

Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik

Band 5

Herausgeber: Arnd I. Urban, Kassel
Franz-Bernd Frechen, Kassel

Untersuchungen zur Bestimmung des Verbrennungsverhaltens von festen Abfallstoffen

Hendrik Seeger

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Bauingenieurwesen Fachgebiet Abfalltechnik der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz
Erster Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Arnd I. Urban
Zweiter Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. Manfred Born
Erster Prüfer :	Prof. Dr.- Ing. Franz-Bernhard Frechen
Zweiter Prüfer :	Prof. Dr.-Ing. Bernd Bilitewski

Tag der mündlichen Prüfung

3. März 2005

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2005

ISBN 3-89958-144-X

URN urn:nbn:de:0002-1449

2005, kassel university press GmbH, Kassel
www.upress.uni-kassel.de

Umschlaggestaltung: Bettina Brand Grafikdesign, München
Druck und Verarbeitung: Unidruckerei der Universität Kassel
Printed in Germany

Vorwort

Die Idee zu der Thematik der vorliegenden Arbeit entstand in der Zeit, in der im Zuge der neu belebten Diskussion um den Einsatz von Abfällen als Ersatzbrennstoff neben Schadstoffparametern fast ausschließlich der Heizwert als Kriterium betrachtet wurde. Die Feststellung zu treffen, dass diese Betrachtungsweise zu kurz griff, war aufgrund der im Fachgebiet Abfalltechnik vorliegenden Erfahrungen, und auch der eigenen Erfahrungen mit dem Element Feuer, die weit in meine Kindheit zurückreichen, einfach. Schwer dagegen war es, diese Erkenntnis in einen wissenschaftlichen Ansatz umzusetzen. Ich hoffe, dass es mir gelungen ist, mit dieser Arbeit einen kleinen Beitrag zu dem immer noch weit offenen Feld der wissenschaftlichen Beschreibung der Verbrennung fester Abfälle beigesteuert zu haben.

Danken möchte ich Prof. Urban, der mir die Möglichkeit gegeben hat, diese Arbeit im Fachgebiet Abfalltechnik anzufertigen und ihre Entstehung in unseren zahlreichen, konstruktiven Gesprächen begleitet hat. Mein Dank gilt auch Prof. Born, der als Gutachter einen wesentlichen Anteil daran hat, dass ich meine Promotion zeitnah zu meiner Tätigkeit an der Universität Kassel abschließen konnte.

Von all den weiteren Personen, die die Fertigstellung dieser Arbeit ermöglicht haben, und denen dafür mein Dank gilt, möchte ich noch meine Kollegen Gregor Dürl, dessen messtechnische Kenntnisse vieles erleichtert bzw. erst möglich gemacht haben, und Olaf Kock, der mir durch unsere Diskussionen viele Impulse geben konnte, nennen. Ebenfalls erwähnen möchte meine ehemaligen studentischen Hilfskräfte Ruth Arens, die sich inzwischen selber an einer Promotion versucht, Marina Kipnis und Martin Blaschke, der Einsatz nicht hoch genug bewertet werden kann. Und natürlich danke ich auch Laila für den großen Rückhalt im Privaten.

Ein besonderes Anliegen ist es mir an dieser Stelle Helma und Hans (†) Jacobsen zu danken, die mit ihrer selbstlosen Großzügigkeit während meines Studiums mithalfen, den Grundstein für diese Arbeit zu legen.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Abfallwirtschaftlicher Hintergrund – Erzeugung und Verwertung von Ersatzbrennstoffen	5
2.1 Anlagen zur thermischen Verwertung von Ersatzbrennstoffen	6
2.2 Ersatzbrennstoffaufkommen, Verwertungskapazitäten und verwertete Mengen	7
2.2.1 Aufbereitete Abfälle	8
2.2.2 Produktionsabfälle	11
2.3 Ausblick zum Aufkommen und zur Verwertung von Ersatzbrennstoffen aus aufbereiteten Abfällen	14
3. Verbrennungsverhalten von festen Brennstoffen	16
3.1 Theorie der Feststoffverbrennung	17
3.2 Bestimmung von Brennstoffeigenschaften durch normierte Methoden	22
3.3 Experimentelle Ansätze zur Untersuchung des Verbrennungsverhaltens von Festbrennstoffen	24
3.3.1 Untersuchungsmethoden für Kohlen	24
3.3.2 Untersuchungsmethoden für Biomasse	26
3.3.3 Untersuchungsmethoden für Siedlungsabfälle	27
4. Entwicklung und Optimierung der Technikumsverbrennungsanlage	29
4.1 Problematik der experimentellen Abfalluntersuchungen	30
4.2 Entwicklungsstand der TVA bei Beginn der Arbeit	32
4.3 Weiterentwicklung entsprechend der Fragestellungen zum energetischen Verhalten fester Abfälle	36
4.3.1 Modifikationen zur Verbesserung des Verbrennungsbetriebes	36
4.3.2 Modifikationen zur verbesserten Messung energetischer Parameter	38
4.3.3 Aktueller Entwicklungsstand der TVA	39

4.4 Betrachtung der statistischen Bestimmungsgenauigkeit der Untersuchungsergebnisse an der TVA	40
4.4.1 Bewertung der Bestimmungsgenauigkeit der TVA	41
4.4.2 Vergleich der Bestimmung energetischer Größen an der TVA mit anderen Analyseverfahren	44
5. Experimentelle Untersuchungen zur Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens von festen Abfallstoffen	47
5.1 Methodik der Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens auf der Basis von semi-kontinuierlichen Verbrennungsversuchen	47
5.1.1 Entwicklung des Untersuchungsansatzes	47
5.1.2 Durchführung der semi-kontinuierlichen Verbrennungsversuche zur Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens	51
5.1.3 Bildung der charakteristischen Kurven und des Energiefreisetzungs-wertes als Grundlage für die Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens	54
5.2 Physikalische Beschreibung des Verbrennungsvorganges in der TVA	59
5.2.1 Die Aufheizphase	59
5.2.2 Die Anfahrphase der Feststoffverbrennung	60
5.2.3 Die stabile Hauptphase der Feststoffverbrennung	62
5.3 Untersuchungen zum stoffspezifischen Verbrennungsverhalten von Monofraktionen fester Abfallstoffe	68
5.3.1 Auswahl und Aufbereitung der Abfallstoffe	68
5.3.2 Ergebnisse der Untersuchungen zum Verbrennungsverhalten auf der Basis von semi-kontinuierlichen Verbrennungsversuchen	71
5.4 Untersuchungen zum Verbrennungsverhalten von Abfallgemischen	83
5.5 Ausblick zur Anwendung und weiteren Untersuchung der Charakterisierungsgrößen des Verbrennungsverhaltens	92

6. Anwendung der Charakterisierungsgrößen des Verbrennungs- verhaltens für den Einsatz von festen Abfallstoffen in Verbren- nungsanlagen	94
6.1 Auswirkungen eines veränderten Verbrennungsverhaltens	95
6.2 Anwendung der Charakterisierungsgrößen zur Bewertung des Einsatzes fester Abfallbrennstoffe	97
6.2.1 Betriebsoptimierung bei Müllverbrennungsanlagen	99
6.2.2 Einsatz in Energetischen Verwertungsanlagen	101
6.2.3 Einsatz in Kohlekraftwerken	102
6.2.4 Einsatz in Zementwerken	103
7. Zusammenfassung	104
8. Literatur	107

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Aufkommen und verwertete Mengen an, sowie Verwertungs- kapazitäten für Ersatzbrennstoffen aus aufbereiteten Abfällen	9
Abbildung 2	Aufkommen an Ersatzbrennstoffen aus Produktionsabfällen	12
Abbildung 3	Verwertete Mengen an Ersatzbrennstoffen aus Produktions- abfällen	12
Abbildung 4	Genehmigte Verwertungskapazitäten und verwertete Mengen an Ersatzbrennstoffen aus Produktionsabfällen in Zementwer- ken und Kraftwerken	13
Abbildung 5	Verbrennungsprozess eines Festbrennstoffkorns	18
Abbildung 6	Verbrennungsphasen bei der Feststoffverbrennung	19
Abbildung 7	Entgasungsraten der flüchtigen Bestandteile von Steinkohle in Abhängigkeit von der Temperatur	20
Abbildung 8	Wirkungsbereiche der Kinetik und der Diffusion bei der Kohlen- stoffverbrennung	21
Abbildung 9	Vergleich der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten k_D^* für die Flüchtigenverbrennung und $k_{C,CFix}$ für die Restkoksverbrennung unterschiedlicher Biomassen	26
Abbildung 10	Vorteile des Bilanzierungsverfahrens gegenüber anderen Ana- lysemethoden	31
Abbildung 11	Konfiguration der Technikumsverbrennungsanlage (TVA)	32
Abbildung 12	Feststoffbrenner mit Primärluftzufuhr im Vordergrund	33
Abbildung 13	Modifikationen der TVA zur Verbesserung der Untersuchung energetischer Fragestellungen	36
Abbildung 14	Konstruktionszeichnung des neuen Verbrennungsrostes	37
Abbildung 15	Energieflussdiagramme der TVA für die alte und die aktuelle Anlagenkonfiguration	40
Abbildung 16	Arbeitsschritte bei der Probenaufbereitung mit Zeitangaben für die Hauptschritte	46
Abbildung 17	Temperaturverlaufskurven im Rauchgas bei der semi-kon- tinuierlichen Verbrennung unterschiedlicher Abfallgemische	48
Abbildung 18	Verläufe der Messgrößen ΔT_{Rg} und ΔT_{Kw} und des Wärmestrom- es der freigesetzten Energie bei einem Verbrennungsversuch mit Holz	49
Abbildung 19	Charakteristische Kurven der freigesetzten Energie unter- schiedlicher Abfallgemische	50
Abbildung 20	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von zerkleinerten Textilien über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	54
Abbildung 21	Bestimmung der mittleren Steigungen für die Rauchgastempe- raturpeaks	55
Abbildung 22	t_{zu} , t_{zw} und t_{ab} eines charakteristischen Peaks bei einem Ver- such mit Textilien ohne Berücksichtigung des Wärmestroms aus der Ölverbrennung	57
Abbildung 23	Steigungen der Q/t-Zunahme und der Q/t-Abnahme für den charakteristischen Peak bei einem Versuch mit Textilien	58

Abbildung 24	Verlauf der erfassten Output-Wärmeströme zu Beginn eines Verbrennungsversuches bei reinem Ölbrennerbetrieb	59
Abbildung 25	Entwicklung der Verbrennungsleistung während der Anfahrphase der Feststoffverbrennung	61
Abbildung 26	Verlauf der Verbrennungsleistung während der stabilen Hauptphase der Feststoffverbrennung bei einem Versuche mit PET	62
Abbildung 27	Mittlere Verbrennungsleistung pro Intervall für eine Holzzugabe	64
Abbildung 28	Rechnerischer Verlauf der Entgasungs- und Verbrennungsgeschwindigkeit	65
Abbildung 29	Mittlere Verbrennungsraten pro Intervall für eine Holzzugabe	67
Abbildung 30	Korngrößenbereiche der Abfallfraktionen nach der Vorzerkleinerung	70
Abbildung 31	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Textilien	72
Abbildung 32	Aus den Verbrennungsversuchen gebildete charakteristische Energiefreisetzungskurven der untersuchten Abfallfraktionen ohne Berücksichtigung des Wärmestroms aus der Ölverbrennung	74
Abbildung 33	Zusammenhang zwischen dem Heizwert und dem Energiefreisetzungswert für die untersuchten Abfallfraktionen	76
Abbildung 34	Zusammenhang zwischen dem Aschegehalt und dem Energiefreisetzungswert für die untersuchten Abfallfraktionen	76
Abbildung 35	Zusammenhang zwischen dem Energiefreisetzungswert, dem Heizwert der flüchtigen Bestandteile und der während der Peakbildung verbrannten Masse flüchtiger Bestandteile	77
Abbildung 36	Heizwert, t_v und EFW der untersuchten Fraktionen	80
Abbildung 37	Vergleich der a_{QRG1} und a_{QW1} jeweils einer Fraktion aus einer Festbrennstoffgruppe	81
Abbildung 38	Aus den Verbrennungsversuchen gebildete charakteristische Energiefreisetzungskurven der untersuchten Holz/Papier-Mischfraktionen ohne Berücksichtigung des Wärmestroms aus der Ölverbrennung	86
Abbildung 39	Aus den Verbrennungsversuchen gebildete charakteristische Energiefreisetzungskurven der untersuchten Holz/PET-Mischfraktionen ohne Berücksichtigung des Wärmestroms aus der Ölverbrennung	87
Abbildung 40	Rechnerisch aus den Einzelfraktionen und direkt aus den Versuchsdaten bestimmte Werte für Q_{Peak} der untersuchten Mischfraktionen	90
Abbildung 41	Potentielle Auswirkungen beim Einsatz von Brennstoffen mit einem vom Regelfeststoff abweichenden Verbrennungsverhalten	98

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Berücksichtigte Anlagenarten zur thermischen Verwertung von Ersatzbrennstoffen	6
Tabelle 2	Normierte Methoden zur Bestimmung von Eigenschaften fester Brennstoffe	23
Tabelle 3	Ergebnisse einer labortechnischen Untersuchung von Kohlen mit den Normmethoden und den Methoden nach ZELKOWSKI	25
Tabelle 4	Ergebnisse der Heizwertbestimmungen von Abfallmonofractionen an der TVA	41
Tabelle 5	Fehlerbetrachtung für einen Verbrennungsversuch	43
Tabelle 6	Mittelwerte und Spannbreiten der Variationskoeffizienten bei den Heizwertanalyseverfahren Kalorimeteranalyse, Modellierung und Bilanzierung	44
Tabelle 7	Spannbreite des mit Hilfe der Messgrößen ΔT_{Rg} und ΔT_{Kw} erfassten Anteiles der Output-Wärmeströme	49
Tabelle 8	Spannbreite der Brennerleistungen, der Erfassungsgrade bei t_1 und der Zeitpunkte t_1^*	60
Tabelle 9	Reihenfolge der Verbrennungsversuche	71
Tabelle 10	Abweichungen der charakteristischen Energiefreisetzungskurven vom realen Verlauf der erfassten Outputwärmeströme	72
Tabelle 11	Mittlere Abweichungen der freigesetzten Energie pro Verbrennungsintervall bei den charakteristischen Energiefreisetzungskurven im Vergleich zum realen Verlauf der erfassten Outputwärmeströme	73
Tabelle 12	Ergebnisse der Bestimmung der EFW	75
Tabelle 13	Unterteilung der untersuchten Abfallfraktionen in Festbrennstoffgruppen anhand ihres EFW	78
Tabelle 14	Heizwert, t_v und EFW der untersuchten Fraktionen	79
Tabelle 15	Untersuchte Brennstoffmischungen	84
Tabelle 16	Abweichungen der charakteristischen Energiefreisetzungskurven vom realen Verlauf der erfassten Outputwärmeströme bei den Mischfraktionen	85
Tabelle 17	Mittlere Abweichungen der freigesetzten Energie pro Verbrennungsintervall bei den charakteristischen Energiefreisetzungskurven im Vergleich zum realen Verlauf der erfassten Outputwärmeströme bei den Mischfraktionen	85
Tabelle 18	EFW und t_v der untersuchten Mischfraktionen	88
Tabelle 19	Charakterisierung der Anlagen in denen feste Abfälle verbrannt werden	95

Abbildungen im Anhang

Abbildung A1	Bilanzraum für die Heizwertbestimmung an der TVA	A2
Abbildung A2	Mit Ruß und Silikon gefüllter Gummi	A9
Abbildung A3	Darstellung der vorzerkleinerten Holzbriketts	A9
Abbildung A4	Fraktion der zerkleinerten Mischkunststoffe	A10
Abbildung A5	Zerkleinertes Papier	A10
Abbildung A6	PET-Flaschen im zerkleinerten Zustand	A11
Abbildung A7	Fraktion Tetra-Packs im zerkleinerten Zustand	A11
Abbildung A8	Vorzerkleinerte Bekleidungstextilien	A12
Abbildung A9	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Gummi(1) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A17
Abbildung A10	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Gummi(1)	A17
Abbildung A11	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Gummi(2) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A18
Abbildung A12	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Gummi(2)	A18
Abbildung A13	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Holz(1) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A19
Abbildung A14	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Holz(1)	A19
Abbildung A15	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Holz(2) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A20
Abbildung A16	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Holz(2)	A20
Abbildung A17	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Mischkunststoffen(1) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A21

Abbildung A18	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Mischkunststoffen(1)	A21
Abbildung A19	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Mischkunststoffen(2) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A22
Abbildung A20	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Mischkunststoffen(2)	A22
Abbildung A21	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Papier(1) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A23
Abbildung A22	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Papier(1)	A23
Abbildung A23	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Papier(2) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A24
Abbildung A24	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Papier(2)	A24
Abbildung A25	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von PET(1) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A25
Abbildung A26	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von PET(1)	A25
Abbildung A27	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von PET(2) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A26
Abbildung A28	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von PET(2)	A26
Abbildung A29	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Tetra-Packs(1) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A27
Abbildung A30	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Tetra-Packs(1)	A27

Abbildung A31	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Tetra-Packs (2) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A28
Abbildung A32	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Tetra-Packs(2)	A28
Abbildung A33	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Textilien(1) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A29
Abbildung A34	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Textilien(1)	A29
Abbildung A35	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Textilien(2) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A30
Abbildung A36	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Textilien(2)	A30
Abbildung A37	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho2Pap1(a) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A32
Abbildung A38	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho2Pap1(a)	A32
Abbildung A39	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho2Pap1(b) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A33
Abbildung A40	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho2Pap1(b)	A33
Abbildung A41	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho1Pap1(a) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A34
Abbildung A42	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho1Pap1(a)	A34
Abbildung A43	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho1Pap1(b) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A35

Abbildung A44	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho1Pap1(b)	A35
Abbildung A45	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho1Pap2(a) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A36
Abbildung A46	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho1Pap2(a)	A36
Abbildung A47	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho1Pap2(b) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A37
Abbildung A48	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho1Pap2(b)	A37
Abbildung A49	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho2Pet1 über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A38
Abbildung A50	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho2Pet1	A38
Abbildung A51	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho1Pet1(a) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A39
Abbildung A52	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho1Pet1(a)	A39
Abbildung A53	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho1Pet1(b) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A40
Abbildung A54	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho1Pet1(b)	A40
Abbildung A55	Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho1Pet2 über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches	A41
Abbildung A56	Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho1Pet2	A41

Tabellen im Anhang

Tabelle A1	Messgrößen für die Heizwertbestimmung an der TVA	A3
Tabelle A2	Rechengrößen für die Heizwertbestimmung an der TVA	A3
Tabelle A3	Heizwerte der Komponenten der flüchtigen Bestandteile	A13
Tabelle A4	Heizwert und Anteil der flüchtigen Bestandteile für die untersuchten Abfallfraktionen	A14
Tabelle A5	Erfasste Anteile der Ölbrenner- und der Gesamtverbrennungsleistung bei den Untersuchungen der Monofraktionen fester Abfallstoffe	A15
Tabelle A6	Abweichungen der charakteristischen Energiefreisetzungs-kurven vom realen Verlauf der erfassten Outputwärmeströme	A16
Tabelle A7	Abweichungen der charakteristischen Energiefreisetzungs-kurven vom realen Verlauf der erfassten Outputwärmeströme	A31

Abkürzungsverzeichnis

A	Aschegehalt o. Fläche
a	Steigung
BRAM	Brennstoff aus Müll
C	Gehalt an fixen Kohlenstoff
cp	spezifische Wärmekapazität
d _A	Oberflächengleicher Äquivalenzdurchmesser
dp	Partikeldurchmesser
E	Aktivierungsenergie
EFW	Energiefreisetzungswert
EnVA	Energetische Verwertungsanlage
ESB	Ersatzbrennstoff
F	Gehalt an flüchtigen Bestandteilen
Hu	Heizwert
k _{0E}	Frequenzfaktor der Entgasung
k _{C,fix}	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante der Restkoksverbrennung
k _D [*]	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante der Flüchtigenverbrennung
k _{Mess}	Korrekturfaktor für den messtechnisch erfassten Anteil von Q/t
m	Masse
m ₀	Ausgangsmasse
\dot{m}	Massenstrom
MBA	Mechanisch – Biologische Behandlungsanlage
MBS	Mechanisch – Biologische Stabilisierungsanlage
Q	Energie
\dot{Q}	Wärmestrom
\dot{Q}_0	Grundniveau einer charakteristischen Energiefreisetzungskurve
R	Universelle Gaskonstante
R ²	Korrelationskoeffizient
Stabw.	Standardabweichung
TVA	Technikumsverbrennungsanlage
T	Temperatur
t	Zeit
\dot{V}	Volumenstrom
W	Wassergehalt
ΔT	Temperaturdifferenz
$\frac{\partial \Phi_i}{\partial f_i}$	Partielle Ableitung einer Wertefunktion

Verzeichnis der Indizes

ab	Teilintervall der Wärmestromabnahme bei einem charakteristischen Peak
Br	Brennbares
F	Flüchtige Bestandteile
i,an	Analysenfeuchter Zustand
i,awf	Asche- und wasserfreier Zustand
Kw	Kühlwasser
kk	Restkoks, fixer Kohlestoff
Rg	Rauchgas
V	Verbrennung
z	Zündung
zu	Teilintervall der Wärmestromzunahme bei einem charakteristischen Peak
zw	Zwischenintervall einem charakteristischen Peak

1. Einleitung

Der Beginn der Industrialisierung hat einen sich immer noch beschleunigenden Prozess der technologischen Entwicklung in Gang gebracht, der unserer Gesellschaft einen Lebensstandard ermöglicht, der vorigen Generationen sicherlich kaum vorstellbar erschien. Doch hat die Etablierung der daraus resultierenden sogenannten Konsumgesellschaft auch ihre Schattenseiten. Wo viel verbraucht wird, fällt in logischer Konsequenz auch viel Abfall an. Dass Abfall nicht nur lästig ist, sondern von ihm auch eine Gefährdung für die Umwelt und damit auch wieder für den Menschen ausgeht, ist ein Gedanke, der sich in Deutschland, ebenso wie in den anderen westlichen Industrienationen, spätestens seit den 70er Jahren allgemein verankert hat.

Um diese Gefährdung auch für spätere Generationen zu vermeiden, wurde mit dem In-Kraft-Treten der TA Siedlungsabfall (TASi) 1993 für Deutschland beschlossen, dass nur noch Abfälle abgelagert werden dürfen, die durch eine Behandlung in Bezug auf ihr biologisches und toxisches Reaktionspotential weitgehend inertisiert worden sind. Der für die Umsetzung dieses Zieles eingeräumte Übergangszeitraum endet am 31.5.2005. Nach derzeitigem Stand ist es absehbar, dass dann keine ausreichenden Kapazitäten an Abfallbehandlungsanlagen zur Verfügung stehen werden, um alle in Deutschland anfallenden Siedlungsabfälle zu behandeln.

Ein potentieller Ausweg wird in dem verstärkten Einsatz von zu Ersatzbrennstoff aufbereiteten Abfällen gesehen, einer Möglichkeit, die bereits seit dem Ende der 90er Jahre wieder zunehmend verfolgt wird. Dabei erfolgt die Verbrennung der Ersatzbrennstoffe aus Abfall in industriellen Feuerungen, womit einerseits eine Behandlung der Abfälle erfolgt und andererseits fossiler Brennstoff eingespart wird.

Im Zuge der erwarteten Zunahme des Einsatzes von Ersatzbrennstoffen aus Abfall in unterschiedlichen Verbrennungsprozessen gewinnt die Bestimmung des Verbrennungsverhaltens der sehr unterschiedlichen Stoffe oder Stoffgemische, die unter dem Begriff Ersatzbrennstoff bzw. Sekundärbrennstoff zusammengefasst werden, stark an Bedeutung.

Eine wesentliche Brennstoffeigenschaft zeigt sich in dem zeitabhängigen und energetischen Verhalten des Brennstoffs während des Verbrennungsprozesses. Bei optimierten Verbrennungsprozessen ist es für einen Anlagenbetreiber sehr wichtig zu

wissen, ob ein potentieller Ersatzbrennstoff ein Verbrennungsverhalten aufweist, das von dem des Regelbrennstoffes, für den seine Anlage ausgelegt wurde, abweicht. Doch besteht hier für die Verbrennung von Festbrennstoffen noch ein großes Wissensdefizit. Dieses betrifft auch immer noch die Kohle, trotz ihrer über 250jährigen technologischen Geschichte. Mithilfe der normierten Analysemethoden für Festbrennstoffe (z. B. DIN-Normen zur Immediatanalyse) ist aber das Verbrennungsverhalten, insbesondere das zeitabhängige Verhalten, nicht ausreichend charakterisierbar, auch nicht für den Primärbrennstoff Kohle, für den diese Verfahren ursprünglich entwickelt wurden.

Inzwischen wurde von Seiten der deutschen Kraftwerksbetreiber, vertreten durch die Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber VGB, auf dieses Defizit reagiert. Es wurde eine neue Richtlinie „Charakterisierung von Kraftwerkskohlen“ erarbeitet, in die auch neuentwickelte Laborverfahren und aus diesen Verfahren abgeleitete Kennzahlen zur Beschreibung des Verbrennungsverhaltens eingegangen sind. Die Möglichkeiten der Einschätzung des Verbrennungsverhaltens aufgrund dieser labortechnischen Kennzahlen wurde bereits durch den Vergleich mit praktischen Betriebserfahrungen zum Verbrennungsverhalten in Großanlagen verifiziert. Leider sind die Bestimmungsverfahren aber auf den Brennstoff Kohle zugeschnitten und die Anwendbarkeit auf andere Brennstoffe ist nicht ohne weiteres möglich.

Dafür, dass auch das Verbrennungsverhalten von Festbrennstoffen aus Abfall näher charakterisiert werden sollte, sprechen im wesentlichen zwei Gründe. Zum einem unterliegen die an den konventionellen Müllverbrennungsanlagen angelieferten Abfälle seit dem Inkrafttreten des KrW-/AbfG starken Schwankungen, die zu ungünstigen Betriebsbedingungen oder sogar Betriebsstörungen führen. Hier könnte das Wissen über das charakteristische Verbrennungsverhalten dabei helfen einzuschätzen, wie und ob überhaupt eine Abfallcharge in den Verbrennungsbetrieb zu integrieren ist. Zum anderen ist aufgrund des Defizits bei den Behandlungskapazitäten für Abfälle bei Umsetzung der TASI ab 2005 damit zu rechnen, dass große Abfallmengen als Ersatzbrennstoff in industriellen Feuerungen oder in speziellen Neuanlagen energetisch verwertet werden müssen. Bei dem Einsatz von Ersatzbrennstoffen aus Abfall ergeben sich drei Hauptproblemfelder:

1. durch eine entsprechende Kesselkonfiguration soll ein möglichst hoher Wirkungsgrad bei der Nutzung der, durch die Verbrennung freiwerdenden, Energie erreicht werden;
2. die Korrosion muss in einem Rahmen bleiben, der eine wirtschaftliche Betriebsweise der Verbrennungsanlage im Vergleich zu anderen Anlagen ermöglicht;
3. die Schadstoffimmissionen müssen innerhalb der zulässigen Grenzen bleiben.

Wie im Verlauf der Arbeit noch erläutert wird, ist besonders in Hinblick auf das erste Problemfeld das Verbrennungsverhalten von entscheidender Bedeutung. Aber auch auf die anderen Problemfelder hat das Verbrennungsverhalten einen Einfluss. Sowohl bei der Einschätzung, ob ein Ersatzbrennstoff in einer Industriefeuerung verwendet werden kann, wie auch bei der Auslegung von Neuanlagen ist das Wissen über das charakteristische Verbrennungsverhalten eine wertvolle Hilfe.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen ersten Ansatz zu finden, das Verbrennungsverhalten von Abfällen zu charakterisieren, und Charakterisierungsgrößen zu bestimmen, die im Hinblick auf den Einsatz fester Abfallbrennstoffe in Großfeuerungsanlagen zur Anwendung kommen können. Die Bestimmung des Verbrennungsverhaltens erfolgt anhand von Verbrennungsversuchen an einer Anlage im Technikumsmaßstab, die speziell für die Untersuchung von Fragestellungen im Zusammenhang mit der Verbrennung fester Abfälle entwickelt wurde. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt hierbei auf einem Vergleich des stoffspezifischen Verbrennungsverhaltens unter gleichen Prozessbedingungen, um damit die Grundlage für eine möglichst umfassende Anwendbarkeit zu legen.

Als Grundlage und Hintergrund für die Arbeit wird im Kapitel 2 zunächst auf Art und Menge der potentiellen Ersatzbrennstoffe ebenso wie auf die prinzipiell verfügbaren Anlagen für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen und deren Kapazitäten eingegangen. Für die experimentelle Arbeit als Grundlage wird in Kapitel 3 der aktuelle Stand der Forschung zum Verbrennungsverhalten von Festbrennstoffen präsentiert und in Kapitel 4 die Entwicklung und Optimierung der Technikumsverbrennungsanlage als Instrument für die Untersuchung brennbarer Abfälle dargestellt.

In Kapitel 5 folgt als zentraler Teil die Beschreibung der experimentellen Arbeit zum Verbrennungsverhalten. Nachdem die Untersuchungsmethodik beschrieben wird, folgen die Ergebnisse der ersten Versuchsphase zur Untersuchung von Abfallmono-

fraktionen, deren stoffspezifisches Verhalten bestimmt wurde. Im Anschluss erfolgte in der zweiten Versuchskampagne die Untersuchung von Mischfraktionen mit bekannter stofflicher Zusammensetzung, um zu überprüfen, ob sich das Verbrennungsverhalten von stofflich heterogenen Gemischen auf Basis der stofflichen Zusammensetzung und des stoffspezifischen Verbrennungsverhaltens der einzelnen Bestandteile ableiten lässt. Neben der Präsentation der Versuchsergebnisse in den entsprechenden Unterkapiteln, werden die ermittelten charakterisierenden Größen auch noch einmal in einer Übersichtstabelle im Anhang dargestellt.

Abschließend wird in Kapitel 6 diskutiert, wie die zuvor hergeleiteten Charakterisierungsgrößen für das Verbrennungsverhalten in Abhängigkeit von der Art der Feuerungsanlage angewendet werden sollten.

2. Abfallwirtschaftlicher Hintergrund - Erzeugung und Verwertung von Ersatzbrennstoffen

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, ist der Ausgangspunkt für die Notwendigkeit der näheren Untersuchung des Verbrennungsverhaltens unterschiedlicher fester Abfälle das umweltpolitische Ziel, in Zukunft nur noch inertisierte Abfälle abzulagern. Während dieses für die sogenannten „organischen“ Abfälle durch biologische Verfahren in MBA oder Kompostierungsanlagen annähernd erreicht werden kann, verbleibt eine große Menge kohlenstoffhaltiger Abfälle, bei denen eine Inertisierung nur durch eine thermische Behandlung erfolgen kann.

Die traditionelle Technik für die thermische Behandlung von festen Abfällen ist die Verbrennung auf dem Rost in Müllverbrennungsanlagen. Aufgrund verschiedener Ursachen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht näher diskutiert werden sollen¹, stehen allerdings keine ausreichenden Kapazitäten an Müllverbrennungsanlagen zur Verfügung, um alle zu inertisierenden Abfälle zu behandeln. Von daher ergibt sich der Bedarf, feste Abfälle soweit aufzubereiten, dass sie als Ersatzbrennstoffe in andere Anlagen als Müllverbrennungsanlagen zur thermischen Behandlung eingesetzt werden können.

Die Erzeugung und Verwertung von Ersatzbrennstoffen aus Abfall ist in der Abfallwirtschaft kein neues Thema, denn schon in den 80er Jahren wurde versucht, unter dem Begriff BRAM einen marktfähigen Ersatzbrennstoff aus Hausmüll und hausmüll-ähnlichen Abfällen zu produzieren (BILITEWSKI, 1994). Ende der 90er Jahre wurde das Thema dann wieder aktuell und in Kombination mit mechanischen oder mechanisch-biologischen Behandlungsverfahren als vermeintlich günstigere Alternative zur ungeliebten Müllverbrennung gehandelt. Inzwischen ist die Entwicklung in der Abfallwirtschaft soweit vorangeschritten, dass sich allgemein die Erkenntnis durchgesetzt hat, dass eine möglichst große Menge an Ersatzbrennstoff in industriellen Anlagen verwertet werden muss, um das sich abzeichnende Kapazitätsdefizit bei der thermischen Abfallbehandlung zu decken (URBAN, FRIEDEL, 1997; SCHNURER 2004; JUNG, 2004; HOFFMEISTER, ALWAST, 2004). Dabei ist zu beachten, dass

¹ Diese Ursachen haben weniger einen technischen Hintergrund als vielmehr einen gesellschaftspolitischen.

die Frage der Verwertung von aufbereiteten Haus- und Gewerbeabfällen sich nicht von der Frage der Verwertung anderer Abfallströme entkoppeln lässt, die zum Teil schon seit Jahrzehnten in industriellen Feuerungen genutzt werden.

Im Folgenden wird zunächst auf der Basis einer eigenen Recherche der aktuelle Stand bei der Erzeugung und Verwertung von Ersatzbrennstoffen wiedergegeben. Es werden kurz die Anlagen oder Anlagengruppen benannt, die für einen Ersatzbrennstoffeinsatz nach heutigem Stand in Frage kommen. Der Hauptgesichtspunkt liegt allerdings in der anschließenden Betrachtung des Aufkommens der Abfälle, die derzeit den Ersatzbrennstoffen zugeordnet werden, der bereits existierenden Verwertungskapazitäten und der bereits verwerteten Mengen. Nicht behandelt werden an dieser Stelle die Aufbereitungsprozesse. Dafür wird auf die mittlerweile umfangreiche Literatur verwiesen (z.B. in HÄRDTLE, 2001; FLAMME, 2002; THOMÉ-KOZMIENSKY, 2002).

2.1 Anlagen zur thermischen Verwertung von Ersatzbrennstoffen

Unter Anlagen zur thermischen Verwertung werden Anlagen verstanden, bei denen eine Verwertung von Ersatzbrennstoffen aus Abfall in einem Hochtemperatur-Prozess, d.h. bei Prozesstemperaturen $\gg 100^{\circ}\text{C}$, stattfindet. Dieses sind hauptsächlich Anlagen, in denen eine energetische Verwertung stattfindet, beinhaltet aber auch Anlagen, bei denen unter Einsatz einer hohen Temperatur die Abfälle stofflich verwertet werden. In der folgenden Tabelle 1 sind die Anlagenarten zusammengestellt, die bezüglich des Einsatzes von Ersatzbrennstoffen über die Forschungs- und Entwicklungsphase hinaus sind und bei denen nach dem heutigen Stand größere Kapazitäten für die Ersatzbrennstoffverwertung bestehen oder geschaffen werden können.

Tabelle 1: Berücksichtigte Anlagenarten zur thermischen Verwertung von Ersatzbrennstoffen

Anlagenart	Art der Verwertung
Zementwerke	energetisch + stofflich
Kraftwerke	energetisch
Energetische Verwertungsanlage	energetisch
Vergasungsanlagen	stofflich
Hochöfen	stofflich

In diesem Sinn sind auch Müllverbrennungsanlagen Anlagen zur thermischen Verwertung. Sie werden aber an dieser Stelle nicht mit berücksichtigt, da sie für den

Einsatz unaufbereiteter Abfälle ausgelegt sind und daher keine vorherige Aufbereitung zu Ersatzbrennstoffen benötigen.

Zementwerke: Die Zementwerke zählen zu den klassischen Verwertern von Ersatzbrennstoffen. Über die Verwertung von Ersatzbrennstoffen in Zementwerken wurde bereits ausführlich berichtet, z.B. in SCUR, 1999; BUEKENS, 1999; OERTER, 2000; HUWILER, 2002.

Kraftwerke: Auch in Kraftwerken werden schon seit längerer Zeit Abfälle verwertet, allerdings wird sich hier bisher auf Abfälle beschränkt, die mit einem geringen Zusatzaufwand einzusetzen sind. Für die Verwertung fester Abfälle kommen nur Kohlekraftwerke in Frage.

Energetische Verwertungsanlagen: Der Begriff der Energetischen Verwertungsanlage EnVA wurde von der HEW Entsorgung, jetzt Vattenfall Europe Waste to Energy, geprägt (GRUNDMANN, 2002). Darunter können alle Anlagen gefasst werden, die speziell für die energetische Verwertung von Ersatzbrennstoff aus Abfällen ausgelegt wurden und in der Regel in ein industrielles Energienutzungsprojekt eingebunden sind, z.B. die Energos-Anlage in Minden.

Vergasungsanlagen: Vergasungsanlagen gibt es derzeit in Deutschland nur eine, das SVZ Schwarze Pumpe. Zwar gab und gibt es auch von anderer Seite Ansätze, neue Vergasungsanlagen zu planen, doch ob diese Pläne realisiert werden, bleibt abzuwarten (OBERMEIER, 2000, KRUMM et.al., 2002).

Hochöfen: In Deutschland wird in 3 Hochöfen der Einsatz von DSD-Kunststoffen bei der Stahlproduktion betrieben (JANZ, 2000).

2.2 Ersatzbrennstoffaufkommen, Verwertungskapazitäten und verwertete Mengen

Ersatzbrennstoffe aus Abfall werden zumeist im Kontext der energetischen Verwertung nach dem KrW-/AbfG, §6 Abs. 2 (1994) genannt. Im Allgemeinen kann man aber unter Ersatzbrennstoffen Abfälle verstehen, die sich aufgrund ihrer stofflichen Eigenschaften dafür eignen, in thermischen Prozessen eingesetzt zu werden und dabei fossile Brennstoffe ersetzen. Ersatzbrennstoffe lassen sich nach ihrer Konsistenz (fest, flüssig, pastös), ihrer stofflichen Zusammensetzung (z.B. Holz, Pappe/Kunststoff-Gemisch, überwiegend Textilien), oder ihrer Herkunft unterscheiden. Da nach dem derzeitigen Stand die Unterscheidung nach der Herkunft der Ersatz-

brennstoffe großen Einfluss darauf hat, in welchem Umfang eine thermische Verwertung erfolgt, wird dieses Unterscheidungskriterium im folgenden näher betrachtet. Nach diesem Kriterium lassen sich die Ersatzbrennstoffe in zwei große Gruppen unterteilen, wobei hier die eine Gruppe als aufbereitete Abfälle bezeichnet wird und die andere Gruppe als Produktionsabfälle.

2.2.1 Aufbereitete Abfälle

Bei den aufbereiteten Abfällen handelt es sich um die heizwertreichen Anteile aus Haus- und Gewerbeabfällen, die unter dem Einsatz von mechanischen oder mechanisch-biologischen Behandlungsverfahren aus den gemischten Abfällen gewonnen werden. Die Produktion und der Einsatz dieser Art von Ersatzbrennstoffen ist erst seit den veränderten Rahmenbedingungen in der Abfallwirtschaft, namentlich seit Inkraft-Treten des KrW-/AbfG, wieder von Interesse. Da es sich hier um die Gruppe der Ersatzbrennstoffe handelt, der in der allgemeinen Diskussion die größte Aufmerksamkeit gilt, wird diese Gruppe als Erstes betrachtet. Das Aufkommen an Ersatzbrennstoffen der Gruppe aufbereitete Abfälle ist in Abbildung 1 dargestellt, zusammen mit den Verwertungskapazitäten und den verwerteten Mengen, auf die noch eingegangen wird.

Von diesen Mengen ist allerdings nur die Menge an DSD-Kunststoffen sicher belegt. Bei den DSD-Kunststoffen ist zu beachten, dass diese aufgrund ihrer stofflichen Eigenschaften zwar prinzipiell für eine energetische Verwertung in Frage kommen, die aber zur Zeit nicht praktiziert wird. Eher aus gesellschaftlich-politischen als aus technischen Gründen werden die DSD-Kunststoffe bisher ausschließlich stofflich verwertet, unter anderem in Hochöfen. Die anderen Mengen ergeben sich rechnerisch aus den maximalen Verarbeitungskapazitäten der bekannten Aufbereitungsanlagen. Dabei wurde für Anlagen zur mechanischen Aufbereitung von Gewerbeabfällen und für MBS-Anlagen, bei denen neben einer mechanischen Aufbereitung noch eine biologische Trocknung vorgenommen wird, entsprechend der prinzipiellen Verfahrensbeschreibung angesetzt, dass 50% des Inputmaterials als Ersatzbrennstoff gewonnen wird. Bei den MBA, Anlagen wo neben der mechanischen Aufbereitung die organischen Anteile durch eine Rotte weitgehend abgebaut werden, wurde eine Abschöpfung von 25% des Inputmaterials als Ersatzbrennstoff angenommen (ASA, 2002).

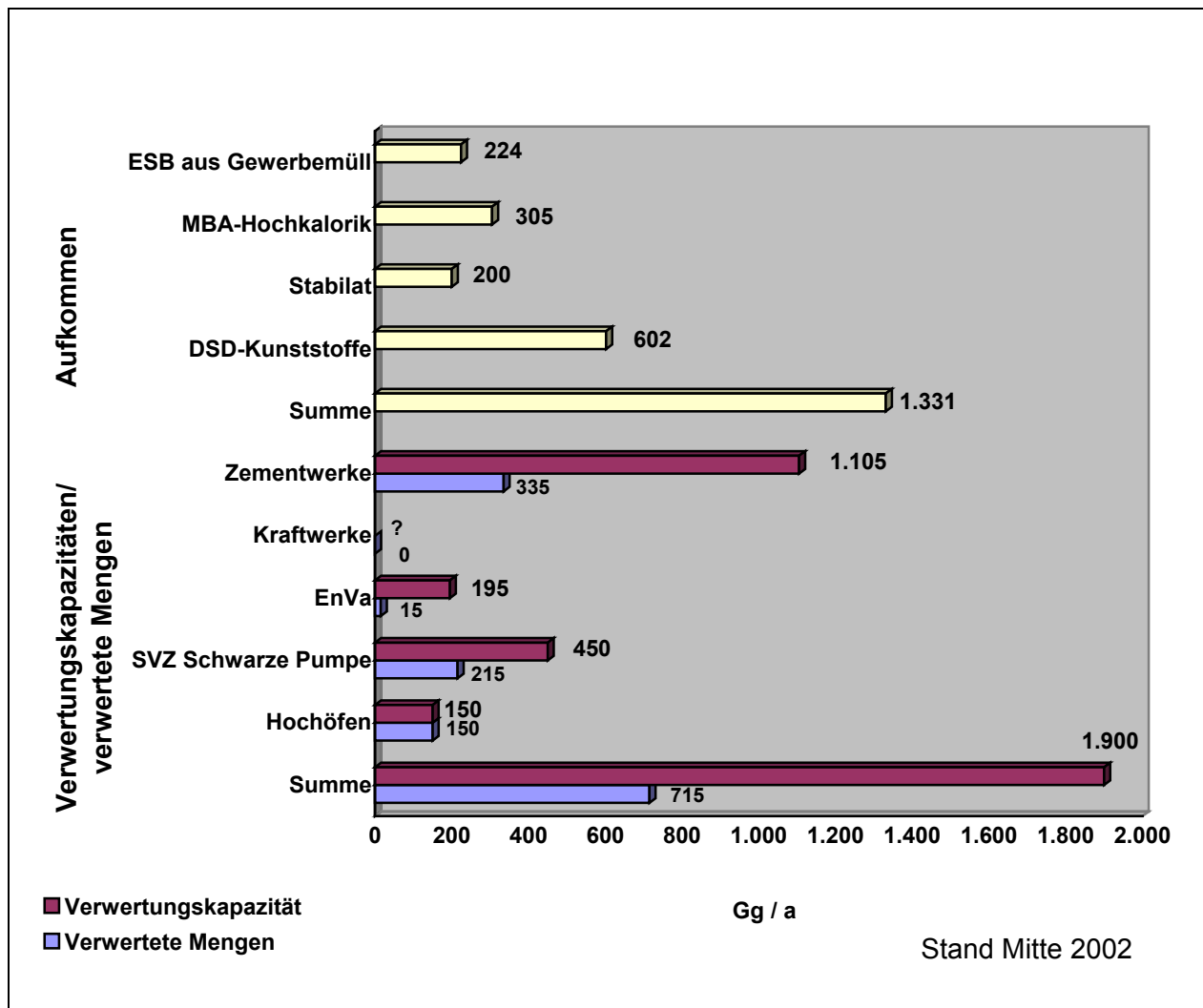


Abbildung 1 Aufkommen und verwertete Mengen an, sowie Verwertungskapazitäten für Ersatzbrennstoffen aus aufbereiteten Abfällen (SEEGER, 2002)

Über die real erzeugten Ersatzbrennstoffmengen werden von den Anlagenbetreibern in der Regel keine Angaben gemacht. Erschwert wird die Mengenbestimmung noch dadurch, dass für die Trockenstabilatanlagen zum Teil unterschiedliche Angaben über die Kapazitäten vorliegen². Die Menge an MBA-Hochkalorik ist zusätzlich dadurch zu relativieren, dass längst noch nicht alle Anlagen, bei denen eine Ausschleusung der hochkalorischen Fraktion vorgesehen ist, diesen Verfahrensschritt derzeit schon betreiben.

² Von verschiedenen Quellen der Fa. Herhof wird die Kapazität der Anlage in Aßlar mit 120.000, 140.000 oder 150.000 t/a angegeben. Für die Anlage in Rennerod werden als Kapazität 50.000, 75.000 oder 120.000 t/a genannt (HERHOF, 2002; WENGENROTH, 2002; ZEILER, WENGENROTH, 2002)

In Abbildung 1 finden sich auch die Verwertungskapazitäten für die aufbereiteten Abfälle die nachweislich thermisch im Regelbetrieb verwerteten Abfälle. Während die Situation in Bezug auf die Ersatzbrennstoffverwertung im SVZ Schwarze Pumpe und bei den Zementwerken gut dokumentiert ist, gibt es im Bereich der Kraftwerke so gut wie keine Angaben zum Einsatz von Ersatzbrennstoffen aus aufbereiteten Abfällen. Bekannt ist, dass es bei einzelnen Kraftwerken Bestrebungen gibt, sich den Einsatz von aufbereiteten Abfällen genehmigen zu lassen bzw. bereits Genehmigungsverfahren abgeschlossen sind (FRIEDRICH, BOTH 2002; TILLMANN, 2002). Ebenfalls ist bekannt, dass es in einzelnen Kraftwerken bereits Probeverbrennungen gegeben hat, wobei es lange Zeit keine Veröffentlichungen über den Umfang und die dabei gemachten Erfahrungen gab. Erst in jüngster Zeit wurde über die Probeverbrennung in Kraftwerken berichtet. Während es bei der Einhaltung der Emissionsgrenzwerte keine Probleme gab, sind bezüglich des Anlagenbetriebes doch erhebliche Probleme aufgetreten. Genannt werden Förderprobleme, Verschlackungen im Kessel und ungenügender Ausbrand (PAUL, KRUSE, 2002; SCHULZ, 2003; FORKERT et. al., 2004).

Bei den Energetischen Verwertungsanlagen gibt es in Deutschland bisher nur drei Anlagen, die für den Einsatz von Ersatzbrennstoff aus aufbereiteten Abfällen konzipiert sind und bereits betrieben werden: Die Wirbelschichtfeuerung der Rethmann Lippewerke in Lünen, die EVA der Firma Herhof in Aßlar und die Energios-Anlage in Minden. Weiterhin ist von zwei Anlagen bekannt, dass sie sich in der Planung befinden. Dabei handelt es sich um eine weitere Energios-Anlage im Landkreis Oberhavel und eine Wirbelschichtanlage bei Neumünster, die nach dem Vorbild der Wirbelschichtanlage in Lenzing, Österreich, errichtet werden soll. Im Bereich der Hochöfen gibt es gesicherte Angaben über die verwerteten Mengen an DSD-Kunststoffen. Inwieweit diese Mengen erhöht werden können oder an den Einsatz anderer Ersatzbrennstoffe gedacht wird, ist offen.

Wenn man die Summen des Aufkommens, der Verwertungskapazität und der verwerteten Mengen auf dem Stand von Mitte 2002 einander gegenübergestellt zeigt sich, dass die tatsächlich thermisch verwerteten Mengen nur etwas mehr als die Hälfte des Aufkommens ausmachen. Allerdings ist das Aufkommen, wie oben beschrieben, mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, insbesondere bezüglich der MBA-Hochkalorik. Die derzeit erzeugte MBA-Hochkalorik wird überwiegend noch deponiert, da dieser im Moment rechtlich noch mögliche Entsorgungsweg kosten-

günstiger als eine thermische Verwertung ist. Auch von Stabilat wird berichtet, dass es zum Teil auf Deponien „zwischengelagert“ wird.

Die verfügbaren Verwertungskapazitäten scheinen die derzeit anfallenden Mengen abzudecken. Allerdings werden die bekannten Kapazitäten zu über 50 % von den Zementwerken gestellt, die, wie unten beschrieben, auch für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen aus Produktionsabfällen in Frage kommen. Hier kann es also sein, dass die Kapazitäten auch von anderen Ersatzbrennstoffen in Anspruch genommen werden und sich somit die verfügbare Kapazität für die Ersatzbrennstoffe aus aufbereiteten Abfällen verringert.

2.2.2 Produktionsabfälle

Bei den Produktionsabfällen handelt es sich um Abfallfraktionen, die prozessbedingt, zumeist in der Industrie stofflich relativ homogen anfallen und nicht erst gezielt als Produkt zur thermischen Verwertung hergestellt werden. Produktionsabfälle werden schon seit längerer Zeit, teilweise schon seit Jahrzehnten, einer thermischen Behandlung außerhalb einer konventionellen Müllverbrennungsanlage zugeführt und verfügen somit über eine gewisse Tradition der thermischen Verwertung. Insbesondere stellen die Produktionsabfälle auf dem Ersatzbrennstoffmarkt auch eine Konkurrenz zu den aufbereiteten Abfällen dar.

In Abbildung 2 ist das Aufkommen von Ersatzbrennstoffen aus Produktionsabfällen abgebildet und Abbildung 3 zeigt die verwerteten Mengen, differenziert in die thermisch und in die anders verwerteten Anteile am Gesamtaufkommen. Es ist zu erkennen, dass das Aufkommen der Ersatzbrennstoffe aus Produktionsabfällen wesentlich höher ist als das der aufbereiteten Abfälle. Allerdings haben sich für diese Abfälle bereits Verwertungsstrukturen entwickelt, so dass sie zu mindestens 80% thermisch und auf andere Art verwertet werden. Nicht weiter berücksichtigt werden in der Abbildung 3 die Tiermehle/ -fette, die nach heutigen Stand nur zeitlich begrenzt aus Anlass des BSE-Krise auf den Ersatzbrennstoffmarkt drängten.

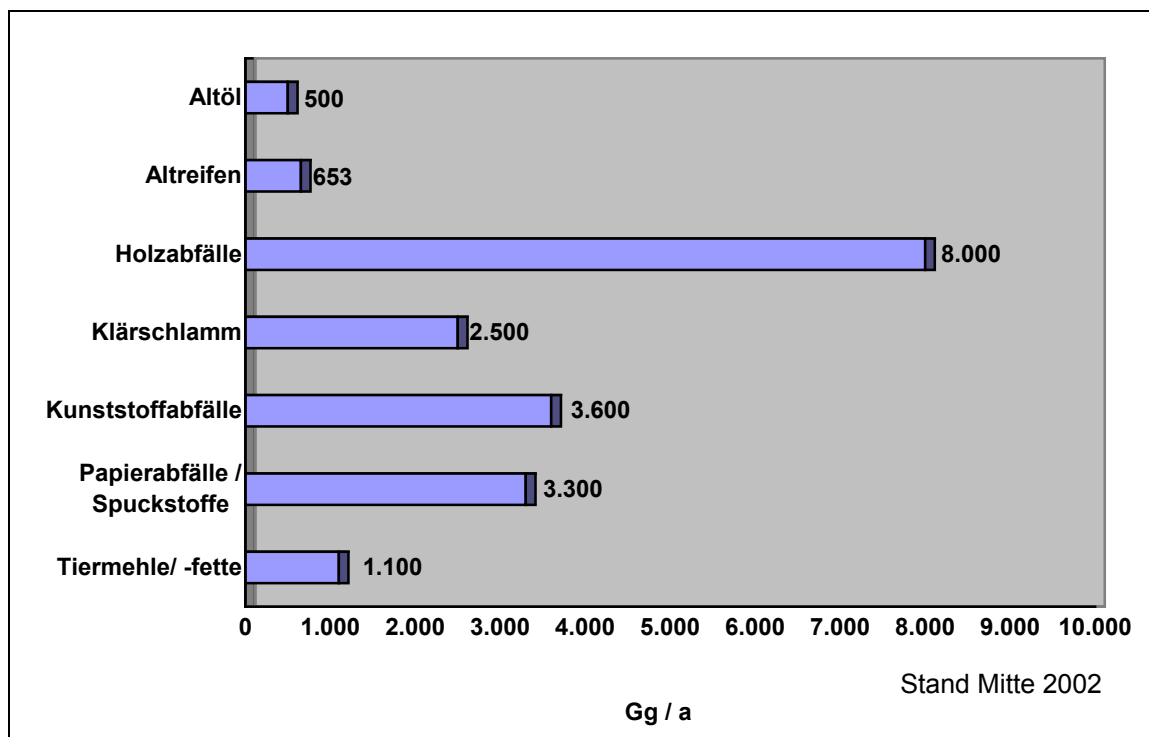


Abbildung 2 Aufkommen an Ersatzbrennstoffen aus Produktionsabfällen
(ARGE ALTAUTO 2001; BILLIGMANN, 2000; DKR, 2001; ESCH, 2001;
LINDNER, 2001; NOTTRODT, 2001; PFAFF, 2001; UBA 2000)

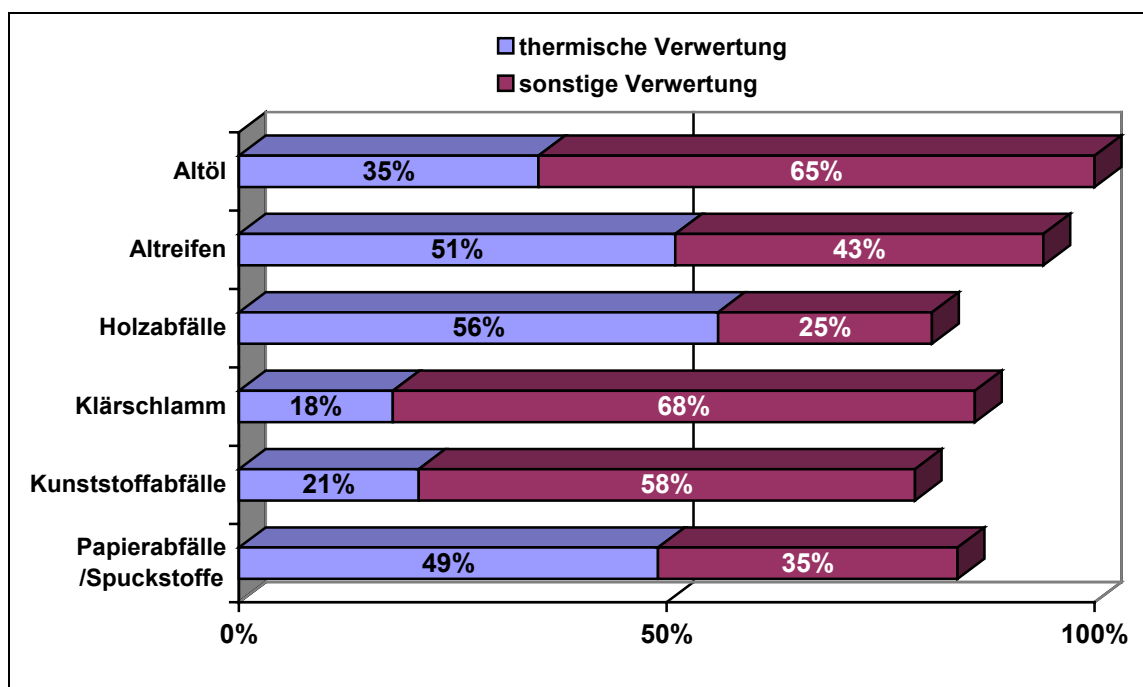


Abbildung 3 Verwertete Mengen an Ersatzbrennstoffen aus Produktionsabfällen
(SEEGER, 2002)

Die thermische Verwertung der in besonders großen Mengen anfallenden Ersatzbrennstoffe Holzabfälle, Kunststoffabfälle und Papierabfälle/Spuckstoffe findet hauptsächlich in eigenen Anlagen der Industrien statt, bei denen diese Abfälle anfallen. Doch werden bedeutende Mengen aller Ersatzbrennstoffe aus Produktionsabfällen auch in Zement- und/oder Kraftwerken verwertet und stehen damit in direkter Konkurrenz zu den Ersatzbrennstoffen aus aufbereitetem Abfall.

Die genehmigten Kapazitäten von Ersatzbrennstoffen aus Produktionsabfällen und die thermisch verwerteten Mengen in Zement- und Kraftwerken sind in Abbildung 4 dargestellt, wobei für die Kraftwerke nur Informationen aus Nordrhein-Westfalen vorliegen. Weiterhin ist zu beachten, dass auch die Anteile der Produktionsabfälle, die im Moment noch keiner Verwertung zugeführt werden, auf den Ersatzbrennstoffmarkt drängen können. Auch wenn es sich dabei um kleine Anteile handelt, stellen diese aufgrund der hohen Aufkommen immer noch erhebliche Mengen dar.

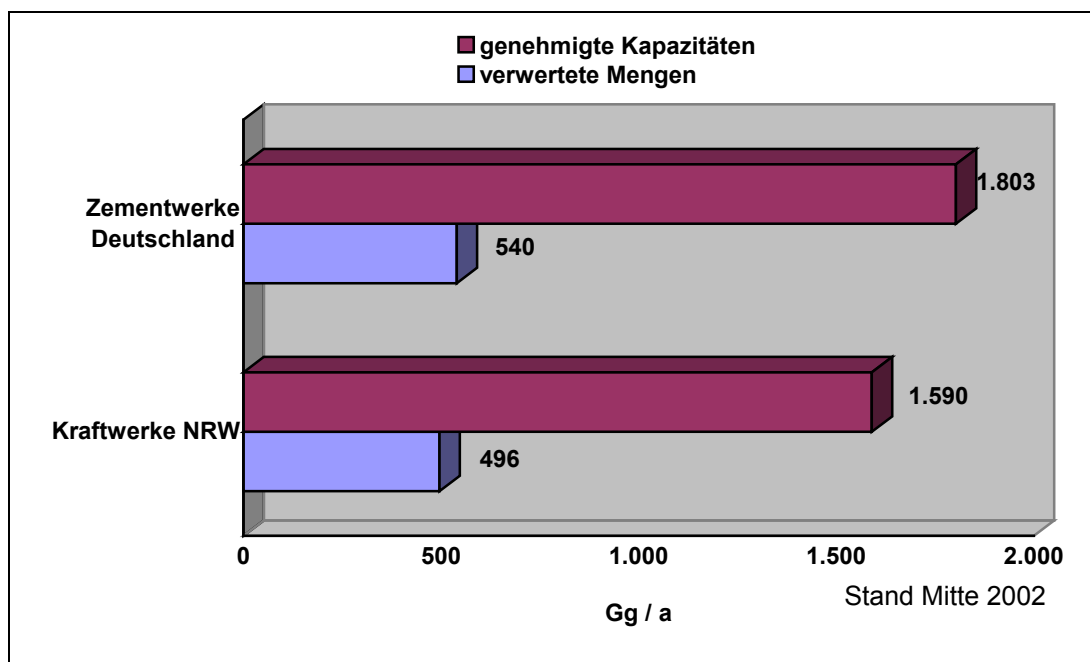


Abbildung 4 Genehmigte Verwertungskapazitäten und verwertete Mengen an Ersatzbrennstoffen aus Produktionsabfällen in Zementwerken und Kraftwerken (FRIEDRICH, BOTH 2002)

2.3 Ausblick zum Aufkommen und zur Verwertung von Ersatzbrennstoffen aus aufbereiteten Abfällen

In Hinblick auf die Umsetzung der TASI ab dem 1.6.2005 setzen viele Kommunen auf die Behandlung des Restmülls in MBA- oder MBS-Anlagen. Somit ist bereits abzusehen, dass sich das Aufkommen an Ersatzbrennstoff aus aufbereiteten Abfällen erhöhen wird. Berücksichtigt man die Anlagen, deren Status (befindet sich in Planung oder Genehmigung) Angaben über die Kapazität zulassen, ergibt sich ein zusätzliches Aufkommen von mindestens 550.000 t/a, davon alleine 285.000 t/a an Trockenstabilat. Das heißt, das Aufkommen wird mindestens um 40 % zunehmen. Aufgrund weiterer laufender Planungen zur Errichtung von MBA- oder MBS-Anlagen wird das Aufkommen aber vermutlich noch stärker ansteigen. Ob auch die Ersatzbrennstoffe aus Gewerbeabfällen einen ähnlichen Anstieg im Aufkommen aufweisen werden ist unsicher. Zwar gibt es von einigen Unternehmen Konzepte zur Errichtung neuer Aufbereitungsanlagen für Gewerbeabfälle, doch werden diese sicherlich nur dann umgesetzt, wenn sich auch tatsächlich ein Absatzmarkt für diese Ersatzbrennstoffe entwickelt. Das setzt voraus, dass neue Kapazitäten für die Verwertung zur Verfügung gestellt werden.

Wie sich allerdings die Kapazitäten für die Verwertung entwickeln werden, darüber gibt es widersprüchliche Angaben. Einerseits gibt die Firma Herhof als Hauptproduzent von Stabilat an, das über die Verwertung von 650.000 t/a verhandelt wird, und damit zu rechnen ist, dass das Material z.B. in einer Papierfabrik oder in Kraftwerken zu verwerten sei (EUWID, 2002). Konkret läuft zur Zeit in Witzenhausen das Genehmigungsverfahren zur Errichtung eines Kraftwerkes für die örtliche Papierfabrik zur jährlichen energetischen Nutzung von ca. 280.000 t Ersatzbrennstoff, der überwiegend aus Trockenstabilat bestehen soll. Aufgrund massiver Bürgerproteste ist der Ausgang des Genehmigungsverfahrens aber noch offen.

Bezüglich der Verwertung aufbereiteter Abfälle wird von Seiten der Kraftwerks- und Zementwerksbetreiber aus betriebstechnischen Gründen Zurückhaltung signalisiert und eher eine Verwertung in Energetischen Verwertungsanlagen wie z.B. den Energos-Anlagen favorisiert. Diese EnVA-Kapazitäten müssten aber erst noch neu geschaffen werden.

Abschließend lässt sich nur feststellen, dass sich die thermische Verwertung von Ersatzbrennstoffen in einem gewissen Umfang etabliert hat und dass unter den derzeitigen Bedingungen das Verhältnis von Aufkommen zu Verwertungskapazitäten als unkritisch anzusehen ist. Eine verlässliche Prognose für die zukünftige Entwicklung lässt sich aber aufgrund der unsicheren Datenlage nicht aufstellen. Sicher ist nur, dass die Verbrennungskapazitäten in Müllverbrennungsanlagen nicht ausreichen werden, alle thermisch zu behandelnden Abfälle aufzunehmen, von denen derzeit noch ein großer Teil deponiert wird. Eine mögliche Konsequenz ist die Zunahme der Verwertung von Ersatzbrennstoffen. Doch zur Zeit liegen, wie in Kapitel 2.2.1 erläutert, aufgrund mangelnder oder schlechter Erfahrungen mit der Verbrennung fester Abfälle in manchen Bereichen noch große Bedenken vor, so dass nicht alle Verwertungskapazitäten ausgeschöpft werden. Durch eine bessere Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens könnten diese zum Teil erschlossen werden.

3. Verbrennungsverhalten von festen Brennstoffen

Betrachtet man den Bereich der Forschung zum Verbrennungsverhalten fester Brennstoffe, stößt man zunächst auf zwei Probleme. Zum einen ist das Verbrennungsverhalten kein physikalisch definierter Begriff. Vielmehr gibt es eine Reihe von Brennstoffeigenschaften, die zusammenwirken und für die Beschreibung eines Brennstoffes während der Verbrennung herangezogen werden. Grob unterteilt gehören zum Verbrennungsverhalten

- a. die Zündwilligkeit,
- b. die Stabilität der Verbrennung bzw. der Flammenbildung,
- c. die Verbrennungsgeschwindigkeit,
- d. die entstehende Verbrennungstemperatur,
- e. den Ausbrand des Brennstoffes.

