

15. VDI-Fachkonferenz
14.06. - 15.06.2016, Berlin

Feuerung und Kessel - Beläge und Korrosion - in Großfeuerungsanlagen

Beschreibung des Brennstofftransports mit „einfachen“ Gleichungen

Martin H. Zwiellehner, Dr. Ragnar Warnecke, Florian Grafmans, Volker Müller

Inhalt

1	Einleitung, Problemstellung und Intention.....	4
2	Randbemerkungen.....	6
2.1	Randbemerkungen zu den betrachteten Anlagen.....	6
2.2	Randbemerkungen zur Brennstoffsituation.....	8
2.3	Randbemerkungen zu den durchgeführten Versuchsfahrten	8
3	Allgemeines zur Brennstoffbeschickung in MVA	10
3.1	Stand der Technik.....	11
3.2	Beschickvorgang der Stößelbeschickung.....	12
3.3	Problematisches Dosierverhalten der Stößelbeschickung	15
3.4	Brennstoffaufgabe: Geometrie & Kennzahlen.....	17
4	Brennstoffe	19
4.1	Der Heizwert und dessen Einfluss	20
4.2	Physikalische Eigenschaften.....	21
4.2.1	Förderfähigkeit	21
4.2.2	Korngröße	22
4.2.3	Dichte	22
4.3	Versuche zur Ermittlung der Brennstoffdichten außerhalb der Feuerung	23
4.3.1	Dichte im Hausmüllbehälter	23
4.3.2	Dichte im Müllfahrzeug bei der Anlieferung.....	25
4.3.3	Portalpresse	31
4.4	Versuche zur Ermittlung der Brennstoffdichten im Brennstoffaufgabebereich	33
4.5	Zusammenfassung der Versuche zur Ermittlung der Brennstoffdichten.....	35
5	Versuche zur Brennstoffbeschickung.....	38
5.1	Videobildbasierte Beobachtungen.....	38
5.2	Ermittlung der Kompressibilität.....	41
5.2.1	Versuche beim Anfahren	41
5.2.2	Versuche im laufenden Betrieb	43
5.3	Variation des Beschickungshubs	43
5.3.1	Einstellparameter für Hublänge und Festlegung der Hubposition	44
5.3.2	Versuche und Ergebnisse	46
5.4	Ermittlung des Mitnahmefaktors	47
5.5	Ergebnis der Versuche	48

6	Numerische Ermittlung von Brennstoffmassenstrom und -dichte im Aufgabebereich.....	53
6.1	Evidenzbasierter bzw. datengestützter Ansatz.....	53
6.2	Geometrisch-physikalischer Ansatz.....	64
6.3	Vergleich der beiden Lösungsmöglichkeiten	75
7	Zusammenfassung der Ergebnisse	77
8	Ausblick und weitere Vorgehensweise.....	78
8.1	Feuerleistungsregelung	78
8.2	Ausblick: Rost - Geometrie & Kennzahlen	82
8.3	Combate	83
9	Literatur.....	84
10	Anhang.....	86
10.1	Standortauswahl.....	86
10.2	Betriebsdaten und allgemeine Angaben zur Verbrennungslinie	89
10.3	Feuerungsleistungsdiagramme.....	91
10.4	Prüfung wirksame Hublänge Aufgabestößel.....	92

1 Einleitung, Problemstellung und Intention

Anlagen mit heterogenen Brennstoffen sind insbesondere Müll-, Biomasse- und Ersatzbrennstoff-Verbrennungsanlagen. Allen ist gemein, dass der heterogene Brennstoff zu ungleichmäßigen Verbrennungszuständen führt. Diese wiederum beeinflussen das Freisetzen von emissions- und korrosionsrelevanten Schadstoffen und können darüber hinaus zu Zuständen im Anlagenbetrieb führen, die einerseits erhöhte Schadstoffe freisetzen können (z.B. CO) und andererseits den Betrieb erschweren und in seiner Effizienz beeinträchtigen können (z. B. Überschüttungen auf dem Rost, Bypass-Zustände um die Abgasreinigung herum, Korrosionen im Kessel).

Die negativen Zustände können durch eine optimale Feuerungsregelung vermieden oder erheblich reduziert werden. Das wesentliche Problem für Feuerungsregelungen stellt die Unkenntnis des tatsächlichen aktuellen Heizwertes und Massenstromes in die Feuerung sowie des Brennstoffinventars auf dem Rost dar. Diese Größen können bisher nur ungenau bzw. nur als Mittelwert über einen großen Zeitraum (mehrere Stunden) und nicht on-line ermittelt werden (Heizwert und Brennstoffmassenstrom) bzw. quasi gar nicht bestimmt werden (Brennstoffinventar auf dem Rost).

Um hier genauere Werte zu erhalten, wurde in der Vergangenheit das Feuerungsmodell CombAte für Rostfeuerungen entwickelt. Eine Kopplung dieses Modells mit der Feuerungsregelung kann zeitnahe Informationen über die genannten fehlenden Größen geben. In der Vergangenheit wurde bereits eine solche Kopplung via OPC realisiert und sogar schon mit der Feuerungsleistungsregelung (FLR) an einer realen Müllverbrennungsanlage (MVA) erprobt. Die Ergebnisse waren vielversprechend. Siehe dazu [25] und [26]. So kann CombAte zum Parametrieren der Feuerungsregelung unabhängig vom Betrieb der Anlage genutzt werden und weiterhin zur Bestimmung der fehlenden Größen im Betrieb herangezogen werden.

Schwierigkeiten gab es jedoch damit, dass einzelne Teilmodelle von CombAte noch nicht der notwendigen Präzision genühten bzw. von in der Praxis nicht beeinflussbaren Randbedingungen ausgegangen sind.

Andererseits steht permanent das Thema im Raum, dass die Parametrierung einer FLR für eine Optimierung bei der enormen Parametervielfalt noch aufwändig manuell und ausschließlich basierend auf Expertenwissen und empirischen Ermittlungen durchgeführt werden muss.

Somit ergibt sich einerseits noch Bedarf an der Optimierung der Teilmodelle und andererseits noch an der Entwicklung von automatisierten Parametrierungsalgorithmen für die FLR.

Das gegenständliche Vorhaben ist in das Forschungsvorhaben VOKos bzw. dort in das Teilprojekt „Feuerung“ eingebettet. Eine detaillierte Beschreibung zum Vorhaben ist unter [27] einsehbar. Ein Schwerpunkt des Teilprojekts „Feuerung“ soll sein, den mechanischen Transport des Brennstoffes - insbesondere *auch* an der Brennstoffaufgabe - zu untersuchen um eine verlässliche Modellierung aufzubauen um diese ins CombAte implementieren zu können. Denn wie bereits oben erwähnt, bietet CombAte u. a. in diesem Bereich Optimierungspotential.

Konkret bedeutet dies 2 Ansatzpunkte, die in CombAte bis dato noch nicht optimal gelöst sind:

- Der in die Feuerung aufzugebene Brennstoff wird in CombAte als Massenstrom in [t/h] parametrieret. Da dieser Brennstoffmassenstrom jedoch nicht on-line gemessen werden kann, ist dies ein großes Defizit bei der Kopplung von Modell und Realität. Das Modell geht also unter Umständen von den falschen Randbedingungen aus, was zu einer Verfälschung der Simulationsergebnisse führt.
- Konstruktive (Höhe Aufgabemaul, Höhe Aufgabeschieber usw.) und betriebliche (Hublänge, Endlagen usw.) Parameter der Brennstoffaufgabe gehen in das CombAte-Modell bis dato noch nicht ein. Es ist jedoch anzunehmen, dass ebendiese Parameter entsprechenden Einfluss auf den dosierten Brennstoffmassenstrom haben.

Zur Lösung der 2 Problempunkte ist es also notwendig, dass in das Modell CombAte ein Berechnungsalgorithmus implementiert wird, der den beschickten Brennstoffmassenstrom *ausschließlich* auf Basis der konstruktiven und betrieblichen Parameter berechnen kann.

Würde dies gelingen, so würden Modell und Realität diesbezüglich immer übereinstimmen.

Dieser Algorithmus muss natürlich auf alle Müllverbrennungsanlagen mit Rostfeuerung übertragbar sein. Somit ist es essentiell, dass die Variationen solcher Anlagen bekannt sind und entsprechend berücksichtigt werden.

Auch die physikalischen Vorgänge (z.B. Kompressibilität des Brennstoffs) bzgl. des Feststofftransports müssen bekannt sein, damit diese mathematisch beschreibbar werden.

Schlussendlich ist es der Brennstoff (= Abfall) selbst, dessen Charakterisierung in Bezug auf den relevanten Feststofftransport die größten Unsicherheiten verursacht. Für „Norm-Brennstoffe“ existiert eine Vielzahl an Untersuchungen - für den Brennstoff Restabfall existiert diesbezgl. nur sehr wenig belastbare Literatur.

2 Randbemerkungen

Diese Randbemerkungen sollen aufzeigen, welche Maßnahmen und Überlegungen im Vorfeld getroffen worden sind, um möglichst exakte und repräsentative Analysen und Versuche durchführen zu können. Auch wenn in einigen Punkten an dieser Stelle dem eigentlichen Thema vorgegriffen wird, so scheint es doch zielführend und notwendig, diese Randbemerkungen bereits am Beginn des Textes zu machen.

2.1 Randbemerkungen zu den betrachteten Anlagen

Behandelt und betrachtet werden ausnahmslos konventionelle, großtechnische Müllverbrennungsanlagen, deren Brennstoff ausschließlich aus Siedlungs-, Gewerbe- und Produktionsabfällen gem. Definition aus [7] besteht. Für Anlagenstandorte ausserhalb Deutschlands ist diese Definition nicht uneingeschränkt übertragbar, sie gilt jedoch sicherlich sinngemäß. So genannte Ersatzbrennstoff- bzw. Sekundärbrennstoff-Kraftwerke (EBS-KW, SBS-KW) und Biomassekraftwerke werden in den vorliegenden Untersuchungen nicht behandelt.

Für die Durchführung der im Abschnitt 6 beschriebenen numerischen Ermittlung des Brennstoffmassenstroms und der Dichte im Aufgabebereich stützt sich dabei insbesondere der Abschnitt 6.1 auf Daten, die aus verschiedenen Anlagen stammen. Um belastbare Aussagen treffen zu können, scheint es unabdingbar zu sein, dass die betrachteten Anlagen zum einen ihrer Brennstoffsituation vergleichbar sind und zum anderen die maximal mögliche Bandbreite an Anlagengrößen, Rosttechnologien und Feuerraumgeometrien - möglichst auch inklusive den Extremwerten - abdecken.

Um die betrachteten Anlagen möglichst detailliert untersuchen zu können, sollten folgende Unterlagen vorliegen - separiert für jede Verbrennungslinie (VL) am entsprechenden Anlagenstandort:

- Betriebsdaten aus dem laufenden Anlagenbetrieb mit gewissen Anforderungen an Qualität und Quantität.
- Maßstabsgetreue (Konstruktions)Zeichnungen von Aufgabeeinrichtung, Rostsystem, Feuerung und Kessel.
- Allgemeine Angaben zur Verbrennungslinie.

Die oben erwähnten Anforderungen an die Betriebsdaten stellen sich wie folgt dar:

- Daten aus dem laufenden Anlagenbetrieb, möglichst ohne Sonderzustände wie geplante oder ungeplante Stillstände bzw. nicht unmittelbar nach Beginn oder kurz vor Ende der Reisezeit, da diese Zeiträume den regulären Anlagenbetrieb oft nicht repräsentieren.
- Betrieb mit konstantem Leistungs-Sollwert, denn nur bei konstantem Leistungs-Sollwert gilt der Zusammenhang, dass ein definierter Brennstoffmassenstrom (bei einem definierten Heizwert) auch in einem definierten Dampfmassenstrom resultiert.
- Möglichst langer Zeitraum soll vorliegen um eine max. mögliche Schwankungsbreite in den Brennstoffqualitäten abzudecken. Als Mindestkriterium wurde 5 x 24 h (als nicht zusammenhängender Zeitraum) angesetzt und als optimaler Zeitraum 1 - 6 Monate. Die Datensätze sollten jedenfalls die Zeiträume des Wechsels vom Wochenendbetrieb ohne Anlieferung auf den Beginn der Frischmüllanlieferung (in der Regel Montag Früh bzw. Vormittag) abdecken.
- Da es aufgrund der Datenmenge nicht möglich ist, Momentanwerte zu betrachten, ist es unabdingbar die Daten einer geeigneten Mittelwertbildung zuzuführen. Als geeignete Zeitbasis hierfür wurden 1-Minuten-Mittelwerte oder 5-Minuten-Mittelwerte evaluiert. Punktuell ist es jedoch notwendig, dass einige Datenpunkte in einer höheren zeitlichen Auflösung vorliegen, da ansonsten gewisse Effekte durch die Mittelwertbildung ausgeblendet würden. Als Beispiel hierfür seien die Weg- bzw.

Positionsmessungen von hydraulischen Antrieben genannt. Diese bewegen sich oft mit Geschwindigkeiten von > 10 mm/Sekunde bei Hublängen von < 200 mm. Da eine exakte Ermittlung der Hubanzahl essentiell wichtig ist, würde selbst eine Zeitbasis von 1-Minuten-Mittelwerten bereits zu einer nicht akzeptablen Verfälschung der Hubanzahl führen.

Eine Auflistung der abgefragten Betriebsdaten und die allgemeinen Angaben zur Verbrennungslinie finden sich im Anhang unter 10.2.

Die Betriebsdaten, die konstruktiven Unterlagen und die allgemeinen Angaben zur Verbrennungslinie können nur vom unmittelbaren Anlagenbetreiber geliefert werden und stellen höchst sensible und z. T. vertrauliche Informationen dar. Aus diesem Grund musste mit allen Betreibern eine Vertraulichkeitsvereinbarung geschlossen werden, mit der Auflage, dass Anlagenstandorte nur anonymisiert und Betriebsdaten nur normiert wiedergegeben und ggf. veröffentlicht werden.

Angefragt wurden in diesem Zusammenhang 65 Anlagenstandorte in 11 europäischen Ländern mit in Summe 160 Verbrennungslinien.

