Darstellung der Verbrennungsverfahren *(Teil I)*:

Die Auto-Shredderleichtfraktion als Abfallbrennstoff *

Bernhard Vosteen und **Rainer Martin,** BAYER AG, Leverkusen
Jürgen Vehlow, Kernforschungszentrum Karlsruhe

Zusammenfassung (Teil I)

Die Auto-Shredderleichtfraktion (Shf) ist ein spezifizierbarer Abfall. Dies ist aufgrund seiner Herkunft zu erwarten, muß aber - angesichts einer enormen "Streubreite" bisher veröffentlichter Shf-Daten - erst noch nachgewiesen werden:

Maßgebende Eigenschaften der Shf als Abfallbrennstoff (aber nicht alle) werden untersucht und ihre Abhängigkeit vom Inerststoff-/Asche-Gehalt dargestellt. Auf diesem Wege gewinnt man Einblick in die doch vorhandene enge Korrelation der Shf-Daten und ihren Bezug zu anderen Abfällen bzw. Regelbrennstoffen. Der Überblick über die Shf-Daten wird wesentlich verbessert.

Auf die Verknüpfungen zwischen den Shf-Eigenschaften, der Shf-Verbrennung und ihrer zugehörigen Rauchgasreinigung wird hingewiesen.

1. Einführung

Gesamtkonzept und Feuerung einer modernen Abfallverbrennungsanlage sollte man auf die besonderen Eigenschaften eines Abfalls zuschneiden, wenn dies möglich und vom Mengenaufkommen her sinnvoll ist. Sonderabfälle verschiedenartiger Konsistenz und "Stückgröße", unterschiedlichster stofflicher und chemischer Zusammensetzung mit wechselnden Schadstoffgehalten erfordern zu ihrer Verbrennung - vom Eintragssystem bis hin zur Rauchgasreinigung vor dem Kamin - einen höheren Gesamtaufwand als spezielle genauer spezifizierbare Industrieabfälle.

*) Vortrag im Rahmen der VDI-Tagung **"Thermische Behandlung von Konsumgüterreststoffen am Beispiel der Altfahrzeugverwertung"** am 13. /14. Mai 1992 in Mannheim.

Analyse der Auto-Shredderleichtfraktion /1/

Analysen in 1991 ausgeführt durch GfA, Münster, unter Zuarbeit von Fa. L. & C. Steinmüller (brennstofftechnisches Labor), Gummersbach

"Immediatanalyse"		
Gesamtfeuchte (Laborzustand)	Gew.-% i.roh.	15,5
Brennwert Ho	MJ/kg i. roh.	12,8
Brennwert Ho (waf.)	MJ/kg waf.	28,5
Heizwert Hu	MJ/kg i. roh.	12,8
Heizwert Hu (waf.)	MJ/kg waf.	26,8
Brennbare Substanz	Gew.-% wf.	50,2
Asche	Gew.-% wf.	46,7 *
Flüchtige Bestandteile	Gew.-% wf.	47,1
Corg. (TOC)	Gew.-% i. roh.	32,3
Carbonat-CO2	Gew.-% wf.	3,1
Nicht-Metalle:		
C ges. Kohlenstoff	Gew.-% wf.	31,3
H Wasserstoff	Gew.-% wf.	4
S Gesamtschwefel	Gew.-% wf.	0,71
Ascheschwefel (S anorg. z. B. als Sulfat)	Gew.-% wf.	0,62
verbrennlicher Schwefel (S org.)	Gew.-% wf.	0,09
N Stickstoff	Gew.-% wf.	0,99
P Phosphor	Gew.-% wf.	0,05
Si Silicium	Gew.-% wf.	4,9
Halogene:		
Cl ges.	Gew.-% wf.	2,1
F ges.	Gew.-% wf.	0,09
Br ges.	Gew.-% wf.	< 0,01
Alkali-Metalle:		
Na Natriun	Gew.-% wf.	0,63
K Kalium	Gew.-% wf.	0,14
Erdalkali-Metalle:		
Ca Calcium	Gew.-% wf.	2,4
Mg Magnesium	Gew.-% wf.	0,48
Ba Barium	Gew.-% wf.	0,46
Metalle:		
Al Aluminium	Gew.-% wf.	0,73
Fe Eisen	Gew.-% wf.	7,8
Ti Titan	Gew.-% wf.	0,47

Spurenlemente :		
Be Berillium	mg/kg wf.	< 5
Cd Cadmium,	mg/kg wf.	85
Cr ges. Chrom	mg/kg wf.	240
Co Kobalt	mg/kg wf.	13
Cu Kupfer	mg/kg wf.	3700
Hg Quecksilber	mg/kg wf.	1
Mn Mangan	mg/kg wf.	480
Mo Molybdän	mg/kg wf.	< 50
Ni Nickel	mg/kg wf.	1100
Pb Blei	mg/kg wf.	2400
Pd Palladium	mg/kg wf.	< 10
Pt Platin	mg/kg wf.	< 1
Rh Rhodium	mg/kg wf.	< 10
Sb Antimon	mg/kg wf.	3200
Se Selen	mg/kg wf.	< 10
Sn Zinn	mg/kg wf.	130
Te Tellur	mg/kg wf.	< 10
Tl Thallium	mg/kg wf.	< 5
V Vanadium	mg/kg wf.	13
Zn Zink	mg/kg wf.	4600
Organische Schadstoffe:		
PCDD/F (TE n. NATO/CCMS incl. NWG)	ng TE /g wf.	0,084
PCB (Summe 6 PCB x 5 , gem. LAGA)	mg/kg wf.	4,015
PCBz	mg/kg wf.	0,018
PCPh (Summe 8 PCPh)	mg/kg wf.	0,995
PAK (Summe 21 PAK)	mg/kg wf.	16,69
Ascheschmelzverhalten oxidativ (Luft):		
Erweichungstemperatur	°C	1180
Schmelztemperatur	°C	1210
Fließtemperatur	°C	1350
Ascheschmelzverhalten reduktiv (CO/CO2 = 2: 1):		
Erweichungstemperatur	°C	1070
Schmelztemperatur	°C	1120
Fließtemperatur	°C	1250

* Hinweis: 6,3 Gew.-% i. roh. an magnetisierbaren Metallen vor brennstofftechnischer Analyse abgetrennt

Shf-Analysendaten

(Shf-Gesamtfraktion nach Reifen-Vordemontage, vgl. /1/))

Tabelle 1

Im Schrifttum und beim Vergleich von Einzelanalysen verschiedener Shf findet man eine zunächst verwirrende "Streubreite" und scheinbare Vielfalt von Shf-Daten bezüglich Brenn- und Heizwerten , Aschegehalten sowie anorganischen und organischen Schadstoff-Gehalten usw. Dennoch ist die Shf ein definierter Abfall. Dies soll im folgenden gezeigt werden.

Tabelle 1 zeigt die umfangreiche Einzelanalyse einer Shf. Die Analysen wurden kürzlich im Rahmen eines Schwel-Brenn-Versuchs mit einer *Shf ohne Altreifenanteil* ermittelt, vgl. Martin, Rieß, Vosteen /1/.

Wir gehen bei der Darstellung von Shf-Eigenschaften als Abfallbrennstoff in der mit Tabelle 1 vorgegebenen Reihenfolge vor.

2. Physikalische Struktur

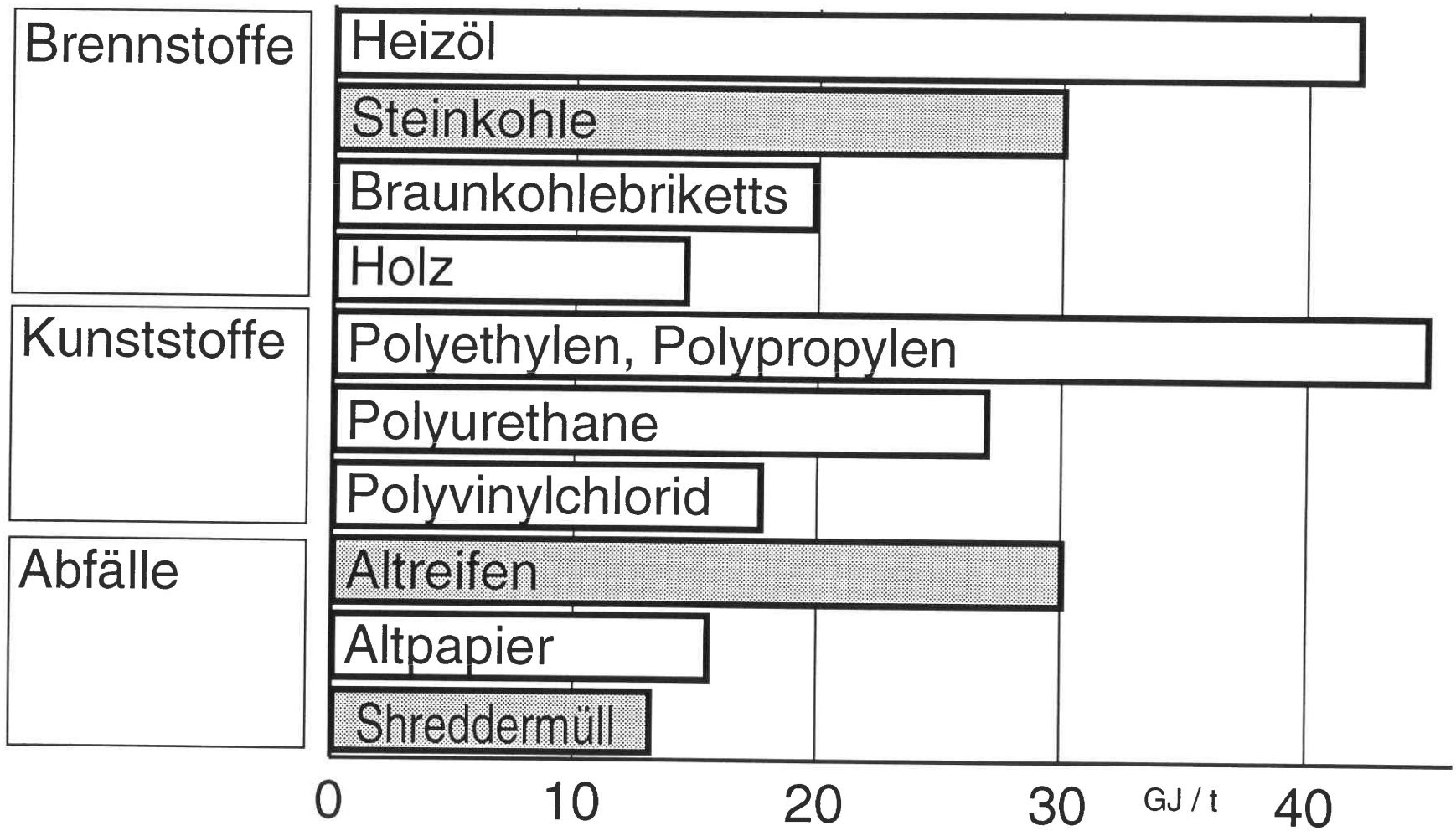
Die Shf erscheint dem Auge nicht als "homogenes" Schüttgut. Aus verbrennungstechnischer Sicht und im Vergleich zu anderem Müll ist sie es aber. Die Shredderung hat die bei manchen anderen Abfällen wünschenswerte Vorzerkleinerung und Durchmischung vorweggenommen. Das ist ein nicht unerheblicher Vorteil, der gelegentlich übersehen wird. Neben einem größeren Feinanteil gibt es einen Grobanteil mit Stücken bis 100 mm Größe.

Beim Vergleich von Analysendaten und später auch von Versuchsergebnissen muß man zwischen der ShF-Gesamtfraktion und - auf trockenem oder nassem Wege durch Siebung bzw. Schwimm-Sink-Trennung - abgetrennten Teilfraktionen (Grobgut, Feingut) unterscheiden.

3. Heizwert und Aschegehalt (Bild 1 bis Bild 3)

Einen ersten Vergleich mit den Heizwerten einiger Regelbrennstoffe, Kunststoffe und Abfälle zeigt Bild 1. Der Shf- Heizwert ist gegenüber dem der Regelbrennstoffe und der meisten reinen Kunststoffe niedrig. Die Shf enthält Kunststoffe. Diese machen aber nur etwa ein Drittel der Shf aus, d. h. die Shf-Gesamtfraktion ist kein eigentlich kunststoffreicher Abfall. Zum aschearmen Kunststoff hinzu kommt als verbrennliches Material hohen Heizwerts eine etwa gleich große Men-

Bild 1



HEIZWERTE VON BRENNSTOFFEN UND ABFÄLLEN

ge von Elastomeren (Altreifen, technische Gummiteile) u.a.

Das besonderes Merkmal der Shf ist ihr hoher Inertstoff- / Aschegehalt ("Nicht -Brennbares") von im Mittel 50 Gew.-%, bezogen auf Trockensubstanz. Auf diesen hohen Aschegehalt muß man - aus Sicht einer Deponieentlastung - das größte Augenmerk legen, vgl. /1/. Ziel einer Shf- Verbrennung sollte eine "Mineralisierung" der Asche sein, um zu verwertbaren oder zumindest problemlos deponierbaren Schlacken zu kommen.

