Reststoffqualitäten wurden „Nullversuche“ mit den Regelbrennstoffen (Steinkohle, Braunkohle und Biomasse) durchgeführt.

Die Emissionen der Schadstoffe CO, org. C, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl, HF und Staub wurden kontinuierlich gemessen.

Die Parameter:

- Summe aus Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn
- Summe Cd und Tl
- Hg
- PCDD/F
- NH<sub>3</sub>

wurden im Reingas diskontinuierlich bestimmt. Die entsprechenden Emissionsmessungen sind im Vergleich zum Betrieb mit dem Regelbrennstoff in Tabelle 4.5 dargestellt.

Tabelle 4.5: Emissionsmessungen bei der Mitverbrennung St. Andrä

Parameter	Zeitbezug	Grenzwert (10 % Brennstoff- wärmeleistung)	Meßwerte [mg/Nm <sup>3</sup> ]	
			Nullversuch	Mitverbrennung
SO <sub>2</sub>	HMW	125	113	83 – 93
NO <sub>x</sub>	HMW	300	162	151 – 172
CO	HMW	160	12	15 – 16
Staub	HMW	30	7,6	1,8 - 2,5
C <sub>org</sub>	HMW	10	0,5	0,1 - 0,4
HCl	TMW	10	1,9	0,9 - 2,9
HF	TMW	0,5	0,27	0,04 - 0,4
Cd+Tl	0,5 - 8 Std-Wert	0,05	< 0,004	< 0,004
Hg	0,5 - 8 Std-Wert	0,05	< 0,002	< 0,002
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu +Mn+Ni+V+Sn	0,5 - 8 Std-Wert	0,5	0,08	0,07 - 0,13
PCDD/F [ng/m <sup>3</sup> ]	6 - 8 Std. Wert	0,1	0,0012	0,0016 - 0,002
NH <sub>3</sub>	HMW	10	0,12	0,02 - 0,08

Meß- und Grenzwerte bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, 0°C, 1013 mbar und trockenem Rauchgas, NH<sub>3</sub> auf 0 % O<sub>2</sub> bezogen

Wie aus der Tabelle 4.5 ersichtlich, kommt es bei den durchgeführten Versuchen zur Mitverbrennung zu keiner wesentlichen Erhöhung der Gesamtemissionen der angeführten Schadstoffe. Allerdings sind sowohl der Brennstoffinput als auch die Emissionen in Bereichen angegeben, sodass der Anteil der Emissionen aus der Klärschlammmitverbrennung (d.h. Verbrennung von Kohle plus Klärschlamm) nicht ersichtlich ist. Aus den eingesetzten Mengen an Brennstoffen und der jeweiligen Brennstoffzusammensetzung lässt sich außerdem ableiten, dass in manchen Fällen (z.B. hauptsächliche Verfeuerung von Steinkohle mit geringen Anteilen an Biomasse und Klärschlamm) der Schadstoffinput sogar geringer ist als bei den sogenannten Nullversuchen. Für eine genaue Beurteilung der Emissionen aus der Klärschlamm-Mitverbrennung in diesem Kraftwerk sind auf jeden Fall weitergehende Messergebnisse heranzuziehen.

Zusätzlich zu den Emissionsmessungen wurden auch die Flugasche, die Grobasche und der Feststoff aus der Entschwefelung untersucht.

Nachstehende Tabellen vergleichen die Schwermetallgehalte der Abfälle aus dem Nullversuch mit denen aus den Versuchen zur Mitverbrennung (Trockensorptionsreststoff und Grobasche). Es wurde jeweils der Gesamtgehalt und der eluierbare Anteil an Schwermetallen in den Abfällen untersucht. Zum Glühverlust wurde keine Angabe gemacht.

Tabelle 4.6: Gesamt- und Eluatgehalte von Grobasche und dem Gemisch aus Flugasche und Feststoff aus der Entschwefelung

Gemisch: Flugasche und Feststoff aus der Entschwefelung				
Parameter	Gesamtgehalt [mg/kg]		Eluatgehalte [mg/kg] <sup>1</sup>	
	Nullversuch	Mitverbrennung	Nullversuch	Mitverbrennung
Al	2,9	3,4 - 3,6	12	8,5 - 11
As	34	31 - 37	< 0,2	< 0,2
Cd	< 2	4 - 7	< 0,1	< 0,1
Cr	49	55 - 64	0,91	0,81 - 0,85
Cu	135	80 - 140	<0,1	<0,1
Hg	0,6	0,6 - 1,3	<0,01	<0,01
Ni	91	93 - 100	<0,2	<0,2
Pb	230	228 - 650	<0,3	<0,3
Zn	140	245 - 570	<0,2	<0,2
Grobasche				
Parameter	Gesamtgehalt [mg/kg]		Eluatgehalte [mg/kg] <sup>1</sup>	
	Nullversuch	Mitverbrennung	Nullversuch	Mitverbrennung
Al	4,4	4,8 - 5,9	21	8,8 - 133
As	11	11 - 13	< 0,2	< 0,2
Cd	<2	<2	< 0,1	< 0,1
Cr	59	86 - 260	0,11	< 0,1 - 0,12
Cu	80	590 - 7800	0,1	0,1 - 0,23
Hg	<0,2	<0,2	< 0,01	< 0,01
Ni	70	130 - 290	< 0,2	< 0,2
Pb	57	130 - 3400	< 0,3	< 0,3 - 1,7
Zn	100	190 - 5590	< 0,2	0,2 - 1,1

<sup>1</sup> gemäß ÖNORM S 2072

Die Konzentrationen einiger Schadstoffe im Gemisch Flugasche/Feststoff aus der Entschwefelung steigen bei der Mitverbrennung von Klärschlamm und anderen Abfallfraktionen deutlich an. Die Konzentrationen von Hg sind bis zu einem Faktor 2, die von Pb bis zu einem Faktor 3 und die von Cd bis zu einem Faktor 4 erhöht gegenüber der Verbrennung von Kohle und Biomasse.

Die Grobasche aus der Mitverbrennung enthält vor allem die schwer flüchtigen Schwermetalle Pb, Zn, Cu und Cr in deutlichen höheren Ausmaßen. Diese hohen Schadstoffgehalte stehen einer stofflichen Verwertung der Rückstände entgegen.

Für die Deponierung von Abfällen ist der Grad der Immobilisierung und Stabilisierung von Schwermetallen von Bedeutung. Das Ausmaß der Immobilisierung kann durch die Schwermetallkonzentrationen im Eluat (z.B. nach der ÖNORM S 2072) bestimmt werden.

Tabelle 4.6 zeigt, dass sich die Mobilisierbarkeit der Schwermetalle des Trockensorptionsrückstandes bei den Versuchen zur Mitverbrennung nicht ändert. In den Eluaten der Grobasche wurden dagegen erhöhte Gehalte an Al, Cu, Zn und Pb gefunden.

Da im Kraftwerk St. Andrä der Entschwefelungsrückstand und die Flugasche gemeinsam abgeschieden werden, kann eine Verfestigung der Abfälle mittels Wasserzugabe erfolgen. Dadurch wird laut Betreiberangaben die Eluierbarkeit von Schwermetallen vermindert. Die verfestigten Abfälle werden am Betriebsgelände des Kraftwerkes St. Andrä zur Schüttung eines Lärmschutzwalles eingesetzt. Im Fall der Mitverbrennung von Klärschlamm könnten die Abfälle weiterhin dafür verwendet werden.

In den beschriebenen Versuchen wurde immer eine Kombination von Klärschlämmen mit Biomasse und anderen Abfällen eingesetzt. Der Klärschlamm stammte zu 90 % aus der Zellstoff- und Papierindustrie. Um die Auswirkungen der Mitverbrennung von Klärschlamm auf das Kraftwerk (z.B. Korrosion), auf die Emissionen in Luft und Wasser und auf die Qualität der Abfälle aus der Verbrennung und der Rauchgasreinigung beurteilen zu können, ist die Durchführung weiterer Versuche (auch mit kommunalem Klärschlamm) notwendig.

Die Kosten der Klärschlamm-Mitverbrennung können für das KW St. Andrä mit etwa 500 bis 700 ATS/t<sub>(30% TS)</sub>, entsprechend 36 bis 51 €/t<sub>(30% TS)</sub>, beziffert werden. Diese würden zur Zeit dem Anlieferer verrechnet werden.

## 4.2 Internationale Erfahrungen

In deutschen Kohlekraftwerken wurden umfangreiche Versuche zur Mitverbrennung von Klärschlamm durchgeführt (Tabelle 4.7).