Die Kriterien, um die Unterlagen in der erforderlichen Qualität und Quantität überhaupt erhalten zu können, sind:

- Kriterium Nr. 1: Es muss sich um eine großtechnische MVA handeln, die sich im Regelbetrieb befindet, d.h. keine Versuchsanlage bzw. keine Anlage im Labormaßstab o.ä. Die Anlage soll sich auch nicht in einem eventuellen Probetrieb und / oder in der Gewährleistungsphase eines Anlagenbauers befinden.
- Kriterium Nr. 2: Ein direkter Zugang zum unmittelbaren Betreiber der Anlage muss vorhanden sein. Ein gewisses Vertrauensverhältnis ist ebenfalls Voraussetzung.
- Kriterium Nr. 3: Der betreffende Anlagenstandort muss über ein professionelles Betriebsdatenerfassungssystem (BDE-System) verfügen, d.h. die Betriebsdaten werden über lange Zeiträume archiviert.
- Kriterium Nr. 4: Dieses BDE-System muss in der Lage sein, beliebige Datensätze für beliebige Zeiträume in ein gebräuchliches Dateiformat - wie z.B. das XLS-, XLSX- oder das CSV-Format - zu exportieren. Die Zeitbasen für die Datenexporte müssen für eine Auswertung taugliche Mittelwertbildungen vorsehen, wie z.B. 1-Sekunden-Mittelwerte, 1-Minuten-Mittelwerte und / oder 5-Minuten-Mittelwerte.
- Kriterium Nr. 5: An jeder Anlage muss Messtechnik in einer definierten (Mindest-)Quantität und Qualität verbaut sein.
- Kriterium Nr. 6: Innerhalb der Anlagendokumentation müssen maßstabgetreue (Konstruktions-)Zeichnungen von Rost, Brennstoffaufgabe inkl. Schacht und Trichter, Feuerung und Kessel vorhanden sein.
- Kriterium Nr. 7: Zur detaillierten Untersuchung der Brennstoffdosierung und des Brennstofftransports müssen geeignete Informationen über die erfolgte Dosierbewegungen und die erfolgten Transportbewegungen vorliegen. Konkret bedeutet dies, dass bekannt sein muss, wieviel Dosier- bzw. Transportvorgänge pro Zeiteinheit durchgeführt wurden.
- Kriterium Nr. 8: Als wohl wichtigstes Kriterium gilt, dass seitens der Geschäftsführung des jeweiligen Standortes eine schriftliche Freigabe zur Herausgabe der Betriebsdaten und technischen Zeichnungen erteilt werden muss.

Eine Auswertung über die angefragten Anlagenstandorte und die schlussendlich übernommenen Verbrennungslinien findet sich im Anhang unter 10.1.

Anmerkung: Hinsichtlich einer unterschiedlichen Feuerraumgeometrie (Gleichstrom-, Mittelstrom-, Gegenstromfeuerung) wurde bis dato noch nicht unterschieden, da davon auszugehen ist, dass die Feuerraumgeometrie für die Brennstoffaufgabe und den Brennstofftransport eine eher untergeordnete Rolle spielt.

Als abschließende Bemerkung sei gestattet, dass es trotz dem alle Betriebsdaten mit größter Sorgfalt evaluiert wurden, nicht konsequent auszuschließen ist, dass es innerhalb der bewerteten Betriebsdaten zu Unregelmäßigkeiten gekommen ist, die vorerst einmal unbemerkt bleiben und u. U. zu einer Verfälschung von Ergebnissen führen. Wenn, dann kann es sich hierbei nur um punktuelle Einzelereignisse handeln. Es ist nicht davon auszugehen, dass systematische Fehler an allen untersuchten Anlagen gemacht wurden.

2.2 Randbemerkungen zur Brennstoffsituation

Dem geneigten Leser mit Praxisbezug wird in weiterer Folge des Öfteren auffallen, dass gewisse Randbedingungen angenommen werden, die nicht unmittelbar auf *jede* an der betreffenden Anlage vorkommende Brennstoffsituation übertragbar ist. Als plakatives Beispiel sei an dieser Stelle die unterschiedliche Zusammensetzung zweier Brennstoffgemische genannt: Hausmüll Sperrmüll bzw. der der thermischen Behandlung zugeführte Restmüllanteil darus. Diese beiden Brennstoffe unterscheiden sich sowohl in ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften grundlegend und weisen demnach auch in ihrer Fließ- und Förderfähigkeit deutliche Unterschiede auf. Diese beiden Brennstoffe bzw. die annähernd unendlichen Kombinationen mit weiteren Brennstoffen bzw. Brennstoffanteilen (z.B. gewerbliche Siedlungsabfälle, Produktionsabfälle) müssen von den thermischen Abfallbehandlungsanlagen problemlos bewältigt werden. Dies bedingt zum Teil eine grundlegend andere Parametereinstellung an der Feuerung - je nach vorherrschender Brennstoffzusammensetzung.

Da es beinahe unmöglich erscheint, Anlagenzustände und Betriebsparameter für jede vorherrschende Brennstoffsituation aufzunehmen und zu analysieren, wird durch zwei Maßnahmen versucht, einen möglichst repräsentativen Querschnitt über die Variationen der Brennstoffe abzubilden:

- eine sorgfältige Auswahl des Zeitraumes für Versuchsfahrten und Betriebsdatenanalysen, d.h. auch Berücksichtigung von saisonalen Einflüssen,
- ein möglichst langer Zeitraum für Betriebsdatenanalysen und Versuchsfahrten.

Bei den gegenständlichen Untersuchungen wird also immer ein repräsentativer Mittelwert des an der jeweiligen Anlage gefahrenen Brennstoffbandes herangezogen. Extremfälle wie z.B. gewisse Monochargen kommen zweifelsohne vor und führen demnach auch zu völlig anderen Betriebszuständen als bei „normalem“ Brennstoff. Diese Sonderfälle werden jedoch im Moment nur im Rahmen der Mittelwertbildung und nicht explizit berücksichtigt.

2.3 Randbemerkungen zu den durchgeführten Versuchsfahrten

Insbesondere die im Abschnitt 5 durchgeführten Versuchsfahrten tragen wesentlich zum erreichten Erkenntnisgewinn bei. Aus diesem Grund scheint es zielführend, nicht ausschließlich - wie im Abschnitt 5.5 - auf die Ergebnisse einzugehen, sondern auch auf die Modalitäten der Versuchsplanung und -durchführung. Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei den Anlagen zur Versuchsdurchführung um großtechnische Anlagen im Regelbetrieb und um keine Versuchs- bzw. Laboranlagen. Da die Durchführung von Versuchen im Bereich der Brennstoffaufgabe latent die Gefahr von Leistungsschwankungen bis hin zu unerwünschten Zuständen mit Emissions-, Ausbrandproblemen, Stützbrennereinsätze usw. mit sich bringt, mussten diese Versuchsfahrten minutiös geplant und in Abstimmung mit der Betriebsleitung und der Betriebsmannschaft mit größter Sorgfalt durchgeführt werden.

Die unter 5.2 und 5.3 beschriebenen Versuchsfahrten sind nur verwert- und vergleichbar, bei annähernd gleichbleibenden physikalischen und chemischen Eigenschaften des Brennstoffs. Aus diesem Grund musste durch eine Reihe von Maßnahmen eine hohe Qualität der durchgeführten Versuchsfahrten sichergestellt sein:

- Die Konsistenz und Qualität des Brennstoffs wurde - soweit möglich - vor und während den Versuchsfahrten visuell im Bunker, im Greifer und im Aufgabetrichter überwacht.
- Die Bediener des Müllkrans wurden darauf hingewiesen, während den Versuchszeiträumen ausschließlich eine möglichst konstante Brennstoffqualität aufzugeben.
- Es wurde versucht, die Zeiträume der mehrstündigen Versuchsfahrten in eine „anlieferschwache“ Periode zu legen, so dass sich die Bediener des Müllkrans nicht auf das Freiräumen der Abkippstellen konzentrieren müssen, was sonst zweifelsohne zu starken Schwankungen in der aufgegebenen Brennstoffqualität führen würde.
- Bei Verdacht auf eine stark schwankende Brennstoffqualität bzw. bei Verdacht auf Auftreten eines (unter 2.2 beschriebenen) Extremfalls, wurde die Versuchsfahrt abgebrochen und konsequent wiederholt.
- Beim Auftreten von anlagen- und / oder betriebsbedingten Störungen bzw. wenn die Gefahr des Herbeiführens eines gefährlichen Zustands bestand, mussten Versuchsfahrten abgebrochen und wiederholt werden.

Trotz dem alle Versuchsfahrten mit größter Sorgfalt geplant und durchgeführt worden sind, ist es nicht auszuschließen, dass es zu - von den versuchsdurchführenden Personen unbemerkten - Unregelmäßigkeiten gekommen ist, die u. U. ein Ergebnis entsprechend verfälschen können.

3 Allgemeines zur Brennstoffbeschickung in MVA

„Das Hauptregelorgan, ohne dass sich keine geregelte Großfeuerung aufrechterhalten lässt, ist die Beschiekeinrichtung“. Der Beschiekeinrichtung kommt die maßgebliche Aufgabe zu, einer Feuerung den zur Einhaltung der Soll-Dampfproduktion benötigten Brennstoff geregelt, in ausreichender Menge, richtig dosiert und weitgehend kontinuierlich zu zuführen. Die Erfüllung dieser Forderung gestaltet sich bei Brennstoffen aus Abfall im Gegensatz zu klassischen Brennstoffen deshalb viel schwieriger, weil durch die Mehrfachheterogenität des Abfalls bisher kaum Möglichkeiten bestehen, die momentan benötigte Brennstoffmenge zur Einhaltung der Soll-Dampfmenge zu bestimmen [23].

Trotz intensiver Literaturrecherchen können nur sehr wenig nähere Angaben zu wissenschaftlichen Untersuchungen oder empirisch ermittelten Methoden gefunden werden, die die geregelte Abfallbeschickung praxisorientiert beschreiben.

Die bestehende Problematik lässt sich wie folgt beschreiben: Wird eine definierte Masse eines klassischen, in der Regel homogenen Brennstoffes wie z.B. eine bestimmte Kohleart mengengeregelt einer Feuerung zugegeben, ist das Verhältnis von erzeugbarer Dampfmenge aus der zugegebenen Brennstoffmenge (annähernd) bekannt und direkt proportional. Auch lassen sich das Brennverhalten und der Verbrennungsablauf durch die in der Regel recht geringe Schwankungsbreite der chemischen und physikalischen Eigenschaften klassischer Brennstoffe exakt vorhersagen. Dadurch lässt sich beispielsweise bei der Kohlefeuerung eine gleichmäßige Feuerung relativ problemlos aufrechterhalten.

Bei der thermischen Behandlung von heterogenem Restabfall als Brennstoff liegen weder Heizwert noch sonstige, für die Verbrennung und Dampferzeugung relevanten Kenngrößen vor. Die aus dem Abfall freigesetzte Dampfmenge entsteht aus einem meist undefinierbaren Gemisch von Abfallsorten mit sehr unterschiedlichen Brennverhalten. Zur Aufrechterhaltung und mittel- bis längerfristigen Anpassung der Dampfproduktion an den jeweiligen Dampfsollwert dient nach dem Stand der Technik der laufend erzeugte Dampfmassenstrom (gemessen in [t/h] oder in [kg/s]). Diese Verknüpfung fließt deshalb als Hauptregelgröße in die Feuerleistungsregelung und somit auch als Regelgröße für die Brennstoffbeschickung ein.

Im Gegensatz zur Verfeuerung von klassischen Brennstoffen lassen sich bei Abfällen frühestens während, meistens erst nach Abschluss der Verbrennung Rückschlüsse auf Brennstoffeigenschaften, das Brennstoffverhalten und die bei der Verbrennung erzeugten Emissionen ziehen. Fest steht jedoch, dass eine ausschließlich dampfmassenstrombezogene Regelung der Beschiekeinrichtung nicht ausreicht. Vielmehr muss eine emissionsarme Verbrennung bei gleichzeitig optimaler Ausbrandqualität in ausreichendem Maß berücksichtigt werden.

Die Beschiekeinrichtung einer Abfallfeuerung lässt sich in folgende Einzelbereiche aufgliedern, die genau aufeinander abzustimmen sind:

- das Zuteilungsorgan, in der Regel bestehend aus einem Kran mit einem Polypgreifer zum laufenden Auffüllen der Brennstoffvorlage,
- die Brennstoffvorlage (auch Schurre genannt), bestehend aus einem Aufgabeschacht und einem Aufgabetrichter,
- der eigentlichen Beschickungseinrichtung zur gezielten Entnahme von Brennstoff aus dem Aufgabeschacht und dessen Dosierung auf den Verbrennungsrost.

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die Bedienung des Zuteilungsorgans, d. h. des Müllkrans in der Regel ausschließlich manuell bzw. teilautomatisch erfolgt. Ansätze zur vollautomatischen Bewirtschaftung eines Müllbunkers befinden sich zur Zeit noch in der Entwicklungsphase. Bei Anlagen mit homogeneren Brennstoffen

wie z. B. Biomassen und Ersatzbrennstoffen hingegen, entspricht eine vollautomatisierte Bunkerlogistik inzwischen dem Stand der Technik.

Dem Müllkranführer wird eine wesentliche Rolle zugeteilt, da er - neben dem Beschicken des Brennstoffvorlageschachtes - für eine Homogenisierung des Abfalls durch konsequentes Mischen verantwortlich ist. Insbesondere in Phasen mit hohem Anlieferaufkommen (wochentags, tagsüber) muss der Kranführer dafür sorgen, dass die Abkippstellen an den Bunkertoren möglichst rasch wieder freigeräumt werden. In diesen Phasen ist ein konsequentes Mischen nicht möglich. Es gelangt dann der nicht abgelagerte Frischmüll direkt in den Vorlageschacht und in weiterer Folge in die Feuerung. Der nicht abgelagerte Frischmüll ist - in der Regel durch den höheren Feuchtegehalt - ein deutlich problematischerer Brennstoff als ein abgelagerter, gemischter Brennstoff.

3.1 Stand der Technik

Dem heutigen Stand der Technik entspricht eine vollautomatisierte Beschickeeinrichtung, die in der Regel als Stößelbeschickung ausgeführt ist. Hierbei lassen sowohl Hublänge, Start- und Endpositionen als auch die Hubgeschwindigkeit beliebig variieren. Je nach Größe bzw. Breite des nachgeschalteten Verbrennungsrostes können die Beschickeeinrichtungen auch mehrbahnig ausgeführt sein. Insbesondere in älteren Anlagen sind Konstruktionen relativ weit verbreitet, die eine zweilagige Ausführung der Beschickstößel beinhalten (Oberkolben und Unterkolben).

Eine Alternative zur Technologie der Stößelbeschickung sind die sogenannten Aufgabewanderroste. Hierbei handelt es sich um einen umlaufenden Kettenantrieb, der den Brennstoff *kontinuierlich* auf den Rost befördert - ein wesentlicher Vorteil gegenüber der Stößelbeschickung.