Mit wachsendem Inertstoff-/Asche-Gehalt wird gewissermaßen das "Brennbare" mit "Nicht-Brennbarem" mehr und mehr verdünnt und der Heizwert sinkt (Bild 2 und Bild 4).

Die Shf- Gesamtfraktion hat einen Heizwert ("unterer Heizwert") von im Mittel 13 GJ / t. Ihr Wassergehalt ("Feuchte") liegt - je nach Handhabung und Witterung - im Bereich von ca. 5 - 30 Gew.-%, im Mittel um 10 Gew.-%, bezogen auf die Gesamtmasse feuchter Shf. Bei Schutz vor Regen dürfte die Feuchte im unteren Bereich bei nur 5 Gew.- % liegen.

Bild 2 fußt zunächst auf nur zwei Meßwerten aus Tabelle 1, nämlich dem Brennwert Ho (waf.) = 28,5 GJ / t und dem Heizwert Hu (waf.) = 26,8 GJ / t, bezogen auf den "wasser- und aschefreien Zustand"). Die Linien für verschiedene Feuchten ergeben sich rechnerisch unter Berücksichtigung der Verdampfungswärme der Feuchte, vgl. z. B. Ruhrkohlen-Handbuch /2/.

Die ohne nähere Kennzeichnung eingetragenen Meßpunkte stammen aus der Literatur (u.a. mit Heizwerten von Shf aus 12 Shredderbetrieben in den USA /3/, /4/) und aus persönlich bereitgestellten Datensätzen /5/. Bei der Auswertung wurde nicht genauer zwischen Aschegehalt, Glühverlust und z.B. Mineralstoffgehalt unterschieden.

Wie Bild 2 zeigt, passen sich praktisch alle Brenn- bzw. Heizwerte diverser Shf unterschiedlichen Aschegehalts (und unterschiedlicher Feuchte) bestens in das Diagramm ein.

Die zu erwartende Abhängigkeit vom Aschegehalt und von der Feuchte wird voll bestätigt.

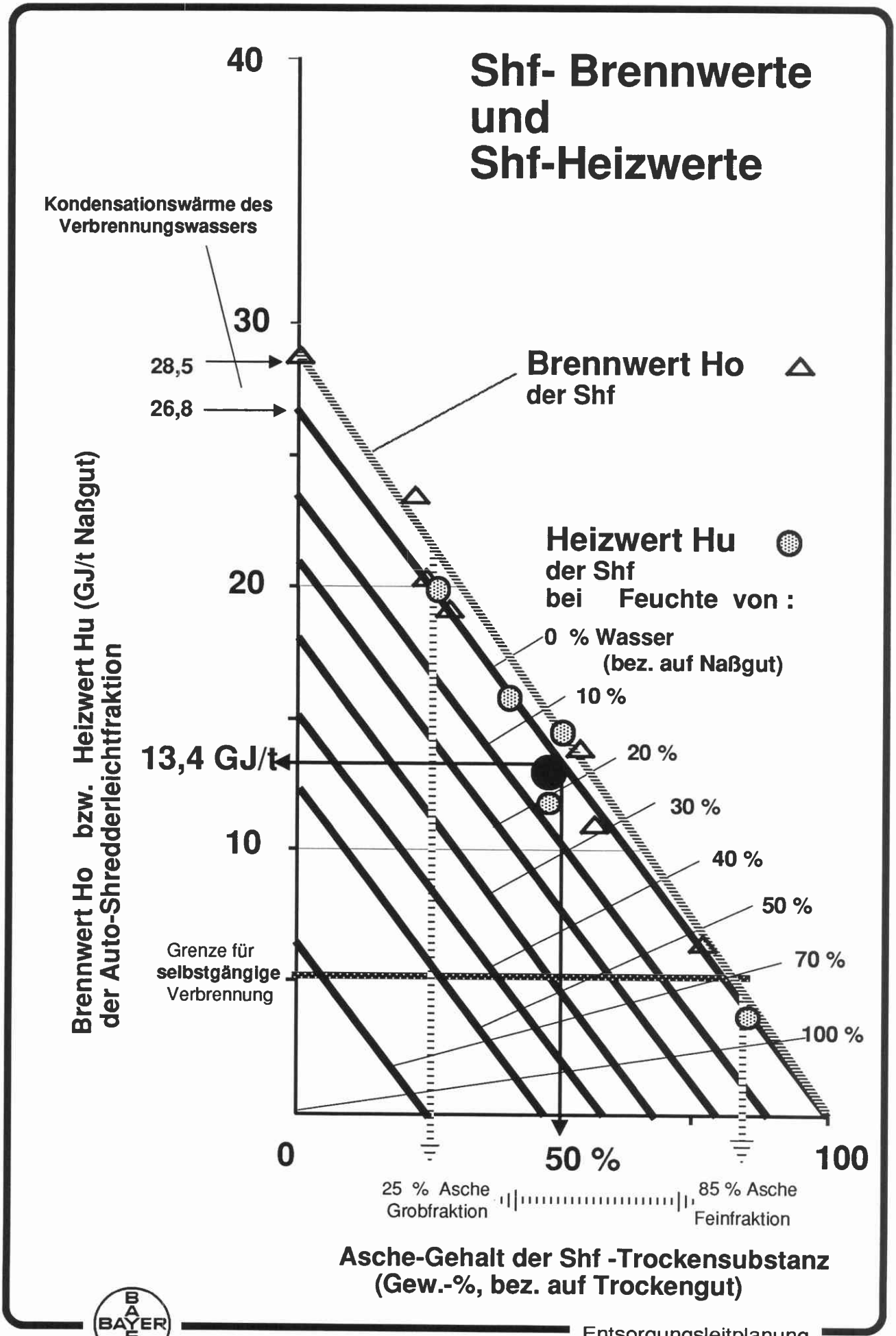

Shf- Brennwerte
und
Shf-Heizwerte
Kondensationswärme des
Verbrennungswassers
40
30
28,5
26,8
20
13,4 GJ/t
10
Brennwert Ho bzw. Heizwert Hu (GJ/t Naßgut)
der Auto-Shredderleichtfraktion
Brennwert Ho
der Shf
Heizwert Hu
der Shf
bei Feuchte von :
0 % Wasser
(bez. auf Naßgut)
10 %
20 %
30 %
40 %
50 %
70 %
100 %
Grenze für
selbstgängige
Verbrennung
0
50 %
100
25 % Asche
Grobfraktion
85 % Asche
Feinfraktion
Asche-Gehalt der Shf -Trockensubstanz
(Gew.-%, bez. auf Trockengut)

Bild 2

Aus der Shf-Gesamtfraktion aussortierte Grobfraktionen geringer Feuchte haben einen hohen Heizwert bis zu 20 GJ / t bei zugleich niedrigem Inertstoff-/Aschegehalt von ca. 25 Gew.-%. Derartige heizwertreichere Grobfraktionen mit höherem Kunststoff- /Elastomeren-Anteil wurden bevorzugt bei Pyrolyseversuchen eingesetzt (BRD und Japan, vgl. auch Bild 5). Die Feinfraktionen dagegen haben einen niedrigen Heizwert von z. B. nur 5,5 GJ / t bei entsprechend hohem Inerststoff-/Aschegehalt bis ca. 85 Gew.-%.

Was macht man, nachdem man sich gewissermaßen die "Rosinen" herausgepickt hat, mit dem ebenfalls schadstoffbehafteten inertstoffreichen Rest ? Man betrachte vergleichend auch Bild 11, aus dem zu ersehen ist, wie breit sich kritische Inhaltsstoffe wie PCB und PAK auf diverse Komponenten verteilen, bis hin zu den Gewebefetzen.

In Bild 2 wurde der "Mindestheizwert für eine Verbrennung ohne Zusatzbrennstoff" als waagerechte Linie bei ca. 5,5 GJ / t eingezeichnet; diese Linie markiert die ungefähre Grenze selbstgängiger Niedertemperatur-Verbrennung. Die Feinfraktionen ließen sich also gerade noch "selbstgängig" verbrennen, z. B. in einer Wirbelschicht-Feuerung.

Dieser "Mindestheizwert" würde auch von einer zunächst trockenen Shf unterschritten, falls man sie "pitschnaß" werden ließe und ihre Feuchte dabei auf über 30 Gew.-% anstiege. Umgekehrt: Falls eine trockene Shf als "Zusatzbrennstoff" zu verbrennenden nassen Abfällen zugesetzt, z. B. mit Naß-Klärschlamm "coverbrannt" würde, so stünde gerade die nötige Wärme bereit, um die entsprechende Wassermenge zu verdampfen.

Neben Versuchen zur Monoverbrennung von Shf erfolgten mit den unterschiedlichsten Shf- Fraktionen Versuche auch zur Coverbrennung mit anderen Abfällen und Regelbrennstoffen (Klärschlamm, Hausmüll, Sondermüll, Kohle).

In Bild 3 wird deshalb der Vergleich der Heizwerte weiter vertieft. Eingetragen in das zuvor entwickelte Bild sind die Heizwerte bzw. die ungefähren Heizwertbereiche von Trocken- und Feuchtabfällen wie Altreifen, Altpapier, Brennstoff aus Müll (BRAM), Hausmüll (HM), trockenem und nassem Klärschlamm (KS) in Abhängigkeit vom jeweiligen Inertstoff-/Asche-Gehalt und von der Feuchte.

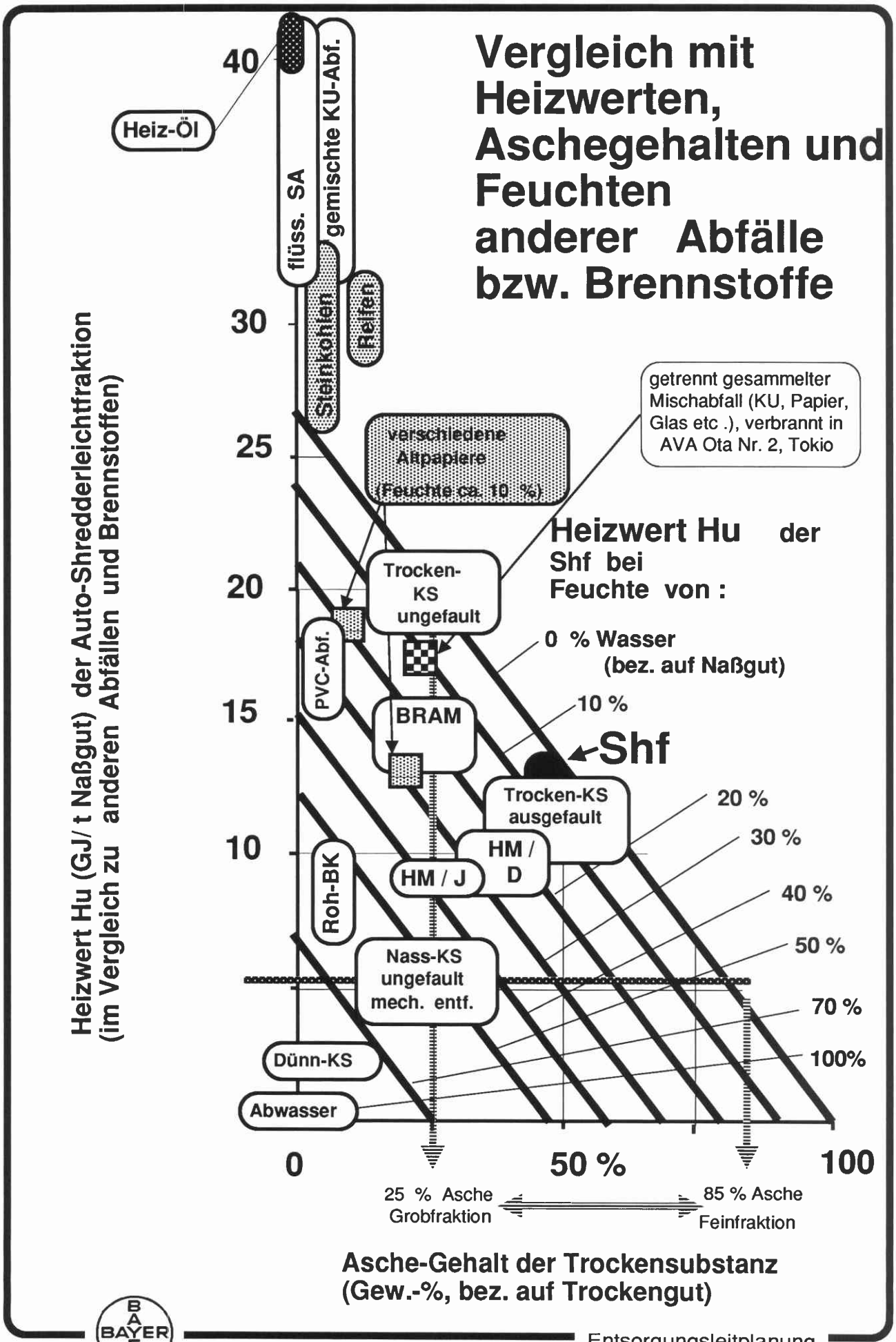

Vergleich mit Heizwerten, Aschegehalten und Feuchten anderer Abfälle bzw. Brennstoffe
Heizwert Hu (GJ/ t Naßgut) der Auto-Shredderleichtfraktion (im Vergleich zu anderen Abfällen und Brennstoffen)
40
30
25
20
15
10
Heiz-Öl
flüss. SA
gemischte KU-Abf.
Steinkohlen
Reifen
verschiedene Altpapiere (Feuchte ca. 10 %)
getrennt gesammelter Mischabfall (KU, Papier, Glas etc .), verbrannt in AVA Ota Nr. 2, Tokio
Heizwert Hu der Shf bei Feuchte von :
Trocken-KS ungefault
PVC-Abf.
BRAM
0 % Wasser (bez. auf Naßgut)
10 %
Shf
Trocken-KS ausgefault
20 %
30 %
HM / D
HM / J
Roh-BK
40 %
Nass-KS ungefault mech. entf.
50 %
70 %
100%
Dünn-KS
Abwasser
0
50 %
100
25 % Asche Grobfraktion
85 % Asche Feinfraktion
Asche-Gehalt der Trockensubstanz (Gew.-%, bez. auf Trockengut)

Bild 3

Deutscher Hausmüll mit ca. 40 Gew.-% Asche (bezogen auf Trockensubstanz) und Feuchten von 30 - 45 Gew. -% (bez. auf Naßgut) hat Heizwerte im Breich von 8,5 - 11 GJ/t (mit steigender Tendenz) . Hierauf sind Hausmüll-Rost-Feuerungen ausgerichtet. Vereinzelt verarbeiten Rost-Feuerungen angereicherten Hausmüll bis 13 GJ / t. Die thermische Belastgungsgrenze düfte (bei herkömmlichen Hausmüllrosten und Hausmüll als Abfallbrennstoff) unter 20 GJ / t liegen.