Jeder dieser Aspekte des Verbrennungsverhaltens wird wiederum von verschiedenen Stoffeigenschaften und Prozessgrößen beeinflusst. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit in der Bestimmung der Unterschiede im Verbrennungsverhalten unterschiedlicher Stoffe unter vergleichbaren Prozessbedingungen liegt, wird der Einfluss der Prozessgrößen wie z.B. die Strömungsbedingungen der Gasphasen oder die Art und Geschwindigkeit des Feststofftransportes, soweit möglich, nicht näher betrachtet.

Zum anderen wurde, und wird immer noch, in erster Linie nur Kohle als eine hinsichtlich ihrer Stoffeigenschaften sehr spezifischen Gruppe von festen Brennstoffen betrachtet. Dieses lässt sich mit der Bedeutung der Kohle erklären, die weltweit rund 20% des Energiebedarfs deckt und etwa 80% der geschätzten weltweiten Reserven an fossilen Brennstoffen stellt (STRAUSS, 1998). Erst im Zuge der Diskussion um Ressourcenschonung und den Treibhauseffekt finden andere, als regenerativ charakterisierte feste Brennstoffe mehr Beachtung, z.B. Holz, Stroh, aber auch Siedlungsabfälle. Aufgrund der Ähnlichkeit der Kohlen in ihrer chemischen Zusammensetzung mit den anderen festen Brennstoffen ist es aber Praxis, die Erkenntnisse zur Kohleverbrennung für die regenerativen Festbrennstoffe zu übernehmen. Insofern stammt die im Folgenden dargestellte Theorie der Feststoffverbrennung auch aus Untersuchungen an Kohle, wobei aber Erkenntnisse, die mit der speziellen Kohlestruktur oder mit kohlespezifischen Anwendungen zusammenhängen, ausgeklammert wurden.

Daran anschließend werden die derzeit gültigen normierten Verfahren zur Bestimmung der Eigenschaften von festen Brennstoffen im Hinblick auf ihre Aussagekraft zum Verbrennungsverhalten betrachtet. Zuletzt erfolgt eine Darstellung neuer Ansätze, die über die normierten Verfahren hinausgehen und Beiträge zur Untersuchung des Verbrennungsverhaltens von festen Brennstoffen liefern.

3.1 Theorie der Feststoffverbrennung

Die Feststoffverbrennung ist ein Prozess, bei dem zahlreiche physikalische wie chemische Energie- und Stofftransportvorgänge stattfinden. Im Vergleich mit der Verbrennung von gasförmigen oder flüssigen Brennstoffen ist die Feststoffverbrennung wesentlich komplexer, bedingt durch Teilprozesse an den zusätzlichen Phasengrenzen Feststoff – Flüssigkeit (z. B. Bildung von flüssigen Pyrolyseprodukten; Diffusion der Flüssigkeiten aus dem Feststoff heraus etc.) und Feststoff – Gas (z. B. Restkokverbrennung). Dazu kommt die vergleichsweise inhomogene Zusammensetzung der Brennstoffpartikel, die neben der an sich schon inhomogen zusammengesetzten brennbaren Materie auch Asche und Wasser enthalten können. Ein großer Asche- bzw. Wasseranteil kann zusätzlich einen erheblichen Einfluss auf die Energie- und Stofftransportvorgänge ausüben.

Zur Beschreibung der Feststoffverbrennung existieren eine Reihe von Modellvorstellungen, die zur Beschreibung der Kohleverbrennung entwickelt wurden. Aufgrund der hochkomplexen Vorgänge, die während der Verbrennung eines Feststoffes ablaufen, ist allen Modellen gemein, dass sie teilweise erhebliche Vereinfachungen vornehmen, um eine handhabbare mathematische Beschreibung zu liefern. Nach der allgemein gängigen Vorstellung gliedert sich der Prozess der Festbrennstoffverbrennung in die in Abbildung 5 dargestellten einzelnen Phasen (KOCK, 2002):

- Aufheizen des Feststoffes
- Verdampfung des Wassers
- Zersetzung der organischen makromolekularen Strukturen (Entgasung und Pyrolyse)
- Verbrennung der organischen Bruchstücke (= flüchtigen Bestandteile)
- Verbrennung des Restkokses
- Abkühlung/Austrag der Brennstoffasche

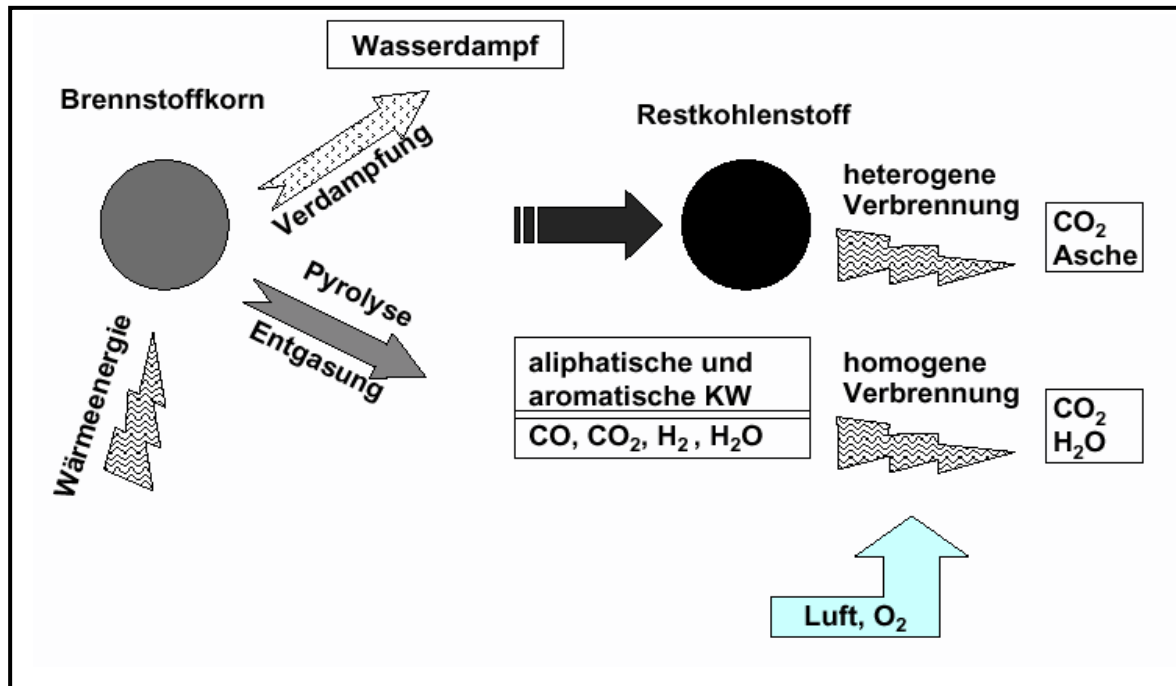


Abbildung 5 Verbrennungsprozess eines Festbrennstoffkorns (KOCK, 2002)

Dabei werden die ersten drei Phasen, die vor der Zündung beginnen, in der Regel unter dem Begriff der Entgasung zusammengefasst. Die daraufhin einsetzende Verbrennung der entgasenden flüchtigen Bestandteile findet außerhalb des Brennstoffkorns statt. Die sogenannte Restkoksverbrennung des als Feststoff verbliebenen, fixen Kohlenstoffs beginnt nach den Modellvorstellungen erst nach dem Ende der Verbrennung der flüchtigen Bestandteile an der Kornoberfläche. Entsprechend ergibt sich die Zeit der gesamten Verbrennung aus der Summe der Zeiten der Zündung, der Verbrennung der flüchtigen Bestandteile und der Verbrennung des Restkokes.

Gleichung 1: $t_v = t_z + t_f + t_{kk}$

Dass die zeitliche Trennung der Verbrennung der flüchtigen Bestandteile und des Restkokes nicht nur eine reine Modellvorstellung ist, sondern auch im Experiment beobachtet werden kann, veranschaulicht Abbildung 6. Dabei ist die Verbrennung der flüchtigen Bestandteile eine relativ kurze Phase, in der eine intensive Energiefreisetzung erfolgt, wie an der schnellen Erhöhung der Temperatur in Abbildung 6 zu erkennen ist, wobei Dauer und Intensität wesentlich von dem Anteil flüchtiger Bestandteile an der brennbaren Substanz abhängen. Die Sauerstoffkonzentration spielt dagegen in dieser Phase eine geringe Rolle, da die hochreaktiven flüchtigen Bestandteile auch bei einer niedrigen Sauerstoffkonzentration zünden. Allerdings ver-

läuft bei einer niedrigen Sauerstoffkonzentration die Verbrennung der flüchtigen Bestandteile länger und weniger intensiv.

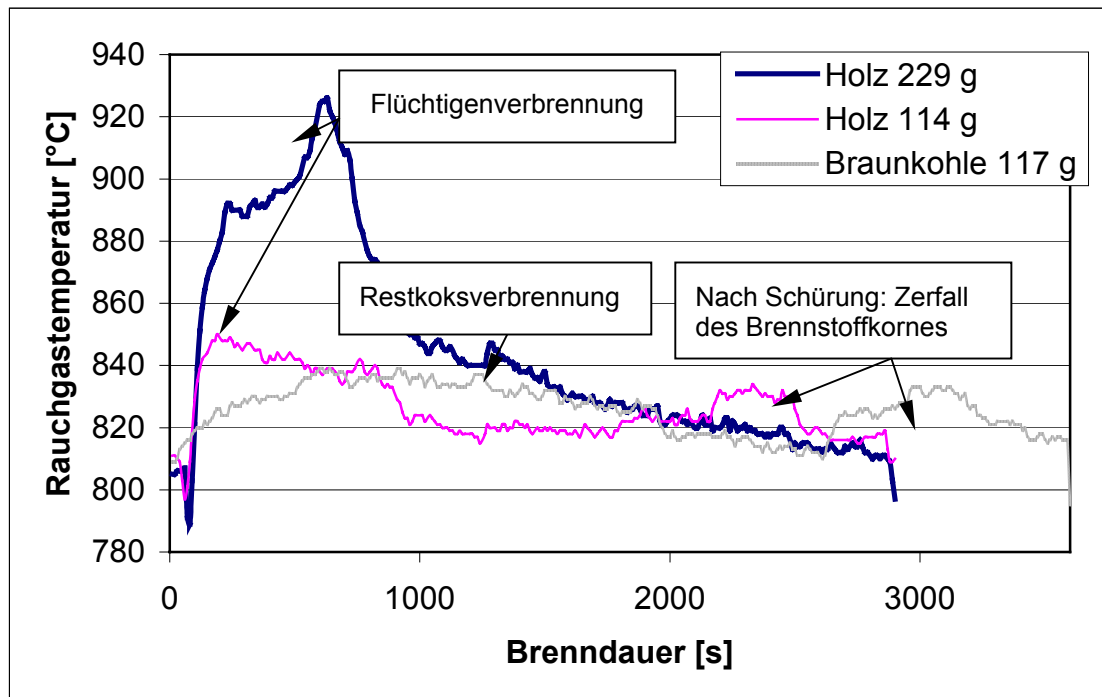


Abbildung 6 Verbrennungsphasen bei der Feststoffverbrennung (KOCK, 2002)

Die Zusammensetzung der flüchtigen Bestandteile von Kohlen hat URBANSKA (in CIAGWA et.al., 1980) untersucht. Auf der Basis ihrer Ergebnisse ergeben sich Formeln für die Berechnung der Anteile der einzelnen Gase an den flüchtigen Bestandteilen unter Verwendung der Kohlen- und Sauerstoffgehalte der wasser- und aschefreien Kohle (ZELKOWSKI, 1986). Die Formeln finden sich im Anhang 3. In Abhängigkeit von der Temperatur weisen die verschiedenen Gase der flüchtigen Bestandteile unterschiedliche Entgasungsraten auf, so dass sich der Heizwert der verbrennenden flüchtigen Bestandteile mit dem fortschreitenden Verbrennungsprozess ändert. Für Steinkohle hat dies KLEIN (1971) untersucht, dessen Ergebnisse in Abbildung 7 gezeigt werden.

Die Restkoksverbrennung ist dagegen ein relativ langsamer und gleichmäßiger Prozess geringerer Intensität. Bei fortschreitender Restkoksverbrennung werden die unverbrannten Anteile zunehmend durch die Asche eingehüllt und der Verbrennungsprozess verläuft immer langsamer. Für Kohle wurde als Faustwert festgestellt, dass die Verbrennungsgeschwindigkeit der flüchtigen Bestandteile in etwa das 10-fache der Verbrennungsgeschwindigkeit des Restkokes beträgt.

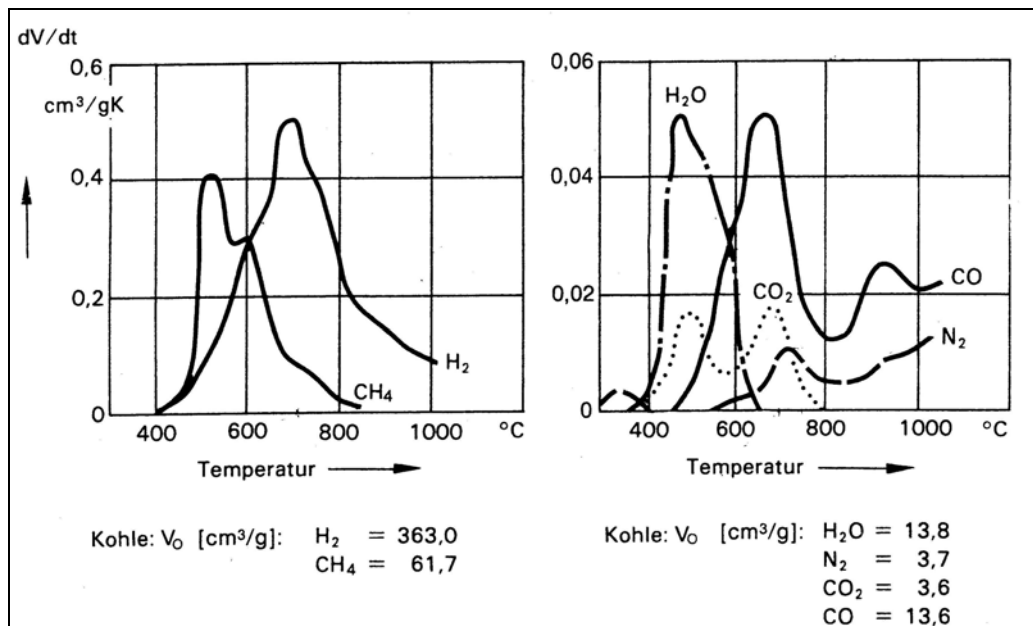


Abbildung 7 Entgasungsraten der flüchtigen Bestandteile von Steinkohle in Abhängigkeit von der Temperatur (KLEIN, 1971)

Für die Berechnung der Verbrennungsgeschwindigkeit stehen grundsätzlich zwei Modellansätze zur Verfügung. Bei dem „Ausbrandmodell bei konstanter Dichte“ wird die Verringerung der brennbaren Substanz nur als Abnahme des Korndurchmessers betrachtet. Dagegen wird bei dem „Ausbrandmodell bei konstanter Oberfläche“ nur die zeitliche Abnahme der Dichte des Brennstoffkorns berücksichtigt. Neben der Auswahl eines der Berechnungsmodelle muss die Frage beantwortet werden, welcher Teilprozess der geschwindigkeitsbestimmende Schritt ist. Seit Jahren wird diskutiert, ob die Sauerstoffdiffusion oder die Kinetik der chemischen Oxidation über die Verbrennungsgeschwindigkeit entscheidet. Für ein poröses Brennstoffkorn, das keine Asche oder flüchtige Bestandteile enthält, ergibt sich der in Abbildung 8 dargestellte Zusammenhang. Bis zu einer bestimmten Grenztemperatur, die von der brennstoffspezifischen Kinetik abhängt und für reinen Kohlenstoff experimentell mit etwa 1100 K bestimmt wurde, ist der Verbrennungsprozess kinetisch gesteuert. Nach dem Überschreiten dieser Temperatur ist der Prozess diffusionsgesteuert.

Beginnt man allerdings die Anteile an Asche und flüchtigen Bestandteilen mit zu berücksichtigen, wird der Verbrennungsprozess zu komplex, um die Frage nach dem geschwindigkeitsbestimmenden Schritt beantworten zu können. Daher kann das reale Verbrennungsverhalten eines Festbrennstoffes nur experimentell erfasst werden. Dennoch hat dieses Erkenntnis auch Bedeutung für die Praxis. Es konnte experimentell nachgewiesen werden, dass bei stark reaktionsfähigen Kohlen die Verbren-

nungsgeschwindigkeit durch die Sauerstoffdiffusion bestimmt wird. Somit weisen solche Kohlen untereinander keine Unterschiede in ihren Verbrennungsverhalten auf.

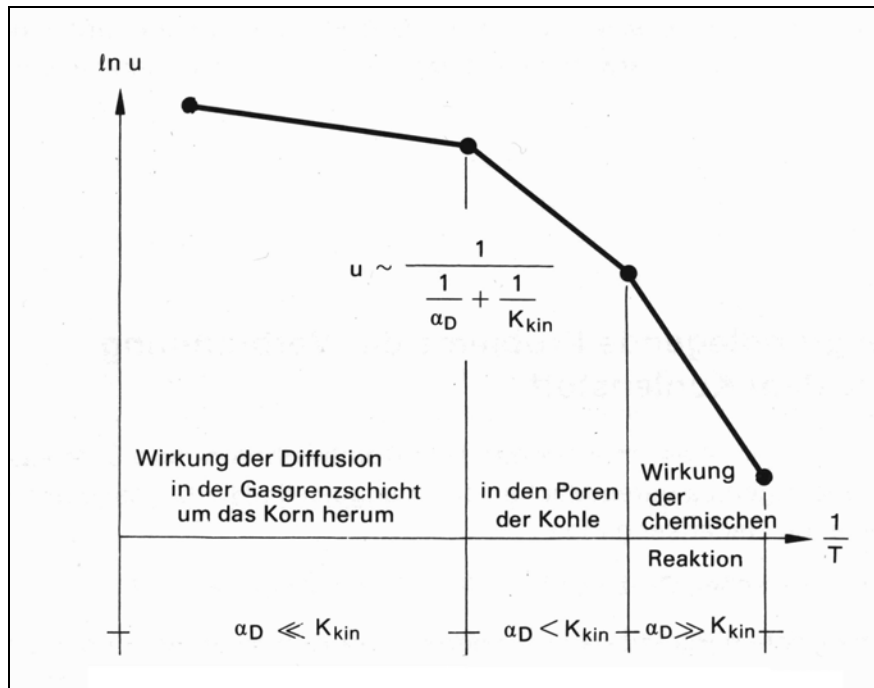


Abbildung 8 Wirkungsbereiche der Kinetik und der Diffusion bei der Kohlenstoffverbrennung, mit u = Verbrennungsgeschwindigkeit [$\text{kg/m}^2\text{s}$], α_D = Diffusionszahl [m/s], K_{kin} = Reaktionskonstante [$1/\text{s}$] (ZELKOWSKI, 1986)

Dagegen wurde bei schwach reaktionsfähigen Kohlen beobachtet, dass die Kinetik der Oxidation die Verbrennungsgeschwindigkeit bestimmt. In diesem Fall ist die brennstoffeigene Reaktionsfähigkeit von großer Bedeutung für das Verbrennungsverhalten (TU et.al., 1934). Damit folgt allgemein für Festbrennstoffe, dass hoch reaktionsfähige Brennstoffe ein ähnliches Verbrennungsverhalten aufweisen, während bei schwach reaktionsfähigen Brennstoffen größere Differenzen im Verbrennungsverhalten auftreten.

Der so beschriebene Prozess der Feststoffverbrennung gilt streng genommen nur für einzelne Brennstoffkörner. Die in der Praxis vorhandenen Schüttungen werden in den einfachsten Modellvorstellungen als aus Einzelkörnern zusammengesetzt betrachtet, wobei der Verbrennungsprozess eines Kornes die anderen Körner nicht beeinflusst. Auf die entwickelten Berechnungsmodelle auf der Basis experimentell gewonnener kinetischer Konstanten soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Ausführliche Darstellungen finden sich in der Literatur (z.B. ZELKOWSKI, 1976; RICHTER, 1979).

Anhand der existierenden Modelle lassen sich auch die Eigenschaften eines Festbrennstoffes erkennen, die, neben den exogenen Einflussgrößen wie Temperatur und Sauerstoffgehalt, für den Verbrennungsprozess maßgeblich sind. Vor allem der Partikeldurchmesser und damit die Reaktionsoberfläche bestimmen das Verbrennungsverhalten maßgeblich. Daneben gibt es noch eine Reihe weiterer, stoffspezifischer Eigenschaften, die als endogene Einflussgrößen auf das Verbrennungsverhalten einwirken:

- Partikeldurchmesser
- Reaktionsoberfläche
- Wärmekapazität und -leitfähigkeit,
- Aschezusammensetzung und -schmelzpunkt,
- Verteilung der brennbaren Bestandteile im Brennstoffkorn,
- Stoffliche Zusammensetzung der brennbaren Bestandteile (fixer Kohlenstoff, flüchtige Bestandteile),
- Brenn-/Heizwert der verschiedenen brennbaren Bestandteile,
- Aktivierungsenergien der chemischen Teilprozesse, etc..

Diese stoffspezifischen Eigenschaften lassen sich unter dem Begriff der Reaktivität des Brennstoffes zusammenfassen. Die Reaktivität gibt an, mit welcher Geschwindigkeit die Entgasung, die Verbrennung der flüchtigen Bestandteile und die Koksverbrennung stattfindet und ob der Prozess durch die Diffusion oder die Kinetik gesteuert wird (ZELKOWSKI, 1986).

3.2 Bestimmung von Brennstoffeigenschaften durch normierte Methoden

Die Eigenschaften von Festbrennstoffen, die in der klassischen Brennstoffanalytik derzeit nach normierten Methoden bestimmt werden, sind in der folgenden Tabelle 2 aufgeführt. Dabei nicht berücksichtigt werden Eigenschaften die hinsichtlich der bei der Verbrennung entstehenden Schadstoffemissionen von Interesse sind, wie z.B. der Chlorgehalt. Wieder handelt es sich in diesem Fall um eine Entwicklung primär für den Bereich der Kohleverbrennung, die aber auch für andere Festbrennstoffe herangezogen wird. Eine Ausnahme davon ist der Hardgrove-Index zur Bestimmung der Mahlbarkeit, der nur für Staubfeuerungen mit vorheriger Feinmahlung relevant ist, und damit für eine Anlagentechnik, die ausschließlich für die Kohleverbrennung eingesetzt wird.

Tabelle 2: Normierte Methoden der klassischen Brennstoffanalytik zur Bestimmung der Eigenschaften fester Brennstoffe

Brennstoffeigenschaft	Bestimmungsmethode
<u>Immediatanalyse</u>	
Brenn-/Heizwert	DIN 51900
Wassergehalt	DIN 51718
Aschegehalt	DIN 51719
Flüchtige Bestandteile	DIN 51720
<u>Chemische Zusammensetzung</u>	
C-Gehalt	DIN 51721
H-Gehalt	DIN 51721
N-Gehalt	DIN 51722
S-Gehalt	DIN 51724
<u>Asche</u>	
Zusammensetzung	DIN 51729
Schmelzverhalten	DIN 51730
<u>Mahlbarkeit</u>	
Hardgrove-Index	ISO 5074

Problematisch bei dem Einsatz dieser Bestimmungsmethoden für andere Festbrennstoffe ist die Tatsache, dass die zugrunde liegenden Methoden der Probenahme und Probeaufbereitung von einem relativ homogenen, körnigen und durch Mahlen leicht zu zerkleinernden Material ausgehen. Für die Analyse von Kohlen wurden spezielle automatisierte Probenahmegeräte entwickelt. In Kombination mit Hochleistungsmöhlen können diese leicht die für die Normmethoden benötigten Proben bereitstellen, d.h. eine Probe auf wenige Gramm einengen, homogenisieren und auf eine Korngröße $< 0,2$ mm zerkleinern. Andere Festbrennstoffe weisen zumeist ganz andere physikalische Eigenschaften auf als Kohle und können nur unter erheblichem Aufwand (z.B. Versprödung durch Gefrieren, um das Zerkleinern durch Mahlen zu ermöglichen) für die Normmethoden aufbereitet werden.

Hinsichtlich der Bestimmung des Verbrennungsverhaltens von Festbrennstoffen ist es allerdings wesentlich gravierender, dass auf der Basis der durch die Normmethoden ermittelten Brennstoffeigenschaften Aussagen zur Reaktivität nur ansatzweise gemacht werden können. Der Brenn- bzw. Heizwert beschreibt lediglich die Summe

der in einem Brennstoff gespeicherten Energie, die als Wärme freigesetzt werden kann, macht aber keine Aussage darüber, unter welchen Bedingungen oder mit welcher Geschwindigkeit diese Energieabgabe erfolgt. Die Parameter Wassergehalt, Aschegehalt und -eigenschaften, sowie der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen beeinflussen wie oben geschildert den Verbrennungsprozess. Um mehr als nur eine grobe Abschätzung der Reaktivität vornehmen zu können, würde man insbesondere für die flüchtigen Bestandteile noch mehr Eigenschaften bestimmen müssen, wie z.B. deren Heizwert oder Entstehungsgeschwindigkeit. Auch die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der brennbaren Substanz als Gesamtgehalt der einzelnen Elemente, liefert ohne Information, in welcher Bindungsform die Elemente vorliegen, bezüglich der Reaktivität nur weitere Anhaltspunkte.

Diese beschränkten Informationen der herkömmlichen Methoden reichten lange Zeit aus, da überwiegend Kohlen eingesetzt wurden, die aus den altbekannten europäischen Kohlerevieren stammten. Für diese Kohlen lagen umfangreiche Erfahrungen über ihr Verbrennungsverhalten aus der Praxis vor. Erst mit dem zunehmenden Einsatz von Kohlen aus Übersee zeigte sich die Notwendigkeit einer genaueren Bestimmung der Reaktivität.

3.3 Experimentelle Ansätze zur Untersuchung des Verbrennungsverhaltens von Festbrennstoffen

3.3.1 Untersuchungsmethoden für Kohlen

Parallel zu der Untersuchung des prinzipiellen Ablaufs des Verbrennungsprozesses von Festbrennstoffen wurden auch zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, um die für den Einsatz der entwickelten Berechnungsmodelle benötigten kinetischen Konstanten zu bestimmen. Angefangen mit den bereits erwähnten Untersuchungen von TU et.al. (1934) mit reinem Kohlenstoff in Form von Graphit, wurde in verschiedenen Laboraufbauten an einem oder mehreren Kohlekörnern das Verbrennungsverhalten näher bestimmt. In den Laborreaktoren wurden die Kohlekörner entweder fixiert (z.B. nach der Methode von BABIJ mit Nadeln) oder befanden sich im freien Fall in beheizten Rohrreaktoren in Anlehnung an die Verhältnisse in einer Staubfeuerung (z.B. Fieldsches Rohr, FIELD, 1969). Für jeweils einzelne Kohlen wurde dabei eine Vielzahl von Parametern bestimmt. Im einzelnen waren dies Entgasungsintensitäten und -geschwindigkeiten, Zünd- und Ausbrennzeiten, Verbrennungsgeschwindigkeiten und -temperaturen und der Ausbrand. Dabei fand allerdings bei keiner der

- 24 -

und -temperaturen und der Ausbrand. Dabei fand allerdings bei keiner der einzelnen Untersuchungen eine Berücksichtigung aller dieser Parameter statt. Eine gute Übersicht zu den verschiedenen Untersuchungsmethoden bietet ZELKOWSKI (1986). Die bei diesen Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse für die einzelnen Parameter weichen mitunter stark voneinander ab. Dies ist einerseits auf mögliche Abweichungen in der Zusammensetzung der einzelnen Kohlekörner innerhalb der gleichen Kohlesorte zurück zu führen, andererseits aber auch auf die Uneinheitlichkeit der Untersuchungsmethoden.

Mit der Einführung der VGB-Richtlinie „Charakterisierung von Kraftwerkskohlen“ ist in Deutschland ein Schritt hin zur Einführung von Standard-Methoden für die Bestimmung von Kennzahlen, die das Verbrennungsverhalten von Kohlen charakterisieren, gemacht worden (ZEHNER, 2002). Für die Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens wird die Übernahme der von ZELKOWSKI et. al. (1992) entwickelten Verfahren zur Bestimmung zweier Kennzahlen vorgeschlagen:

1. Zündwilligkeitszahl $ZWZ = N_{Z500}/T_{Z150}$, wobei N_{Z500} das Zündpotential [MJ/kg] bei 500°C ist und T_{Z150} die charakteristische Temperatur für eine Zündzeit von 150 ms ist.
2. Spezifische Ausbranddauer $SAD = \text{Zeit in der ein Partikel (d=200}\mu\text{m) bei 1250}^\circ\text{C und 5 \% O}_2 \text{ zu 90 \% ausbrennt.}$

Durch den Vergleich mit praktischen Betriebserfahrungen in einer Großanlage wurde bereits verifiziert, dass eine qualitative Bewertung des Verbrennungsverhaltens vorab auf der Basis dieser Kennzahlen möglich ist (REUTHER et. al., 1995). Einige Ergebnisse dieser Untersuchung sind in der folgenden Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Ergebnisse einer labortechnischen Untersuchung von Kohlen mit den Normmethoden und den Methoden nach ZELKOWSKI (REUTHER et. al., 1995)

Kohlen	Hu MJ/kg	W % (i,an)	A %	F(i,waf) %	C(i,waf) %	neue Labor- untersuchungsmethoden		
						N_{Z500}	ZWZ	rel. Ad. ¹
Prosper	29,73	2,7	8,30	36,35	83,5	8,22	12	1,00
Westfalen	28,82	1,0	8,28	24,60		5,13	7	1,08
Saar	28,60	2,9	8,90	36,15		6,78	9	1,06
Südafrika (Middelburg)	25,80	8,5	13,00	29,00	83,0	4,61	6	1,20
Kolumbien (El Cerrejon 1B)	27,30	2,5	12,71	37,60	80,6	8,30	11	0,90 bis 0,98

¹ rel. Ad. : Relative Ausbranddauer – Ausbrandzeit bezogen auf die Ausbrandzeit der Kohle Prosper

Sie veranschaulichen, dass sich auf der Basis der Normmethoden zwar gewisse Tendenzen bezüglich des Verbrennungsverhaltens ablesen lassen, es im Einzelfall aber auch Abweichungen gibt. Zum Beispiel tendieren zwar die Kohlen mit einem vergleichsweise hohen Gehalt an flüchtigen Bestandteilen zu einer besseren Zündwilligkeit, doch folgt die Reihung der Zündwilligkeitszahlen nicht exakt der Reihung des Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen.

Auch bei diesen Methoden zur Untersuchung des Verbrennungsverhaltens ergibt sich wieder das bereits unter 3.2 dargestellte Problem, dass als Vorbedingung für die Anwendung eine Probenaufbereitung erfolgen muss, die für Kohle leicht zu leisten ist, bei anderen Festbrennstoffen aber mit einem kaum vertretbaren Aufwand verbunden ist. Daher erscheint die Anwendung der Methoden nach ZELKOWSKI als Standardverfahren für andere Festbrennstoffe als Kohle kaum geeignet.

3.3.2 Untersuchungsmethoden für Biomasse

Gegenüber der Anzahl der Untersuchungen für Kohle, ist die Anzahl der Untersuchungen zum Verbrennungsverhalten von Biomasse ist deutlich. Sie zielen aber genauso darauf ab, die kinetischen Konstanten für die Anwendung der bestehenden Rechenmodelle zur Feststoffverbrennung zu ermitteln. Dabei wurden unterschiedliche Biomassen in erheblich voneinander abweichenden Aufbereitungszuständen untersucht, von Klärschlamm bis zu 42 mm langen Maiskolbenstücken, mit entsprechend stark streuenden Ergebnissen. Eine Übersicht zu den Untersuchungen an Biomasse bietet BORGHARDT (1996).

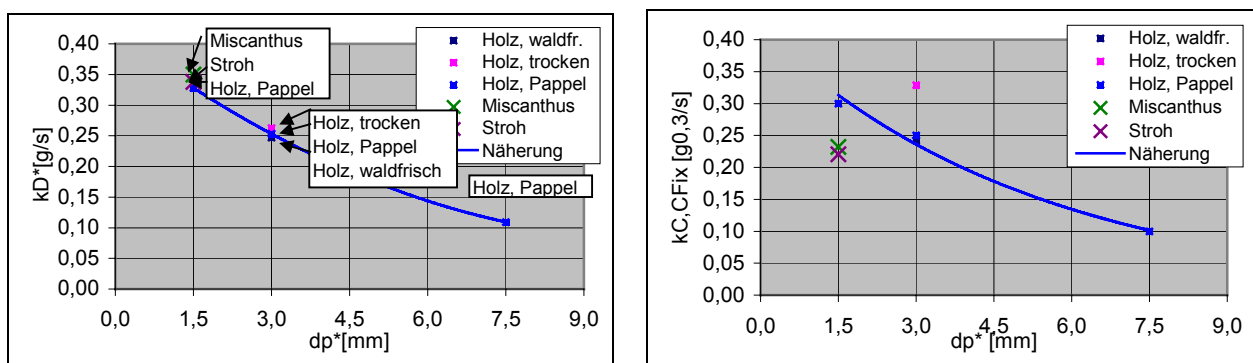


Abbildung 9 Vergleich der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten k_D^* für die Flüchtigverbrennung und $k_{C,CFix}$ für die Restkoksverbrennung unterschiedlicher Biomassen nach BORGHARDT (1996)

BORGHARDT selbst hat eine systematische Untersuchung zur Verbrennung verschiedener Biomassen in einer Wirbelschichtanlage im Technikumsmaßstab vorgenommen. Hierbei wurden auf der Basis einer O_2 -Messung die Brennzeiten für die Verbrennung der flüchtigen Bestandteile und der Koksverbrennung bestimmt, woraus sich die stoffspezifischen Reaktionskonstanten in Abhängigkeit von den verschiedenen untersuchten Korngrößen ergaben. Er kommt dabei zu dem Ergebnis, dass sich die unterschiedlichen Biomassen nur bei der Geschwindigkeit der Koksverbrennung unterscheiden. Die Geschwindigkeit der Flüchtigenverbrennung ist dagegen bei Biomasse nur von der Korngröße abhängig (Abbildung 9).

3.3.3 Untersuchungsmethoden für Siedlungsabfälle

Nach dem derzeitigen Stand liegen gezielte Labor- und/oder Technikumsuntersuchungen zum Verbrennungsverhalten von Siedlungsabfällen nicht vor. Dieses ist sicherlich zum Teil darin begründet, dass sich Siedlungsabfälle aufgrund ihrer zumeist sehr heterogenen Zusammensetzung generell schwer mit Labormethoden untersuchen lassen, worauf im folgenden Kapitel noch näher eingegangen wird. Allerdings besteht im Rahmen eines Forschungsvorhabens zur Modellierung der Festbettverbrennung von Abfall in Rost- und Drehrohrfeurungen die Absicht, für das Verbrennungsverhalten relevante Eigenschaften als Eingangsdaten für das Modell experimentell zu bestimmen (PETERS et. al., 2000). Als erster Schritt ist dabei die Bestimmung des Gasfreisetzungsverhaltens vorgesehen, wofür ein elektrisch beheizter Batch-Reaktor mit einem Fassungsvermögen von 3 kg Festbrennstoff konzipiert wurde.

Dennoch besteht auch bei den Betreibern von Müllverbrennungsanlagen Bedarf, nähere Informationen über die Vorgänge im Feuerungsraum zu erhalten, um den Verbrennungsbetrieb möglichst optimal zu gestalten. Daher gibt es einige Ansätze, direkt im Betrieb von Großanlagen die Verbrennung von Siedlungsabfällen näher zu untersuchen und die dabei gewonnenen Erkenntnisse für die Feuerleistungsregelung zu verwenden.

Ein erster Ansatz ist die Beobachtung des Feuerraumes durch Infrarotkameras, wobei durch die Lage und Intensität der Flammenbildung ein Beobachter in die Lage versetzt werden soll, die momentane Verbrennungssituation auf dem Rost einzuschätzen. Eine solche Einschätzung ist natürlich stark erfahrungsabhängig und bei menschlichen Beobachtern auch immer mit einer subjektiven Komponente versehen.

Um diesem entgegen zu wirken, ist zumeist eine Verknüpfung der Kameras mit einer Fuzzy Logic vorgesehen (WALTER, KREMER, 1995; WALTER et. al., 1999).

Darüber hinaus gibt es Untersuchungsansätze, die zwar keine Ergebnisse liefern, um das Verbrennungsverhalten von Siedlungsabfällen zu beschreiben, doch einen Weg zeigen, wie der aufgrund seiner sehr heterogenen Zusammensetzung schwer im Labor handhabbare Brennstoff Abfall prinzipiell untersucht werden kann. Diesen Ansätzen ist gemein, dass nicht der Brennstoff direkt im Feuerraum betrachtet wird, sondern indirekt aus dem Prozess-Output auf die Brennstoffeigenschaften geschlossen wird.

Zunächst ist hier die Methode nach REIMANN (1994) zu nennen, über eine Energiebilanz der Anlage den Heizwert der verbrannten Abfälle zu berechnen. Auch die Methoden nach DOHMANN, STARKE (2000) und VAN KESSEL et. al. (2004) zielen primär auf die Bestimmung des Heizwertes ab, wobei bei beiden Methoden als Zwischenschritt aus der Rauchgaszusammensetzung und statistisch abgesicherten Erfahrungswerten zum chemischen Aufbau der Abfallfraktionen die Zusammensetzung der brennbaren Substanz berechnet wird.

Das Prinzip der Untersuchung durch die Bilanzierung von Outputströmen aus der Verbrennung größerer Probemengen, bildet auch die Grundlage der in den folgenden Kapiteln dargestellten eigenen Untersuchungsmethoden.

4. Entwicklung und Optimierung der Technikumsverbrennungsanlage

Die Entwicklung der Technikumsverbrennungsanlage (TVA) im FG Abfalltechnik geschah vor dem Hintergrund der zunehmenden Schwankungen der Zusammensetzung von Abfällen nach dem In-Kraft-Treten des KrW-/AbfG. Gerade die für einen thermischen Prozess besonders relevanten Parameter Heizwert und Schadstoffbelastung können bei der Ermittlung im Labor mittels Kalorimeter und Feststoffanalysen aufgrund der Problematik der repräsentativen Probenahme von Abfällen nur mit erheblichen Unsicherheiten bestimmt werden. Dieses betrifft gleichermaßen Abfälle, die in einer konventionellen MVA behandelt werden sollen, wie auch heizwertreiche Abfallfraktionen, die als Ersatzbrennstoff in industriellen Feuerungen eingesetzt werden sollen. Daher erfolgt die Bestimmung von Heizwerten und Schadstoffgehalten im Fachgebiet Abfalltechnik der Universität Kassel durch Verbrennungsversuche, bei denen die Aussagekraft der experimentellen Untersuchung wesentlich verbessert wird, indem mehrere Kilogramm einer Abfallfraktion thermisch umgesetzt werden und eine anschließende Energie- und Massenbilanzierung erfolgt. Der Einsatz der TVA wurde im Rahmen der Dissertation von FRIEDEL (2001) erstmalig dokumentiert. Über die weitere Arbeit an der TVA und den an ihr entwickelten Analyseansatz des Bilanzierungsverfahrens wurde bereits in früheren Arbeiten und Veröffentlichungen berichtet (SEEGER, 2000; KOST, 2001; ROTTER, 2002; ROTTER et. al. 2003). Auf der Basis der Heizwertbestimmung durch das Bilanzierungsverfahren an der TVA wurde dann der Ansatz für die Untersuchungen zur Bestimmung des Verbrennungsverhaltens fester Abfälle mithilfe von Verbrennungsversuchen entwickelt.

Im folgenden wird zunächst noch einmal auf die Problematik der experimentellen Abfalluntersuchung eingegangen, die den Hintergrund für den Ansatz darstellt, feste Abfälle durch Verbrennungsversuche in der TVA zu untersuchen. Anschließend wird der Stand der TVA als Analyseinstrument beschrieben mit den technischen Weiterentwicklungen, die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommen worden. Bevor dann im folgenden Kapitel 5 die eigentlichen Untersuchungen zum Verbrennungsverhalten fester Abfallstoffe dargestellt werden, wird der aktuelle Stand hinsichtlich der Bestimmungsgenauigkeit der Untersuchungen an der TVA betrachtet.

4.1 Problematik der experimentellen Abfalluntersuchungen

Wie bereits zu Beginn des Kapitels 3 und dieses Kapitels erwähnt, resultierte die Entwicklung der TVA aus Überlegungen zur Problematik der Abfallanalytik heraus. Die Problematik, aus einem heterogenen Feststoffgemisch wie Siedlungsabfall eine repräsentative Probe zu nehmen, ist altbekannt und auch in letzter Zeit wieder unter Berücksichtigung ihrer statistischen Grundlagen umfassend dargestellt und diskutiert worden (THOMANETZ, 2002; ROTTER et. al., 2003).

Der Gesamtprozess der Analytik gliedert sich im allgemeinen in die drei Teilschritte Probenahme, Probeaufbereitung und in die eigentliche, apparative Analytik. Dabei herrscht Konsens darüber, dass aufgrund der modernen Analysetechnik der Fehler in der apparativen Analytik mit höchstens einigen Prozent sehr gering ist. Dagegen sind die Teilschritte Probenahme und Probeaufbereitung wesentlich fehleranfälliger. Dies gilt insbesondere für heterogene Feststoffmischungen wie Abfällen. Für feste Abfälle gibt THOMANETZ (2002) an, dass bei der Probeaufbereitung Fehler von über 10 % auftreten können, dass bei der Probenahme schätzungsweise sogar Fehler über 1000 % möglich sind. Des Weiteren führt er an, „dass eine auf empirischen oder statistischen Gesetzmäßigkeiten beruhende praktikable Methode zur repräsentativen Beprobung ruhender Haufwerke fester Abfälle bzw. von Material aus Altlasten nicht vorhanden ist und auch wohl in absehbaren Zeiten nicht realisiert werden kann.“

Auch wenn man sich dieser Meinung anschließen will, so heißt das nicht, dass man nicht neuen Ansätzen nachgehen sollte, die, zumindest für Teilbereiche, eine Lösung oder Reduzierung des Dilemmas versprechen. So wird z.B. an der TU Berlin ein Ansatz verfolgt, durch Kompaktierung einer heterogenen Abfallschüttung zunächst einen Abfall-Formkörper zu schaffen, und diesen dann bis hin zu einer Analysenprobe zu teilen (KUYUMCU, 2002).

Die fehleranfälligen Schritte der Probenahme und Probeaufbereitung entfallen bei dem Verfahren, die Inhaltsstoffe des Abfalls durch die Analytik und Bilanzierung der Produkte einer Müllverbrennungsanlage zu bestimmen, ganz. Dieses Verfahren wurde sowohl von BRUNNER et. al. (1997, auch MORF, BRUNNER, 1999) unter dem Begriff der Stoffflussanalyse an der MVA Spittelau und der MVA Wels in Österreich verfolgt, wie auch von REIMANN (2002) am MHKW Bamberg.

Abfallanalytik durch Bilanzierung von Verbrennungsversuchen an einer Versuchsverbrennungsanlage im Technikumsmaßstab zielt ebenfalls auf die Reduktion der Fehler bei den Schritten der Probenahme und Probeaufbereitung. Durch eine Probemasse im Bereich mehrerer Kilogramm wird das Problem der repräsentativen Probenahme zwar nicht gelöst, es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der Probenahmefehler reduziert wird. Die einzige Probeaufbereitung besteht ggf. aus einer groben Vorzerkleinerung, wobei bei einer sachgemäßen Durchführung kein weiterer Fehler zu erwarten ist. Eine Einordnung des Bilanzierungsverfahrens zwischen der klassischen Laboranalytik und der Stoffflussanalyse an Großanlagen mit der Benennung der Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren erfolgt bei FRIEDEL (2001). An dieser Stelle sollen nur noch einmal die Vorteile des Bilanzierungsverfahrens gegenüber den anderen beiden Verfahren benannt werden (Abbildung 10).

Vorteile des Bilanzierungsverfahrens an der TVA

Gegenüber der klassischen Laboranalytik:

- Durch einen Verbrennungsversuch lassen sich die Daten für die Bestimmung mehrerer Analyseparameter gleichzeitig gewinnen.
- Durchsatz mehrerer Kilogramm unaufbereiteten Probematerials reduziert den Gesamt-Analysefehler bezüglich der Probenahme und der Probenaufbereitung.

Gegenüber der Stoffflussanalyse an Großanlagen:

- Die Analyse einzelner, abgegrenzter Abfallchargen ist möglich.
- Die zeitrichtige Zuordnung der bilanzierten Mengenströme ist möglich
- Das relativ übersichtliche Anlagensystem ermöglicht die Ermittlung der Bestimmungsgenauigkeit.
- Die relativ geringen Versuchskosten machen den laufenden Einsatz des Verfahrens möglich

Abbildung 10 Vorteile des Bilanzierungsverfahrens gegenüber anderen Analysemethoden

Vergleichen muss sich das Bilanzierungsverfahren an der TVA im Wesentlichen mit der klassischen Laboranalytik, die nach wie vor der Standard in Forschung und Praxis bei der Abfallanalytik ist und auf der die Grenz- und Richtwertbestimmung im

Umweltrecht basiert. Auf den Vergleich der Bestimmungsgenauigkeit des Bilanzierungsverfahrens an der TVA mit der klassischen Laboranalytik wird im Folgenden unter 4.4 eingegangen.

4.2 Entwicklungsstand der TVA bei Beginn der Arbeit

Im Folgenden wird der prinzipielle Aufbau der Technikumsverbrennungsanlage beschrieben, der bis auf die im folgenden Kapitel beschriebenen Modifikationen auch für die Untersuchungen zur Bestimmung des Verbrennungsverhaltens gilt. Kernstück der Versuchsanlage ist ein Feststoffbrenner mit Wasserkühlkreislauf, der als Chargenrost betrieben wird. Angeschlossen ist ein Rauchgaskanal, in dem sich die Mehrzahl der Messstellen befindet, und eine Rauchgasreinigungsstufe. Eine Schemazeichnung, in der bereits die späteren Modifikationen enthalten sind, findet sich in Abbildung 11.

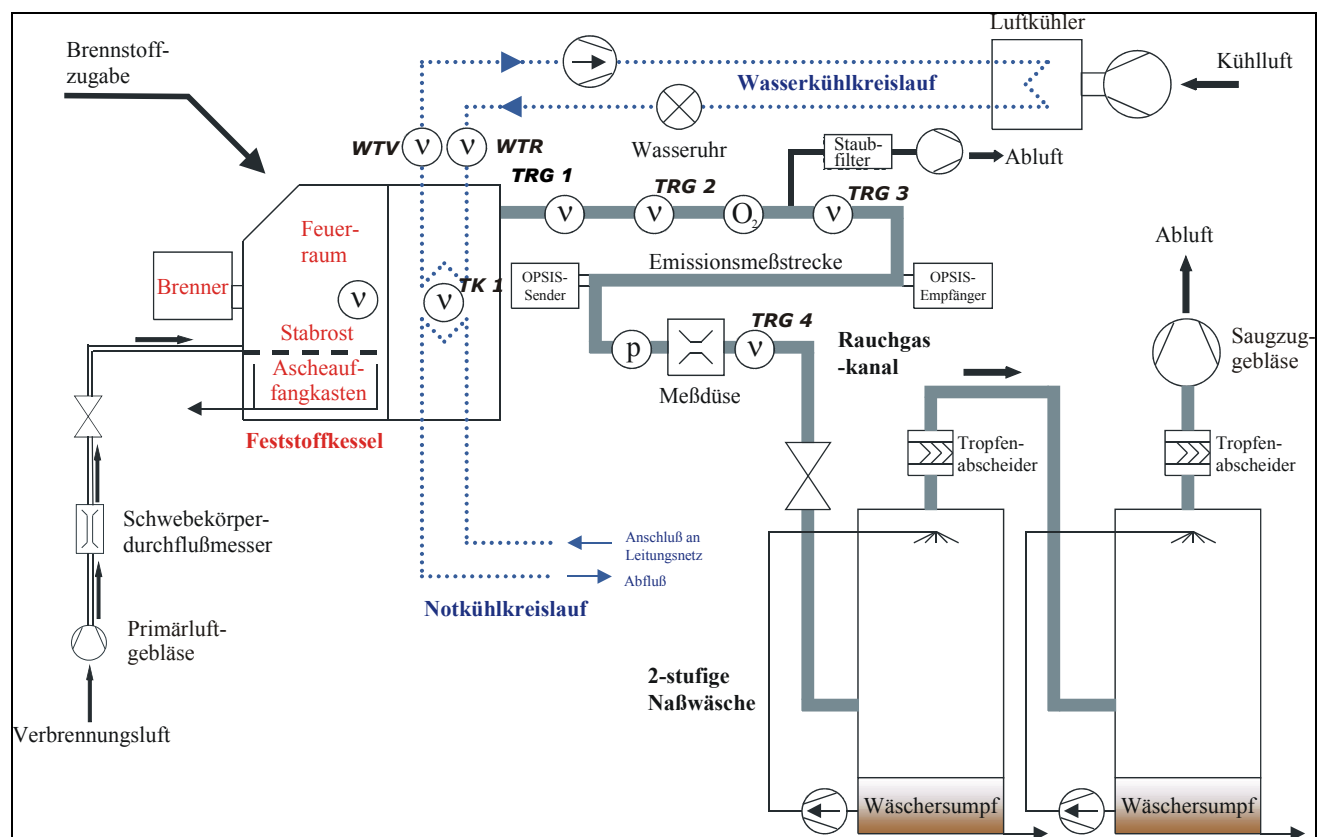


Abbildung 11 Konfiguration der Technikumsverbrennungsanlage (TVA)

Die einzelnen Anlagenteile sind

- Feststoffkessel (Abbildung 12): Der Brennraum des Feststoffkessels ist ca. 30 x 35 x 80 cm groß. Auf einem feststehenden Stabrost (Breite der Stäbe ca. 4 cm, lichte Weite ca. 2 cm) liegt ein Lochblech mit einem Lochdurchmesser von

ca. 0,5 cm. Unter dem Rost befindet sich der Ascheauffangkasten. Die Festbrennstoffzufuhr erfolgt manuell durch eine Klappe (25 x 35 cm). Die thermische Nennleistung des Brennstoffkessels beträgt 30 kW, jedoch konnte in den Versuchen gezeigt werden, dass der Kessel auch den Beanspruchungen bei höheren Leistungen standhält (bisher maximal 48 kW). Die Primärluftzufuhr erfolgt im unteren Bereich der Frontklappe.

- b. Primärluftgebläse: Die Primärluft wird durch ein Gebläse (0,3 kW) gefördert und manuell mittels eines Schwebekörperdurchflussmessers und eines Stellventils geregelt. Auf diese Art ist eine maximale Luftzufuhr von ca. 80 m³/h möglich.
- c. Wasserkühlkreislauf: Die Übertragung eines Großteils der Wärmeenergie aus der Verbrennung in den Wasserkühlkreislauf erfolgt durch zwei Wärmetauscherplatten im hinteren Teil des Festbrennstoffkessels, an den der Wasserkühlkreislauf gekoppelt ist. Zudem ist auch der den gesamten Festbrennstoffkessel umschließende Wassermantel an den Wasserkreislauf angeschlossen. Der Kühlkreislauf enthält 50 l Wasser, welches mittels einer Pumpe kontinuierlich umgewälzt wird (11 – 23 l/min). Aus den Kühlkreislauf wird die Energie über einen Luftkühler mit einer thermischen Leistung von ca. 20 kW abgeführt.



Abbildung 12 Feststoffkessel mit Primärluftzufuhr im Vordergrund

-
- d. Rauchgasreinigung: Die nasse Rauchgaswäsche besteht aus zwei hintereinandergeschalteten Einzelwäschern, die mit Wasser betrieben werden. Pro Wäscher befinden sich ca. 40 l Wasser im Kreislauf. Jedem Wäscher ist ein Tropfenabscheider nachgeschaltet, um mitgerissene Tröpfchen möglichst wieder in den Kreislauf zurückzuführen. Da eine Reduktion des Waschwassers durch Verdampfung während eines Versuches erfolgt, muss regelmäßig Waschwasser nachgefüllt werden muss.
 - e. Saugzuggebläse: Das Saugzuggebläse (0,55 kW) sorgt für den Abzug der Rauchgase und erzeugt im Rauchgaskanal einen Unterdruck, der den Austritt von Rauchgas an undichten Stellen in das Technikum verhindern soll.
 - f. Temperaturmesssonden: Temperaturmessungen erfolgen an fünf verschiedenen Stellen im Verlauf der Verbrennungsstrecke. Die erste Sonde (TK 1) befindet sich am Beginn des ersten Kesselzuges und erfasst näherungsweise die Brennraumtemperatur. Die nächste Sonde (TRG 1) gibt Aufschluss über die Rauchgastemperatur beim Austritt aus dem Kessel. Die weiteren Sonden (TRG 2, TRG 3 und TRG 4) zeigen die Abkühlung des Rauchgases im Rauchgaskanal. Ein Mittelwert aus TRG 3 und TRG 4 kann als Betriebstemperatur für die OPSIS-Messungen der Konzentrationen der Rauchgaskomponenten angenommen werden. Weiterhin werden für energetische Bilanzierungen die Temperaturen im Vor- und Rücklauf der Wasserkühlung erfasst (WTV und WTR).
 - g. Weitere Messgeräte in der Rauchgasstrecke: Es erfolgt die Messung des Sauerstoffgehaltes und des absoluten Drucks im Rauchgaskanal direkt hinter dem Kessel. Durch die Messdüse erfolgt die Bestimmung des Rauchgasvolumenstromes über den Differenzdruck. Zusätzlich kann auch ein FID zur Gesamtkohlenstoffbestimmung angeschlossen werden.
 - h. Staubmessung und OPSIS-Messstrecke: Die Staubmessung erfolgt an einem Rauchgasteilvolumenstrom, der isokinetisch abgezogen wird. OPSIS ist ein Emissionsmeßsystem, das nach dem Prinzip der differentiellen optischen Absorptionsspektroskopie arbeitet und on-line simultan verschiedene Rauchgaskomponenten messen kann. Diese beiden Systeme sind für die energetischen Betrachtungen nicht von Belang, sondern sind nur für Schadstoffuntersuchungen notwendig.

Auf das Verfahren der Massenbilanzierung zur Schadstoffgehaltbestimmung wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen, da in dieser Arbeit die energetischen Aspekte der Verbrennung fester Abfallstoffe betrachtet werden und der Ansatz von FRIEDEL (2001) nicht weiterentwickelt wurde.

Grundlage für die energetischen Betrachtungen an der TVA ist die Heizwertbestimmung durch eine Bilanzierung der Energie. Die vereinfachte Energiebilanz der TVA ist in Gleichung 2 dargestellt. Die Bestimmung basiert im Wesentlichen auf der Messung der abgehenden Wärmeströme, wobei diese über den gesamten Versuchszeitraum integriert werden. Letztendlich ergibt sich der Heizwert bei diesem Bilanzansatz gemäß Gleichung 3. Die ausführliche Darstellung der Heizwertberechnung befindet sich im Anhang 1.

$$\text{Gleichung 2: } Q_{\text{Brennstoff}} + Q_{\text{Primärluft}} = Q_{\text{Kühlwasser}} + Q_{\text{Rauchgas}} + Q_{\text{Asche}} + Q_{\text{Verluste}}$$

$$\text{Gleichung 3: } H_{U,\text{Brennstoff}} = \frac{Q_{\text{Kühlwasser}} + Q_{\text{Rauchgas}} + Q_{\text{Asche}} + Q_{\text{Verluste}} - Q_{\text{Primärluft}}}{m_{\text{Brennstoff}}}$$

Zur Bestimmung der Genauigkeit der Versuchsanlage wurden Kalibrierungsversuche mit Holzbriketts als relativ homogenem Brennstoff durchgeführt. Der Heizwert der Holzbriketts wurde vor den Kalibrierungsversuchen kalorimetrisch bestimmt. Mit Hilfe der Kalibrierungsversuche und einer anschließend durchgeführten Fehlerbetrachtung ergab sich ein relativer maximaler Fehler von ca. 10 % für die Heizwertbestimmung an der TVA. Als Hauptfehlerquelle wurde dabei die Temperaturmessung im Kühlwasserkreislauf identifiziert. Da im Mittel ca. 60 % der Outputenergie in den Kühlkreislauf überführt wurde, wirkte sich hier bei mittleren Temperaturdifferenzen von 20 – 25 K eine Mess- Ungenauigkeit von 1°C bereits erheblich aus und verursacht, wie eigene Berechnungen ergeben haben, allein schon einen relativen Fehler von ca. 7 % (siehe auch 4.4.1).

4.3 Weiterentwicklung entsprechend der Fragestellungen zum energetischen Verhalten fester Abfälle

Die an der TVA vorgenommenen Modifikationen lassen sich in zwei Kategorien unterteilen:

- Modifikationen, die eine generelle Verbesserung des Verbrennungsbetriebes an der TVA bewirken;
- Modifikationen, die die messtechnische Erfassung hinsichtlich energetischer Größen verbessern.

Die einzelnen Modifikationen sind im Folgenden aufgeführt und werden in den entsprechenden Unterkapiteln erläutert (Abbildung 13).

<u>Verbesserung der Verbrennung</u>	<u>Verbesserung der Messung</u>
- Umbau Verbrennungsrost	- Kalibrieroutine Temperaturmessung
- Modifikation Primärluftzufuhr	- Neuer Messdatenumformer
- Installation Ölstützfeuerung	- Modifikation der Kesseldurchströmung
- Installation Wasserdurchlaufkühler	- Veränderung Kühlwassermassenstrom
- Quenche vor Rauchgasreinigung	- Neue Volumenstrommessung

Abbildung 13 Modifikationen der TVA zur Verbesserung der Untersuchung energetischer Fragestellungen

4.3.1 Modifikationen zur Verbesserung des Verbrennungsbetriebes

Zwar hatte FRIEDEL gezeigt, dass der Einsatz der TVA zur Analyse fester Abfälle durch Verbrennungsversuche prinzipiell zielführend ist, doch gab es bei dem bestehenden Anlagenaufbau hinsichtlich des Verbrennungsbetriebes noch Verbesserungsbedarf. In erster Linie schränkte der Aufbau bzw. die Abmessungen des Kessels die Möglichkeiten einer guten, stabilen und gleichmäßigen Verbrennung der nur grob vorzerkleinerten Abfälle ein. Das Problem des Rostdurchfalls durch die mit einem Abstand von 2 cm in den Verbrennungsraum fest eingebauten Roststäbe war zunächst durch die Auflage eines Lochblechs (Lochdurchmesser 0,5 cm) gelöst worden. Dieser Aufbau führte aber dazu, dass die Löcher verstopften und auch die

feine Asche zum großen Teil auf dem Rost liegen blieb, mit der Konsequenz, dass sich auf dem Rost ein anwachsendes Haufwerk bildete, das zunehmend die Primärluftzufuhr erschwerte.

Zur Lösung dieses Problems wurde das Lochblech entfernt und durch einen eigens gefertigten Rost aus schmalen Rundstählen mit einem Abstand von 0,4 cm ersetzt (Abbildung 14). Dieser Rost lässt sich mit einem Hebel bewegen, wodurch eine Schürwirkung erzielt wird und die feinen Ascheteile nahezu vollständig in den Aschekasten bewegt werden. Der neu-konstruierte Rost ermöglichte auch die Modifikation der Primärluftzufuhr in den Verbrennungsraum. Dadurch, dass die Luft erst das Brennstoffbett durchströmt, bevor sie den Verbrennungsraum verlässt, wird gegenüber der alten Primärluftzufuhr eine bessere Verteilung der Luft erreicht. Anstelle des Einblasens der Luft durch die Frontklappe wurde dazu die Primärluftleitung in zwei Strängen an beiden Seiten unterhalb des Rostes geführt, wo die Luft auf der gesamten Rostlänge von unten der Verbrennung zugeführt wird.

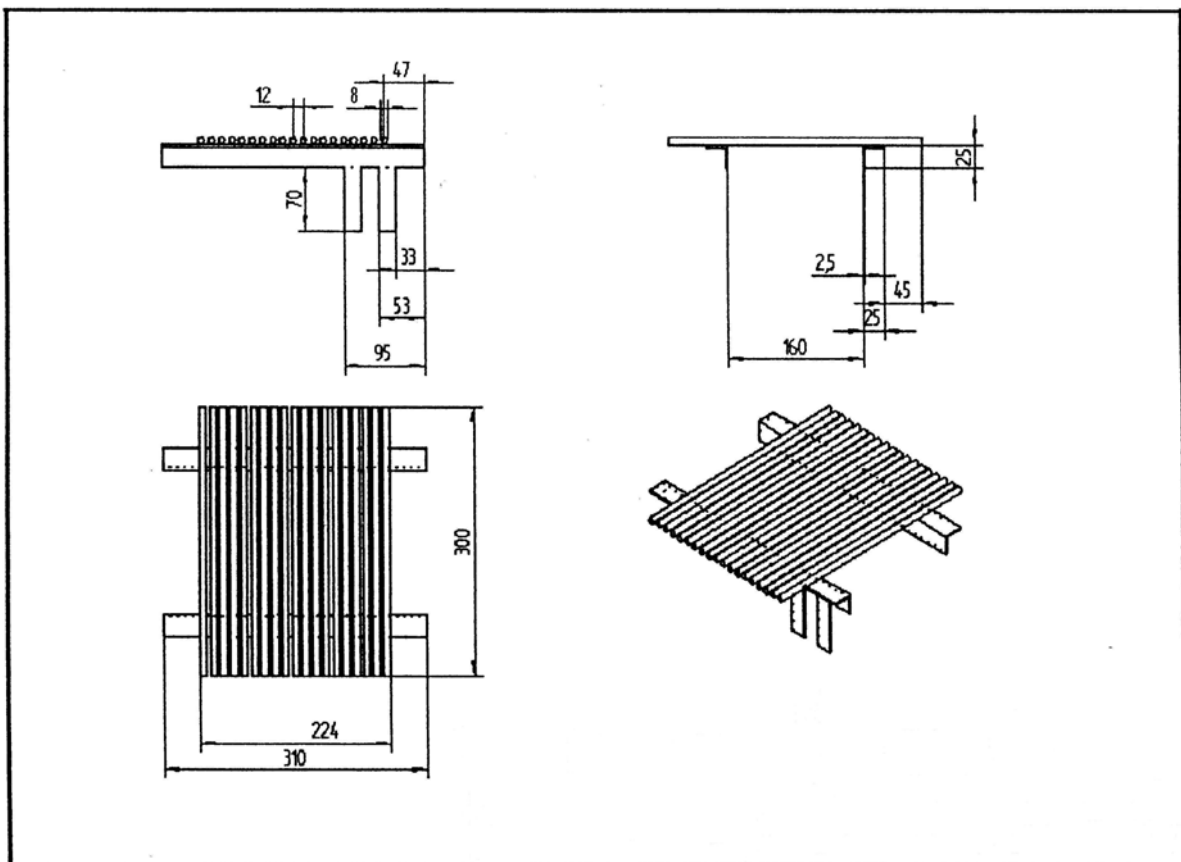


Abbildung 14 Konstruktionszeichnung des neuen Verbrennungsrostes

Die Größe des Feststoffbrenners beschränkt auch die Menge an festen Abfällen, die chargenweise in die Verbrennung gegeben werden kann, auf maximal 1 kg pro

Zugabe, wobei eine Zugabe alle 5 – 20 min erfolgen kann. Bei dieser Betriebsweise tritt eine sehr unregelmäßige Verbrennung mit starken Temperaturschwankungen auf. Aufgrund der relativ geringen Festbrennstoffmenge werden auch nur über kurze Zeiträume Verbrennungstemperaturen erreicht, die den Bedingungen in der Praxis entsprechen.

Um hier Abhilfe zu schaffen, wurde ein Heizölbrenner in den Feststoffbrenner als Stützfeuerung integriert. Der Ölbrenner weist einen Leistungsbereich von 16,5 – 30 kW auf, in Abhängigkeit des gewählten Heizöldurchsatzes. Die Brennerleistung wird dem zusätzlich verbrannten Feststoff und dem gewünschten Temperaturniveau angepasst und sorgt für ein kontinuierliches Grundniveau der Verbrennungstemperatur.