Der Aufgabewanderrost besitzt jedoch einige systemimmanente Probleme bzw. Besonderheiten, die schlussendlich dazu führten, dass dieses System mittlerweile beinahe vollständig aus dem existierenden Anlagenpark verschwunden ist:

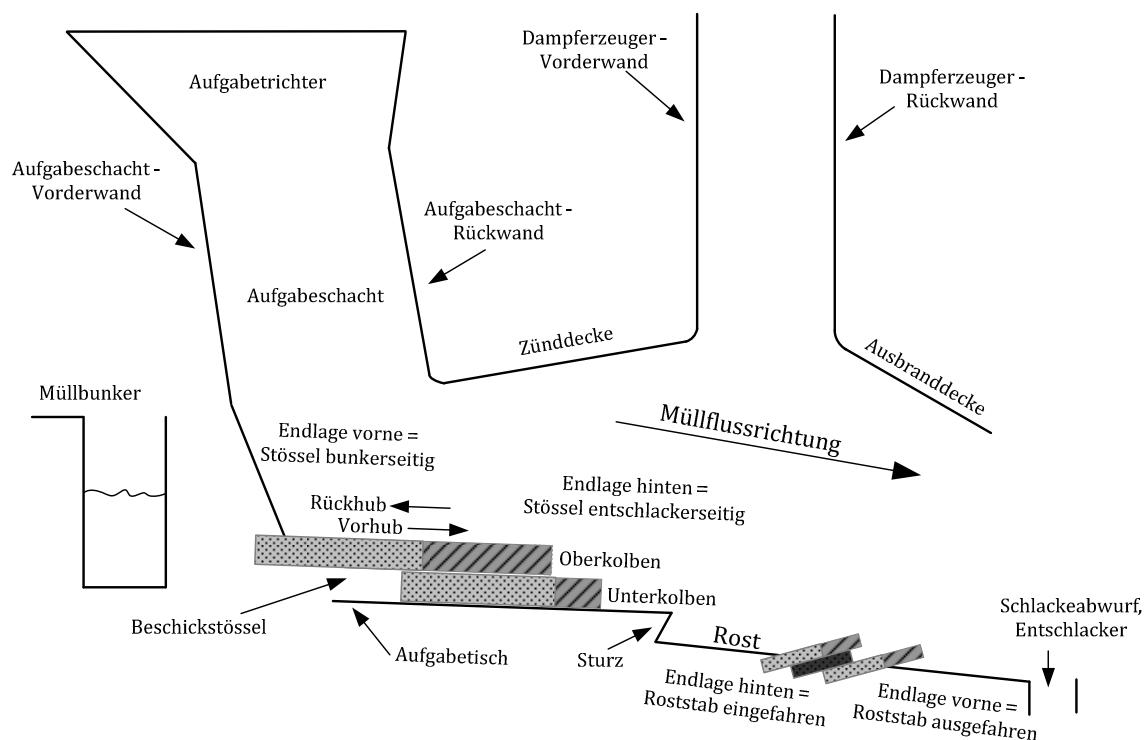
- In Anschaffung, Betrieb und Unterhalt gestaltet sich der Aufgabewanderrost deutlich teurer und aufwändiger als die Stößelbeschickung.
- Die gesamte Aufgabekonstruktion wird luftgekühlt, da die Strahlungswärme der Brennkammer die Mechanik zu sehr erhitzen würde. Diese Kühlluftmengen sind nicht unerheblich, sie betragen ca. 3 - 4% der gesamten Verbrennungsluftmenge. Die Kühlluft durchströmt die Wanderrostkonstruktion und tritt mehr oder weniger undefiniert in den Feuerraum ein - ohne wirkliche Relevanz für die Feuerführung und wirkt sich daher negativ auf die Energieeffizienz der Gesamtanlage aus.
- Es lässt es sich nicht ausschließen, dass sich flüssige bzw. pastöse brennbare Bestandteile im Abfall befinden. Diese Stoffe können durch den Aufgabewanderrost in das Innere der Konstruktion gelangen und sich dort gegebenenfalls entzünden, was zu gefährlichen Betriebszuständen führen kann.
- Des Weiteren ist der Aufgabewanderrost aufgrund seiner vergleichsweise diffizilen Konstruktion deutlich empfindlicher gegenüber Rückbränden als eine Stößelbeschickung. Rückbrände können vorkommen, wenn sich sehr leicht brennbares Material auf dem Aufgabewanderrost befindet oder wenn sich Brennstoff im Aufgabemaul verhakt. Auch wenn der Rostantrieb ausfällt steigt die Gefahr von Rückbränden, weil kein frischer Brennstoff nachgefördert wird. Somit hat der Abfall genug Zeit um (auf dem Aufgabewanderrost) zu trocknen und schlussendlich auch zu zünden. Ein entsprechendes Angebot an Verbrennungsluft ist zum einen durch die Kühlluft und zum anderen durch die Primärluft in Zone 1 vorhanden. Dadurch, dass kein frischer Brennstoff auf den Verbrennungsrost gefördert wird, der Brennstoff in Zone 1 jedoch weitertransportiert wird, reißt das Brennbett entsprechend auf und die Primärluft kann ungehindert durch die Luftschlitze im Verbrennungsrost nach oben in Richtung Aufgabewanderrost strömen. Das Problem mit Rückbränden existiert natürlich auch bei

Stößelbeschickungen, jedoch sind diese Konstruktionen diesbezüglich weniger empfindlich und in der Regel zumindest teilweise wassergekühlt.

- Der relativ hohe Sturz (ca. 2 m) wirkt sich dahingehend positiv aus, da der oft verklumpte und ineinander verhakte Brennstoff sich besser in kleinere Partikelgrößen aufteilen kann. Negativ hingegen wirkt sich ein hoher Sturz aus, weil dadurch erhöhte Mengen an kleinen Partikeln aus dem Brennbett ausgetragen werden, die sich später als Flugstaub in der Kesselasche wiederfinden. An dieser Stelle sei kurz erwähnt, dass die genannten Vor- und Nachteile nicht nur für Stürze an Beschiekeinrichtungen gelten, sondern auch für Stürze die sich - herstellerabhängig - längs des Rostes zwischen den einzelnen Rostzonen befinden. Die Stürze in Rosten sind jedoch bei weitem nicht so hoch wie Stürze hinter den Beschickungen. Roststürze sind herstellerabhängig ca. 50 - 75 cm hoch ausgeführt, Stürze hinter Beschickungen sind ca. 75 - 200 cm hoch. Wiederum herstellerabhängig sind diese Stürze eher als Rutsche denn als Sturz ausgeführt.

Im deutschsprachigen Raum beispielsweise existieren derzeit an 5 Anlagenstandorten Verbrennungseinheiten, in denen sich noch ein Aufgabewanderrost in Betrieb befindet. Ein Trend zum Rückbau von Aufgabewanderrosten auf Stößelbeschickungen ist erkennbar. Umso aufschlussreicher ist es daher, dass sich im Rahmen der im gegenständlichen Bericht durchgeführten Untersuchungen auch 1 Verbrennungslinie (DE19VL1) befindet, die mit einem Aufgabewanderrost ausgerüstet ist.

Folgende Nomenklatur zur Beschreibung der Anlagenkomponenten wird eingeführt:



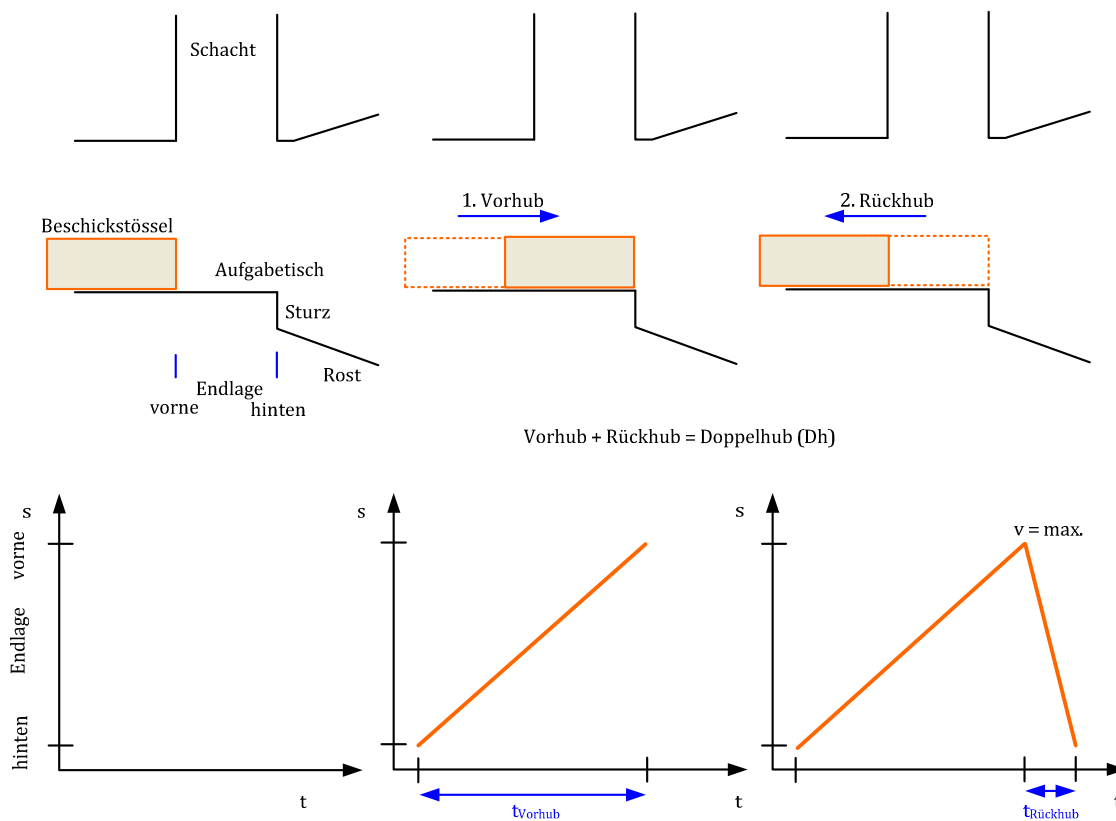
3.2 Beschickvorgang der Stößelbeschickung

Zur dosierten Beschickung des Verbrennungsrostes fährt der Beschiekstößel geschwindigkeits- bzw. positionsgeregelt seitlich gegen die Brennstoffsäule und schiebt sie gegen die Eintrittsöffnung (Aufgabemaul) des Ofens. Die Größe der Eintrittsöffnung und die ausgeführte Länge des Vorhubes sind ausschlaggebend für das durch den Aufgabeschieber maximal möglich zuführbare Volumen. Wegen des oftmals sehr zähen und sperrigen Abfalls ist das Antriebssystem für den Beschiekstößel möglichst variabel und praxistauglich zu gestalten. Als

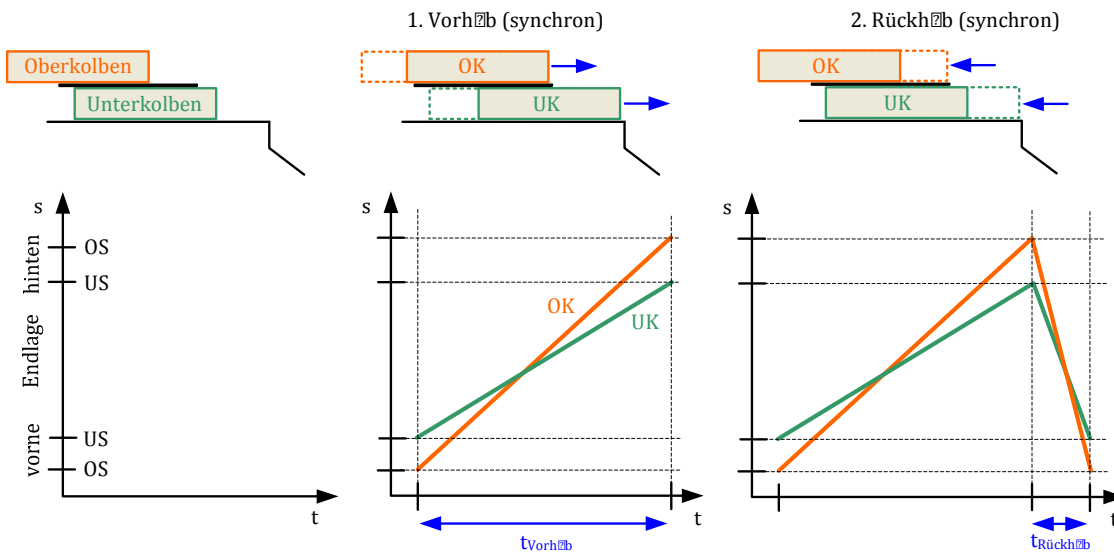
Antriebskonzept haben sich - analog zu Vorschub-, Gegenlaufüberschub- und Rückschubrostantrieben - ölhdraulisch betätigte Linearmotore (Hydraulikzylinder) durchgesetzt. In der Regel handelt es sich dabei - wiederum in Analogie zu Vorschub-, Gegenlaufüberschub- und Rückschubrostantrieben - um doppeltwirkende Differentialzylinder. Der Einsatz von Proportionalventilen in Verbindung mit analogen, absoluten Wegmesssystemen ermöglicht eine Positionsregelung des Zylinders und somit variable Geschwindigkeiten und Zykluszeiten der Beschickereinrichtung.

Der eigentliche Beschickvorgang ist beendet, sobald der Stößel seine hintere Endlage erreicht hat. Danach fährt er automatisch retour in seine vordere Endlage. Das durch den Beschickstößel freigeschobene Volumen wird durch den nachrutschenden Abfall und der sich dadurch leerende Aufgabetrichter durch den Müllkranführer wieder aufgefüllt.

In der Regel erfolgt der Vorhub des Beschickstößels in langsamer, positionsgeregelter Fahrweise. Um den Zeitraum, in dem keine Brennstoffdosierung erfolgt, so kurz wie möglich zu halten, erfolgt der Rückhub mit konstanter, möglichst maximaler Geschwindigkeit:



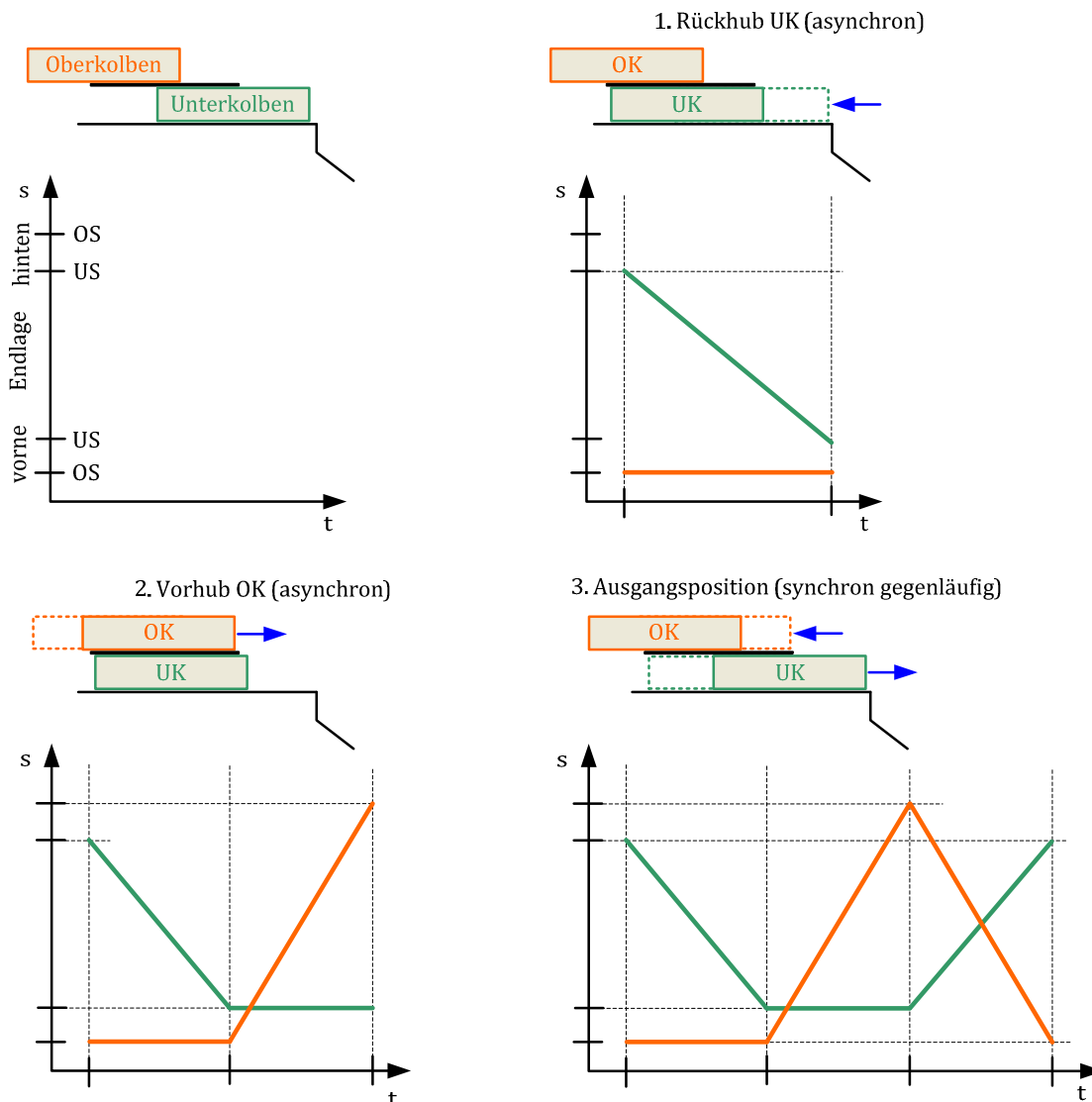
Der Bewegungsablauf an der Doppelkolbenbeschickung erfolgt entweder im Parallelbetrieb oder im Zyklusbetrieb. Im Parallelbetrieb bewegen sich beide Stößel immer in die gleiche Richtung, d. h. sowohl Vorhub als auch Rückhub erfolgen gleichzeitig bzw. parallel. In der Regel werden - konstruktiv bedingt - jedoch am Ober- bzw. Unterkolben unterschiedliche Hublängen gefahren. Dies hat zur Folge, dass OK und UK mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten gefahren werden müssen.