Man verbrennt heute Altreifen mit einem Heizwert um 30 GJ/t auf thermisch hochbelastbaren Rost-Feuerungen. Aber der Aschegehalt von Altreifen ist vergleichsweise gering (ca. 10 - 20 Gew.-%), die Asche ist im Altreifen feinstverteilt und schließlich anders zusammengesetz.

Auf Hausmüllrosten wurde Shf versuchsweise coverbrannt.

Japanischer Hausmüll ist i. a. etwas feuchter als deutscher Hausmüll und hat daher einen geringeren Heizwert. In Japan werden für Hausmüll häufig auch Wirbelschichtfeuerungen eingesetzt.

Der Heizwert von nicht getrocknetem, sondern nur mechanisch entfeuchtetem Nass-KS rutscht an die Grenze oder sogar unter die Grenze selbstgängiger Verbrennung ab.

Versuche zur Shf-Coverbrennung mit Naß-Abfällen und auch zur Shf-Monoverbrennung in Wirbelschicht-Feuerungen sind erfolgt bzw. stehen demnächst an.

4. Brenntechnische Kennwerte: Flüchtige, C- und H- Gehalt (Bild 4)

In Bild 4 gehen wir zunächst wieder nur von den Werten der Einzelanalyse in Tabelle 1 aus.

Mehrere Meßpunkte für die Flüchtigen-Gehalte von Shf aus den USA wurden eingetragen /3/, /4/. Ersichtlich fügen sich diese Meßwerte gut ein.

Die Flüchtigen bestimmt man im Brennstofflabor an festen Brennstoffen zur Kennzeichnung ihrer Zündwilligkeit und Brennfreudigkeit. Dies erfolgt durch eine Art "Verschwelungstest" unter Luftabschluß, aber nicht vollkommenem Luftausschluß. Der Test "simuliert" gewissermaßen luftar-

Shf-Gehalte an Brennbarem, Flüchtigen u.a.

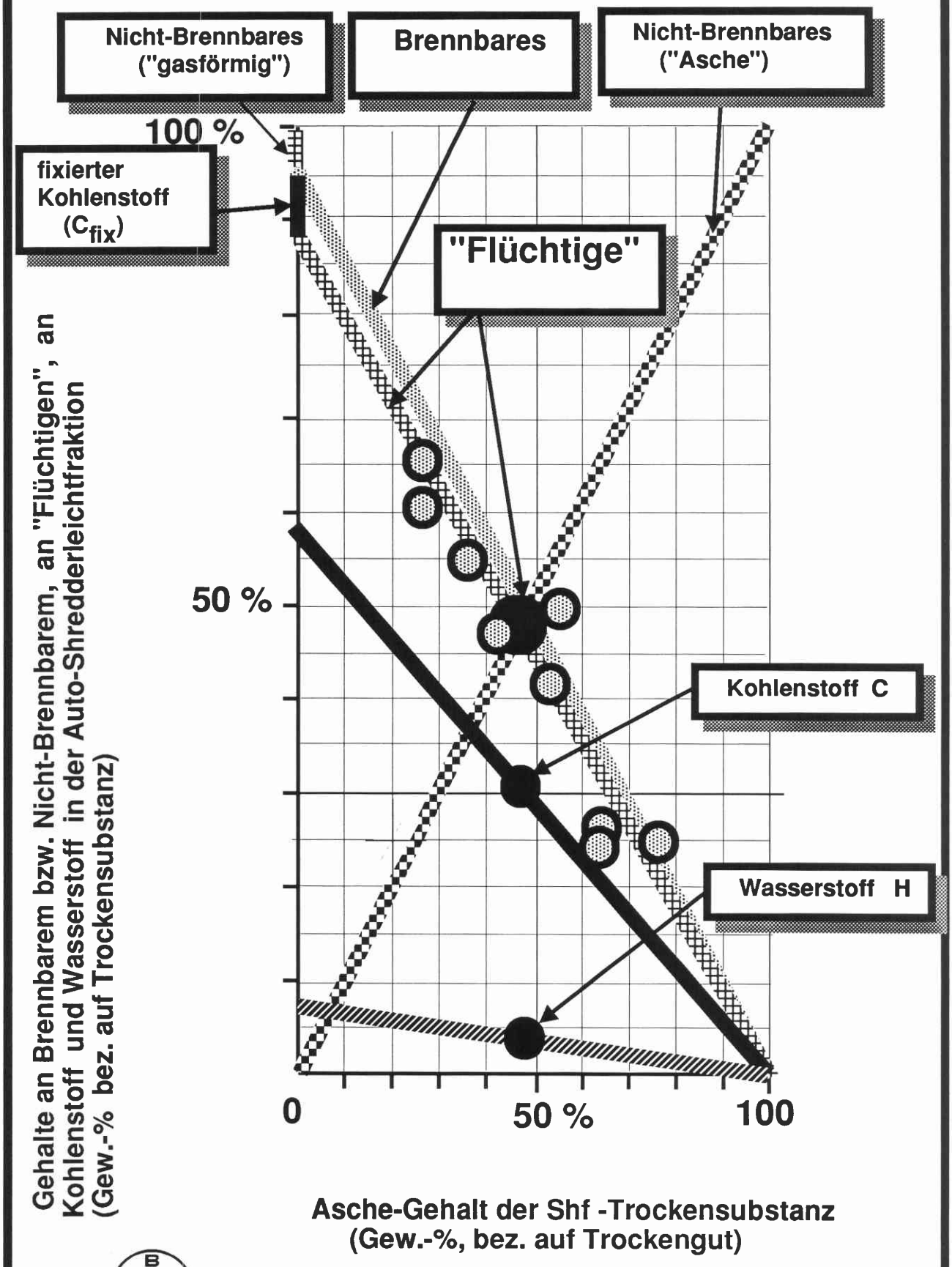


Bild 4

me Verschwelungsbedingungen vor Beginn der eigentlichen Verbrennung: Die Zündung eines Festbrennstoffs in einer Feuerung setzt i.a. an den in die umgebende Gasphase ausgetretenen Flüchtigen ein (Reaktion mit der dort verfügbaren Luft). Zündprobleme kennt man z. B. von anhrazitischen Kohlen mit geringem Flüchtigen-Gehalt und speziell auch bei hohem Asche-Gehalt.

Die Kunststoffe selbst (als Teil der Shf) haben einen hohen Gehalt an Flüchtigen und sollten daher zündwillig sein, sofern sie nicht zu sehr mit Inerten "verdünnt" sind, und - bei den hier betrachteten hohen Feuerraumtemperaturen - gut brennen. Mit wachsendem Inertstoff-/Aschegehalt kommt gewissermaßen ein Ascheballast als "Feuerlöschmittel" hinzu.

Wie alles andere hängt also auch das hier betrachtete Zünd- und Brennverhalten (bei Beginn der Verbrennung) von der gewählten Shf-Fraktion ab.

Die Kunststoffe in der Shf haben im Vergleich zu Kohlen ein hohes Kohlenstoff-/Wasserstoff-Verhältnis C/H = 7 - 8 (vgl. Bild 4) ähnlich wie andere organische Abfälle auch. Unter anderem dadurch erklärt sich die Gleichwertigkeit der Heizwerte.

5. Schwefel-Gehalt (Bild 5)

In der von uns näher untersuchten Shf-Gesamtfraktion (ohne Altreifen) besteht der vorhandene Schwefel-Gesamtgehalt (S ges) ganz überwiegend auf nicht verbrennlichem, d. h. anorganisch gebundenem Schwefel, z.B. Sulfaten wie Anhydrit. Die Analysen besagen: S ges. = 0,71 Gew.-%, S org. = 0,09 Gew.-% und S anorg. = 0,62 Gew.-% (!), vgl. Tabelle 1 .

Der Aufbau des Bildes ergibt sich draus auf folgende Weise: a) Eingetragen wurden unsere beiden Meßpunkte für den organischen Schwefel und den anorganischen Schwefel . Zusätzlich wurde ein zugehöriger Meßpunkt des anorganischen Schwefels von pyrolysierter Shf, die nach der Pyrolyse einen höheren Asche-Gehalts hat. Der Anhydrit sollte bei niedriger Temperatur im Pyrolysereststoff verbleiben. Die Gerade durch die beiden Punkte zum anorganischen Schwefel liefert rechts den Gehalt an anorganischem Schwefel bei 100 Gew.-% Inertstoff/Asche. b) Die Gerade für den Gehalt an organischem Schwefel einer Shf ohne Altreifen liegt annähernd bei Null. c) Gummireiche Shf-Grobfraktionen nehmen den hohen Gehalt von organischem Schwefel in Altreifen an.
c) Summiert man den organischen und den anorganischen Schwefel für ShF mit