Aus der Integration und dem Betrieb des Brenners ergaben sich zwei neue Probleme für den Betrieb der TVA. Der zusätzliche Energieeintrag durch die Stützfeuerung in den Wasserkühlkreislauf konnte von dem Luftkühler nicht mehr in einem ausreichendem Maße abgeführt werden und die Rauchgastemperatur stieg auf ein Niveau, dass die aus Kunststoff bestehenden Wäscher zur Raugasreinigung überbeanspruchte. Aus diesem Grund wurde eine zusätzliche Kühlstufe installiert. Sie besteht aus einer in den Kühlkreislauf integrierten Rohrwendel (Länge = 7 m), die in einen Wassertank ($V = 40 \text{ l}$) getaucht ist, der kontinuierlich mit kaltem Leitungswasser durchströmt wird ($V/t = 0,9 \text{ m}^3/\text{h}$). Diese Kühlstufe hat eine zusätzliche Kühlleistung von ca. 30 kW. Zum Schutz der Rauchgasreinigung wurde unmittelbar vor dem Rauchgaseintritt in den ersten Wäscher eine Quenche installiert, in der mit Umgebungsluft das Rauchgas auf eine Temperatur $< 60^\circ\text{C}$ herabgekühlt wird.

4.3.2 Modifikationen zur verbesserten Messung energetischer Parameter

Wie bereits am Ende von Kapitel 4.2 erläutert, ergab eine Fehlerbetrachtung, dass insbesondere Ungenauigkeiten bei der Erfassung der Vor- und Rücklauftemperaturen im Wasserkühlkreislauf große Auswirkungen auf die energetische Gesamtbetrachtung der Versuchsergebnisse an der TVA haben. Aus diesem Grund wurde zunächst eine Kalibrierroutine eingeführt, bei der alle Temperaturmessstellen regelmäßig für ihren Temperaturbereich kalibriert werden. Diese Maßnahme war aber noch unzureichend, da die in die Messgeräte integrierten Datenumformer nach wie vor nur eine geringe Genauigkeit garantierten. Als weitere Maßnahme wurden

daher die in die Geräte integrierten Datenumformer überbrückt und alle Messdaten direkt auf einen externen Messdatenumformer geleitet, der eine wesentlich höhere Datenauflösung leisten konnte. Für die Temperaturmessstellen im Wasserkühlkreislauf konnte damit der Messfehler von 1 K auf 10^{-3} K reduziert werden, womit sie die höchste Genauigkeit von allen Messstellen an der Anlage erreichen.

Als Konsequenz wurden Maßnahmen getroffen, um einen möglichst großen Anteil der während der Verbrennung freigesetzten Energie in den Wasserkühlkreislauf zu überführen, wo sie am genauesten erfasst werden konnte. Als erste Maßnahme wurde die Umwälzpumpe für das Kühlwasser auf die niedrigste Leistungseinstellung gestellt, um durch die Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit die Verweilzeit des Kühlwassers im Kessel zu erhöhen. Auf der anderen Seite des Wärmeübertragungsprozesses wurde die rauchgasseitige Durchströmung des Kessels so modifiziert, dass auch hier eine höhere Verweilzeit erreicht wird. Damit wurde insgesamt erreicht, dass der Hauptoutputstrom der Energiebilanz mit nur noch einem sehr geringen Fehler erfasst wird und sich die Genauigkeit der Energiebilanz erheblich verbessert.

In den folgenden an der TVA vorgenommenen Versuchen wurde festgestellt, dass die verbleibende Ungenauigkeit bei der Energiebilanz zum größten Teil auf die Volumenstrommessung zurückzuführen war. Der Volumenstrom geht unmittelbar in die Berechnung des im Rauchgas verbleibenden Wärmestroms ein, der nach dem Wärmestrom des Kühlkreislaufes den zweitgrößten Output-Wärmestrom darstellt. Die Messungenauigkeit war darauf zurückzuführen, dass die Volumenströme an der TVA gerade nur im untersten Messbereich der verwendeten Differenzdruckmessdüse lag. Durch den Einbau einer Differenzdruckmessdüse, deren Messbereich dem der erzeugten Rauchgasvolumenströme entspricht, wurde dieses Problem behoben.

4.3.3 Aktueller Entwicklungsstand der TVA

Die aktuelle Anlagenkonfiguration der TVA wurde bereits in der Abbildung 11 wiedergegeben. In Abbildung 15 sind anhand von zwei Energieflussdiagrammen die Verteilungen der In- und Outputenergieströme für die TVA dargestellt. Dabei gibt das linke Diagramm die Verteilung für die alte Anlagenkonfiguration exemplarisch anhand eines Kalibrierungsversuches wieder, während das rechte Diagramm die Verteilung für die aktuelle Anlagenkonfiguration auf der Basis von Durchschnittswerten aus den Versuchen zur Untersuchung des Verbrennungsverhaltens zeigt.

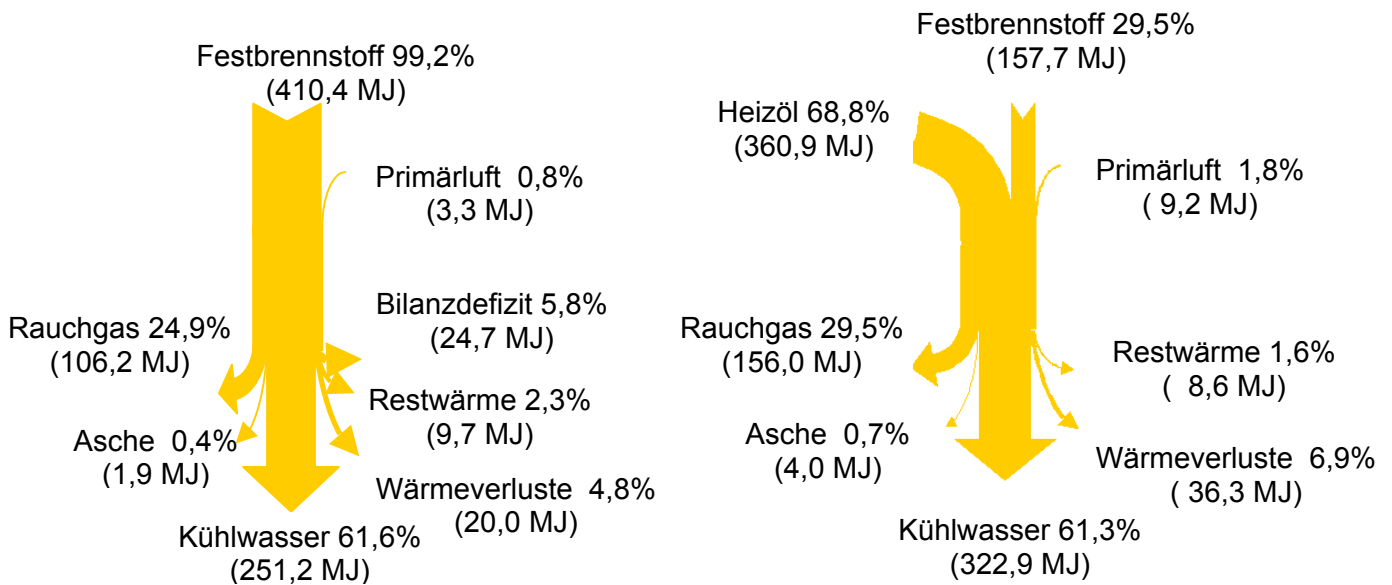


Abbildung 15 Energieflussdiagramme der TVA für die alte (links) und die aktuelle (rechts) Anlagenkonfiguration

Wie man sieht, ist die relative Verteilung der Wärmeströme fast gleich geblieben. Allerdings sind die absoluten Wärmeströme, bedingt durch den Einsatz der Ölstützfeuerung, bei der aktuellen Anlagenkonfiguration höher. Das insgesamt höhere Temperaturniveau in der Anlage führt auch zu einem erhöhten Wärmeverlust durch die nicht isolierten Bauteile. Ohne die unter 4.3.2 beschriebenen Maßnahmen ist davon auszugehen, dass sich die relative Verteilung der Outputströme weg vom Wasserkühlkreislauf zu den schlechter erfassbaren Wärmeströmen hin verschieben würde.

4.4 Betrachtung der statistischen Bestimmungsgenauigkeit der Untersuchungsergebnisse an der TVA

Die Betrachtung der Bestimmungsgenauigkeit an der TVA hinsichtlich energetischer Parameter erfolgt unter zwei Blickwinkeln: Zunächst werden die Anlage und die an ihr ermittelten Größen hinsichtlich der Repräsentativität und der Genauigkeit der Messwerte bewertet. Dann erfolgt ein Vergleich der Bestimmungsgenauigkeit mit anderen Analysemethoden, wobei der Schwerpunkt auf dem Vergleich mit der klassischen Kalorimetrie als dem derzeitigen Standardverfahren gelegt wird und hier auch Betrachtungen zum Aufwand bei der Durchführung der beiden Analyseverfahren erfolgen. Die Betrachtungen zur Bestimmungsgenauigkeit werden aus zwei

Gründen zunächst auf Basis der Heizwertbestimmungen an der TVA vorgenommen: Zum einen liegt bei diesem energetischen Parameter die größte Datenbasis für die Betrachtungen vor. Zum anderen ist der Heizwert der Standardparameter bei Abfall hinsichtlich energetischer Problemstellungen und damit der Parameter, der auch bei den anderen Analysemethoden bestimmt wird und somit einen Vergleich der Methoden ermöglicht. Da die experimentelle Bestimmung des Verbrennungsverhaltens auf Messgrößen basiert, die bei der Heizwertbestimmung an der TVA entscheidend mit eingehen, sind die Betrachtungen zur Bestimmungsgenauigkeit im Wesentlichen auch auf die weiteren an der TVA bestimmten energetischen Größen übertragbar.

4.4.1 Bewertung der Bestimmungsgenauigkeit der TVA

Basis der Betrachtungen zur Bestimmungsgenauigkeit sind die Heizwertanalysen, die an den Stoffen vorgenommen wurden, die auch bei der Bestimmung des Verbrennungsverhaltens verwendet wurden (siehe Kapitel 5) und deren Ergebnisse in Tabelle 4 dargestellt sind. Bei jedem Material wurde eine Doppelbestimmung vorgenommen.

Tabelle 4: Ergebnisse der Heizwertbestimmungen von Abfallmonofractionen an der TVA

Brennstoff	Heizwert [kJ/kg]	Mittelwert des Heizwertes [kJ/kg]	Standardab- weichung [kJ/kg]	Variations- koeffizient [%]
Gummi (1)	27.609	28.242	633	2,2
Gummi (2)	28.874			
Holzbriketts (1)	17.973	18.497	524	2,8
Holzbriketts (2)	19.020			
Mischkunststoffe (1)	30.079	30.508	429	1,4
Mischkunststoffe (2)	30.937			
Papier (1)	12.399	12.796	397	3,1
Papier (2)	13.193			
PET (1)	19.486	19.990	504	2,5
PET (2)	20.493			
Tetra-Packs (1)	18.311	19.427	1.116	5,7
Tetra-Packs (2)	20.543			
Textilien (1)	23.806	23.897	91	0,4
Textilien (2)	23.988			
Arithmetisch gemittelter Variationskoeffizient:				2,6

Bei der Bewertung der Bestimmungsgenauigkeit der an der TVA durchgeführten Untersuchungen ist zunächst von Interesse, ob die einzelnen Untersuchungsergebnisse als repräsentativ anzusehen sind, d.h. inwieweit die Ergebnisse bei einer Mehrfachbestimmung voneinander abweichen oder streuen. Das statistische Maß für die Streuung ist die Varianz oder die daraus abgeleitete Standardabweichung. Zum Vergleich von Streuungen, die auf der Basis verschiedener Mittelwerte ermittelt werden, wie es hier der Fall ist, sind Standardabweichungen allerdings nur bedingt geeignet. Der Vergleich der Streuungen bei den Heizwertbestimmungen der verschiedenen Stoffe erfolgt durch den Variationskoeffizienten (Gleichung 4) als sogenannte „relative Standardabweichung“.

$$\text{Gleichung 4: Variationskoeffizient } v = \frac{\sigma}{\mu}$$

mit der Standardabweichung σ und dem Mittelwert μ

Der Variationskoeffizient ist ein Maß für die Präzision der Messung. Mit einem mittleren Variationskoeffizienten von nur 2,6 % kann man sagen, dass die TVA repräsentative Ergebnisse liefert. Bei den früheren Untersuchungen von KOST (2001), die noch vor dem Abschluss aller unter 4.3 beschriebenen Maßnahmen vorgenommen wurden, wurde ein mittlerer Variationskoeffizient von 13,5 % ermittelt. Die inzwischen erreichte deutliche Verbesserung zeigt, dass die entsprechenden Maßnahmen an der TVA ihren Zweck erfüllt haben.

Mit dem Variationskoeffizienten kann zwar eine Aussage darüber gemacht werden, wie stark bei einer Versuchswiederholung das Ergebnis vom Mittelwert der Ergebnisse früherer Untersuchungen abweicht, es kann aber so keine Aussage darüber gemacht werden, wie stark das Ergebnis von dem tatsächlichen Wert, in diesem Fall dem tatsächlichen Heizwert des Stoffes, abweicht. Eine solche Aussage ist aber auf der Basis der Methode des Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetzes möglich und wurde bereits von FRIEDEL (2001) erstmalig für die Heizwertbestimmung an der TVA vorgenommen.

Generell gilt für einen Wert Φ als Funktion mehrerer unabhängiger, fehlerbehafteter Größen $f_{i,N}$, dass sich der Absolutfehler wie folgt berechnen lässt:

$$\text{Gleichung 5: } \Phi = \Phi(f_1, f_N)$$

$$\text{Gleichung 6: } \Delta\Phi = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial\Phi}{\partial f_i} \cdot \Delta f_i \right)^2}$$

Bei dem Bilanzierungsverfahren an der TVA ergibt sich der Heizwert direkt aus den in der Energiebilanz berechneten In- und Outputenergien, die sich ihrerseits aus den Teilenergien zusammensetzen. Die Teilenergien ergeben sich als Funktionen unabhängiger Größen im Sinne des Fehlerfortpflanzungsgesetzes. Diese Fehlerbetrachtung muss für jede einzelne Bestimmung separat vorgenommen werden, doch sind für die einzelnen Heizwertbestimmungen der verschiedenen Stoffe die Ergebnisse aufgrund des prinzipiell gleichen Versuchsaufbaues ähnlich genug, um anhand des in Tabelle 5 dargestellten Beispiels generelle Aussagen machen zu können. Die ausführliche Fehlerrechnung für das dargestellte Beispiel findet sich im Anhang A2.

Tabelle 5: Fehlerbetrachtung für einen Verbrennungsversuch (PET 1)
(*:Relativer Fehler bezogen auf die Energiesummen)

Energieterm	Energiemenge [kJ]	Absolutfehler [kJ]	Relativ- fehler	Relativer Fehler*
Inputenergien:				
Brennstoff	140.514	1.403	1,00%	0,27%
Ölstützfeuer	375.276	5.720	1,52%	1,09%
Verbrennungsluft	11.100	1.287	11,60%	0,24%
<i>Summe Q_{Input}</i>	<i>526.890</i>	<i>6.029</i>	<i>1,14%</i>	
Outputenergien:				
Kühlwasser	324.099	14.547	4,49%	2,76%
Abgas	149.779	14.552	9,72%	2,76%
Asche	10.266	96	0,94%	0,02%
Wärmeverluste	33.544	3.347	9,98%	0,64%
Restwärme	9.202	460	5,00%	0,09%
<i>Summe Q_{Output}</i>	<i>526.890</i>	<i>20.851</i>	<i>3,96%</i>	
Gesamtfehler			4,12%	

Der Gesamtfehler von wenig über 4 % lässt insgesamt den Schluss zu, dass die Heizwertbestimmung relativ genau erfolgt (zum Vergleich mit anderen Verfahren, siehe 4.4.2), insbesondere wenn man bedenkt, dass die in die Fehlerbetrachtung eingehenden Messfehler angenommene Maximalfehler sind. Somit ist auch der Gesamtfehler als maximal möglicher Gesamtfehler zu betrachten. Erwartungsgemäß liefern die Teilenergien, die die größten Anteile an der Gesamtenergie stellen, auch die größten Beiträge zu dem Gesamtfehler. Im Einzelnen sind dies die Teilenergien im Kühlwasser, im Abgas und, als neue Teilenergie gegenüber der alten Fehlerbetrachtung, die Ölstützfeuerung. Bei der Betrachtung der Relativfehler bezogen auf die

eigene Energiemenge zeigt sich, dass sich ein weiteres Optimierungspotential am ehesten bei der Erfassung der Energie im Abgas ergibt. Wie auch bei den Variationskoeffizienten lässt sich bei dem Vergleich mit dem alten, von FRIEDEL ermittelten Gesamtfehler von etwas über 10 % erkennen, dass die Maßnahmen zur Verbesserung der Erfassung energetischer Größen an der TVA erfolgreich waren.

4.4.2 Vergleich der Bestimmung energetischer Größen an der TVA mit anderen Analyseverfahren

Einen Vergleich des Analyseverfahrens mittels Bilanzierung an der TVA mit anderen Analyseverfahren hat KOST (2001) anhand der Untersuchung von BRAM vorgenommen. Die anderen Verfahren zur Bestimmung des Heizwertes waren die klassische Heizwertbestimmung im Kalorimeter und die Modellierung über fraktionsspezifische Kennziffern auf der Basis einer Sortieranalyse. Über eine Regressionsanalyse wurde ermittelt, dass alle drei methodischen Ansätze plausible Ergebnisse und eine gute Vergleichbarkeit liefern. Zusätzlich wurden für den Vergleich der Genauigkeiten die Variationskoeffizienten der Analyseverfahren bestimmt. Die mittleren Variationskoeffizienten und deren Spannbreite für die Heizwertbestimmung der drei Verfahren sind zusammen mit dem neu bestimmten Variationskoeffizienten der TVA in der folgenden Tabelle 6 dargestellt. Auch im Fachgebiet Abfalltechnik liegen umfangreiche Erfahrungen bei der kalorimetrischen Heizwertbestimmung vor und die Werte einer umfangreichen Analysereihe von 37 Proben MBA-Outputmaterials werden ebenfalls in der Tabelle berücksichtigt.

Tabelle 6: Mittelwerte und Spannbreiten der Variationskoeffizienten bei den Heizwertanalyseverfahren Kalorimeteranalyse, Modellierung und Bilanzierung

Analyseverfahren	Kalorimeter		Modellierung	Bilanzierung TVA	
	KOST	FG Abfallt.		alt	neu
mittlerer Variationskoeffizient	12,4 %	6,0 %	10,4 %	13,5 %	2,6 %
Spannbreite Variationskoeffizienten	3,7 % bis 28,8 %	0,1 % bis 12,9 %	8,5 % bis 13,0 %	10,4 % bis 18,8 %	0,4 % bis 5,7 %

Bei dem Verfahrensvergleich von KOST weisen die drei Verfahren vergleichbare Genauigkeiten auf. Die am Fachgebiet Abfalltechnik vorgenommene Analysereihe ergibt für die Kalorimeterbestimmung eine größere Genauigkeit. Beim Bilanzierungsverfahren an der TVA zeigt sich, dass die Verbesserungsmaßnahmen dazu geführt haben, dass gegenüber den anderen beiden Analysemethoden eine deutlich höhere

Genauigkeit bei der Heizwertbestimmung erzielt wird. Auffällig ist auch, dass bei den Kalorimeteranalysen wesentlich höhere Spannbreiten an Variationskoeffizienten auftreten als bei den anderen Verfahren und somit die Einschätzung der Genauigkeit im Einzelfall schwerer fällt. Dieses Verhalten ist auf die geringe Probemenge von nur ca. 1 g pro Kalorimeterbestimmung zurückzuführen, bei der sich bereits eine kleine Inhomogenität stark auf den Analysenwert auswirkt.

Betrachtet man den Zeitaufwand für die Analyse mit dem Kalorimeter und die Bestimmung durch die Bilanzierung an der TVA, so scheint zunächst die Kalorimetermethode klar im Vorteil zu sein. Bei entsprechender Erfahrung mit der Durchführung der Analyse werden für eine 3fach Bestimmung im Kalorimeter erfahrungsgemäß ca. 2 h benötigt. Dagegen beträgt die reine Versuchsdauer bei dem Bilanzierungsverfahren bereits 3 1/2 h, wozu noch jeweils 1 h Vor- und Nachbereitung an der Anlage dazukommen sowie eine etwa 1 stündige Datenauswertung. Das ergibt in der Summe 6 1/2 h für die Heizwertbestimmung. Allerdings wird für die Bilanzierung an der TVA nach der Probenahme keine weitere Probeaufbereitung benötigt. Dagegen muss für die Kalorimeteranalyse die Probe erst analysenfein gemahlen werden. Die einzelnen dafür benötigten Arbeitsschritte sind zusammen mit den dafür geschätzten Arbeitszeiten, ausgehend von der gleichen Probemenge, die auch dem Bilanzierungsverfahren zugrunde liegt, in Abbildung 16 dargestellt. Es ergeben sich 4 h für die Probenaufbereitung, womit die Kalorimeteranalyse in der Summe 6 h benötigt. Damit ist der Zeitaufwand für die beiden hier betrachteten Verfahren nahezu gleich und die bessere Bestimmungsgenauigkeit des Bilanzierungsverfahrens wird nur durch einen geringen Mehraufwand erkaufte.

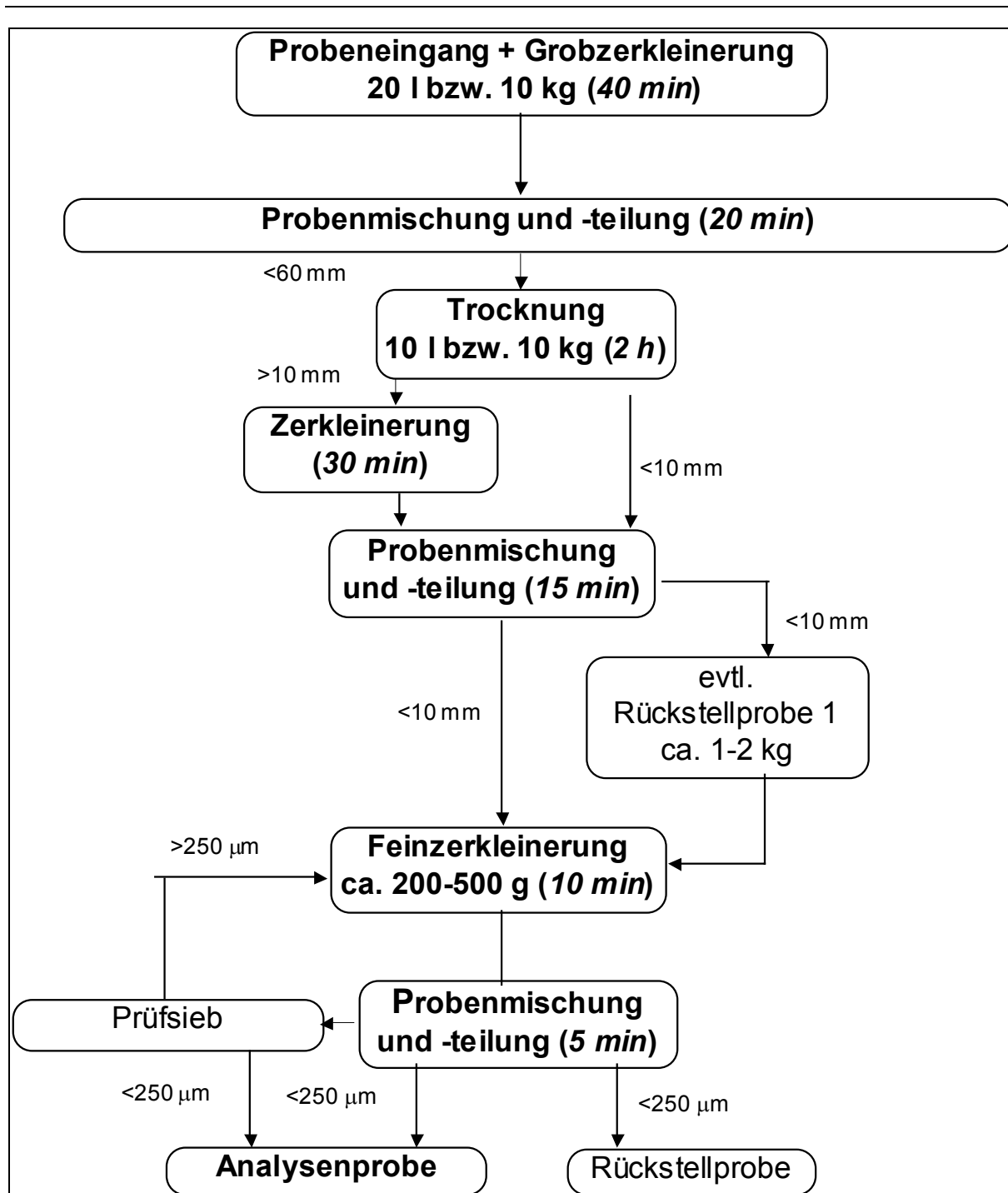


Abbildung 16 Arbeitsschritte bei der Probenaufbereitung mit Zeitangaben für die Hauptschritte

5. Experimentelle Untersuchungen zur Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens von festen Abfallstoffen

Wie bereits in Kapitel 3 dargelegt, wurden bei den bisher praktizierten Methoden zur Untersuchung des Verbrennungsverhalten überwiegend nur einzelne Brennstoffkörner betrachtet. Selbst wenn es gelingt, den Brennstoff entsprechend fein aufzubereiten, dass man tatsächlich von einzelnen Brennstoffkörnern sprechen kann, kommt im Bereich der festen Abfallstoffe das zusätzliche Problem hinzu, dass diese üblicherweise in heterogenen Gemischen anfallen. Bei einem heterogenen Gemisch ein repräsentatives Einzelkorn zu finden bzw. zu erzeugen, gestaltet sich extrem schwierig. Zur Umgehung dieses Problems wird der gleiche Ansatz verfolgt, wie bei den Bilanzierungsverfahren zur Bestimmung des Heizwertes und der Schadstoffe (siehe Kapitel 4). Über einen längeren Versuchszeitraum wird einem semi-kontinuierlichen Verbrennungsprozess bei gleichen Randbedingungen in definierten Intervallen Brennstoff zugegeben. Durch eine statistische Auswertung des Verbrennungsverhaltens in den einzelnen Intervallen lässt sich dann auf das Verbrennungsverhalten des Gemisches schließen.

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, liegt der Schwerpunkt dieser Untersuchung auf dem Vergleich des stoffabhängigen Verbrennungsverhaltens und somit kommt dem Einhalten gleicher Randbedingungen bei den einzelnen Versuche eine besondere Bedeutung zu. Im Einzelnen heißt das, dass die Prozessbedingungen der Feuerung bei den einzelnen Versuchen näherungsweise konstant gehalten wurden und die untersuchten Stoffe in einem vergleichbaren Aufbereitungszustand vorlagen.

5.1 Methodik der Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens auf der Basis von semi-kontinuierlichen Verbrennungsversuchen

5.1.1 Entwicklung des Untersuchungsansatzes

Wie auch bei der integralen Bestimmung des Heizwertes, ist die Grundlage zur Erfassung des zeitabhängigen Verbrennungsverhaltens die Energiebilanz der TVA (siehe Gleichung 2, Kap. 4). Dabei stellt sich der Output-Wärmestrom wie folgt dar:

$$\text{Gleichung 7} \quad \dot{Q}_{\text{output}} = \dot{Q}_{\text{Kühlwasser}} + \dot{Q}_{\text{Rauchgas}} + \dot{Q}_{\text{Asche}} + \dot{Q}_{\text{Verluste (Strahlung, Konvektion)}}$$

Erfahrungen aus früheren Versuchsreihen an der Anlage haben gezeigt, dass die

Anteile \dot{Q}_{Asche} und $\dot{Q}_{\text{Verluste}} \ll \dot{Q}_{\text{Kühlwasser}}$ und $\dot{Q}_{\text{Rauchgas}}$ sind (siehe 4.3.3). Daher sollen sie bei den folgenden Betrachtungen vernachlässigt werden. Somit lässt sich der sich aus der freigesetzten Energie ergebende Wärmestrom in Abhängigkeit von der Zeit mit der folgenden Gleichung 8 beschreiben:

Gleichung 8
$$\dot{Q}(t) = c_{p, \text{KW}} \cdot \dot{m}_{\text{KW}} \cdot \Delta T(t)_{\text{KW}} + c_{p, \text{Rg}} \cdot \dot{V}_{\text{Rg}} \cdot \Delta T(t)_{\text{Rg}}$$

Die durch den Verbrennungsvorgang erzeugte Energie führt zu Temperaturerhöhungen des Rauchgases und indirekt des Kühlwassers. Im Idealfall lässt sich somit durch eine kontinuierliche Temperaturmessung der zeitliche Verlauf der Energiefreisetzung während der Verbrennung unter Berücksichtigung der Zeitverzögerung zwischen der Verbrennung und der messtechnischen Erfassung quantitativ ermitteln. Im Falle des semi-kontinuierlichen Verbrennungsprozesses ergeben sich für verschiedene Stoffe und Gemische charakteristische Kurven, die zur Beschreibung des Verbrennungsverhaltens herangezogen werden können.

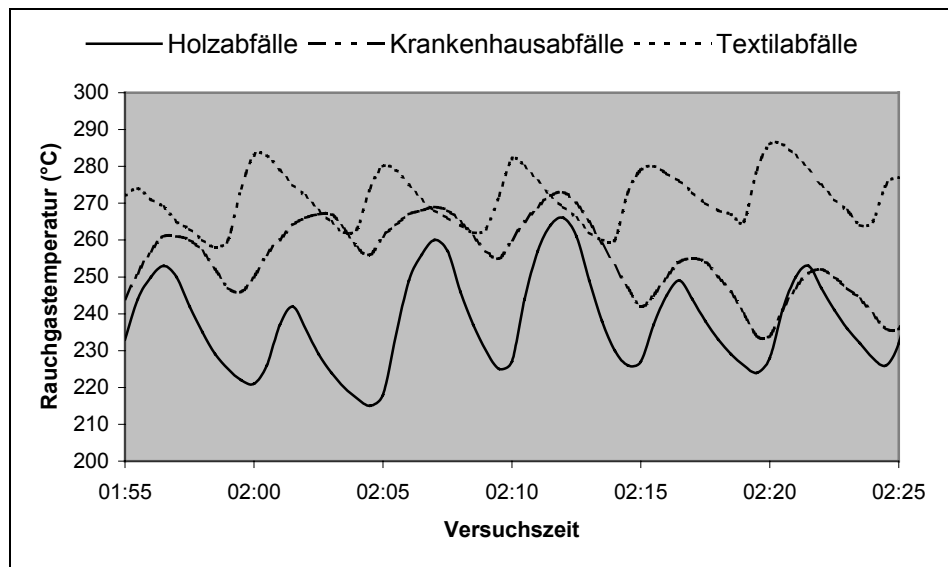


Abbildung 17 Temperaturverlaufskurven im Rauchgas bei der semi-kontinuierlichen Verbrennung unterschiedlicher Abfallgemische

Dass sich charakteristische Kurven erwarten lassen, illustrieren die Verläufe der Rauchgastemperaturen in Abbildung 17, die aus Verbrennungsversuchen stammen, die noch nicht unter der Fragestellung des Verbrennungsverhaltens durchgeführt wurden und von daher keine gleichen, aber doch vergleichbare Bedingungen, aufwiesen. Zwar lassen sich bei der Betrachtung einer einzelnen Kurve zwischen den einzelnen Peaks, die sich aus den Beschickungsintervallen der semi-kontinuierlichen Betriebsweise ergeben, Unterschiede ausmachen. Doch vergleicht man die Peaks einer Kurve mit denen der zwei anderen Kurven, lässt sich innerhalb einer Kurve eine

Ähnlichkeit der Form der Peaks erkennen. Dass der zeitliche Verlauf des Wärmestromes der freigesetzten Energie (= der Verbrennungsleistung) näherungsweise durch den Verlauf der Messgrößen ΔT_{Rg} und ΔT_{Kw} wiedergegeben werden kann, wie in Gleichung 8 dargestellt, zeigt Abbildung 18. Hier sind für einen weiteren Versuch die Verläufe der Messgrößen ΔT_{Rg} und ΔT_{Kw} und der aus den Versuchsdaten berechnete Wärmestrom (kJ/s) einander gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass sich die qualitativen Kurvenverläufe näherungsweise decken.

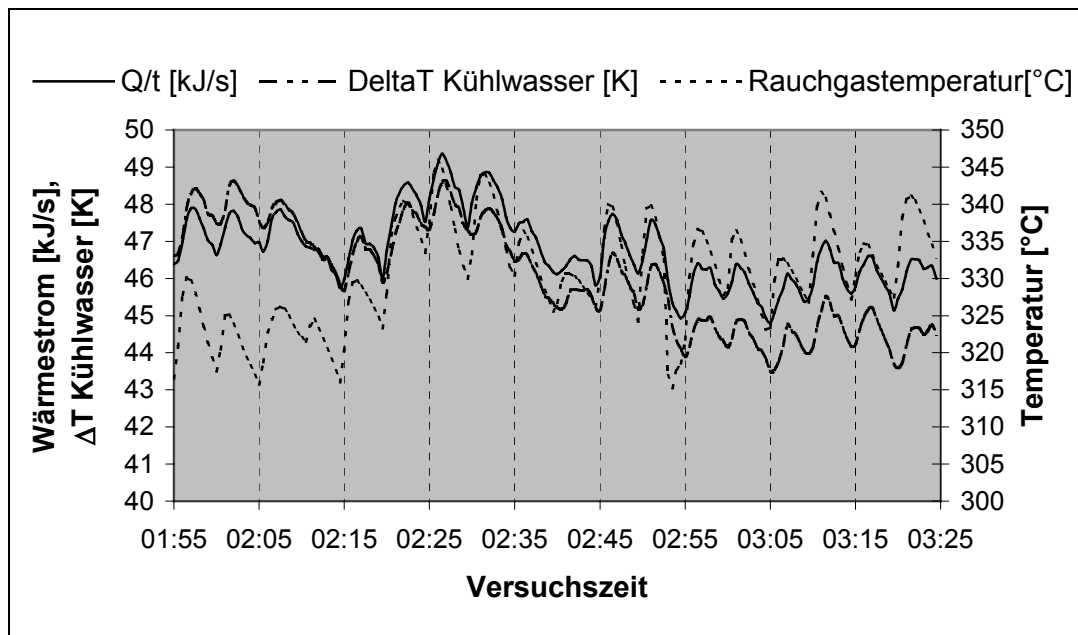


Abbildung 18 Verläufe der Messgrößen ΔT_{Rg} und ΔT_{Kw} und des Wärmestromes der freigesetzten Energie bei einem Verbrennungsversuch mit Holz

Bei den im Verlauf der Arbeit auf ihr Verbrennungsverhalten untersuchten Stoffen wurde genau ermittelt, welcher Anteil der Output-Wärmeströme mit Hilfe der Messgrößen ΔT_{Rg} und ΔT_{Kw} erfasst wird, nachdem der Anfahrvorgang zu Beginn der Brennstoffzugabe beendet war (Tab. 7).

Tabelle 7: Spannbreite des mit Hilfe der Messgrößen ΔT_{Rg} und ΔT_{Kw} erfassten Anteiles der Output-Wärmeströme

Gemessener Anteil von Q/t	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.
	93,8 %	89,7 %	96,1 %	1,0 %

Im Mittel sind dies 93,8 %, wobei zwischen den einzelnen Versuchen insgesamt nur geringe Schwankungen auftraten. Die so ermittelten Abweichungen wurden als Korrekturfaktoren berücksichtigt und sind im Anhang für jeden Versuch aufgeführt.

Das Erfassen des zeitlichen Verlaufs des Wärmestromes der freigesetzten Energie für die unterschiedlichen Probematerialien ist ein erster Schritt hin zur direkten Vergleichbarkeit des Verbrennungsverhaltens der unterschiedlichen Stoffe bzw. Stoffgemische. Der nächste Schritt ist, aus den mittleren Steigungen der Temperaturverläufe des Wasserkühlkreislafes und des Rauchgases für die einzelnen Beschickungsintervalle eine charakteristische Kurve zu ermitteln. Dabei wird zunächst ein linearer Ansatz verfolgt, sowohl für den Temperaturanstieg als auch für die folgende Temperaturabnahme zurück auf das Grundniveau während eines Beschickungsintervalls. Somit lässt sich für ΔT_{Rg} und ΔT_{Kw} das zeitabhängige Verhalten mit den statistisch gemittelten Anstiegs- und Abnahmesteigungen bestimmen. Durch Überlagerung der sich daraus ergebenden Q/t_{Rg} - und Q/t_{Kw} -Kurven wird der Verlauf der charakteristische Kurve der freigesetzten Energie bestimmt. Diese Schritte werden unter 5.1.3 noch genauer ausgeführt. Für die bereits in Abbildung 17 berücksichtigten Abfallgemische, die als Vorversuche noch unter leicht differierenden Versuchsbedingungen untersucht wurden, sind die sich ergebenden charakteristischen Energiefreisetzungskurven in der folgenden Abbildung 19 dargestellt. Die unterschiedliche Form der Kurven als Indikator für das unterschiedliche Verbrennungsverhalten ist hier deutlich erkennbar. Inwieweit sich aus den Kurven über die bloße Feststellung eines unterschiedlichen Verbrennungsverhaltens hinausgehende Möglichkeiten des Vergleichs ergeben, wird in Kapitel 5.3 ausgeführt.

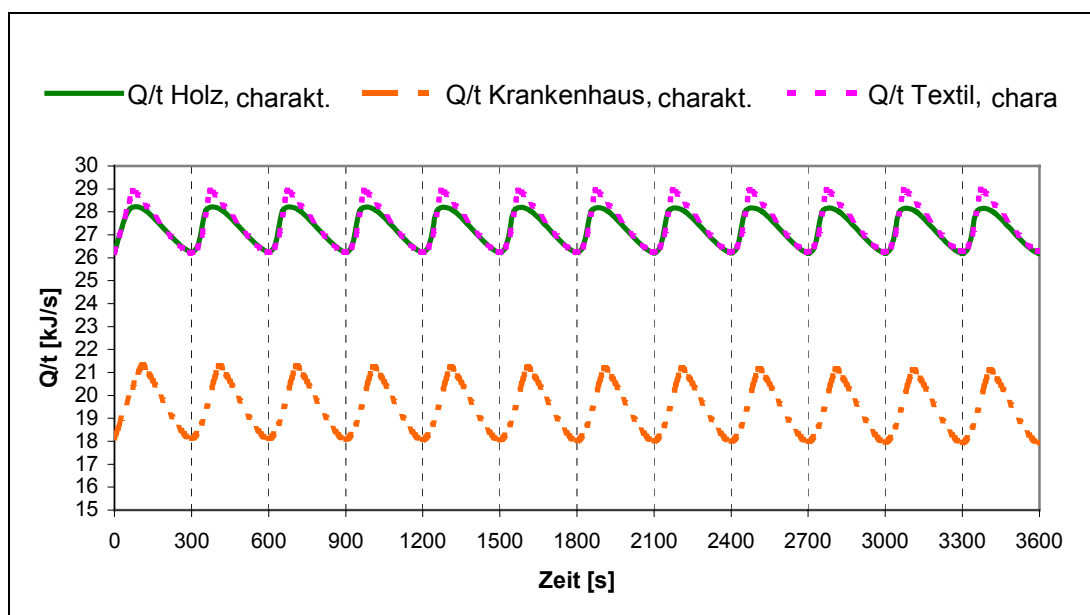


Abbildung 19 Charakteristische Kurven der freigesetzten Energie unterschiedlicher Abfallgemische

5.1.2 Durchführung der semi-kontinuierlichen Verbrennungsversuche zur Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens

Bei der Durchführung eines semi-kontinuierlichen Verbrennungsversuches wird dieser in fünf Versuchsphasen unterteilt:

- a. die Aufheizphase,
- b. die Anfahrphase der Feststoffverbrennung,
- c. die stabile Hauptphase der Feststoffverbrennung,
- d. die Nachbrennphase,
- e. die Abkühlphase.

Während der Aufheizphase wird die TVA inklusive des Wasserkühlkreislaufes in einen stabilen Temperaturzustand gebracht, wozu eine halbe Stunde ausschließlich der Ölbrenner betrieben wird. Während der folgenden Phasen wird der Festbrennstoff in Abfallchargen gleicher Masse nach festgelegten Zeitintervallen zugegeben. Erst mit dem Beginn der Festbrennstoffzugabe in der Anfahrphase der Feststoffverbrennung wird die zusätzliche Primärluft für den Festbrennstoff dazugegeben (Der Ölbrenner führt sich selbsttätig die benötigte Verbrennungsluft zu). Das auf dem Rost liegende Material wird regelmäßig unmittelbar vor den Zugaben geschürt.

Auf der Basis von Vorerfahrungen und der technischen Randbedingungen der Anlage (Abmessungen des Feuerraums, Leistungen der Kühlstufen und der Gebläse) wurde die Festbrennstoffmasse auf 200 g pro Verbrennungsintervall von 5 Minuten festgelegt. Eine häufigere Beschickung als im fünfminütigen Rhythmus ist in der praktischen Durchführung nicht möglich, ohne das Risiko einzugehen, dass es zu Störungen des regelmäßigen Betriebsablaufes kommt. Die so erprobte Betriebsweise gewährleistet einen stabilen Verbrennungsprozess und einen nahezu vollständigen Ausbrand.

Wie schon zu Beginn des Kapitels erwähnt, ist es für die im Rahmen dieser Arbeit vorgesehene Untersuchung des stoffspezifischen Verbrennungsverhaltens essentiell, dass die Versuchsbedingungen einheitlich sind. Dieses betrifft zunächst einmal die Korngröße der zu untersuchenden Stoffe. Durch eine Vorzerkleinerung werden die Probematerialien soweit aufbereitet, dass sie in einem vergleichbaren Korngrößenspektrum vorliegen, wobei aufgrund der Untersuchung in einem Rostofen der Zerkleinerungsgrad nach unten limitiert ist, um einen Durchfall hoher Anteile

unverbrannten Materials zu vermeiden. Für den Einsatz in der TVA wird eine Korngröße $> 20\text{mm}$ angestrebt. Die maximale Korngröße ergibt sich aus dem Verhalten des Probematerials im verwendeten Zerkleinerungsaggregat. Für die untersuchten Stoffe wird hierauf im Kapitel 5.3 noch einmal im Detail eingegangen.

Betreffend der einheitlichen Prozessbedingungen als Voraussetzung für die Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse miteinander sind bezüglich des Verbrennungsverhaltens die Einflussgrößen Temperatur und Sauerstoffgehalt relevant. Der Ölbrenner wird auf eine feste Verbrennungsleistung von ca. 28 kW eingestellt, wodurch nach der halbstündigen Vorwärmung eine Feuerraumtemperatur von ca. 650°C erreicht wird. Diese Temperatur reicht bei Abfallbrennstoffen aus, um eine sofortige Zündung herbeizuführen, da sie einen hohen Gehalt an flüchtigen Bestandteilen aufweisen. Im weiteren Versuchsverlauf ist es aufgrund der semi-kontinuierlichen Betriebsweise nicht möglich, Temperaturschwankungen zu vermeiden, und aufgrund der unterschiedlichen Heizwerte der untersuchten Stoffe lassen sich auch unterschiedliche mittlere Temperaturniveaus zwischen den einzelnen Versuchen nicht ausschließen. Wie aber in Kapitel 3.1 dargelegt, ist die absolute Temperatur nicht mehr relevant, sobald nach dem Überschreiten einer Grenztemperatur der Bereich erreicht wird, in dem der Verbrennungsprozess durch die Sauerstoffdiffusion bestimmt wird. Die Grenztemperatur von 1100 K für reinen Kohlenstoff wurde den Versuchen zugrundegelegt, obwohl davon auszugehen ist, dass die Grenztemperatur für die vorliegenden C/H/O-Verbindungen niedriger anzusetzen ist.

Mit den derzeit für die TVA zur Verfügung stehenden Messfühlern ist es aufgrund der hohen Beanspruchung nicht möglich, die Feuerraumtemperatur kontinuierlich zu messen. Doch haben Messungen in regelmäßigen Intervallen gezeigt, dass die Temperatur über dem Rost im Mittel ca. 250°C höher liegt als die kontinuierlich gemessene Temperatur am Kesseleintritt. Daher wurde darauf geachtet, dass während der Hauptphase eines Versuches die Temperatur am Kesseleintritt 600°C nicht unterschreitet, um eine Mindestverbrennungstemperatur von 850°C zu sichern.

Der Primärluftvolumenstrom wird für jede Abfallfraktion so bestimmt, dass ein ausreichender Überschuss an Sauerstoff zur Verfügung steht. Dafür erfolgt die Primärluftzufuhr so, dass in Anlehnung an die Praxis in Großanlagen, der Sauerstoffgehalt im Rauchgas nach Möglichkeit nicht unter 6 % fällt, wobei sich dieses bei sehr schnell verbrennenden Stoffen direkt nach einer Neuzugabe nicht immer einhalten lässt.

Generell wird der Volumenstrom der Primärluft in den ersten anderthalb bis zweieinhalb Minuten (Phase der zunehmenden Verbrennungsleistung) erhöht und in der restlichen Zeit des Verbrennungsintervalls (Phase der abnehmenden Verbrennungsleistung) minimal gehalten, wobei der Sauerstoffgehalt im Rauchgas bis auf 10 % steigt.

Nach einigen Festbrennstoffzugaben, im Mittel sechs bis sieben, wird ein Niveau der Verbrennungsleistung erreicht, bei dem sich auf einem näherungsweise konstanten Grundniveau der Verbrennungsleistung pro Intervall ein Leistungspeak ausbildet. Dieser Zustand wird als die stabile Hauptphase der Feststoffverbrennung bezeichnet. Nur die Daten dieser Versuchsphase werden hinsichtlich der charakteristischen Kurve ausgewertet.

Die Festbrennstoffzugabe erfolgt drei Stunden lang. Dieser Zeitraum wurde aufgrund von Vorversuchen gewählt, um die hohe statistische Repräsentativität eines Verbrennungsversuches zu gewährleisten. Es folgt eine fünfminütige Phase, bei der unter Brennerbetrieb der Abbrand der auf dem Rost gebliebenen Reste erfolgt. Mit dem Ausschalten des Brenners nach Beendigung dieser Phase ist der Versuch beendet, womit die Gesamtdauer der Versuche drei Stunden und fünfunddreißig Minuten beträgt.

Die auf dem Rost verbleibende Asche wird nach dem Abkühlen gewogen. Anschließend wird der Glühverlust für die Beurteilung der Ausbrandgüte nach DIN 38414, Teil 3 bestimmt. Diese Methode wird wegen ihrer einfachen und praktikablen Versuchsdurchführung für Serienanalysen der festen Rückstände nach der Abfallverbrennung gewählt und liefert in diesem Fall angesichts der sehr geringen Aschemengen eine ausreichende Genauigkeit. In Vorversuchen wurde die Asche zum Teil direkt nach der Nachbrennphase entnommen und gelöscht. Die Ergebnisse der anschließenden Glühverlustbestimmungen wichen nur gering von denen ungelöschter Asche aus vergleichbaren Versuchen ab, weshalb die Entnahme und das Löschen der heißen Asche nicht weiter praktiziert wurde.

5.1.3 Bildung der charakteristischen Kurven und des Energiefreisetzungswertes als Grundlage für die Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens

Für einen ersten qualitativen Vergleich des Verbrennungsverhaltens werden die sich in Abhängigkeit vom eingesetzten Brennstoff unterschiedlich ausprägenden Peaks der Verbrennungsleistungskurve betrachtet. Wie bei den eingesetzten Festbrennstoffen zu erwarten, ist der Verbrennungsprozess nicht vollständig homogen und es kommt zu Unregelmäßigkeiten bei der Peakbildung. Für eine direkte Vergleichbarkeit ist es deshalb sinnvoll, durch statistische Mittelung eine Modellkurve aus gleichförmigen Peaks zu bestimmen. Diese Modellkurve wird im Folgenden als charakteristische Energiefreisetzungskurve bezeichnet. Aus ihr ergibt sich der Energiefreisetzungswert (EFW) als Kennzahl zur quantitativen Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens.

Der erste Schritt zur Bestimmung der charakteristischen Energiefreisetzungskurve besteht in der Festlegung des Beginns der stabilen Hauptphase mit periodischem Temperaturverlauf als der Zeitraum, der für die Versuchsauswertung zur Bildung der charakteristischen Energiefreisetzungskurve herangezogen wird. Diese beginnt, nachdem bei den Temperaturen des Vor- und Rücklaufes des Kühlwasserkreislaufes sowie des Rauchgases ein stabiles Niveau erreicht wird.

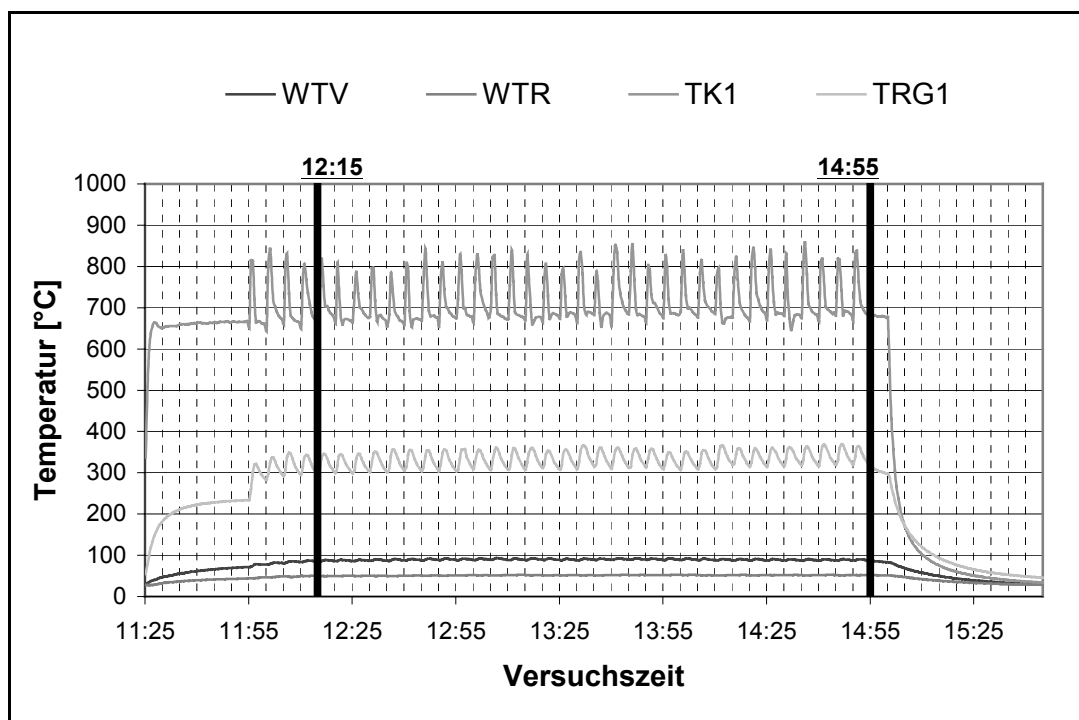


Abbildung 20 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von zerkleinerten Textilien über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

In Abbildung 20 ist dieses am Beispiel eines Verbrennungsversuches mit Textilien dargestellt. In diesem Fall ergibt sich für die Auswertung zur Bestimmung der charakteristischen Energiefreisetzungscurve eine Zeitspanne von 9600 s bzw. 32 Verbrennungsintervallen à 300 s.

Für die charakteristische Energiefreisetzungscurve wird das Grundniveau, auf dem sich die charakteristischen Peaks ausbilden, nach Gleichung 9 berechnet.

$$\text{Gleichung 9} \quad \dot{Q}_0 = T_{\text{Rg,BASE}} \cdot \dot{V}_{\text{Rg}} \cdot c_{p,\text{Rg}} + T_{\text{Kw,BASE}} \cdot \dot{m}_{\text{Kw}} \cdot c_{p,\text{Kw}}$$

Dabei erfolgt die Berechnung der Basistemperaturen des Rauchgases $T_{\text{Rg,BASE}}$ und des Wasserkühlkreislauferes $T_{\text{Kw,BASE}}$, indem der Mittelwert der tiefsten Temperaturen der Teilintervalle innerhalb der stabilen Hauptphase gebildet wird. Ebenso werden für das Rauchgasvolumen \dot{V}_{Rg} , den Massenstrom \dot{m}_{Kw} und die Wärmeleitfähigkeit des Wassers $c_{p,\text{Kw}}$ die mittleren Werte während der stabilen Hauptphase genommen, die aus den Versuchsdaten bestimmt werden. Die Wärmeleitfähigkeit des Rauchgases $c_{p,\text{Rg}}$ wird auf der Basis der angenommenen Elementarzusammensetzung der Brennstoffe berechnet.

Im Weiteren werden die Outputwärmeströme im Rauchgas und im Wasserkühlkreislauf zunächst getrennt ausgewertet. Wie schon beschrieben, ergeben sich diese Wärmeströme unmittelbar aus dem Temperaturverhalten des Rauchgases bzw. des Vorlaufs und Rücklaufs im Wasserkühlkreislauf.

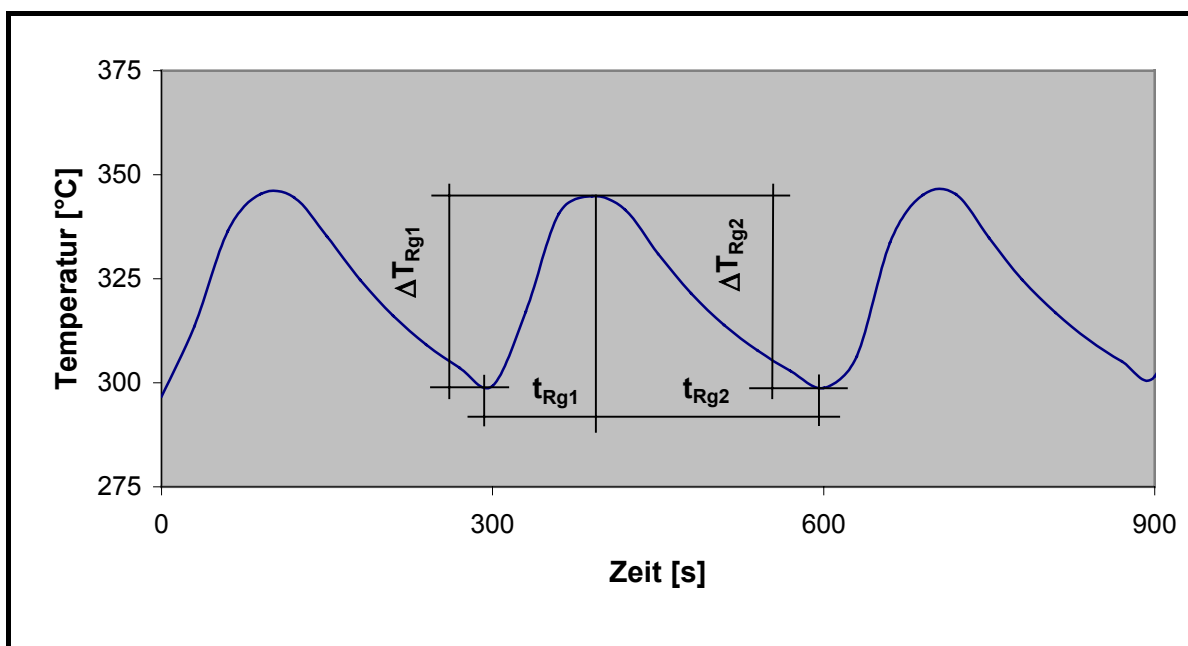


Abbildung 21 Bestimmung der mittleren Steigungen für die Rauchgastemperaturpeaks

Von den Temperaturpeaks wird jeweils die mittlere Steigung des Anstiegs und der Abnahme bestimmt, wie hier für das Rauchgas dargestellt (Abbildung 21). Dazu erfolgt die Bestimmung der Temperaturunterschiede $\Delta T_{Rg1,i}$ zwischen dem Temperaturminimum am Anfang des Intervalls und dem Temperaturmaximum des Intervalls und $\Delta T_{Rg2,i}$ zwischen dem Temperaturmaximum und dem Temperaturminimum am Ende des Intervalls, sowie der Zeitspannen $t_{Rg1,i}$ für die Temperaturzunahme und $t_{Rg2,i}$ für die Temperaturabnahme.

Die Berechnung der mittleren Steigungen a erfolgt für das Rauchgas nach den Gleichungen 10 und 11.

$$\text{Gleichung 10} \quad a_{Rg1,i} = \frac{\Delta T_{Rg1,i}}{t_{Rg1,i}}$$

$$\text{Gleichung 11} \quad a_{Rg2,i} = \frac{\Delta T_{Rg2,i}}{t_{Rg2,i}}$$

Die Berechnung der Steigungen $a_{Kw1,i}$ und $a_{Kw2,i}$ für den Temperaturverlauf im Wasserkühlkreislauf erfolgt analog. Durch die anschließende Mittelwertbildung erhält man mit a_{Rg1} und a_{Rg2} bzw. a_{Kw1} und a_{Kw2} die Steigungen, aus denen sich die Steigungen a_Q für die Peakausbildung der charakteristischen Energiefreisetzungscurve ergeben :

$$\text{Gleichung 12} \quad a_{QRg1,2} = a_{Rg1,2} * \dot{V}_{Rg} * c_{p,Rg}$$

$$\text{Gleichung 13} \quad a_{QKw1,2} = a_{Kw1,2} * \dot{m}_{Kw} * c_{p,Kw}$$

Der erste Punkt der charakteristischen Energiefreisetzungscurve ist die Spitze des ersten Peaks und wird berechnet nach den Gleichungen 14 und 15. Dabei ist t_{zu} das Teilintervall, in dem die Wärmeströme im Rauchgas und im Wasserkühlkreislauf aus der bei der Verbrennung freigesetzten Energie beständig zunehmen (Abbildung 22).

$$\text{Gleichung 14} \quad (a_{QRg1} + a_{QKw1}) = a_{Zunahme}$$

$$\text{Gleichung 15} \quad \dot{Q}_{zu} = \dot{Q}_0 + a_{Zunahme} * t_{zu}$$

Im Idealfall setzt dann die Abnahme der beiden Wärmeströme im Rauchgas und im Kühlwasserkreislauf ein, womit sich der Punkt am Ende des ersten Peaks nach dem Zeitintervall t_{ab} nach den Gleichungen 16 und 17 berechnen.

$$\text{Gleichung 16} \quad (a_{QRg2} + a_{QKw2}) = a_{Abnahme}$$

$$\text{Gleichung 17} \quad \dot{Q}_{ab} = \dot{Q}_{zu} - a_{Abnahme} * t_{ab}$$

Real ist es so, dass die Zu- und Abnahmezeiten der Wärmeströme im Rauchgas und im Kühlwasser nicht vollkommen synchron sind. Dieses ist auf den räumlichen Versatz der Messstellen für die Temperaturen des Wasserkühlkreislafes und des Rauchgases zurückzuführen und darauf, dass der Prozess der Wärmeübertragung in den Wasserkühlkreislauf zu einem zeitlichen Versatz der Temperaturmessung führt.

Von daher ist es notwendig, ein Zwischenintervall einzuführen, in dem entweder während der Wärmestrom im Kühlwasser noch zunimmt, der Wärmestrom im Rauchgas schon wieder abnimmt, oder aber umgekehrt, der Wärmestrom im Rauchgas noch zunimmt während der Wärmestrom im Wasser schon wieder abnimmt.

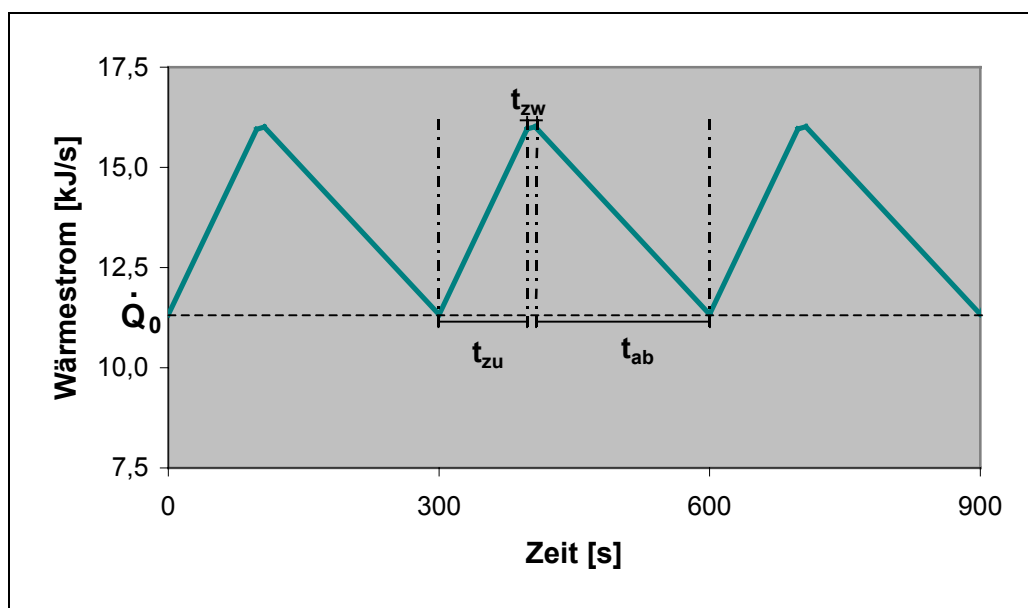


Abbildung 22 t_{zu} , t_{zw} und t_{ab} eines charakteristischen Peaks bei einem Versuch mit Textilien ohne Berücksichtigung des Wärmestroms aus der Ölverbrennung

Die Berechnung dieses Zwischenpunktes am Ende des Zeitintervalls t_{zw} erfolgt nach Gleichung 18.

$$\text{Gleichung 18} \quad \dot{Q}_{zw} = \dot{Q}_{zu} + |a_{QRg1} - a_{QKw2}| \cdot t_{zw}$$

Durch die Wiederholung der Rechenschritte der Gleichungen 14 bis 16 ergibt sich die charakteristische Energiefreisetzungskurve als Reihe von gleichförmigen Peaks, die daher als charakteristische Peaks betrachtet werden.

Somit sind das Grundniveau \dot{Q}_0 und die Zu- und Abnahmesteigung des charakteristischen Peaks die Parameter, die die charakteristische Energiefreisetzungskurve beschreiben. Dabei steht das Grundniveau im direkten Zusammenhang mit dem Energiepotential des eingesetzten Brennstoffs, d.h. es gibt unmittelbar Auskunft über

den Heizwert. Den Peaksteigungen liegt das Verbrennungsverhalten des Brennstoffs zugrunde. Für eine direkte qualitative Vergleichbarkeit lässt sich aus den Steigungen eine Kennzahl bilden, der Energiefreisetzungswert EFW (Gleichung 19), der definiert wird als der Quotient des Betrages der mittleren Zunahmesteigung a_{Zunahme} und des Betrages der mittleren Abnahmesteigung a_{Abnahme} der charakteristischen Peaks.

$$\text{Gleichung 19} \quad \text{EFW} = \frac{|a_{\text{Zunahme}}|}{|a_{\text{Abnahme}}|}$$

Das Zwischenintervall erschwert die direkte Berechnung der mittleren Steigungen der charakteristischen Peaks aus den $a_{\text{QRg1,2}}$ und $a_{\text{QKw1,2}}$. Daher ist es hilfreich den ermittelten Verlaufes der Zu- und Abnahme der Wärmeströme graphisch darzustellen, wie in Abbildung 23 anhand des Beispiels der Verbrennung von Textilien gezeigt. Die Gerade für die Energieabnahme ist zum besseren Vergleich der Steigungen spiegelverkehrt dargestellt. Aus dieser Abbildung lassen sich a_{Zunahme} und a_{Abnahme} leicht ablesen.