Wird eine Beschickeinrichtung im Zyklusbetrieb betrieben, dann läuft ein fest hinterlegter Zyklus der beiden Stößel ab. Nachfolgende Abbildungen verdeutlichen (beispielhaft) einen solchen Zyklus. Der UK fährt von hinterer Endlage in die vordere Endlage, der OK fährt von vorderer Endlage in die hintere Endlage, beide kehren gemeinsam wieder in ihre jeweilige Ausgangsposition zurück.

Für nachfolgende Betrachtungen wird *nicht differenziert* zwischen Synchronbetrieb und Zyklusbetrieb an Doppelkolbenbeschickungen. Relevant sind ausschließlich die Anzahl der Doppelhübe pro Stunde (D^h/h). Ob eine bestimmte Anzahl an D^h/h im Synchronbetrieb oder im Zyklusbetrieb zustande gekommen ist, ist nicht relevant. Entscheidend ist vielmehr die pro Doppelhub bzw. abgeschlossenem Zyklus geförderte Brennstoffmasse. Eine gewählte Fahrweise kann natürlich entscheidenden Einfluss auf qualitative, jedoch schwer messbare Größen wie z. B. eine ungleichmäßige Brennstoffdosierung (sog. Haufenbildung) haben oder Probleme bei bestimmten Brennstoffkonsistenzen (z.B. Sperrmüll) verursachen oder diese beheben.

Im Detail betrachtet, ist die Geschwindigkeit des Vorhubs (v_{Vorhub}) jedoch nicht konstant, sondern wird laufend in einer Zykluszeit von ca. 1 - 2 Sekunden durch die Vorgaben aus der Feuerleistungsregelung auf die gerade vorherrschenden Verbrennungsbedingungen angepasst. Weil ein Vorhub in der Praxis oft bis zu 15 Minuten dauert, ist eine permanente Anpassung der Geschwindigkeit notwendig. Der Rückhub erfolgt auch positionsgeregelt, jedoch mit maximal möglicher, konstanter Geschwindigkeit und ist in ca. 30 Sekunden bis max. 1 Minute abgeschlossen.



3.3 Problematisches Dosierverhalten der Stößelbeschickung

Bei der Stößelbeschickung - die nachweislich dem Stand der Technik entspricht - handelt es sich also lediglich um ein quasikontinuierliches Beschickungssystem, da die Brennstoffdosierung auf den Rost prinzipbedingt durch das Zurückfahren des Stößels in seine Ausgangsposition („vordere Endlage“) unterbrochen wird. Während dieser Zeit wird vom Beschickstößel kein Brennstoff auf den Rost dosiert. Oftmals wird vermutet, dass es auch während der Rückwärtsbewegung des Stößels zu Brennstofftransportphänomenen kommt, die als sogenanntes „Durchrutschen“ oder „Nachrutschen“ bezeichnet werden. Eine Differenzierung zwischen „Durchrutschen“ und „Nachrutschen“ kann wie folgt vorgenommen werden: Vom „Durchrutschen“ wird gesprochen, wenn sich Brennstoff in wesentlichen Mengen während dem Dosier(vorwärts)hub unkontrolliert am Aufgabestößel vorbeibewegt. Dies ist nicht erwünscht. „Nachrutschen“ passiert während dem Rückhub des/der Beschickstößel, wenn Brennstoff durch die wieder vergrößerte Öffnung zum Feuerraum hin direkt auf den Rost „nachrutscht“. Ein gewisses „Nachrutschen“ wird bei jedem Rückhub des Beschickstößels auftreten, da das freigewordene Volumen aufgefüllt wird. Dieses „natürliche Nachrutschen“ ist erwünscht und dient ferner dem Betriebspersonal als visuelle Bestätigung eines aufrechten Müllflusses. Fehlt es plötzlich, so ist das Vorliegen eines „Verstopfers“ wahrscheinlich.

Zur Problematik bzw. zur Entstehung der beiden erwähnten Phänomene gibt es bis dato keine belastbaren Aussagen und / oder reproduzierbare Erklärungen. Neben konstruktiven Merkmalen scheint die Masse der Müllsäule im Brennstoffschacht einen Einfluss auf das Eintreten der Phänomene zu haben. Untermauert werden kann diese These dadurch, dass empirische Untersuchungen in mehreren Anlagen gezeigt haben, dass durch einen niedrigeren Füllstand im Brennstoffvorlageschacht (und somit durch geringere Masse der Brennstoffsäule) das Auftreten der „Rutschphänomene“ reduziert werden konnte. Diese Vorgehensweise hat sich auch bei Problemen mit einer ungleichmäßigen Brennstoffdosierung bzw. bei Vorlageschächten die zu „Verstopfern“ neigen, bewährt. Die Fahrweise mit einem niedrigen Füllstand im Aufgabeschacht muss aber mit betrieblichen Maßnahmen gut koordiniert sein, da der Abfall im Schacht nicht nur als Vorlage für die Beschickung dient, sondern auch als luftdichter Abschluss des Feuers gegen den Müllbunker um Rückbrände und Falschlufteinbrüche zu verhindern. Wird der Füllstand plötzlich zu niedrig, so kann dies gefährliche Anlagenzustände hervorrufen. Aus diesem Grund sind auch diverse Füllstandsmessungen über die Höhe des Aufgabeschachtes verteilt, die entsprechende Signale in die Leitwarte und an den für die Befüllung des Schachtes zuständigen Müllkranführer übermitteln.

Die Erfahrungen aus der Praxis haben auch gezeigt, dass das Auftreten der Phänomene tendenziell stärker abhängig ist von der konstruktiven Ausgestaltung der Beschickvorrichtung als von der zum Zeitpunkt des Auftretens vorherrschenden Konsistenz des Brennstoffs, obwohl diese mit Sicherheit auch eine Rolle spielt. Begründet werden kann dieses Postulat mit der Tatsache, dass jede Anlage im Verlauf eines längeren Zeitraums (z.B. einem Jahr) das gesamte vorhandene Spektrum an unterschiedlichen Brennstoffqualitäten inkl. der Extremfälle wie Monochargen aller Art, Grünschnitt, Laub, Deponierücklauf, Gärreste usw. in einer mehr oder weniger starken Ausprägung angeliefert bekommt. Nun gibt es Verbrennungslinien die keinerlei Probleme mit Durchrutschphänomenen haben, obwohl auch diese Einheiten das ganze Spektrum an Abfallqualitäten bekommen. Andererseits gibt es jedoch Anlagen die des Öfteren, zum Teil mehrmals täglich von Durchrutschphänomenen betroffen sind. Diese Tatsache lässt eben den bereits erwähnten Schluss zu, dass es sich verstärkt um konstruktive Merkmale handeln muss, die ein Durchrutschen des Brennstoffs begünstigen oder eben verhindern.

Zusätzlich erschwert wird die Beschreibung der Problemstellung dadurch, dass es so gut wie keine Möglichkeiten gibt, um den tatsächlichen Dosiervorgang der Beschickungseinrichtung im laufenden Betrieb zu analysieren um z. B. durch visuelle Eindrücke Rückschluss auf die vorherrschende Abfallkonsistenz ziehen zu können. Aussagen, welche Brennstoffkonsistenzen reproduzierbar ein „Durch- oder Nachrutschen“ begünstigen oder verhindern, können demnach *nicht getroffen werden*. Die Beobachtungen in der Praxis haben jedoch gezeigt, dass schwerer, „kompakter“ Brennstoff (d. h. in der Regel Brennstoff mit hohem Feuchtegehalt) eher zum Durchrutschen neigt als leichter, sperriger Brennstoff wie z.B. Sperrmüll. Dadurch wird das Problem der beschriebenen Phänomene weiter verdeutlicht: Der erwähnte schwere und „kompakte“ Brennstoff stellt ohnehin bereits erhöhte Anforderungen an die Feuerführung und durch zusätzliche, unkontrolliert auf den Rost gelangende Brennstoffmengen wird dieser in der Regel immer - zumindest punktuell - mechanisch überlastet. Man spricht von einer sogenannten Überschüttung des Rostes. Eine Überschüttung des Rostes gilt es unbedingt zu vermeiden, da diese Überschüttungszustände immer auch mit Zuständen deutlich erhöhter Emissionen in Folge eines nicht mehr stimmigen Brennstoff-/Luft-Verhältnisses und unvollständiger Verbrennung (sog. „kaltes CO“) einhergehen. Ferner ist durch eine ausgeprägte Überschüttung des Rostes auch die Ausbrandqualität gefährdet, da die Länge des Rostes oft nicht ausreicht um den gesamten darauf befindlichen Brennstoff entsprechend zu schüren und umzuwälzen. Durch einen unvollständigen Ausbrand wird nicht nur die Schlackequalität verschlechtert sondern es besteht die Gefahr, dass noch brennende Klumpen in den Entschlacker gefördert werden. Dies kann vom Verstopfen bis hin zum Strukturversagen des Schlackeschachtes führen. Bis ein ausgeprägter Überschüttungszustand des Rostes bereinigt ist, dauert es in der Regel mehrere Stunden. Ein definierter Anlagenbetrieb ist während dieser Zeitphase nur durch reine „Handfahrweise“ der Feuerung und mit Betrieb der fossil befeuerten Stützfeuerung möglich.

Zusammenfassend können die oben beschriebenen Phänomene jedoch als „Ausnahme-Ereignisse“ eingestuft werden, die für den Regelbetrieb einer großtechnischen MVA keine Rolle spielen und demnach in den folgenden Betrachtungen auch nicht weiter berücksichtigt werden sollen. Eine Ausnahme macht das „erwünschte Nachrutschen“ der Brennstoffsäule im Rahmen eines Rückhubs des Beschickstößels. Dieses „erwünschte Nachrutschen“ lässt Rückschlüsse auf die Kompressibilität und Dichte des Brennstoffs im Bereich des Beschickstößels zu. Siehe dazu Abschnitt 4.4 und 5.2.2.

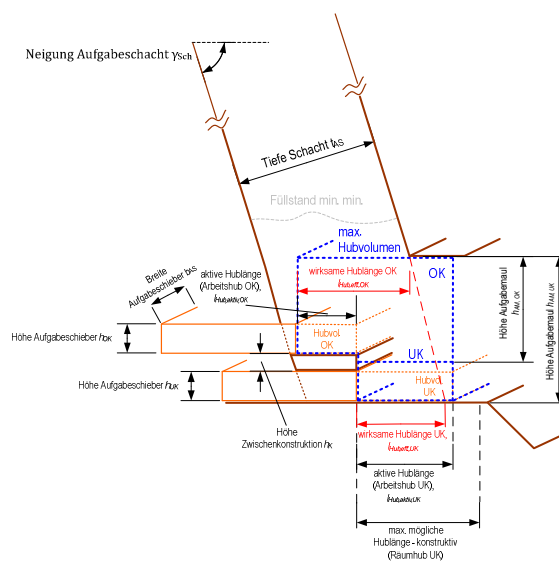
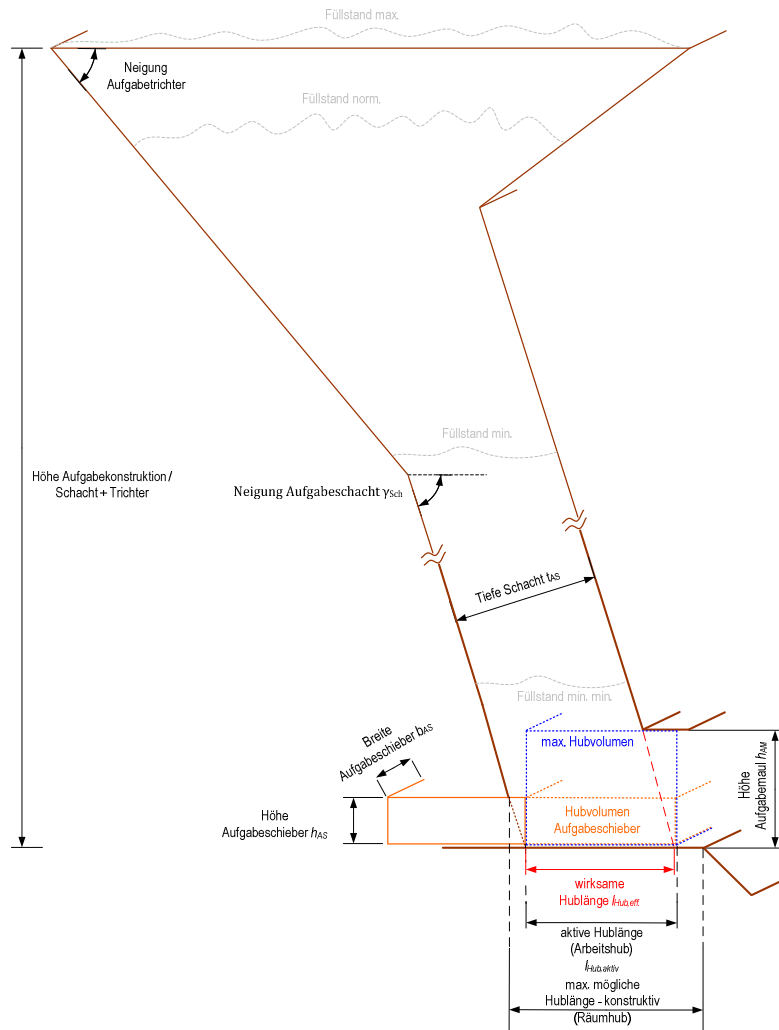
3.4 Brennstoffaufgabe: Geometrie & Kennzahlen

Als ein wichtiges Merkmal gilt die konstruktive Höhe des Beschickstößels, die einlagig ca. 30 cm, zweilagig ca. 40 cm nicht unterschreiten sollte. Nur bei Einhaltung dieser Mindesthöhe lässt sich verhindern, dass der Beschickstößel unter kompressiblem oder voluminösem Brennstoff durchgleitet, ohne diesen auf den Verbrennungsgrost zu schieben. Den Gegendruck baut der Reibungswiderstand des Brennstoffes auf, der sich beim Durchpressen durch das Aufgabemaul brennstoffabhängig unterschiedlich hoch einstellt. Aufgrund praktischer Erfahrungen und Untersuchungen sollte die lichte Höhe des Aufgabemauls mindestens das 2,5-fache, jedoch nicht mehr als das 4,5-fache von der Beschickstößelhöhe betragen (mind. ca. 75 cm, max. ca. 180 cm). Ein weiterer zu berücksichtigender Faktor ist das Verhältnis von der Höhe des Aufgabemauls zur Tiefe des Aufgabeschachtes. Dieser Faktor sollte immer ≤ 1 sein.

Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, dass sich über die Höhe des Aufgabemauls auch die maximale Korngröße des zur Verbrennung gelangenden Abfalls definiert, der aufgegeben werden darf. Ebenfalls müssen die Abmessungen des Schlackeschachtes auf die Öffnungen des Aufgabemauls abgestimmt sein, da davon ausgegangen werden muss, dass die maximale Korngröße die in den Feuerraum gelangt, auch unverbrannt in den Entschlacker transportiert wird.

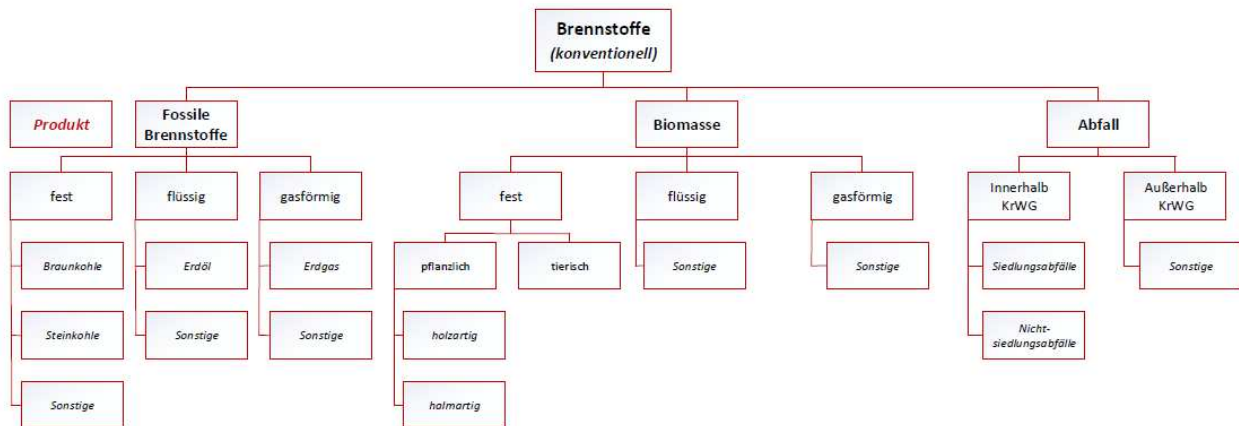
Die konstruktiven Parameter der einzelnen Aufgabeschächte sind von Anlage zu Anlage äußerst unterschiedlich ausgeprägt. Neigungswinkel des Schachtes, Tiefe und Breite sind nur drei Faktoren, welche die Pressung des Brennstoffes im Aufgabeschacht beeinflussen bzw. dessen Reibung im Schacht. Dieser Sachverhalt wirkt sich bis zur Beschickung aus, da mitunter die Kompression des Brennstoffes ausschlaggebend für die Brennstoffzuführung auf den Rost ist.

Nachfolgende Abbildung definiert die wichtigsten geometrischen Abmessungen. Diese Darstellung gilt nur für Aufgabekonstruktionen mit einem Beschickstößel. In einer weiteren Abbildung ist eine Konstruktion mit Doppelkolbenbeschickung dargestellt. Die Doppelkolbenbeschickung besteht aus 2 übereinander angeordneten Beschickstößeln. Dem Oberkolben (OK) und dem Unterkolben (UK). Je nach Konstruktion befindet sich zwischen den beiden Stößeln ein konstruktives Element, wie z.B. ein Sturz, eine Rutsche. Befindet sich kein konstruktives Element zwischen den beiden Stößeln, dann gleiten die beiden Stößel direkt aufeinander.

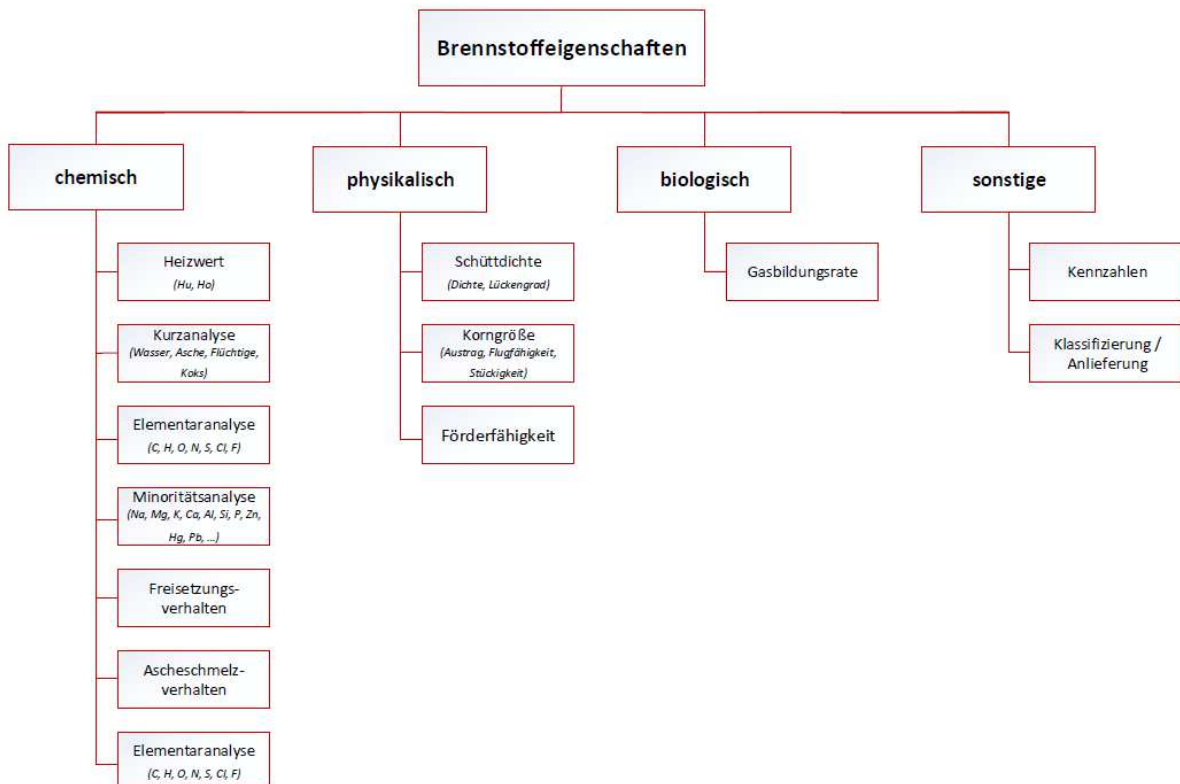


4 Brennstoffe

Die Variation an Brennstoffen ist vielfältig. Die nachfolgende Abbildung gibt eine grobe Einteilung der Brennstoffe wieder. Allgemein können die verschiedenen Brennstoffe grundlegend in fossile Brennstoffe, Biomasse und Abfälle eingeteilt werden. In Müllverbrennungsanlagen (MVA) werden grundsätzlich Abfälle innerhalb des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) angeliefert und thermisch behandelt.



Der sogenannte Hausmüll oder hausmüllähnlicher Gewerbeabfall kann mit chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften charakterisiert werden:



Ein besonderes Augenmerk wird im Weiteren auf die physikalischen Eigenschaften des Mülls und seinen Heizwert gelegt.

4.1 Der Heizwert und dessen Einfluss

Die wichtigste charakterisierende Größe des Brennstoffs Restabfall ist der Heizwert, der die Wärmemenge abzüglich der Kondensationswärme der entstehenden kondensierbaren Wasserdämpfe angibt, die bei vollständiger Verbrennung verfügbar wird [7].

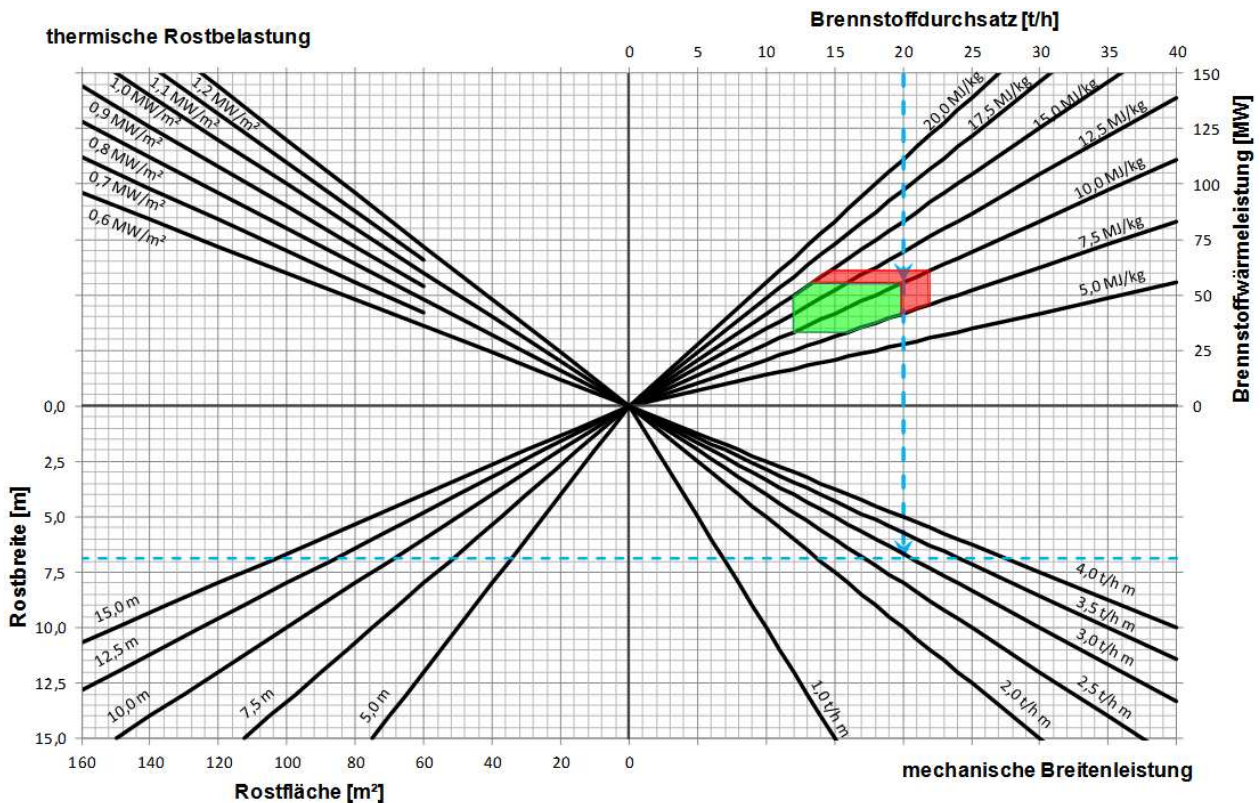
Die Ermittlung des Heizwertes von gemischten Siedlungsabfällen ist ein viel diskutiertes Problem. Es herrscht Übereinstimmung darüber, dass das normierte Standardverfahren der Heizwertbestimmung im Kalorimeter für gemischte Siedlungsabfälle aufgrund der geringen Probemenge von wenigen Gramm kaum brauchbar ist [11, 12, 13]. Standardmäßig wird mittlerweile in MVA eine Methode praktiziert, die als quasi-online bezeichnet werden kann. Aus der Wärmebilanz des Dampferzeugers und der Feuerungsanlage den Heizwert zu berechnen. Diese Methode hat jedoch systemimmanent den Nachteil, dass eine sinnvolle Bilanz aufgrund der Schwierigkeit, die in die Feuerung gelangende Abfallmenge exakt zu bestimmen, nur über einen längeren Zeitraum geführt werden kann [14]. Die Beschickung der Aufgabetrichter durch den Müllkranfahrer erfolgt diskontinuierlich, wobei eine Erfassung der aufgegebenen Brennstoffmasse nur zum Zeitpunkt des Abwurfs erfolgt. Die Zeitabstände, zwischen denen aufgegeben wird, sind nicht konstant sondern variieren deutlich. Als Größenordnung können angegeben werden: Ca. 5 Minuten als Mindestabstand zwischen 2 Befüllungen und ca. 45 Minuten als maximal möglicher Abstand zwischen 2 Befüllungen. Das macht das Problem deutlich: Um repräsentative Werte zu erhalten, müssen gleitende Mittelwerte für den aufgegebenen Müllmassenstrom gebildet werden. Als sinnvolle Zeitbasen hierfür haben sich 2h-, 4h-, 6h-, 8h- und 24h-Mittelwerte etabliert. Demnach geben die berechneten Werte nicht den jeweils aktuellen Zustand wieder, sondern liefern Vergangenheitswerte.

Im Zusammenhang mit dem gegenständlichen Vorhaben ist wichtig zu erwähnen, dass ein bestimmter Heizwert (angegeben in [kJ/kg], [MJ/kg]), bei einem bestimmten Brennstoffmassenstrom (angegeben in [kg/h], [t/h]) einer bestimmten Brennstoffwärmeleistung (kurz: BWL, angegeben in [MW], [MW_{th}]) entspricht.

Es gilt: $\dot{Q}_{BWL} = \dot{m}_{Brennstoff} * H_u$

Der Zusammenhang zwischen diesen 3 Größen wird im so genannten Feuerungsleistungsdiagramm (kurz: FLD) dargestellt. Die im FLD angegebene BWL ist direkt proportional mit der erzeugten Dampfmassenstrom (angegeben in [t/h], [kg/s]) im Dampferzeuger. Als maßgeblicher Sollwert wird an jeder Verbrennungslinie der zu erzeugende Dampfmassenstrom von den Heizern eingestellt. Insbesondere bei der Interpretation von durchgeführten Versuchsfahrten aus dem Abschnitt 5.3 wird der Zusammenhang zwischen diesen 3 Größen eine große Rolle spielen. Im Anhang unter 10.3 sind beispielhaft 2 Feuerungsleistungsdiagramme für eine Müllverbrennungsanlage und für ein Ersatzbrennstoff-Kraftwerk abgebildet. Deutlich sind die Unterschiede in der Auslegung zu erkennen.