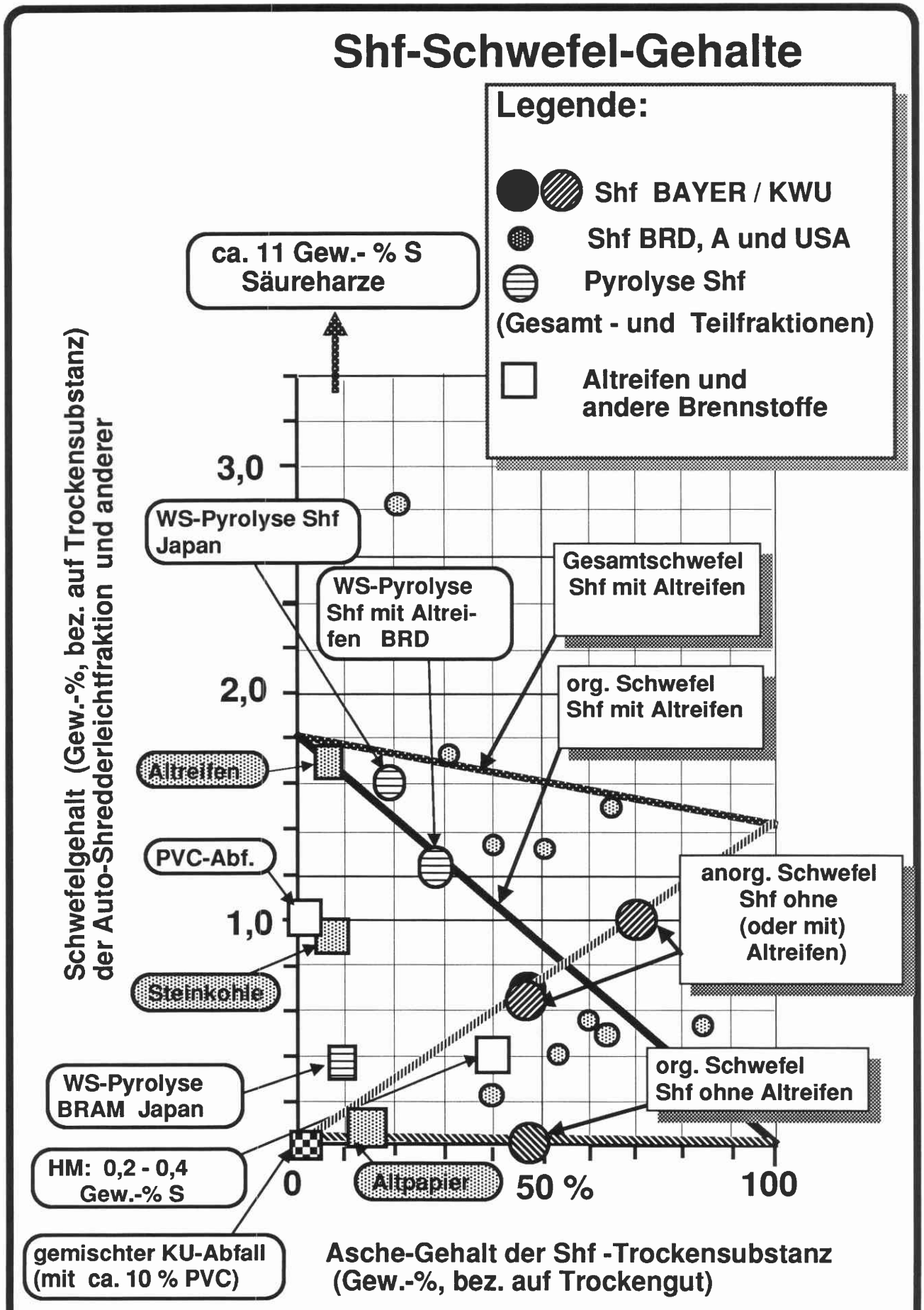

Shf-Schwefel-Gehalte
Legende:
Shf BAYER / KWU
Shf BRD, A und USA
Pyrolyse Shf
(Gesamt - und Teilfraktionen)
Altreifen und andere Brennstoffe
ca. 11 Gew.- % S Säureharze
Schwefelgehalt (Gew.-%, bez. auf Trockensubstanz) der Auto-Shredderleichtfraktion und anderer
3,0
2,0
1,0
WS-Pyrolyse Shf Japan
WS-Pyrolyse Shf mit Altrei-fen BRD
Gesamtschwefel Shf mit Altreifen
org. Schwefel Shf mit Altreifen
Altreifen
PVC-Abf.
Steinkohle
anorg. Schwefel Shf ohne (oder mit) Altreifen)
org. Schwefel Shf ohne Altreifen
WS-Pyrolyse BRAM Japan
HM: 0,2 - 0,4 Gew.-% S
gemischter KU-Abfall (mit ca. 10 % PVC)
0
Altpapier
50 %
100
Asche-Gehalt der Shf -Trockensubstanz (Gew.-%, bez. auf Trockengut)

Bild 5

Altreifen, so ergibt sich die obere Linie für den Gesamt-Schwefel-Gehalt der Shf mit Altreifen.

Zusätzlich eingetragen wurde Meßwerte aus der Literatur, meist ohne Angabe., um welche Schwefelbindung es sich handelt. Die obere Gerade überdeckt fast alle Literaturwerte

An einer Niedertemperatur-Verbrennung nimmt nur der organische Schwefel teil, denn der anorganische Schwefel wird in der Asche (als Anhydrit) verbleiben.

Im Fall einer Hochtemperatur-Verbrennung aber zersetzt sich auch der Anhydrit und trägt zur SO_2/SO_3-Fracht vor Rauchgasreinigung bei. In der Schlacke findet man kaum mehr anorganischen Schwefel.

Ähnlich wie gummifreie ShF sind auch "Gemischte Kunststoffabfälle" aus dem Verpackungsbereich schwefelfrei und bedürften daher bei alleiniger Verbrennung (Monoverbrennung in einem "Kunststoff-Heizwerk") keiner gezielten Rauchgas-Entschwefelung.

Nach einer Hypothese von Griffin /6/ kann die PCDD/F-Denovo-Synthese durch Schwefel inhibiert werden. Dies scheinen finnische Versuche zur Coverbrennung PVC-angereicherter gemischten Kunststoffabfälle zusammen mit schwefelhaltiger Kohle zu bestätigen. Die Versuche erfolgten jüngst bei Fa. Neste Oy in Finnland in einem industriellen Wirbelschicht-Dampferzeuger mit stationärer Wirbelschicht-Feuerung /7/. "Ein bißchen Schwefel schadet nicht", sondern wäre gewissermaßen zu begrüßen. Allerdings ist das S /Cl- Verhältnis von Kohlen sehr hoch (ca. S/Cl = 5 - 10). In den Rauchgasen eines Altreifen-Kraftwerks sollen Dioxine und Furane nicht nachweisbar gewesen sein. Altreifen enthalten wenig Chlor und relativ viel Schwefel. Das S/Cl-Verhältnis liegt etwa bei S/Cl = 1,8. Dies scheint die Hypothese von Griffin zu bestätigen. Die Zusammenhänge sind bis heute noch nicht eindeutig erforscht.

6. Stickstoff-Gehalt

Die Shf hat laut unserer Einzelmessung einen Stickstoff-Gehalt von 0,99 Gew.-%, bezogen auf die Trockensubstanz, vgl. Tabelle 1. Umgerechnet auf den was-

ser- und aschefreien Zustand entspricht dies N (waf.) = 1,87 Gew.-%. Dieser Wert liegt im (oberen) Bereich von Steinkohlen. Die im Auto verwendeten (chlorfreien) Polyuretan-Weichschäume haben selbst einen hohen Stickstoff-Gehalt bis zu 5, 5 Gew.-% . Mit dem Polyuretan- Anteil an der Shf ergibt sich, daß der Stickstoff-Gehalt der Shf nur etwa zur Hälfte durch Polyurethane bedingt ist. Auch die anderen Materialien tragen zum Stickstoff-Gehalt der Shf bei.

Bei der Verbrennung können feuerungsintern zwischenzeitlich Stickoxide NO_x (d. h. NO und NO_2) und - bei stark abgesenkter Verbrennungstemperatur - Lachgas (N_2O) entstehen, beides bevorzugt aus diesem sogenannten "Brennstoff-Stickstoff". Diese zwischenzeitlich gebildeten Schadstoffe können mittels feuerungsinterner Maßnahmen weitestgehend unterdrückt werden.

Bei Verbrennungstemperaturen unter ca. 1000 °C trägt in erster Linie der Brennstoffstickstoff zu Stickoxid-Bildung bei. Oberhalb 1000 °C entstehen mehr Stickoxide temperaturbedingt durch unmittelbare Reaktion des Sauerstoffs mit dem reichlich vorhandenen Stickstoff aus der Verbrennungsluft. Dagegen wird die Lachgas-Bildung bei hohen Verbrennungstemperaturen verschwindend klein. Auch in Hochtemperatur-Feuerungen kommen feuerungsinterne NOx-Minderungsmaßnahmen zur Anwendung.

Die feuerungsintern angewendeten Minderungsmaßnahmen ("Primär-Maßnahmen") sind im wesentlichen:

Luftstufung zur NO_x-Minderung (d.h. "Luftmangel" bei Verbrennungsbeginn durch verteilte Zugabe der Verbrennungsluft als Primärluft und Sekundärluft)

und

Temperaturanhebung im Bereich der Gasphasenverbrennung auf > ca. 900 °C zwecks N_2O-Zersetzung, vgl. z. B. Lee /9/.

Diese Minderungsmaßnahmen werden inzwischen gut beherrscht und kommen in allen modernen Großfeuerungen wie auch in Abfallverbrennungsanlagen zur Anwendung.

Die NO_x -Emissionsgrenzwerte werden durch die 13. BImSchV für Großfeuerungen bzw. durch die 17. BImSchV für Abfallverbrennungsanlagen begrenzt (vgl. Bild 12).

Sofern Primär-Maßnahmen nicht ausreichen, die NO_x-Grenzwerte einzuhalten, müssen im Rahmen der Rauchgasreinigung sekundäre Entstickungsmaßnahmen zur Anwendung kommen (z. B. die selektive katalytische NO_x-Reduktion mit NH_3).

Lachgas ist emissionsseitig (bisher) nicht begrenzt. Es ist aber seit Jahren - wegen seiner möglichen Langzeitwirkungen in der Stratosphäre (Mitbeteiligung am Ozonabbau) - in der Diskussion und sollte daher feuerungsintern weitestgehend zersetzt werden.

7. Chlor-Gehalt (Bild 6) :

Eine typische ShF-Gesamtfraktion mit 50 Gew.-% Inertststoff-/Asche enthält ca. 2 Gew.-% Chlor, bezogen auf Trockensubstanz.

Auch der Chlor-Gehalt geht mit steigendem Inertstoff-/Aschegehalt (durch "Verdünnung") auf annähernd Null zurück. Größere Mengen chlorhaltiger anorganischer Inhaltsstoffe (Chloride) sind ja kaum zu erwarten.

Aus Untersuchungen zum Kunststoffanteil und zu dem PVC-Anteil am Kunststoff in der Shf errechnet sich ein Cl-Gehalt von ca. 6,6 Gew.-% für die Brennbare Substanz, d.h. die "andere" Shf-Hälfte /10/. Diese besteht aus Kunststoffen, Elastomeren, Textilien, Papier, Holz.

Die Verbindungslinie zum Wert Null bei 100 Gew.-% Asche bildet annähernd eine "obere Brenzungslinie" für die Chlor-Gehalte der ShF. Mit einer eventuellen Abnahme von PVC iin der Shf würde sich diese Linie nach unten drehen.

Vergleichend wurden in Bild 6 auch die Chlor-Gehalte einiger anderer Brennstoffe und Abfälle miteingetragen (/8/ u.a.)

"Organisches Chlor" und aus Chloriden freigesetztes "anorganisches Chlor" hydrolisiert im feuchten Rauchgas des Feuerraums zu Salzsäure.

Shf-Chlor-Gehalte

Legende:

- Shf BAYER / KWU
- Shf BRD und A
- Shf USA
- Shf Japan

(Gesamt - und Teilfraktionen)

- andere Brennstoffe

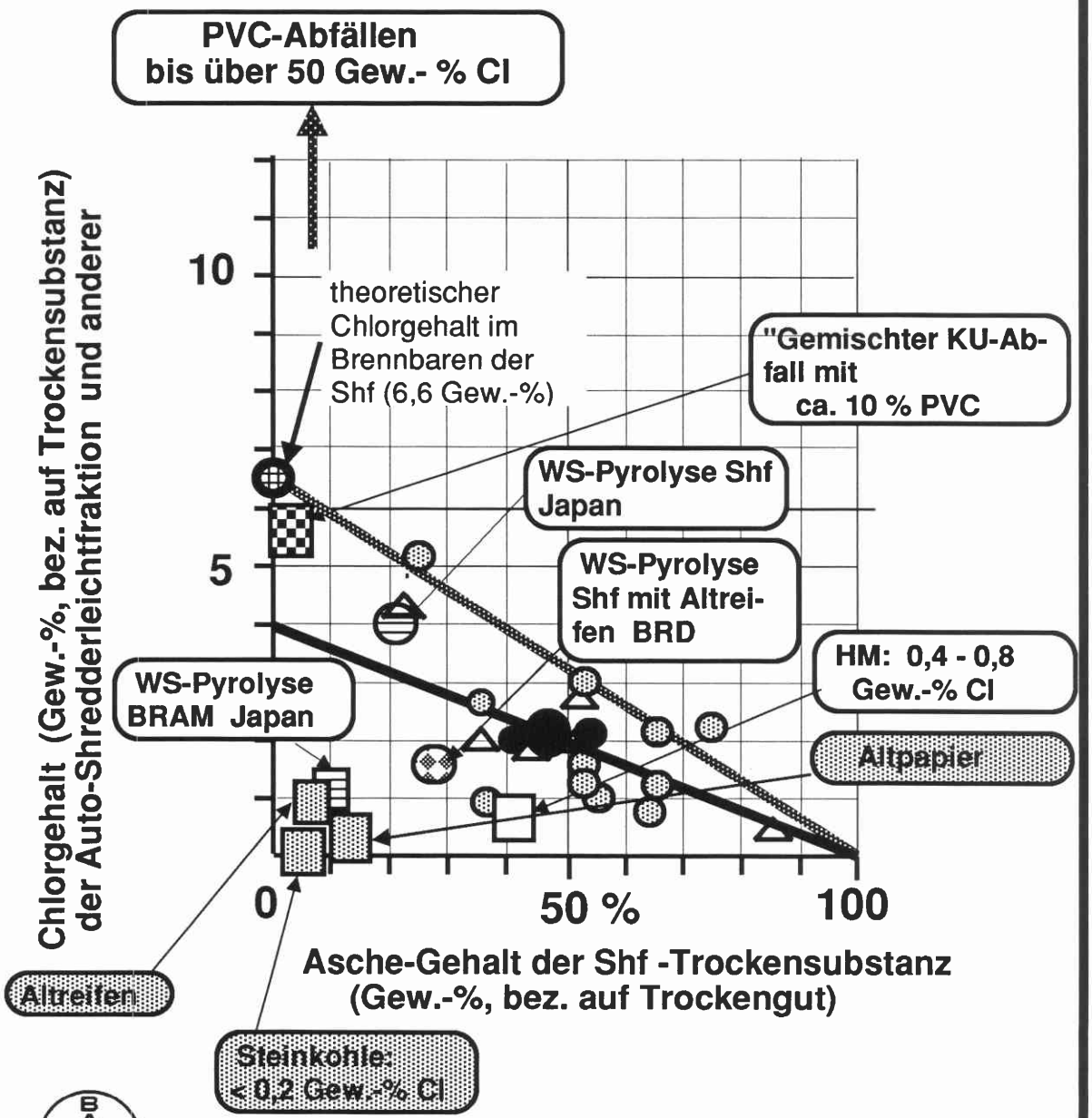


Bild 6

Die Salzsäure kann (infolge Taupunktunterschreitung) direkt zu Niedertemperatur-Korrosionen am Kesselende und im Filterbereich der Rauchgasreinigung führen. Dies läßt sich durch Wahl angehobener Endtemperaturen (Rauchgastemperatur > 180 °C) beherrschen.