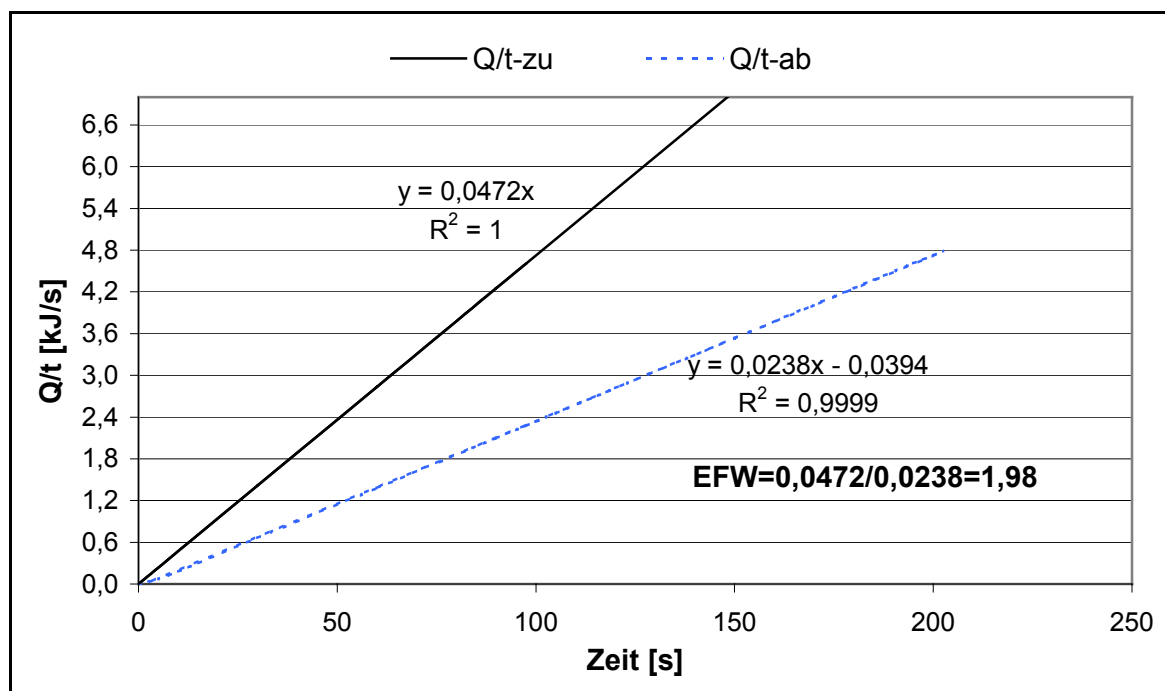


Abbildung 23 Steigungen der Q/t-Zunahme und der Q/t-Abnahme für den charakteristischen Peak bei einem Versuch mit Textilien

5.2 Physikalische Beschreibung des Verbrennungsvorganges in der TVA

Die Beschreibung der physikalischen Vorgänge während eines Verbrennungsversuches an der Technikumsverbrennungsanlage folgt der im vorigen Kapitel erläuterten Unterteilung in drei Betriebsphasen.

5.2.1 Die Aufheizphase

In der Aufheizphase findet durch den alleinigen Einsatz des konventionellen Ölbrenners eine homogene Verbrennung des Öl-Gasgemisches statt. Bei richtiger Einstellung des Brenners kann von einer näherungsweise vollständigen Verbrennung und einem stationären Betrieb ausgegangen werden. Die kontinuierliche O_2 -Messung und in regelmäßigen Abständen vorgenommenen CO -Messungen bestätigen diese Annahme. Nach dem Start der Ölverbrennung nähert sich die Summe der erfassten Output-Wärmeströme stetig dem Nennwert der eingestellten Brennerleistung an (Abbildung 24). Diese langsame Annäherung ist darauf zurückzuführen, dass die freigesetzte Energie zu Beginn des Verbrennungsbetriebes nicht nur für die Erwärmung des Kühlwassers und des Rauchgases verbraucht wird, sondern auch für das Aufheizen der überwiegend metallischen Anlagenteile.

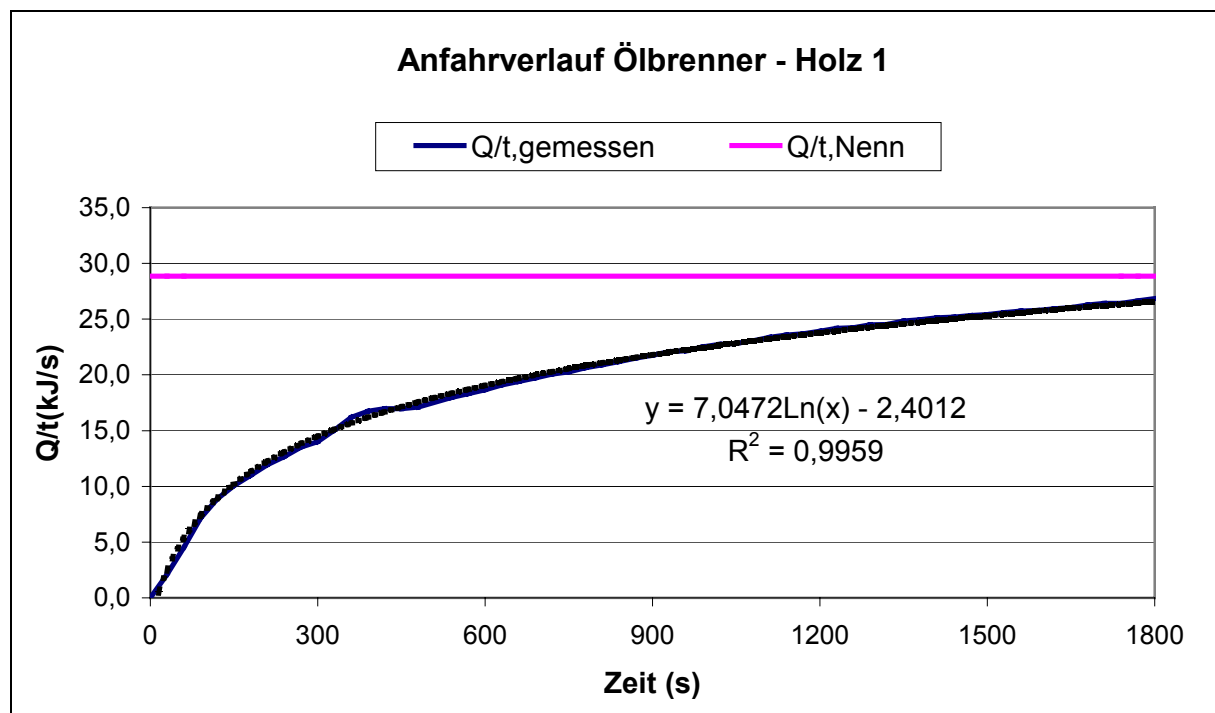


Abbildung 24

Verlauf der erfassten Output-Wärmeströme zu Beginn eines Verbrennungsversuches bei reinem Ölbrennerbetrieb

Das Ende der Aufheizphase wurde auf der Basis von Erfahrungswerten auf $t_1 = 1800$ s festgelegt. Zu diesem Zeitpunkt erreichen die erfassten Output-Wärmeströme noch nicht ganz die Brennernennleistung. Der Verlauf der erfassten Output-Wärmeströme aus der Ölverbrennung lässt sich durch eine Logarithmusfunktion beschreiben, wobei es bei den verschiedenen Versuchen in Abhängigkeit von der Brennereinstellung zu geringfügigen Abweichungen bei den Funktionskoeffizienten kommt. Damit lässt sich der Zeitpunkt t_1^* bestimmen, bei dem theoretisch die Nennleistung vollständig als Summe der Output-Wärmeströme erfasst wird. In Tabelle 8 ist für die vorgenommenen Versuche die Spannbreite der Brennernennleistungen, der Erfassungsgrade zum Zeitpunkt t_1 und der errechneten t_1^* dargestellt. Die Schwankungen zwischen den einzelnen Versuchen sind insgesamt gering. In allen Fällen wird zum Ende der Aufheizphase mehr als 90% der Verbrennungsleistung in den Output-Wärmeströmen erfasst, der Aufheizvorgang der Versuchsanlage ist also weitestgehend abgeschlossen.

Tabelle 8: Spannbreite der Brennerleistungen, der Erfassungsgrade bei t_1 und der Zeitpunkte t_1^*

	Brennerleistung [kW]	Erfasste Leistung bei $t_1 = 1800$s	t_1^* [s]
Mittelwert	27,97	96%	2252
Maximum	29,44	99%	2610
Minimum	25,76	91%	1920
Stabw.	1,16	3%	245

5.2.2 Die Anfahrphase der Feststoffverbrennung

Bei der gemeinsamen Öl- und Feststoffverbrennung, die mit der Anfahrphase der Feststoffverbrennung beginnt, handelt es sich aufgrund der räumlichen Anordnung des Ölbrenners in einem ausreichenden Abstand oberhalb des Verbrennungsrostes um zwei parallel stattfindende Verbrennungsprozesse. Von daher wird im Folgenden vereinfachend angenommen, dass der Ölbrenner die Feststoffverbrennung auf dem Rost nur durch den zusätzlichen Wärmeenergiebeitrag im gemeinsamen Reaktionsraum beeinflusst.

Die aus der Ölverbrennung resultierende Temperatur im Feuerraum führt zu einer sofortigen Zündung bei allen untersuchten Stoffen und zu einem sprunghaften An-

stieg des Leistungsniveaus. Ebenfalls bereits zu Beginn der Feststoffverbrennung ist die Ausbildung der charakteristischen Peaks zu beobachten, auf deren physikalische Bedeutung im nächsten Abschnitt (5.2.3) eingegangen wird. Der Verlauf der Verbrennungsleistung in dieser Phase ist in Abbildung 25 wiedergegeben.

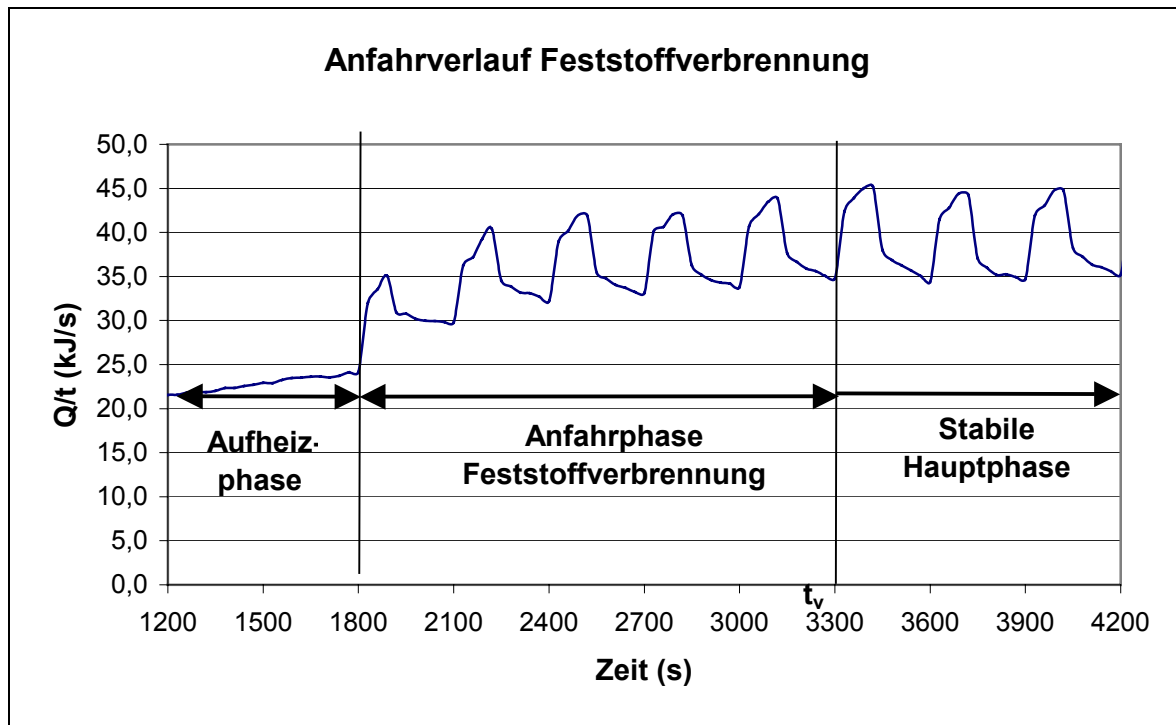


Abbildung 25 Entwicklung der Verbrennungsleistung während der Anfahrphase der Feststoffverbrennung am Beispiel eines Versuches mit Tetra-Packs

Das Leistungsniveau steigt während der Anfahrphase der Feststoffverbrennung mit jeder weiteren Festbrennstoffzugabe an. Das ist darauf zurückzuführen, dass innerhalb eines Verbrennungsintervalls der zugegebene Festbrennstoff nicht vollständig ausbrennt und somit auch in den folgenden Intervallen noch Energie freisetzt. Ein stabiles Leistungsniveau wird dann erreicht, wenn der Festbrennstoff aus der ersten Zugabe vollständig verbrannt ist. Unter idealen Bedingungen verbrennt die gleiche Masse Brennstoff in der gleichen Zeit. Somit wird ab dem Zeitpunkt der vollständigen Verbrennung der ersten Zugabe während eines Verbrennungsintervalls genauso viel Festbrennstoff verbrannt wie zugegeben wird. Real sind die verwendeten Festbrennstoffe nicht völlig homogen, wodurch es zu geringen Schwankungen kommen kann.

Das Erreichen eines stabilen Leistungsniveaus als Grundniveau ist der Beginn der stabilen Hauptphase. Bis zu diesem Zeitpunkt finden erfahrungsgemäß mindestens 4 Zugaben statt, womit sichergestellt ist, dass auch die Brennerleistung bis zu diesem Zeitpunkt vollständig erfasst wird (siehe Tabelle 8). Die Zeit von der ersten Brenn-

stoffzugabe bis zum Erreichen der stabilen Hauptphase ist gleich der Verbrennungszeit t_v für 200 g des betrachteten Festbrennstoffes unter den vorhandenen Randbedingungen.

5.2.3 Die stabile Hauptphase der Feststoffverbrennung

Die stabile Hauptphase der Feststoffverbrennung ist charakterisiert durch ein relativ konstantes Grundniveau der Verbrennungsleistung, auf dem sich in jedem Verbrennungsintervall die charakteristischen Peaks ausbilden. Dieser Zustand kann als periodisch-stationär bezeichnet werden. Der Verlauf der Verbrennungsleistung ist in Abbildung 26 dargestellt.

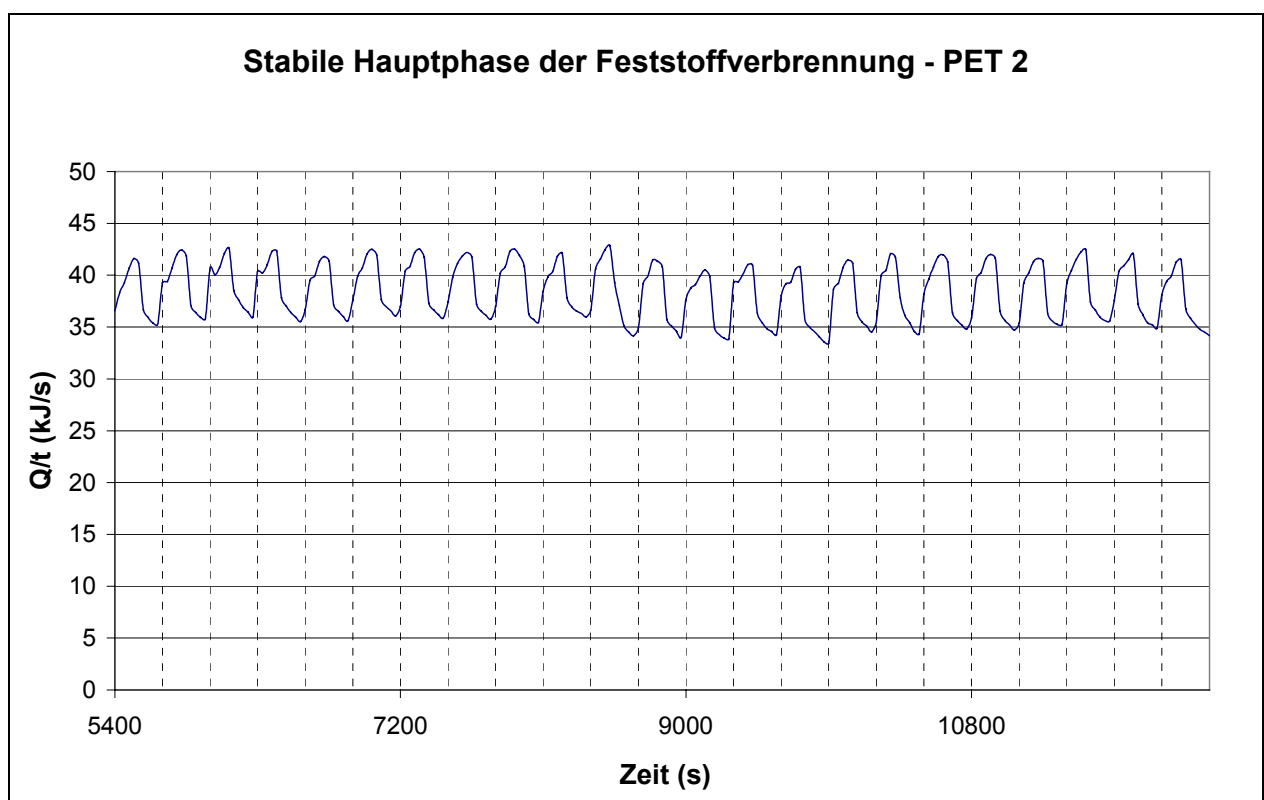


Abbildung 26 Verlauf der Verbrennungsleistung während der stabilen Hauptphase der Feststoffverbrennung bei einem Versuche mit PET

Wie bereits unter 5.2.2 dargelegt, ergibt sich die charakteristische Hauptphase dadurch, dass innerhalb eines Verbrennungsintervalls ein Gleichgewichtszustand in Bezug auf die Brennstoffmasse besteht. Daraus folgt unmittelbar, dass für ein Verbrennungsintervall betrachtet, auch ein Gleichgewicht zwischen der Input- und der Output-Energie besteht. Berücksichtigt man noch den unter 5.1 dargestellten Zusammenhang, dass in der stabilen Hauptphase die freigesetzte Energie unter Berücksichtigung eines Korrekturfaktors k_{Mess} vollständig durch die erfassten

Wärmeströme im Kühlwasserkreislauf und im Rauchgas beschrieben wird, dann ergeben sich für die stabile Hauptphase folgende Gleichungen:

$$\text{Gleichung 20:} \quad \dot{m}_{\text{Br,Intervall}} = \dot{m}_{\text{V, Intervall}}$$

$$\text{Gleichung 21:} \quad \dot{Q}_{\text{Input,Intervall}} = \frac{1}{k_{\text{Mess}}} (\dot{Q}_{\text{Kw,Intervall}} + \dot{Q}_{\text{Rg,Intervall}})$$

Hieraus wiederum folgt, dass die Energie pro Intervall, die durch die Fläche unter der Q/t-Kurve wiedergegeben wird, bezogen auf die zugegebene Brennstoffmasse pro Intervall, den Heizwert des Brennstoffs ergibt:

$$\text{Gleichung 22:} \quad \frac{Q}{m}_{\text{Input,Intervall}} = \frac{1}{m} \int \dot{Q}_{\text{Intervall}} dt = H_u$$

Für die Betrachtung der Ausbildung der charakteristischen Peaks muss, in Anlehnung an die im Kapitel 3.1 beschriebenen Modellvorstellungen, der Verbrennungsvorgang näher beleuchtet werden. Diese Betrachtung wird zunächst für den Brennstoff Holz durchgeführt, da für diesen Brennstoff bereits umfassende Stoffdaten vorliegen (HARTMANN, 1999; MARUTZKY, SEEGER, 1999). Untersucht wurde trockenes Holz, womit die Phase der Trocknung entfällt und sich der Verbrennungsprozess nur noch in die Phasen der Verbrennung der flüchtigen Bestandteile und der Koksverbrennung unterteilt. Um den zeitlichen Ablauf der Verbrennungsphasen auf der Basis des erfassten Outputwärmestroms bestimmen zu können, benötigt man Angaben über die Massenanteile der flüchtigen Bestandteile und des Restkokes (fixen Kohlenstoffs) und über deren Heizwerte. Über die Energiebilanz des Versuches wurde 19 MJ/kg als Heizwert des Holzes bestimmt. Aus der Literatur ist bekannt, dass der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen bei Holz bei ca. 80 Ma.-% liegt. Für den Restkoks wird reiner Kohlenstoff mit einem Heizwert von 32,8 MJ/kg angesetzt. Daraus berechnet sich der Heizwert der flüchtigen Bestandteile zu 14,3 MJ/kg. Berechnet man für den Festbrennstoff Holz auf der Basis der Daten eines Verbrennungsversuches an der TVA für eine Zugabemenge die mittlere Verbrennungsleistung pro Verbrennungsintervall, der aus der Verbrennung dieser Zugabemenge resultiert, so ergibt sich der in Abbildung 27 dargestellte Verlauf. Dabei ist in diesem Fall $t = 0$ der Zugabezeitpunkt für die betrachtete Holzzugabemenge.

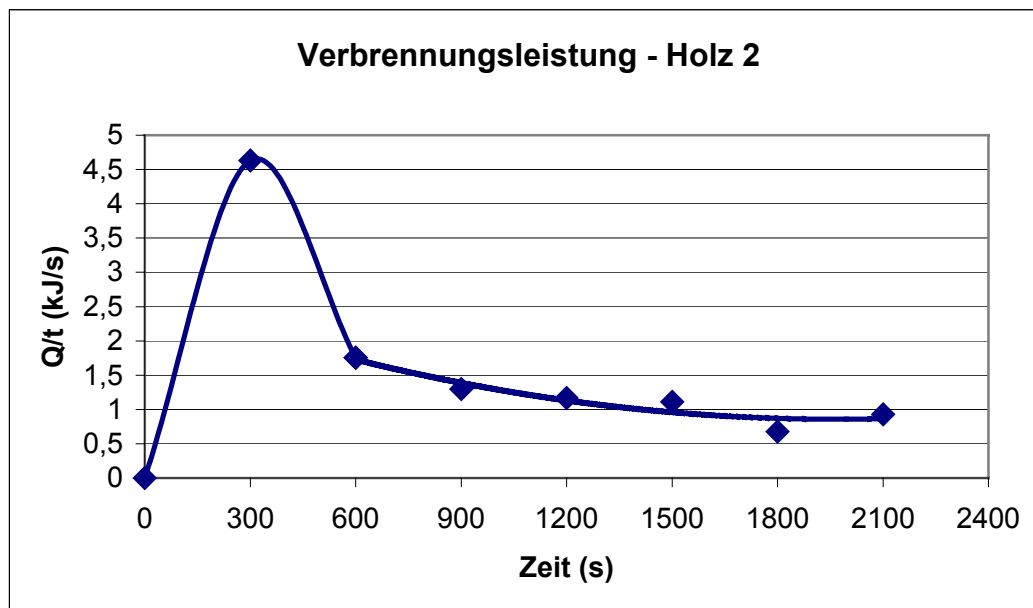


Abbildung 27 Mittlere Verbrennungsleistung pro Intervall für eine Holzzugabe

Es zeigt sich, dass nach dem Leistungspeak im ersten Verbrennungsintervall die Verbrennungsleistung stark absinkt. Im Laufe der weiteren Verbrennungsintervalle sinkt die Verbrennungsleistung nur noch langsam. Dieser Verlauf entspricht prinzipiell den Modellvorstellungen, nachdem zu Beginn durch die Verbrennung der flüchtigen Bestandteile für einen kurzen Zeitraum eine hohe Verbrennungsleistung auftritt, und nach deren Ende die Restkoksverbrennung einsetzt, die langsam und auf einem niedrigeren Leistungsniveau abläuft. Berücksichtigt man allerdings die oben hergeleiteten Stoffdaten für das Holz, stellt man fest, dass die während der Peakausbildung freigesetzte Energie weit unter dem Energieanteil liegt, den die flüchtigen Bestandteile am Brennstoff haben (in diesem Fall ca. 55%). Hält man an dem Modell der nacheinander abfolgenden Verbrennung der flüchtigen Bestandteile und des Restkokes fest, dann endet die Verbrennung der flüchtigen Bestandteile nach etwa 1060 s. Das heißt, dass der Leistungspeak nicht die gesamte Verbrennung der flüchtigen Bestandteile darstellt, sondern nur Teil dieser ersten Verbrennungsphase ist.

Dieser experimentell ermittelte Verbrennungsverlauf deckt sich mit der für die Kohleverbrennung entwickelten Theorie. Unter Zugrundelegung der Modellvorstellung, dass die Restkoksverbrennung erst nach dem Ende der Verbrennung der flüchtigen Bestandteile einsetzt, und des Ausbrandmodells bei konstanter Kornoberfläche, lässt sich für die Berechnung der Entgasungs- und Verbrennungsgeschwindigkeit die folgende Gleichung herleiten (ZELKOWSKI, 1986), die den in Abbildung 28 gezeigten Verlauf zur Folge hat.

Gleichung 23:
$$\frac{dm_{ab}}{dt} = (m_0 - m_{ab}) \cdot k_{0E} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

Aufgrund der Aufheizung des Festbrennstoffes nimmt die Geschwindigkeit zunächst zu. Ab einem bestimmten Punkt hat sich die reaktionsfähige Masse aber soweit reduziert, dass die Geschwindigkeit wieder abnimmt.

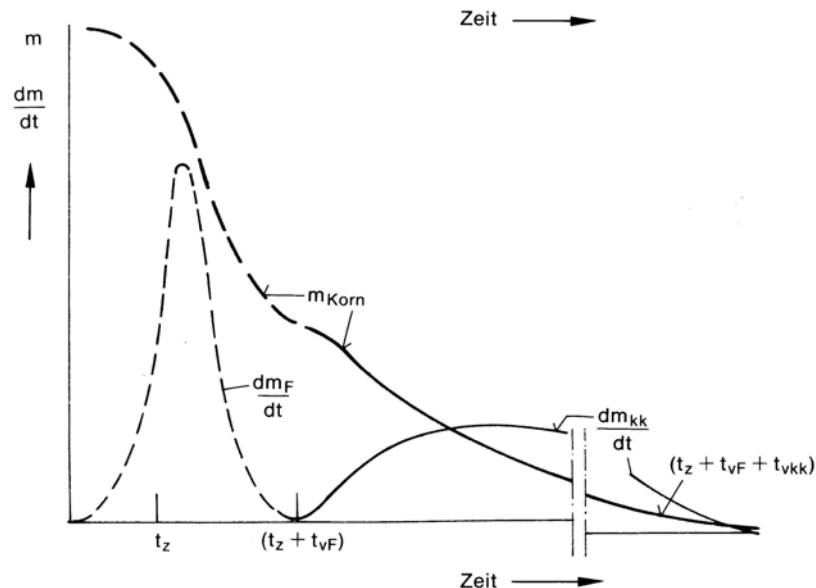


Abbildung 28 Modellhafter Verlauf der Entgasungs- und Verbrennungsgeschwindigkeit (ZELKOWSKI, 1986)

Will man zusätzlich berücksichtigen, dass sich über den Zeitraum der Verbrennung der flüchtigen Bestandteile deren Zusammensetzung ändert, kann man versuchen, die von KLEIN (1971) in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelten Entgasungsraten der flüchtigen Bestandteile von Steinkohle auf Holz zu übertragen. Zugrunde gelegt wird dabei eine nach den Formeln von URBANSKA berechnete Zusammensetzung der flüchtigen Bestandteile (siehe 3.1). Es ergeben sich die flüchtigen Bestandteile zu 25 Ma.-% kurzkettige Kohlenwasserstoffe (C_mH_n)³, 20 Ma.-% CO und 55 Ma.-% CO₂, zusammen mit einem Heizwert von 14,5 MJ/kg. Dieser Heizwert weicht nur gering von dem zuvor errechneten Heizwert der flüchtigen Bestandteile ab, weshalb die Formeln nach URBANSKA auch für andere Festbrennstoffe als Kohle geeignet scheinen und im Folgenden auch für die anderen untersuchten

³ In Anlehnung an Zelkowski werden die C_mH_n bezüglich des Heizwertes und des Entgasungsverhaltens als Methan betrachtet.

Festbrennstoffe verwendet werden. Für die Zeit der Peakausbildung ergibt sich für das Holz, dass zunächst die heizwertärmeren flüchtigen Bestandteile überwiegen und der mittlere Heizwert in dieser Phase 13,3 MJ/kg beträgt.

Abschließend ist noch zu beachten, dass die Modellvorstellungen von einzelnen, in einem Gasraum schwebenden kugelförmigen Körnern ausgehen. Dieses trifft aber bei den vorgenommenen Untersuchungen mit einer auf dem Rost liegenden Brennstoffschüttung nicht zu. Es erscheint unwahrscheinlich, dass bei der gesamten Festbrennstoffmasse die Verbrennung der flüchtigen Bestandteile gleichzeitig beendet ist und dann simultan die Restkoksverbrennung einsetzt, zumal die Brennstoffschüttung noch während der Phase der Verbrennung der flüchtigen Bestandteile um neuen Festbrennstoff ergänzt wird. Plausibler erscheint die Vorstellung, dass direkt nach der Zugabe eine reine Verbrennung der flüchtigen Bestandteile stattfindet, dass aber dann teilweise bereits die Restkoksverbrennung einsetzt, während in anderen Teilen der Brennstoffschüttung noch die Verbrennung der flüchtigen Bestandteile abläuft. Zur Berechnung der mittleren Verbrennungsrate pro Verbrennungsintervall für eine Brennstoffzugabemenge wurde angesetzt, dass die ausschließliche Verbrennung der flüchtigen Bestandteile während des ersten Verbrennungsintervalls stattfindet. Ab dem zweiten Verbrennungsintervall verbrennt der entgaste Festbrennstoff, der sich aus dem unverbrannten Festbrennstoff abzüglich der im ersten Verbrennungsintervall freigesetzten flüchtigen Bestandteile ergibt, in einer Mischung aus Verbrennung der flüchtigen Bestandteile und des Restkokes. Für Holz ergeben sich damit die in Abbildung 29 dargestellten mittleren Verbrennungsraten.

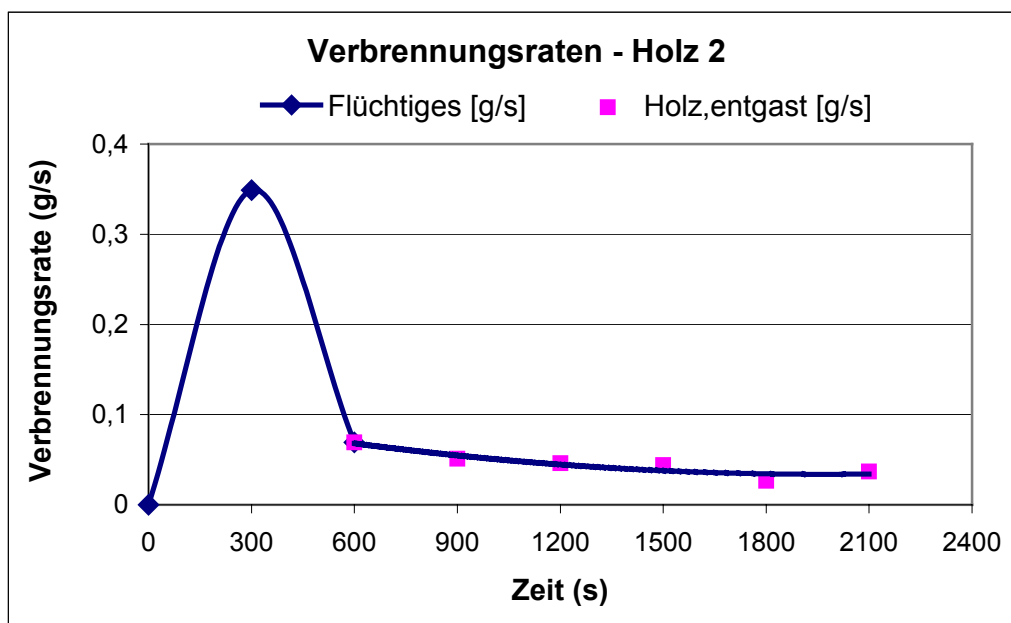


Abbildung 29 Mittlere Verbrennungsraten pro Intervall für eine Holzzugabe

Der so für Holz beschriebene Verbrennungsprozess gilt im Prinzip auch für die anderen an der TVA untersuchten Festbrennstoffe. Im Gegensatz zu Holz liegen für die anderen Stoffe aber nur weniger gut abgesicherte Stoffdaten vor, insbesondere was den Gehalt an flüchtigen Bestandteilen angeht. Hier wurde so vorgegangen, dass zunächst auf der Basis einer angenommenen Elementarzusammensetzung die Zusammensetzung der flüchtigen Bestandteile und der sich daraus ergebende Heizwert berechnet wurde. Daraus und aus dem per Energiebilanz bestimmten Heizwert des Brennstoffs insgesamt konnte dann, wieder unter der Voraussetzung, dass der Restkoks als reiner Kohlenstoff betrachtet werden kann, der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen errechnet werden. Die Ergebnisse für die einzelnen untersuchten Brennstoffe finden sich im Anhang. Auf sie wird im Zusammenhang mit den weiteren Versuchsergebnissen in den folgenden Kapiteln eingegangen.

5.3 Untersuchungen zum stoffspezifischen Verbrennungsverhalten von Monofractionen fester Abfallstoffe

5.3.1 Auswahl und Aufbereitung der Abfallstoffe

Bei der Auswahl der zu untersuchenden Stoffe wurde Wert darauf gelegt, ein Materialspektrum zu erfassen, das alle brennbaren, in Siedlungsabfällen vorkommenden festen Abfallstoffe repräsentiert. Die brennbaren Abfälle im Siedlungsabfall können prinzipiell in die folgenden Fraktionen aufgeteilt werden:

- Papier, Pappe, Karton (PPK)
- Kunststoffe
- Bioabfall
- Holz
- Textilien
- Papier-/ Kunststoffverbunde
- Leder
- Gummi

Es kann eine weitere Unterteilung dieser Fraktionen erfolgen, wie sie z.B. bei KOST (2001) vorgenommen wurde. Für die im Rahmen seiner Arbeit durchgeführten Bestimmungen von Heizwert, Asche- und Wassergehalt und Elementarzusammensetzung der aus einer Abfallsortierung gewonnenen Fraktionen fand eine Unterteilung in bis zu drei Differenzierungsebenen statt. Dabei zeigte sich, dass bei einigen Fraktionen die stärker differenzierten Unterfraktionen vergleichbare Werte in den genannten Parametern aufweisen, hinsichtlich der brennstofftechnischen Charakterisierung also eine Differenzierung nicht notwendig ist. Hierzu gehören die Fraktionen PPK, Holz und Gummi.

Die Fraktion Kunststoffe beinhaltet Materialien, die sich mitunter stärker in ihren Brennstoffeigenschaften voneinander unterscheiden. Sofern allerdings Kunststoffabfälle nicht direkt aus dem kunststoffverarbeitendem Gewerbe stammen, lassen sich die Kunststoffsorten in der Praxis nicht alleine durch Form oder Farbe unterscheiden. Aus diesen Gründen wurde eine Mischkunststofffraktion untersucht, wie sie bei der Sortierung von DSD-Abfällen anfällt. Um aber im Vergleich zu der heterogen zusammengesetzten Mischkunststofffraktion auch eine homogene Kunststofffraktion zu untersuchen, wurde zusätzlich eine Fraktion PET-Flaschen, die nur geringe Fremdstoffeinträge durch Verschlussreste oder Klebeetiketten aufweist, berücksichtigt.

Bei Textilien besteht ein ähnliches Problem wie bei den Kunststoffen. Prinzipiell unterteilen sich Textilien in Wolle, Baumwolle, Synthetik und Mischsynthetik, wobei die synthetischen Fasern wiederum aus verschiedenen Kunststoffen bestehen können. Die verschiedenen Textilienarten weisen entsprechend ihrer Zusammensetzung unterschiedliche Heizwerte auf, wobei dieser bei synthetischen Fasern höher liegt als bei Naturfasern. Aber auch hier ist in der Praxis nicht zu erwarten, dass eine Separierung der verschiedenen Textilarten erfolgt, so dass wiederum eine Mischfraktion untersucht wurde. Der bereits in Kapitel 4.4.1 aufgeführte Heizwert der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Textilien im Vergleich mit den von Kost ermittelten Heizwerten für Textilien lässt darauf schließen, dass in diesem Fall ein hoher Anteil an synthetischen Fasern vorlag.

Noch komplizierter ist die Situation bei den Papier- und Kunststoffverbunden. Neben den verschiedenen in den Verbunden verwendeten Materialien liegen diese je nach Verbundstoff auch noch in unterschiedlichen Anteilen vor. Da es im Rahmen dieser Arbeit nicht zu leisten ist, zusätzlich zu den anderen Fraktionen auch noch einen repräsentativen Querschnitt aller Verbundstoffe zu untersuchen, erfolgte eine Beschränkung auf den mengenmäßig relevanten Verbundstoff Tetra-Pack. Weitere Argumente für Tetra-Packs als Beispiel für einen Verbund sind die Zusammensetzung aus den am häufigsten im Verbund vorkommenden Materialien und die gut bekannte Materialzusammensetzung mit ca. 90 % Papier bzw. Karton, ca. 8 % Aluminium und ca. 2 % Kunststoffen in Form von PE-Folien und Verschlüssen.

Die Fraktionen Leder und Bioabfälle wurden nicht untersucht. Leder aus den Gründen, dass es zum einen von den anfallenden Mengen keine große Rolle spielt. Zum anderen besteht das Problem, dass Kunstleder, das der Fraktion Kunststoffe zuzuordnen wäre, optisch schwer von echtem Leder zu unterscheiden ist. Bioabfälle wurden nicht berücksichtigt, da sie sich brenntechnisch vor allem durch ihren hohen Wassergehalt auswirken. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte eine Beschränkung auf trockene Stoffe. Getrocknete Bioabfälle weisen eine vergleichbare stoffliche Zusammensetzung wie Holz auf, womit eine gesonderte Untersuchung einer Bioabfallfraktion nicht notwendig ist.

Damit liegen für die Untersuchung des stoffspezifischen Verbrennungsverhaltens sieben Fraktionen vor, deren Partikel allerdings sehr unterschiedlich geformt sind, was einen Vergleich in Bezug auf die Reaktionsoberfläche schwer macht. Unter

Zugrundelegung des Ausbrandmodells bei konstanter Kornoberfläche entspricht die Reaktionsoberfläche der tatsächlichen Partikeloberfläche zu Beginn des Verbrennungsprozess ohne Berücksichtigung der Porosität und der Veränderungen in der Partikelstruktur während der Verbrennung. Damit kann ein Vergleich durch die Berechnung der oberflächengleichen Äquivalenzdurchmesser nach Gleichung 24 erfolgen.

Gleichung 24:
$$d_A = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

Die gewählten Abfallfraktionen wurden, soweit notwendig, mit einem Shredder zerkleinert bis sie ein einheitliches Korngrößenspektrum aufwiesen. Die erreichten Korngrößensbereiche der einzelnen Abfallfraktionen sind in Abbildung 30 dargestellt. Im Anhang 2 finden sich Photos der aufbereiteten Fraktionen.

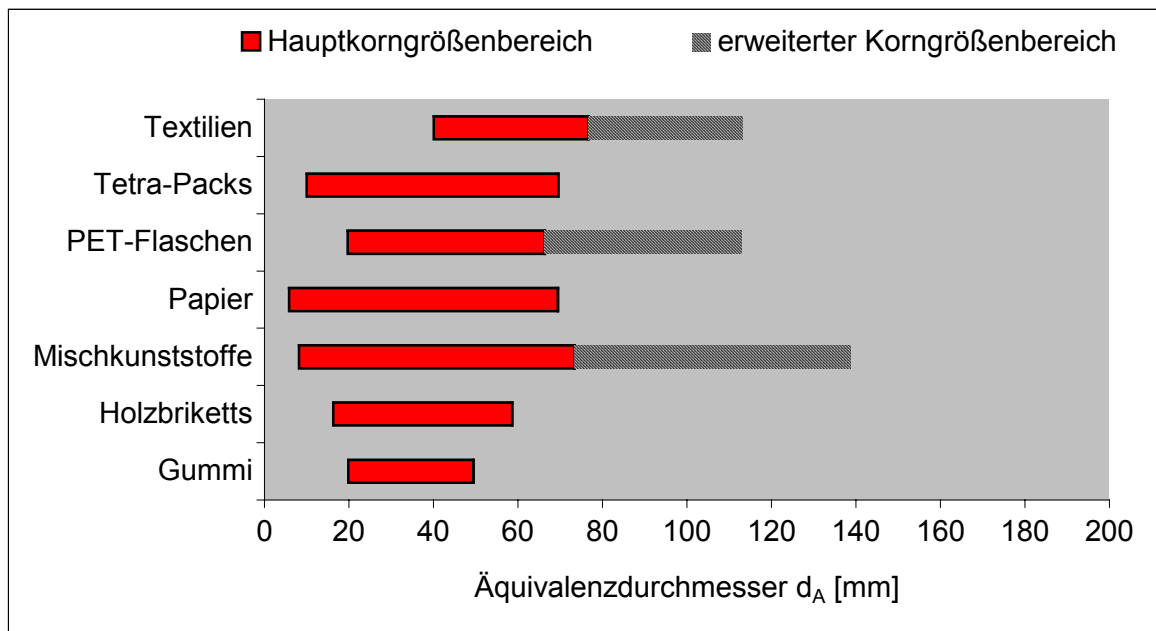


Abbildung 30 Korngrößensbereiche der Abfallfraktionen nach der Vorzerkleinerung

Die Abbildung zeigt, dass die untere Grenze von 20 mm, die einem erhöhten Rostdurchfall vorbeugen soll, gut eingehalten werden konnte und die Fraktionen insgesamt in einem einheitlichen Korngrößensbereich vorlagen. Als Problem trat auf, dass bei den elastischen Stoffen Textilien, PET und Mischkunststoffe der Durchgang einzelner größerer Partikel nicht zu vermeiden war. Obwohl versucht wurde, solche Partikel vor der Brennstoffzugabe auszusortieren, konnte nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass auch einzelne größere Partikel in die Verbrennung gelangten.

Pro Fraktion wurden zwei Versuche vorgenommen. Die Reihenfolge der Versuchsdurchführung wurde jeweils für die erste und zweite Versuchsreihe zufällig ausgewählt, um somit systematische Fehler, die bei gleicher Reihenfolge der beiden Versuchsreihen entstehen könnten, zu vermeiden (siehe Tabelle 9).

Tabelle 9: Reihenfolge der Verbrennungsversuche

Brennstoff	Versuchsreihe 1	Versuchsreihe 2
Textilien	1	8
Gummi	2	12
Papier	3	10
Holzbriketts	4	9
PET	5	14
Tetra-Packs	6	13
Mischkunststoffe	7	11

5.3.2 Ergebnisse der Untersuchungen zum Verbrennungsverhalten auf der Basis von semi-kontinuierlichen Verbrennungsversuchen

Bei der Auswertung der Daten aus den Verbrennungsversuchen war zunächst einmal die Prüfung des methodischen Ansatzes von Interesse. Es wurde betrachtet, ob die nach der unter 5.1.3 beschriebenen Vorgehensweise gebildeten charakteristischen Energiefreisetzungskurven den realen Verlauf der erfassten Outputwärmeströme gut abbilden. Dazu erfolgte für alle Versuche ein Vergleich dieser zwei Kurven. Als repräsentatives Beispiel finden sich in Abbildung 31 die Verläufe der erfassten Outputwärmeströme und der charakteristischen Energiefreisetzungskurve für einen 11/2-stündigen Abschnitt eines Verbrennungsversuches mit Textilien. Erwartungsgemäß kommt es zu keiner vollkommenen Übereinstimmung zwischen den Verlaufskurven. Die Linearisierung der Steigungen führt zu einer erkennbaren Dämpfung der Kurvenpeaks, sowohl in Bezug auf das Grundniveau wie auf die Peak-Maxima.

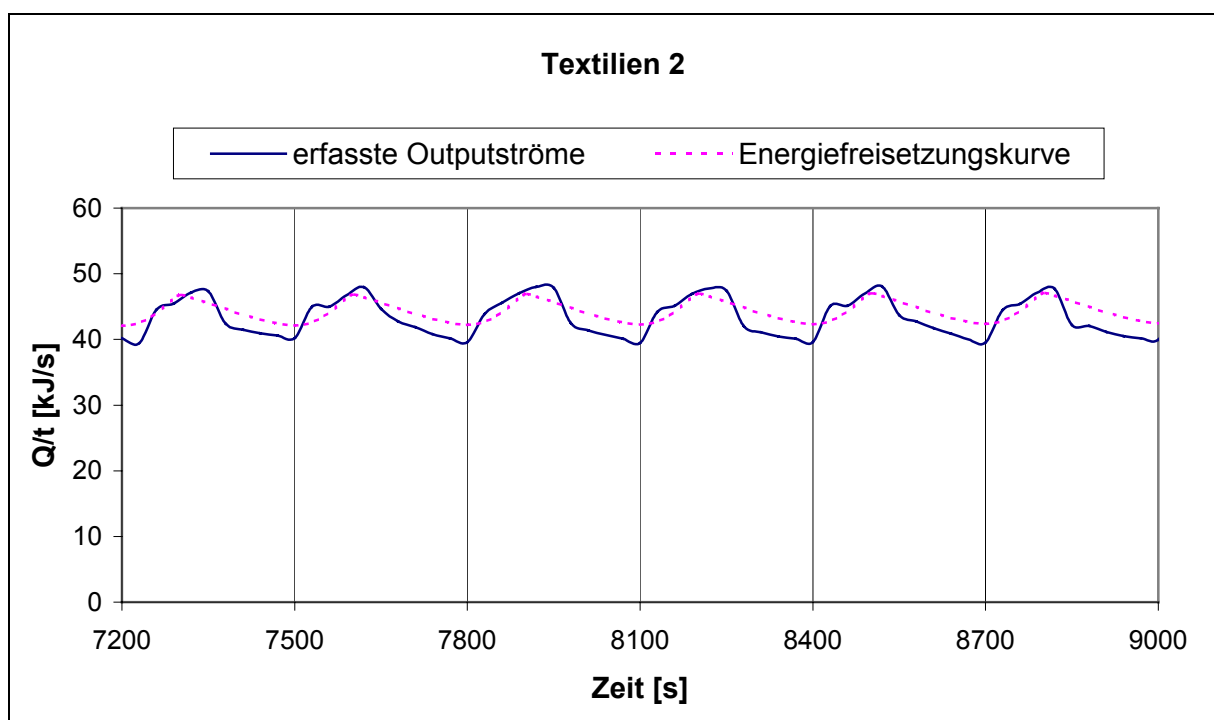


Abbildung 31 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Textilien

Die Spannweite der Abweichungen ist in Tabelle 10 dargestellt, wobei sich die relative Abweichung jeweils auf das Grundniveau der Verlaufskurve der erfassten Outputwärmeströme bezieht. Es zeigt sich, dass die mittlere Abweichung beim Grundniveau ca. 6,5 % beträgt und bei den Peak-Maxima mit ca. 5,1 % in der gleichen Größenordnung liegt. Auch wenn die Extremwerte der Abweichungen deutlich über 10 % liegen, so treten diese extremen Abweichungen nicht zusammen auf, so dass der linearisierte Verlauf der charakteristischen Energiefreisetzungskurve den realen Verlauf der Entwicklung der Verbrennungsleistung gut wiedergibt.

Tabelle 10: Abweichungen der charakteristischen Energiefreisetzungskurven vom realen Verlauf der erfassten Outputwärmeströme

Abweichung Energiefreisetzungskurve zu realen Wärmeströmen	Mittelwert		Maximum		Minimum		Stabw. (kJ/s)
	absolut (kJ/s)	relativ (%)	absolut (kJ/s)	relativ (%)	absolut (kJ/s)	relativ (%)	
Grundniveau	2,32	6,49	5,09	15,74	0,05	0,13	1,26
Peak-Maximum	1,70	4,60	4,89	12,39	0,20	0,51	1,25

Betrachtet man die Auswirkungen dieser Abweichungen auf die insgesamt während eines Zeitintervalls freigesetzte Energie, beschrieben durch die Fläche unterhalb der Kurve, so ergibt sich das in Tabelle 11 dargestellte Bild, in dem die mittleren Abweichungen pro Verbrennungsintervall aufgeführt sind.

Tabelle 11: Mittlere Abweichungen der freigesetzten Energie pro Verbrennungsintervall bei den charakteristischen Energiefreisetzungskurven im Vergleich zum realen Verlauf der erfassten Outputwärmeströme

Brennstoff	Abweichung von Q pro Intervall, Energiefreisetzungskurve zu realen Wärmeströmen	
	absolut (kJ)	relativ (%)
Gummi	-305	2,36
Holzbriketts	246	2,13
Mischkunststoffe	219	1,62
Papier	708	6,81
PET	-136	1,10
Tetra-Packs	676	6,04
Textilien	635	4,93
Mittelwert (Beträge)	418	3,57
Stabw. (Beträge)	227	2,13

Bis auf zwei Ausnahmen liegen die Abweichungen zwischen der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und dem realen Verlauf der erfassten Outputwärmeströme unterhalb von 5 %, im Mittel ergibt sich eine relative Abweichung von etwas über 3,5 %. Somit zeigt die charakteristische Energiefreisetzungskurve im Bezug auf die insgesamt bei der Verbrennung freigesetzte Energie eine noch bessere Übereinstimmung mit den realen Verhältnissen als bei der Beschreibung des zeitlichen Verlaufs der Verbrennungsleistung. Die charakteristischen Energiefreisetzungskurven für die untersuchten Fraktionen sind in Abbildung 32 dargestellt, wobei hier die Kurven durch die Überlagerung der jeweiligen Kurven aus den zwei Versuchen pro Fraktion gebildet wurden.

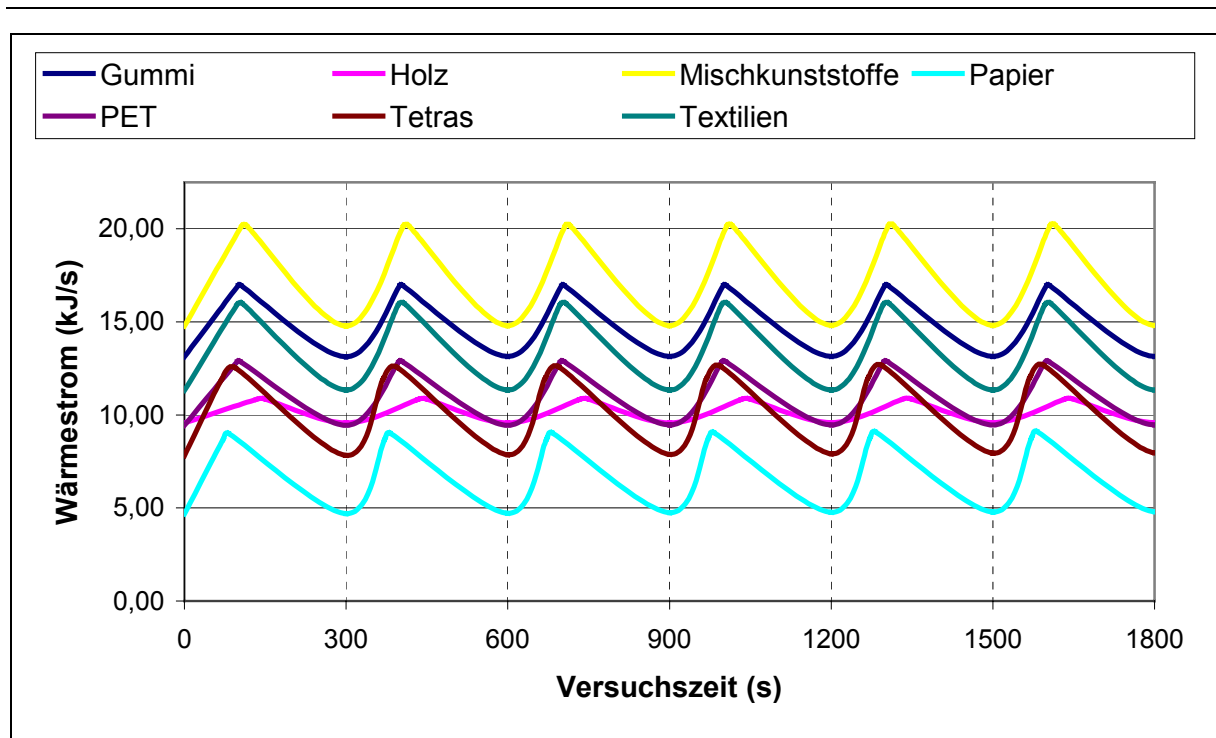


Abbildung 32 Aus den Verbrennungsversuchen gebildete charakteristische Energiefreisetzungskurven der untersuchten Abfallfraktionen ohne Berücksichtigung des Wärmestroms aus der Ölstützfeuerung

Deutlich erkennbar sind die unterschiedlichen Steigungen der charakteristischen Peaks und die unterschiedlichen Grundniveaus, bedingt durch die unterschiedlichen Heizwerte. Dabei ist es interessant, dass das Grundniveau der Holzbriketts über dem der Tetra-Packs liegt, obwohl der Heizwert von Holz geringfügig kleiner ist. Durch die vergleichsweise sehr flach ausgeprägten Peaks beim Holz beschreibt die Energiefreisetzungskurve dennoch einen geringeren Energiegehalt im Vergleich zu den Tetra-Packs, doch zeigt es, dass die Abschätzung des Heizwertes auf der Basis des Grundniveaus nur zulässig ist, wenn die Peakausbildung nicht zu stark voneinander abweicht. Zieht man die unter 5.2.3 entwickelten Modellvorstellungen heran, lässt sich diese Abweichung zwischen der Stufung der Heizwerte und der Grundniveaus erklären. Demzufolge ist die Peakbildung auf die Verbrennung flüchtiger Bestandteile zu Beginn des Verbrennungsprozesses zurückzuführen. Die danach im entgasten Festbrennstoff verbliebene und dann in der weiteren Verbrennung freigesetzte Energie wird durch die Fläche unterhalb des Grundniveaus wiedergegeben, abzüglich des Anteils aus der Ölstützfeuerung. Somit gibt das Grundniveau nicht den Heizwert des Festbrennstoffs sondern den Heizwert des entgasten Festbrennstoffs wieder.

Die sich aus den charakteristischen Energiefreisetzungskurven ergebenden Energiefreisetzungswerte der untersuchten Abfallfraktionen sind in Tabelle 12 dargestellt. Es

ergaben sich nur geringe Variationskoeffizienten, womit bestätigt wird, dass der in einem Verbrennungsversuch ermittelte EFW nicht maßgeblich durch Zufallseffekte beeinflusst wird, sondern eindeutig dem zugrundeliegenden Verhalten des jeweils untersuchten Stoffs zugeordnet werden kann. Variationskoeffizienten über 5 % lagen nur bei den Fraktionen Mischkunststoffe und Tetra-Packs vor. Diese größere Streuung der Werte lässt sich darauf zurückführen, dass im Gegensatz zu den Fraktionen Gummi, Holz, Papier und PET hier Stoffmischungen vorlagen. Anscheinend ist es, trotz der Bemühungen eine ausreichende Homogenisierung dieser Fraktionen zu erreichen, nicht gelungen, bei jeweils beiden Versuchen die gleiche Stoffzusammensetzung zu verbrennen. Dass dieses aber prinzipiell möglich ist, zeigt das Ergebnis der Textilfraktion, die ebenfalls ein Stoffgemisch darstellt und in diesem Fall den geringsten Variationskoeffizient aufweist. Hier ist eine weitgehende Homogenisierung bei der Probenvorbereitung gelungen.

Tabelle 12: Ergebnisse der Bestimmung der EFW

Brennstoff	a_{Zunahme} [kJ/s ²]	a_{Abnahme} [kJ/s ²]	EFW	Mittelwert pro Fraktion	Stabw.	Variations- koeffizient
Gummi (1)	0,0403	0,0206	1,96	2,00	0,04	2,00
Gummi (2)	0,0361	0,0174	2,04			
Holzbriketts (1)	0,0071	0,0060	1,21	1,20	0,02	1,26
Holzbriketts (2)	0,0120	0,0099	1,18			
Mischkunststoffe	0,0563	0,0296	1,90	1,71	0,20	11,44
Mischkunststoffe	0,0444	0,0295	1,51			
Papier (1)	0,0527	0,0179	2,94	3,08	0,14	4,39
Papier (2)	0,0597	0,0186	3,21			
PET (1)	0,0364	0,0183	1,99	2,03	0,04	1,97
PET (2)	0,0346	0,0167	2,07			
Tetra-Packs (1)	0,0731	0,0242	3,02	2,85	0,18	6,15
Tetra-Packs (2)	0,0564	0,0211	2,67			
Textilien (1)	0,0472	0,0238	1,95	1,97	0,02	0,76
Textilien (2)	0,0474	0,0243	1,98			

Setzt man die EFW in Zusammenhang mit den Heizwerten (Abbildung 33), zeigt sich, dass keine Korrelation zwischen diesen beiden Werten besteht. Damit bestätigt sich, dass die Betrachtung des Heizwerts alleine für die Beschreibung des Verbrennungsverhaltens nicht ausreichend ist.

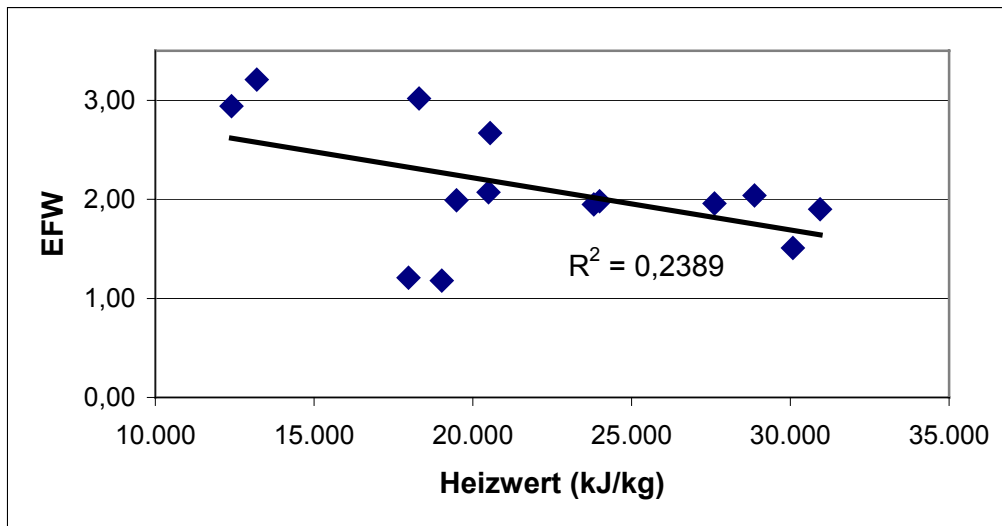


Abbildung 33 Zusammenhang zwischen dem Heizwert und dem Energiefreisetzungswert für die untersuchten Abfallfraktionen

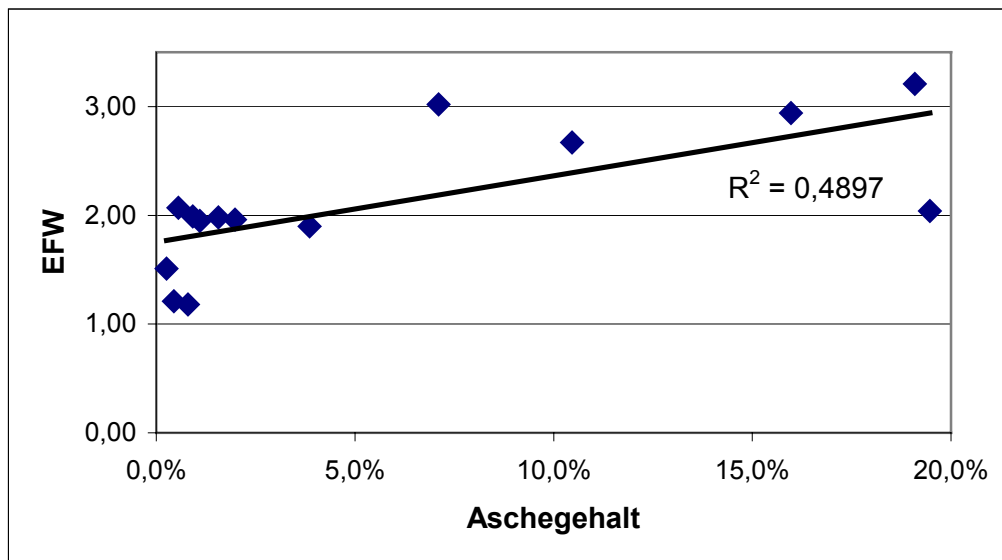


Abbildung 34 Zusammenhang zwischen dem Aschegehalt und dem Energiefreisetzungswert für die untersuchten Abfallfraktionen

Ebenfalls zeigt sich, dass keine Korrelation zwischen dem EFW und dem Aschegehalt festzustellen ist (Abbildung 34). Daraus kann nicht abgeleitet werden, dass der Gehalt an Asche überhaupt keinen Einfluss auf das Verbrennungsverhalten hat. Aber es kann daraus geschlossen werden, dass der Gehalt an Asche keinen Einfluss auf die Entgasung und die Verbrennung der flüchtigen Bestandteile zu Beginn des Verbrennungsprozesses hat, also auf die Phase, in der die Zündung und Ausbildung einer stabilen Flamme stattfindet. Aufgrund der hier untersuchten Abfallfraktionen, die einen hohen Anteil an flüchtigen Bestandteilen aufweisen, muss dieses sicherlich

zunächst noch auf Stoffe eingeschränkt werden, deren Anteil an flüchtigen Bestandteilen in einem vergleichbaren Bereich liegt.

Anhand der ermittelten EFW bietet sich eine Unterteilung der untersuchten Brennstoffe in drei Festbrennstoffgruppen an. Dabei gibt der EFW die Qualität der Peakbildung wieder, die auf die Verbrennung der flüchtigen Bestandteile zu Beginn des Verbrennungsprozesses zurückzuführen ist (siehe 5.2.3). Bei den untersuchten Stoffen ist ein hoher EFW gleichbedeutend mit einem großem Peak in dem Sinne, dass die Fläche unter dem Peak einen großen Wert annimmt, was gleichbedeutend ist mit einer hohen Energie, die freigesetzt wird. Die Höhe der bei der Peakbildung freigesetzten Energie hängt ab von der Masse der verbrannten flüchtigen Bestandteile und deren Heizwert. Für die untersuchten Fraktionen, bei denen der Heizwert der flüchtigen Bestandteile aus der bekannten Elementarzusammensetzung berechnet werden konnte und damit auch die verbrannte Masse der flüchtigen Bestandteile bei der Peakbildung, ergab sich, dass der EFW zwar mit der verbrannten Masse korreliert, aber nicht mit dem Heizwert der flüchtigen Bestandteile (Abbildung 35).

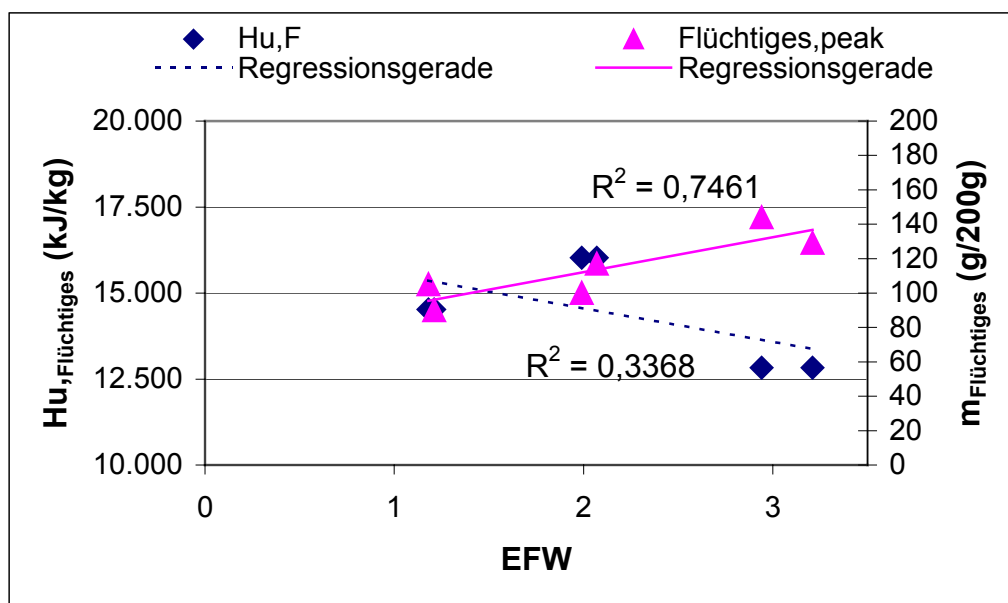


Abbildung 35 Zusammenhang zwischen dem Energiefreisetzungswert, dem Heizwert der flüchtigen Bestandteile und der während der Peakbildung verbrannten Masse flüchtiger Bestandteile

Damit ist der EFW ein Maß für die Masse der flüchtigen Bestandteile, die in der Anfangsphase des Verbrennungsprozesses verbrannt wird, d. h. bei einem hohen EFW ist die Verbrennungsrate der flüchtigen Bestandteile zu Beginn der Verbrennung

groß und ein hoher Anteil der im Brennstoff gespeicherten Energie wird schnell freigesetzt.