Das FLD ist eines der chronologisch ersten Auslegungsinstrumente beim Neubau einer Verbrennungslinie. Alle weiteren konstruktiven Ausgestaltungsmerkmale der Feuerung leiten sich aus dem FLD ab. Dargestellt ist hier ein Feuerungsnomogramm aus dem die Zusammenhänge - insbesondere auch zu den konstruktiven Abmessungen und den damit verbundenen mechanischen und thermischen Belastungen der Feuerungsanlage - ersichtlich sind. [15]



Die Brennstoffqualität, insbesondere der Heizwert ist also eine von anderen Betriebsparametern einer MVA unabhängige Größe, die im laufenden Betrieb nicht beeinflusst werden kann, im Vergleich zu den anderen Stellgrößen wie Müllmassenstrom, Primär- und Sekundärluftmengen etc. Daraus folgt, dass so gut wie alle Stellgrößen der Feuerungsleistungsregelung - mehr oder weniger stark - abhängig sind vom Abfallheizwert. Da dieser aber als aktueller Wert eben nicht - verlässlich, reproduzierbar und vor allem zeitnah - bekannt ist, wird versucht mittels Messgrößen auf den aktuellen Heizwert rückzuschließen. Da diese mit dem Heizwert korrelierenden Messgrößen durch die vorhandenen Stellgrößen sehr wohl beeinflussbar sind, spricht man von Regelgrößen. Ziel ist es nun, diese Regelgrößen möglichst auf einen bestimmten, von etlichen Rahmenbedingungen beeinflussten, Ideal- oder Sollwert zu halten. Gelingt dies in einem gewissen Rahmen, kann davon ausgegangen werden, die Heizertschwankungen wurden (mittels den Stellgrößen) „ausgeregelt“, d. h. sie haben keinen Einfluss mehr auf einen optimalen Betriebspunkt.

4.2 Physikalische Eigenschaften

Der Feststoff Müll hat neben seinen chemischen Eigenschaften auch wichtige physikalische Eigenschaften. Diese sind im Wesentlichen: die Dichten des Mülls, Korngröße, Korngrößenverteilung, Lückengrad, Elastizität, Plastizität und Verhakung. Diese Parameter haben großen Einfluss auf die Modellierung. Sie wurden bis dato entweder auf Basis von phänomenologischen Zusammenhängen oder empirischen Ermittlungen bestimmt.

4.2.1 Förderfähigkeit

Zu der Förderfähigkeit des Brennstoffs Müll liegen nur wenig belastbare Erkenntnisse und Zahlen vor. Zum Beispiel in [2] wurden Versuche an einem Modell einer Brennstoffaufgabe im Maßstab 1:10 durchgeführt. Ziel der Untersuchung war, den Materialfluss im Aufgabebereich zu untersuchen um in weiterer Folge die Müllaufgabe weiterentwickeln zu können. Als beste Alternative haben sich Hobelspäne von 5 bis 10 mm Breite und 5 bis 20 mm Länge dargestellt. Gemäß den Autoren aus [2] kamen diese Hobelspäne in ihrem Fließ- und

Böschungseigenschaften dem Originalmüll am nächsten. Es wurde explizit darauf geachtet, dass die Korngrößen des Modellbrennstoffs auch maßstabsgerecht gegenüber den Korngrößen von Originalmüll verkleinert wurden. Weitere Alternativbrennstoffen waren zerkleinerter Originalmüll, Polystyrol-Schaum-Chips und Holzwürfel. Die sehr umfangreichen Versuche beschreiben im Prinzip bereits alle auftretenden Phänomene wie Nachrutschen beim Rückhub, Verdichtungsvorgang beim Vorhub, Pfropfenbildung im Aufgabemaß usw. Leider sind die in [2] gewonnenen Erkenntnisse auf die gegenständlichen Verbrennungslinien nur sehr bedingt übertragbar, da in [2] mit einer Sonderkonstruktion aus Räumschieber und Aufgabeschieber mit unterschiedlichen Schieberhöhen gearbeitet wird. Abschließend wird in [2] angemerkt, dass die Übertragbarkeit des Modellbrennstoffs auf den Originalmüll hinsichtlich der physikalischen Eigenschaften nicht vollumfänglich gegeben sei. Insbesondere wird darauf hingewiesen, dass sich die Massen- und Reibungskräfte zwischen Modell und Original deutlich unterscheiden. Es wird empfohlen, dass unterschiedliche Betriebsweisen von Brennstoffaufgaben „im Original zu erproben“ seien.

Aus [18] sind Modellversuche mit Blähtonkörpern, Holz- und Keramikugeln bekannt. Allerdings wird dort nur der Brennstofftransport auf dem Rost simuliert und nicht der Aufgabebereich.

In [19] wurden Versuche an einer großtechnischen Anlage durchgeführt, um das Förderverhalten des Brennstoffs Müll im Bereich der Aufgabe besser zu verstehen.

Die Förderfähigkeit eines Stoffes setzt sich maßgeblich aus der Elastizität, Plastizität und der mechanischen Verhakung zusammen. Die elastischen und physikalischen Verformungen sind ein Resultat aus den auf die Müllschüttung ausgeprägten Kräften.

4.2.2 Korngröße

Aufgrund der Tatsache, dass der Müll sehr vielseitig in seiner Zusammensetzung ist, fällt die Bandbreite für die die Korngrößenverteilung sehr groß und breit gefächert aus. Einen grober Überblick gibt die nachfolgende Tabelle aus [16].

Feinmüll	0-8mm	organische Abfälle, Kehricht, Garten-/Parkabfälle
Mittelmüll	8-40mm	Papier, Holz, Kunststoffe, Gummi/Leder, organische Abfälle, Garten-/Parkabfälle, Metalle, Glas, Keramik, Mineralien
Grobmüll	40-120mm	Papier, Holz, Kunststoffe, Textilien, organische Abfälle, Garten-/Parkabfälle, Metalle, Glas, Keramik, Mineralien
Siebreste	>120mm	Papier, Holz, Kunststoffe, Garten-/Parkabfälle, Metalle, Glas, Keramik, Mineralien

Aus [17] ist bekannt, dass der Korngrößenbereich 40 mm bis 120 mm als Bereich mit der größten Korngrößenhäufigkeit angenommen werden kann.

4.2.3 Dichte

Die Dichte von Abfall verändert sich auf dem Weg vom Verursacher bis auf den Rost in der Abfallverbrennungsanlage kontinuierlich. Zusätzlich besteht beim Schüttgewicht wie bei allen anderen Eigenschaften des Abfalls auch eine große Schwankungsbreite aufgrund der starken Inhomogenität. Allgemein

beschreibt die Dichte die Masse pro definiertes Volumen in $[\text{kg}/\text{m}^3]$. Es werden folgenden Dichten unterschieden.

- Reindichte ist die Dichte eines Volumens ohne Hohlräume
- Rohdichte (Raumgewicht) ist die Dichte eines Volumens mit den Hohlräumen
- Schüttdichte (Schüttgewicht) ist die Dichte des Volumens eines losen Gemenges

Am Standort des GKS Schweinfurt wurden umfangreiche Versuche zur Ermittlung der Brennstoff- und Schlackedichten durchgeführt. Siehe dazu [18] und [19].

Die Dichte des Brennstoffs $\rho_{\text{Müll,komp vor As,As-position}}$ ist im Aufgabebereich (vor dem Aufgabeschieber) größer als die von einem Haufwerk $\rho_{\text{Müll,Schütt}}$. Grund hierfür ist die Kompression, welche der Müll durch das Gewicht der darüber liegenden Müllsäule und die Kraft vom Aufgabeschieber während des Beschickungsvorgangs F_{Vh} erfährt.

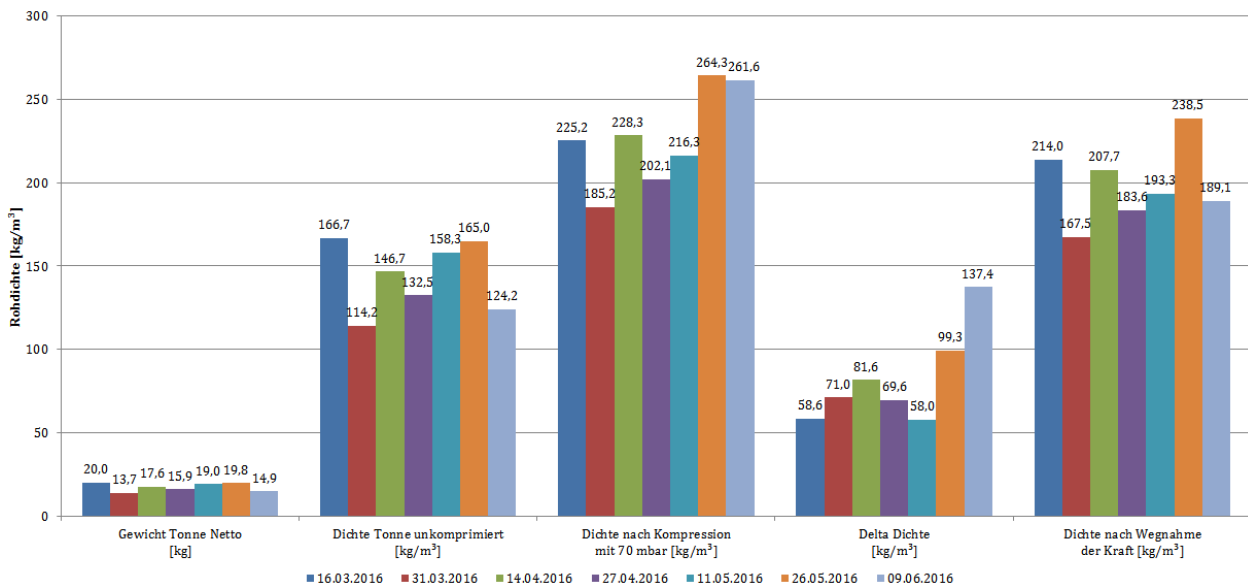
4.3 Versuche zur Ermittlung der Brennstoffdichten außerhalb der Feuerung

Um eine Massenstromberechnung durchführen zu können, ist es unumgänglich eine Erkenntnis über die Dichte zu haben. Aus diesem Grund wurden am Standort des GKS Schweinfurt verschiedenste Bereiche der Anlage - in Bezug auf die Dichte des Mülls - studiert und Versuche zu den relevanten Themen durchgeführt.

4.3.1 Dichte im Hausmüllbehälter

Um einen ersten Überblick über die Dichte von Hausmüll zu bekommen, wurde eine handelsübliche Mülltonne ($V = 120 \text{ l}$, Nennmaße nach EN 840) als Referenzbehälter herangezogen. Die Mülltonne wurde zuerst im leeren und trockenen Zustand unter Verwendung einer Personenwaage gewogen (Tara = 6,2 kg). Nachdem Müll von einem vier Personen Familien Haushalt (zwei Erwachsene, zwei Kinder) über einen Zeitraum von 14 Tage in der gesammelt wurde, wurde die Tonne dergestalt befüllt, dass das Volumen vollumfänglich gefüllt war. Im Anschluss ist diese erneut gewogen worden. Aus der Gewichts Differenz und den gemessen Füllvolumen, konnte die Rohdichte von Hausmüll errechnet werden. Die errechneten Rohdichten bewegen sich zwischen $114,2 \text{ kg}/\text{m}^3$ und $166,7 \text{ kg}/\text{m}^3$. Der Mittelwert aus diesem Versuch für die Rohdichte von Hausmüll beträgt $147,2 \text{ kg}/\text{m}^3$ mit einer Standardabweichung von $\pm 18,8 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Um ein erstes Gefühl für die Kompressibilität von Müll zu erlangen, wurde auf dem Müll in der Mülltonne ein Druck von ca. 70 mbar aufgeprägt. Derr Müll ließ sich um eine $\Delta_{\text{Rohdichte}}$ zwischen $58,6 \text{ kg}/\text{m}^3$ und $137,4 \text{ kg}/\text{m}^3$ verdichten. Nach Wegnahme der Kraft, expandierte die Müllsäule langsam wieder. Übrig blieb eine Art Grundverdichtung, d. h. der Müll nahm nicht mehr sein ursprüngliches Volumen an. Die nachfolgende Abbildung zeigt die errechneten Rohdichten in der 120-Liter-Mülltonne und das Verhalten nach dem ein Druck von ca. 70 mbar aufgebracht wurde.



Nur der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass eine volle Haushalts-Papiertonne eine Rohdichte von ca. 170 kg/m³ aufwies und eine Haushalts-Biotonne eine Rohdichte von ca. 330 kg/m³.

Dieser Versuch kann nur eine grobe Einordnung liefern. Aufgrund der Tatsache, dass hier nur ein Haushalt betrachtet wurde, kann die ermittelte mittlere Dichte nicht auf eine ganze Stadt, Kommune oder einen gesamten Zweckverband übertragen werden. Der Müll wurde in der Tonne stets unter Ausschluss von Umwelteinflüssen wie Nässe oder extreme Sonneneinstrahlung gesammelt. Dies stellt sich bei städtischen bzw. kommunalen Sammelbehältnissen sicher deutlich anders dar. In [7] wird - ohne weitere Angaben - aufgeführt, dass „die Dichte im Abfallsammelbehälter ca. 90 - 120 kg/m³ beträgt“.

In [21] wurden ebenfalls Untersuchungen u. a. auch an 120 l-Hausmüllbehältnissen für die Gebiete Stadtrand, städtisch und innerstädtisch einer 50.000-Einwohner Stadt. Dort kam man zu folgenden Resultaten:

- Stadtrand: mittlere Rohdichte = 177 kg/m³
- Städtisch: mittlere Rohdichte = 162 kg/m³
- Innerstädtisch: nicht repräsentativ, da nur 1,1 m³ Behälter vorhanden.

Weiters wird angegeben, dass der Restmüll aus der Stadtrandstruktur und der städtischen Struktur schwerer ist als der aus innerstädtischen Strukturen. Es wird auch saisonal unterschieden. Im Sommer ist die Rohdichte in der Stadtrandstruktur um ca. 20 % höher als im Winter. In der städtischen Struktur ist diese saisonal etwa identisch.

In [8] wird ebenfalls kurz auf den regionalen Unterschied der Hausmüllzusammensetzung bzw. dessen Ursache eingegangen. Im städtischen Abfall sind deutlich mehr Verpackungen (z. B. Kunststoffe) enthalten. Dagegen befinden sich in ländlichem Hausmüll mehr Bioabfälle. Dies könnte ein Grund für die höhere Rohdichte sein. Die Abfallmengen pro Kopf unterscheiden sich ebenfalls. Sie sind auf dem Land kleiner als in der Stadt. In den vergangenen Jahrzehnten sind außerdem beispielsweise feine Bestandteile wie Aschen aus Hausfeuerungen zunehmend durch Wohlstandsbestandteile wie Kunststoffverpackungen zurückgedrängt worden. Diese Effekte werden durch die Unterschiede im Grad der Wertstoffeffassung überlagert. Je nach Intensität ihrer Erfassung sind die Wertstoffe (Glas, Pappe, Papier, Metalle, Kunststoffe) mehr oder weniger im Abfall enthalten. Die getrennte Sammlung von Bioabfällen zur Kompostierung muss in diesem Zusammenhang ebenfalls beachtet werden.