Höhere Chlor-Gehalte bzw. HCl-Konzentrationen können aber auch schon auf der heißen Kesselseite indirekt zu Hochtemperatur-Korrosion führen, indem sich mit Asche-Inhaltsstoffen niedrig schmelzende Chloride bilden, die starke Verschmutzungen der Überhitzerheizflächenverursachen und im Zusammenwirken mit Sulfaten zu der gefürchteten Hochtemperatur-Korrosionen führen, vgl. z. B. Bongwald / 11/.

Man begrenzt deshalb die End-Überhitzer-Temperatur - als die höchste Temperatur im Dampfkreislauf - auf Werte < ca. 380 °C (Oberflächentemperatur), senkt damit aber entscheidend den möglichen Verstromungs-Wirkungsgrad, von ca. 38 % bei reinen Kohle-Kraftwerken auf Werte unter 20 %. Die Chlor-Gehalte der meisten betrachteten Abfälle liegen weit über dem sehr niedrigen Chlorgehalt von Steinkohlen oder normalen Braunkohlen (< 0,2 Gew.-% Cl).

Für die energetische Nutzung eines chlorhaltigen heizwertreichen Abfalls kommt daher die "Abfall-Verstromung" kaum in Betracht. Sinnvoller erscheint in diesem Fall eine Heizdampf-Erzeugung (Heizwerk) mit Nutzung des Wärmeinhalts auf niedrigerem Temperaturniveau. Dies setzt allerdings eine geeignete ganzjährige Anbindung an einen industriellen Dampfverbraucher voraus.

Aus der Sicht einer Sonderabfallverbrennung sind die Chlor-Gehalte der Shf vergleichsweise klein. Man hat jahrzehntelange Erfahrungen mit der Verbrennung hochchloriger Flüssigprodukte, zum Teil mit Chlorgehalten weit über 50 Gew.-%.

Der Chlorgehalt der ShF ist deutlich höher als der von Hausmüll und beispielsweise von BRAM, um dessen Coverbrennung in Industriefeuerungen und in Prozeßfeuerungen wie z. B. Zement -Drehrohr-Öfen man sich früher bemühte und - in England, Italien und den skandinavischen Ländern - auch heute noch fortbemüht.

Durch eine Coverbrennung von stärker chlorhaltigen Abfällen wie Shf mit Kohle trüge man die viel diskutierte PCDD/F-Problematik in die Kraftwerke hinein. Alles dies wurde in jüngster Zeit, nicht zuletzt im Zusammenhang mit der Klärschlamm-Coverbrennung, ausführlich - vor dem Hintergrund der 17. BImSchV - untersucht und weitgehend ausdiskutiert /12/.

Zu den übrigen Halogenen:

Fluor findet man - bei alleiniger Auto-Shredderung (d.h. ohne "weiße Ware") - nur in kleinsten Mengen, vgl. Tabelle 1.

Der Brom-Gehalt in der Shf wurde wegen flammgeschützter elektronischer Bauteile bestimmt und aber ist sehr gering (< 0,01 Gew.-%). Dies erscheint im Hinblick auf die chloriert/bromierten Dioxine und Furane, die bei der gemeinsdamen Verbrennung von bromhaltigen Abfällen mit Hausmüll in die Diskussion gekommen sind, wichtig.

8. Alkali-Metalle

Kalium und Natrium haben Einfluß auf das Verschmutzungsverhalten des Feuerraums und des der Feuerung nachgeschalteten Kessels. Sie sind nur in geringen Mengen vorhanden und werden hier nicht näher betrachtet. Der aus Verschmutzungsgründen ungeliebte Phosphor ist ebenfalls in nur geringsten Mengen vorhanden.

9. Erdalkali-Metalle

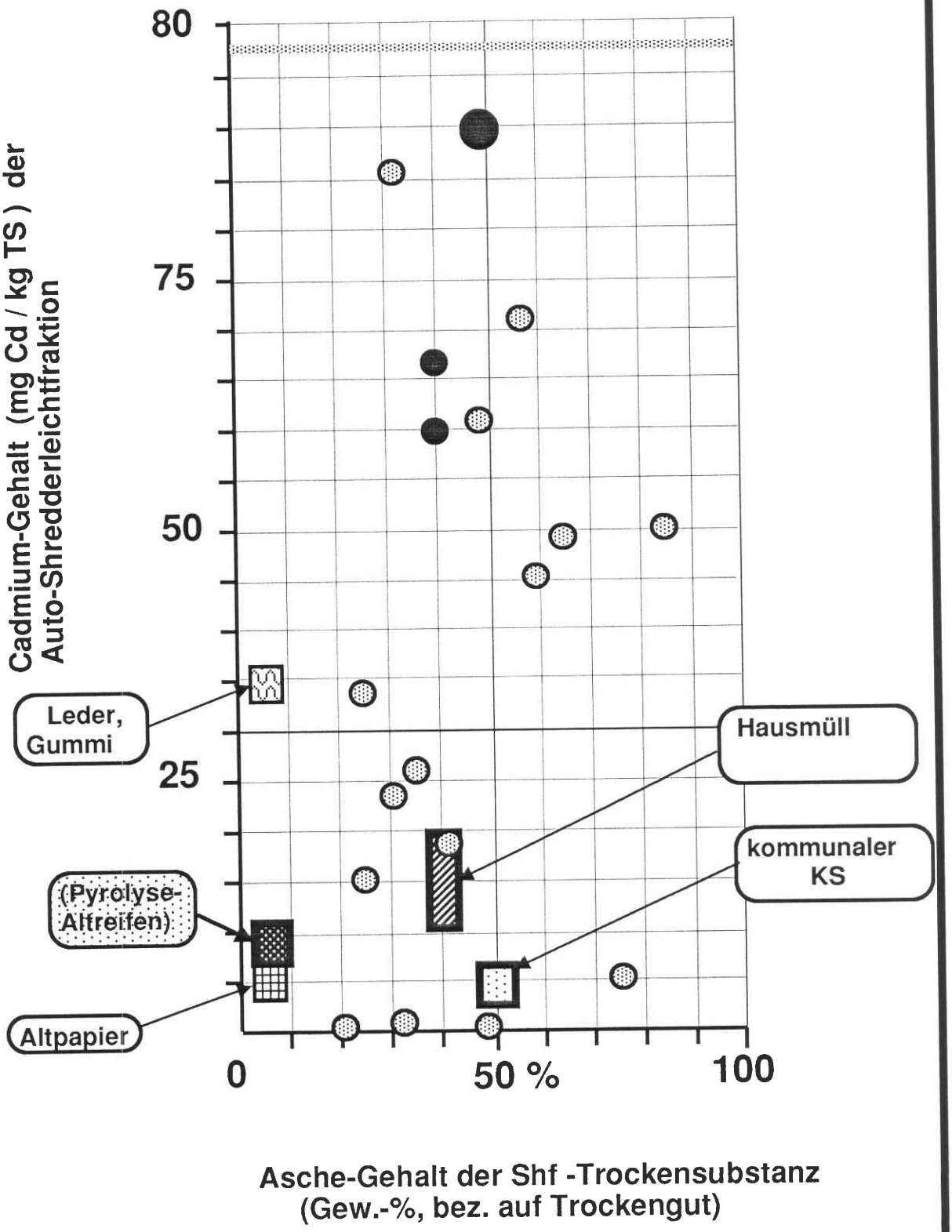
Wir beschränken uns auf den Hinweis, daß das in geringer Menge vorhandene Barium weitgehend in der Asche oder Schlacke verbleibt, dort aber - wegen seiner hohen Eluationsfähigkeit - augenfällig stören kann. Man weiß dies von anderen Schlacken und wir haben dies im Rahmen der Untersuchungen /1/ bestätigt gesehen.

Das Calcium und Magnesium in der Shf könnte auf Kalkstein / Dolomit-Mehl als Füller zurückzuführen sein. Diese stören nicht. Es sei nur angemerkt, daß sich die Carbonate bei der Verbrennung zersetzen. Aus der Zersetzung resultiert CO_2, als Teil der in Bild 4 vermerkten "gasförmigen Nicht-Brennbaren".

10. Metalle

Von besonderem Belang für die Asche bzw. die Schlacke aus der Shf-Verbrennung ist wahrscheinlich der Aluminium-Gehalt (Verwendbarkeit der Schlacke "im Beton")