Tabelle 4.7: Übersicht der Kraftwerke mit Erfahrungen zur Mitverbrennung von Klärschlämmen in Deutschland

Standorte, Betreiber	Feuerungstyp	Leistung	Klärschlamm	Status	Anteile		Entsorgungskapazität
					Gew.-%	Leistungs-%	
Berrenrath, Rheinbraun	Braunkohle, Wirbelschicht	235 MW <sub>th</sub>	entwässert	seit 1995 Dauerbetrieb	4	3,5	max. 65.000 t TS/a
Boxberg III, VEAG	Braunkohle, Trockenf.	2 · 500 MW <sub>el</sub>	entwässert	seit 1999 Dauerbetrieb	3 - 5	ca. 1	ca. 30.000 t TS/a
Braunsbedra, EWAG	Braunkohle, Rost	4 · 7 MW <sub>th</sub>		1996 Versuche durchgeführt	bis 50	ca. 25	-
Buschhaus, BKB	Braunkohle, Trockenf.	930 MW <sub>th</sub>	getrocknet; entwässert	seit 1998 Dauerbetrieb	5	< 5	ca. 80.000 t TS/a
Duisburg H., Stadtwerke	Steinkohle, Schmelzf.	200 MW <sub>th</sub> , 365 MW <sub>th</sub>	entwässert	Dauerbetrieb	9	< 0,5	ca. 16.000 t TS/a
Farge Bremen, Preußen Elektra	Steinkohle, Trockenf.	356 MW <sub>el</sub>	entwässert	genehmigt, kein Betrieb	9	< 0,5	ca. 10.000 t TS/a
Franken II, Bayernwerke	Steinkohle, Schmelzf.	1.047 MW <sub>th</sub>	entwässert; getrocknet	seit 1998 Dauerbetrieb	5 % TS	< 1,5	ca. 35.000 t TS/a
Heilbronn, EnBW	Steinkohle, Trockenf.	1.933 MW <sub>th</sub>	entwässert; getrocknet	seit 1998 Dauerbetrieb	4	< 1,1	ca. 40.000 t TS/a
Lausward, Stadtwerke Düsseldorf	Steinkohle, Schmelzf.	170 MW	getrocknet,	genehmigt, kein Betrieb	21	11	1994 – 1996 20.000 t TS/a
Lünen, Inno- vatherm	Steinkohle, Wirbelschicht	9 MW <sub>el</sub>	entwässert	seit 1997 Dauerbetrieb	Kohlezusatz damit H <sub>u</sub> > 4.200 KJ/kg		ca. 100.000 t/a
Mibrag	Braunkohle, Trockenf.	k.A.	k.A.	Versuche durchgeführt	k.A.	k.A.	-
Karlsruhe, RDK EnBW	Steinkohle, Trocken	1280 MW <sub>th</sub>	entwässert	1998 Versuche durchgeführt	1,25	0,07	-
Voerde, STEAG	Steinkohle, Schmelzf.	350 MW <sub>el</sub>	getrocknet	1998 Versuche durchgeführt	k.A.	ca. 20	-
Wahlheim, Neckarwerke	Steinkohle, Schmelzf.	382 MW <sub>th</sub>	getrocknet	1996 Versuche durchgeführt	12,5	5	-
Weißer II, Saar Energie	Steinkohle, Schmelzf.	195 MW <sub>th</sub>	entwässert, getrocknet	seit 1996 Dauerbetrieb	5	k.A.	ca. 10.000 t TS/a
Weisweiler, RWE	Braunkohle, Trockenf.	913 MW <sub>th</sub>	entwässert	Dauerbetrieb ab 5/2000	7,5	1	max. 140.000 t/a
Zolling Bayernwerk	Steinkohle, Trockenf.	1080 MW <sub>th</sub>	entwässert	seit 1999 Dauerbetrieb	9,6	2,76	ca. 10.000 t TS/a

Aus Tabelle 4.7 geht hervor, dass für die Mitverbrennung in deutschen Kohlekraftwerken in 17 Anlagen Erfahrungen vorliegen. Eine gültige Genehmigung liegt in zwölf Anlagen vor, die in neun Anlagen genutzt wird. In Summe ergibt sich eine Mitverbrennungs-Kapazität von



ca. 350.000 t TS/a d.h. ca. 15 Prozent des gesamten jährlichen Aufkommens an kommunalem Klärschlamm (2,3 Mio. t TS/a).

#### 4.2.1 KW Franken II

Im Steinkohlekraftwerk Franken II werden seit Oktober 1998 kommunale Klärschlämme in einer Schmelzkammerfeuerung mitverbrannt.

Dabei wird mechanisch entwässertes Klärschlamm über Schiene bzw. Straße angeliefert und in einem Annahmehunker chargenweise zwischengelagert. Diese Art der Speicherung dient der Zuordnung des Klärschlammes zum Anlieferer im Falle einer Vertragsverletzung. Der angelieferte Klärschlamm wird danach wahlweise mittels Dickstoffpumpen in zwei verschiedenen Zwischensilos gefördert, wobei es hier möglich ist, unterschiedliche TR-Gehalte und Schadstoffbelastungen auszugleichen. Thermisch getrockneter Klärschlamm (< 90 % TR) wird mittels Silofahrzeugen angeliefert und pneumatisch in das Vorratssilo transportiert. Tabelle 4.8 spezifiziert die Klärschlämme, die im Kraftwerk Franken II mitverbrannt werden.

Tabelle 4.8: Spezifikation der eingesetzten Klärschlämme (KW Franken II)

	mechanisch entwässert	thermisch getrocknet
Trockenrückstand	20 – 35 %	> 90 %
Eigenschaften	stichfest, pumpfähig	pneumatisch förderbar
	ausreichend ausgefault oder stabilisiert	
Mech. Entwässerung	Fällung mit Polymeren, Konditionierung ohne Zuschläge	
Fremdkorngröße	max. 10 mm	
Art / Herkunft	kommunal oder kommunalähnlich	
Zusammensetzung	Grenzwerte der Abf KlärV §4	
Analysen	entsprechen Abf KlärV §3	

Der mechanisch entwässerte Schlamm muss hydraulisch pumpbar sein, weshalb der TS-Gehalt nicht über 35 % liegen darf. Auf der anderen Seite muss der thermisch getrocknete Klärschlamm einen TR > 90 % aufweisen um pneumatisch förderbar zu sein.

Der entwässerte und der thermisch getrocknete Schlamm werden gemeinsam mit der Kohle vermahlen, getrocknet und dabei vollständig vermischt. Die zur Trocknung erforderliche Energie wird dem Rauchgas entzogen, wodurch - im Gegensatz zur separaten Trocknung - kein Einsatz von Primärenergie erforderlich ist. Voraussetzung für den Eintrag über die Kohlemühle ist, dass die vorhandenen Mahltrocknungsanlagen eine ausreichend hohe Trocknungsleistung aufweisen.

Zusammen mit dem Kohlestaub wird der getrocknete und gemahlene Klärschlamm aus den Mühlen ausgetragen, in den Brennern mit Heißluft vermischt, in den Feuerraum eingedüst und bei etwa 1500 °C verbrannt. Die Klärschlammaufgabe beträgt 6,5 t/h bei einer Kohlaufgabe von 135 t/h (entsprechend etwa 5 %).

Bei Vollastbetrieb können, abhängig von der Feuchtigkeit der Kohle, täglich 150 bis 200 t Klärschlamm mit einem TR-Gehalt von 30 % und über 100 t mit ca. 90 % TR mitverbrannt werden.

Probleme bei der Mitverbrennung verursachten anfänglich vor allem Ablagerungen auf Flächen unterhalb eines Temperaturbereiches von 1000 °C, welche aufgrund der hohen Ascheschmelztemperatur (1300 °C) nicht auf Versinterungen zurückzuführen waren.

Untersuchungen ergaben eine starke Anreicherung von Sulfaten, Phosphaten und Arsenaten in den Ablagerungen. Dies rührte daher, dass durch die eingebrachten Klärschlämme die  $\text{SO}_3$ - und  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Gehalte in der Flugasche erhöht wurden (Tabelle 4.9).

Tabelle 4.9: Vergleich der  $\text{SO}_3$ - und  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Konzentrationen [%]

	Klärschlamm (KW Franken II)		Steinkohle	
	mech. entwässert	therm. getrocknet	Ruhr	Polen
$\text{SO}_3$	9,00	4,30	0,81	0,74
$\text{P}_2\text{O}_5$	14,30	10,30	0,03	0,06

Durch den geringen Luftüberschuss am Kesselende kann es in Teilbereichen zur Reduktion dieser Verbindungen zu elementarem Schwefel, Phosphor und Arsen kommen. Bei der Abkühlung kondensieren diese Elemente an den Rohroberflächen und auf den Flugaschepartikeln, welche die Wirkung eines Kondensationskeimes haben. Besonders kleine Partikel weisen aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche eine sehr hohe Beladung auf und es kommt zu einer Verklebung von Flugaschepartikeln auf den Kesselrohren.