Entsprechend erfolgt die Benennung der in Tabelle 13 aufgeführten Festbrennstoffgruppen in „langsam, schnell und schnellst verbrennende“ Festbrennstoffe. Die Fraktion Mischkunststoffe erfährt dabei zunächst keine Zuordnung, zum einen weil der mittlere EFW von 1,7 schon relativ weit entfernt liegt von dem Wert 2,0 für die „schnell verbrennenden“ Festbrennstoffe, zum anderen weil der große Variationskoeffizient von 11,4 % eine Festlegung des EFW mit einer größeren Unsicherheit behaftet. Tendenziell sind die Mischkunststoffe eher den „schnell verbrennenden“ Festbrennstoffen zuzuordnen. Es bleibt abzuwarten, ob mit der Untersuchung weiterer Fraktionen die Gruppeneinteilung ergänzt werden muss, entweder indem die Bereiche der Festbrennstoffgruppen weiter gefasst werden oder indem neue Gruppen ergänzt werden.

Tabelle 13: Unterteilung der untersuchten Abfallfraktionen in Festbrennstoffgruppen anhand ihres EFW

Festbrennstoffgruppe	EFW	Zugeordnete Fraktionen
Langsam Verbrennende	$1 \pm 0,2$	Holzbriketts
Schnell Verbrennende	$2 \pm 0,2$	Gummi, PET, Textilien
Schnellst Verbrennende	$3 \pm 0,2$	Tetra-Packs, Papier

Diese Gruppeneinteilung bestätigt sich auch durch die Beobachtung des Verbrennungsvorganges während der Versuche, in denen die Abfallfraktionen innerhalb einer Festbrennstoffgruppe ein ähnliches Verhalten zeigen. Die Fraktion Holzbriketts brennt relativ langsam und gleichmäßig, ohne dass sich eine starke Flamme bildet. Bereits bei den Mischkunststoffen erfolgt kurz nach der Zugabe eine starke Flammenbildung, die noch während eines Verbrennungsintervalls wieder nachlässt. Diese Neigung zur starken Flammenbildung direkt nach der Brennstoffzugabe, verbunden mit dem deutlichen Rückgang der Flammenstärke im Verlauf eines Intervalls, nimmt bei den folgenden Festbrennstoffgruppen zu. Bei Papier und den Tetra-Packs (der Anteil vom Papier liegt hier bei ca. 90 %) entsteht schon während der Brennstoffzugabe eine sehr große Flamme, was das Handling dieser Fraktionen an der TVA erschwert hat. Diese starke Flammenbildung bei den „schnellst verbrennenden“ Fraktionen lässt bereits nach ca. 90 s, also etwas weniger als 1/3 der Dauer eines

Verbrennungsintervalls, nach. Die Flammenintensität ist dann deutlich geringer als bei Holz.

Die Gruppenbenennung bezieht sich ausschließlich auf die Verbrennung der flüchtigen Bestandteile. Die Zeiten für die vollständige Verbrennung einer Festbrennstoffcharge als Zeitdifferenz zwischen der ersten Festbrennstoffzugabe und dem Erreichen der stabilen Hauptphase (siehe 5.2.2) hängt von einer Reihe weiterer Faktoren ab. Nach dem derzeitigen Stand können die Werte für t_v nur bestimmt werden, indem sie unmittelbar aus den Verlaufskurven der Verbrennungsleistung der Versuche abgelesen werden. Für die untersuchten Fraktionen sind die Werte für t_v zusammen mit den Fraktionsmittelwerten für den Heizwert und den EFW in der folgenden Tabelle 14 zusammengestellt.

Dass es keine direkte Abhängigkeit zwischen t_v und dem EFW oder dem Heizwert gibt, zeigt Abbildung 36, in der diese drei Größen für die untersuchten Fraktionen aufgetragen sind. Im Gegensatz zu der Abbildung 36 lässt sich hier ein gegenläufiger Zusammenhang zwischen dem Heizwert und dem EFW erkennen, allerdings nur unter der Einschränkung, dass der Brennstoff Holz nicht berücksichtigt wird. Bei der Betrachtung aller untersuchter Brennstoffe behält die Aussage einer nicht bestehenden Korrelation der Größen Heizwert und EFW ihre Gültigkeit.

Tabelle 14: Heizwert, t_v und EFW der untersuchten Fraktionen

Brennstoff	Heizwert [MJ/kg]	t_v [s]	EFW
Papier	12,8	1.200	3,1
Holzbriketts	18,5	2.100	1,2
Tetra-Packs	19,4	1.500	2,9
PET	20,0	3.000	2,0
Textilien	23,9	2.400	2,0
Gummi	28,2	1.800	2,0
Mischkunststoffe	30,5	1.800	1,7

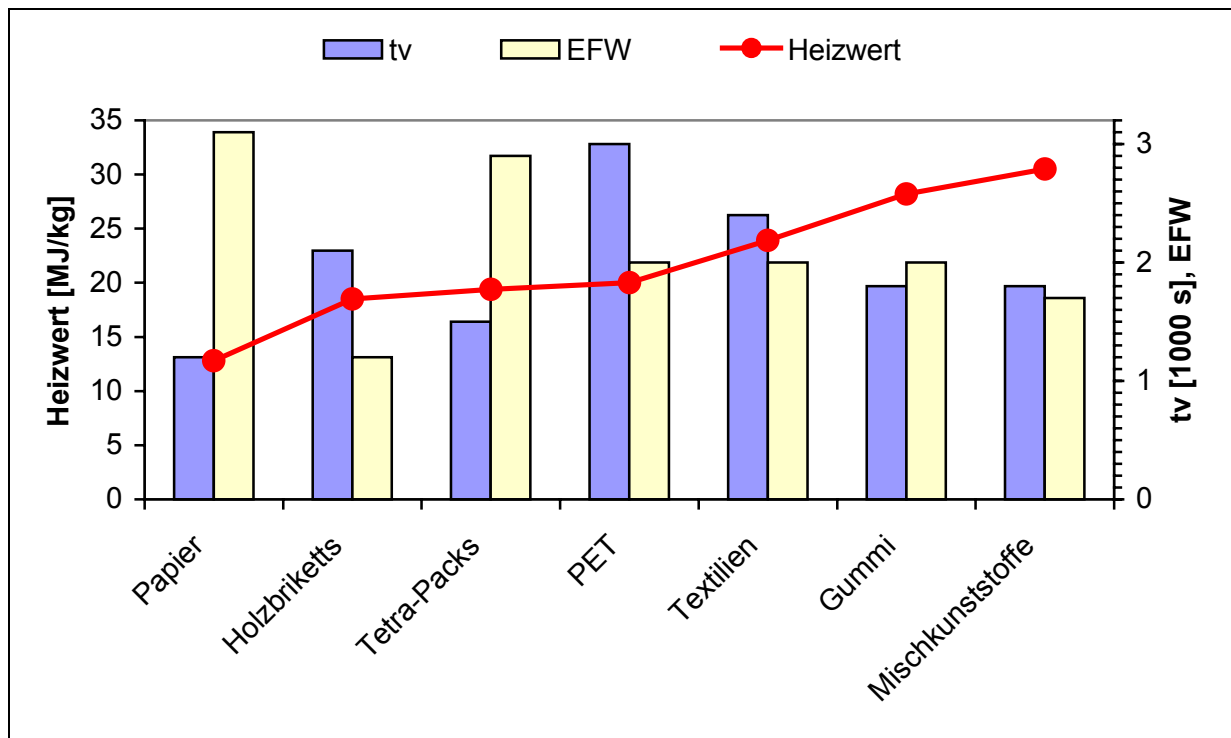


Abbildung 36 Heizwert, t_v und EFW der untersuchten Fraktionen

Eine interessante Beobachtung ergibt sich, wenn man die Zunahmesteigung a_{Zunahme} der charakteristischen Peaks genauer betrachtet. Diese gibt an, mit welcher Geschwindigkeit die im Brennstoff enthaltene Energie zu Beginn der Verbrennung freigesetzt wird. Der Wert von a_{Zunahme} ergibt sich als Summe der Steigungen a_{QRg1} und a_{QKw1} als der im Rauchgas und im Kühlwasserkreislauf verzeichneten Leistungsanstiege während der Peakbildung (siehe 5.1.3, Gleichung 14). Generell wird bei den Verbrennungsversuchen der größere Anteil der freigesetzten Energie in den Kühlwasserkreislauf überführt, und so ist zu erwarten, dass das auch bei der während der Peakbildung freigesetzten Energie der Fall ist, also $a_{\text{QKw1}} > a_{\text{QRg1}}$ ist. Dieses trifft bei den untersuchten Abfallfraktionen auch zu, mit Ausnahme der Fraktionen Papier und Tetra-Packs - der Fraktionen, die der Festbrennstoffgruppe „Schnellst verbrennend“ zugeordnet sind. Dieses wird in Abbildung 37 deutlich, in der die Werte von a_{QRg1} und a_{QKw1} für einen Vertreter jeder Brennstoffgruppe gegenübergestellt werden. Die Werte der nicht dargestellten Fraktionen verhalten sich ähnlich.

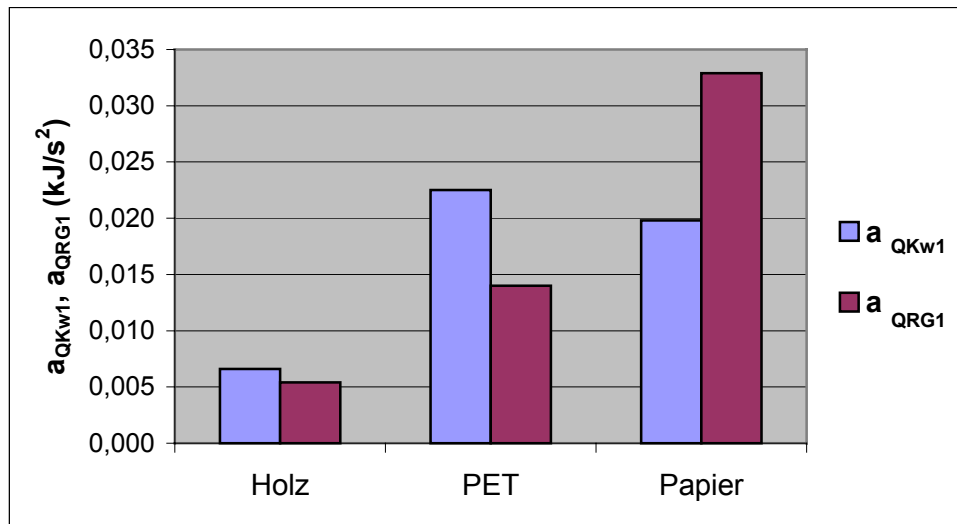


Abbildung 37 Vergleich der a_{QRG1} und a_{QKw1} jeweils einer Fraktion aus einer Festbrennstoffgruppe

Diese Beobachtung führt zu dem Schluss, dass bei den „schnellst brennenden“ Fraktionen die Energie direkt nach der Zugabe zunächst mit einer Geschwindigkeit freigesetzt wird, die bei der Kesselanordnung der TVA dazu führt, dass nicht genug Energie im Wärmetauscher abgenommen wird. Somit verbleibt der Großteil der Energie im Rauchgas. Entsprechende Verschiebungen sind auch bei anderen Anlagen denkbar, in denen Brennstoffe eingesetzt werden, deren Verhalten von dem der Auslegungsbrennstoffe abweichen. Dieses Problem wird im Kapitel 6 noch einmal aufgegriffen.

Als Zwischenresümee der Untersuchungen der Monofractionen gilt:

Auf der Basis der Daten semi-kontinuierlicher Verbrennungsversuche lassen sich drei Größen ermitteln, die Informationen über das Verbrennungsverhalten des untersuchten Festbrennstoffes liefern:

1. Die Zeit vom Beginn der Festbrennstoffverbrennung bis zum Erreichen der stabilen Hauptphase ist die Zeit t_v , die für die vollständige Verbrennung einer Festbrennstoffcharge benötigt wird.
2. Das sich in der stabilen Hauptphase einstellende Leistungsniveau gibt, unter Berücksichtigung des konstanten Beitrags zur Verbrennungsleistung durch die Ölstützfeuerung, qualitativ den Heizwert des eingesetzten Festbrennstoffs wieder.

-
3. Der aus der charakteristischen Energiefreisetzungskurve berechnete Energiefreisetzungswert EFW ist ein Maß für die Masse der flüchtigen Bestandteile, die in der Anfangsphase des Verbrennungsprozesses verbrannt wird und damit für die Verbrennungsrate der flüchtigen Bestandteile und der Höhe der freigesetzten Energie zu Beginn des Verbrennungsprozesses.

Da diese Größen unter bestimmten Randbedingungen ermittelt werden, stellen sie stoffspezifische, qualitative Vergleichsgrößen dar.

5.4 Untersuchungen zum Verbrennungsverhalten von Gemischen fester Abfallstoffe

Im Hinblick auf die Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens fester Abfälle ist die im vorigen Kapitel beschriebene Untersuchung einzelner Stofffraktionen ein notwendiger erster Schritt. In der Praxis der Verbrennung fester Abfälle treten allerdings in der Regel Gemische auf, deren einzelne Bestandteile sich einer der zuvor untersuchten Stofffraktionen zuordnen lassen bzw. die aus einem Verbund solcher Stoffe bestehen. Die Anzahl möglicher Zusammensetzungen dieser Gemische ist nahezu unendlich und macht es notwendig zu untersuchen, inwieweit aus der Kenntnis der Zusammensetzung eines Feststoffgemisches und der Kenntnis des Verbrennungsverhaltens der einzelnen Bestandteile das Verbrennungsverhalten des Gemisches abgeleitet werden kann.

Die Untersuchung von Zweistoffgemischen ist nach der Untersuchung der Einzelfraktionen der nächste logische Schritt. Da es darum geht, ob die Stoffe bei einer gemeinsamen Verbrennung sich gegenseitig beeinflussen, sollten sie in einer möglichst homogenen Mischung vorliegen. Dieses lässt sich bei einer Zweistoffmischung am ehesten realisieren. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte eine Beschränkung auf die Untersuchung von Zweistoffgemischen auf der Basis der Stofffraktion Holz. Die Wahl von Holz als Grundstoff für die untersuchten Gemische liegt darin begründet, dass es sich bei Holz um die Fraktion handelt, bei der für den Einsatz als Brennstoff in Forschung und Praxis die meisten Erfahrungen vorliegen. Gleichzeitig ist mit Holz der einzige Vertreter der Festbrennstoffgruppe „Langsam verbrennend“ gemäß Tabelle 13 (S. 67) berücksichtigt. Gemischt wurde Holz jeweils in den Verhältnissen 1:1, 1:2 und 2:1 mit einem Vertreter der anderen beiden Festbrennstoffgruppen.

Für die Gruppe „Schnellst Verbrennende“ fiel die Wahl auf Papier anstelle der Tetra-Packs, da es sich bei den Tetra-Packs gewissermaßen bereits um ein Stoffgemisch handelt. Bei der Gruppe „Schnell Verbrennende“ standen drei verschiedene Fraktionen zur Auswahl, wobei die Fraktion Textilien bereits eine Mischung verschiedener Stoffe darstellt und daher nicht berücksichtigt wurde. Da neben dem EFW, von dem sich die Gruppeneinteilung herleitet, für das Verbrennungsverhalten auch das t_v von Bedeutung ist, erfolgte die Auswahl von PET, das von allen untersuchten Fraktionen den höchsten Wert für t_v aufweist. Mit der Auswahl von Papier als Vertreter der

Gruppe „Schnellst Verbrennende“ war hinsichtlich des t_v auch die Fraktion mit dem minimalen Wert berücksichtigt.

Die untersuchten Brennstoffmischungen sind zusammen mit den im Folgenden verwendeten Kurzbezeichnungen in Tabelle 15 aufgeführt. Für jedes Verbrennungsintervall wurde manuell eine möglichst homogene Mischung einer Zugabemenge der Brennstoffmischung vorbereitet. Es fanden pro Mischung zwei Verbrennungsversuche statt. Lediglich bei den zuletzt untersuchten Mischungen Ho1Pet2 und Ho2Pet1 wurde auf einen zweiten Versuch verzichtet, da sich bei der Auswertung der Versuche zu den anderen Gemischen keine großen Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsläufen zu einer Mischung ergaben.

Tabelle 15: Untersuchte Brennstoffmischungen

Mischfraktion	Mischverhältnis	Kurzbezeichnung
Holz/Papier	1 : 1	Ho1Pap1
	1 : 2	Ho1Pap2
	2 : 1	Ho2Pap1
Holz/PET	1 : 1	Ho1Pet1
	1 : 2	Ho1Pet2
	2 : 1	Ho2Pet1

Auch bei der Untersuchung der Mischfraktionen war zunächst einmal von Interesse, wie gut die charakteristischen Energiefreisetzungscurven den realen Verlauf der erfassten Outputwärmeströme abbilden. Die Spannbreite der Abweichungen ist in Tabelle 16 dargestellt. Wie schon bei den Versuchen mit den Monofractionen sind die relativen Abweichungen jeweils auf das Grundniveau der Verlaufskurve der erfassten Outputwärmeströme bezogen.

Für die Versuche mit den Mischfraktionen ergibt sich im Bezug auf den Vergleich der charakteristischen Energiefreisetzungscurve mit dem realen zeitlichen Verlauf der Verbrennungsleistung kein neues Bild. Sowohl beim Grundniveau wie auch bei den Peak-Maxima liegen die mittleren und die maximalen Abweichungen in der gleichen Größenordnung wie bei den Versuchen mit den Monofractionen (siehe Kapitel 5.3.2, Tabelle 10). Somit bestätigt sich, dass der linearisierte Verlauf der charakteristischen Energiefreisetzungscurve den realen zeitlichen Verlauf der Verbrennungsleistung gut wiedergibt.

Tabelle 16: Abweichungen der charakteristischen Energiefreisetzungskurven vom realen Verlauf der erfassten Outputwärmeströme bei den Mischfraktionen

Abweichung Energiefreisetzungskurve zu realen Wärmeströmen	Mittelwert		Maximum		Minimum		Stabw. (kJ/s)
	absolut (kJ/s)	relativ (%)	absolut (kJ/s)	relativ (%)	absolut (kJ/s)	relativ (%)	
Grundniveau	1,76	4,85	2,90	8,10	0,31	0,87	0,84
Peak-Maximum	2,73	7,63	5,69	15,97	0,46	1,20	1,47

Bei der Betrachtung der Auswirkungen der Abweichungen durch die Linearisierung der Verlaufskurve der Verbrennungsleistung auf die insgesamt während eines Zeitintervalls freigesetzte Energie bestätigen sich ebenfalls die aus den Versuchen mit den Monofractionen gewonnen Erkenntnisse (siehe Kapitel 5.3.2, Tabelle 11). Im Bezug auf die insgesamt bei der Verbrennung freigesetzte Energie liegt auch hier eine noch bessere Übereinstimmung mit den realen Verhältnissen vor als bei der Beschreibung des zeitlichen Verlaufs der Verbrennungsleistung, wie anhand der in Tabelle 17 dargestellte Ergebnisse zu ersehen ist.

Tabelle 17: Mittlere Abweichungen der freigesetzten Energie pro Verbrennungsintervall bei den charakteristischen Energiefreisetzungskurven im Vergleich zum realen Verlauf der erfassten Outputwärmeströme bei den Mischfraktionen

Brennstoff	Abweichung von Q pro Intervall, Energiefreisetzungskurve zu realen Wärmeströmen	
	absolut (kJ)	relativ (%)
Ho1Pap1	592	5,14
Ho1Pap2	146	1,31
Ho2Pap1	65	0,56
Ho1Pet1	92	0,78
Ho1Pet2	356	2,99
Ho2Pet1	437	3,63
Mittelwert (Beträge)	281	2,40
Stabw. (Beträge)	195	1,66

Im Durchschnitt liegen die Abweichungen zwischen den charakteristischen Energiefreisetzungskurven und dem realen Verlauf der erfassten Outputwärmeströme sogar noch geringfügig unterhalb der mittleren Abweichung bei den Versuchen mit den Monofractionen. Das ist darauf zurückzuführen, dass es sich bei den für die Misch-

fraktionen ausgewählten Festbrennstoffen überwiegend um Fraktionen handelt, die schon bei den Versuchen mit den Monofractionen unterdurchschnittliche Abweichungen aufwiesen.

Die sich für die Mischungen ergebenden charakteristischen Energiefreisetzungskurven sind zusammen mit denen der jeweiligen Einzelfractionen dargestellt, in Abbildung 38 die der Holz/Papier-Mischungen, in Abbildung 39 die der Holz/PET-Mischungen.

Es ist bekannt, dass sich der Heizwert einer Mischung anteilig aus den Heizwerten der einzelnen Bestandteile zusammensetzt. Entsprechend befinden sich die charakteristischen Energiefreisetzungskurven der untersuchten Mischungen von ihrem Grundniveau her zwischen den charakteristischen Energiefreisetzungskurven der Einzelfractionen. Je höher der Anteil der heizwertreicheren Fraktion bei den Zweistoffmischungen, desto höher liegt auch das Grundniveau im Vergleich zu den anderen Mischungen. So steigt im Fall der Holz/Papier-Mischungen das Grundniveau von ca. 34 kW für reines Papier (+ Ölstützfeuer) auf ca. 36 kW für eine 1:2 Mischung von Holz und Papier, und über weitere Zwischenstufen

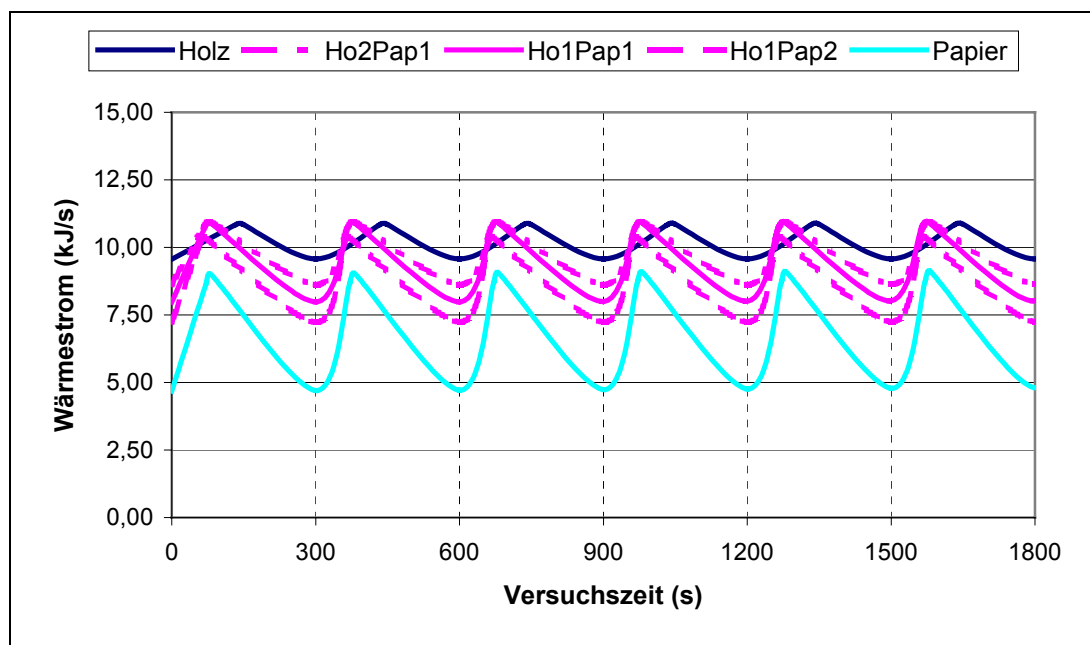


Abbildung 38 Aus den Verbrennungsversuchen gebildete charakteristische Energiefreisetzungskurven der untersuchten Holz/Papier-Mischfraktionen ohne Berücksichtigung des Wärmestroms aus der Ölstützfeuer

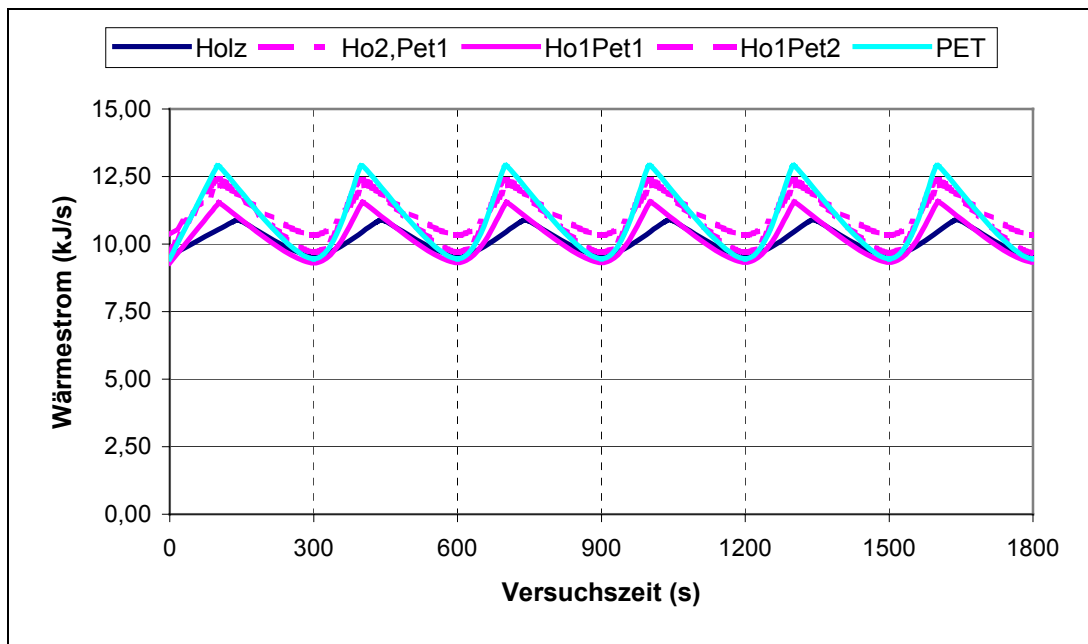


Abbildung 39 Aus den Verbrennungsversuchen gebildete charakteristische Energiefreisetzungskurven der untersuchten Holz/PET-Mischfraktionen ohne Berücksichtigung des Wärmestroms aus der Ölstützfeuerung

bis hin zu ca. 39 kW für reines Holz (für die weiteren Werte, siehe auch im Anhang Tabellen A6 und A7).

Dieses Verhalten lässt sich bei den Holz/Papier-Mischungen eindeutig feststellen. Auch bei den Holz/PET-Mischungen ist dieses Verhalten im Prinzip zu beobachten, mit der Ausnahme der Ho2Pet1-Kurve. Eine Erklärung ergibt sich aus dem Umstand, dass bei den Holz/PET-Mischungen die Einzelfraktionen ähnliche hohe Heizwerte aufweisen. Daher liegen die Mischungen in einem engen Heizwertspektrum, das in seiner Größenordnung dem der Bestimmungsgenauigkeit entspricht. Alternativ zu der Bestimmung aus der charakteristischen Energiefreisetzungskurve ließe sich die Lage des Grundniveaus aber auch berechnen. Auf der Basis des unter 5.3.2 dargestellten Zusammenhangs, dass das Grundniveau den Heizwert des entgasten Festbrennstoffs wiedergibt, lässt sich für eine Mischung die Lage des Grundniveaus aus den anteiligen Werten für die Mischungsbestandteile bestimmen.

Bei der Betrachtung der charakteristischen Energiefreisetzungskurven lässt sich bereits erkennen, dass im Gegensatz zum Heizwert der EFW einer Mischung nicht durch eine lineare Überlagerung der EFW der Einzelfraktionen zu ermitteln ist. Deutlich erkennbar tendieren die Peaks der charakteristischen Energiefreisetzungskurven zu einer Ähnlichkeit mit den Peaks der Einzelfraktion mit dem höheren EFW. Offensichtlich kommt es bei der gemeinsamen Verbrennung eines Festbrennstoffes mit

Brennstoffen einer höheren Festbrennstoffgruppe zu einer beschleunigten Freisetzung der flüchtigen Bestandteile.

Diese Beobachtung bestätigt sich durch die sich ergebenden EFW für die Mischungen, die zusammen mit den t_v - Werten in Tabelle 18 aufgeführt sind. Überwiegend weisen die untersuchten Mischungen EFW auf, die sich im Bereich der EFW der Mischungsbestandteile mit dem jeweils höheren Wert befinden. Hiervon gibt es in 2 Fällen Abweichungen.

Bei der Mischfraktion Ho2Pet1 liegt der EFW zwar immer noch deutlich oberhalb des Mittelwertes, der sich aus den mengenmäßig gewichteten EFW der Einzelfractionen ergibt und bei dem Mischungsverhältnis von Holz und PET 1,47 betragen würde, doch ist er auch deutlich niedriger als der EFW von reinem PET. Somit lässt sich für eine Mischung der maximale EFW eines Bestandteiles offensichtlich nur dann als Wert für die gesamte Mischung heranziehen, wenn dieser Bestandteil in einem ausreichend großen Massenanteil vorliegt. Dabei scheint sich der benötigte Massenanteil zu reduzieren, wenn der maximale EFW einer Mischungskomponente sehr viel höher ist als der EFW der anderen Mischungsbestandteile, wie man anhand der Mischfraktion Ho2Pap1 erkennen kann.

Tabelle 18: EFW und t_v der untersuchten Mischfraktionen

Brennstoff	a_{Zunahme} [kJ/s ²]	a_{Abnahme} [kJ/s ²]	EFW	Fraktions- mittelwert	Variations- koeffizient	t_v [s]
Holz	0,0096	0,0080	1,20	-	-	2100
Papier	0,0562	0,0183	3,08	-	-	1200
PET	0,0355	0,0175	2,03	-	-	3000
Ho2Pap1 (a)	0,0332	0,0111	2,99	3,01	0,68	1800
Ho2Pap1 (b)	0,0308	0,0102	3,02			
Ho1Pap1 (a)	0,0416	0,0136	3,05	3,08	1,38	1500
Ho1Pap1 (b)	0,0389	0,0125	3,11			
Ho1Pap2 (a)	0,0501	0,0147	3,41	3,61	7,85	1200
Ho1Pap2 (b)	0,0484	0,0127	3,81			
Ho2Pet1	0,0176	0,0098	1,80	-	-	2400
Ho1Pet1 (a)	0,0221	0,0119	1,86	1,95	6,56	2400
Ho1Pet1 (b)	0,0216	0,0106	2,04			
Ho1Pet2	0,0280	0,0139	2,01	-	-	3000

Im Fall der Mischfraktion Ho1Pap2 ergibt sich sogar ein EFW, der deutlich höher ist, als der von Papier, das in diesem Fall die Mischungskomponente mit dem höchsten EFW ist. Das ist möglich, da der im Vergleich zu Papier höhere Anteil flüchtiger Bestandteile im Holz durch die sehr intensive Flüchtigenverbrennung des hohen Papieranteiles an der Mischfraktion sehr viel schneller freigesetzt wird als bei der reinen Holzverbrennung. Dieses verdeutlicht noch einmal die beschleunigende Wirkung der Zumischung von Festbrennstoffen mit einem hohem EFW auf den Prozess der Verbrennung der flüchtigen Bestandteile.

Im Gegensatz zu den EFW lässt sich in Bezug auf die Verbrennungszeit t_v erkennen, dass sich diese Größe für die Mischfraktionen im Prinzip aus der Mittelung der Werte der einzelnen Bestandteile unter Berücksichtigung der Massenanteile an der Mischung berechnen lässt. Diese Berechnung wird insofern eingeschränkt, als aufgrund der Versuchsmethodik mit der Unterteilung in Verbrennungsintervalle die Zeiten nur als Vielfaches von 300s angegeben werden können. In den Fällen, in denen der rechnerische Wert kein Vielfaches von 300 s ist, muss für einen Abgleich mit dem sich direkt aus den Versuchsdaten ergebenden Wert für t_v der rechnerische Wert entsprechend gerundet werden. Mit der Beachtung dieser Einschränkung ist es dann möglich, alleine aus der Zusammensetzung der Festbrennstoffmischung und den Werten der einzelnen Festbrennstofffraktionen, die Gesamtzeit für die vollständige Verbrennung einer Charge zu ermitteln.

Wenn man für die Untersuchung des Verbrennungsverhaltens der Mischfraktionen die Ausbildung der Peaks bei den charakteristischen Energiefreisetzungscurven genauer betrachtet, so lässt sich noch ein weiterer Zusammenhang erkennen, der die Vorhersage des Verhaltens von Festbrennstoffmischungen erleichtert. Unter Vernachlässigung des zumeist sehr kleinen Zwischenintervalls, ergibt sich die Peakausbildung aus der maximalen Höhe des Leistungsanstieges oberhalb des Grundniveaus \dot{Q}_{zu} und dem Zeitpunkt t_{zu} , an dem dieses Leistungsmaximum erreicht wird (siehe 5.1.3). Gleichzeitig lässt sich aus \dot{Q}_0 auch Q_{Peak} als die durch den Peak als dreieckförmige Fläche oberhalb des Grundniveaus der charakteristischen Energiefreisetzungscurve beschriebene Energie berechnen. Führt man diese Berechnung für die untersuchten Mischfraktionen durch, so ergeben sich die in Abbildung 40 dargestellten Werte. Dabei stellen die Geraden die rechnerischen Werte für Q_{Peak} dar, die sich aus den anteiligen Werten der Einzelfraktionen ergeben.

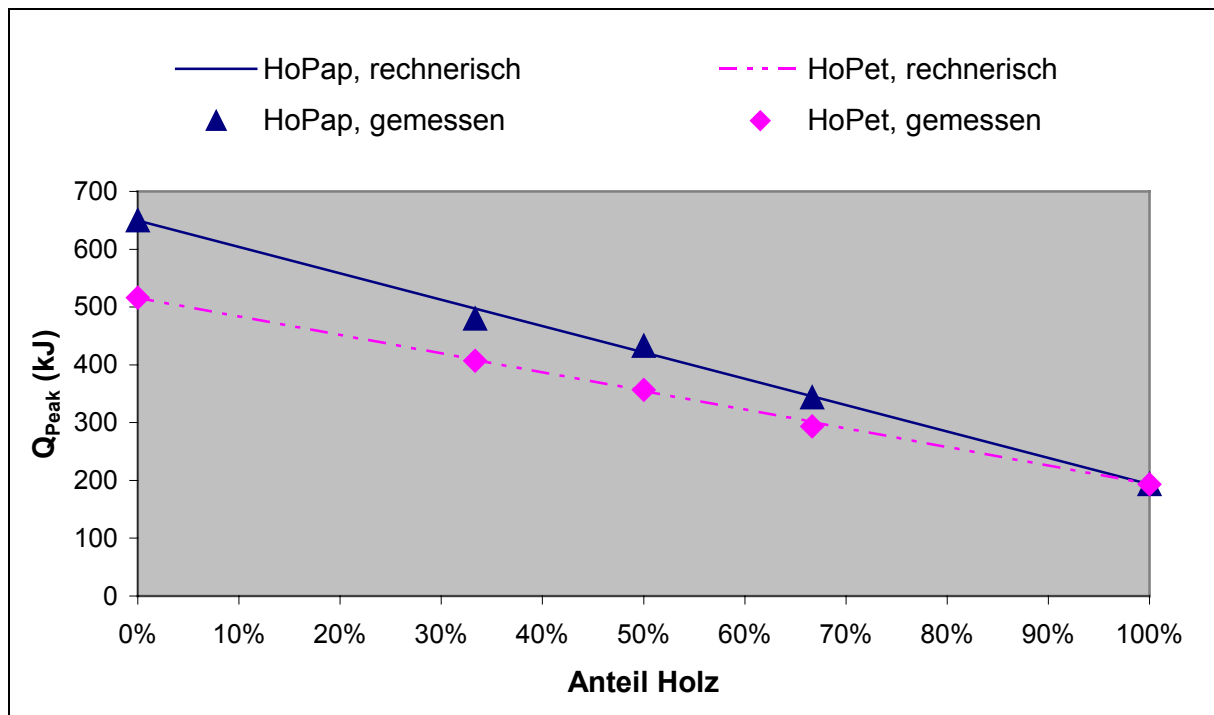


Abbildung 40 Rechnerisch aus den Einzelfractionen und direkt aus den Versuchsdaten bestimmte Werte für Q_{Peak} der untersuchten Mischfraktionen

Es ist klar zu erkennen, dass die aus den Versuchen der Mischfraktionen bestimmten Werte für Q_{Peak} sich mit denen der rechnerischen Ermittlung auf der Basis der Versuche der Monofractionen decken. Daraus lässt sich unmittelbar schließen, dass sich auch das \dot{Q}_{zu} bei Festbrennstoffmischungen aus der anteiligen Zusammensetzung berechnen lässt, sofern die \dot{Q}_{zu} -Werte der einzelnen Bestandteile bekannt sind. Somit verändert sich die Masse der freigesetzten flüchtigen Bestandteile nicht, sondern nur der zeitliche Ablauf der Entgasung mit der anschließenden Verbrennung der flüchtigen Bestandteile. Im Hinblick auf die Ausbildung der charakteristischen Peaks und damit auch der EFW bleibt damit zunächst nur offen, nach welcher Zeit t_{zu} das Leistungsmaximum erreicht wird, aber nicht, welchen Betrag es annimmt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass hinsichtlich der betrachteten Größen zur Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens, Festbrennstoffmischungen nicht vollständig auf der Grundlage der stofflichen Zusammensetzung und dem Verbrennungsverhalten der Einzelfractionen zu charakterisieren sind. Doch liefern die Untersuchungen zu den Mischungen ausreichende Erkenntnisse, um dies näherungsweise vornehmen zu können. Genau wie der Heizwert, lässt sich auch die Zeit t_v für die vollständige Verbrennung einer Charge anteilig aus den Werten der Mischungs-

bestandteile berechnen. Für den EFW ist es dagegen nicht möglich. Durch die gemeinsame Verbrennung von Festbrennstoffen verschiebt sich im Hinblick auf das Verhalten der Monofractionen der zeitliche Ablauf der Verbrennung der flüchtigen Bestandteile. Diese zeitliche Verschiebung kann nach derzeitigem Kenntnisstand nicht exakt bestimmt werden, wobei allerdings gewisse Tendenzen aus den Versuchsergebnissen herausgelesen werden können. Aus der stofflichen Zusammensetzung bestimmbar ist dagegen die insgesamt während des ersten Verbrennungsintervalls freigesetzte Energie.

5.5 Ausblick zur Anwendung und weiteren Untersuchung der Charakterisierungsgrößen des Verbrennungsverhaltens

Auf der Basis der in diesem Kapitel beschriebenen Versuchsergebnisse erscheint eine Anwendung der hergeleiteten Charakterisierungsgrößen für das Verbrennungsverhalten für den Betrieb von Großanlagen bereits möglich. Wie die Charakterisierungsgrößen in Abhängigkeit von der jeweiligen Anlagenart angewendet werden können, wird im folgenden Kapitel behandelt. An dieser Stelle erfolgt vorab eine Diskussion der generellen Herangehensweise für die Anwendung der Charakterisierungsgrößen.

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei den Charakterisierungsgrößen zunächst um qualitative Vergleichsgrößen, deren Werte unter speziellen Randbedingungen bestimmt wurden. Dabei ist aber entscheidend, dass die in den Versuchen ermittelten Unterschiede im Verbrennungsverhalten alleine auf die stoffspezifische Zusammensetzung der Brennstoffe zurückzuführen sind. Somit lassen sich die qualitativen Unterschiede auch auf andere Anlagenbedingungen übertragen.

Für gewöhnlich liegen in einer Feuerungsanlage umfangreiche Betriebserfahrungen für den Einsatz eines oder mehrerer Regelbrennstoffe vor, wobei unter Umständen, wie z.B. im Fall der konventionellen Müllverbrennung, der Regelbrennstoff eine hohe Variationsbreite in seinen Eigenschaften aufweisen kann. Soll ein neuer Brennstoff zum Einsatz kommen, so werden umfangreiche Betriebsversuche gefahren bzw. im laufenden Betrieb auf das veränderte Verbrennungsverhalten reagiert. Sofern aber die Charakterisierungsgrößen des Verbrennungsverhaltens für den Regelbrennstoff bekannt sind und auch für den neuen Brennstoff bestimmt werden, kann bereits im Vorfeld durch den qualitativen Vergleich des Verbrennungsverhaltens besser abgeschätzt werden, wie die Anlage auf den Einsatz des neuen Brennstoffs reagieren wird. Dies setzt allerdings voraus, dass sich durch den Einsatz des neuen Brennstoffs keine wesentlichen Veränderungen der Prozessbedingungen ergeben.

Dabei ist der Verbrennungsprozess bezüglich veränderter Prozessbedingungen aber relativ unempfindlich, sofern gewisse Mindestbedingungen eingehalten werden. Wie in Kapitel 3 ausgeführt, ist ab dem Erreichen einer Temperatur von ca. 1100 K der Verbrennungsprozess nur noch durch die Sauerstoffdiffusion hin zur brennbaren Substanz gesteuert. Sofern also eine ausreichend hohe Verbrennungstemperatur

und ein ausreichendes Sauerstoffangebot vorhanden ist, was bei Großfeuerungsanlagen im Anlagenbereich der Verbrennung überwiegend vorherrschend ist, ergibt sich das Verbrennungsverhalten aus den Brennstoffeigenschaften. Dabei spielt neben den stoffspezifischen Eigenschaften die Korngröße der Festbrennstoffe eine entscheidende Rolle, zumal bei diesem Parameter auch größere Variationen bei den Verbrennungsanlagen auftreten.

Der Korngröße der Festbrennstoffe kommt auch deshalb eine wesentliche Bedeutung zu, weil es sich hierbei um eine Brennstoffeigenschaft handelt, die im Gegensatz zu den stoffspezifischen Eigenschaften verändert werden kann. Sollte sich herausstellen, dass ein neuer Brennstoff in seinen Charakterisierungsgrößen zu stark vom Regelbrennstoff abweicht, dann kann durch eine Veränderung der Korngröße versucht werden, das gewünschte Verbrennungsverhalten zu erhalten.

Hinsichtlich der Fortführung der Untersuchungen zur Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens von Festbrennstoffen ist somit die erste Priorität in der Untersuchung der Veränderung der Charakterisierungsgrößen in Abhängigkeit von der Korngröße zu sehen. Ein weiterer Parameter, bei dem ein wesentlicher Einfluss auf das Verbrennungsverhalten zu erwarten ist, ist der Wassergehalt. Dieser ist besonders bei der Verbrennung fester Abfälle, deren Wassergehalt starken Schwankungen aufweisen kann, von Interesse.

Letztendlich bleibt auch noch zu klären, ob das genaue Zeitverhalten der Verbrennung der flüchtigen Bestandteile von Festbrennstoffmischungen aus dem Verhalten der Einzelfractionen berechnet werden kann. Sofern hier durch eine breitere Datenbasis aus Versuchen mit Mischfraktionen eine allgemeine Gesetzmäßigkeit gefunden wird, kann bereits auf der Basis einer Sortieranalyse das Verbrennungsverhalten einer Festbrennstoffmischung bestimmt werden. Damit würde sich der Versuchsaufwand bei dem Einsatz eines neuen Brennstoffs in einer Verbrennungsanlage erheblich reduzieren lassen.

6. Anwendung der Charakterisierungsgrößen des Verbrennungsverhaltens für den Einsatz von festen Abfallstoffen in Verbrennungsanlagen

Die prinzipiellen Anlagenarten, für die nach dem derzeitigen Stand der Diskussion und der Praxis der Einsatz von festen Abfällen als Brennstoff in Frage kommt, wurden bereits in Kapitel 2 genannt. Hinsichtlich der Verwendung der hergeleiteten Größen zur Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens sollen diese Anlagen unter technischen Gesichtspunkten noch einmal näher betrachtet werden. Bei dieser Betrachtung wird das Charakteristikum Heizwert nicht weiter berücksichtigt, zum einen weil die Eignung bestimmter Heizwerte für die unterschiedlichen Anlagen in der Literatur schon hinreichend diskutiert wurde (z.B. SCHOLZ et.al., 2001), hauptsächlich aber, weil der Heizwert im eigentlichen Sinn kein Charakteristikum für das Verbrennungsverhalten ist, wie zuvor schon ausgeführt (siehe Kapitel 3.2 und 5.3.2).

Ein erster wesentlicher Schritt ist es, eine Trennung zwischen den eigentlichen Apparaten der Verbrennung und den Verfahren vorzunehmen, wobei in dem Verfahrensbegriff der eigentliche Zweck enthalten ist, für den die Verbrennung zum Einsatz kommt. Diese Unterteilung wird für die genannten Anlagen, zusammen mit der Darstellung der Charakteristika der Apparatetypen, in der Tabelle 19 vorgenommen. Diese Unterteilung ist notwendig, weil sich für die Apparate und Verfahren unterschiedliche Wertungen bezüglich der Charakterisierungsgrößen ergeben können, die gegebenenfalls gegeneinander abgewogen werden müssen.

Dabei unterscheidet sich die Müllverbrennungsanlage als Anlagenart insofern von den anderen Anlagenarten, dass in diesem Fall die Verbrennung fester Abfälle der eigentliche Hauptzweck des Verfahrens ist, während ansonsten die Verbrennung fester Abfälle nur ein Teil eines Verfahrens ist, das einen anderen Hauptzweck verfolgt. Daher ergeben sich für die Anwendung der Charakterisierungsgrößen zwei unterschiedliche Fragestellungen. Für die Anlagen, bei denen der Hauptzweck nicht in der Verbrennung fester Abfälle liegt, soll die Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens bei der Einschätzung helfen, welche festen Abfälle als Brennstoff eingesetzt werden, bzw. in welchem Aufbereitungszustand sie eingesetzt werden können. Diese Fragestellung ergibt sich bei den Müllverbrennungsanlagen nicht, da diese dafür ausgelegt sind, nahezu beliebige feste Abfälle zu verbrennen. Für die geht es

vielmehr darum zu betrachten, inwieweit die Anwendung der Charakterisierungsgrößen einen Beitrag zur Betriebsoptimierung liefern kann.

Tabelle 19: Charakterisierung der Anlagen in denen feste Abfälle verbrannt werden

Anlagenart	Hauptzweck	Apparate- typ	Einsatzstoff	Charakte- ristische Temp.	Verweilzeit im Reaktor
Müllverbren- nungsanlage	Abfall- beseitigung	Rost	Feststoff mit breiter Korn- größenvertei- lung, pastöse Stoffe	ca. 850 °C	im Stunden- bereich
Energetische Verwertungsan- lage	Nutzenergie- gewinnung (Wärme, Dampf, Strom)				
Kohlekraftwerk	Stromgewinnung	Wirbel- schicht	Feststoff mit enger Korngrö- ßenverteilung, pastöse Stoffe	ca. 850 °C	im Minuten- bereich
		Brenn- kammer	Feststoff staub- förmig	bis 1500 °C	im Sekun- denbereich
Zementwerk	Zement- produktion	Drehrohr	Feststoff staub- förmig o. mit enger Korngrö- ßenverteilung, pastöse Stoffe	bis 2000 °C	im Minuten- bereich

Bei der Betrachtung der Apparatecharakteristika zeigen sich in allen Kategorien große Unterschiede zwischen den verschiedenen Apparatetypen, wobei der Rost auf der einen Seite und die Brennkammer auf der anderen jeweils die Extreme der Charakteristika (mit Ausnahme der Temperatur) in sich vereinen. Die Wirbelschicht und das Drehrohr sind bezüglich ihrer Apparatecharakteristika zwischen den beiden anderen Apparatetypen anzusiedeln. Entsprechend dieser Unterschiede gestaltet sich auch die Anwendung der Charakterisierungsgrößen für das Verbrennungsverhalten unterschiedlich.

Doch bevor auf die Anwendung der Größen zur Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens in Abhängigkeit von dem jeweiligen Hauptzweck und dem Apparatetyp eingegangen wird, muss zunächst kurz diskutiert werden, wie sich ein verändertes Verbrennungsverhalten des eingesetzten Brennstoffs in einer Anlage auswirken kann.

6.1 Auswirkungen eines veränderten Verbrennungsverhaltens

Wie bereits in Kapitel 3 diskutiert, gehören zu dem Verbrennungsverhalten eines Brennstoffs mehrere einzelne Brennstoffeigenschaften. Bezogen auf eine Verbren-

nungsanlage und ihren Regelbrennstoff können die unterschiedlichen Eigenschaften, die dem Verbrennungsverhalten zugerechnet werden, zwischen dem Regelbrennstoff und einem Ersatzbrennstoff unterschiedlich stark differieren. Entsprechend können, beeinflusst von der jeweiligen Anlagenkonfiguration, diese Unterschiede im Verbrennungsverhalten verschiedene Auswirkungen haben. Als maßgeblich hinsichtlich der Auswirkungen können die Unterschiede in der zeitlichen Entwicklung der Verbrennungsleistung des Festbrennstoffes und die Unterschiede in der Verbrennungszeit angesehen werden, die aus einer unterschiedlichen stofflichen Zusammensetzung und den sich daraus ergebenden Verbrennungsraten resultieren. Beides kann verschiedene Auswirkungen haben (siehe auch REIMANN, BORN, 2000; VDI, 2001), auf die im folgenden näher dargestellt werden.

Die brennstoffabhängige Entwicklung der Verbrennungsleistung wirkt sich im Wesentlichen auf das Temperaturprofil in der Verbrennungsanlage aus, aufgrund dessen Veränderung die folgenden Konsequenzen denkbar sind:

- a. Die sich ergebenden Abweichungen von den Auslegungstemperaturen führen, unabhängig davon ob es sich um höhere oder niedrigere Temperaturen handelt, im Bereich der Kesselheizflächen zu veränderten Wärmeübergängen, auf die mit einer Veränderung des Kesselbetriebs reagiert werden muss.
- b. Erhöhte Temperaturen bedeuten eine erhöhte Materialbeanspruchung und damit einen erhöhten Materialverschleiß. Gleichzeitig können sie zu Flugaschen-schmelzen führen, woraus eine stärkere Verschmutzung der Heizfläche resultiert. Diese Verschmutzungen können Korrosion begünstigen. Zusammen mit dem temperaturbedingten Verschleiß führt dieses zu verringerten Standzeiten. Zusätzlich bringt die Verschmutzung der Heizflächen auch eine Beeinträchtigung des Wärmeübergangs mit sich.
- c. Bei Brennstoffen mit einem stark erhöhten EFW gegenüber dem Regelbrennstoff ist im Zündraum der Feuerung mit extremen Temperaturspitzen zu rechnen. Diese können zu einer Überlastung der Feuerleistungsregelung führen.

Bei einer Veränderung der Verbrennungszeit führt dieses nur dann zu Konsequenzen, wenn die Verbrennungszeit des Ersatzbrennstoffes bei gleichbleibender Verweilzeit größer ist als die des Regelbrennstoffes. In diesem Fall können die folgenden Auswirkungen auftreten:

- d. Es verbleiben nicht vollständig ausgebrannte Partikel in der Flugasche. Diese können sich auf den Kesselheizflächen ablagern mit den potentiell gleichen Folgen wie die Ablagerung von Flugaschenschmelze. Sie können aber auch bis in die Rauchgasreinigung gelangen, was zu einer Beeinträchtigung der Qualität der Rauchgasreinigungsrückstände führt und möglicherweise deren Entsorgungskosten erhöht.
- e. Es verbleiben nicht vollständig ausgebrannte Partikel in der Schlacke. Auch dieses kann die Schlackequalität soweit beeinträchtigen, dass sich die Entsorgungskosten erhöhen.

Diese Zusammenhänge sind in der Abbildung 41 noch einmal dargestellt. Welche Auswirkungen sich tatsächlich ergeben und inwieweit sie als gravierende Beeinträchtigung angesehen werden, hängt zum großen Teil von den einzelnen Verfahren und Apparatetypen ab, wie im Zusammenhang mit den Anwendungsmöglichkeiten der Charakterisierungsgrößen des Verbrennungsverhaltens im Folgenden diskutiert wird.

6.2 Anwendung der Charakterisierungsgrößen zur Bewertung des Einsatzes fester Abfallbrennstoffe

Zur Vermeidung der im vorigen Kapitel dargestellten Auswirkungen erscheint es sinnvoll, Regelbrennstoff nur dann durch einen Ersatzbrennstoff zu ersetzen, wenn dieser das gleiche oder zumindest ein sehr ähnliches Verbrennungsverhalten aufweist. Dabei macht es keinen Unterschied, ob dieses gleiche Verbrennungsverhalten aufgrund einer ähnlichen stofflichen Zusammensetzung besteht oder durch eine Konfektionierung hergestellt wird, d.h. eine Ersatzbrennstoffmischung hergestellt wird, die ein mit dem Regelbrennstoff vergleichbares Verbrennungsverhalten aufweist. Allerdings wird es nicht immer möglich sein, dass ein vollständig gleiches Verbrennungsverhalten zwischen Regel- und Ersatzbrennstoff vorliegt, sondern es kann nur eine Übereinstimmung in einzelnen Verbrennungscharakteristika erreicht werden. In diesem Fall gilt es anlagenspezifisch abzuwägen, welche Abweichungen im Verbrennungsverhalten mit den sich daraus ergebenden Auswirkungen hingenommen werden können.

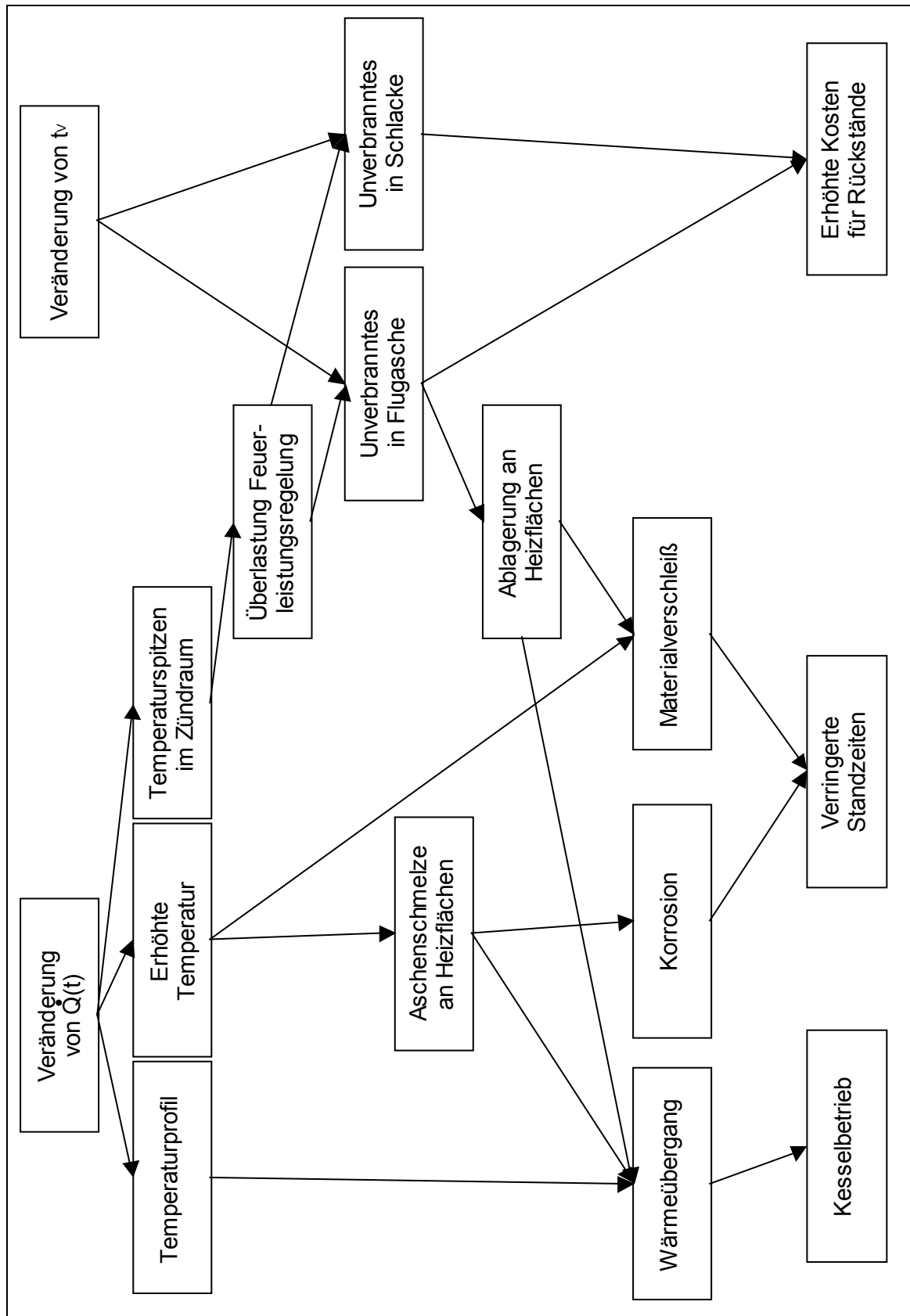


Abbildung 41 Potentielle Auswirkungen beim Einsatz von Brennstoffen mit einem vom Regelbrennstoff abweichenden Verbrennungsverhalten

Wie zuvor schon dargestellt, hängt das Verbrennungsverhalten neben den stoffspezifischen Eigenschaften auch von den Prozessbedingungen ab. Bei den betrachteten Anlagen ist in allen Fällen von einer Verbrennungstemperatur oberhalb von 1100 K auszugehen. Damit findet die Verbrennung wie in der TVA in dem Bereich statt, der durch die Sauerstoffdiffusion bestimmt wird und somit die unterschiedlichen Temperaturen der Anlagen keinen Einfluss auf das Verbrennungsverhalten haben. Da alle Anlagen mit einer überstöchiometrischen Luftzufuhr arbeiten, ist ebenfalls davon auszugehen, dass für den Brennstoff im ausreichenden Überschuss Sauerstoff vorhanden ist, wobei es allerdings zwei mögliche Ausnahmen gibt. Die eine ist die Verbrennung auf dem Rost, auf die unter 6.2.1 noch eingegangen wird. Die andere ist, dass bei einem gegenüber dem Regelbrennstoff stark erhöhten EFW der Sauerstoffbedarf zu Beginn der Verbrennung der flüchtigen Bestandteile nicht ausreichend gedeckt wird, was zu einer Verlängerung der Verbrennungszeit mit den unter 6.1 beschriebenen Auswirkungen führt.

Somit verbleibt als maßgebliche Einflussgröße die von den Apparatetypen abhängende Korngröße, neben den stoffspezifischen Eigenschaften.

Bei den nun im einzelnen diskutierten Anlagenarten werden für die Anwendung der Charakterisierungsgrößen EFW und Verbrennungszeit t_v die prinzipiellen Charakteristika der Verfahren und Apparate herangezogen. Damit kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei einer einzelnen Anlage Modifikationen vorliegen, die zu anderen Schlussfolgerungen führen.

6.2.1 Betriebsoptimierung bei Müllverbrennungsanlagen

Wie bereits erwähnt, stellt sich in einer Müllverbrennungsanlage nicht die Frage, ob ein fester Abfall als Ersatzbrennstoff eingesetzt werden kann, da der Regelbrennstoff eine veränderliche Mischung verschiedener fester Abfälle ist und die in Müllverbrennungsanlagen eingesetzte Rostfeuerung für eine große Bandbreite an unterschiedlichen Festbrennstoffzusammensetzungen ausgelegt ist. Aber auch wenn die möglichst vollständige Verbrennung der eingebrachten Abfälle als Hauptzweck des Verfahrens durch die bei der Rostfeuerung möglichen Regelungsmöglichkeiten für nahezu jeden festen Abfall erreicht werden kann, wird bei den Müllverbrennungsanlagen in der Regel auch eine möglichst optimale Energienutzung angestrebt und somit besteht auch ein Interesse an einem gleichmäßigen Verbrennungsprozess. Ein

gleichmäßiger Verbrennungsprozess mit geringen Belastungsschwankungen bei den Anlagenbauteilen trägt auch zu einem geringeren Verschleiß und damit erhöhten Standzeiten bei.

In der üblichen Praxis erfolgt die Herstellung einer möglichst gleichmäßigen Mischung durch den Greifer im Bunker aufgrund von Erfahrungswerten. Zu einer sinnvollen Anwendung der Charakterisierungsgrößen des Verbrennungsverhaltens kann es hier kommen, wenn eine Abfallcharge angeliefert wird, über die noch keine Erfahrungen im Betrieb vorliegen. Wenn die Bandbreite der Charakterisierungsgrößen der durchschnittlichen Abfallmischung vorliegt, indem sie z.B. auf der Basis einer Sortieranalyse experimentell bestimmt wurden, kann nach einer zusätzlichen Bestimmung der Charakterisierungsgrößen der einzelnen Charge abgeschätzt werden, zu welchem maximalen Anteil die Abfälle der Charge in die Feuerung gegeben werden kann, ohne eine wesentliche Änderung im Verbrennungsprozess zu bewirken. Ein derartiges Vorgehen ist allerdings auf Einzelchargen, deren Zusammensetzung mit einem vertretbaren Aufwand bestimmt werden kann, beschränkt.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ergibt sich, wenn eine Charge eines Abfallbrennstoff nicht vollständig untergemischt werden kann, z.B. aufgrund der Größe der Charge und des inneren Zusammenhalts der Bestandteile. Durch die Bestimmung der Charakterisierungsgrößen im Vergleich mit denen der durchschnittlichen Abfallmischung können schon im Vorfeld der Zugabe Informationen gewonnen werden, wie der Verbrennungsbetrieb anzupassen ist. So lässt sich auf der Basis des EFW die Feuerlage auf dem Rost prognostizieren und entsprechend die Verbrennungsluftverteilung anpassen. Und unter Verwendung der Verbrennungszeit t_v kann eine Anpassung der Rostgeschwindigkeit erfolgen.

Die experimentell ermittelten Charakterisierungsgrößen können dabei aufgrund der vergleichbaren Prozessbedingungen direkt herangezogen werden, mit der Einschränkung, dass aufgrund des Vorliegens der brennenden Abfälle in einer Schüttung auf dem Rost eine ungehinderte Sauerstoffzufuhr nicht immer gewährleistet werden kann und somit Abweichungen im Verbrennungsverhalten möglich sind.

6.2.2 Einsatz in Energetischen Verwertungsanlagen

Auch bei Energetischen Verwertungsanlagen sind von vornherein feste Abfälle als Regelbrennstoff vorgesehen. Da hier der Verfahrenszweck aber nicht in der bloßen Verbrennung der Abfälle liegt, sondern in der Nutzenergiegewinnung, kommt bei einer EnVA einer gleichmäßigen Verbrennungsführung im Vergleich zu einer Müllverbrennungsanlage eine wesentliche größere Bedeutung zu. Damit stellt sich hier durchaus die Frage, ob Abfälle verbrannt werden, deren Verbrennungsverhalten von dem gewünschten stark abweicht.

Nach derzeitigem Stand werden bei Energetischen Verwertungsanlagen Rost- oder Wirbelschichtfeuerungen eingesetzt. Bei einer Rostfeuerung in einer EnVA bestehen die gleichen Anwendungsmöglichkeiten der Charakterisierungsgrößen des Verbrennungsverhaltens wie in einer Müllverbrennungsanlage. Allerdings werden in der Regel EnVA mit homogener zusammengesetzten Abfällen betrieben, weshalb sich hier eher die Notwendigkeit und auch die Möglichkeit ergibt, die Charakterisierungsgrößen der einzelnen Abfallchargen zu bestimmen.

Bei der Wirbelschichtfeuerung handelt es sich ebenfalls um einen Apparatetyp, der geeignet ist, ein breites Spektrum unterschiedlicher Brennstoffe aufzunehmen. Dabei muss zwischen der stationären und der zirkulierenden Wirbelschicht differenziert werden (IGELBÜSCHER, SCHILLING, 2002; ANDERL, 2004).

Die stationäre Wirbelschicht bezieht ihre Toleranz gegenüber Änderungen im Verbrennungsverhalten der eingesetzten Brennstoffe aus der Speicherwirkung des Wirbelsandes, der den Großteil des Wirbelbettes ausmacht. Dieser Effekt gleicht aber nur kurzzeitige Veränderungen aus. Erfolgt die Zugabe eines veränderten Brennstoffes über einen längeren Zeitraum, muss auch hier die Prozessführung verändert werden, wozu die Charakterisierungsgrößen herangezogen werden können. Dabei kann für die veränderte Verbrennungsrate der flüchtigen Bestandteile auf der Basis des EFW die Sekundärluftzugabe angepasst werden. Die Verbrennungszeit gibt Auskunft über die benötigte Verweilzeit im Wirbelbett und damit über die benötigte Primärluftmenge.