4.3.2 Dichte im Müllfahrzeug bei der Anlieferung

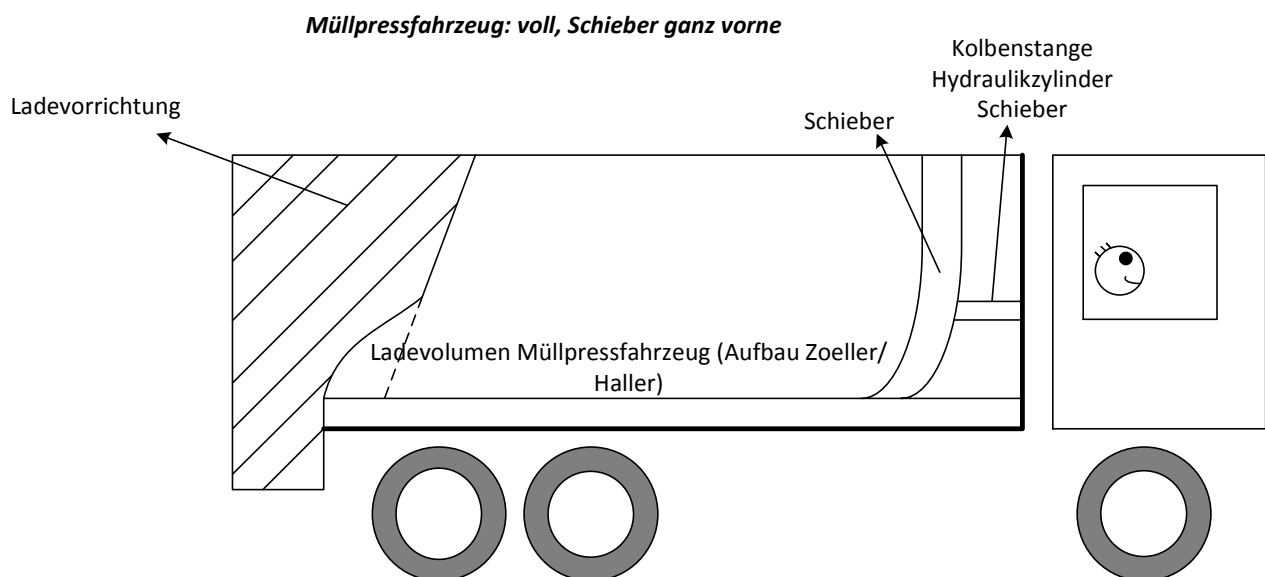
Die Anlieferung von Müll erfolgt zu einer MVA auf unterschiedlichen Wegen. Die Möglichkeiten der Anlieferung sind in der Regel auf Schiff, Bahn, LKW und Auto beschränkt. Bei den vorliegenden Versuchen zur Brennstoffdichtermittlung am Standort des GKS Schweinfurt, wurde ausschließlich eine Anlieferung per LKW betrachtet.

Die LKW-Anlieferung wird in Anlieferung mit Schubboden-LKW und Müllpressfahrzeuge unterteilt.

4.3.2.1 Dichte im Müllpressfahrzeug

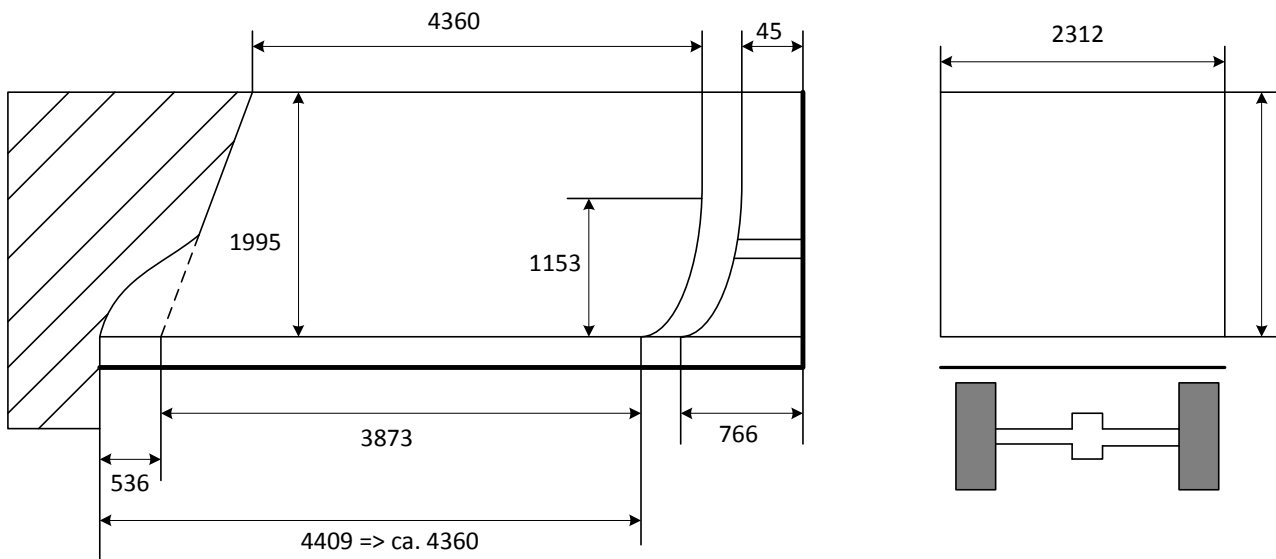
Aus [22] und [23] ist bekannt, dass im Müllfahrzeug der Abfall auf eine Dichte von ca. 450 kg/m^3 gepresst wird.

Die vollen Abfallbehälter werden durch die Hubeinrichtung in den hinteren Teil des Müllpressfahrzeugs entleert. Durch das Ladewerk wird der Müll in den Transportraum des Fahrzeugs gefördert. Im Laderaum befindet sich der sog. Schieber - dieser hat zwei Funktionen. Zum einen besitzt er die Aufgabe beim Entladen den Müll aus dem Müllpressfahrzeug zu schieben. Das geschieht durch den Hydraulikzylinder, der zwischen Führerhaus und Schieber verbaut ist. Zum anderen hält der Schieber während des Beladens durch das Ladewerk mit einem eingestellten Druck dagegen. Somit verdichtet das Ladewerk den Müll im Pressfahrzeug. Die nachfolgende Abbildung zeigt schematisch ein Pressfahrzeug.

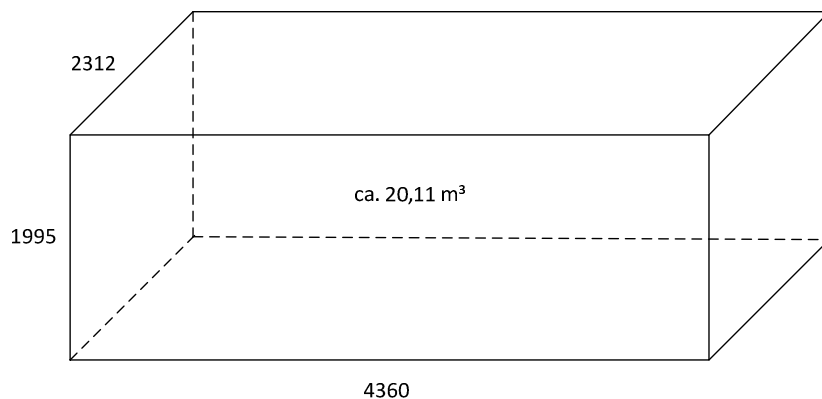


Bevor die Messreihe der am Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt gestartet wurde, ist der Laderaum eines Müllpressfahrzeuges vermessen worden:

Abmaße: Müllpressfahrzeug



Das Volumen des Laderaums wurde vereinfacht als Quader angenommen. Die Schrägen und Rundungen des Laderaums heben sich in etwa gegenseitig auf:

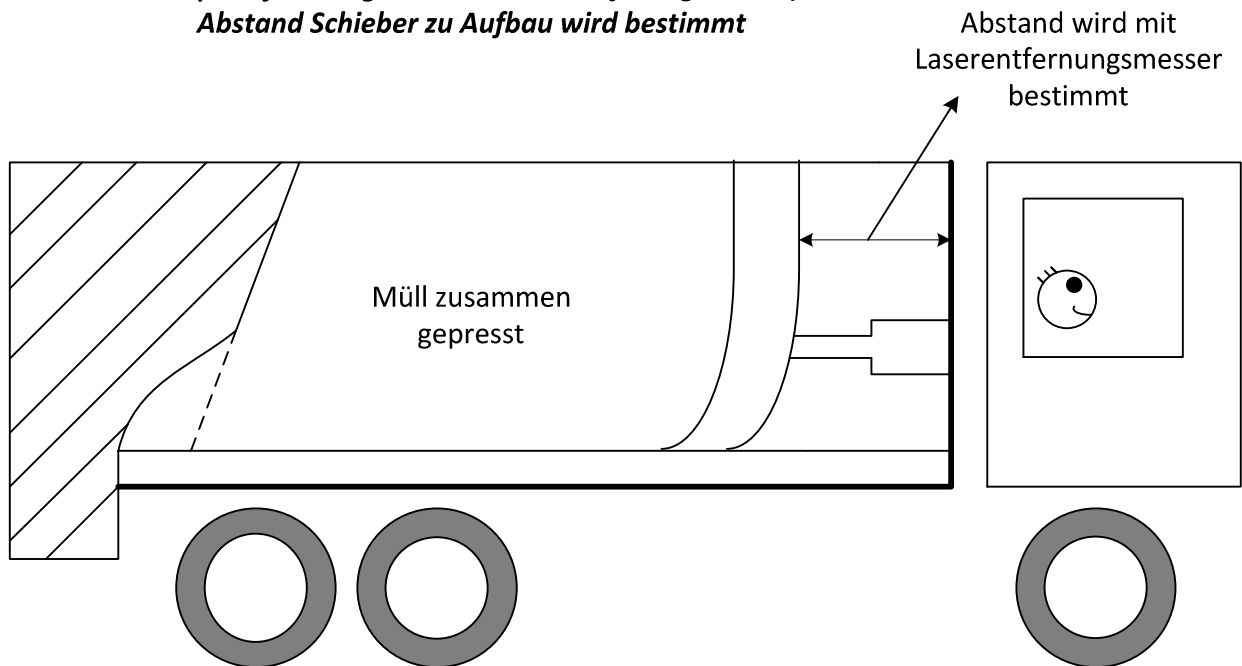


Schrägen und Rundung beispielsweise von Schieber und Ladevorrichtung heben sich in etwa auf

Bei der Anlieferung am GKS wird das Müllpressfahrzeug mit Hilfe der Eingangswaage gewogen. Ebenso wird das leere Müllpressfahrzeug beim Verlassen des Betriebsgeländes nochmals verwogen. Die Differenz der beiden gemessenen Massen ergibt die Müllmasse, welches das Müllpressfahrzeug geladen hatte.

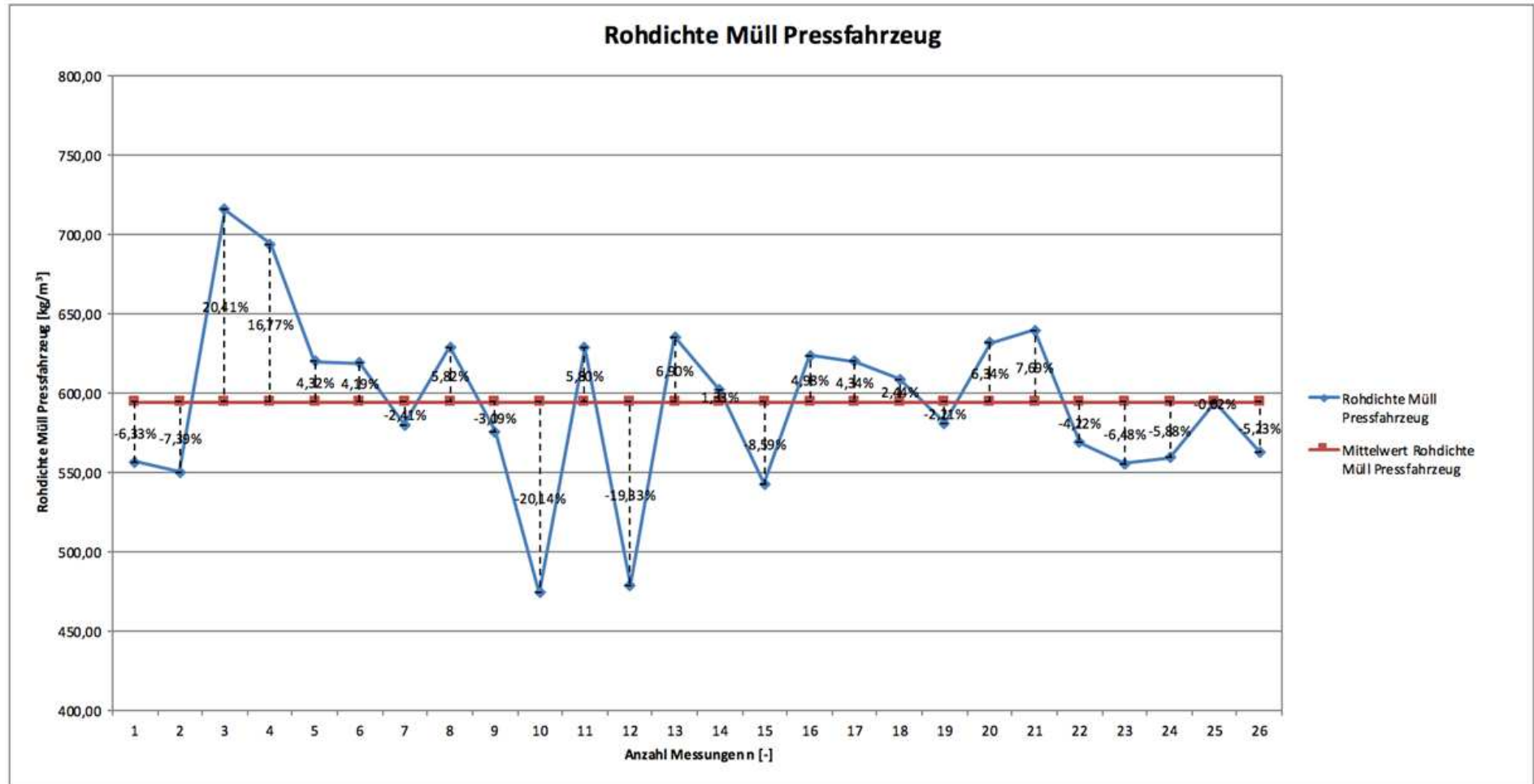
Durch eine Öffnung am Laderaumaufbau kann mit Hilfe eines Laserentfernungsmessers der Abstand zwischen Schieber und Führerhaus gemessen werden. Hiermit kann das Volumen bestimmt werden, welches dem geladenen Müll im Pressfahrzeug entspricht:

**Müllpressfahrzeug: Zustand bei Anlieferung im GKS,
Abstand Schieber zu Aufbau wird bestimmt**



Aus dem errechneten Volumen und der Masse des Mülls kann abschließend die Dichte des Mülls im Pressfahrzeug bestimmt werden.

In diesem Versuch wurden ausschließlich Fahrzeuge der Stadt Schweinfurt untersucht. Es handelt sich also hierbei um städtischen und innerstädtischen Müll. Einen kleinen Überblick der Messergebnisse gibt die nachfolgende Abbildung wieder.



Insgesamt wurden 26 Messungen an Müllpressfahrzeugen durchgeführt. Die durchschnittliche Dichte von Hausmüll im Müllpressfahrzeug beträgt 594 kg/m^3 im Pressfahrzeug mit einer Standardabweichung von 8,96%.

Die Messungen wurden über einen Zeitraum von 14 Tagen durchgeführt. In diesen zwei Wochen wurden in der Stadt Schweinfurt alle Stadtbezirke mindestens einmal geleert. Somit kann der durchschnittliche Dichtewert des Hausmülls auf andere deutsche Städte mit ähnlicher Bevölkerungsstruktur übertragen werden.