Da bei Einsatz von Klärschlamm der Anteil an flüchtigen Verbindungen hoch ist, kommt es in der Kernzone des Brenners zu einem raschen Sauerstoffverbrauch und zu einer Verstärkung der reduzierenden Zone. Die Anhebung des Luftüberschusses konnte dabei Abhilfe schaffen. Zusätzlich wurde der Rußblaszyklus erhöht [STEIRER, 1996].

Das Kraftwerk Franken II verfügt über eine SCR-Entstickung in High-Dust-Schaltung, über einen Elektrofilter und eine Nassentschwefelungsanlage.

#### 4.2.2 KW Lausward

Das Steinkohlekraftwerk Lausward wird von der Stadtwerke Düsseldorf AG betrieben. Die vier Kraftwerksblöcke sind als Schmelzkammerfeuerungen ausgeführt und besitzen eine elektrische Gesamtleistung von 930 MW. Der für die Mitverbrennung vorgesehene Klärschlamm wird bereits im Klärwerk auf 95 % TS getrocknet. Der Klärschlamm wird in einem Block mitverbrannt; bei Stillstand dieses Blockes wird der Klärschlamm zur Entsorgungssicherheit in die anderen Blöcke eingebracht.

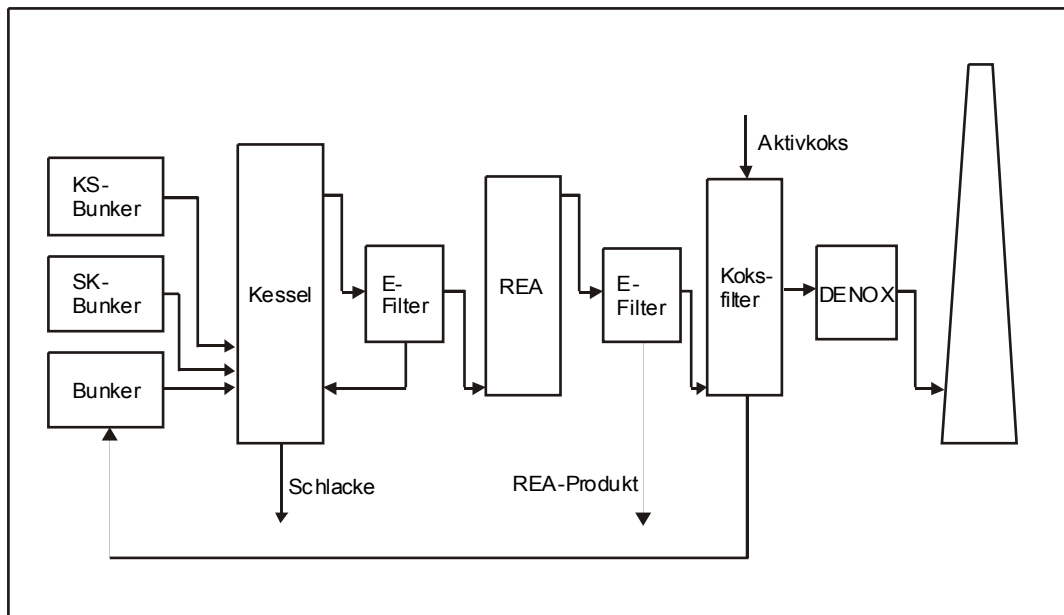


Abbildung 4.3: Konzeption der Klärschlammmitverbrennung KW Lausward

Zur Beurteilung der Auswirkungen der Klärschlamm-Mitverbrennung wurden im Versuchsbetrieb nach HANSMANN et al. (1994) umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Abbildung 4.3 zeigt den prinzipiellen Aufbau des KW Lausward. Der Kessel wird im Versuch mit bis zu 25 % Klärschlamm befeuert; daneben werden noch Stäube aus dem Elektrofilter und Koks aus dem Aktivkoksfilter in den Kessel rückgeführt. Der getrocknete Klärschlamm mit einer Körnung von bis zu 4 mm wird ohne vorherige Mahlung in die als Zykclone ausgebildeten Verbrennungszonen aufgegeben.

Als Ergebnis des Verbrennungsversuches kann festgehalten werden:

- Das Emissionsverhalten des Kraftwerkes ändert sich durch die Mitverbrennung nicht.
- Die mit dem Klärschlamm eingetragenen organischen Verbindungen werden bei Temperaturen > 1300 °C vollständig zerstört.
- Die mit dem Klärschlamm zusätzlich eingetragenen anorganischen Stoffe (Schwermetalle) werden in die glasartige Matrix der Schmelzeschlacke und in den REA-Reststoff eingebunden.

Nach GERHARDT (1998) wird das Kraftwerk für die Verfeuerung von Gas umgestellt, weshalb keine Klärschlämme mehr eingesetzt werden.

#### 4.2.3 KW Heilbronn

Nach ENERGIE SPEKTRUM (1997) & MAIER et al. (1997) wurde für den steinkohlebefeuerten 700-MW Block 7 des Heizkraftwerkes Heilbronn (Energie-Versorgung Schwaben AG) eine Versuchsanlage zur Klärschlamm-Mitverbrennung errichtet (Abbildung 4.4).

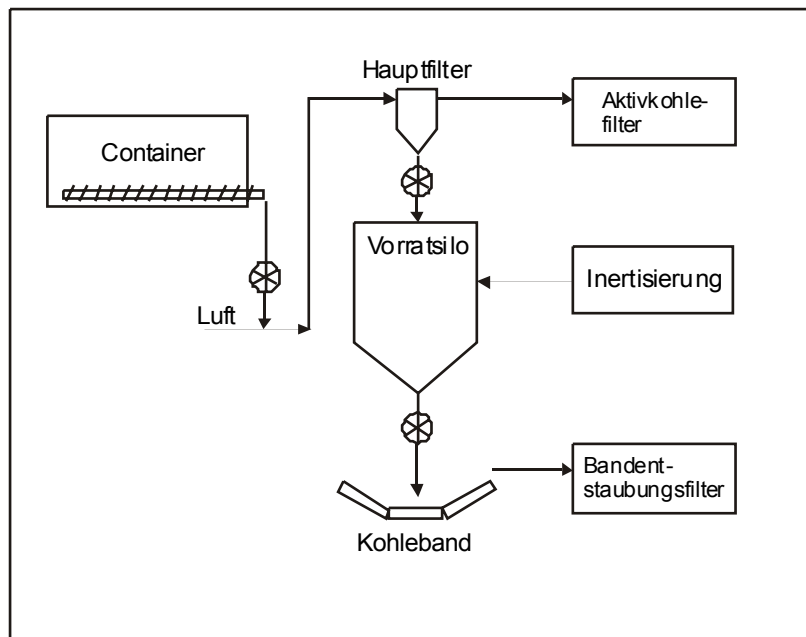


Abbildung 4.4: Klärschlammverbrennungsanlage Heilbronn

Entwässertes und granuliertes Klärschlamm wird in Containern angeliefert und zur Zwischenlagerung pneumatisch in ein Silo befördert, von dem das Granulat auf ein Kohleband dem Hauptbrennstoff zudosiert werden kann. Die Anlage ist so konzipiert, dass eine große Bandbreite des aufgegebenen Materials (hochverdichtete Granulate, stark staubende Pulvern, faserige Produkte) eingesetzt werden kann.

Aufgrund der Selbstentzündungs- und Explosionsgefahr müssen umfangreiche Sicherheitsmaßnahmen getroffen werden:

- Alle Anlagenteile in den explosionsgefährdeten Bereichen sind druckfest ausgeführt.
- Die Füllleitungen und das Silo sind durch Zellenradschleusen voneinander entkoppelt.
- Die entkoppelten Bereiche werden getrennt druck- und temperaturüberwacht.
- Inertisierung der Anlagenteile mit Stickstoff.

Die Anlieferung des Klärschlammes erfolgt in Containern mit eingebauter Trogförderschnecke; der Transport zum Silo wird über pneumatische Saugförderung bewerkstelligt. Die Transportluft wird nach der Klärschlamm-Entladung noch mittels Aktivkohlefilter von Gerüchen befreit.

Die Zudosierung des Klärschlammes zur Kohle erfolgt über eine automatische Steuerung und beträgt zwischen 2 und 4 % [MAIER et al., 1997]. Kritischer Punkt bei der Zudosierung ist die Staubbildung bei der Aufgabe des Granulates auf das Kohleband, weshalb hier eine zusätzliche Filtereinheit eingebaut ist.

Die Ergebnisse dieses Versuchsbetriebes waren positiv; es konnten sämtlich Emissionsgrenzwerte nach der 17. BImSchV eingehalten werden [ENERGIE SPEKTRUM, 1997].