In einer zirkulierenden Wirbelschicht ergibt sich aus unterschiedlichen Verbrennungszeiten kein Problem. Unverbrannte Partikel werden bei diesem Apparatetyp im Rauchgas abgeschieden und in die Verbrennung zurückgeführt. Allerdings ist die

zirkulierende Wirbelschicht weniger tolerant gegenüber Temperaturänderungen aufgrund einer veränderten Entwicklung der Verbrennungsleistung. Bei einer Brennstoffänderung kann der EFW herangezogen werden, um die Einstellung der Luftzufuhr anzupassen.

6.2.3 Einsatz in Kohlekraftwerken

Im Gegensatz zu den zuvor diskutierten Anlagenarten sind Kohlekraftwerke für einen Regelbrennstoff ausgelegt. Dieser weist zwar in Abhängigkeit von der Kohlesorte auch gewisse Schwankungen im Verbrennungsverhalten auf, diese Schwankungen sind aber gegenüber denen der meisten festen Abfälle gering, auch wenn diese homogenisiert sind. Um den Verfahrenszweck der Stromgewinnung möglichst effizient zu erfüllen, sind nur geringe Schwankungen im Verbrennungsprozess tolerierbar. Sollen hier feste Abfälle als Brennstoff zum Einsatz kommen, müssen diese so konfektioniert sein, dass nach Möglichkeit ihr Verbrennungsverhalten dem der Kohle entspricht. Wie aber zuvor schon erläutert, wird es eher die Ausnahme bleiben, dass eine Übereinstimmung aller Charakterisierungsgrößen erreicht werden kann. Welcher Brennstoffeigenschaft in diesem Fall die größere Bedeutung zukommt, hängt vom eingesetzten Apparatetyp ab.

Für Anlagengrößen bis zu 500 MW kommen für die Kohleverbrennung Wirbelschichtfeuerungen zum Einsatz. Hier ergeben sich die gleichen Empfindlichkeiten bezüglich eines veränderten Verbrennungsverhaltens und die gleichen Anwendungsmöglichkeiten für die Charakterisierungsgrößen des Verbrennungsverhaltens wie schon zuvor im Zusammenhang mit den Energetischen Verwertungsanlagen geschildert.

Wesentlich bedeutender für die Kohleverbrennung zur Stromgewinnung sind Staubfeuerungen, bei denen staubförmig gemahlene Kohle in einer Brennkammer verbrannt wird. Diese Art der Feuerung zeichnet sich durch die sehr geringe Verweilzeit des Brennstoffs aus. Entsprechend empfindlich reagiert dieser Prozess auf Veränderungen der Verbrennungszeit. Wird einer Staubfeuerung ein Ersatzbrennstoff mit einer erhöhten Verbrennungszeit zugegeben, führt dieses zu unverbrannten Bestandteilen in der Flugasche und/oder der Schlacke mit den unter 6.1 beschriebenen Auswirkungen. Ebenso liegt eine hohe Empfindlichkeit bezüglich der Veränderung der Entwicklung der Verbrennungsleistung bei einem veränderten EFW des Brennstoffes und einer daraus resultierenden Verschiebung des Temperaturprofils vor. Bei einem hoch-optimierten Prozess wie der Stromgewinnung in Staubfeuerung-

gen können bereits leichte Wirkungsgradminderungen als Folge des veränderten Temperaturprofils erhebliche Konsequenzen für die Wirtschaftlichkeit haben. Daneben ist die durch den EFW beschriebene Freisetzung flüchtiger Bestandteile zu Beginn des Verbrennungsprozesses der Brennstoffpartikel auch entscheidend für die Ausbildung einer stabilen Flamme. Im Zusammenhang mit dem Einsatz von festen Abfällen in Kohlestaubfeuerungen ist es damit von entscheidender Bedeutung, den Ersatzbrennstoff so zu konfektionieren, dass sowohl die Verbrennungszeit t_v wie auch der EFW dem des Kohlestaubs angepasst wird.

6.2.4 Einsatz in Zementwerken

Bei dem Einsatz von Ersatzbrennstoffen in den Drehrohren der Zementproduktion entfallen die meisten potentiellen Probleme durch ein verändertes Verbrennungsverhalten schon dadurch, dass in dem Verfahren der Feuerung kein Kessel nachgeschaltet ist, in dem sich bei den anderen Anlagentypen ggf. die Auswirkungen manifestieren. Mit bis zu 2000 °C weist der Zementbrennprozess sehr hohe Temperaturen auf, für die ein Drehrohr ausgelegt ist, weshalb sich keine Probleme aus Temperaturbelastungen erwarten lassen. Allerdings spielt, ähnlich wie bei der Energienutzung in einer Kesselanlage, auch beim Zementbrennprozess das Temperaturprofil eine entscheidende Rolle. Von daher macht es Sinn, den EFW eines potentiellen Ersatzbrennstoffes heranzuziehen, um im Vorfeld des Einsatzes zu beurteilen, ob eine zu starke Temperaturverschiebung in der Anlage zu erwarten ist. Das Zurückbleiben von unverbrannten Bestandteilen im Zementklinker stellt eine potentielle Auswirkung einer erhöhten Verbrennungszeit dar, doch ist auch dieses aufgrund der Verweilzeit im Drehrohr von 30 - 45 Minuten sehr unwahrscheinlich, sofern der Brennstoff nicht in sehr großen Partikeln zugegeben wird. Dieses ist allerdings in der Regel aus fördertechnischen Gründen ausgeschlossen.

In der Konsequenz müssen für den Einsatz fester Abfälle im Zementprozess wesentlich weniger Problemfelder beachtet werden als in den anderen Anlagenarten zur Verbrennung fester Brennstoffe. Diese könnte mit dazu beigetragen haben, dass sich bei der Zementherstellung der Einsatz fester Abfälle als Brennstoff schon früh etablieren konnte.

7. Zusammenfassung

Im Hinblick auf den zu erwartenden zunehmenden Einsatz von Ersatzbrennstoffen aus Abfall in unterschiedlichen Verbrennungsprozessen im Zuge der Umsetzung der TASI ab dem 1.6.2005, kann die Einschätzung, ob ein Ersatzbrennstoff in einer Industrieheizung verwendet werden kann, durch die Kenntnis seines Verbrennungsverhaltens im Vergleich zu einem Regelbrennstoff wesentlich erleichtert werden. Auch bei der konventionellen Müllverbrennung in Rostfeuerungsanlagen helfen Kenntnisse über das Verbrennungsverhalten von festen Abfällen dabei einzuschätzen, wie eine Abfallcharge in den Verbrennungsbetrieb optimal zu integrieren ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Ansatz gefunden, das Verbrennungsverhalten von festen Abfallbrennstoffen zu charakterisieren und Charakterisierungsgrößen zu bestimmen, die im Hinblick auf den Einsatz fester Abfallbrennstoffe in Großfeuerungsanlagen zur Anwendung kommen sollten.

Dazu wurde zunächst die bestehende Technikumsverbrennungsanlage (TVA) hinsichtlich energetischer Fragestellungen im Zusammenhang mit der Verbrennung fester Abfälle weiterentwickelt. Die Methodik der Heizwertbestimmung fester Brennstoffe durch eine Verbrennungsbilanz an der TVA wurde derart weiterentwickelt, dass sie die bessere Alternative zur klassischen Feststoffanalyse ist, die bei der Heizwertbestimmung für heterogene Brennstoffe deutlich präzisere Ergebnisse (Variationskoeffizient $< 3\%$) liefert. Die Methodik erfordert zwar eine anspruchsvolle und zeitaufwändige Versuchsdurchführung, doch unter Berücksichtigung des Analyseaufwandes unter Einbeziehung der Probenahme, ergibt sich gegenüber der klassischen Feststoffanalyse nur ein geringfügiger Mehraufwand.

Die Methodik der Verbrennungsbilanz ließ sich dahingehend weiterentwickeln, dass auch das Verbrennungsverhalten von festen Brennstoffen näher charakterisiert werden kann. Dazu wurden sieben Monofractionen untersucht, die im Prinzip alle in Siedlungsabfällen vorkommenden brennbaren Fraktionen repräsentieren.

Die semi-kontinuierlichen Verbrennungsversuche unter gleichen Prozessbedingungen ermöglichen auf der Basis der messtechnisch erfassten Energieoutputströme die Bestimmung charakteristischer Energiefreisetzungscurven, aus denen der Energiefreisetzungswert (EFW) als dimensionslose Kennzahl hergeleitet wurde und der eine direkte qualitative Vergleichbarkeit ermöglicht. Der EFW ist ein Maß für die Masse der flüchtigen Bestandteile, die in der Anfangsphase des

der flüchtigen Bestandteile, die in der Anfangsphase des Verbrennungsprozesses verbrannt wird, und damit für die Verbrennungsrate der flüchtigen Bestandteile und der Höhe der freigesetzten Energie zu Beginn der Verbrennung. Auf der Basis der EFW ließen sich die untersuchten Fraktionen in drei Festbrennstoffgruppen, die als langsam Verbrennende, schnell Verbrennende und schnellst Verbrennende bezeichnet wurden, einteilen.

Als zweite Charakterisierungsgröße für das Verbrennungsverhalten neben dem EFW ergibt sich die Zeit t_v , die eine Brennstoffcharge bei dem Versuchsaufbau benötigt, um vollständig zu verbrennen. Diese Größe ist ein Maß für die stoffspezifische Abbranddauer.

Bei beiden Charakterisierungsgrößen konnte gezeigt werden, dass keine Korrelation mit dem Heizwert besteht, was bestätigt, dass der Heizwert alleine für die Beschreibung des Verbrennungsverhaltens eines Festbrennstoffs nicht ausreichend ist. Ebenso wenig ist bei den untersuchten Fraktionen, die alle über einen hohen Gehalt an flüchtigen Bestandteilen verfügen, ein Einfluss des Aschegehaltes auf die anfängliche Verbrennung der flüchtigen Bestandteile vorhanden.

Die Versuche mit aus den Monofractionen zusammengesetzten Mischfraktionen ergaben, dass sich die betrachteten Größen zur Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens für Festbrennstoff-Mischungen nicht vollständig auf der Grundlage der stofflichen Zusammensetzung und dem Verbrennungsverhalten der Einzelfractionen bestimmen lassen. Während sich die Zeit t_v für die vollständige Verbrennung einer Charge anteilig aus den Werten der Mischungsbestandteile berechnen lässt, ist dies für den EFW nicht möglich. Durch die gemeinsame Verbrennung von Festbrennstoffen verschiebt sich im Hinblick auf das Verhalten der Monofractionen der zeitliche Ablauf der Verbrennung der flüchtigen Bestandteile, wobei diese zeitliche Verschiebung ohne Versuche derzeit nicht exakt bestimmt werden kann. Was sich allerdings aus der stofflichen Zusammensetzung bestimmen lässt, ist die insgesamt während des ersten Verbrennungsintervalls freigesetzte Energie.

Im Hinblick auf weitere Einflussgrößen zur Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens von Festbrennstoffen ist die Untersuchung des Einflusses der Parameter Korngröße und Wassergehalt auf die Charakterisierungsgrößen von Interesse. Auch bleibt noch zu klären, ob das genaue Zeitverhalten der Verbrennung der flüchtigen Bestandteile von Festbrennstoffmischungen aus dem Verhalten der Einzelfractionen

berechnet werden kann und somit das Verbrennungsverhalten einer Festbrennstoffmischung bereits auf der Basis einer Sortieranalyse bestimmbar ist.

Für die Anwendung im Betrieb von Großfeuerungsanlagen sind die in dieser Arbeit hergeleiteten Charakterisierungsgrößen für das Verbrennungsverhalten auf der Basis der theoretischen Betrachtungen zu den Verbrennungsanlagentypen als stoffspezifische, qualitative Vergleichsgrößen bereits geeignet. Es werden in Abhängigkeit von der Anlagenart Anwendungsvorschläge für die Charakterisierungsgrößen unterbreitet. Eine Verifikation anhand von Betriebsdaten einer Großfeuerungsanlage ist der nächste, noch ausstehende Schritt.

8. Literatur

- Anderl, H.: Thermische Verwertung von Ersatzbrennstoffen in der Wirbelschicht 110 MW Reststoffverwertungsanlage RV-Lenzing; in Faulstich, M., Bilitewski, B., Urban, A. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung 9, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik, Universität Kassel; Kassel, 2004, S. 15-40
- Arge Altauto: Altreifenentsorgung in Deutschland; Information im Internet, www.arge-altauto.de; 2001
- ASA - Arbeitsgemeinschaft Stoffstromspezifische Abfallbehandlung: MBA Steckbriefe; Minden, 2002, 122 S.
- Bilitewski, B., Härdtle, G., Marek, K.: Abfallwirtschaft; Berlin, 1994, 635 S.
- Billigmann, F.-R.: Praxisgerechte Anforderungen an die Verwertung von Holzabfällen; BDE – Kreislaufwirtschaft in der Praxis Nr. 9; Köln, 2000, 43 S.
- Borghardt, R.: Ermittlung von stoff- und verfahrensbezogenen Brennstoffcharakteristika in Wirbelschichtfeuerungen als Eingangsparameter für ein Simulationsmodell; Dissertation Universität Magdeburg; Magdeburg, 1996, 131 S.
- Brunner, P. et. al.: The MSW Incinerator as a Monitoring Tool in Waste Management, in ISWA 97 Session Proceedings (Hrsg.): ISWA New Zealand, Vol. 2, 1997, S. 300-306
- Buekens, A.: Die Co-Verbrennung von Abfällen in der Zementindustrie und deren Einfluss auf die flüchtigen Schwermetalle und Dioxine im Rauchgas; in Bilitewski, B., Faulstich, M., Urban, A. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung 4, Schriftenreihe des Institutes für Abfallwirtschaft und Altlasten; Dresden, 1999, S. 211-222
- Ciagwa, J., Matwiejew, A., Urbanska, S.: Physikalisch-chemische Kohleeigenschaften (pol.); Energopomiar; Gliwice, 1980
- DIN 51718: Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes und der Analysenfeuchtigkeit; Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.); Berlin, 1995, 3 S.
- DIN 51719: Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes; Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.); Berlin, 1978, 4 S.
- DIN 51720: Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Gehaltes an Flüchtigen Bestandteilen; Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.); Berlin, 2000, 7 S.
- DIN 51721: Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Gehaltes an Kohlenstoff und Wasserstoff; Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.); Berlin, 2001, 7 S.

-
- DIN 51722: Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Stickstoffgehaltes; Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.); Berlin, 1990, 3 S.
- DIN 51724: Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Schwefelgehaltes; Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.); Berlin, 1999, 13 S.
- DIN 51729: Prüfung fester Brennstoffe – Aschezusammensetzung; Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.); Berlin, 28 S.
- DIN 51730: Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Asche-Schmelzverhaltens; Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.); Berlin, 1984, 6 S.
- DIN 51900: Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe – Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes; Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.); Berlin, 1989, 23 S.
- DKR: Verwertungswege 2000; Information im Internet, www.dkr.de; 2001
- Dohmann, J., Starke, C.: Ermittlung der Feuerleistung von Müllverbrennungsanlagen; in Müll und Abfall Nr. 9, 2000, S. 528-531
- Esch, B., Loll, U.: Aktuelle Klärschlammengen und ihre Entsorgung in Deutschland und Europa; Vortrag auf den Würzburger Klärschlammtagen; Würzburg, 2001, 11 S.
- EUWID: „Herhof: Gesamte Produktion von Trockenstabilat wird abgesetzt“; in EUWID Nr. 15, 2002
- Field, M.: Rate of Combustion of size graded fraction of char from a low-rank coal between 1200 K and 2000 K; in Combustion and Flame Nr. 13, 1969, S. 237-252
- Flamme, S.: Energetische Verwertung von Sekundärbrennstoffen in industriellen Anlagen – Ableitung von Maßnahmen zur umweltverträglichen Verwertung; Dissertation Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal; Wuppertal, 2002, 183 S.
- Forkert, J., Kappa, S., Mielke, F.: Betriebserfahrungen bei der thermischen Verwertung von Sekundärbrennstoffen im Braunkohlekraftwerk; in Faulstich, M., Bilitewski, B., Urban, A. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung 9, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik, Universität Kassel; Kassel, 2004, S. 41-50
- Friedel, M.: Konsequenzen für die thermische Restabfallbehandlung verursacht durch die TASI und das KrW-/AbfG; Dissertation Universität Kassel; Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik, Universität Kassel; Kassel, 2001, 181 S.

- Friedrich, H., Both, G., Alwast, H., Köpp, M.: Energetische Verwertung von Industrie- und Gewerbeabfällen in Zementwerken und Kraftwerken von Nordrhein-Westfalen; in Bilitewski, B., Faulstich, M., Urban, A. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung 7, Schriftenreihe des Institutes für Abfallwirtschaft und Altlasten; Dresden, 2002, S. 7-26
- Grundmann, J.: Energetische Verwertungsanlagen zur Versorgung von Produktionsprozessen; in Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 2; Neuruppin, 2002, S. 109-116
- Härdtle, G.: Ersatzbrennstoffe 1 – Herstellung, Lagerung und Verwertung, Neuruppin, 2001, 275 S.
- Hartmann, H., Böhm, T., Maier, L.: Umweltrelevante Eigenschaften naturbelassener biogener Festbrennstoffe sowie Möglichkeiten zu deren Beeinflussung; Endbericht der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik; Freising, 1999, 155 S.
- Herhof: Referenzliste der Herhof-Umwelttechnik-GmbH, Information im Internet, www.herhof.de, 2002.
- Hoffmeister, J., Alwast, H.: Akteure, Stoffströme und Märkte – Die Entsorgungssituation ab 2005; in Wiemer, K., Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Restabfallbehandlung VIII; Witzenhausen, 2004, S. 34-56
- Huwiler, G.: Mitverbrennung im Zementwerk; in GVC, Dechema (Hrsg.): The Future of Waste Management in Europe; Düsseldorf, 2002, S. 80-84
- Igelbüscher, A., Schilling, J.: Möglichkeiten der Co-Verbrennung in der stationären Wirbelschicht; in Bilitewski, B., Faulstich, M., Urban, A. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung 7, Schriftenreihe des Institutes für Abfallwirtschaft und Altlasten; Dresden, 2002, S.175-185
- ISO 5074: Prüfung fester Brennstoffe – Hardgrove - Index; Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.); Berlin, 7 S.
- Janz, J.: Kunststoffverwertung im Hochofen; in Urban, A., Bilitewski, B., Faulstich, M. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung 5, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik, Universität Kassel; Kassel, 2000, S. 187-203
- Jung, G.: Bericht der LAGA zum Stand der Umsetzung der Restabfallbehandlung 2005; in Wiemer, K., Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Restabfallbehandlung VIII; Witzenhausen, 2004, S. 28-33
- Kessel, L. van, Arendsen, A., Brem, G.: On-line determination of the calorific value of solid fuels; in Fuel Nr. 1, 2004, S. 59-71

-
- Klein, J.: Untersuchungen zur Abspaltung von Wasserdampf, CO, CO₂, N₂ und H₂ bei der nicht isothermischen Steinkohlenpyrolyse unter inerter und oxidierter Atmosphäre; Dissertation RWTH Aachen; Aachen, 1971
- Kock, O.: Regenerative Festbrennstoffe – Notwendigkeit und Möglichkeit der Charakterisierung des Brennverhaltens; in Chemie Ingenieur Technik Nr. 10, 2002, S. 1380-1388
- Kost, T.: Brennstofftechnische Charakterisierung von Abfällen; Dissertation Technische Universität Dresden, Schriftenreihe des Institutes für Abfallwirtschaft und Altlasten; Dresden, 2001, 135 S.
- Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen, BGBl. I, 27.9.1994, S. 2705
- Krumm, W., Hamel, S., Mertens, C.: Synthesegaserzeugung aus Trockenstabilat mit dem IPV-Verfahren; in Wiemer, K., Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Restabfallbehandlung VI; Witzhausen, 2002, S. 232-240
- Kuyumcu H., Ochsenreiter, C., Zwisele, B.: Entwicklung eines Probennahmeverfahrens für die Beurteilung von Ersatzbrennstoffen; in Thome-Kozmiensky, K. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 2; Neuruppin, 2002, S. 435-464
- Lindner, C., Feldmann, H.: Kunststoffabfälle – Ist-Situation und Ausblick bei Produktion und Entsorgung;; in Faulstich, M., Urban, A., Bilitewski, B. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung 6, Berichte aus Wassergüte und Wasserwirtschaft, Technische Universität München; München, 2001, S. 157-168
- Marutzky, R., Seeger, K.: Energie aus Holz und Biomasse; Leinfelden-Echterdingen, 1999, 352 S.
- Morf, L.; Brunner, P.: Die Müllverbrennung als Analyseinstrument zur Bestimmung der Abfallzusammensetzung; in Müll und Abfall Nr. 5, 1999, S. 307-314
- Nottrodt, A., Wandschneider, J., Gutjahr, M., Chibiorz, J.: Tiermehl – Entsorgung und Nutzung in thermischen Anlagen; in Faulstich, M., Urban, A., Bilitewski, B. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung 6, Berichte aus Wassergüte und Wasserwirtschaft, Technische Universität München; München, 2001, S. 207-264
- Obermeier, M. (2000): Betriebserfahrungen des SVZ Schwarze Pumpe; in Urban, A., Bilitewski, B., Faulstich, M. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung 5, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik, Universität Kassel; Kassel, 2000, S. 159-161 + Beilage

- Oerter, M. (2000): Anforderungen an geeignete Sekundärbrennstoffe für die Zementindustrie; in Urban, A., Bilitewski, B., Faulstich, M. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung 5, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik, Universität Kassel; Kassel, 2000, S. 265-272
- Paul, S., Kruse, I.: Mitverbrennung von Substitutbrennstoffen und Tiermehl in Kohlekraftwerken; in VGB Power Tech Nr. 9, 2002, S. 36-42
- Peters, B., Krebs, L., Schröder, E., Frey, H.: Modellierung der Festbettverbrennung; in Nachrichten – Forschungszentrum Karlsruhe Nr. 3, 2000, S. 139-147
- Pfaff, D.: Spuckstoffe aus der Papierindustrie - Mengen und Entsorgungsmöglichkeiten; in Faulstich, M., Urban, A., Bilitewski, B. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung 6, Berichte aus Wassergüte und Wasserwirtschaft, Technische Universität München; München, 2001, S. 141-156
- Reimann, D.: Zeitgemäße Restabfallverbrennung, Stand der Technik - Möglichkeiten - Grenzen; Schriftenreihe Umweltschutz; Bamberg, 1994
- Reinmann, D., Born, M.: Energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen in Müllverbrennungsanlagen; in SIDAF (Hrsg.): Abfallkolloquium 2000 – Wege und Kosten der Abfallbehandlung unter Berücksichtigung neuer Rechtsnormen; Freiberg, 2000, S. 250-265
- Reimann, D.: Schadstofffrachten von Restabfällen am Beispiel des MHKW Bamberg; in Bilitewski, B., Faulstich, M., Urban, A. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung 7, Schriftenreihe des Institutes für Abfallwirtschaft und Altlasten; Dresden, 2002, 9 S.
- Reuther, D., Schmid, K., Steigner, T., Zerkowski, J. et. al.: Betriebserfahrung mit Importkohlen und ihre labortechnische Bewertung; in VGB Kraftwerkstechnik Nr. 9, 1995, S. 795-801
- Richter, W.: Stand der Entwicklung mathematischer Flammen und Feuerraummodelle und Möglichkeiten ihrer Anwendung in der Feuerungspraxis; VDI-Berichte Nr. 346; Düsseldorf, 1979
- Rotter, S.: Schwermetalle im Hausabfall – Potenzial, Verteilung und Steuerungsmöglichkeiten durch Aufbereitung; Dissertation Technische Universität Dresden, Schriftenreihe des Institutes für Abfallwirtschaft und Altlasten; Dresden, 2002, 135 S.
- Rotter, S., Kost, T., Bilitewski, B., Seeger, H., Kock, O., Urban, A.: Abfallanalysen – Anwendung, Probleme und neue Wege für die Praxis; in Müll und Abfall Nr. 9, 2003, S. 438-454

-
- Schnurer, H.: Aktuelles Abfallrecht; in Faulstich, M., Bilitewski, B., Urban, A. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung 9, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik, Universität Kassel; Kassel, 2004, S. 9-14
- Scholz, R., Schulenburg, F., Beckmann, M.: Vergleich und Bewertung von Verfahren und Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung; in Umweltpraxis, Abwasser, Abfall, Management Nr. 5 u. 6, 2001, S. 20-24 u. 20-25
- Schulz, W.: Einsatz von Sekundärbrennstoffen in Steinkohlekraftwerken; in Gallenkemper, B., Bidlingmaier, W., Doedens, H., Stegmann, R. (Hrsg.): 8. Münsteraner Abfallwirtschaftstage; Münster, 2003, 7 S.
- Scur, P.: Potenziale und Grenzen des Einsatzes von Ersatzbrennstoffen in der Zementindustrie; in Wiemer, K., Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Restabfallbehandlung III; Witzenhausen, 1999, S. 691-707
- Seeger, H., Urban, A.: Qualitätssicherung für Ersatzbrennstoffe durch Verbrennungsversuche; in Urban, A., Bilitewski, B., Faulstich, M. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung 5, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik, Universität Kassel; Kassel, 2000, S. 301-308
- Seeger, H., Urban, A.: Stand der Erzeugung und Verwertung von Ersatzbrennstoffen; Studie für das Forum für kommunalpolitische Bildung; Münster, 2002, 16 S.
- Steier, K.: Maßnahmen in Kohlekraftwerken zur Mitverbrennung von Klärschlamm; in Faulstich, M., Urban, A., Bilitewski, B. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung 6, Berichte aus Wassergüte und Wasserwirtschaft, Technische Universität München; München, 2001, S.275-300
- Strauß, K.: Kraftwerkstechnik; Berlin, 1998, 494 S.
- Terbeck, G.: Konzept zum Einsatz von Brennstoffen aus der Restmüllaufbereitung in einer zirkulierenden Wirbelschichtanlage; in Urban, A., Bilitewski, B., Faulstich, M. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung 5, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik, Universität Kassel; Kassel, 2000, S. 215-224
- Thomanetz, E.: Das Märchen von der repräsentativen Abfallprobe; in Müll und Abfall Nr. 3, 2002, S. 136-141
- Thome-Kozmiensky, K. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 2, Neuruppin, 2002, 515 S.
- Tillmann, K. P.: Verwertung von Trockenstabilat im Kraftwerk – Rechtliche Anforderungen, Qualitätssicherung und Betriebserfahrungen; in Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 2; Neuruppin, 2002, S.195-208

- Tu, C., Davis, H., Hottel, H.: Combustion Rate of Carbon ; in Industrial and Engineering Chemistry Nr. 26, 1934, S. 749-757
- Umweltbundesamt: Ökobilanz für Altölverwertungsverfahren fertiggestellt; Information im Internet, www.umweltbundesamt.de; 2000
- Urban, A., Friedel, M.: Kapazitäten thermischer Verfahren und Behandlungsanlagen; in Urban, A., Bilitewski, B., Faulstich, M. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung 2, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik, Universität Kassel; Kassel, 1997, S. 107-156
- VDI 3460: Emissionsminderung - Thermische Abfallbehandlung; Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN (Hrsg.); Düsseldorf, 2002, 138 S.
- Walter, M., Kremer, H.: Anwendung der Infrarotthermographie zur Ermittlung der Temperaturverteilungen von Verbrennungsgut auf Rostfeuerungen in Müllverbrennungsanlagen; in VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Verbrennung und Feuerungen, 17. Deutscher Flammentag; Düsseldorf, 1995
- Walter M., Schäfers, Schumacher: Optimierte Feuerleistungsregelung in Abfallverbrennungsanlagen durch den Einsatz von Fuzzy Control und bildverarbeitenden Methoden; in GVC, Dechema (Hrsg.): Arbeitssitzung der Fachausschüsse Abfallbehandlung und Hochtemperaturtechnik; Hamburg, 1999, S. 437-444
- Wengenroth, K.: Möglichkeiten und Grenzen der Aufbereitung am Beispiel des Herhof-Trockenstabilat; in Wiemer, K., Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Restabfallbehandlung VI; Witzhausen, 2002, S. 327-339
- Zehner, P.: Characterisation of Power Plant Coals; in VGB PowerTech Nr. 9, 2002, S. 36-43
- Zeiler, D., Wengenroth, K.: Zukünftige Konzepte des Trockenstabilat-Verfahrens; in SIDAF (Hrsg.): Aktuelle Situation und Perspektiven der Abfallwirtschaft; Freiberg, 2002
- Zelkowski, J.: Analyse der Staubkohlen-Flamme; in Chemie Ingenieur Technik Nr. 9, 1976
- Zelkowski, J.: Kohleverbrennung; VGB Fachbuchreihe Kraftwerkstechnik; Essen, 1986, 431 S.
- Zelkowski, J., Avramidis, J., Remke, S., Özdemir, M., Woyciechowski, W.: Kohlecharakterisierung im Hinblick auf die Verbrennung, Mahlbarkeit, Zündwilligkeit, Reaktivität, Verschlackung; in Kohlenstaub-Aufbereitung: ein Beitrag zur NO_x-Minderung, 8. DVV-Kolloquium; Essen, 1992, 48 S.

Anhang

A1 Heizwertberechnung aus der Energiebilanz der TVA	A2
A2 Fehlerbetrachtung für die Heizwertbestimmung an der TVA am Beispiel eines Verbrennungsversuches	A4
A3 Untersuchte Abfallfraktionen	A9
A4 Berechnung des Heizwertes und des Anteiles der flüchtigen Bestandteile für die untersuchten Abfallfraktionen	A13
A5 Untersuchungen von Monofraktionen fester Abfallstoffe	A15
A6 Untersuchungen von Abfallgemischen	A31
A7 Charakterisierende Größen der untersuchten Brennstoffe	A42

A1 Heizwertberechnung aus der Energiebilanz der TVA

Der Heizwert berechnet sich auf der Basis der Energiebilanz eines 31/2-stündigen Verbrennungsversuches an der TVA. Der Bilanzraum ist in der folgenden Abbildung A1 dargestellt.

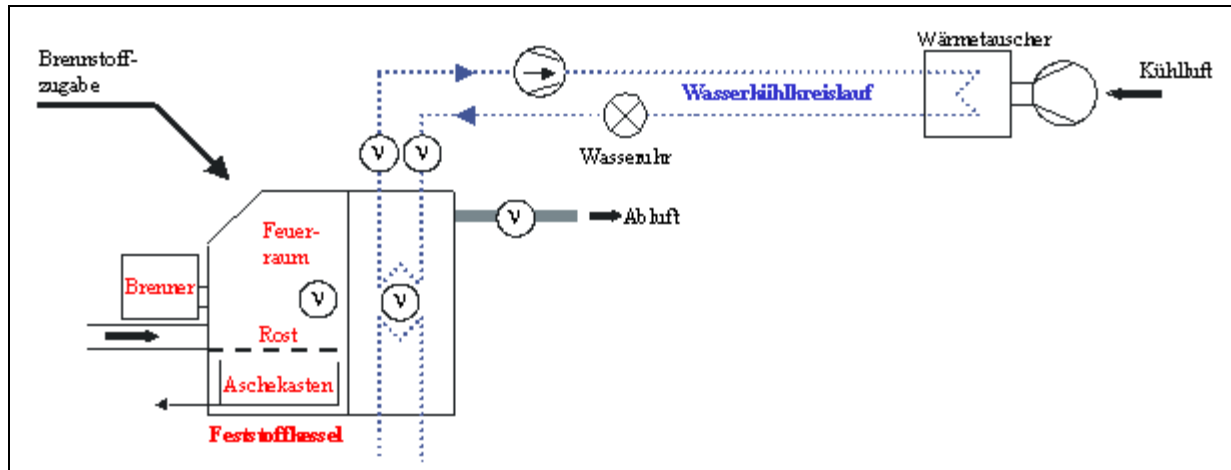


Abbildung A1 Bilanzraum für die Heizwertbestimmung an der TVA

Die Energiebilanz lautet

$$Q_{\text{Festbrennstoff}} + Q_{\text{Heizöl}} + Q_{\text{Primärluft}} = Q_{\text{Kühlwasser}} + Q_{\text{Rauchgas}} + Q_{\text{Asche}} + Q_{\text{Wärmeverluste}} + Q_{\text{Restwärme}}$$

mit

$$Q_{\text{Heizöl}} = m_{\text{Heizöl}} \cdot (H_{\text{u, Heizöl}} + c_{p, \text{Heizöl}} \cdot T_{\text{Vorwärm}})$$

$$Q_{\text{Primärluft}} = \sum (\dot{V}_{\text{Luft}} \cdot T_{\text{Luft}}) \cdot c_{p, \text{Luft}}$$

$$Q_{\text{Kühlwasser}} = \sum \Delta T_{\text{Kw}} \cdot \dot{V}_{\text{Kw}} \cdot \rho_{\text{Kw}} \cdot c_{p, \text{Kw}}$$

$$Q_{\text{Rauchgas}} = \sum (\dot{V}_{\text{Rg}} \cdot T_{\text{Rg}}) \cdot c_{p, \text{Rg}}$$

$$Q_{\text{Asche}} = m_{\text{Asche}} \cdot (H_{\text{u, Asche}} + c_{p, \text{Asche}} \cdot T_{\text{Asche}})$$

$$Q_{\text{Wärmeverluste}} = \sum [3,2943 \cdot (T_{\text{Rg}} - 100)^{1,4541}] \quad (\text{empirische Beziehung für die TVA nach KOST})$$

$$Q_{\text{Restwärme}} = (T_{\text{Kw, Versuchsende}} - T_{\text{Kw, Versuchsanfang}}) \cdot m_{\text{Kw}} \cdot c_{p, \text{Kw}}$$

Die in den Gleichungen enthaltenen Mess- und Rechengrößen werden in den beiden folgenden Tabellen erläutert. Der Wärmeverlust durch CO im Rauchgas wird wegen seines geringen Betrages vernachlässigt, geht aber in die Fehlerbetrachtung ein.

Der gesuchte Heizwert des Festbrennstoffes ergibt sich zu

$$H_{\text{u, Brennstoff}} = \frac{Q_{\text{Kühlwasser}} + Q_{\text{Rauchgas}} + Q_{\text{Asche}} + Q_{\text{Wärmeverluste}} + Q_{\text{Restwärme}} - Q_{\text{Heizöl}} - Q_{\text{Primärluft}}}{m_{\text{Festbrennstoff}}}$$

Tabelle A1: Messgrößen für die Heizwertbestimmung an der TVA

Messgröße	Erläuterung
$m_{\text{Festbrennstoff}}$	Ausgewogene Masse des verbrannten Festbrennstoffes
$m_{\text{Heizöl}}$	Ausgewogene Masse des verbrannten Heizöls
\dot{V}_{Luft}	Bestimmung durch einen Schwebekörperdurchflussmesser
T_{Kw}	Temperaturmessungen im Vorlauf und Rücklauf des Kühlwasserkreislaufes; ΔT_{Kw} ist die Differenz der beiden Messstellen; für $T_{\text{Kw,Versuchsende}}$ und $T_{\text{Kw,Versuchsanfang}}$ wird der Mittelwert beider Messstellen gebildet
\dot{V}_{Rg}	Bestimmung durch eine Differenzdruckdüse
T_{Rg}	Temperaturmessung am Kesselaustritt
m_{Asche}	Ausgewogene Masse nach Ende der Verbrennung
Hu_{Asche}	Bestimmung aus dem Glühverlust (GV) nach der Näherung nach SHIN (FRIEDEL, 2001); $Hu_{\text{Asche}} [\text{MJ/kg}] = 0,523 \cdot \text{GV}[\%]^{0,77}$
T_{Asche}	Wird gleich der gemessenen Temperatur im Feuerraum zu Versuchsende gesetzt

Tabelle A2: Rechengrößen für die Heizwertbestimmung an der TVA

Rechengröße	Erläuterung
$Hu_{\text{Heizöl}}$	43.150 kJ/kg
$cp_{\text{Heizöl}}$	1,88 kJ/(kg*K)
$T_{\text{Vorwärm}}$	Heizöl wird auf 45 °C vorgewärmt
T_{Luft}	20 °C mittlere Hallentemperatur
cp_{Luft}	1,29 kJ/(m _N ³ *K)
\dot{V}_{Kw}	11 l/min
ρ_{Kw}	in Abhängigkeit von der mittleren T_{Kw}
cp_{Kw}	in Abhängigkeit von der mittleren T_{Kw}
cp_{Rg}	in Abhängigkeit von der mittleren T_{Rg} und der Rauchgaszusammensetzung; die Rauchgaszusammensetzung wird auf der Basis einer angenommenen Elementarzusammensetzung des Brennstoffes berechnet
cp_{Asche}	1,00 kJ/(kg*K)

A2 Fehlerbetrachtung für die Heizwertbestimmung an der TVA am Beispiel eines Verbrennungsversuches

Die Fehlerbetrachtung für die Bestimmung der Energiebilanz der TVA, die dem Bilanzierungsverfahren zur Heizwertbestimmung zugrunde liegt, wurde von FRIEDEL (2001) entwickelt und konnte für diese Arbeit im wesentlichen unverändert übernommen werden. In Bezug auf einige Messgrößen, erfolgte durch die unter 4.3.2 beschriebenen Maßnahmen eine Verbesserung der Messgenauigkeit. Zusätzlich ergänzt werden musste der Inputenergieterm „Ölstützfeuer“.

Als Beispiel für die Darstellung wurde der Verbrennungsversuch PET 1 ausgewählt, da dessen Werte für die Energieströme den Mittelwerten über alle Versuche am nächsten liegen.

Fehlerbetrachtung Input:

Brennstoff

Parameter	Meß-/Berechnungswert	Meßgenauigkeit
Meß-/Stoffgröße		
Masse [kg]	7,2	0,001
Heizwert [kJ/kg]	19.486	195
spez. Wärme [kJ/kg*K]	1,5	0,2
Temperatur u [°C]	20	1
Partielle Ableitungen		
dQ/dm [kJ/kg]	19.515,80	
dQ/dHu [kg]	7,2	
dQ/dcp [kg*K]	144	
dQ/du [kJ/K]	10,80	
Energiemenge und Fehler		
Energiemenge [kJ]	140.514	
absoluter Fehler [kJ]	1.403	
relativer Fehler	1,00%	

Ölstützfeuer

Parameter	Meß-/Berechnungswert	Meßgenauigkeit
Meß-/Stoffgröße		
Masse [kg]	8,68	0,1
Heizwert [kJ/kg]	43.150	431,5
spez. Wärme [kJ/kg*K]	1,88	0
Temperatur u [°C]	45	0,001
Partielle Ableitungen		
dQ/dm [kJ/kg]	43.234,60	
dQ/dHu [kg]	8,68	
dQ/dcp [kg*K]	390,6	
dQ/du [kJ/K]	16,32	
Energiemenge und Fehler		
Energiemenge [kJ]	375.276	
absoluter Fehler [kJ]	5.720	
relativer Fehler	1,52%	

Verbrennungsluft

Parameter	Meß-/Berechnungswert	Meßgenauigkeit
Meß-/Stoffgröße		
Volumenstrom [Nm ³ /h]	256,8	5
spez. Wärme [kJ/Nm ³ *K]	1,29	0,01
Temperatur u [°C]	20	1
Versuchsdauer [min]	215	
Partielle Ableitungen		
dQ/dV [kJ*s/Nm ³]	92,45	
dQ/dcp [Nm ³ *K]	18.402,76	
dQ/du [kJ/K]	1186,98	
Energiemenge und Fehler		
Energiemenge [kJ]	11.100	
absoluter Fehler [kJ]	1.287	
relativer Fehler	11,60%	

Fehlerbetrachtung Output:

Wasserkühlkreislauf

Parameter	Meß-/Berechnungswert	Meßgenauigkeit
Meß-/Stoffgröße		
Wasservolumenstrom [l/min]	11,00	0,40
Wasserdichte [kg/m ³]	978	10,00
Wassermassenstrom [kg/s]	0,18	0,008
spez. Wärme [kJ/kg*K]	4,19	0,02
mittl. Temperaturdifferenz Δu	33,45	0,002
Intervalllänge [s]	30	
Versuchsdauer [min]	215	
Partielle Ableitungen		
Summe der Temp.differenzen	14.383,50	
dQ/dm [kJ*s/kg]	1.808.005,95	
dQ/dcp [kg*K]	77.350,65	
dQ/du [kJ/K]	9.689,07	
Energiemenge und Fehler		
Energiemenge [kJ]	324.099	
absoluter Fehler [kJ]	14.547	
relativer Fehler	4,49%	

Asche

Parameter	Meß-/Berechnungswert	Meßgenauigkeit
Meß-/Stoffgröße		
Masse [kg]	0,60	0,001
Glühverlust [%]	88,9	5
Heizwert Asche[kJ/kg]	16.563,65	159,02
spez. Wärme [kJ/kg*K]	1,00	0,01
Temperatur u [°C]	687,86	5
Partielle Ableitungen		
dQ/dm [kJ/kg]	17.251,51	
dQ/dHu [kg]	0,60	
dQ/dcp [kg*K]	409,35	
dQ/du [kJ/K]	0,60	
Energiemenge und Fehler		
Energiemenge [kJ]	10.266	
absoluter Fehler [kJ]	96	
relativer Fehler	0,94%	

Beim Abgasverlust wurde nach Vorversuchen auf die CO-Messung verzichtet, da der dafür notwendige Aufwand für die Messung und die Auswertung der Daten in keinem Verhältnis zu dem Einfluss dieses Parameters auf die Gesamtbilanz stand. Statt dessen wurde auf der Basis der vorgenommenen Messungen ein konstanter Energiebetrag als Fehler festgelegt.

Abgasverlust

Parameter	Meß-/Berechnungswert	Meßgenauigkeit
Meß-/Stoffgröße		
Temperatur an V-Messung [°C]	105,54	1
Druckdifferenz an V-Messung [Pa]	43,68	4,37
mittl. Abgasvolumenstrom [Nm ³ /h]	83,86	4,19
spez. Wärme Abgas [kJ/Nm ³ *K]	1,47	0,02
mittl. Abgastemperatur [°C]	334,56	1
Intervalllänge [s]	30	
Versuchsdauer [min]	215	
Partielle Ableitungen		
Summe der Abgastemperatur [°C]	143.859,31	
dQ/dVrg [kJ*s/Nm ³]	6.362.793,16	
dQ/dcp [mN ³ *K]	100.531,58	
dQ/du [kJ/K]	443,02	
Energiemenge und Fehler		
Energiemenge "fühlbare Wärme" [kJ]	149.779	
absoluter Fehler [kJ]	7.691	
relativer Fehler	5,14%	
Energiemenge "CO" [kJ]		
absoluter Fehler [kJ]	6.860	
Energiemenge gesamt [kJ]	149.779	
absoluter Fehler [kJ]	14.552	
relativer Fehler	9,72%	

Wärmeverluste durch Strahlung und Konvektion

Parameter	Meß-/Berechnungswert	Meßgenauigkeit
Meß-/Stoffgröße		
Wärmestrom [kW]	2,59	0,26
Versuchsdauer [min]	215	
Energiemenge und Fehler		
Energiemenge [kJ]	33.544	
absoluter Fehler [kJ]	3347	
relativer Fehler	9,98%	

Für die Restwärme wurde ein relativer Fehler von 5 % abgeschätzt, aus denen sich der absolute Fehler für diesen Term errechnet.

Restwärme

Parameter	Meß-/Berechnungswert
Energiemenge [kJ]	9.202
absoluter Fehler [kJ]	460
relativer Fehler	5,00%

Zusammenfassende Bewertung:

Energieterm	Energiemenge [kJ]	Absolutfehler [kJ]	Relativfehler	Relativer Fehler*
Inputenergien:				
Brennstoff	140.514	1.403	1,00%	0,27%
Ölstützfeuer	375.276	5.720	1,52%	1,09%
Verbrennungsluft	11.100	1.287	11,60%	0,24%
<i>Summe Q_{zugeführt}</i>	<i>526.890</i>	<i>6.029</i>	<i>1,14%</i>	
Outputenergien:				
Kühlwasser	324.099	14.547	4,49%	2,76%
Abgas	149.779	14.552	9,72%	2,76%
Asche	10.266	96	0,94%	0,02%
Wärmeverluste	33.544	3.347	9,98%	0,64%
Restwärme	9.202	460	5,00%	0,09%
<i>Summe Q_{abgeführt}</i>	<i>526.890</i>	<i>20.851</i>	<i>3,96%</i>	
Gesamtfehler			4,12%	

Der Gesamtfehler von 4,12% ist von seiner Größenordnung exemplarisch für die durchgeführten Versuche. Die Spannweite der Gesamtfehler reicht von 4,07% bis 4,37%.

A3 Untersuchte Abfallfraktionen



Abbildung A2 Mit Ruß und Silikon gefüllter Gummi



Abbildung A3 Darstellung der vorzerkleinerten Holzbriketts



Abbildung A4 Fraktion der zerkleinerten Mischkunststoffe



Abbildung A5 Zerkleinertes Papier



Abbildung A6 PET-Flaschen im zerkleinerten Zustand



Abbildung A7 Fraktion Tetra-Packs im zerkleinerten Zustand



Abbildung A8 Vorzerkleinerte Bekleidungstextilien

A4 Berechnung des Heizwertes und des Anteiles der flüchtigen Bestandteile für die untersuchten Abfallfraktionen

Für die Berechnung des Heizwertes der flüchtigen Bestandteile wurde zunächst mit den Formeln nach URBANSKA (in CIAGWA et.al., 1980) die Zusammensetzung der flüchtigen Bestandteile berechnet. Für angenommene Kohlenstoffgehalte C und Sauerstoffgehalte O des wasser- und aschefreien Brennstoffes ergeben sich die Massenanteile der die flüchtigen Bestandteile bildenden Gase wie folgt:

$$\text{CO}_2 = 0,64 \left(\frac{\text{C}}{\text{O}} \right)^{-1} + 0,025 \frac{\text{C}}{\text{O}} - 0,0029 \left(\frac{\text{C}}{\text{O}} \right)^2$$

$$\text{CO} = 0,28 - 0,03 \frac{\text{C}}{\text{O}} + 0,00025 \left(\frac{\text{C}}{\text{O}} \right)^2$$

$$\text{CH}_4 = -0,266 + 0,748 \text{ C} - 0,48 \text{ C}^2$$

$$\text{H}_2 = 0,01 + 0,17 (\text{C} - 0,6) - 0,21 (\text{C} - 0,6)^2$$

$$\text{C}_m\text{H}_n = 0,22 + 0,003 \frac{\text{C}}{\text{O}} + 0,0055 \left(\frac{\text{C}}{\text{O}} \right)^2 - 0,19 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{C}}{\text{O}} \right)^3$$

$$\text{N}_2 = 0,003 + 0,17 (\text{C} - 0,6) - 0,025 (\text{C} - 0,6)^2$$

Über die für die Gase bekannten Heizwerte kann dann der Heizwert der flüchtigen Bestandteile ermittelt werden. Die Heizwerte sind in der folgenden Tabelle A3 aufgeführt.

Tabelle A3: Heizwerte der Komponenten der flüchtigen Bestandteile

Gas	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	C _m H _n	N ₂
Hu [MJ/kg]	0	10,11	50,01	119,98	50,51*	0

* In Anlehnung an ZELKOWSKI werden die C_mH_n als Methan betrachtet

Die Formeln wurden für Kohlen und deren übliche Kohlen- und Sauerstoffgehalte entwickelt. Bei den untersuchten Brennstoffen lagen der Kohlen- und Sauerstoffgehalt oftmals außerhalb der für Kohlen üblichen Bereiche, worauf folgende Effekte auftraten:

1. Es ergaben sich für die Massenanteile bestimmter Gase negative Werte sehr kleinen Betrages. In diesem Fall wurden diese Anteile gleich Null gesetzt.
2. Die Summe aller Anteile war kleiner Eins. In diesem Fall wurde die Differenz zu Eins zu gleichen Anteilen den Anteilen von CO und CO₂ zugeschlagen.

Dieses lässt sich damit begründen, dass die in der Berechnung nicht berücksichtigten und die Differenz ausmachenden Schwefel- und Halogenverbindungen im niedrigen Heizwertbereich anzusetzen sind. Gleichzeitig erfolgt damit eine Kompensation des zu hoch angesetzten Heizwertes für die C_mH_n .

Über die Annahme des Restkoks (oder C_{Fix}) als reiner Kohlenstoff mit einem Heizwert von 32,8 MJ/kg, lässt sich aus dem Heizwert der flüchtigen Bestandteile Hu_F , dem bei den Versuchen bestimmten Heizwert des Brennstoffes Hu_{ges} und dem ebenfalls bestimmten Aschegehalt A der Anteil der flüchtigen Bestandteile berechnen:

$$F = \frac{(32,8 \text{ MJ/kg} - Hu_{ges} - A \cdot 32,8 \text{ MJ/kg})}{(32,8 \text{ MJ/kg} - Hu_F)}$$

Die Ergebnisse der Berechnung des Heizwertes und des Anteiles der flüchtigen Bestandteile für die untersuchten Abfallfraktionen sind in der folgenden Tabelle A4 zusammengefasst.

Tabelle A4: Heizwert und Anteil der flüchtigen Bestandteile für die untersuchten Abfallfraktionen

Brennstoff	A [Mas.-%]	C_{i,awf} [Mas.-%]	O_{i,awf} [Mas.-%]	Hu_F [MJ/kg]	F [Mas.-%]
Gummi	2,0	75	14	25,6	54
Holz	0,6	50	44	14,5	77
Mischkunststoffe	2,1	77	10	30,5	69
Papier	17,6	50	44	12,8	71
PET	0,8	53	42	16,0	75
Tetras	8,8	54	37	14,7	58
Textilien	1,4	72	16	23,3	89

A5 Untersuchungen von Monofractionen fester Abfallstoffe

Tabelle A5: Erfasste Anteile der Ölbrenner- und der Gesamtverbrennungsleistung bei den Untersuchungen der Monofractionen fester Abfallstoffe

Brennstoff	Ölbrennerleistung [kW]	Erfasste Leistung bei $t_1 = 1800s$	t_1^* [s]	Messtechnisch erfass- ter Anteil von Q/t (k_{Mess})
Gummi 1	29,44	97%	2220	93,8%
Gummi 2	26,56	99%	2460	89,7%
Holz 1	28,86	93%	2550	96,1%
Holz 2	27,26	97%	2040	93,5%
Mischkunststoffe 1	27,59	99%	2130	92,8%
Mischkunststoffe 2	26,86	95%	2580	95,4%
Papier 1	29,20	94%	2340	94,0%
Papier 2	26,94	91%	1950	94,8%
PET 1	29,03	99%	1920	93,0%
PET 2	27,23	93%	2040	94,4%
Tetras 1	28,60	96%	2460	90,9%
Tetras 2	25,76	94%	2610	94,9%
Textilien 1	29,04	95%	1920	94,8%
Textilien 2	29,16	99%	2310	95,1%
Mittelwert	27,97	96%	2252	93,8%
Maximum	29,44	99%	2610	96,1%
Minimum	25,76	91%	1920	89,7%
Stabw.	1,16	3%	245	1,0%

Tabelle A6: Abweichungen der charakteristischen Energiefreisetzungscurven vom realen Verlauf der erfassten Outputwärmeströme

Brennstoff	Grundniveau			Peak-Maximum		
	Q/t_{gemessen} [kJ/s]	Q/t_{EFKurve} [kJ/s]	$\Delta Q/t$ [kJ/s]	Q/t_{gemessen} [kJ/s]	Q/t_{EFKurve} [kJ/s]	$\Delta Q/t$ [kJ/s]
Gummi 1	40,18	43,79	3,61	50,1	47,81	2,29
Gummi 2	36,89	40,64	3,75	46,21	44,17	2,04
Holz 1	37,85	39,39	1,54	40,72	40,98	0,26
Holz 2	35,87	37,54	1,67	38,88	38,51	0,37
Mischkunststoffe 1	39,18	42,37	3,19	49,48	48,07	1,41
Mischkunststoffe 2	40,1	41,75	1,65	50,14	47,04	3,1
Papier 1	32,84	34,96	2,12	40,41	38,98	1,43
Papier 2	30,64	33,8	3,16	39,53	37,79	1,74
PET 1	39,46	39,41	0,05	47,94	43,05	4,89
PET 2	35,08	37,14	2,06	41,93	40,41	1,52
Tetras 1	34,27	35,53	1,26	43,4	40,53	2,87
Tetras 2	32,33	37,42	5,09	42,54	42,04	0,5
Textilien 1	38,86	41,07	2,21	48,57	47,41	1,16
Textilien 2	39,22	40,33	1,11	47,75	47,55	0,2
Mittelwert			2,32			1,70
Maximum			5,09			4,89
Minimum			0,05			0,20
Stabw.			1,26			1,25

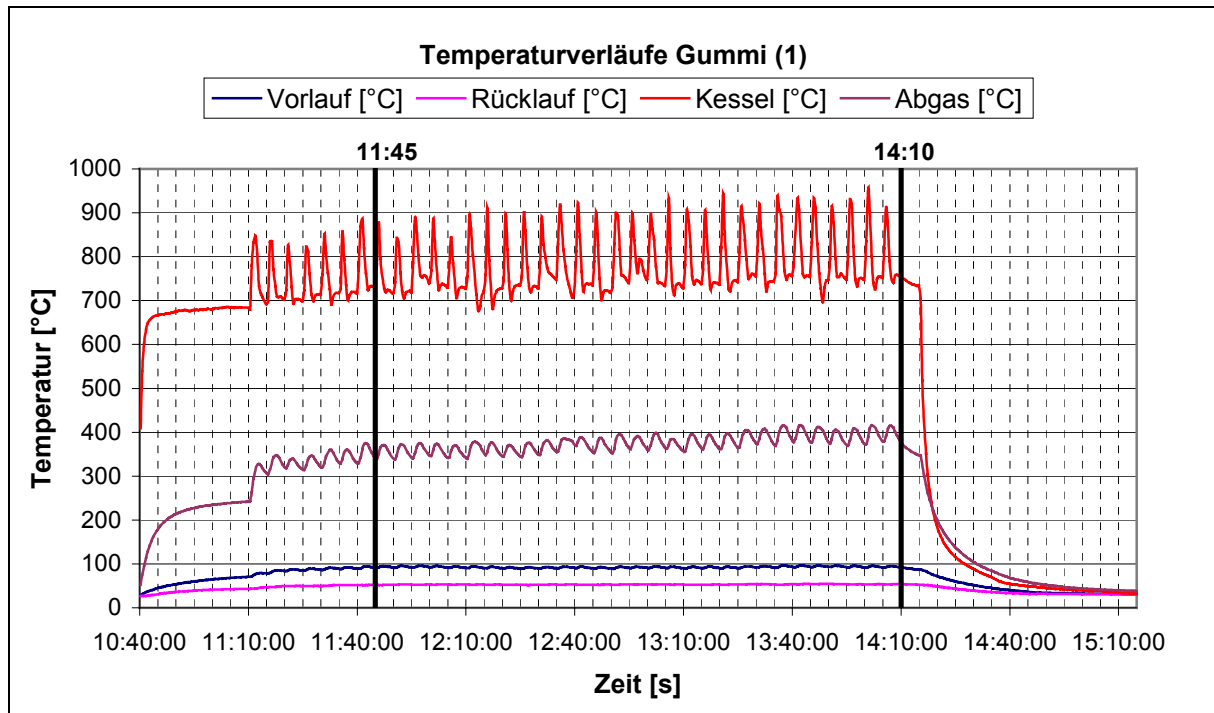


Abbildung A9 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Gummi(1) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

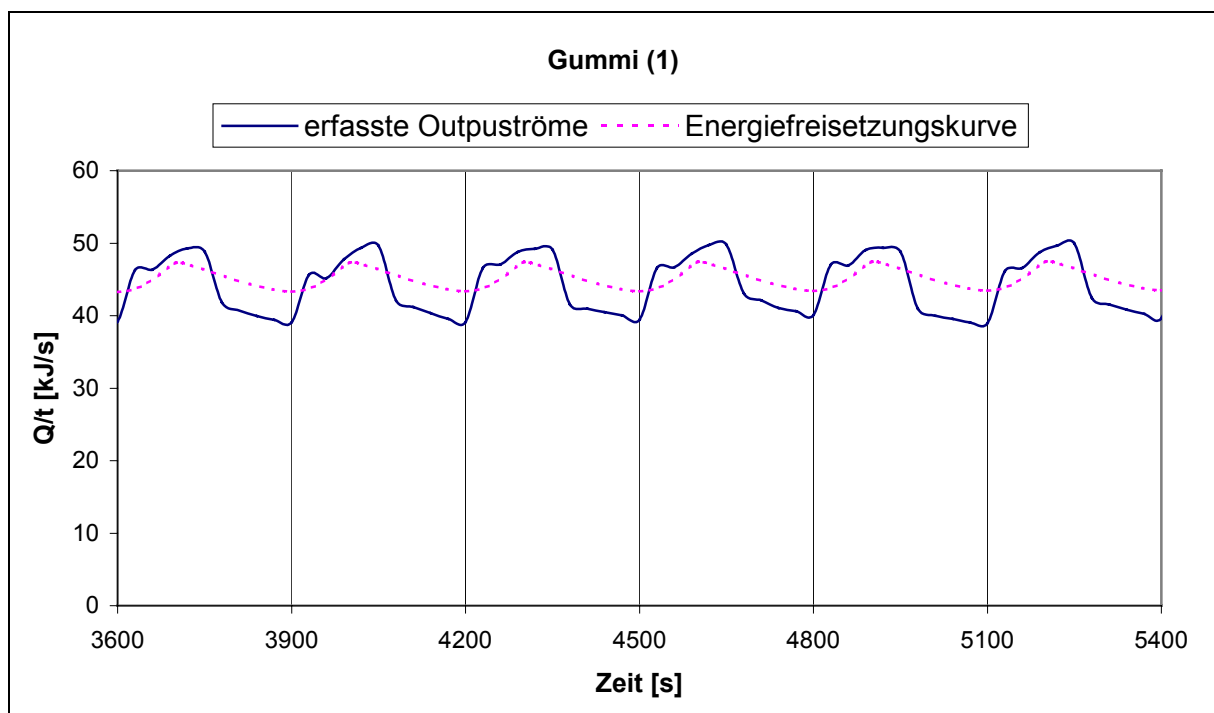


Abbildung A10 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Gummi(1)

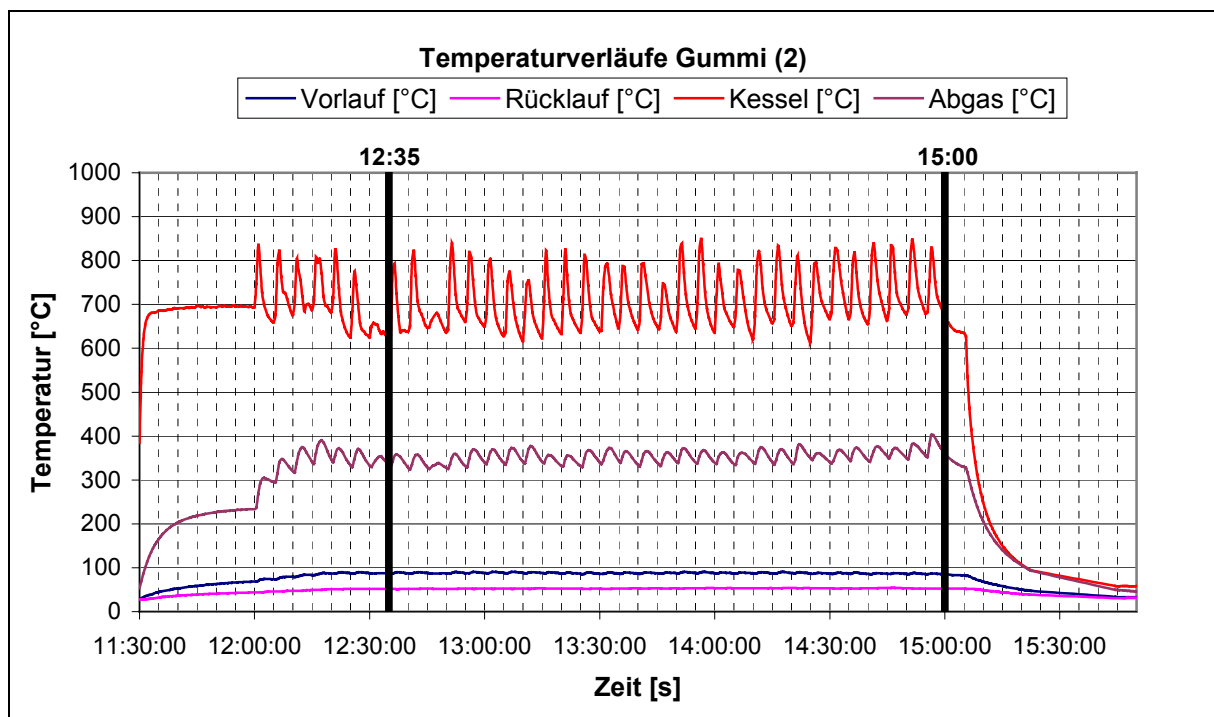


Abbildung A11 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Gummi(2) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

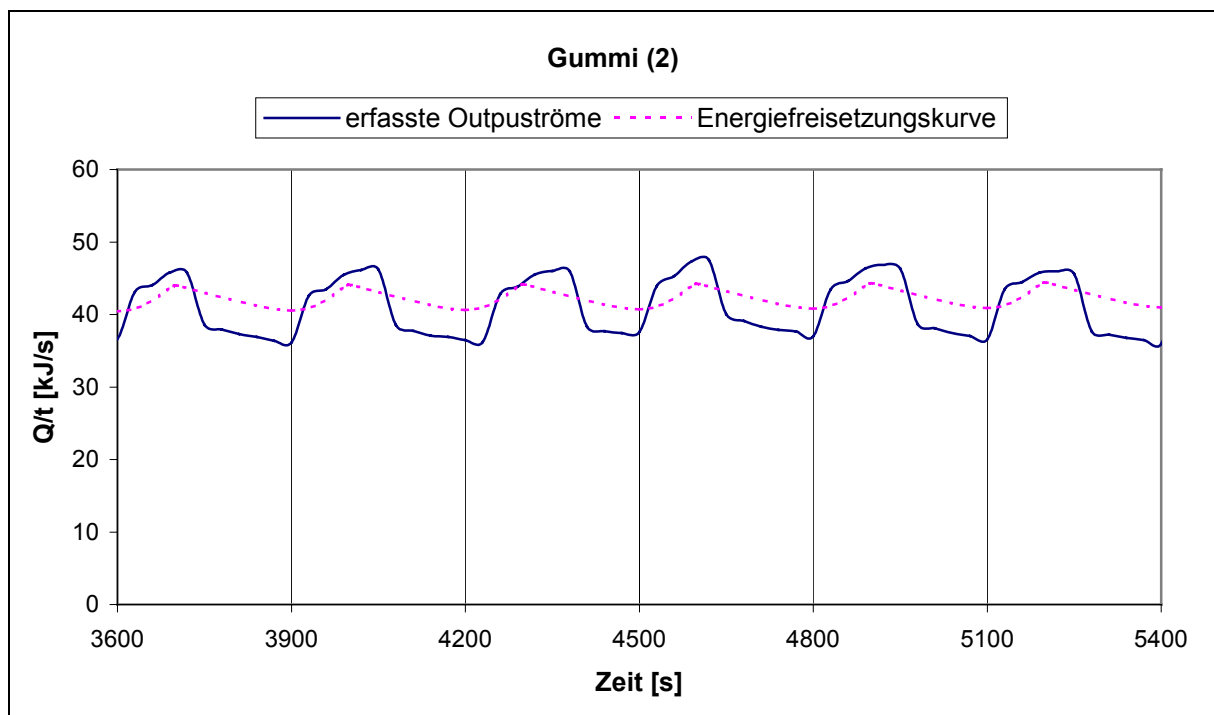


Abbildung A12 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Gummi(2)