Shf-Cadmium-Gehalte



Shf-Kupfer-Gehalte

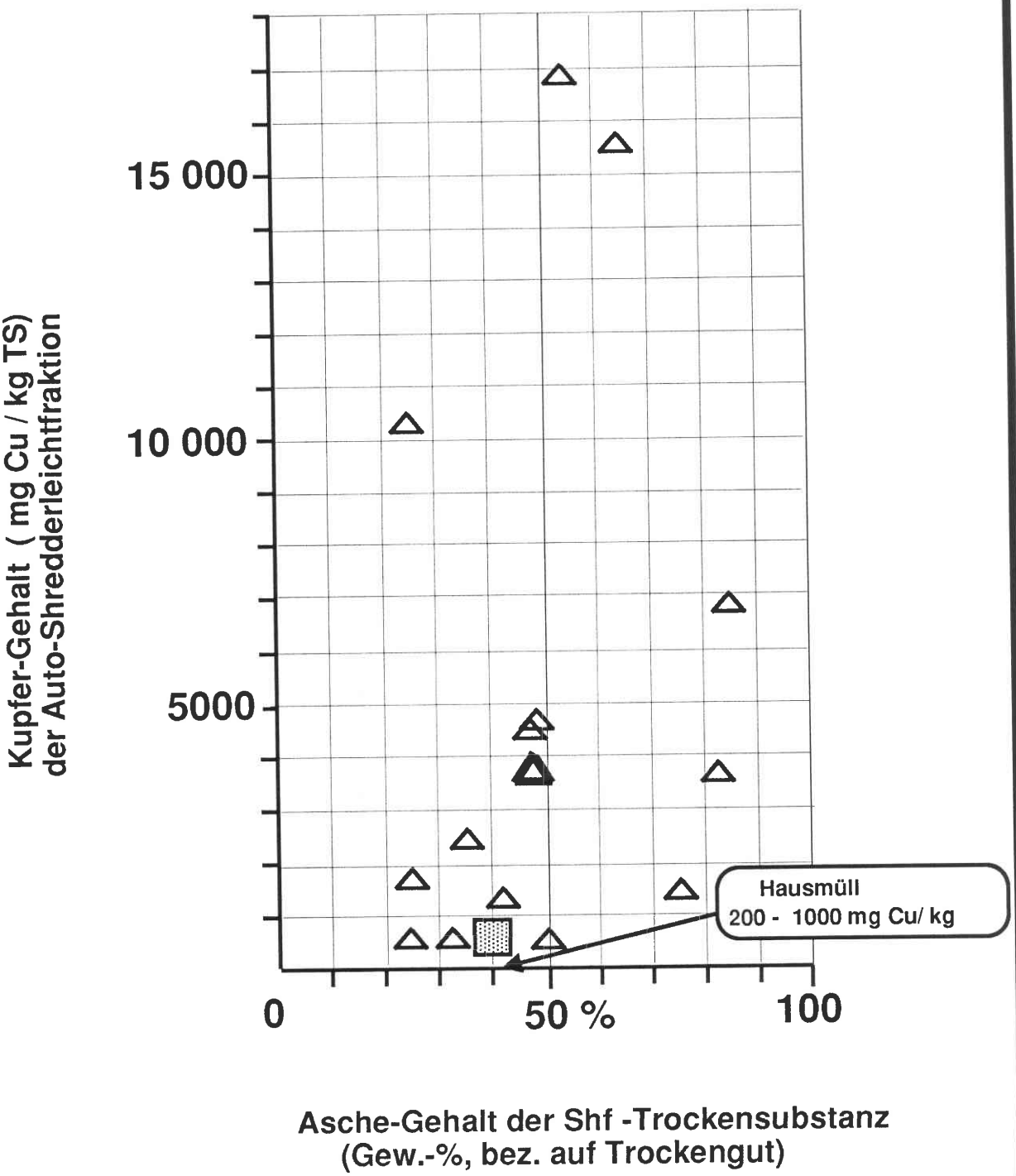


Bild 8

Shf-Quecksilber-Gehalte

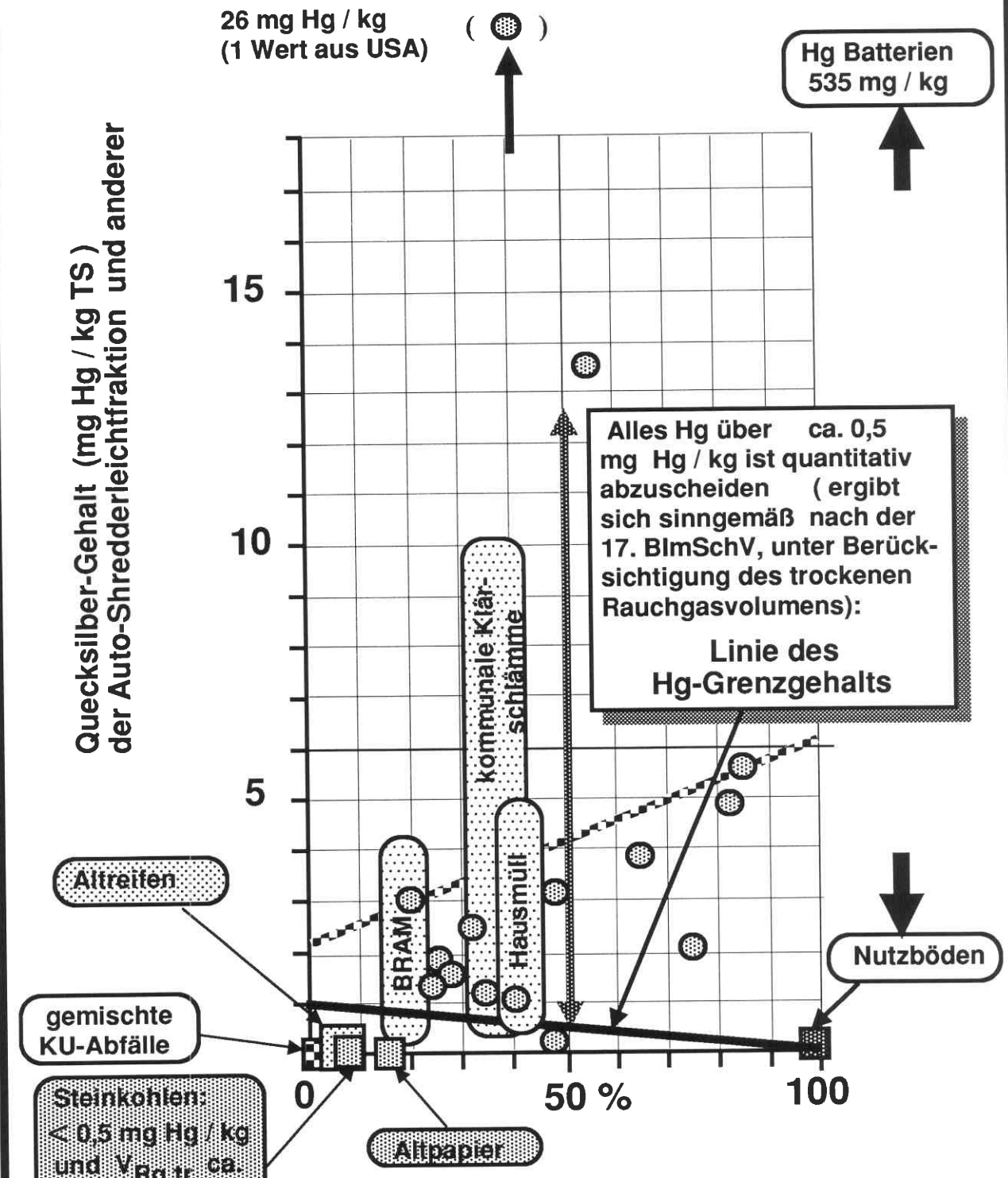


Bild 9

und der Eisengehalt (Ascheschmelzverhalten):

Aluminium kann - wie von Hausmüll-Schlacken her gut bekannt - bei einer späteren Weiterverwendung der Schlacken im Baubereich stören (durch Gasbildung und stärkere Quellerscheinungen).

Auch auf den stets hohen Eisen-Gehaltkommen wir in Zusammenhang mit dem später betrachteten Ascheschmelzverhalten zurück. Eisen ($Fe_2O_{3)}$ ist wesentlicher Bestandteil vieler Kohlen.

11. Spurenelemente

Cadmium -Gehalt (Bild 7)

Der Cadmium-Gehalt der Shf ist im Vergleich zu einigen Abfällen gering bzw. im Vergleich zu einigen anderen geradezu verschwindend klein (z. B. gegenüber Cd-stabilisierten PVC-Kunststoffen aus dem Außenbereich /13/). Cadmium wird aber als niederflüchtiges toxisches Schwermetall - eine gute Staubabscheidung im Rahmen der Rauchgasreinigung vorausgesetzt - problemlos abgeschieden.

Kupfer-Gehalt (Bild 8)

Die Kupfer-Gehalte der Shf, die erheblich streuen, liegen erwartungsgemäß weit über dem Kupfer-Gehalt von Hausmüll. Kupfer gilt - wie schon erwähnt - als ein maßgebender Katalysator für die Denovo-Synthese von PCDD/F im abkühlenden Rauchgas. Daher wurde bei Versuchen zurShF-Coverbrennung mit Hausmüll und mit Sondermüll besonders auf die PCDD/F geachtet.

Quecksilber-Gehalt (Bild 9)

Der Quecksilber-Gehalt eines Abfalls ist eine besonders ***kritische Schlüsselgröße***.

Quecksilber als hochflüchtiges toxisches Schwermetall muß gemäß 17. BImSchV weitestgehend abgeschieden werden, vgl. Bild 10. Im Rauchgas einer Abfallverbrennung ist die Einhaltung eines Emissionsgrenzwerts <

0,05 mg Hg / Nm^3 (trocken, bei 11 Vol.- % O_2) vorgeschrieben. So klein der zulässige Emissionsgrenzwert der 17. BImSchV auch ist, er ist immerhin größer als Null. Hieran knüpfen wir nun Überlegungen zu einem theoretischen "Quecksilber-Grenzgehalt" im Abfallbrennstoff, um die Verbrennung Hg-haltiger Abfälle besser übersehen und diskutieren zu können:

Die 17. BImSchV erlaubt eine "endliche" Quecksilber-Emission. Man kann abschätzen, wie groß der entsprechende "Quecksilber-Grenzgehalt" eines Abfalls ohne jede Quecksilberabscheidung (in der Rauchgasreinigung) theoretisch sein dürfte. Dabei denkt man sich die dem Quecksilber-Grenzgehalt entsprechende Hg-Menge in dem Rauchgas verteilt. Dazu ist zunächst das bei der Verbrennung gebildete "spez. trockene Rauchgasvolumens" (Nm^3 trocken / kg Brennstoff) abzuschätzen. Dieses ist dem Heizwert der Brennstoff-Trockensubstanz proportional. Und es ist der bei Abfallverbrennung anzuwendende hohe Luftüberschuß (O_2 = 6 - 11 Vol.-%) zu berücksichtigen.

Ergebnis:

Der Quecksilber-Grenzgehalt, bezogen auf den wasser- und aschefreien Zustand, beträgt ca. 1 mg Hg /kg (Brennbares). Mit wachsendem Inertstoff-/ AscheGehalt geht der Quecksilber-Grenzgehalt linear gegen Null (beim Heizwert von Null bzw. 100 Gew.-% Asche) zurück. Die leicht geneigte Linie des Quecksilber-Grenzgehalts ist in Bild 9 eingetragen. Bei Abfällen mit Inertstoff-/Asche-Gehalten um 50 Gew.-% wie Shf beträgt der Quecksilber-Grenzgehalt ca. 0,5 mg Hg / kg Trockensubstanz. Sowohl für die Monoverbrennung eines Abfalls in einer eigenständigen Abfallverbrennungsanlage wie für dessen Coverbrennung mit Hg-armen Regelbrennstoffen gilt nach dieser Überlegung:

Bei Quecksilber-Gehalten unter dem Grenzgehalt brauchte ist keine Hg-Abscheidung bzw. eine Rauchgasnachreinigung erforderlich. Anderseits aber: Alles über den Grenzgehalt hinaus enthaltene Quecksilber ist vollständigst, d.h. quantitativ zu 100 % abzuscheiden.

Wie man nun in Bild 9 sieht, liegen die Quecksilber-Gehalte der Shf fast durchweg deutlich über ihrem jeweiligen Grenzgehalt, d.h. eine geeignete Hg-Abscheidung im Rahmen der Rauchgasreinigung wird zwingend erforderlich.

Anzumerken ist, daß man die Quecksilber-Abscheidung - in oxidierender Atmosphäre - heute gut beherrscht.

Zur Hg-Abscheidung bei direkter bzw. indirekter Verbrennung :

Im Rahmen der Rauchgasreinigung hinter einer Verbrennung, d.h. in oxidierender Atmosphäre, wird Quecksilber als Quecksilbe- (II)-Chlorid in sauren Wäscherstufen erfahrungsgemäß gut gelöst und abgeschieden.

Bei indirekter Verbrennung, d.h. thermischer Brennstoffaufbereitung durch Pyrolyse oder durch Vergasung, wäre zu wünschen, die Hg-Abscheidung - statt erst nach der Verbrennung - schon vor der Verbrennung am dort noch kleinen unverdünnten Strom der Pyrolyse- oder Vergasungsgase vorzunehmen. Jedoch erscheint eine Hg- Abscheidung in reduzierender Atmosphäre (als reduziertes metallisches Hg-(0) bis heute schwierig.

Anmerkung zur Hg-Problematik bei der Monoverbrennung von Regelbrennstoffen bzw. der Coverbrennung von Abfällen mit Regelbrennstoffen

Die eben durchgeführte Betrachtung gilt nicht nur für die reine Abfallverbrennung, sondern sinngemäß auch für die Coverbrennung von Abfällen mit Regelbrennstoffen in bestehenden Kraftwerks-Feuerungen oder in Industrie-/Prozeß-Feuerungen, wie sie von der 17. BImSchV - bis max. 25 % Anteil an der Feuerungswärmeleistung - erlaubt ist. Hierzu einige weitere erhellende Überlegungen:

Monoverbrennung von Regelbrennstoffen

Betrachten wir zunächst einmal den Nullast-Betrieb ("Null-Last" bzgl. Abfallzugabe), also beispielsweise den Betrieb eines Kohle-Kraftwerks nur mit Steinkohle allein: Der Quecksilber-Gehalt von Steinkohle ist mit nur ca. 0,2 - 0,5 mg Hg / kg bekanntlich gering /2/. Bei der in Kraftwerken sinnvollen und auch nach der 13. BImSchV erlaubten nahstöchiometrischen Verbrennung kann von einem spez. trockenen Rauchgasvolumen von ca. 10 Nm^3/kg ausgegangen werden. Zusätzlich erfolgt im Rahmen der - zur Entschwefelung erforderlichjen - nassen Rauchgasentschwefelungsanlage (REA) hinter dem Kraftwerkskessel eine (im Mittel begrenzte) Quecksilber-Abscheidung. Das Kohle-Kraftwerk unterschreitet also ohne weiteres den für Abfallverbrennungsanlagen vorgeschriebenen Grenzwert. In der älteren 13. BImSchV für die Großfeuerungsanlagen ist erstgar kein Quecksilber-Grenzwert vorgegeben worden.

Im Vergleich zu anderen Abfällen enthält die Shf zwar wenig Quecksilber, wenn man von

wenigen herausfallenden ShF-Hg-Werten absieht (vieleicht bedingt durch Fremdprodukte). Die Shf ist diesbezüglich eher mit kommunalen Klärschlämmen vergleichbar.

Coverbrennung von Abfällen mit Regelbrennstoffen

Da der Quecksilber-Gehalt vieler Abfälle (z. B. kommunale und industrielle Klärschlämmen und auch ShF) deutlich über dem Grenzgehalt liegt bzw. liegen kann, ist man bei Coverbrennung mit Regelbrennstoffen zu aufwendigen Rauchgas**nach**reinigungsmaßnahmen gezwungen.