Nach MAIER et al. (1997) wurden bei der versuchsweisen Klärschlamm-Mitverbrennung die in Tabelle 4.10 angeführten Emissionswerte gemessen. Der Vergleich der Emissionswerte mit und ohne Mitverbrennung von Klärschlamm zeigt, dass kein signifikanter Einfluss der Mitverbrennung auf die Schadstoffkonzentrationen im gesamten Abgas erkennbar ist.

Tabelle 4.10: Vergleich der Emissionswerte mit und ohne Klärschlamm-Mitverbrennung (in mg/Nm<sup>3</sup>)

	Genehmigungswerte für reinen Kohlebetrieb	Werte bei reinem Kohlebetrieb	Werte bei Klärschlamm-Mitverbrennung (2 – 4 %)
CO	150	3 - 10	4,7 – 8,5
SO <sub>2</sub>	400	80 - 270	175 – 270
NO <sub>x</sub>	200	150 - 190	170 – 180
Staub	50	5 - 20	4,6 – 6,1
HF	10	1 – 3,4	1,5 – 2,5
org. C	-	1,0	0,3 – 1,3
Cd, Tl	-	< 0,005	< 0,005
Hg	-	0,3 – 12 [µg/Nm <sup>3</sup> ]*	0,1 – 13 [µg/Nm <sup>3</sup> ]*
Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn	-	< 0,075	< 0,075
Dioxine / Furane	-	< 5 [pg/Nm <sup>3</sup> ]	< 5 [pg/Nm <sup>3</sup> ]

\* gemessen als Zwei-Stunden-Mittelwert

Die Reinigung der entstehenden Rauchgase erfolgt beim KW Heilbronn durch Rauchgasentstickung, Elektrofilterung sowie über Nassentschwefelung.

#### 4.2.4 EVT Energie- und Verfahrenstechnik GmbH

Bei den Steinkohlestaubfeuerungen der EVT wird mechanisch entwässertes Klärschlamm zusammen mit der Steinkohle in den Kohlemühlen (Schüsselmühle) getrocknet.

Die Steinkohle wird in die Mühle eingebracht, auf einen Restfeuchtegehalt von 0,5 bis 1 % getrocknet, gemahlen und nach Passieren eines Sichters dem Brenner zugeführt.

Aufgrund des hohen Wasser- und Aschegehaltes liegt der Heizwert des eingesetzten Klärschlammes bei etwa 1 MJ/kg, sodass die eingesetzte Steinkohlenmenge praktisch unverändert bleibt. Im Mittel werden 2 Gew.-%, maximal werden 5 Gew.-% bezogen auf die eingebrachte Kohlemenge mitverbrannt.

Beispielsweise konnten im Kraftwerk Farge (356 MW<sub>el</sub>) bis zu 4,4 Gew.-% TR mitverbrannt werden. Die dabei entstehenden Emissionen für NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, Staub, HCl und HF liegen bei der Mitverbrennung in ähnlichen Bereichen wie bei reinem Kohlebetrieb. Die Reststoffe (Gips, Flugasche, Grobasche) sind auch bei der Mitverbrennung vermarktungsfähig.

Bei Schmelzkammerfeuerungen wird durch die Mitverbrennung von mechanisch entwässertem Klärschlamm die Feuertemperatur abgesenkt. Dies kann neben der Kapazität der Mahltrocknungsanlage die Menge an zugeführtem Klärschlamm limitieren, da der Schmelzfluss der Schlacke weiterhin gewährleistet sein muss.

Bei Braunkohlekraftwerken kann Klärschlamm über die in der Regel verwendete Schlagradmühle aufgegeben werden. Dickstoffpumpen fördern den Klärschlamm zu den Aufgabestellen vor den Schlagradmühlen. Die Braunkohle wird dann zusammen mit dem Klärschlamm über eine Schurre dem Schlagrad der Mühle zugeführt [THOMÉ-KOZMIENSKY, 1998].

#### 4.2.5 KW Buschhaus

Das KW Buschhaus der Braunschweigschen Kohlen- und Bergwerke AG besitzt seit 1998 eine Dauergenehmigung zur Mitverbrennung von max. 5 % thermisch getrocknetem Klärschlamm. Das Braunkohlekraftwerk basiert auf einer Trockenstaubfeuerung [GERHARDT, 1998].

#### 4.2.6 KW Berrenrath

Das Kraftwerk Berrenrath der Rheinbraun AG ist ein braunkohlebefeuertes Kraftwerk ( $275 \text{ MW}_{\text{th}}$ ) basierend auf dem Prinzip der Wirbelschichtfeuerung. Mittels Großversuch konnte die technische Machbarkeit der Klärschlamm-Mitverbrennung (22 bis 34 % TS) nachgewiesen werden. Klärschlamm wird bei der zirkulierenden Wirbelschicht entweder dem umlaufenden Aschestrom zugegeben oder direkt in die Brennkammer eingebracht [THOMÉ-KOZMIENSKY, 1998].

Das KW Berrenrath besitzt seit 1995 eine Dauergenehmigung zur Mitverbrennung von mechanisch entwässertem Klärschlamm entsprechend einer Menge von 65.000 t TS pro Jahr. Im Zuge des Genehmigungsverfahrens wurde zusätzlich die Installation eines Flugstromabsorbers mit Braunkohlekoks vereinbart, um die Grenzwerte für Quecksilber sicher einhalten zu können.

Der Wassergehalt der Braunkohle (55 – 61 %) liegt im Bereich des entwässerten Klärschlammes (65 – 75 %), weshalb die Wirbelschichtfeuerung für den Eintrag größerer Wassermengen ausgelegt ist und eine vorhergehende thermische Trocknung des Klärschlammes entfällt. Die Aufgabe des Klärschlammes erfolgt gemeinsam mit Braunkohle und Kalk (Entschwefelung) in die Rücklaufschächte des Zyklons.

#### 4.2.7 KW Weisweiler

Im braunkohlestaubbefeuerten Kraftwerk Weisweiler ( $2.250 \text{ MW}_{\text{el}}$ ) wurde 1995 von Noell-KRC eine Versuchsanlage zur Mitverbrennung von Klär- und Papierschlamm errichtet.

Der Klärschlamm wird auf 30 % TR vorentwässert, mit LKW angeliefert, von Grobanteilen befreit und in einem Vorratsbunker zwischengelagert. Mittels Schlammumpfen wird der Klärschlamm ins Kesselhaus befördert und auf die Braunkohleförderbänder zudosiert. Die Trocknung und Aufmahlung erfolgt gemeinsam mit der Kohle in den Kohlemühlen durch die rückgesaugten Abgase. Das staubförmige Material wird über Staubbrenner in den Feuerraum des Kessels eingespeist [THOMÉ-KOZMIENSKY, 1998].

#### 4.2.8 KW Weiher II

Die Saarbergwerke AG führt die Mitverbrennung von kommunalen Klärschlämmen im KW Weiher II durch. Die Anlage besteht aus zwei Blöcken mit einer elektrischen Bruttoleistung von je 150 MW, die als Schmelzkammerfeuerungen ausgeführt sind.

Die Kombination von Kraftwerk und Klärschlamm-trocknungsanlage wurde bereits in Kapitel 2.2.2.3 dargestellt. Der Vorteil dieser Variante gegenüber der Klärschlamm-trocknung in der Kohlemühle besteht darin, dass bezüglich des Entsorgungsweges Freiheit besteht. Die Rauchgasreinigung des KW Weiher II besteht aus E-Filterung, Nassentschwefelung sowie einer SCR-Entstickung.

Das KW Weiher II besitzt seit 1996 die Dauergenehmigung zur Mitverbrennung von Klärschlämmen [GERHARDT, 1998].

#### 4.2.9 KW Litvinov (Tschechien)

Chemopetrol (petrochemische Industrie) verfügt über eine werksinterne Kläranlage, in welcher die Produktionsabwässer gereinigt werden. Die Schlämme sollen zukünftig gemeinsam mit den regionalen Klärschlämmen im braunkohlebefeuerten KW Litvinov mitverbrannt werden, weshalb eine Versuchsanlage errichtet wurde.

Die Klärschlämme werden mittels Pumpen von der Kläranlage über Zwischenbehälter in den Voreindicker gepumpt und auf einen TR-Gehalt von 6 % eingedickt; das abgetrennte Filtrat gelangt zurück in die Kläranlage. Die Entwässerung erfolgt mittels Zentrifugen, wodurch ein TR-Gehalt von 25 % erreicht wird. Die Zuführung des Dickschlammes zum Trockner erfolgt über Pumpen. In der Trocknungsanlage kommt es zur Mischung mit den kommunalen Klärschlämmen, wobei das Mischungsverhältnis variabel eingestellt werden kann. Die getrockneten Klärschlämme werden anschließend in einem Bunker gelagert, von dem aus sie über ein Fördersystem (Kratzförderer, Schnecke) in den Verteilerbehälter des Kessels gefördert werden. Von dort kommt es zur Zudosierung des Klärschlammes auf die bestehenden Kohle-Trogkettenförderer [THOMÉ-KOZMIENSKY, 1998].