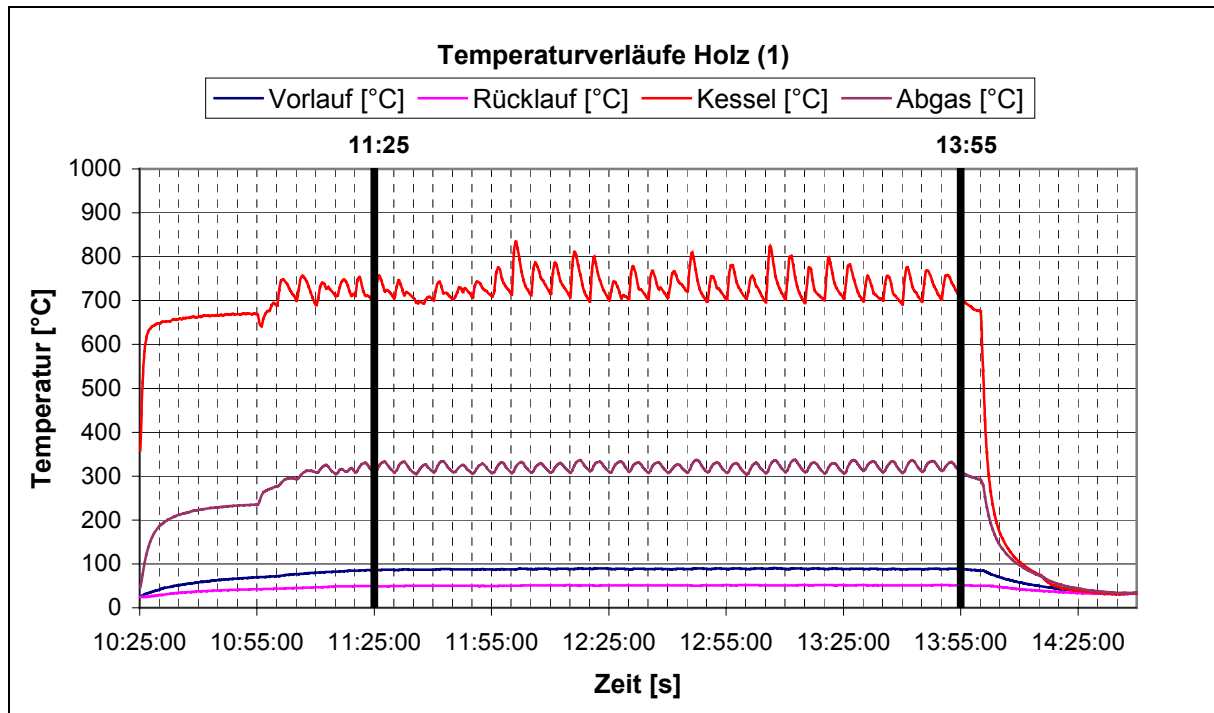


Abbildung A13 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Holz(1) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

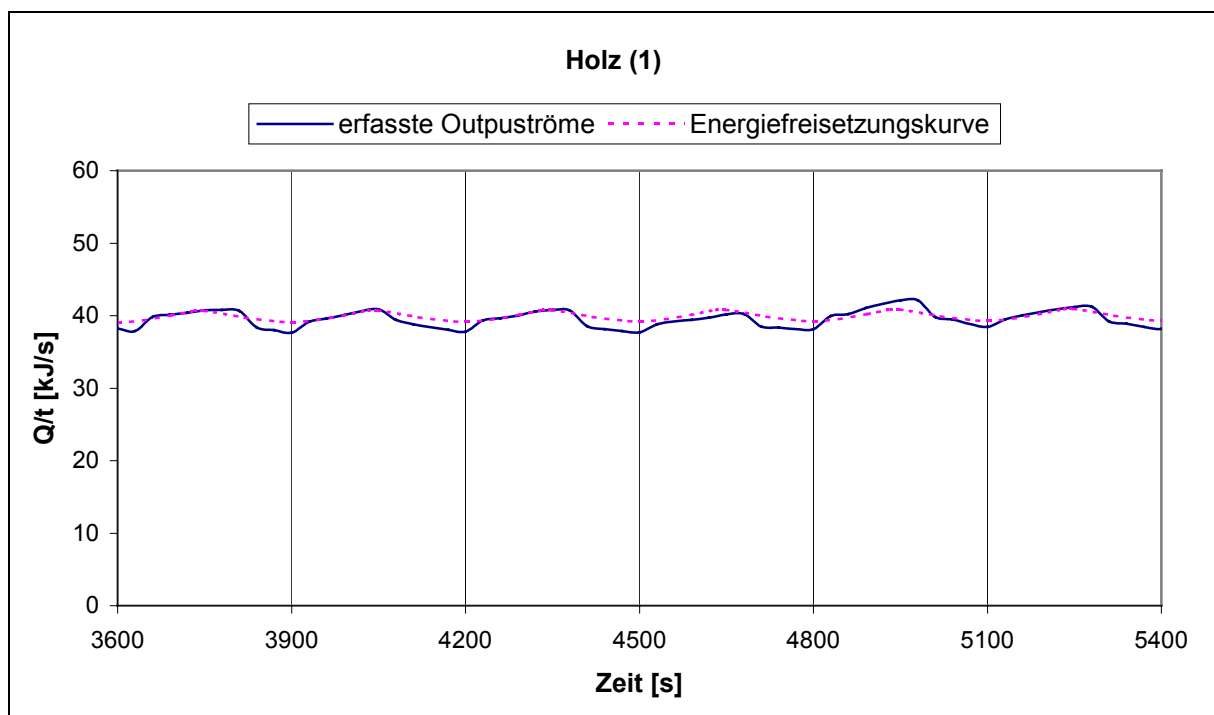


Abbildung A14 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Holz(1)

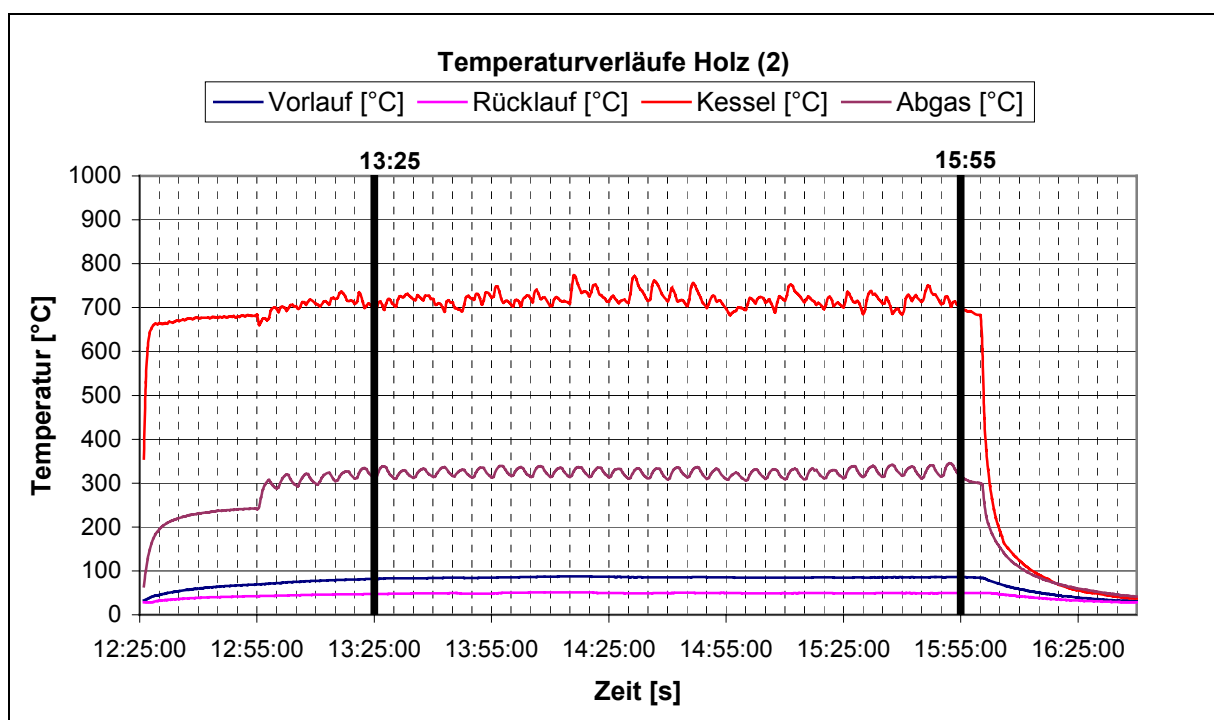


Abbildung A15 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Holz(2) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

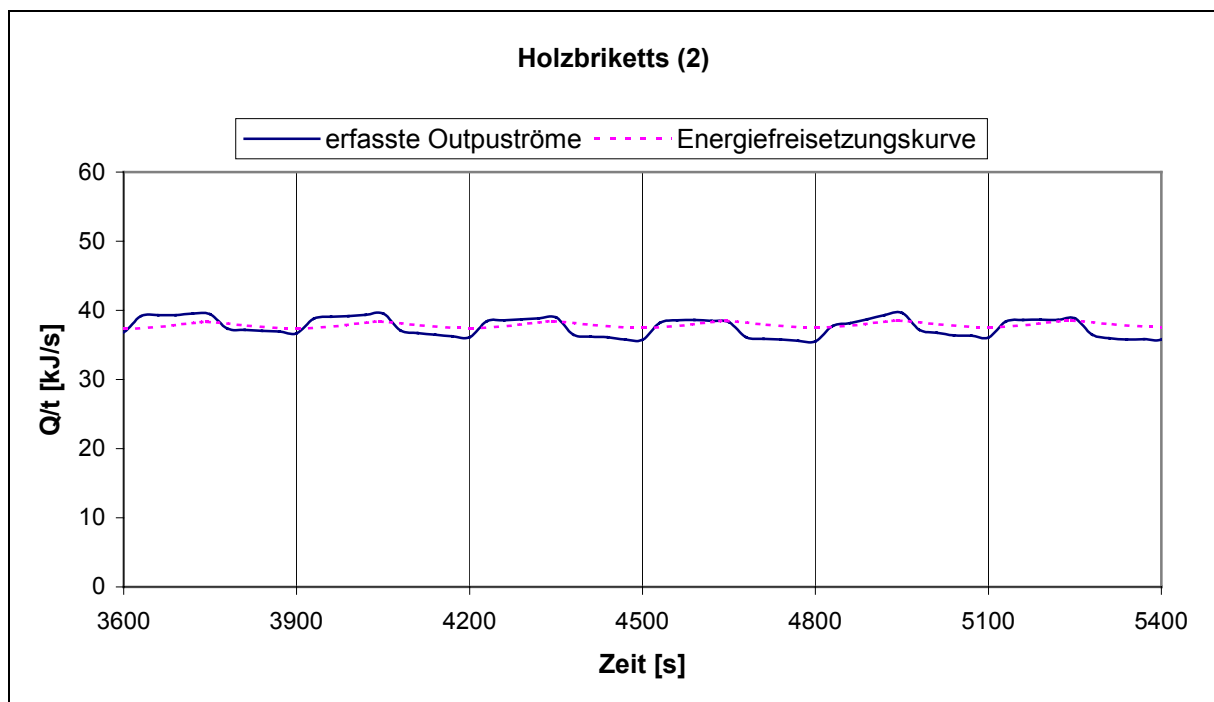


Abbildung A16 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungs-kurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Holz(2)

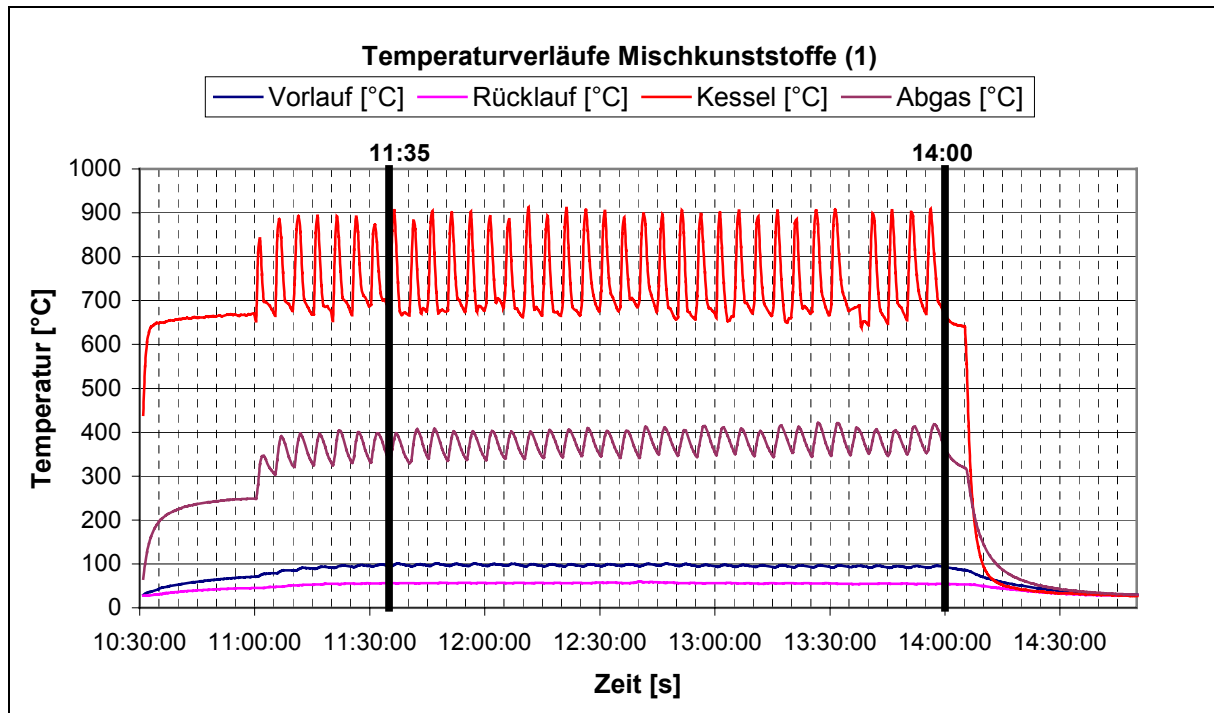


Abbildung A17 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Mischkunststoffen(1) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

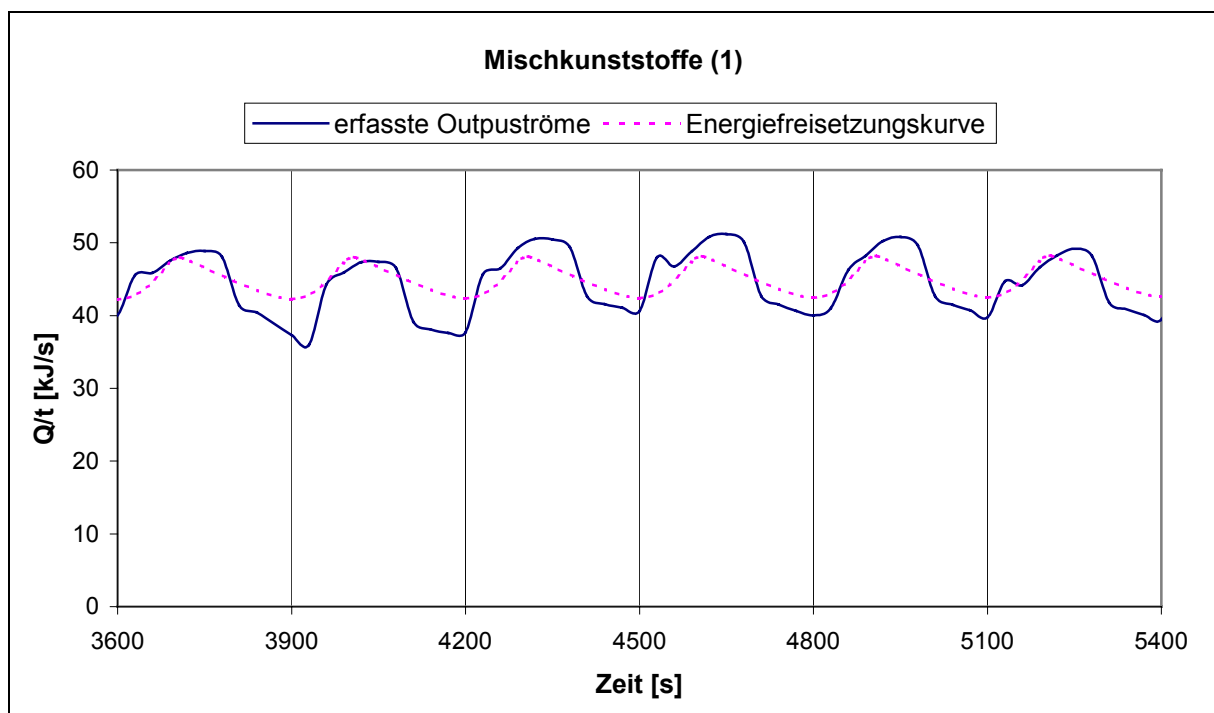


Abbildung A18 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Mischkunststoffen(1)

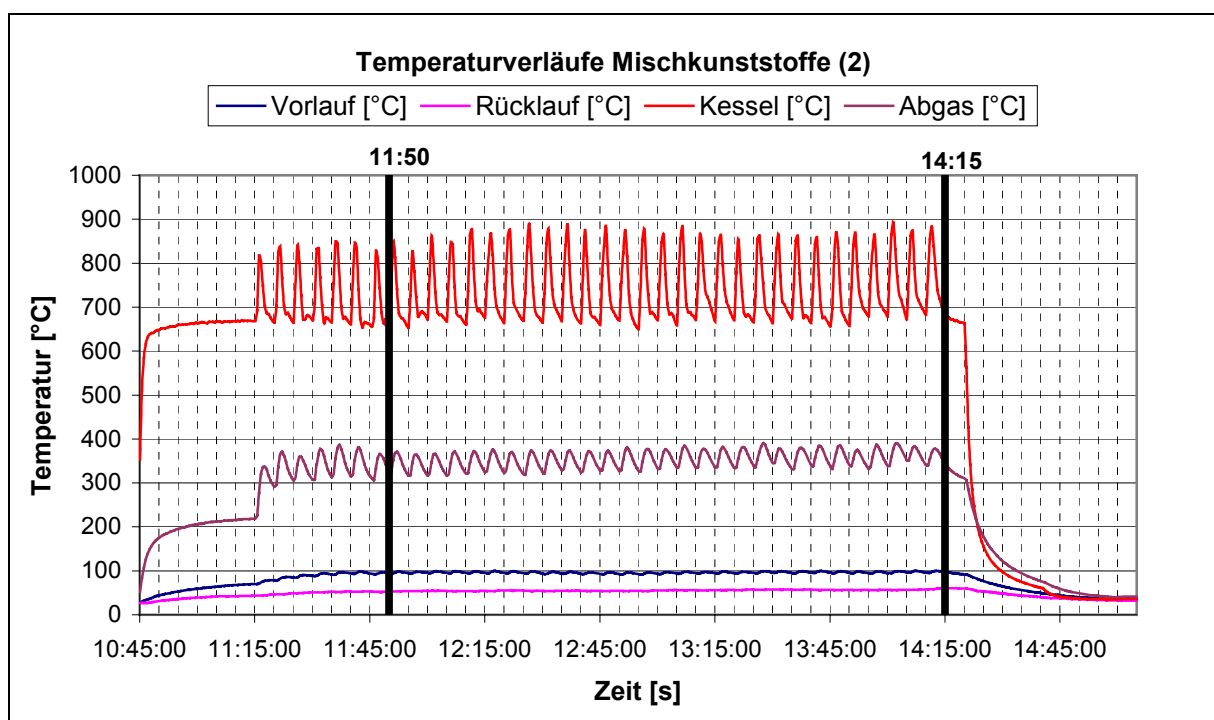


Abbildung A19 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Mischkunststoffen(2) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

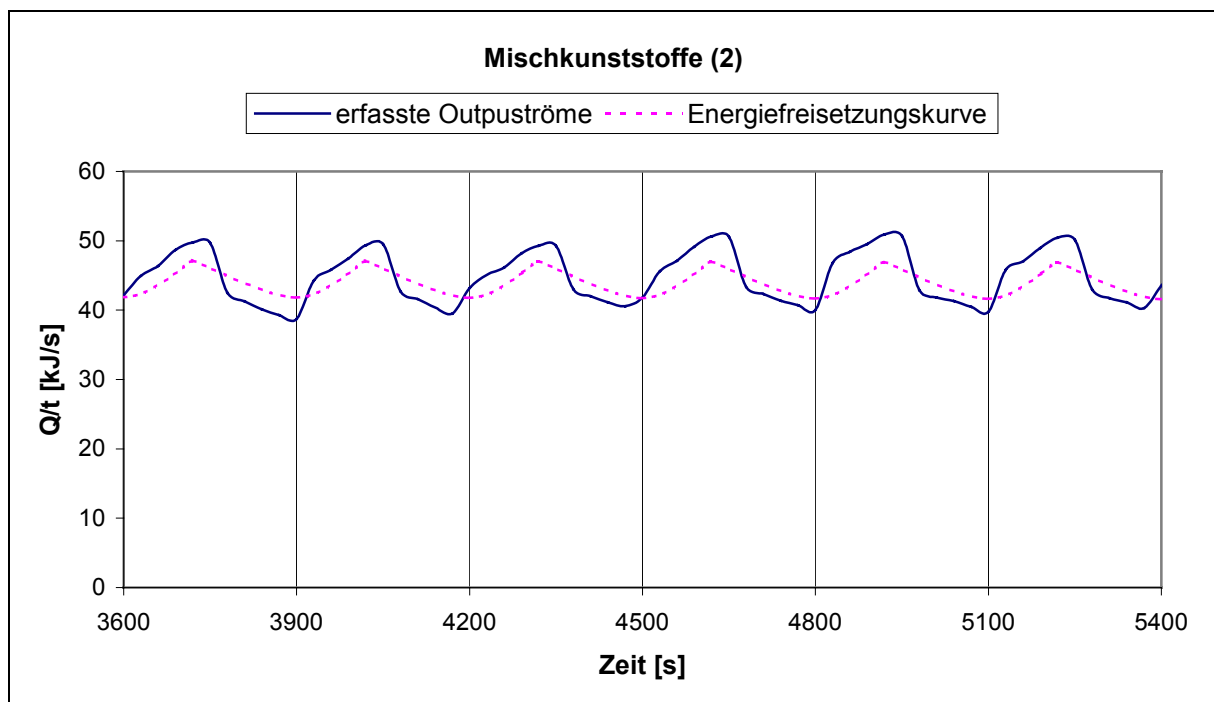


Abbildung A20 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Mischkunststoffen(2)

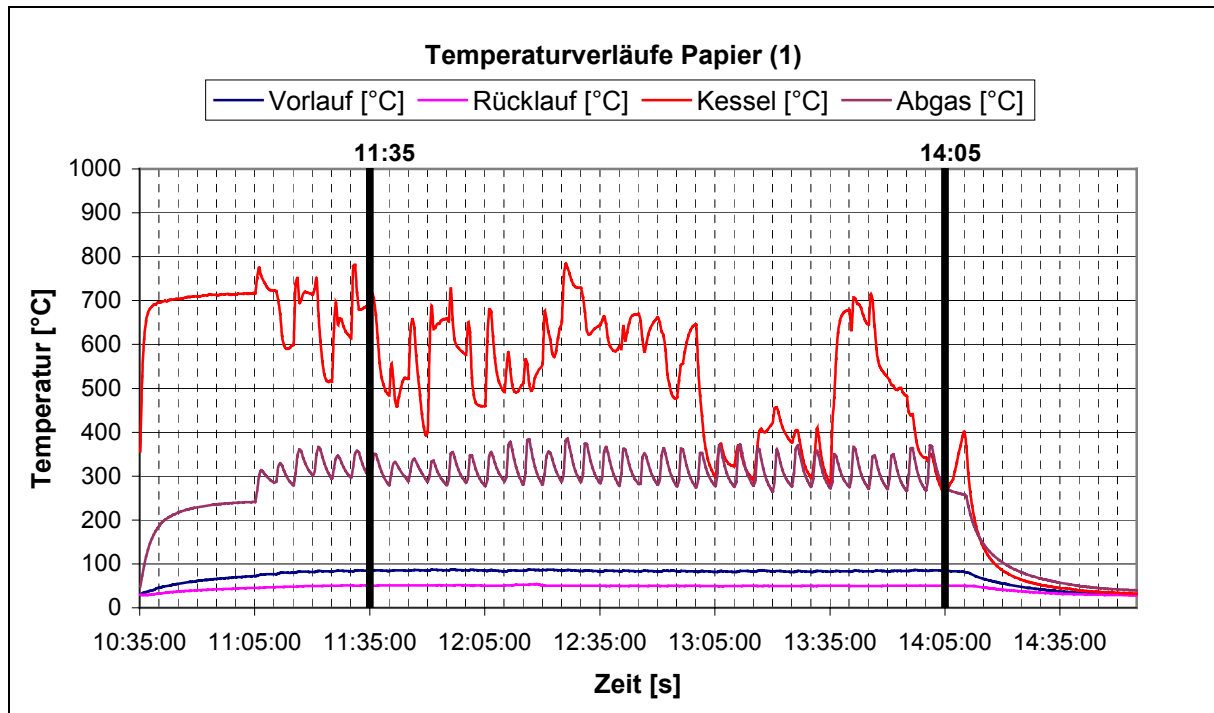


Abbildung A21 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Papier(1) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

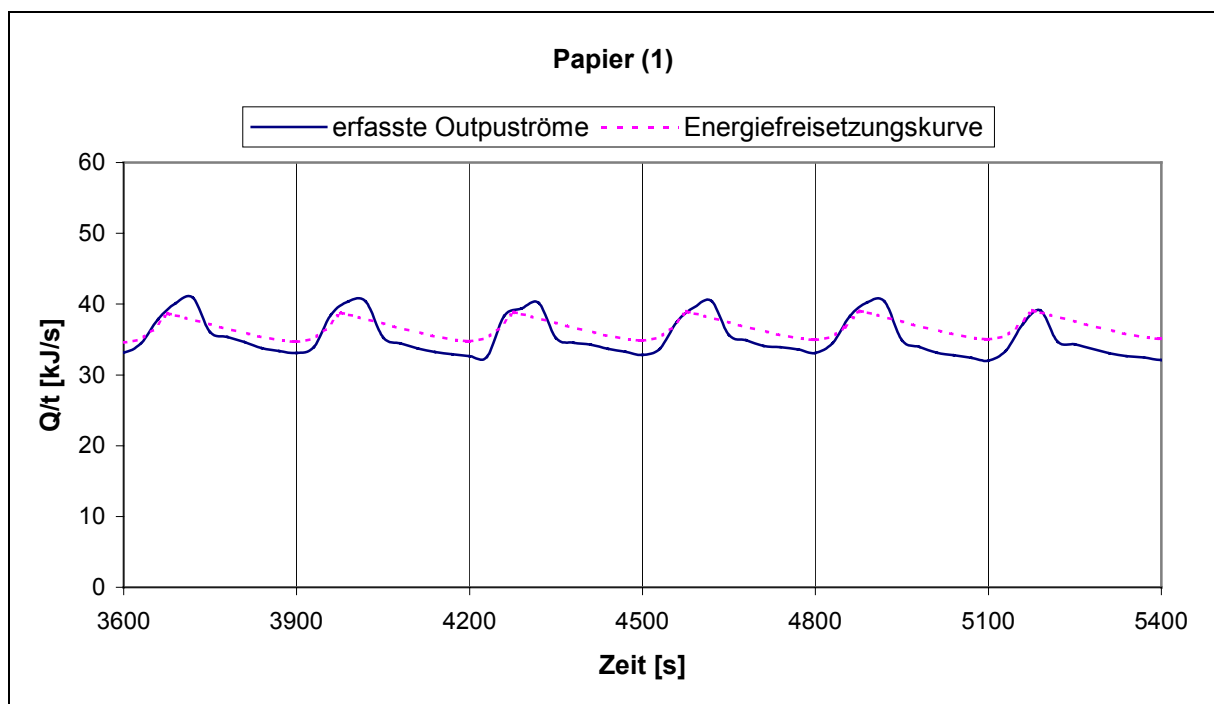


Abbildung A22 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Papier(1)

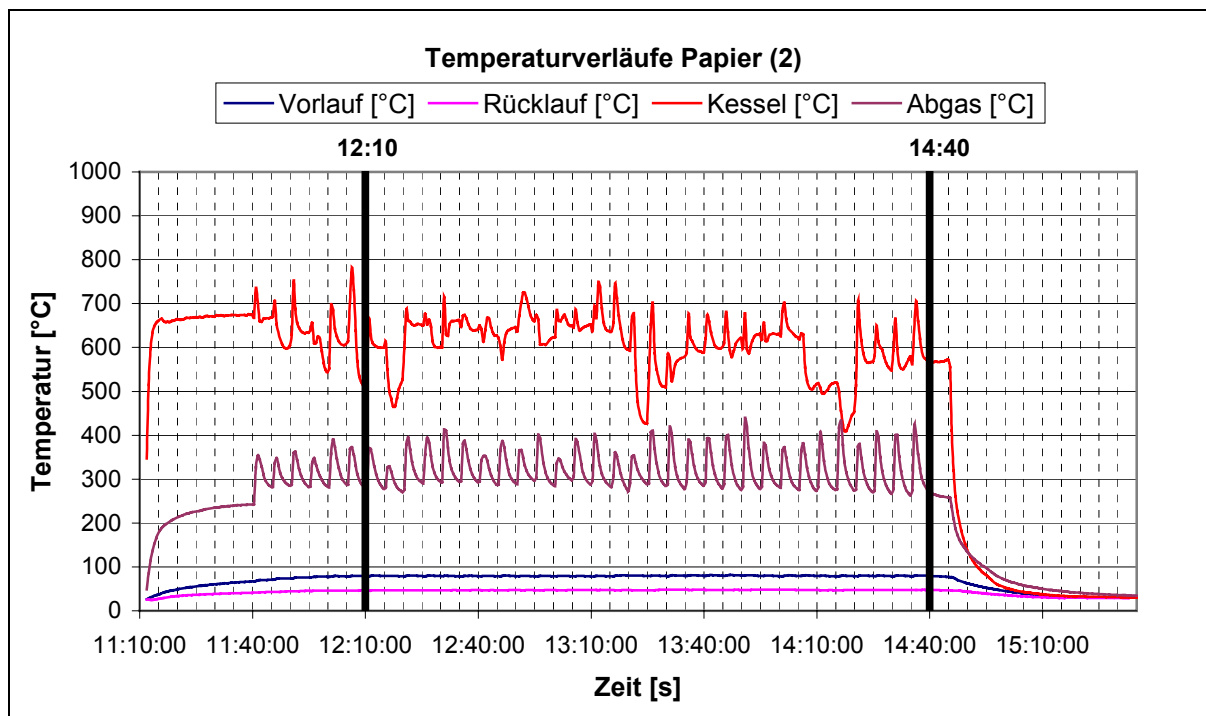


Abbildung A23 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Papier(2) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

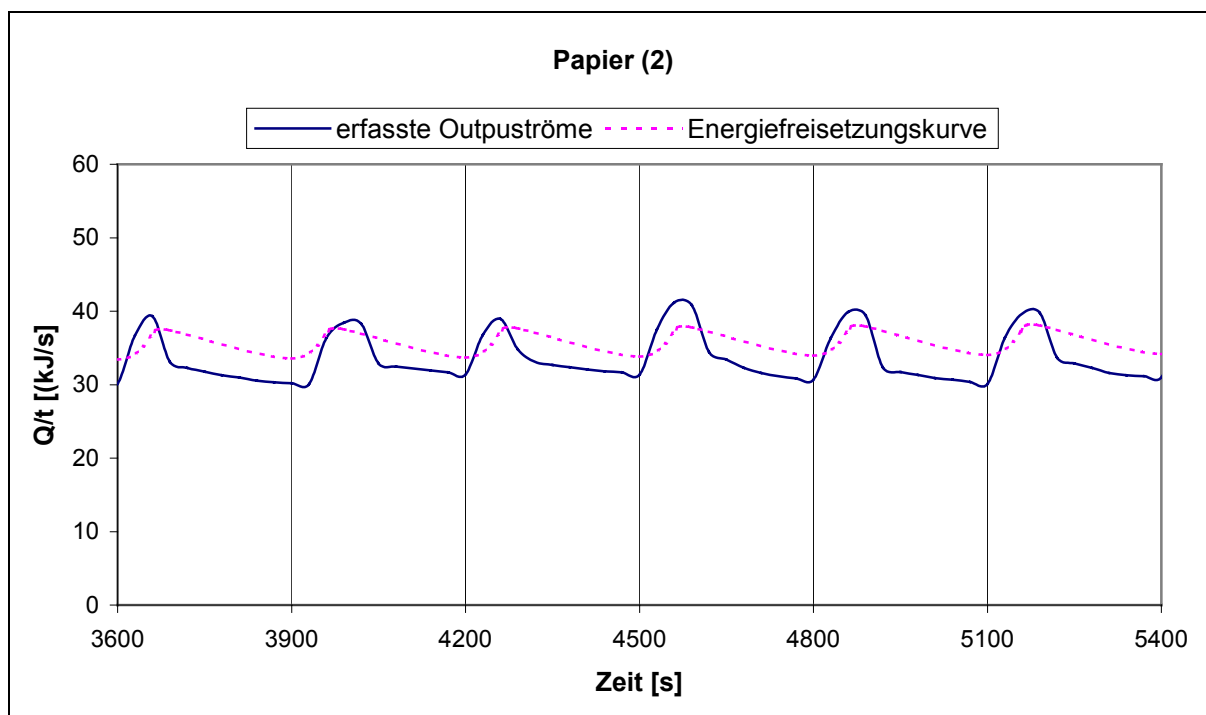


Abbildung A24 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Papier(2)

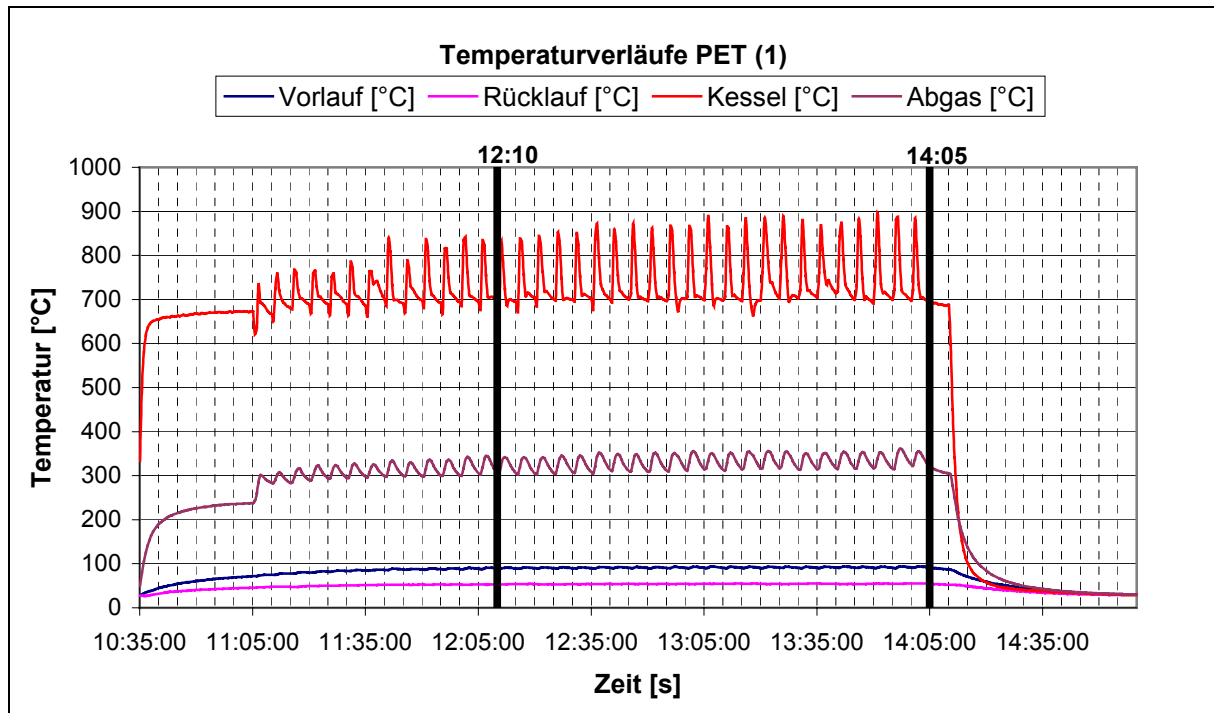


Abbildung A25 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von PET(1) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

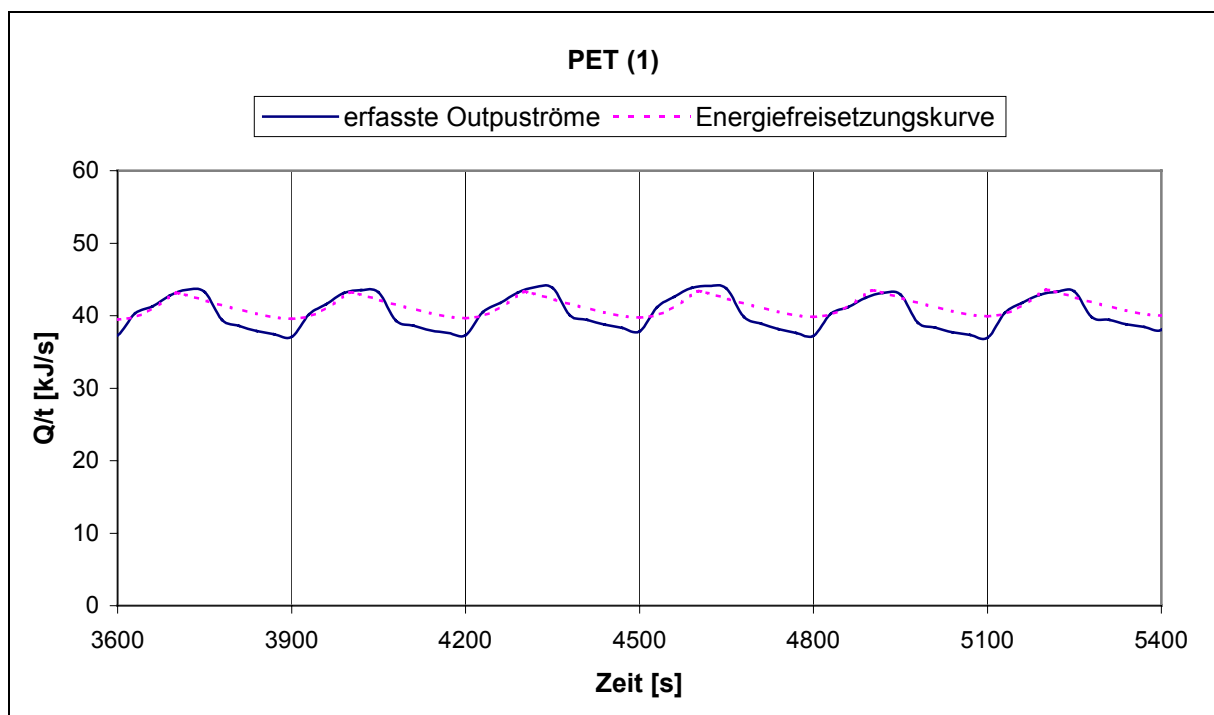


Abbildung A26 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von PET(1)

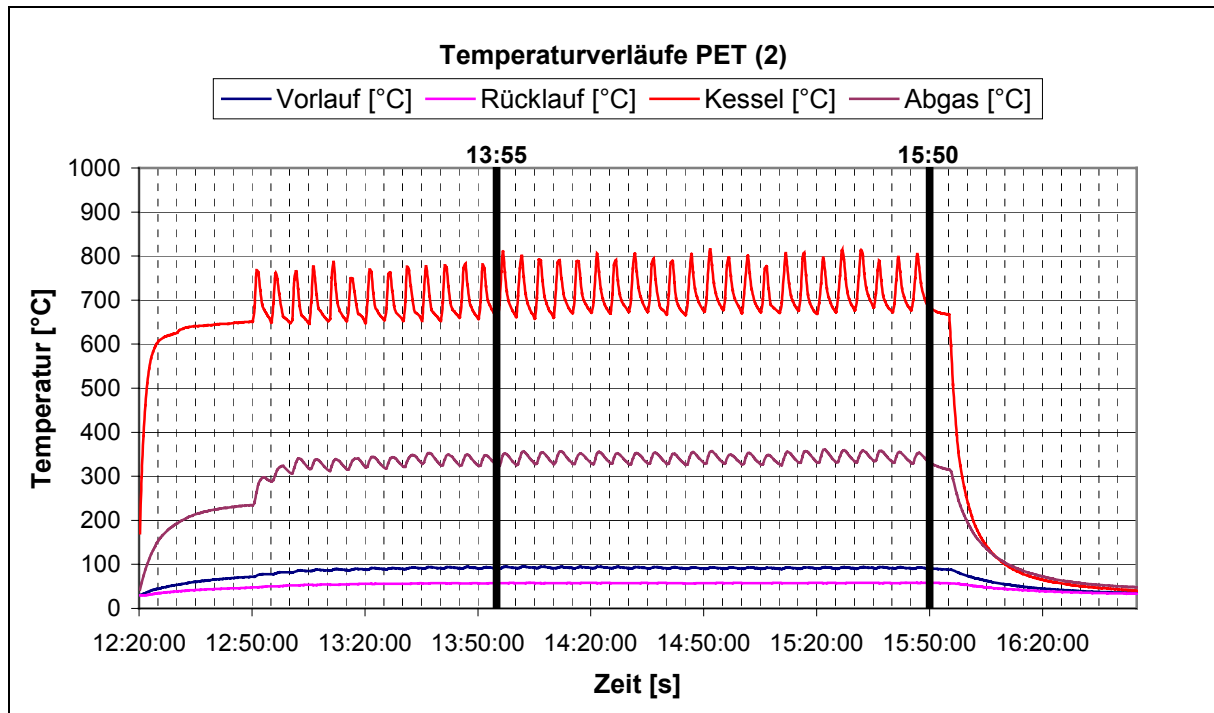


Abbildung A27 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von PET(2) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

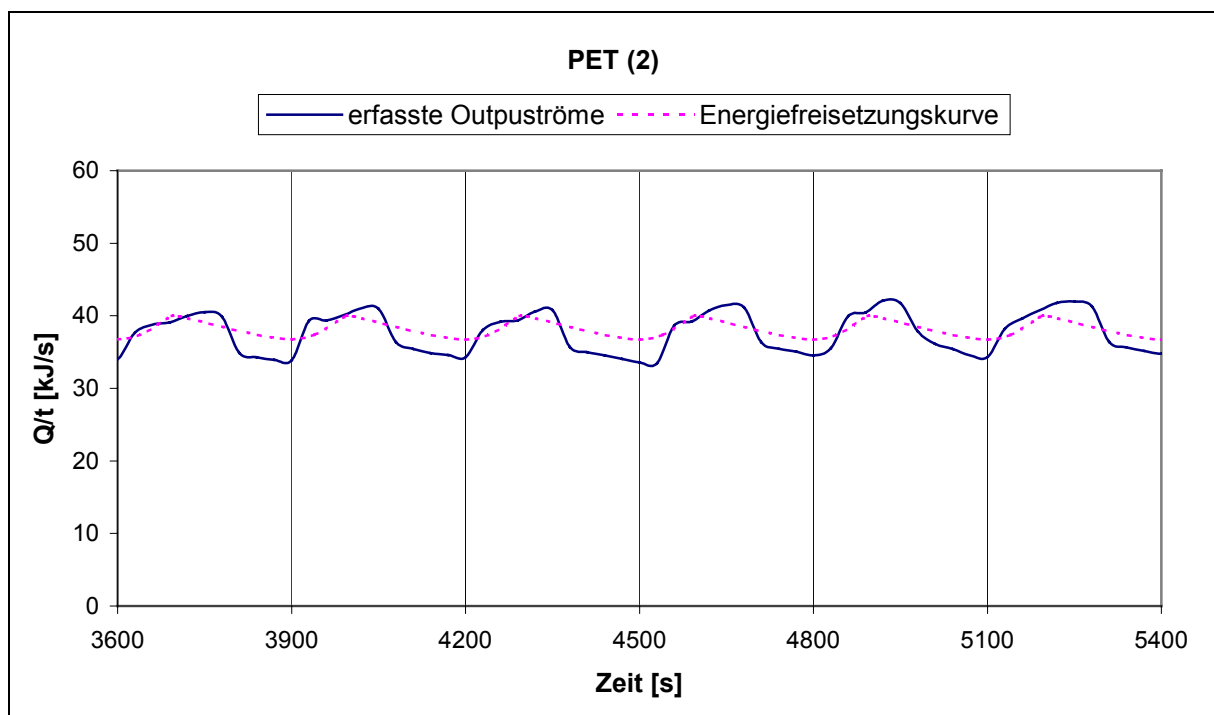


Abbildung A28 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von PET(2)

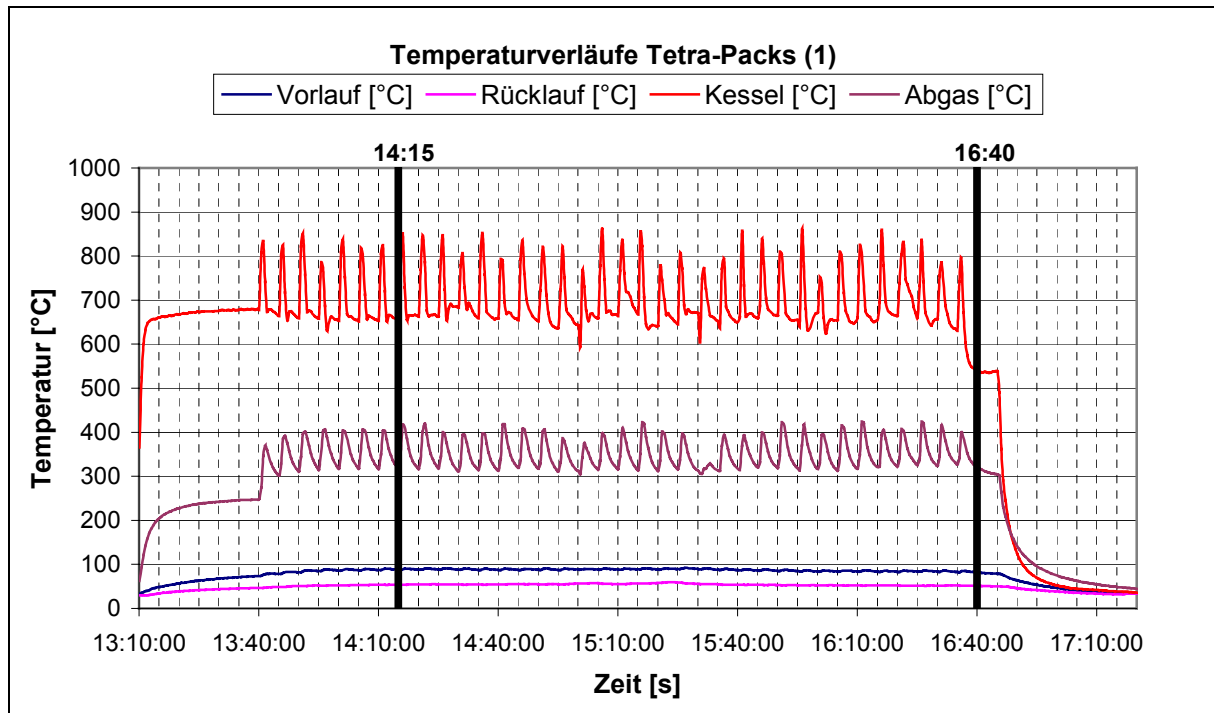


Abbildung A29 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Tetra-Packs(1) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

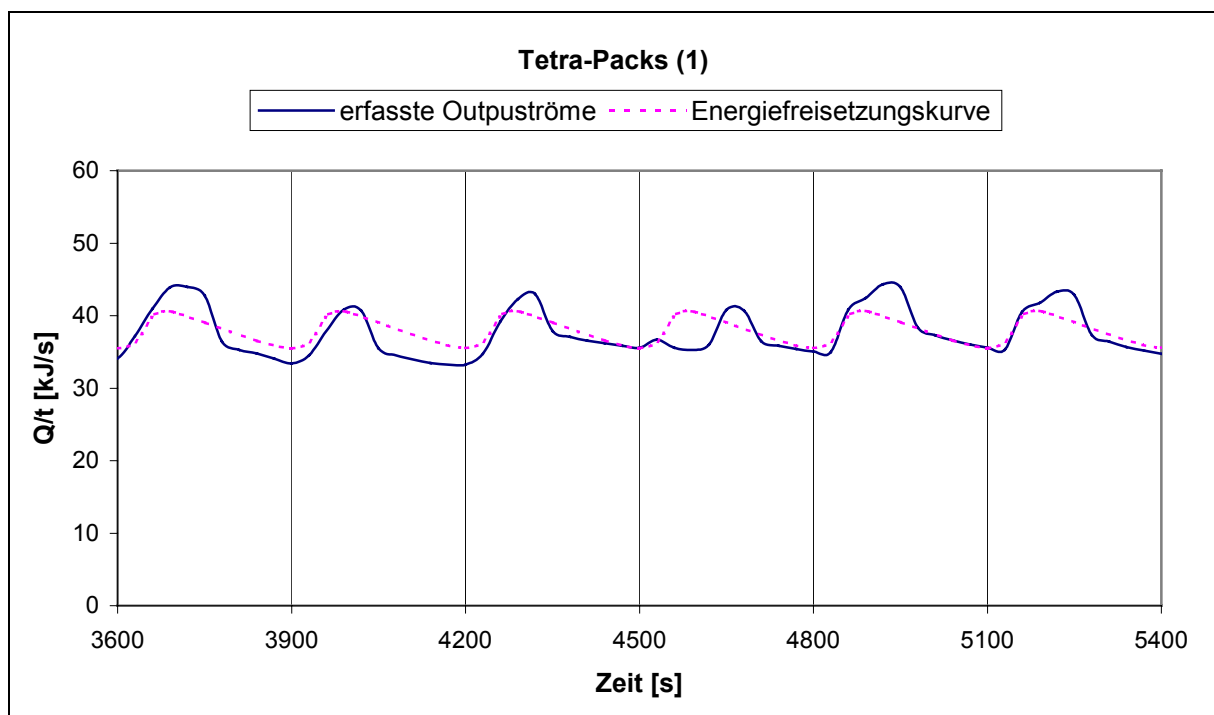


Abbildung A30 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Tetra-Packs(1)

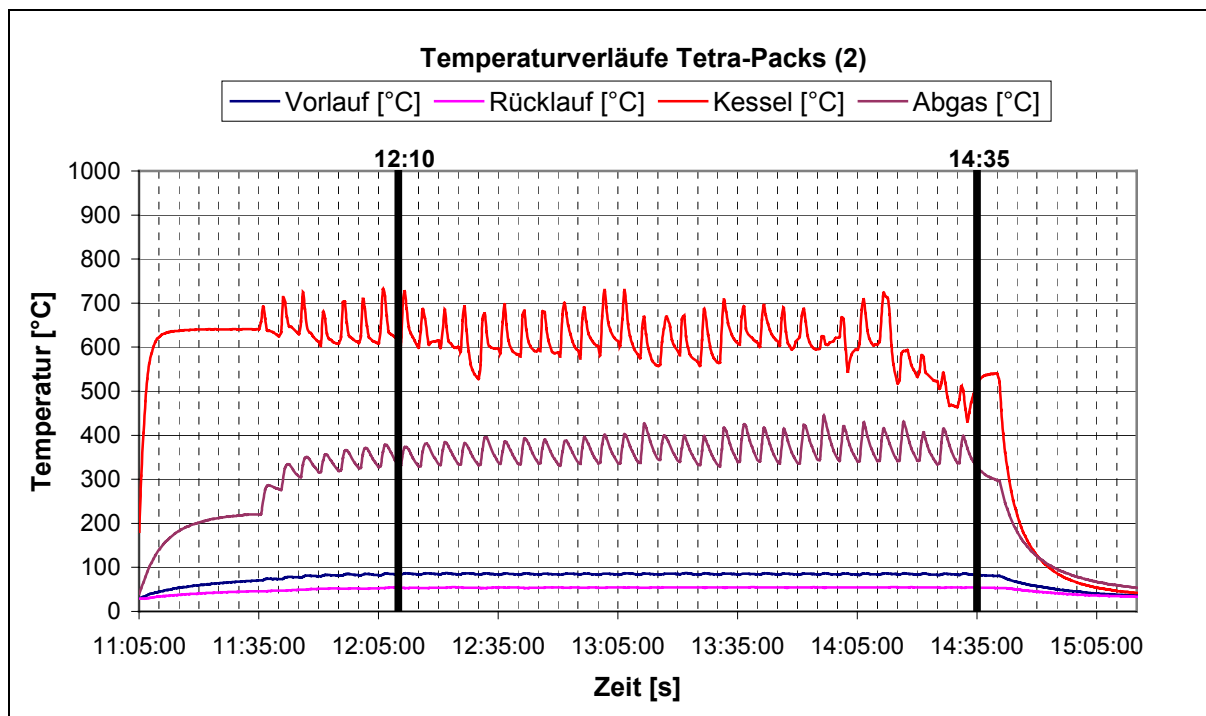


Abbildung A31 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Tetra-Packs(2) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

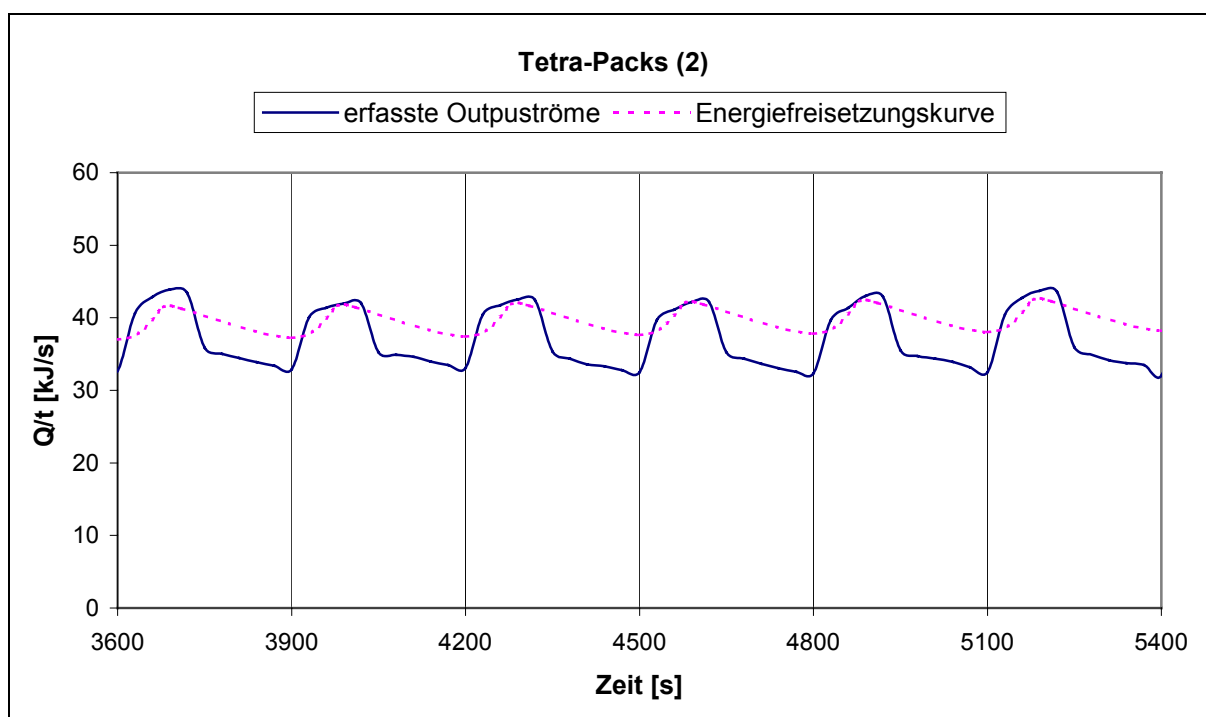


Abbildung A32 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Tetra-Packs(2)

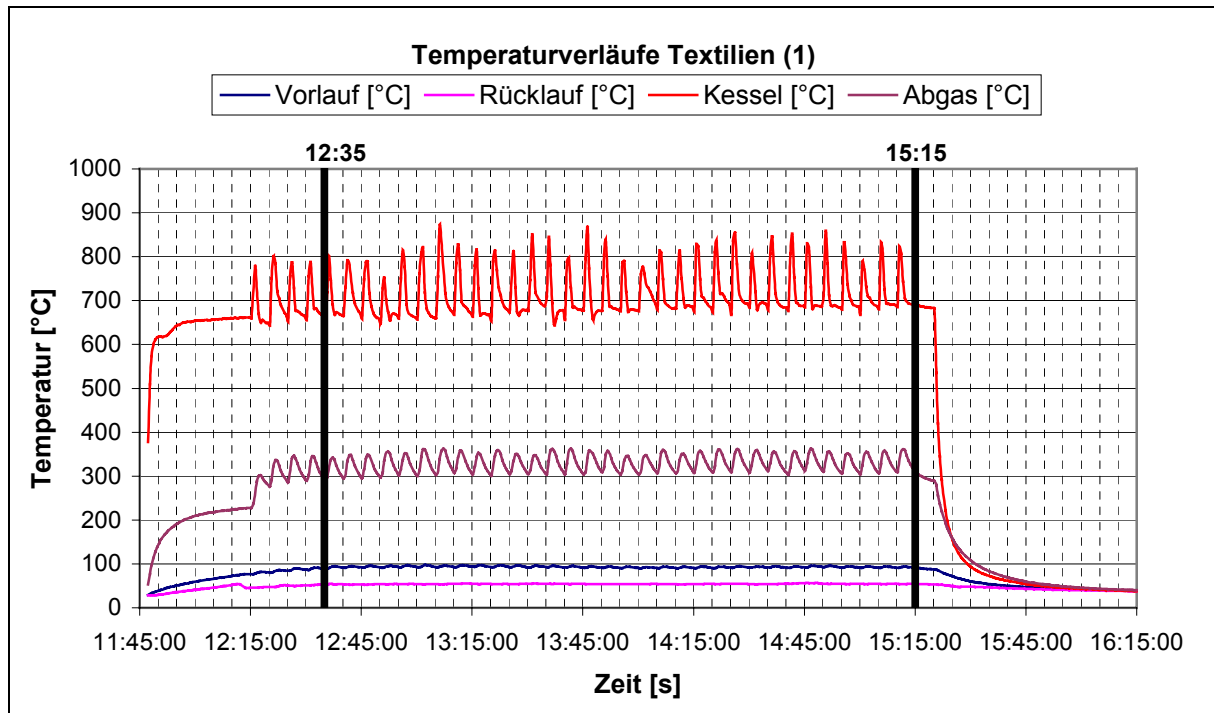


Abbildung A33 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Textilien(1) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

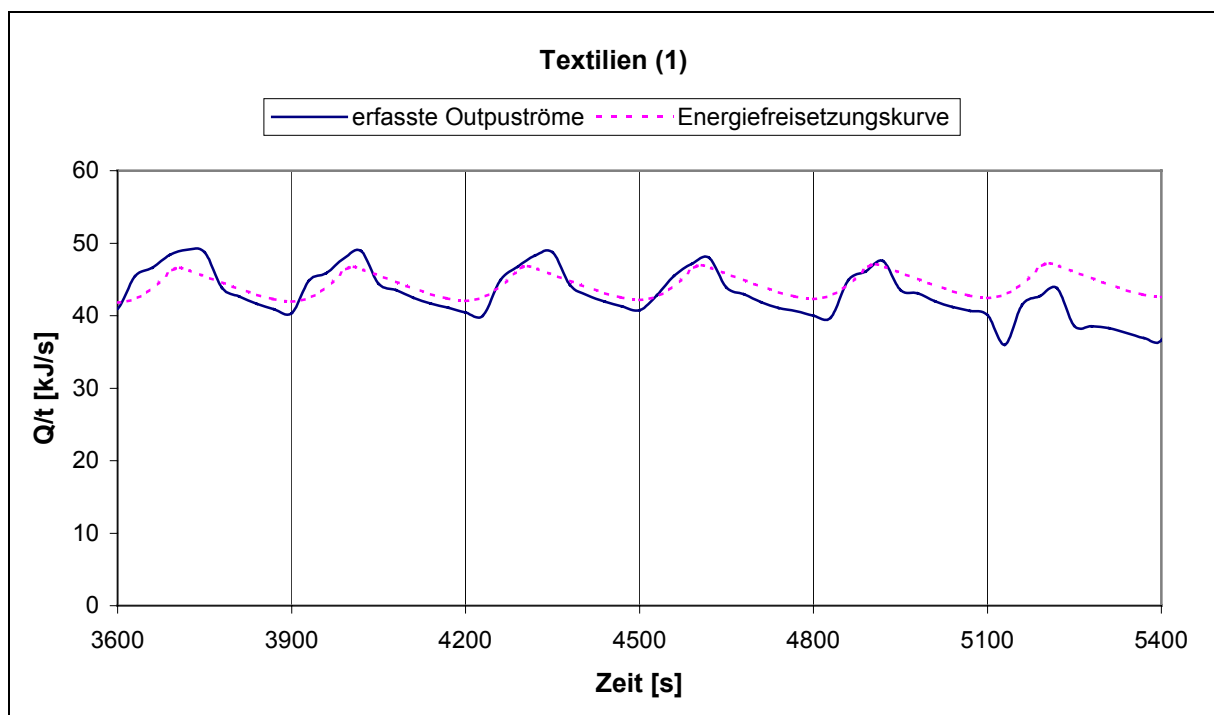


Abbildung A34 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Textilien(1)

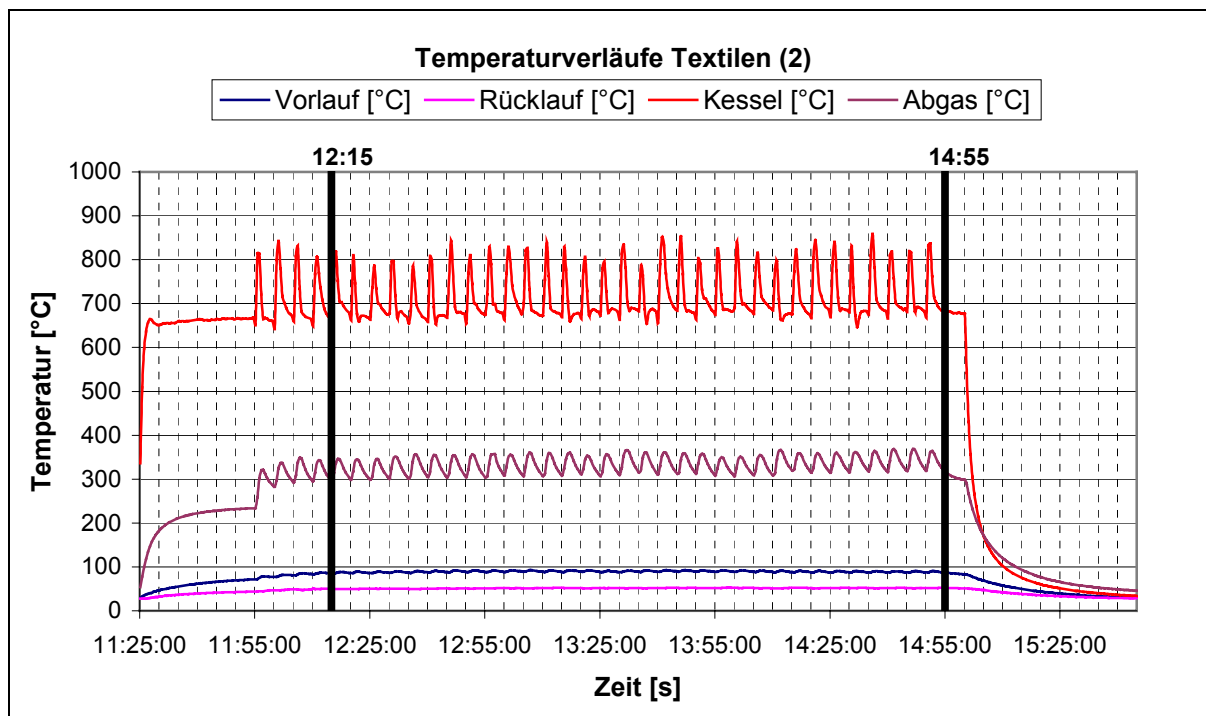


Abbildung A35 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Textilien(2) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