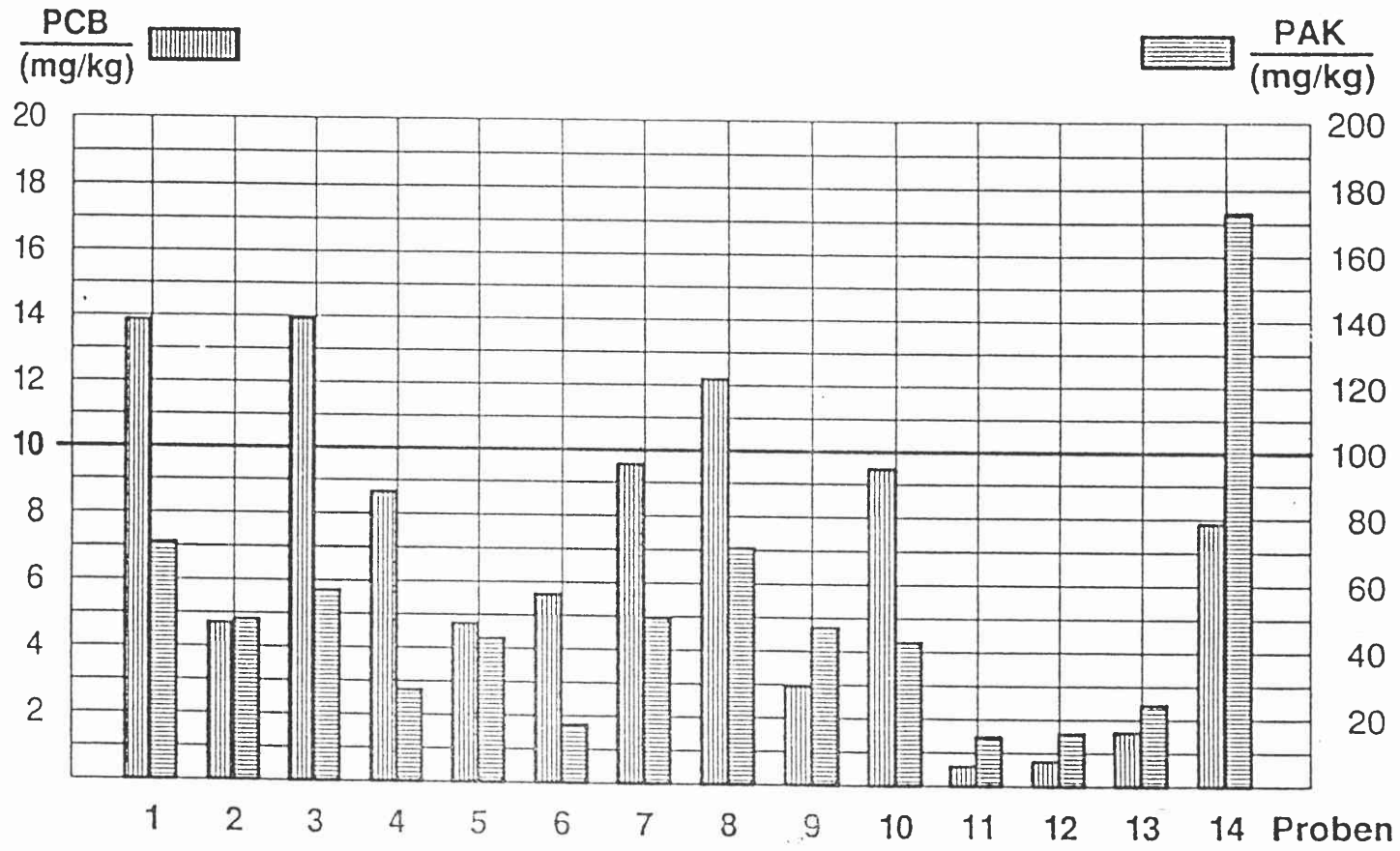
Die Kosten einer solchen Rauchgasnachreinigung - zwecks quantitativer Quecksilber-Abscheidung aus dem - gegenüber der Monoverbrennung - erheblich größeren Rauchgasstrom und demzufolge hochverdünntem Zustand liegen sehr hoch und machen die Coverbrennung mit Regelbrennstoffen uninteressant. Hinzu kommen natürlich weitere Gesichtspunkte gegen die Coverbrennung aus technischer Sicht. Diese "Gegenargumentation" betrifft aber nicht einige - aus Sicht der Verbrennung - "blütenreine" Abfälle (z. B. ohne nennenswerte Quecksilber- bzw. Chlor-Gehalte) wie gewisse Altpapiere und Altkunststoffe.

Entsprechende Überlegungen wie die soeben bzgl. der Coverbrennung Hg-reicher Abfälle mit Regelbrennstoffen durchgeführten Betrachtungen knüpfen sich - unter direktem Bezug auf den PCDD/F-Emissionsgrenzwert der 17. BImSchV und die sogenannte Mischungsregelung) an eine mögliche chlorbedingte Mehrbildung von PCDD/F durch verstärkte Denovo-Synthese. Diese Überlegung führt zum gleichen Ergebnis: Auch aus diesem Grunde würde eine aufwendige Rauchgasnachreinigung erforderlich, nun aber bzgl. PCDD/F. Die PCDD/F-Abreinigung müßte Endkonzentrationen weit unterhalb des Grenzwerts der 17. BImSchV (0,1 ng TE / $Nm^{3)}$ einhalten , nämlich Werte in der Nähe der Nullast-Konzentrationen (10 - 50 pg TE / Nm^3), also ziemlich dicht über Nachweisgrenze, vgl. Hoffmann /14/.

Blei- und Zink-Gehalt

Hier nur der Hinweis darauf, daß Blei und andere niedrig schmelzende Metalle in Feuerungen "abtropfen" und dann praktische Probleme bereiten können, beispielsweise an den Hausmüll-Feuerungsrosten.

Die hohen Zink-Gehalte der Shf streuen sehr und werden hier nicht gesondert untersucht. Zink kann, wie schon erwähnt, durch Bildung von Zinkchlorid eine Mitursache für stärkere Kesselverschmutzungen sein.

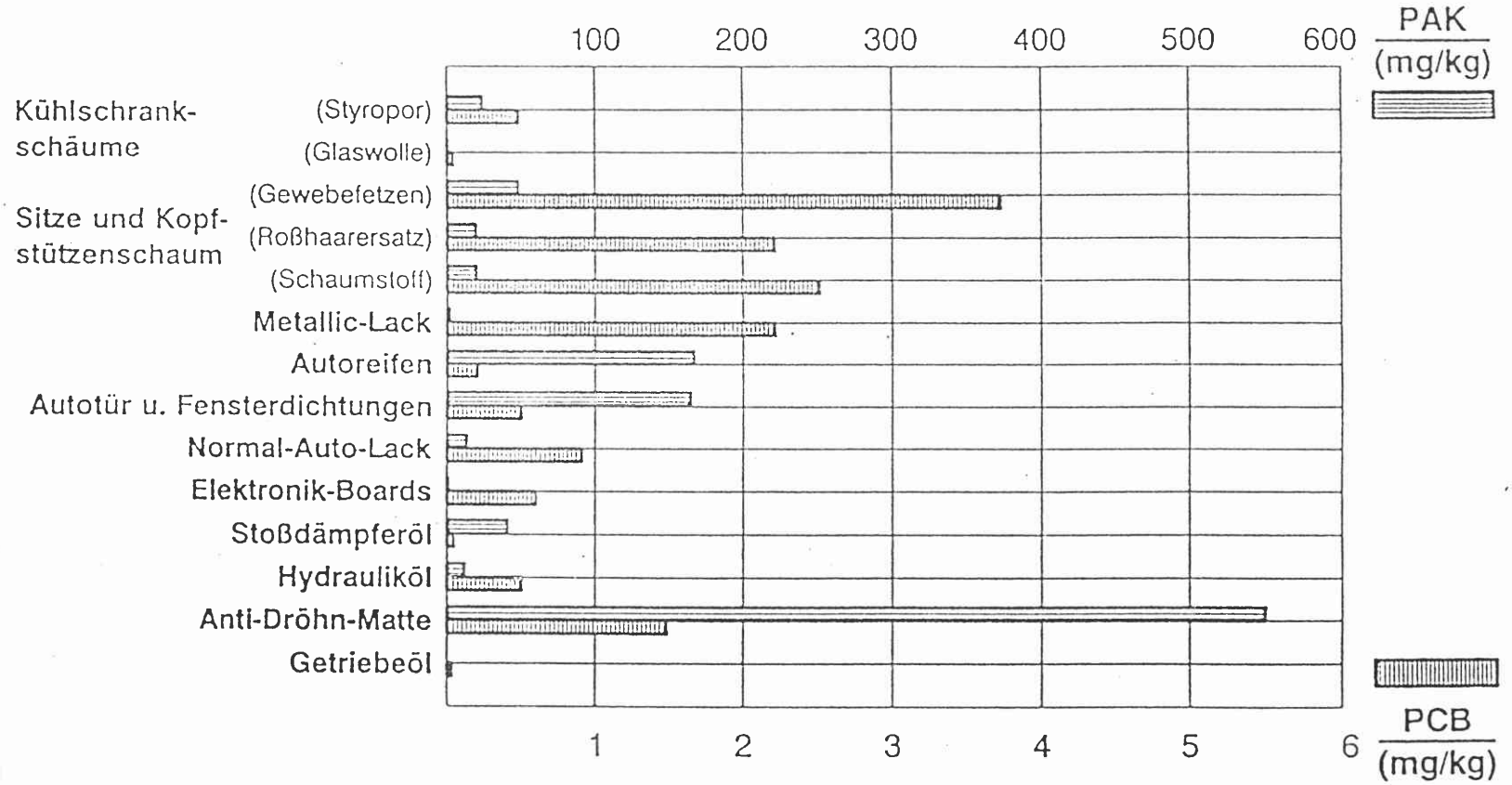


PCB -/ PAK-Gehalt von Shredderleichtmüll

Quelle: H. Nix (1990)

Bild 10

Bild 11



PCB -/ PAK-Gehalt von Einzelmaterialien im Altauto

Quelle: H. Nix (1990)

Entwicklung der Emissionsgrenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen seit 1974

	TA Luft 1974	TA Luft 1986 *	17. BImSchV *
Schwefeloxide	---	100 mg / m^3	50 mg / m^3
Stickstoffoxide	---	500 mg / m^3	200 mg / m^3
Kohlenmonoxid	1000 mg / m^3	100 mg / m^3	50 mg / m^3
Chlorwasserstoff	100 mg / m^3	50 mg / m^3	10 mg / m^3
Fluorwasserstoff	5 mg / m^3	2 mg / m^3	1 mg / m^3
Gesamtstaub	100 mg / m^3	30 mg / m^3	10 mg / m^3
Spezielle anorganische Stoffe			
Kl. I : Cd-, Tl-Verbindungen	20 mg / m^3	0,2 mg / m^3	0,05 mg / m^3
Hg und seine Verbindungen			0,05 mg / m^3
Kl. II : As, Co, Ni, (Se, Te)	20-50 mg / m^3	1,0 mg / m^3	0,5 mg / m^3
Kl. III : Cr, Cu, Mn, Pb, Sb, Sn, V	20-75 mg / m^3	5,0 mg / m^3	
Organische Stoffe, Gesamt - C	20-300 mg / m^3	20,0 mg / m^3	10,0 mg / m^3
PCDD + PCDF (Dioxine und Furane)	---	----	0,1 ng TE / m^3

* Tagesmittelwerte, bezogen auf 11 % O_2

Bild 12

12. Organische Schadstoffe (Bild 10 und Bild 11)

Die Shf enthält polychlorierte Biphenyle (PCB) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe sowie Spuren anderer organischer Schadstoffe, vgl. Tabelle 1 . Eine Übersicht über PCB- und PAK-Gehalte gibt Bild 10 /15/.

Bei Mitshredderung sogenannter "weißer Ware" wären auch R11-Kältemittelreste (Trichlor-Monofluor-Methan) aus dem Polyurethan-Hartschaum alter Kühlschränke im der gemischten Shf enthalten. Die thermische Destruktion von R 11 bei der Abfallverbrennung ist mehrfach untersucht worden und gelingt schon bei mittleren Temperaturen.

Eine vollständige thermische Destruktion aller Organica in der Feuerung und ihren nachgeschalteten gasseitegen Brennräumen muß sichergestellt sein. Die 17. BImSchV läßt nur einen geringen Gehalt von organischen Stoffen < 10 mg org. C /Nm^3 zu.

Auf die Forderung der 17. BImSchV nach einer hochtemperierten Nachbrennkammer (> 1200 °C) kommen wir später zurück. Sie erscheint nicht unverzichtbar. Es muß aber ein überzeugender Nachweis für eine weitgehend vollständige thermische Destruktion derr Organica erbracht werden. Die Vorgänge beim Gasphasen-Ausbrand in den gasseitigen Brennräumen sind - unter Berücksichtigung von Temperaturniveau, Luftüberschuß, Durchmischung und Verweilzeit - wichtig und das Verbrennungsergebnis analytisch genaustens zu untersuchen.

Zur besseren Orientierung bei der weiteren Diskussion von Versuchsergebnissen aus ShF-Verbrennungsversuchen gibt Bild 12 /15/ nochmals eine knappe Übersicht über die von der 17. BImSchV geforderten Emissionsgrenzwerte.

13. Ascheschmelzverhalten

Labor-Messungen des Ascheschmelzverhaltens von Shf liegen kaum vor.

Nach eigenen Messungen an der Altreifen-freien Shf /1/ ist die Shf-Schlacke sehr "kurz", d.h. sie erweicht und schmilzt in einem engen Temperaturbereich:

a) unter oxidierenden Bedingungen im Bereich von 1180 °C - 1210 °C
und
b) unter reduzierenden Bedingungen im Bereich von 1070 °C -1120 °C.