Die wesentlichsten Verfahrensschritte sind aus Abbildung 4.5 ersichtlich.

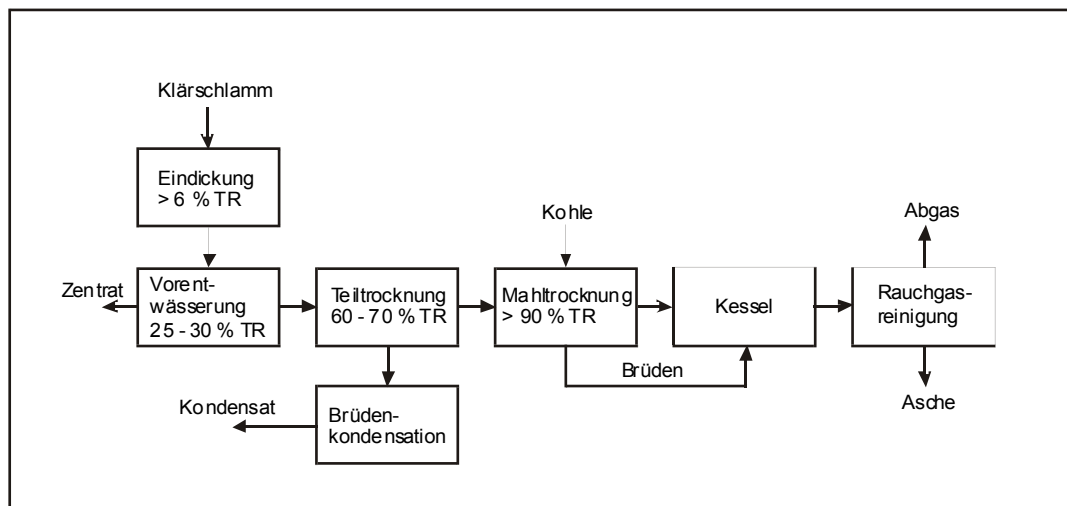


Abbildung 4.5: Klärschlammverbrennung KW Litvinov

#### 4.2.10 KW Lünen

Im KW Lünen wird Steinkohle in einem Wirbelschichtofen verbrannt, wobei als Brennstoff auch eine Mischung aus Klärschlamm und Kohle eingesetzt werden kann.

Der Klärschlamm wird zunächst statisch auf 8 % TR eingedickt und mit Kohle konfektioniert. Das Kohleschlammgemisch hat nach dem Abpressvorgang (Kammerfilterpresse) einen Heizwert von etwa 4.400 kJ/kg. Durch die Zudosierung von Kohle wird der Heizwert erhöht und ein Stützgerüst für die Entwässerung gebildet. Durch Kombination von Kammerfilterpresse und Zentrifuge kann ein Wassergehalt von 55 % erreicht werden.

Der Brennstoff aus Kohle und Schlamm wird mittels Lastkraftwagen zur Verbrennungsanlage befördert und dort mit Wurfbeschickern aufgegeben. Ein Pumpen ist aufgrund des zu niedrigen Wassergehaltes, ein pneumatisches Fördern aufgrund des zu hohen Wassergehaltes nicht möglich [THOMÉ-KOZMIENSKY, 1998].

#### 4.2.11 KW Farge

Das Kraftwerk Farge (Preußen Elektra) basiert auf einer Steinkohlefeuerung mit trockenem Ascheabzug. Die elektrische Bruttoleistung beträgt 356 MW<sub>el</sub> bei einem Kohleverbrauch von 100 t/h.

Beim Kraftwerk Farge wird entwässertes Klärschlamm (25 % TS) über die Kohlemühlen eingebracht. Der Energieinhalt ist entsprechend dem hohen Wassergehalt sehr gering und lässt sich nach GERHARDT (1998) mit 0 bis 1.500 kJ/kg beziffern, weshalb der Leistungsanteil nur bei 0,5 % liegt. Die Abgasmenge und insbesondere der Anteil des Wasserdampfes steigen jedoch.

Das KW Farge besitzt eine Dauergenehmigung zur Klärschlamm-Mitverbrennung, die bisher jedoch noch nicht in Anspruch genommen wurde.

#### 4.2.12 KW Karlsruhe

Das KW Karlsruhe (1.400 MW<sub>th</sub>) der Badenwerke AG ist dem KW Heilbronn (Kapitel 4.2.3) sehr ähnlich. Gestützt auf die positiven Ergebnisse aus Heilbronn haben 1998 Versuche stattgefunden. Geplant ist ein Einsatz von entwässertem Klärschlamm (30 – 35 % TS) im Ausmaß von etwa 10.000 t jährlich [GERHARDT, 1998].

#### 4.2.13 STEAG (KW Voerde)

Die STEAG verfügt nach SCHENKEL & WITTE (1994) über eine installierte Kraftwerksleistung an schmelzkammerbefeuerten Kraftwerksblöcken von rund 2000 MW. In diesen Feuerungen werden jährlich mehr als 5 Mio. t ballastreiche Steinkohle bei Temperaturen von etwa 1500° C verbrannt.

In Versuchen wurde Klärschlamm bis zu einem Feuerungswärmeanteil von 25 % eingesetzt. Durch die hohen Temperaturen werden einerseits organische Schadstoffe nahezu vollständig zerstört, andererseits werden auch die Schwermetalle in die flüssige Schlacke eingebunden. Voraussetzung für den Einsatz von Klärschlamm ist dessen Trocknung auf einen Restfeuchte von ca. 10 %. Für die Versuche im Kraftwerk wurde Klärschlamm eingesetzt, der in Kammerfilterpressen unter Zugabe von Steinkohlestaub entwässert und anschließend in einer direkten Trocknungsanlage auf eine Restfeuchte zwischen 10 und 15 % getrocknet wurde. Der Klärschlamm wird anschließend mit der Kraftwerkskohle gemischt und in Tagesbunker gefördert. Klärschlämme haben im Vergleich zu Kohle einen geringeren Ascheschmelzpunkt, was für das Betriebsverhalten der Feuerung von Vorteil ist. Ein zu hoher Kalkgehalt (resultierend aus der Zugabe von Kalk zur besseren Entwässerbarkeit in den Kläranlagen) setzt den Schmelzpunkt der Asche jedoch so weit herab, dass Anbackungen an den Berührungsoberflächen entstehen können.

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche waren durchwegs positiv. Die im Klärschlamm enthaltenen Schwermetalle werden nahezu vollständig in das Granulat eingebunden, weshalb es bei der Deponierung zu keinen Problemen durch erhöhte Eluatgehalte kommt. Die Zusammensetzung der Suspension aus der Rauchgasentschwebungsanlage wie ebenfalls keine Änderungen auf. Organische Stoffe (PCB, PAH, Dioxine, Furane) werden thermisch zerstört. Die Werte für NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, Cl und F hinter der Rauchgasreinigungsanlage werden bei Einsatz von Klärschlamm nicht wesentlich verändert.



#### 4.2.14 KW Boxberg

Das braunkohlestaubbefeuerte Kraftwerk Boxberg besteht aus zwei Kraftwerksblöcken mit je 500 MW. Zur Ermittlung des Einflusses der Klärschlamm-Mitverbrennung auf den Kraftwerksbetrieb sowie auf die Qualität der Reststoffe wurde in den Jahren 1996 bis 1997 ein großtechnischer Versuch an einem Kessel durchgeführt. Dazu wurde eine Versuchsanlage (Tabelle 4.11) errichtet, mit der es möglich war, eine für den Dauerbetrieb vorgesehene Menge von 16 t/h in den Dampfkessel einzubringen.

Tabelle 4.11: Auslegungsdaten für die Versuchsanlage

Klärschlammkonsistenz	25 bis 40 % TS
maximale Fremdkörpergröße	100 mm
Klärschlammfördermenge	10 bis 16 t/h
Klärschlammbeitrag	Mühlen oder Schlammlanzen
Zerstäuberdampfmenge	2,4 t/t Klärschlamm
max. Förderdruck	80 bar
Gleitmittelmenge	3 x 100 l/h

Im Rahmen des Großversuches wurden 10.000 t mechanisch entwässertes kommunales Klärschlamm verbrannt, wobei folgende Ergebnisse festgestellt wurden:

- Die Mühlensysteme reagieren in ihren Temperaturverläufen empfindlich auf Störungen in der kontinuierlichen Klärschlammbeschickung.
- Die Klärschlammwanzen sind empfindlich gegenüber Fremdkörpern, weshalb der Einbindung des Klärschlammes über die Mühlen der Vorzug zu geben ist.
- Die Emissionen für SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, HCl und HF liegen im Bereich der Schwankungsbreite der reinen Kohlefeuerung.
- Organische Schadstoffe im Klärschlamm werden gut abgebaut.
- Die Klärschlamm-Mitverbrennung verursacht keine Veränderungen der Staubabscheidung. Hinsichtlich der Reingasemissionen der Schwermetalle Cadmium und Thallium gibt es gegenüber der reinen Kohlefeuerung keine Unterschiede.
- Die eingetragenen Schwermetalle werden weitestgehend in der Filterasche und im REA-Wasser wiedergefunden.