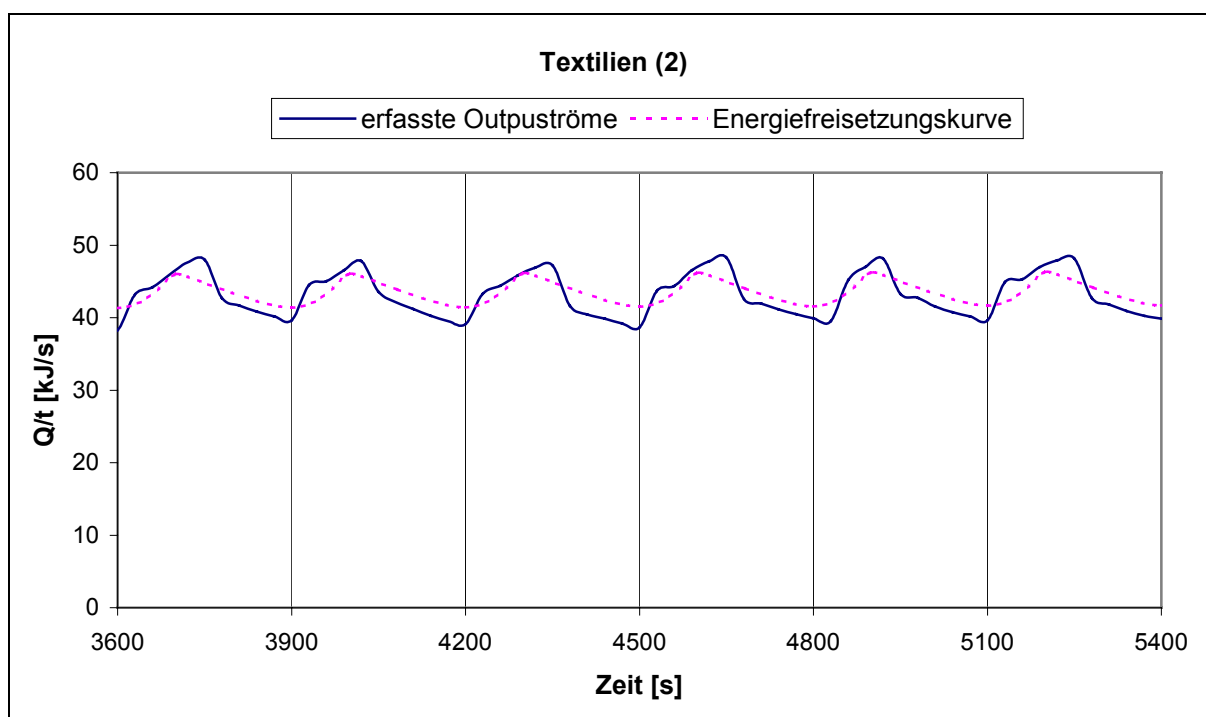


Abbildung A36 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Textilien(2)

A6 Untersuchungen von Abfallgemischen

Tabelle A7: Abweichungen der charakteristischen Energiefreisetzungscurven vom realen Verlauf der erfassten Outputwärmeströme

Brennstoff	Grundniveau			Peak-Maximum		
	Q/t_{gemessen} [kJ/s]	Q/t_{EFKurve} [kJ/s]	$\Delta Q/t$ [kJ/s]	Q/t_{gemessen} [kJ/s]	Q/t_{EFKurve} [kJ/s]	$\Delta Q/t$ [kJ/s]
Ho2Pap1 (a)	36,83	38,85	2,02	44,75	41,32	3,43
Ho2Pap1 (b)	35,62	35,93	0,31	43,76	38,07	5,69
Ho1Pap1 (a)	35,81	38,71	2,90	44,09	41,6	2,49
Ho1Pap1 (b)	35,56	38,34	2,78	43,12	41,18	1,94
Ho1Pap2 (a)	34,85	35,49	0,64	43,19	38,76	4,43
Ho1Pap2 (b)	34,56	36,00	1,44	41,91	38,99	2,92
Ho2Pet1	38,30	40,35	2,05	41,77	42,23	0,46
Ho1Pet1 (a)	36,79	38,65	1,86	42,21	40,99	1,22
Ho1Pet1 (b)	36,19	37,26	1,07	42,44	39,43	3,01
Ho1Pet2	36,70	39,20	2,50	43,56	41,88	1,68
Mittelwert			1,76			2,73
Maximum			2,90			5,69
Minimum			0,31			0,46
Stabw.			0,84			1,47

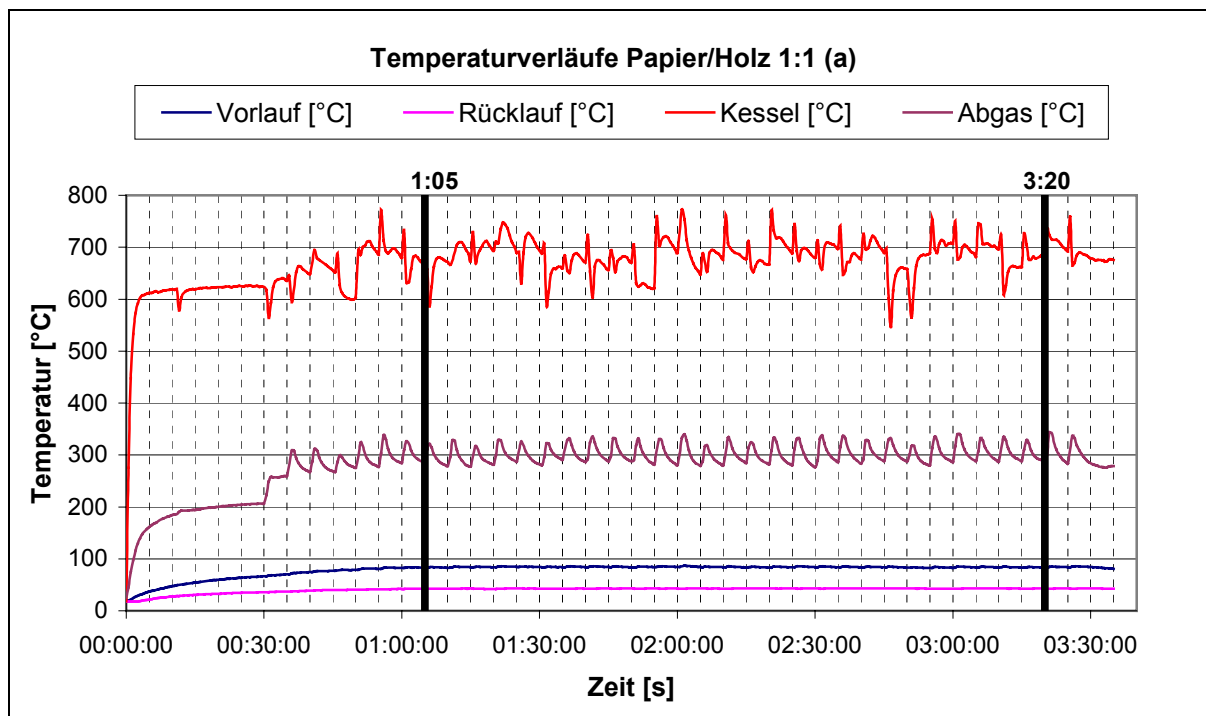


Abbildung A37 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho2Pap1(a) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

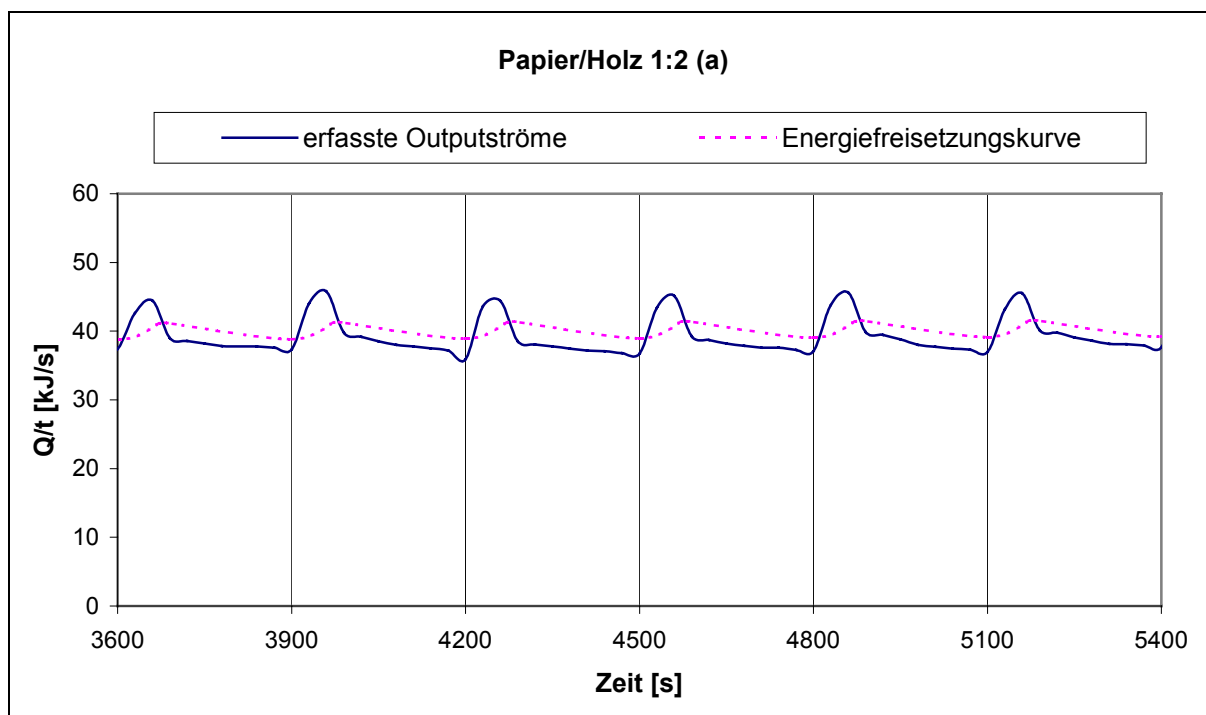


Abbildung A38 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho2Pap1(a)

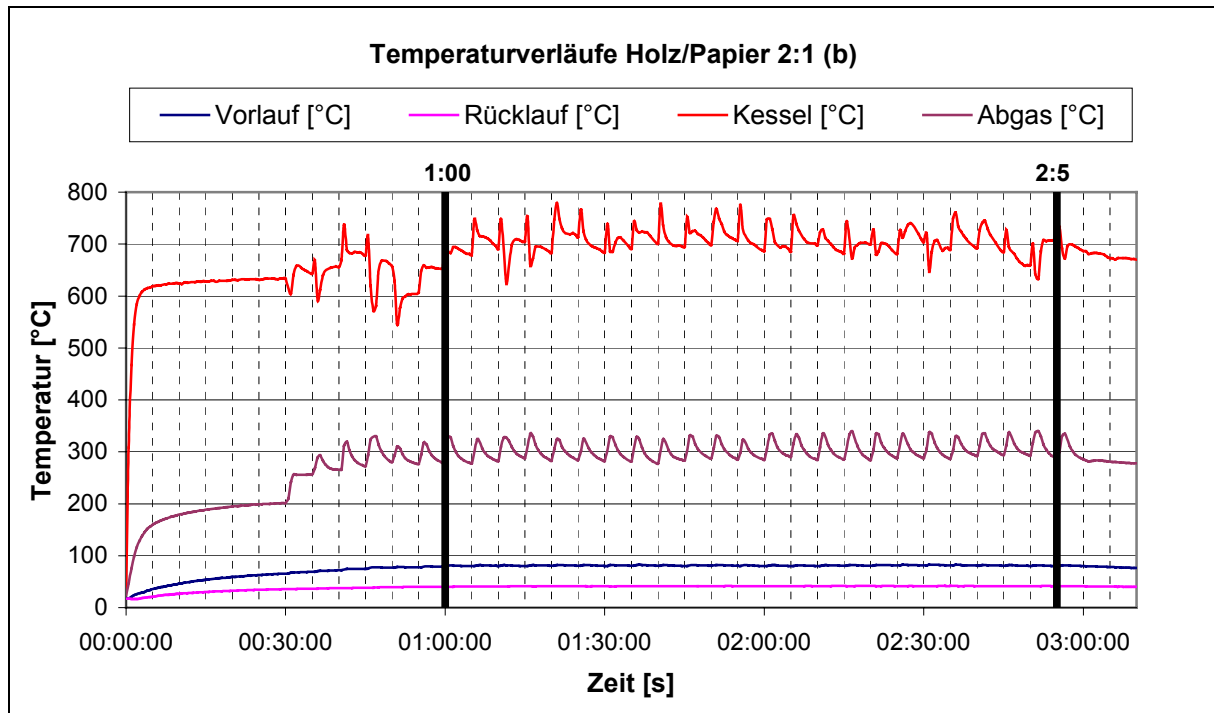


Abbildung A39 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho2Pap1(b) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

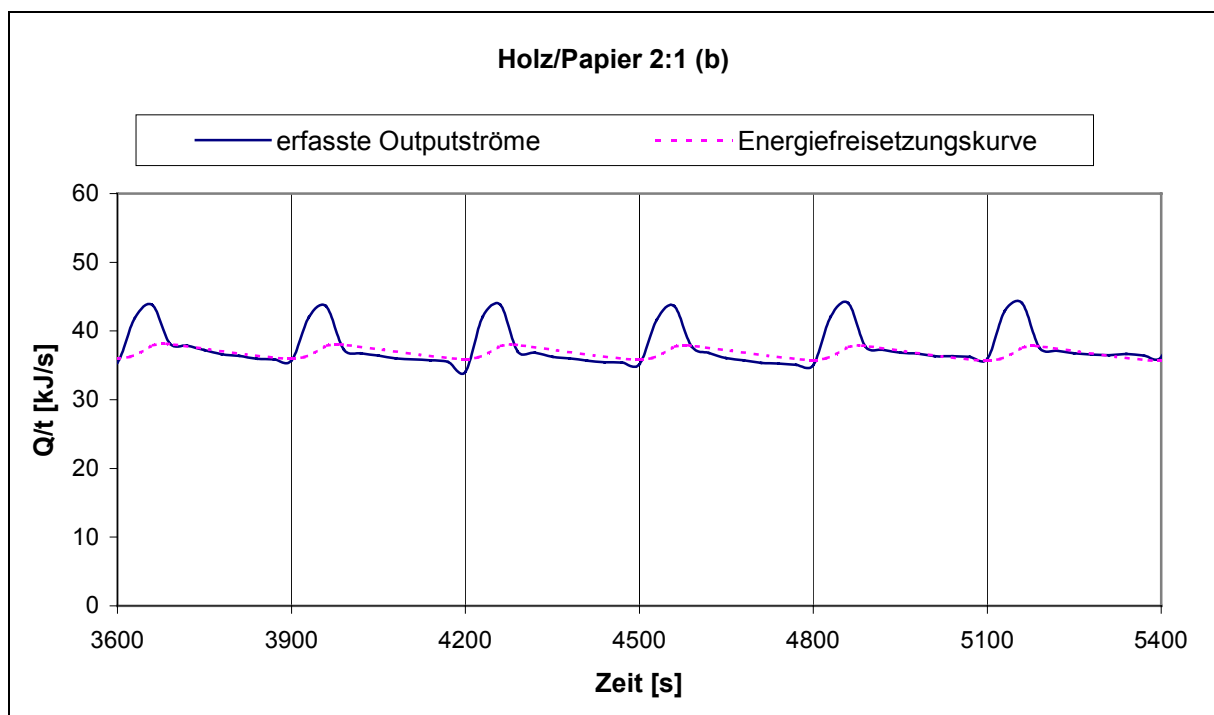


Abbildung A40 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho2Pap1(b)

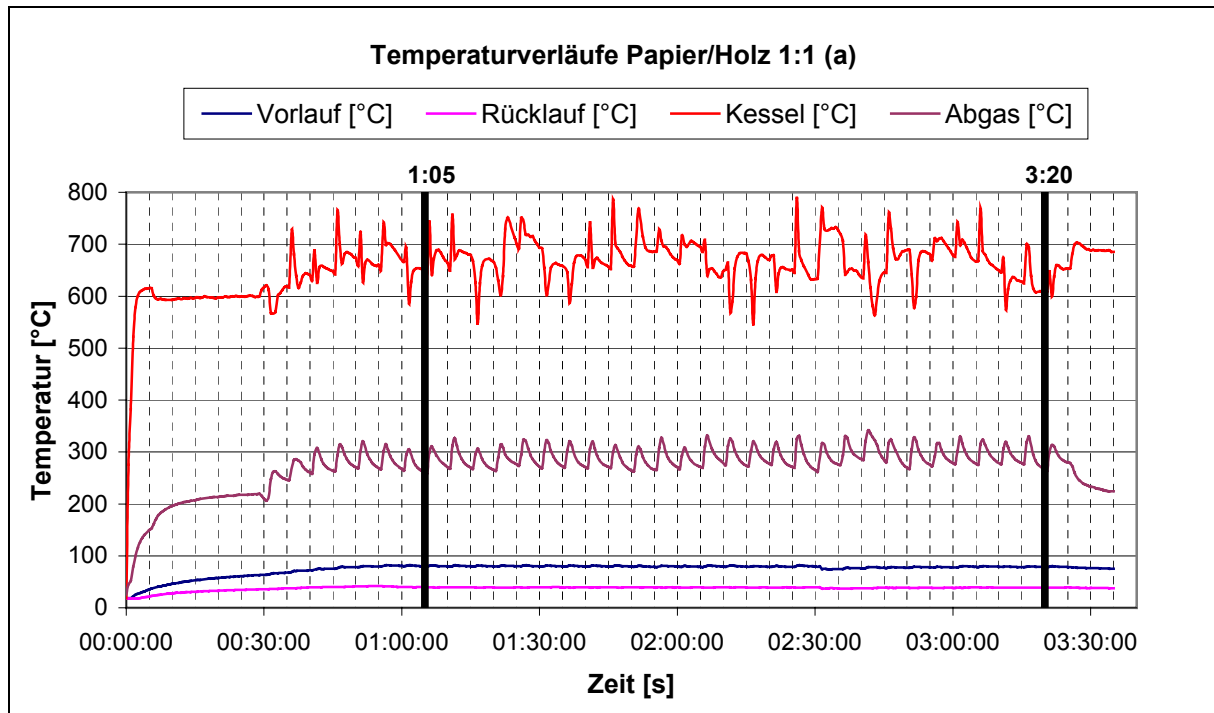


Abbildung A41 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho1Pap1(a) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

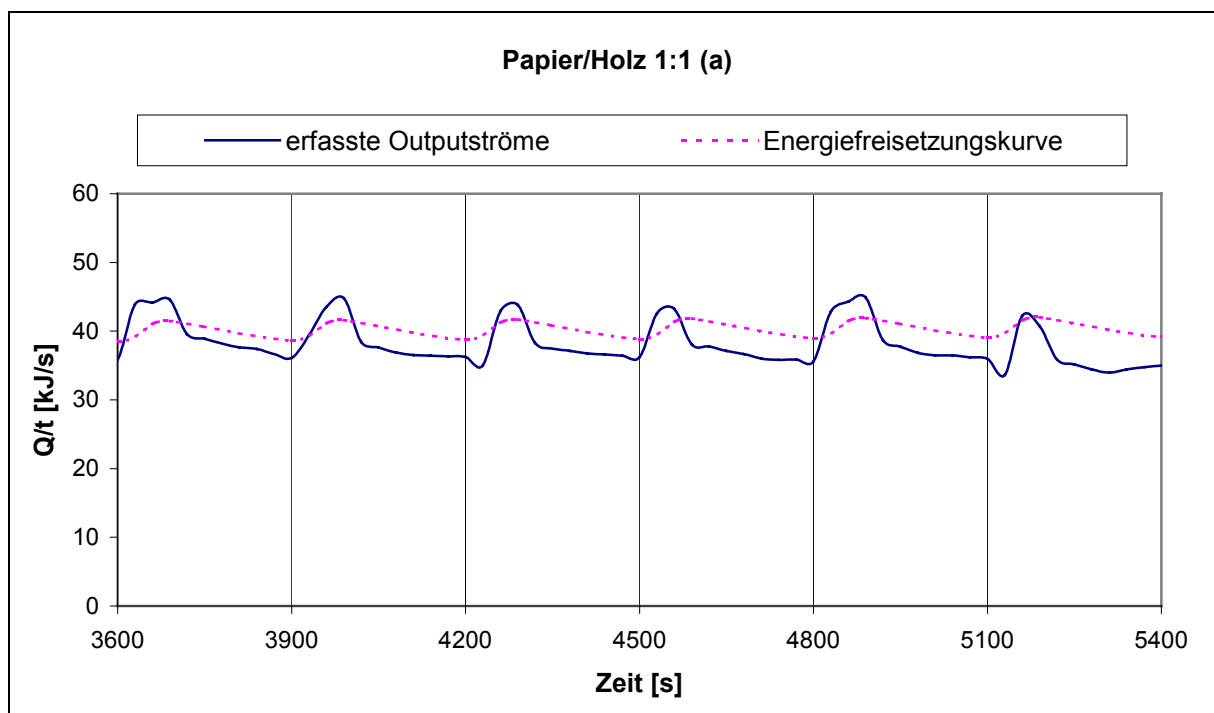


Abbildung A42 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho1Pap1(a)

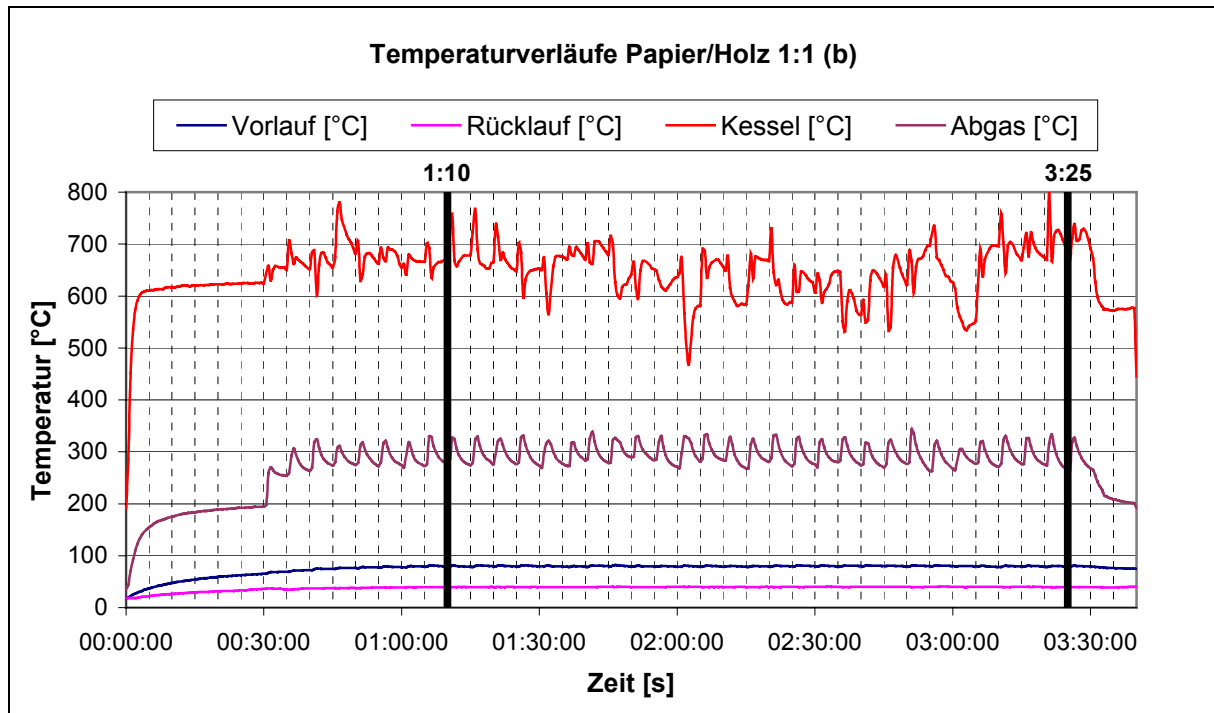


Abbildung A43 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho1Pap1(b) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

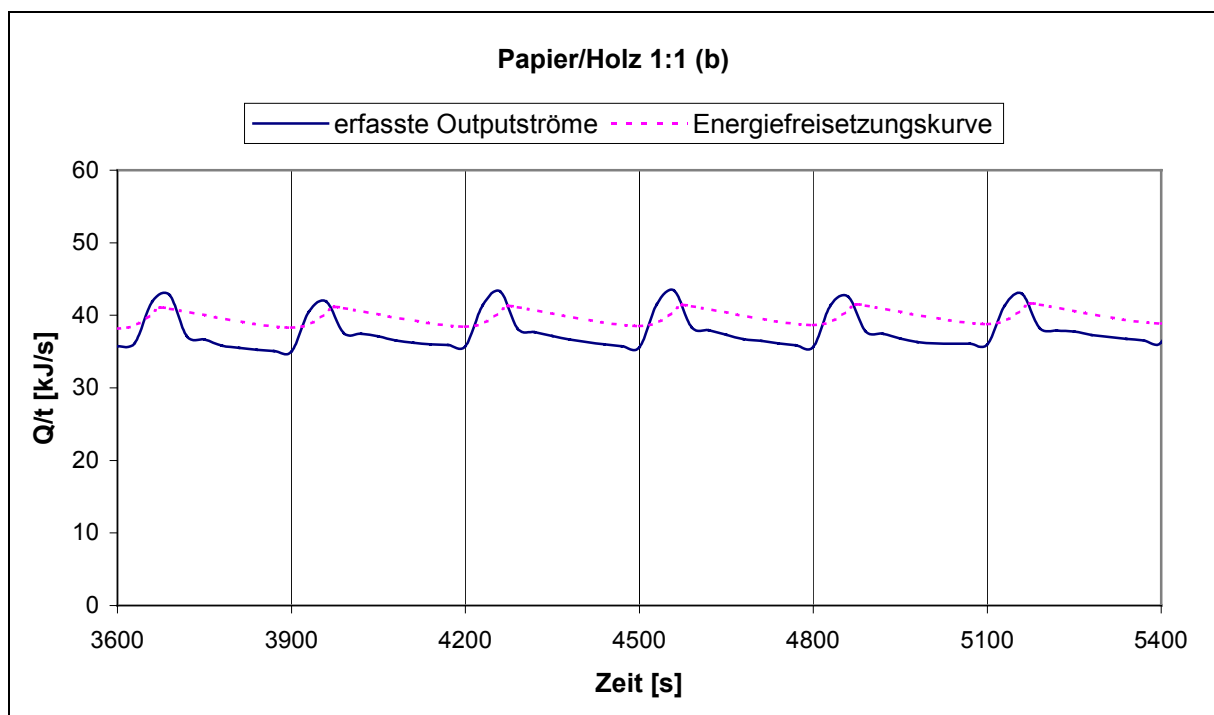


Abbildung A44 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho1Pap1(b)

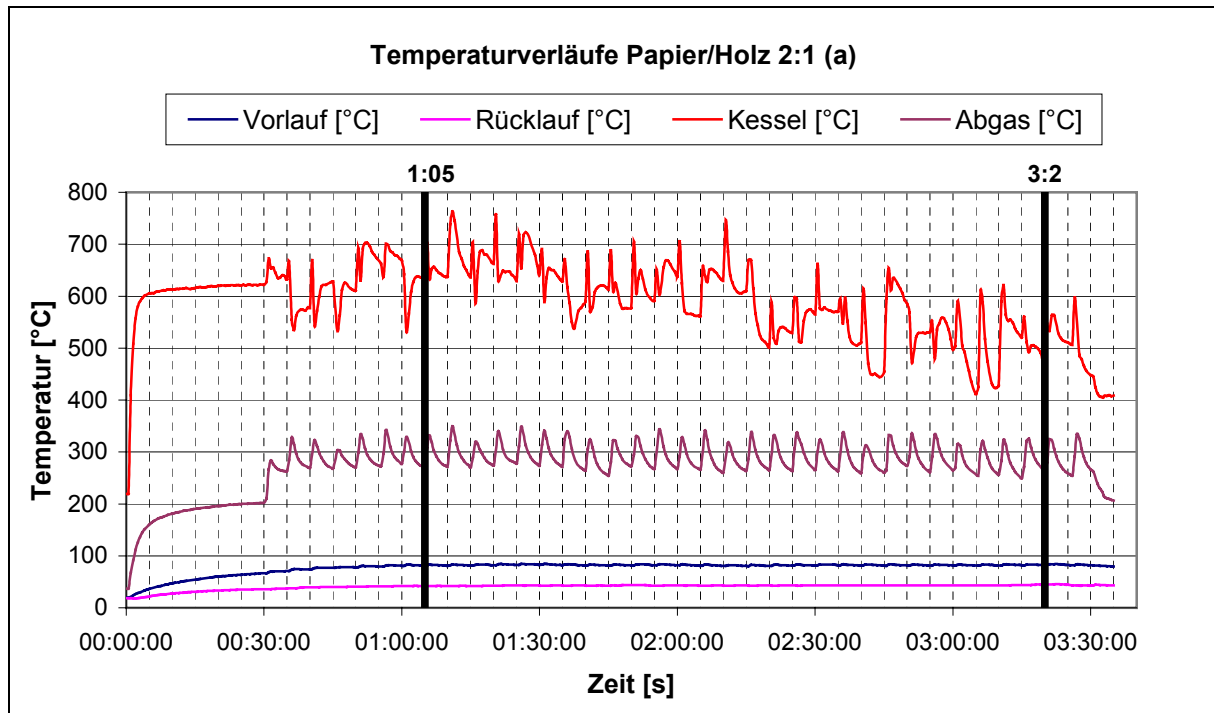


Abbildung A45 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho1Pap2(a) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

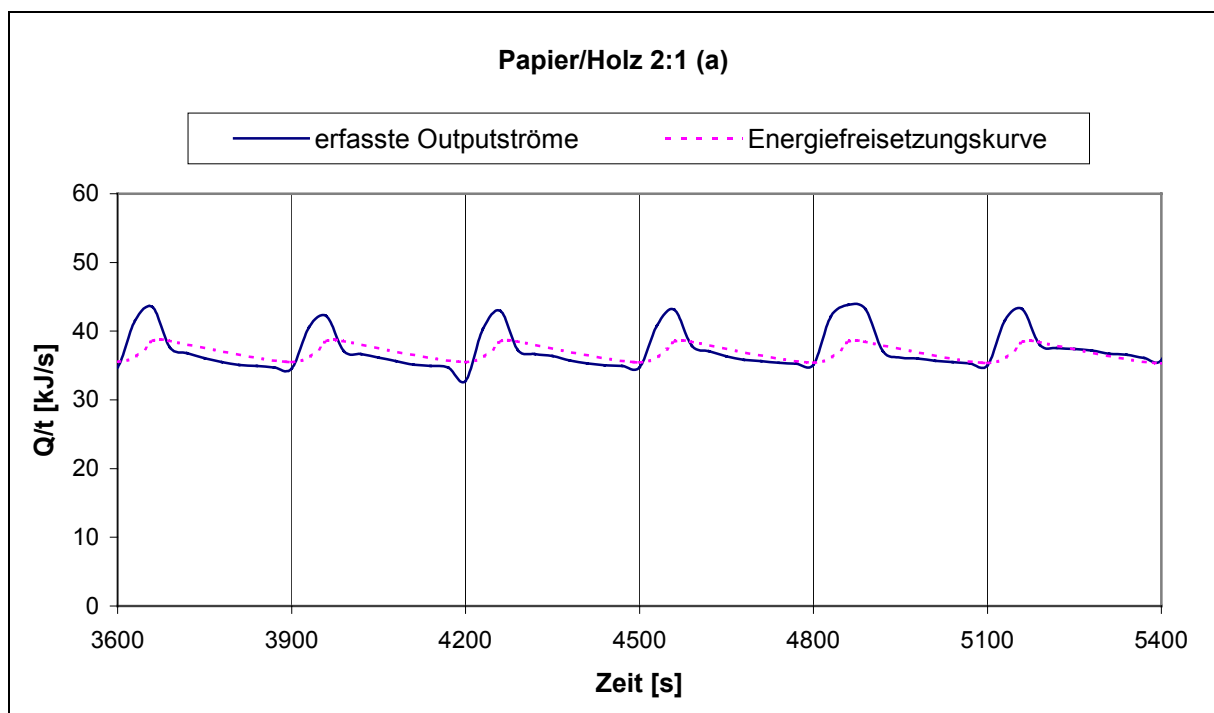


Abbildung A46 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho1Pap2(a)

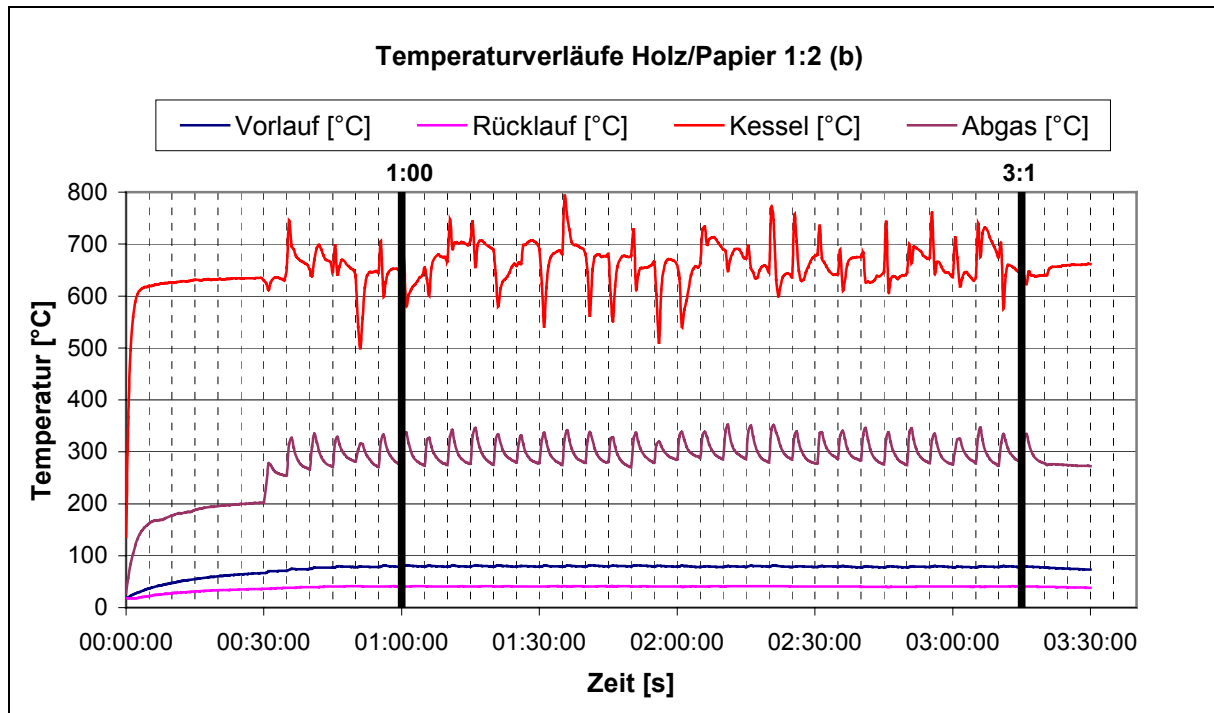


Abbildung A47 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho1Pap2(b) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

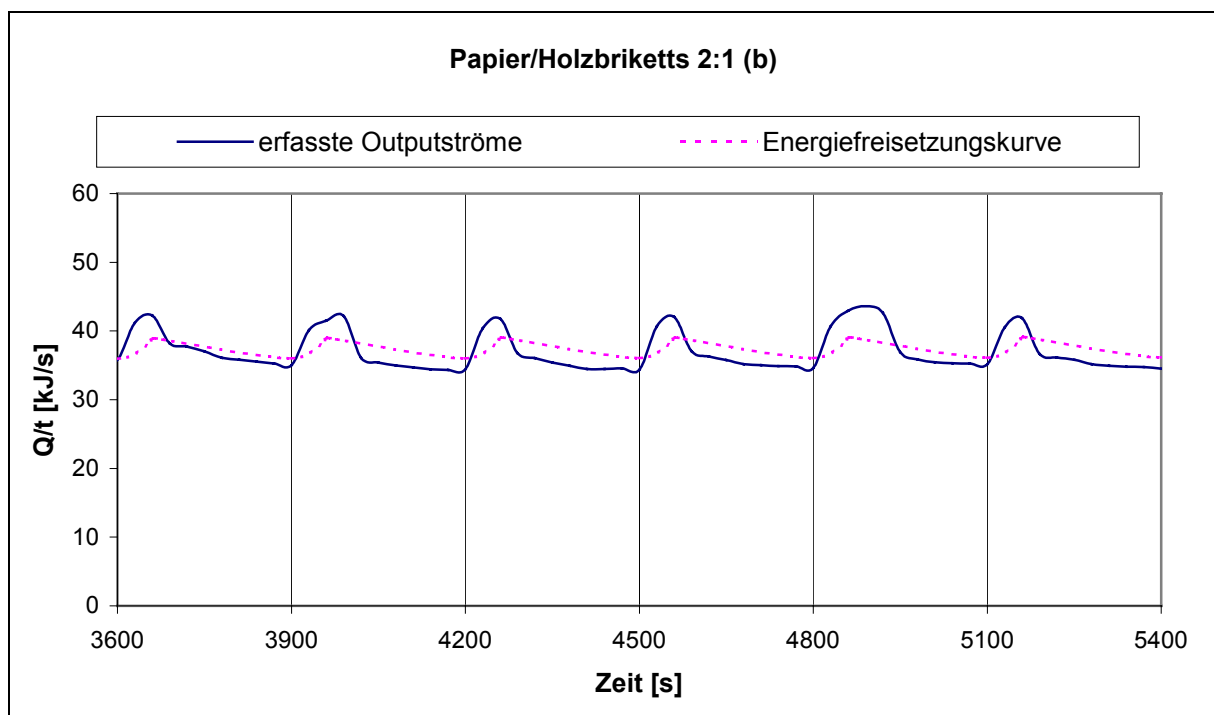


Abbildung A48 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho1Pap2(b)

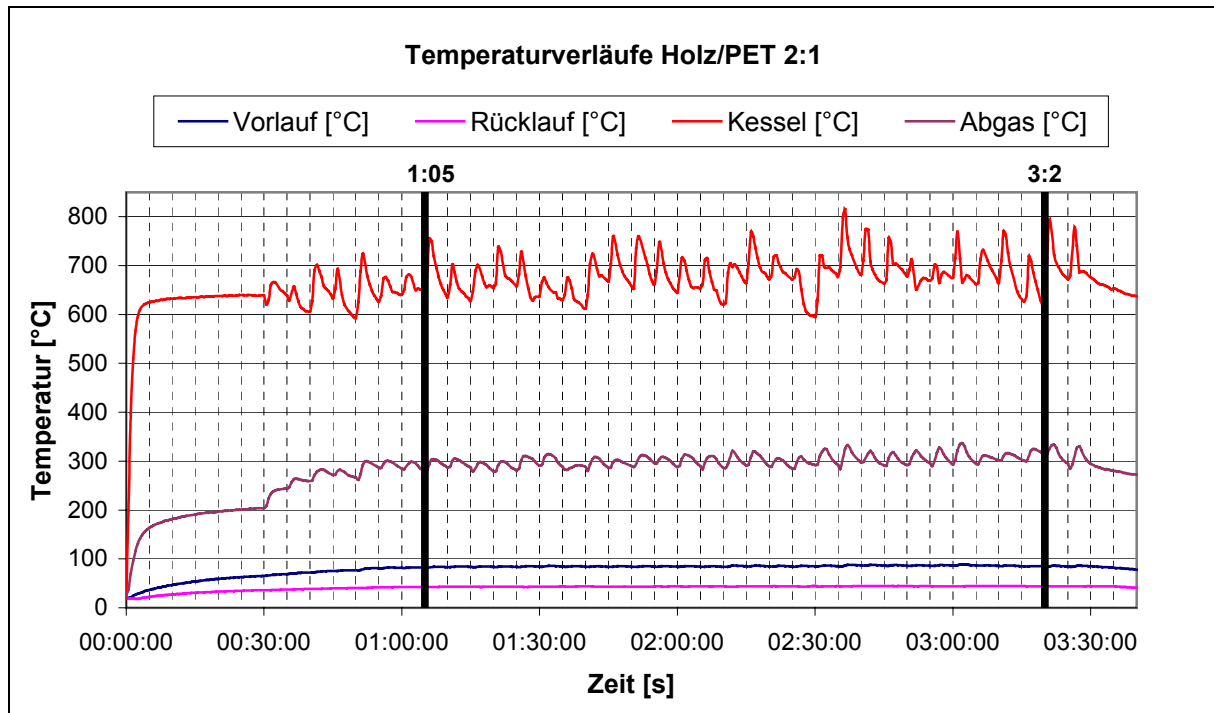


Abbildung A49 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho2Pet1 über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

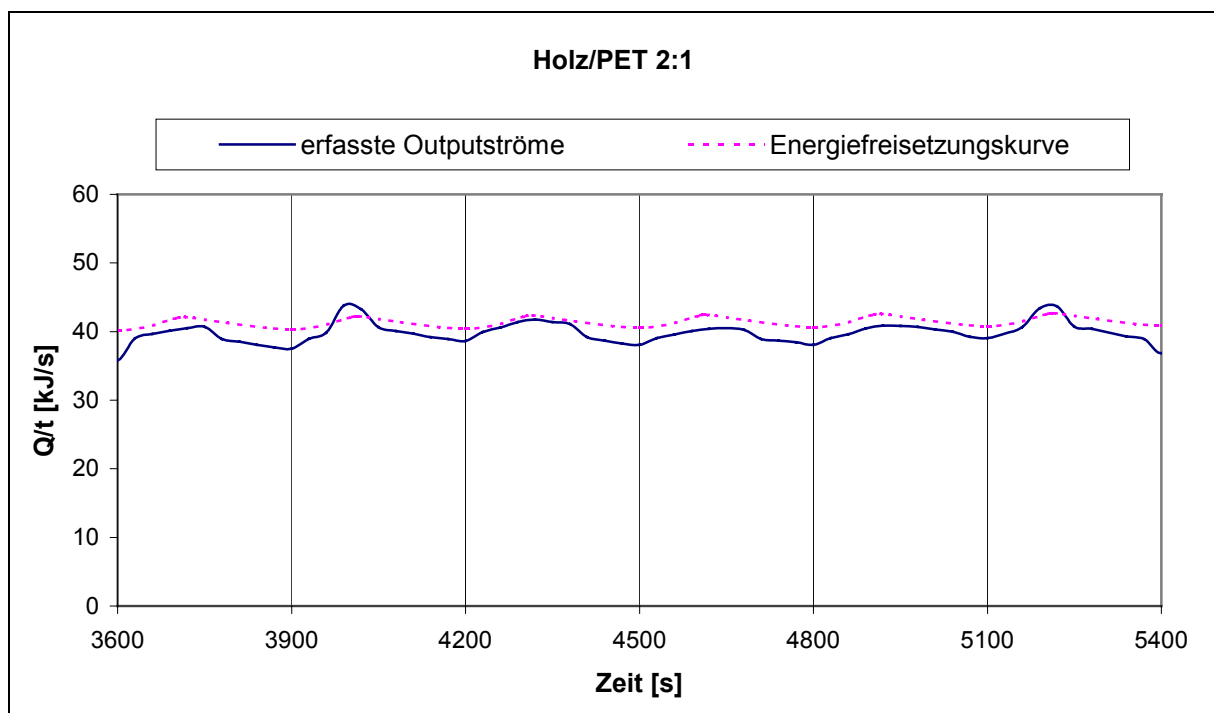


Abbildung A50 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho2Pet1

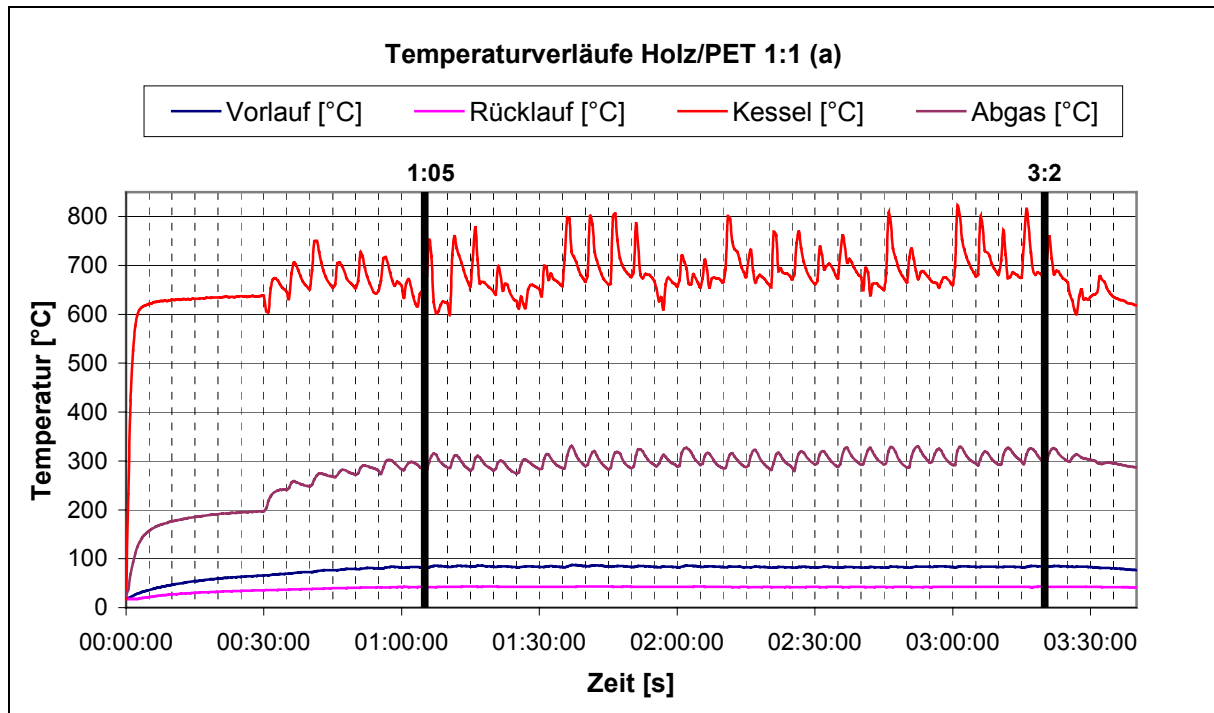


Abbildung A51 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho1Pet1(a) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

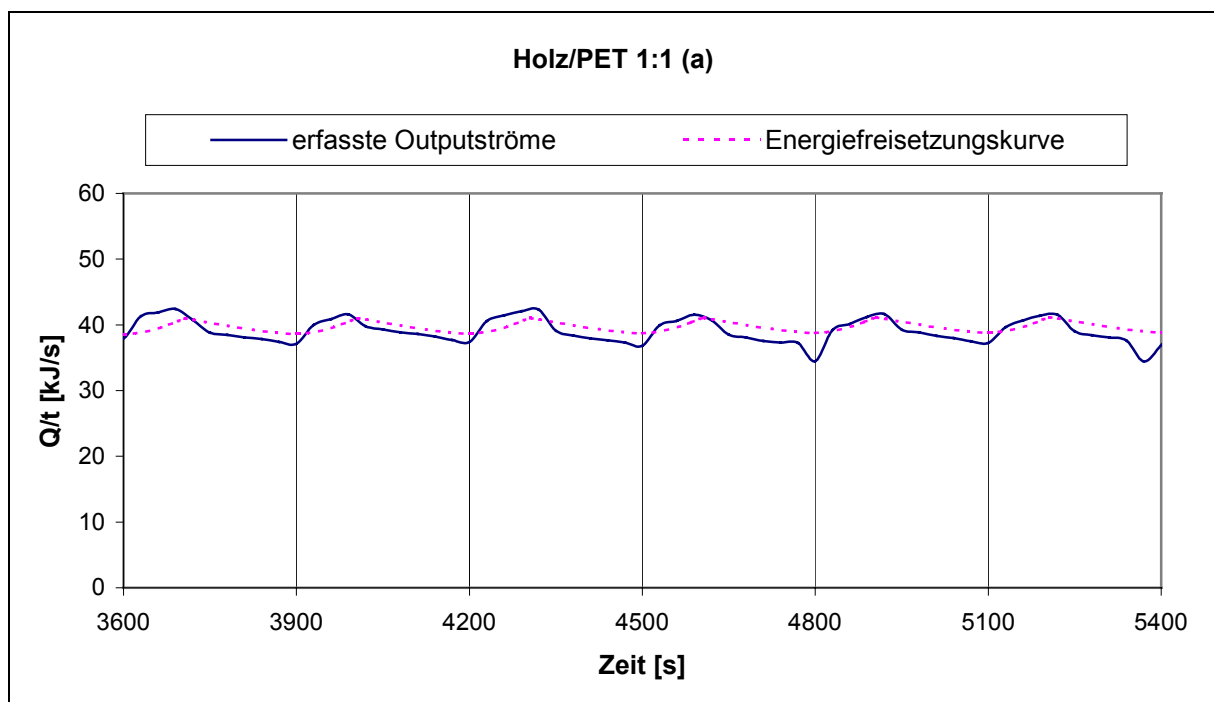


Abbildung A52 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho1Pet1(a)

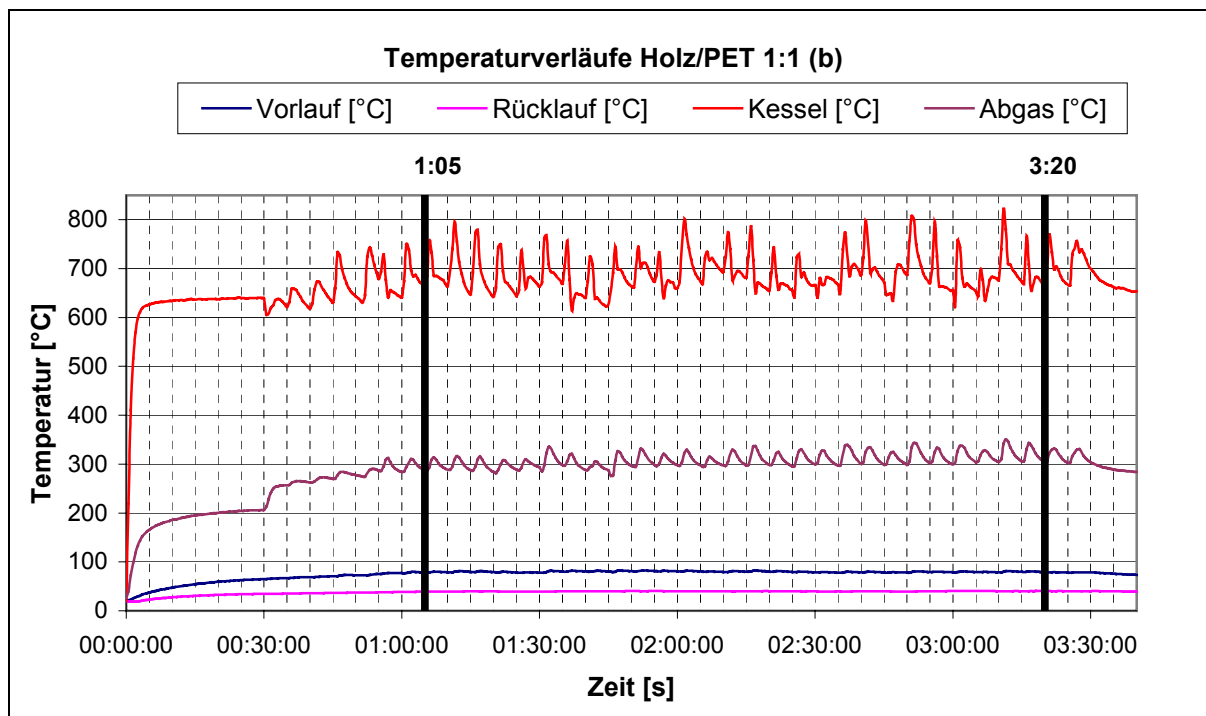


Abbildung A53 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho1Pet1(b) über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

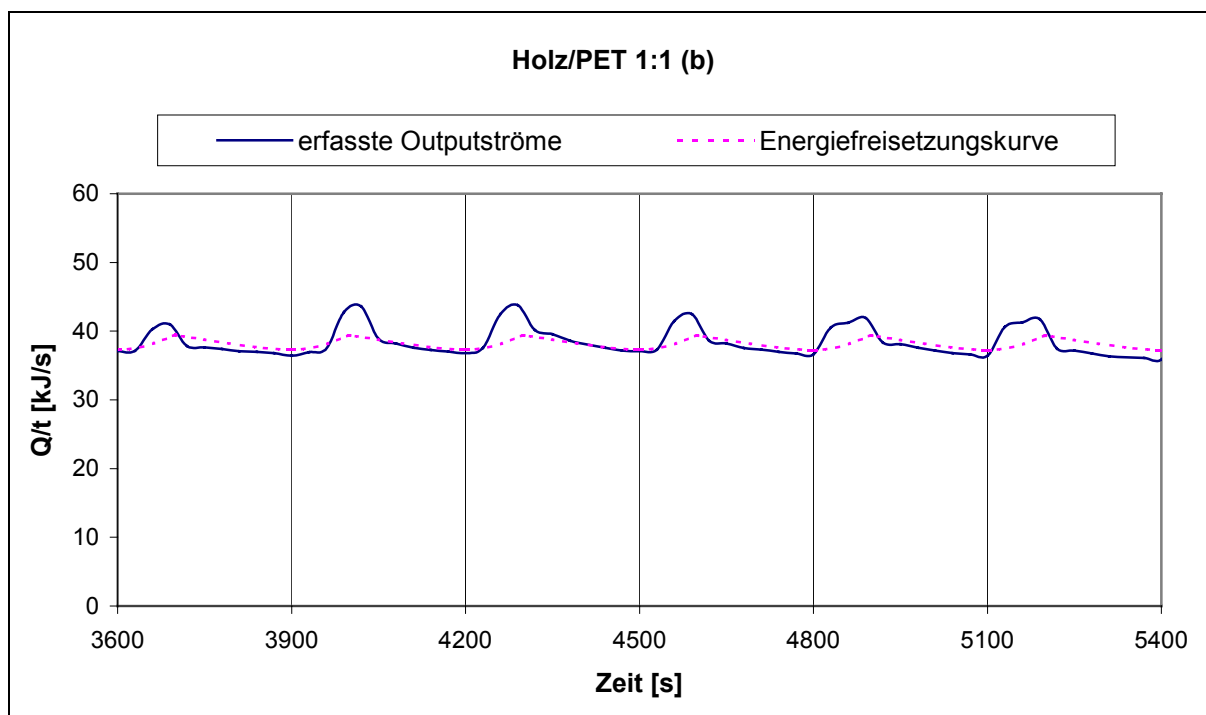


Abbildung A54 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungscurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho1Pet1(b)

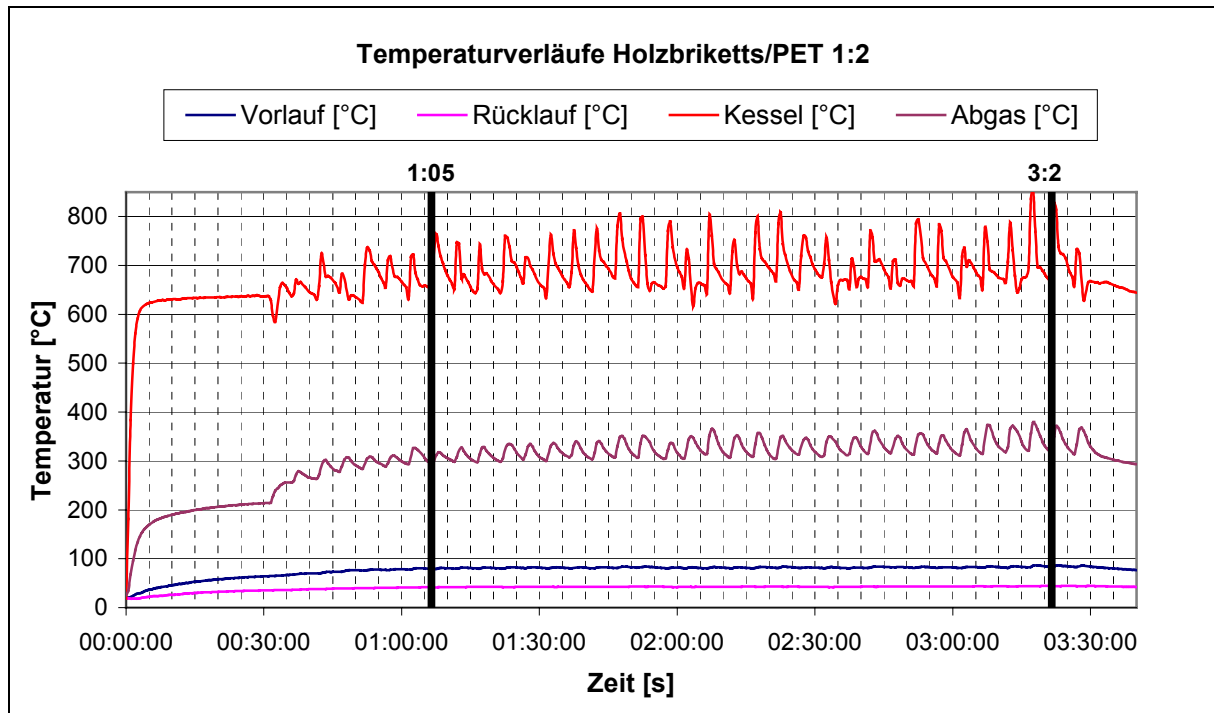


Abbildung A55 Temperaturverläufe bei der Verbrennung von Ho1Pet2 über die Gesamtlänge des Verbrennungsversuches

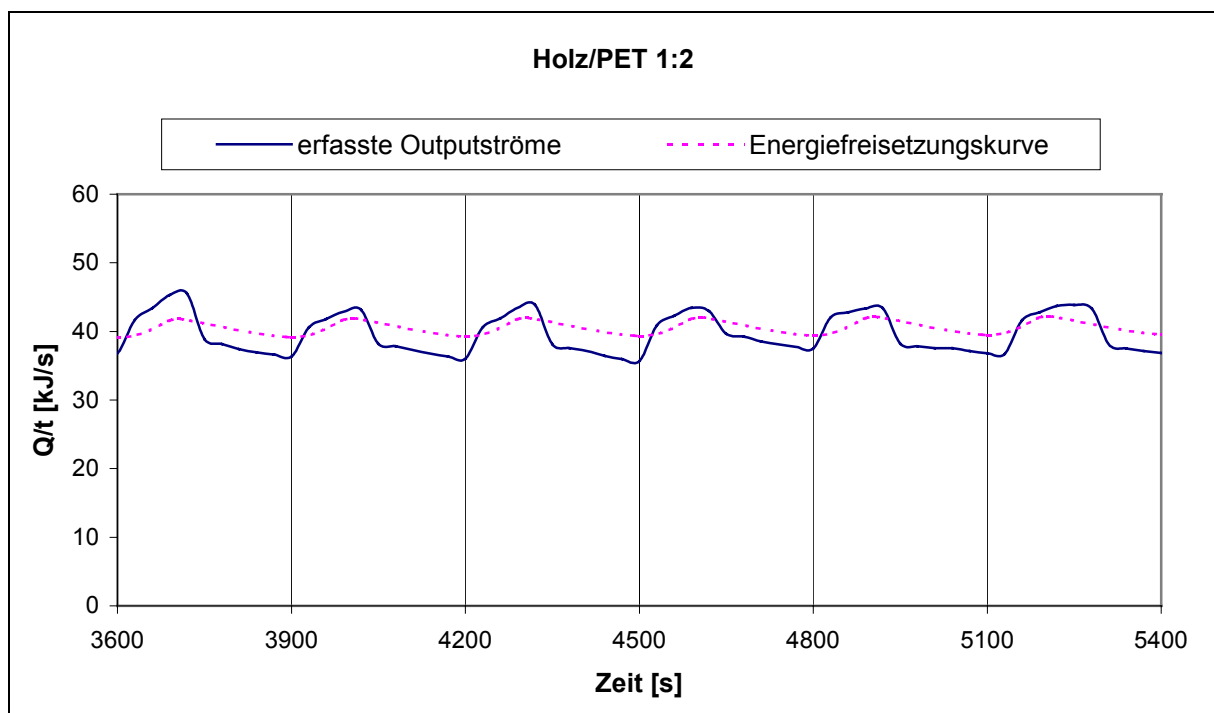


Abbildung A56 Verläufe der charakteristischen Energiefreisetzungskurve und der erfassten Outputwärmeströme bei der Verbrennung von Ho1Pet2

A7 Charakterisierende Größen der untersuchten Brennstoffe

Brennstoff	Hu [kJ/kg]	A	F	Hu _F [MJ/kg]	a _{Zunahme} [kJ/s ²]	a _{Abnahme} [kJ/s ²]	EFW	t _v [s]
Gummi (1)	27.609	2,0	54	25,6	0,0403	0,0206	1,96	1.800
Gummi (2)	28.874				0,0361	0,0174	2,04	
Holzbriketts (1)	17.973	0,6	77	14,5	0,0071	0,0060	1,21	2.100
Holzbriketts (2)	19.020				0,0120	0,0099	1,18	
Mischkunststoffe (1)	30.079	2,1	69	30,5	0,0563	0,0296	1,90	1.800
Mischkunststoffe (2)	30.937				0,0444	0,0295	1,51	
Papier (1)	12.399	17,6	71	12,8	0,0527	0,0179	2,94	1.200
Papier (2)	13.193				0,0597	0,0186	3,21	
PET (1)	19.486	0,8	75	16,0	0,0364	0,0183	1,99	3.000
PET (2)	20.493				0,0346	0,0167	2,07	
Tetra-Packs (1)	18.311	8,8	58	14,7	0,0731	0,0242	3,02	1.500
Tetra-Packs (2)	20.543				0,0564	0,0211	2,67	
Textilien (1)	23.806	1,4	89	23,3	0,0472	0,0238	1,95	2.400
Textilien (2)	23.988				0,0474	0,0243	1,98	
Ho2Pap1 (a)	17.090	6,3	75	13,9	0,0332	0,0111	2,99	1.800
Ho2Pap1 (b)	16.609				0,0308	0,0102	3,02	
Ho1Pap1 (a)	16.118	9,1	74	13,7	0,0416	0,0136	3,05	1.500
Ho1Pap1 (b)	15.814				0,0389	0,0125	3,11	
Ho1Pap2 (a)	14.709	11,9	73	13,4	0,0501	0,0147	3,41	1.200
Ho1Pap2 (b)	14.136				0,0484	0,0127	3,81	
Ho2Pet1	19.698	0,7	76	15,0	0,0176	0,0098	1,80	2.400
Ho1Pet1 (a)	19.014	0,7	76	15,3	0,0221	0,0119	1,86	2.400
Ho1Pet1 (b)	17.647				0,0216	0,0106	2,04	
Ho1Pet2	19.262	0,7	76	15,5	0,0280	0,0139	2,01	3.000

Lebenslauf

28.07.1972 geboren in Hamburg

Schulausbildung

09/1978 – 06/1982 Grundschule Am Heegen, Hamburg

09/1982 – 06/1991 Gymnasium Rahlstedt, Hamburg

Zivildienst

07/1991 – 10/1992 Nußknacker e.V., Hamburg;
Verein zum betreuten Wohnen psychisch Kranker

Studium

10/1992 – 05/1998 Studium Bauingenieurwesen und Umwelttechnik an der
TU Hamburg – Harburg;
Vertiefungsrichtungen Abfallwirtschaft,
Siedlungswasserwirtschaft, Verfahrenstechnik

Berufliche Tätigkeit

12/1998 – 04/2005 Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet
Abfalltechnik, Universität Kassel;
Forschung im Bereich der thermischen Abfallbehandlung;

Seit 05/2005 Projektingenieur bei Umwelttechnik & Ingenieure GmbH,
Hannover

In der Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik sind bisher folgende Bände erschienen:

Thermische Abfallbehandlung
Entwicklung von Technik und Kosten in einer Kreislaufwirtschaft
Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Arnd I. Urban, Prof. Dr.-Ing. B. Bilitewski, Prof.
Dr.-Ing. M. Faulstich
ISBN 3-88122-892-6, 2. Fachtagung, Kassel, 1997

Thermische Abfallbehandlung
Zukunft in Deutschland und Europa
Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. A. I. Urban, Prof. Dr.-Ing. B. Bilitewski, Prof.
Dr.-Ing. M. Faulstich
ISBN 3-89792-003-6, 5. Fachtagung, Kassel, 2000

Konsequenzen für die thermische Restabfallbehandlung
verursacht durch die TASI und das KrW/-AbfG, Martin Friedel,
Universität Kassel, Diss., ISBN 3-89792-057-3, 2001

Thermische Abfallbehandlung 8
Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. A. I. Urban, Prof. Dr.-Ing. B. Bilitewski, Prof.
Dr.-Ing. M. Faulstich
ISBN 3-937022-01-5, 8. Fachtagung, Berlin, 2003

Angepasste Abfallentsorgung für Schwellen- und
Entwicklungsländer, Aber Mohamad, Universität Kassel, Diss.,
ISBN 3-937022-00-7, 2002

Thermische Abfallbehandlung 9
Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. A. I. Urban, Prof. Dr.-Ing. B. Bilitewski, Prof.
Dr.-Ing. M. Faulstich
ISBN 3-937022-02-3, 9. Fachtagung, Berlin, 2004