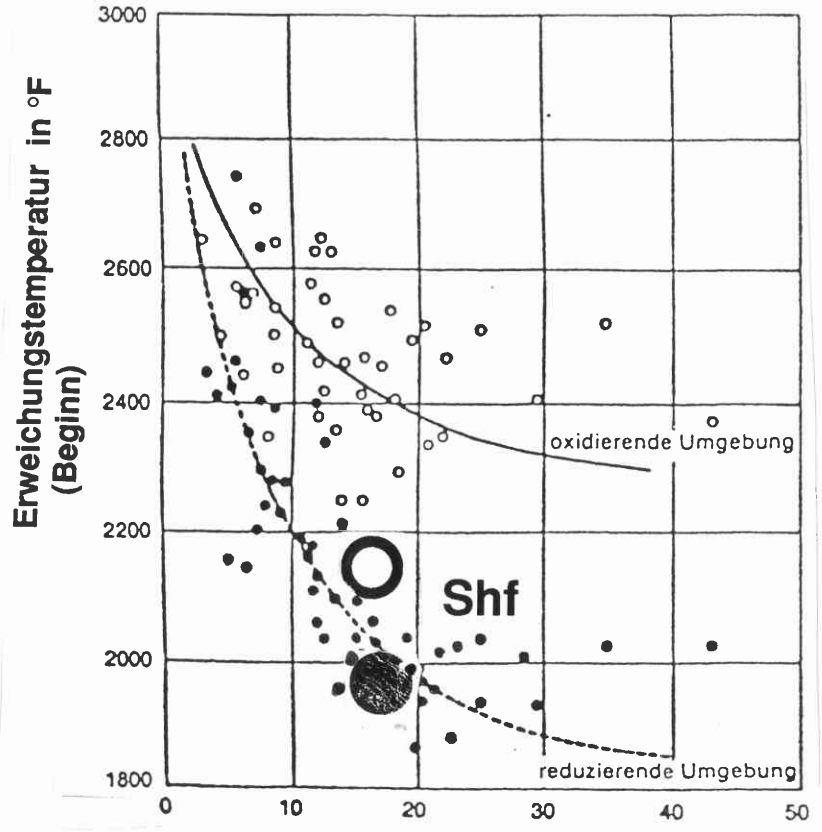
mit dem tieferen Wert als der Temperatur des Erweichungsbeginns und dem höheren Wert als Schmelztemperatur ("Halbkugeltemperatur"), vgl. Tabelle 1. (Die zugehörigen an nachveraschtem Schwelkoks ermittelten Werte lagen um nur ca. 20 - 50 °C tiefer /1/.)

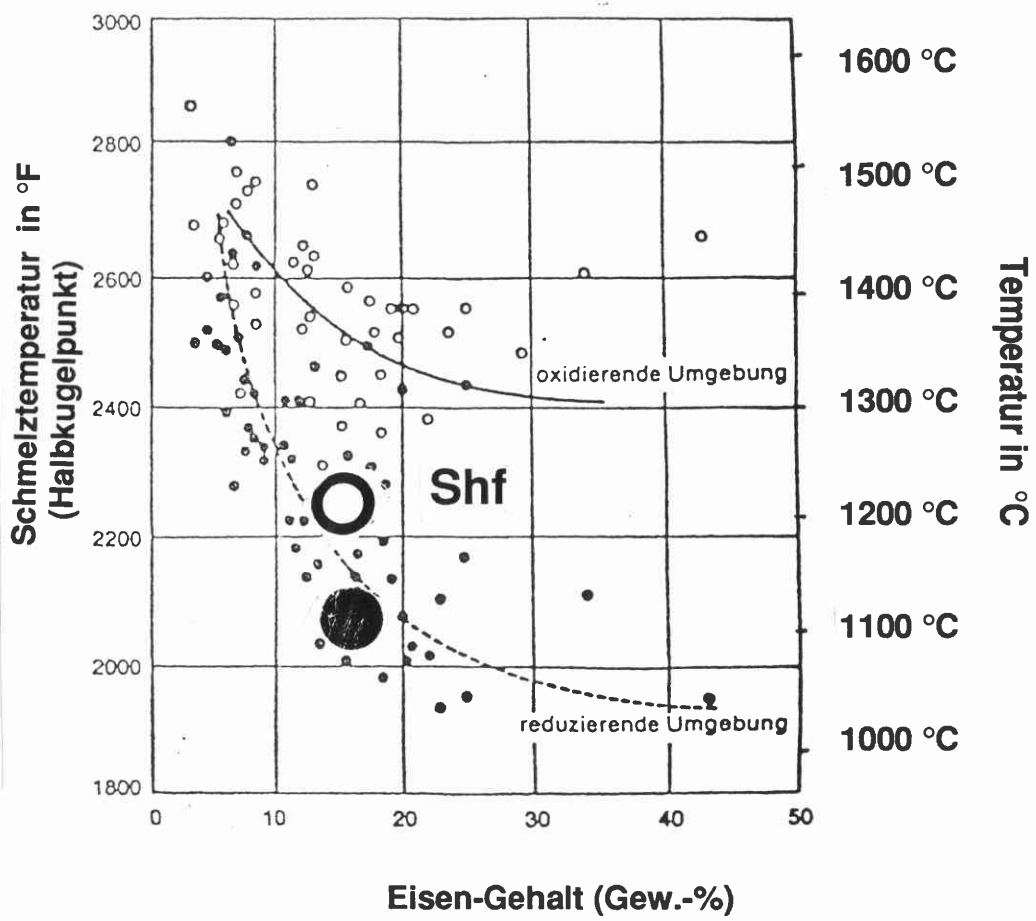
Reduzierende Bedingungen treten an jedem ab-/ausbrennenden Teilchen / Partikel - als Folge des laufenden Verbrennungsvorgangs selbst - auf. Sehr anschaulich zeigen dies die Untersuchungen von Andrei und Beér /16/. Am brennenden Partikel gelten also die tieferen Werte. Im Rauchgas werden aus Korrosionsgründen reduzierende Bedingungen tunlichst vermieden. Abgesehen von CO-reichen Teilzohnen (z. B. Flugkoks in sauerstoffarmen Rückströmungsgebieten) stellen sich reduzierende Bedingungen aber auch in ggf. flugkokshaltigen Ablagerungen ein. Nur für das ausgebrannte Partikel im sauerstoffhaltigen Rauchgas gelten die höheren Werte.

Beér hat an anderer Stelle /17/ auch gezeigt, welchen großen Einfluß Eisen (vermutlich als "Fayalit" 2 FeO x SiO_2 auf das Ascheschmelzverhalten von Kohleaschen hat, vgl. Bild 13. Shf enthält wie Kohle viel Eisen als Rost (vgl. Tabelle 1). Beim Schwel-Brenn-Versuch /1/ lag der Eisengehalt der Shf-Asche (Schmelzgranulat) - nach unseren weiteren Anlysen - bei 16 Gew.-%. Trägt man nun die obigen Werte hierzu in Bild 13 ein, so ergibt sich eine erkennbare Zuordnung zum Ascheschmelzverhalten von Kohleaschen. Die Shf-Erweichungs- und Schmelztemperaturen sind deutlich geringer als die von Steinkohlen (oder Steinkohlenkoksen), also Brennstoffen, für deren industrielle Verbrennung im "durchlüfteten Brennbett" Rost-Feuerungen zunächst entwickelt wurden.

Neben Eisen haben aber auch andere Substanzen erheblichen Einfluß auf das Ascheschmelzverhalten (z. B. die Alkalien) und wieder andere greifen in die Bildung von Kesselablagerungen ein (z. B. niedrig schmelzende Metallchloride

Bild 13





Einfluß von Eisen auf das Ascheschmelzverhalten von Kohlen und Shf (vgl. /17/)

wie Zinkchlorid). Gläser schmelzen teilweise erst bei höheren Temperaturen. Andere Gläser sind niedrigschmelzend. Der Einfluß von Gläsern auf das Ascheschmelzverhalten von Shf-Aschen wurde von uns nicht untersucht. Wenn Glas aufgeschmolzen und dabei mit anderen geschmolzenen Aschemineralen gemischt wird, verringert sich das Verhältnis Calciumoxid / Siliziumoxid der Schmelze, d.h. ihre sogenannte Basizität, und die Schmelztemperaturen sinken weiter.

Heute wird weltweit auch Hausmüll in Rost-Feuerungen verbrannt. Die Erweichungstemperatur von HM-Aschen liegt zum Teil bei nur 1000 °C - 1100 °C, ebenfalls deutlich tiefer als die von Steinkohlen. Daher ist bei der Hausmüll-Verbrennung sehr auf die Feuerungsführung zu achten, d. h. auf einen begrenzten Heizwert und eine optimierte (ggf. nachgeregelte) Luftverteilung, um Ascheschmelzfluß zu vermeiden.

In Altreifen-Kraftwerken /18 / werden Altreifen in Rost-Feuerungen verbrannt. Der Heizwert von Altreifen ist, wie früher gezeigt , hoch (ca. 31 GJ/t) und direkt mit Kohle vergleichbar. Aus Sicht von Hausmüll -Rost-Feuerungen erscheint er sehr hoch, doch ist der Aschegehalt der Altreifen wesentlich geringer als bedi Hausmüll, feiner im Brenngut verteilt und anders zusammengesetzt.

Es kommt also nicht nur auf den Heizwert eines Abfallbrennstoffs an , sondern auch auf seine "Stückigkeit", sein Back-/Erweichungsverhalten und schließlich das Ascheschmelzverhalten selbst. Auch aus diesem Grunde sind für eine Prüfung der verfahrenstechnischen Eignung einer Feuerung Verbrennungsversuche mit dem jeweiligen Abfall unumgänglich.

Wegen des hohen Asche-Gehalts der Shf, d.h. der relativ großen Aschemenge und wegen ihres Ascheschmelzverhaltens sind bei der Shf-Verbrennung in Rost-Feuerungen, aber auch in Drehrohr-Feuerungen und Wirbelschicht-Feuerungen spezifische Feuerungsprobleme zu erwarten. Diese werden bei der nachfolgenden Betrachtung von Feuerungen näher untersucht.

Literaturhinweise:

/ **1** / R. Martin, R. Rieß, B. Vosteen: **"Schwel-Brenn-Verfahren zur thermischen Behandlung der Shredderleichtfraktion"**, BAYER-Vortrag im Rahmen der VDI-VW-Gemeinschaftstagung "Neue Konzepte für die Autoverwertung, Wolfsburg, 26.-28. November 1991

/ **2** / **"Ruhrkohlen Handbuch"** Essen (1984)

/ **3** / M.R. Wolmann, W.S. Hubble, I.G. Most, S.L. Natov: **"Power Generation from Automobile Shredder Waste Fuel: Characterization and System Feasibility"**, U.S. Department of Energy (1985)

/ **4** / R.S. Taberny, K. Dangtran: **"Fluidized Bed Incineration of Automobile Shredder Residue"**, National Meeting of The Institute of Scrap Recycling Industries, New Orleans, 9.- 14. März (1990)

/ **5** / F. Schmieg : **Persönliche Mitteilung** im Rahmen der Zusammenarbeit des VDI-Arbeitskreises "Thermische Behandlung von Rückständen der Automobilindustrie" (1992)

/ **6** / R. D. Griffin: **"A New Theory of Dioxin Formation in Municipal Solid Waste Combustion"**, Chemosphere 15 (1986), S. 1987 - 1990

/ **7** / M. Frankenhaeuser: **"Co-Combustion of Mixed Plastics with Coal in a Bubbling Fluidised Bed Incinerator" "**, Untersuchung der Fa. Neste OY, Finnland, mit Unterstützung des PWMI/Brüssel (veröffentlichter Bericht (1992))

/ **8** / O. Abel, I. Avramidis: **"Systemstudie zur pyrolytischen Entsorgung von Siedlungsabgfall, Sonderabfall, Klärschlamm und Altlasten "** im Rahmen einer Diplomarbeit an der TU Clausthal (1988) für Fa. Steinmüller, Gummersbach

/ **9** / Y. Lee: **"Update to Emission Control"**, Fa. Ahlstrom Pyropower (1991)

/10 / **"Thermische Verwertung kunststoffreicher Abfallfraktionen "**, Studie der Fa. Fichtner im Auftrag des VKE (1989)

/11 / G. Bohnsack: **"Chlorid-Hochtemperaturkorrosionen am austenitischen Überhitzer eines braunkohlebefeuerten Dampferhitzers "**, VGB-Kraftwerkstechnik (1984)

/12/ Persönliche Mitteilungen im Rahmen der VGB-Arbeitsgruppe **"Abfallmitverbrennung in Kraftwerksfeuerungen"** (1991)

/13 / W. Trötsch: **"Cadmium - Anwendung, Recycling, Ersatzprodukte"** UWSF-Z. Umweltchem. Ökotox. 2 (4) (1990), S. 226-230

/14 / V. Hoffmann : **" Emissionen aus Anlagen der 17. BImSchV"**, Vortrag anläßlich der Veranstaltung "Rechtliche und technische Lösungen zur Umsetzung der Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe - 17. BImSchV", Haus der Technik, Essen, am 3./4. 2. 1992

/15 / H. Nix: **"Shredderleichtmüll aus der Sicht der Entsorgungsindustrie"**, IUTA-Workshop "Entsorgung von Shredderleichtmüll", Duisburg, am 7. 9. 1990

/16 / M. A. Andrei, A. F. Sarofim, J. L. Beér: **"Time-resolved Burnout of Coal Particles in a Fluidised Bed"** Combustion and Fläme 61 (1985), S. 17 - 27

/17 / J. L. Beér et al.: **"Das Verhalten von konzentrierten Kohlenwasserschlämmen hinsichtlich Verbrennung, Wärmeübertragung, Schadstoffemissionen und Ascheablagerung"** VGB Kraftwerkstechnik 65 (1985), S. 939 - 956

/18 / **"Altreifen Heizkraftwerke"** Fa. Fichtner, Firmenschrift Nr. 51 (Januar 1991)

/19 / D. O. Reimann: **"Heizwert und Schwermetalle aus Klärschlamm"**

Vortrag im Rahmen des VDI -Bildungswerks "Klärschlammentsorgung", Düsseldorf, am 16./17. Januar 1989