Auf der Grundlage dieser Versuchsergebnisse wurde 1998 mit dem Umbau auf Dauerbetrieb begonnen. Die Anlage zur Klärschlamm-Mitverbrennung im Kraftwerk Boxberg wurde zweistrassig zu je einem 500 MW-Kessel ausgeführt und ist für eine jährliche Durchsatzleistung von 80.000 bis 130.000 Tonnen konzipiert. Zur Zwischenlagerung des Klärschlammes dient ein Tagessilo mit einer Kapazität von 300 m<sup>3</sup>; die Annahmehäuser besitzen ein Volumen von 80 m<sup>3</sup> und sind mit Dickstoffpumpen ausgerüstet. Die Pumpen ermöglichen bei erhöhter Anlieferungsmenge ein kurzfristiges Entleeren der Annahmebehälter in den Tagesbehälter bzw. ein direktes Fördern in den Kessel.

Nach WIERICK et al. zeigt der Dauerbetrieb der Klärschlamm-Mitverbrennung im Kraftwerk Boxberg keine negativen Einflüsse auf den Kesselbetrieb; die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte konnten eingehalten werden. Probleme bereiten lediglich Fremdkörper (Holz, Metalle, ...) weshalb mit zusätzlichen Kosten in der Größenordnung von etwa 14 ATS (etwa 1 €) je Tonne verbranntem Klärschlamm zu rechnen ist.

#### **4.2.15 KW Hochfeld**

Nach GERHARDT (1998) wird im steinkohlebefeuerten Heizkraftwerk Hochfeld II der Stadtwerke Duisburg AG Klärschlamm mittels Zerstäuberlanzen in den Feuerraum der Schmelzkammerfeuerung eingebracht. Der Klärschlamm wird ohne weitere Vorbehandlung mit einem TS-Gehalt von 20 bis 35 % von der Kläranlage übernommen. Das KW Hochfeld besitzt seit 1998 eine Genehmigung für den Dauerbetrieb der Mitverbrennung.

#### **4.2.16 KW Walheim**

Das KW Walheim der Neckarwerke Stuttgart AG führt seit 1996 Versuche zur Mitverbrennung von thermisch getrockneten Klärschlämmen in einem Schmelzkammerkessel durch. Nach Angaben des Betreibers zeigten die Versuche, dass ein Dauerbetrieb möglich ist [GERHARDT, 1998].

### 4.3 Analyse der Entsorgungswege von kommunalem Klärschlamm im Raum Baden-Württemberg [Rentz, 1999]

In einer deutschen Studie wurden die möglichen Entsorgungswege von kommunalem Klärschlamm im Raum Baden-Württemberg analysiert. Das Aufkommen an kommunalem Klärschlamm in diesem Bundesland ist vergleichbar mit dem Gesamtanfall von Klärschlamm in Österreich. Als Basis dienten drei Grundscenarien:

1. Die bisherige Entsorgung durch Deponierung entfällt. Die freigesetzten Mengen müssen alternativen Entsorgungskapazitäten zugeführt werden.
2. Neben der Entsorgung durch Deponierung entfällt auch die Verbringung in andere Bundesländer und ins Ausland.
3. Zusätzlich zu oben genannten Punkten entfällt auch die Aufbringung auf landwirtschaftlich genutzte Flächen einschließlich der Kompostierung und der landbaulichen Verwertung.

Als potentielle Entsorgungswege wurden die Monoverbrennung, die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken, die Mitverbrennung in Zementwerken, die Mitbehandlung in thermischen Abfallbehandlungsanlagen, die Mitbehandlung in sonstigen Anlagen (Ziegeleien, Asphaltmischwerken, Verbrennungsanlagen der Papierindustrie), sowie die Behandlung durch Ent- und Vergasungsverfahren und durch Nassoxidation betrachtet.

In den Szenarien sind der Kosten- und Energieaufwand für die Trocknung, den Transport und die Behandlung der Klärschlämme und auch die Emissionen ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , Hg, Pb, Cd) berücksichtigt.

Es wurde angenommen, dass die bestehenden Verwertungs-/Entsorgungswege für die Abfälle bzw. Reststoffe aus Kohlekraftwerken auch bei der Mitverbrennung von Klärschlamm unverändert bestehen bleiben.

Die Analyse ergab, dass durch die verstärkte Nutzung der Klärschlammmitbehandlung insbesondere bei großen Klärschlammengen die Systemkosten gegenüber der Nutzung der Monoverbrennung gesenkt werden können. Die eingesetzten Monoverbrennungsverfahren führen jedoch zu vergleichsweise geringeren Quecksilberemissionen.

Besonders kosteneffizient ist die Ausweitung der Mitverbrennung von getrocknetem Klärschlamm in Kraftwerken und Zementwerken. Dem steht auch der hierfür erforderliche Zubau einer größeren Anzahl von Trocknungsanlagen und größere Transportentfernungen nicht entgegen.

Bei allen berechneten Entsorgungsstrukturen wird eine Primärenergieeinsparung und eine Minderung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen erzielt. Die Potentiale sind vergleichsweise gering, sie könnten jedoch durch den Einsatz der Solartrocknung gesteigert werden.

## 5 POTENTIAL DER KRAFTWERKE DES VERBUND

Der Verbund unternahm Mitte 2000 eine Abschätzung der möglichen Potentiale zur Mitverbrennung von Klärschlamm bei den Standorten Dürnrohr, St. Andrä, Voitsberg und Zeltweg (siehe Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Kohlebefeuerte Kraftwerke des Verbund

	Dürnrohr	St. Andrä 2	Voitsberg 3	Zeltweg
Leistung [MW <sub>el</sub> ]	405	124	330	137
Brennstoffwärmel- leistung [MW <sub>th</sub> ]	924	284	792	344
Feuerungsart	Staubfeuerung	Staubfeuerung	Staubfeuerung	Staubfeuerung
Hauptbrennstoff	Steinkohle	Steinkohle	Braunkohle	Steinkohle
Brennstoffverbrauch (Durchschnitt) [t/h]	133	37	283	49
Heizwert H <sub>v</sub> [KJ/kg]	24 - 28	ca. 28	ca. 10	26 – 28

Das Mitverbrennungspotential ist nur sehr schwer abzuschätzen und wird von einer großen Anzahl an Parametern beeinflusst:

- Kraftwerkstechnik und erforderliche Adaptionen.
- Spezifikation des Klärschlammes.
- Art des Hauptbrennstoffes.
- Verfügbarkeit des Klärschlammes.
- Einfluss auf Kraftwerksreststoffe.
- Rechtliche Rahmenbedingungen.
- Öffentliche Meinung und politischer Wille.

Aufgrund der unterschiedlichen Anlagenauslastung kommt es zu beträchtlichen jährlichen Schwankungen des Kohleverbrauches. Im mehrjährigen Durchschnitt werden etwa 1.250.000 Tonnen Kohle verfeuert (Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Brennstoffverbrauch [t/a] der kohlebefeierten Kraftwerke des Verbund [VERBUNDGESELLSCHAFT, 1997]

	1995	1996	1997	1998	1999	Durchschnitt
Steinkohle	240.015	390.266	300.705	125.077	195.564	250.325
Braunkohle	1.085.464	898.026	981.155	671.999	1.330.429	993.415
Kohle gesamt	1.327.474	1.290.288	1.283.857	799.074	1.527.992	<b>1.243.740</b>

Tabelle 5.3 zeigt das mögliche Massenpotential der thermischen Behandlung von Klärschlamm in den Kraftwerken des Verbund in Abhängigkeit vom Substitutionsgrad. Basis ist ein durchschnittlicher Kohleverbrauch von 1.250.000 Tonnen pro Jahr.

Tabelle 5.3: Abschätzung des Mitverbrennungspotentials der Kraftwerke des Verbund

Substitutionsgrad [%]	Masse Klärschlamm [t/a]
1	12.500
2	25.000
3	37.500
4	50.000
5	62.500

Neben den Kraftwerken des Verbund bieten sich in Österreich weitere Kraftwerke (z.B. KW Mellach, KW Riedersbach, KW Timelkam) zur Mitverbrennung von Klärschlamm an, weshalb das theoretische Verbrennungspotenzial höher als in Tabelle 5.3 dargestellt ist. Zum Beispiel wird im Fernheizwerk Mellach ein möglicher Einsatz von Klärschlamm geprüft.

Eine Alternative zur Mitverbrennung von Klärschlamm in bestehenden Kohlekraftwerken wäre die gänzliche Umrüstung eines Kraftwerkes in eine Klärschlamm- oder Abfallverbrennungsanlage. Dazu würde dem Kohlekessel ein Wirbelschichtkessel zur Vergasung oder Verbrennung der Abfälle vorgeschaltet werden und die Rauchgasreinigungseinrichtungen umgebaut werden, um die Grenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen sicher einhalten zu können.

Die Trocknung der Klärschlämme könnte mit der Abwärme des Kohlekessels erfolgen. Neben Einrichtungen zur sicheren Lagerung und Förderung des Klärschlammes wären auch zusätzliche Einrichtungen zum Messen und Aufzeichnen der Emissionen erforderlich.

Das Abwasser aus der Trocknung und der Rauchgasreinigung müsste einer Abwasserbehandlungsanlage zugeführt werden.

Bei Ausfall der Kessel muss die Entsorgungssicherheit weiterhin garantiert sein, d.h. es müssten in erreichbarer Nähe zum Kraftwerksstandort kurzfristig andere Entsorgungswegen verfügbar gemacht werden können.

Welche Optionen tatsächlich realisiert werden, hängt von der prinzipiellen Entscheidung ab, ob der Weg der Entsorgung oder der Verwertung von Abfällen beschritten wird.

## 6 GLOSSAR

### **Aschegehalt**

Anteil des beim Verbrennen des Brennstoffes verbleibender Glührückstand.

### **Brennwert $H_b$**

Verbrennungswärme, die bei vollständiger Verbrennung von 1 kg Brennstoff freigesetzt wird.

### **Brüden**

Abgas, welches bei der Trocknung von Klärschlamm entweicht und welches leicht flüchtige, meist organische Inhaltsstoffe aus dem Schlamm enthält.

### **Geruchseinheit**

Jene Konzentration eines Geruchsstoffes bei der die Geruchsschwelle erreicht wird.

### **Heizwert $H_i$**

Wärmemenge, die bei vollständiger Verbrennung von 1 kg Brennstoff unter konstantem Druck freigesetzt wird, unter Abzug der Verdampfungswärme des im Brennstoff vorhandenen und bei der Verbrennung gebildeten Wasser vom Brennwert  $H_b$ .

### **Schmelzkammerfeuerung**

Kohlestaubfeuerung, bei der die Feuerraumtemperatur über dem Schmelzpunkt der Asche liegt. Dadurch kann die flüssige Asche als Schlacke am Kesselboden abgezogen werden.

### **Trockenfeuerung**

Kohlestaubfeuerung, bei der die Feuerraumtemperatur über der Schmelztemperatur der Asche liegt. Die Asche fällt im Kessel als Grobasche, zum überwiegenden Teil aber als Flugasche, die mittels Elektro- bzw. Gewebefiltern aus dem Rauchgas abgeschieden wird, an.

### **Trockenrückstand TR oder Trockensubstanz TS**

Beschreibt den Massenanteil der festen Substanz im Schlamm. TR berechnet sich aus der Masse des Feststoffes zur Gesamtmasse des Schlammes.

### **Wassergehalt**

Beschreibt das Verhältnis der Masse des Wassers zur Gesamtmasse des Schlammes. Der Wassergehalt steigt mit kleiner werdenden Feststoffteilchen und zunehmendem Anteil an organischer Trockensubstanz.

**Wirbelschichtfeuerung**

Bei der Verfeuerung von Kohle in der Wirbelschicht, wird feinkörniges, nicht brennbares Material durch Luftdüsen aufgewirbelt (Wirbelschicht). In dieses Wirbelbett wird feinkörnige Kohle eingeblasen und bei Temperaturen zwischen 800 und 900 °C verbrannt. Mit dem Rauchgas mitgerissenen Feststoffteilchen werden entweder abgeschieden oder wieder in die Wirbelschicht rückgeführt (zirkulierende Wirbelschicht).

**Selbstentzündung**

Vorgang, bei dem es unter allseitiger Wärmeeinwirkung und Anwesenheit von Luft zu einer selbstständigen Entzündung einer Staubschüttung kommt.

**Staubexplosionsfähigkeit**

Stäube sind explosionsfähig, wenn in einem Staub/Luft-Gemisch nach der Zündung Flammenausbreitung auftritt.

**Sauerstoffgrenzkonzentration**

Konzentration an Sauerstoff unter welcher in einem Staub/Luft/Inertgas-Gemisch keine Staubexplosion mehr möglich ist.

**Zündtemperatur**

Beschreibt die Entzündbarkeit von aufgewirbeltem Staub durch heiße Flächen.

## 7 LITERATUR

- ABT K.O. & HANSMANN G. (1995): Der Beitrag von Kraftwerksanlagen zur Lösung von Entsorgungsproblemen. In: VGB Kraftwerkstechnik 75; Heft 2: 141 – 144.
- AUSTROPAPIER (2000): Fragebogen zu „Management of By-products/Residues containing Heavy Metals and POP’s from Pulp and Paper Production“
- BALLSCHMITTER K. & BACHER R. (1996): Dioxine. ISBN 3-527-28768-X, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim.
- BEVER J. (1994): Perspektiven der Klärschlamm Entsorgung. ISBN 3-486-26358-7; R. Oldenbourg Verlag GmbH, München.
- BIERBAUM K. & GREIF H.G. (1996): Mitverbrennung von Produktionsrückständen und Klärschlämmen in Braunkohlekesselanlagen. In: Brennstoff Wärme Kraft; Nr. 10 Spezial: 18 – 26.
- BORN M. (1999): Mitverbrennung von Abfällen in Energieerzeugungs- und Feuerungsanlagen – Thermodynamische Berechnungen. In: Seminar der VDI-Bildungswerk GmbH vom 06 – 07.05.99 in München: Abfallwirtschaft im Umbruch – Verwertung / Mitverbrennung / Sekundärbrennstoffe.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2001): Bundesabfallwirtschaftsplan 2001.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (1999): Gewässerschutzbericht 1999
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT (1995): Systemanalyse und Stoffbilanz eines kalorischen Kraftwerkes – SYSTOK. Monographie, Band 67, Wien.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, JUGEND UND FAMILIE (1997): Zur Situation der Verwertung und Entsorgung des kommunalen Klärschlammes in Österreich. Monographie, Band 95, Wien.
- DRESCHER D. & MARTIN C. (1994): Betriebserfahrungen an der Klärschlamm trocknungsanlage Weiher. In: Wasser Abwasser Abfall; Schriftenreihe der Fachgebiete Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik; Universität Kassel; Band 13.
- DÜLMER M. & SCHMITT-RIEGRAP C. (1998): Emissionsverhalten der Kraftwerksrückstände bei der Klärschlamm-Mitverbrennung. In: <http://mindepos.bg.tu-berlin.de>.
- BAUMELER A.; BRUNNER P.H.; FEHRINGER R., KISLIKOVA A.; SCHACHERMEYER E. (1998): Reduktion von Treibhausgasen durch Optimierung der Abfallwirtschaft (CH<sub>4</sub>); Schriftenreihe der Energieforschungsgemeinschaft im Verband der E-Werke Österreichs, Nr. 650/457
- ENERGIE SPEKTRUM (1997): Sinnvolle Beigabe – Mitverbrennung von Klärschlamm im HKW Heilbronn erfolgreich erprobt. Energie Spektrum 5: 22-24.
- GERHARDT T. (1998): Thermische Behandlung von kommunalen Klärschlämmen in Kohlestaubfeuerungen. VGB – Technisch-wissenschaftliche Berichte „Feuerungen“, ISBN 0937-0188.
- GERHARDT T.; REBMANN M.; SPLIETHOFF H. & HEIN K.R.G (1996): Untersuchungen zur Mitverbrennung von kommunalen Klärschlämmen in Kohlenstaubfeuerungen. In VGB Kraftwerkstechnik 76, Heft 5: 403-413.
- GREIL C. & HIRSCHFELDER H. (1999): Brenngas aus Reststoffen. In: EntsorgungsPraxis 4: 28 – 30.
- HACKL A., MAUSCHITZ G. (2001): Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie III. Jahresreihe 1997 – 1999. Zement + Beton Handel und Werbeges. m.b.H. Wien (2001)
- HANSMANN G.; MITTMANN H.; LINDERT M. & GÖRTZ W. (1994): Mitverbrennung von Klärschlamm im Kraftwerk – Stand der Mitverbrennung im Kraftwerk Lausward der Stadtwerke Düsseldorf AG. In: Brennstoff Wärme Kraft 46, Heft 10: V8-V16.



- HOCQUEL M., SPLIETHOFF H. & HEIN K.R.G. (1999): Verhalten von Quecksilberemissionen bei der Mitverbrennung von Klärschlämmen in Kohlestaubfeuerungen unter besonderer Berücksichtigung des gasförmigen Anteils. In: <http://www.bwplus.fzk.de>.
- JOHÄNNTGEN U. (1992): Klärschlamm trocknen und verwerten – Das gemeinsame Verbrennen mit Kohle wird untersucht. In: ENERGIE; Jahrgang 44, Nr. 7: 46-49.
- KERN (2001): Persönliche Mitteilung (Fa. ACAT)
- KRAUSE H.: High Temperature Corrosion Problems in Waste Incineration Systems. Batelle Memorial Institute, Columbus Laboratories, Ohio, USA.
- KREBS G. (1994): Trocknung mit thermischer Nutzung von Klärschlamm. In: Wasser Abwasser Abfall; Schriftenreihe der Fachgebiete Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik; Universität Kassel; Band 13.
- KRONE C.; KOCH J.; LEIDEL H. & SCHEEL W. (1992): Aufbereitung von Klärschlämmen zur thermischen Entsorgung in Braunkohlenkraftwerken. In: Brennstoff Wärme Kraft, Bd. 44, Nr. 10: 454-456.
- LAGA – Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (1997): Maßstäbe und Kriterien für die energetische Verwertung von Abfällen in Zementwerken. Entwurf 31.10.1997
- LUBOSCHIK U. (1995): Solare Klärschlamm-trocknung. In: Wasser, Energie, Luft – eau, energie, air; 87. Jahrgang, Heft 9: 190-191.
- MAIER H. (1989): Emissionen rauchgasflüchtiger und filtergängiger Schwemetalle aus braunkohle-befeuerten Anlagen. Chemie im Kraftwerk 52-58
- MAIER H., SCHÖNGRUNDNER W. & MUCH K. (1989): Das Verhältnis von Schwermetallen in einer Braunkohlefeuerung. In: VGB Kraftwerkstechnik 69, Heft 8: 824 – 828.
- MAIER H.; TRIEBEL W.; BUCK P. & WALDHAUDER H. (1997): Auswirkungen der versuchsweisen Mitverbrennung von thermisch getrocknetem Klärschlamm in einem Steinkohlekraftwerk. In: VGB-Fachtagung „Feuerungen 1997“; Essen.
- MEYER B. (1998): Prozessabläufe und ökologische Bewertung der thermischen Klärschlammbe-handlung. In: Vorträge des deutsch-tschechischen Fachsymposiums Klärschlamm-entsorgung unter besonderer Berücksichtigung der Mitverbrennung – Methoden, Perspektiven und Pilot-projekte; Freiberg.
- MEYER W. (1997): Emissionsfaktoren bei der energetischen Nutzung von Abfällen. In: VGB Kraftwerkstechnik 77, Heft 11: 936-939.
- MEYER W. (1998): Technologische Lösungen der thermischen Klärschlammbehandlung. In: Vorträge des deutsch-tschechischen Fachsymposiums Klärschlamm-entsorgung unter besonderer Berücksichtigung der Mitverbrennung – Methoden, Perspektiven und Pilotprojekte; Freiberg.
- RAGOSSNIG A., NELLES M., TESCH H., LORBER K.E., GRECH H. (1999): Mitverbrennung heizwertreicher Abfallfraktionen in industriellen Feuerungsanlagen. Montanuniversität Leoben: Institut für Entsorgungs- und Deponietechnik
- RENTZ O.; SASSE H.; KARL U. (1999): Analyse der künftigen Entsorgung kommunaler Klärschläm-me in Baden-Württemberg durch Mitverbrennung; Forschungsbericht Projekt Wasser-Abfall-Boden
- RÖMER R. (1991): Thermische Klärschlammbehandlung – Verbrennung, Trocknung, Energiegewin-nung, Emission. In: Klärschlamm-entsorgung I; Hrsg. VDI-Bildungswerk GmbH.; ISBN 3-18-401023-6.
- SCHENKEL W. & WITTE H. (1994): Klärschlamm-entsorgung, Status – Lösungen – Tendenzen. Hrsg.: Technische Akademie Esslingen; expert verlag; ISBN 3-8169-0885-3.
- SCHEURER W. & RICHERS U. (2000): Stand der thermischen Nutzung von Sekundärbrennstoffen in Kraftwerken. In: EntsorgungsPraxis; 1: 27 – 34.

- SCHIRMER U. (2000): Aktuelle Situation der Mitverbrennung von Abfallstoffen in Kraftwerken. In: Bio- und Restabfallbehandlung IV, biologisch – mechanisch – thermisch; Wiemer K. & Kern M. (Hrsg.), Witzenhausen, ISBN 3-928673-31-9: 446 – 479.
- SCHLESSING J. (1995): Weiterentwicklung von Schüsselmühlen. In: VGB Kraftwerkstechnik 75, Heft 10: 873 – 879.
- SCHOLL E.W. (1989): Brenn- und Explosionsverhalten von Kohlestaub. In: Bekohlung und Entaschung 1989; Vorträge zur VGB-Konferenz, 13./14. Dezember 1989.
- SEITL P. (2001): Persönliche Mitteilung
- SPLIETHOFF H. & HEIN K. (Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen – Universität Stuttgart) (1997): Mitverbrennung von Holz, Stroh, Kunststoff, Klärschlamm und Teeröl in Kohlenstaubfeuerungen. In: VGB-Fachtagung „Feuerungen 1997“; Essen.
- STEIRER, K. (1999): Klärschlamm-Mitverbrennung in Kohlekraftwerken. In: Seminar der VDI-Bildungswerk GmbH vom 06. – 07.05.1999 in München: Abfallwirtschaft im Umbruch – Verwertung/Mitverbrennung/Sekundärbrennstoffe.
- TAUSCHITZ J.; MORY A. & MORITZ G. (1999): BioCoComb: Errichtung und Betrieb einer Biomassevergasungsanlage im Dampfkraftwerk Zeltweg. Schriftenreihe der Forschung im Verbund; Wien.
- THIEMANN H. (1992): Klärschlammmentwässerung in einer zweiten Stufe zur optimierten Klärschlamm-trocknung. Sonderdruck aus: Entsorgungs Praxis 1-2.
- THOMÉ-KOZMIENSKY K.J. (1998): Klärschlamm Entsorgung. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky; Neuruppin.
- UMWELTBUNDESAMT (1995): Analytische Untersuchung von Klärschlamm – Analysenbericht. Bericht 046
- UMWELTBUNDESAMT (2001): Stand der Abfallbehandlung in Österreich im Hinblick auf das Jahr 2004, Bericht 182
- URBAN A. & FRIEDEL M. (1994): Anforderungen an die Trocknung hinsichtlich einer thermischen Verwertung. In: Wasser Abwasser Abfall; Schriftenreihe der Fachgebiete Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik; Universität Kassel; Band 13.
- VERBUNDGESELLSCHAFT, TU-WIEN, UMWELTBUNDESAMT (1995): Systemanalyse und Stoffbilanz eines kalorischen Kraftwerkes; Monographien, Band 67; Wien.
- VERBUNDGESELLSCHAFT (1996): Umweltbericht.
- VERBUNDGESELLSCHAFT (1997): Umweltbericht.
- VERBUNDGESELLSCHAFT (1998): Umweltbericht.
- VERBUNDGESELLSCHAFT (2000): Unveröffentlicht
- VERBUND-UMWELTTECHNIK (2001): Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen. Schriftenreihe der Forschung im Verbund. Band 73
- VGB-KRAFTWERKSTECHNIK (1995): Lehrhefte für die Ausbildung zum Kraftwerker – Feuerungen und Dampferzeuger. Heft 7, Zweite Auflage, Essen.
- WIEBUSCH B., SEYFRIED C.F., JOHNKE B., CREDO S. (1997): Stand der Mono-Klärschlammverbrennung in Deutschland. Korrespondenz Abwasser, 44, 3, 473-492
- WIERICK H.G., BRUNNE T., MIELKE F., RICHTER S., HEINZE D.: Erfahrungen bei der Mitverbrennung von Klärschlämmen im VEAG-Braunkohlekraftwerk Boxberg.
- WITTE H. (1994): Schlamm-trocknung als Behandlungsschritt der Schlammbehandlung. In: Wasser Abwasser Abfall; Schriftenreihe der Fachgebiete Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik; Universität Kassel; Band 13.
- ZETTL C. (2000): Vereinigung der österreichischen Papierindustrie: Persönliche Mitteilung