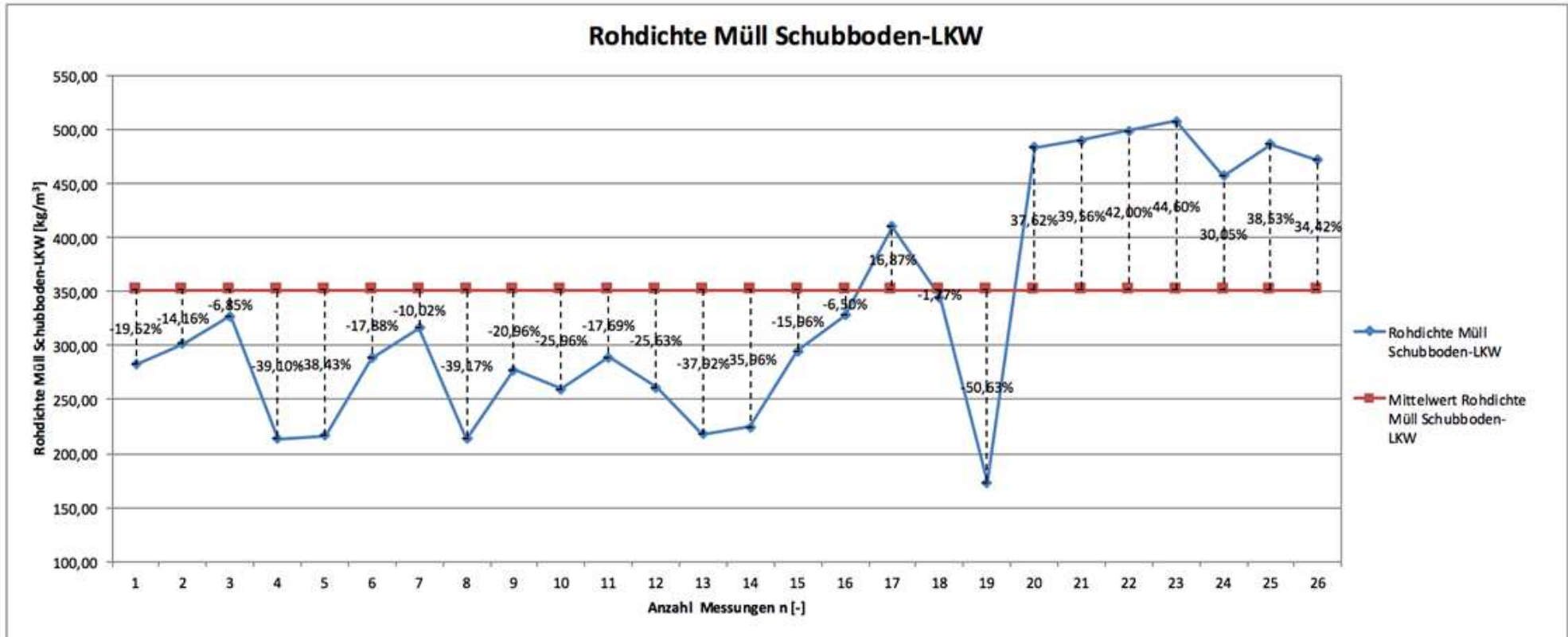
4.3.2.2 Dichte im Schubbodenlastwagen

Ein anderer Weg den Müll an die MVA anzuliefern, ist mit einem Schubboden-LKW. Meistens wird der Schubbodentrailer (ugs. „walking floor“) an Umladestationen von einem Kran oder Radlader beladen. Am GKS wurden mehrere LKWs vermessen. Die Masse des Mülls, welche der Schubboden-LKW anliefern, ist auf den gleichen Weg wie mit dem Müllpressfahrzeug ermittelt worden. Das Volumen im Anhänger wurde von oben abgeschätzt. Die Schwierigkeit bestand darin, die drei bis vier Haufen im Anhänger so gut wie möglich optisch auf den Leerräumen zu verteilen. Der Abstand von Oberkante des Anhängers bis zur gedachten Füllstandsebene wurde mit einem Laserentfernungsgesetz gemessen. Nachdem der Müll in den Müllbunker abgeladen wurde, ist der Trailer nochmal vermessen worden, um so das Leervolumen des Anhängers zu bekommen. Die gemessene Entfernung zwischen Oberkante Anhänger und Müll wird von der gesamt Höhe des Trailers subtrahiert und man erhält zusammen mit der Länge und Breite des Laderaums das angelieferte Müllvolumen. Wird nun die Masse durch das Müllvolumen dividiert, kann die Rohdichte im Schubboden-LKW ausgerechnet werden.

Insgesamt wurden 30 Ladungen auf dem Schubboden-LKW untersucht. Davon waren 19 Lieferungen mit Hausmüll oder hausmüllähnlicher Gewerbeabfall. Die ermittelte Dichte für diese Fraktion beträgt durchschnittlich 268 kg/m^3 mit einer Standardabweichung von 20%.

Bei den verbleibenden elf Ladungen wurde Müll aus einem Zwischenlager angeliefert. Dieser Müll wurde auf einer Deponie (zwischen)gelagert und war den Umwelteinflüssen ausgesetzt. Hier ergab sich eine mittlere Dichte von 481 kg/m^3 mit einer Standardabweichung von 6%.

Die mittlere Dichte der gesamten Schubboden-LKW-Betrachtung beträgt 351 kg/m^3 mit einer Abweichung von 31%. Die nachfolgende Abbildung zeigt die mittlere Dichte und der Abweichung der Einzelmessungen zum Mittelwert.



Abschließend zu dieser Untersuchung kann gesagt werden, dass durch die Fahrt der Müll im Trailer höchstwahrscheinlich etwas verdichtet wird. Die Messung wurde über elf Tage stichprobenartig durchgeführt und gibt nur einen groben Überblick über den Dichtebereich des angelieferten Mülls am Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt.

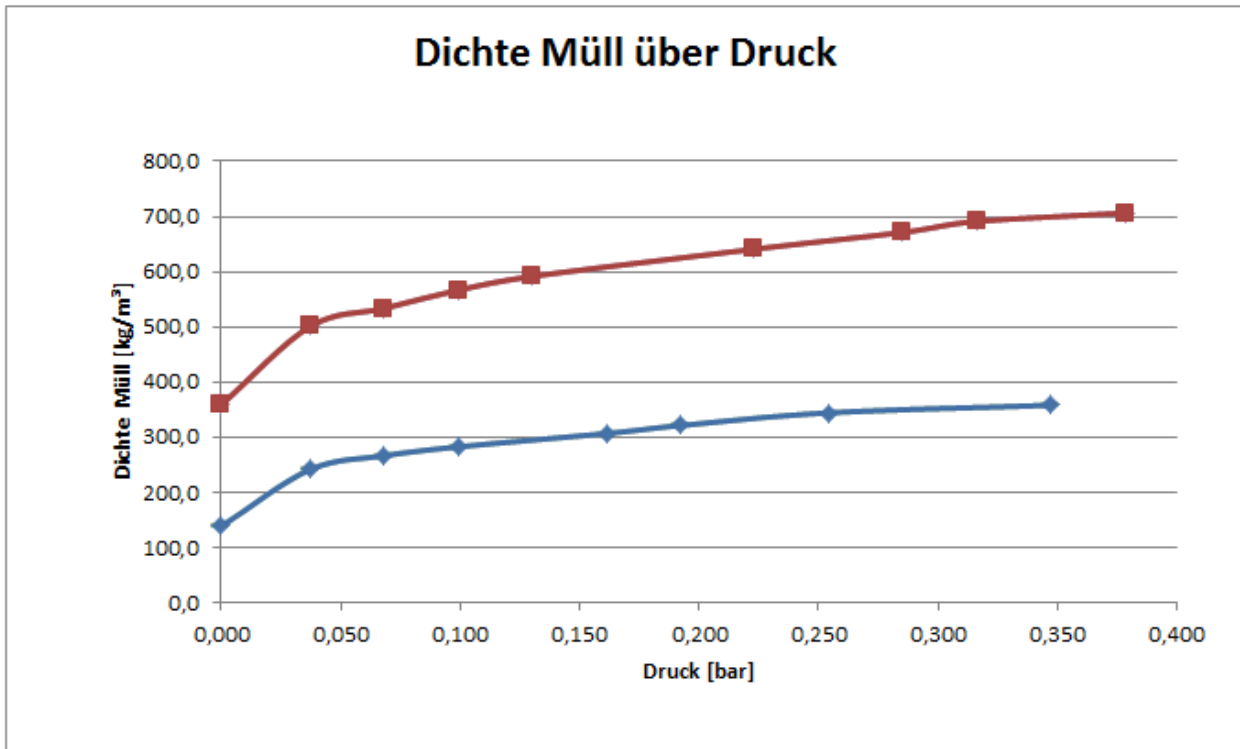
4.3.3 Portalpresse

Auf Grund der Tatsache, dass Müll kompressibel ist, wäre es interessant zu wissen, wie sich Hausmüll unter Druck verhält. Deshalb wurde am Standort des Gemeinschaftskraftwerks Schweinfurt eine so genannte Portalpresse der Firma Strautmann angeschafft:



Mit Hilfe dieser Portalpresse wurde in mehreren Versuchen eine Messkurve aufgezeichnet, welche die Dichte des Mülls über der aufgebracht Kraft wiedergibt. Die Presse kann mit einer Kraft von bis zu 580 kN pressen. Das entspricht einem Druck im Pressraum auf die Müllschüttung von ca. 7 bar. Durch einen nachträglich eingebauten Druckmessumformer, kann der direkt anliegende Druck am Hydraulikzylinder gemessen werden. Die Einbauposition der Hydraulikdruckmessung wurde so gewählt, dass sich diese direkt vor dem Druckzylinder befindet. Durch zwei Druckbegrenzungsventile kann der maximal anliegende Druck am Hydraulikzylinder geregelt werden. Während des Handbetriebes kann die Presse mit der Zwei-Hand-Schaltung schrittweise nach Belieben gefahren werden und somit wird der Müll in der Presse kontrolliert verdichtet. Der gefahrenen Presshub wird mit Hilfe eines Laserentfernungsmesser oben an der Presse gemessen. Die Masse des eingefüllten Mülls wird vorher mit einer Palettenwaage ermittelt. Das Schüttvolumen wird anschließend in der Presse vermessen. Die Startdichte des Mülls kann somit berechnet werden.

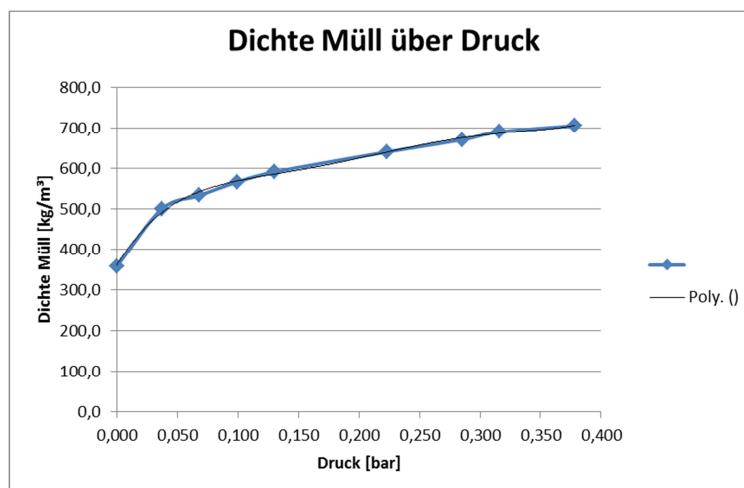
Es wurden zwei Versuche mit Hausmüll durchgeführt, deren Dichten sehr unterschiedlich waren. Der Druck auf den Müll in der Presse wurde schrittweise erhöht und anschließend für jeden Schritt der gefahrene Hubweg vermessen. Die untenstehende Abbildung zeigt die zwei Verdichtungskurven von Müll mit einer Startdichte von jeweils 138 kg/m^3 und 359 kg/m^3 bis zu einem Druck auf die Müllschüttung von 400 mbar.



Aus den Verdichtungskurven kann ein Polynom fünften Grades abgeleitet und damit ohne größere Abweichung die Verdichtungskurve für jeden Müll mit beliebiger Startdichte ausgerechnet werden. Es muss lediglich die Startdichte des Mülls bekannt sein.

$$\rho_{\text{Müll,Druck}} = 503784 \cdot p^5 - 574030 \cdot p^4 + 244120 \cdot p^3 - 48263 \cdot p^2 + 4996,6 \cdot p + \rho_{\text{Müll,Schütt}}$$

Die Abbildung zeigt die Verdichtungskurve des Mülls mit einer Grunddichte von 359 kg/m^3 und dem Polynom fünften Grades:



Zu beachten ist allerdings, dass das Polynom fünften Grades bis zu einer Dichte von 400 mbar sehr gut passt, danach wird aufgrund der Eigenschaft eines Polynoms die berechneten druckabhängigen Dichtewerte zu den gemessenen druckabhängigen Dichten stärker abweichen.

4.4 Versuche zur Ermittlung der Brennstoffdichten im Brennstoffaufgabebereich

Aus [7] ist bekannt, dass durch die Aufnahme des Abfalls durch den Müllgreifer und den anschließenden Abwurf auf den Aufgabetrichter, der Abfall wiederum eine Auflockerung erfährt, die zu einer Rohdichte von ca. 200 -350 kg/m³ am Rostanfang führt. In [20] wird z. B. mit einer Dichte von 350 kg/m³ im Aufgabebereich gerechnet.

Da in den Literaturquellen keine Angaben zur Herkunft und Belastbarkeit dieser Daten gemacht wurden, werden am Standort des GKS Schweinfurt eigene Versuchsreihen durchgeführt. Es wird vermutet, dass in den Literaturstellen, die Dichteerhöhung durch die Gewichtskraft der Brennstoffsäule unzureichend berücksichtigt wurde.

Um die Dichten des Brennstoffs im Aufgabebereich zu ermitteln wurde eine Mülltrichterbeobachtung angewendet. Während des Vor- und Rückhubes ist eine kontinuierliche Bewegung der Müllschüttung im Trichter zu beobachten. Bei Stillstand des Aufgabeschiebers stagniert die Müllschüttung im Trichter. Aufgrund dieser Tatsachen und Erkenntnisse aus Videoaufnahmen, welche den Aufgabebereich beim Beschickvorgang zeigen, ist ein Durchrutschen des Brennstoffs in den Feuerraum auszuschließen. Die Grundidee des Versuchs ist, dass während des Rückhubes nur das Volumen an Müll von oben nachrutschen darf, welches der Aufgabeschieber eingenommen hat. Der Aufgabestößel am GKS Schweinfurt besitzt die Maße (L x B x H) 1050 mm x 3130 mm x 300 mm und gibt somit im Rückhub ein Volumen von 0,986 m³ frei. Durch die verbauten Verschleißplatten an den Trichterseitenwänden kann das Volumen, welches nachrutscht ziemlich exakt bestimmt werden. Aus einer Vielzahl an beobachteten Beschickhüben konnte ermittelt werden, dass während des Rückhubes durchschnittlich 1,64 m³ aus dem Trichter nachrutschen. Daraus ergibt sich ein Verdichtungsfaktor im Müllschacht zwischen Mülltrichter und Aufgabebereich von 1,674.



Ebenfalls kann mit Hilfe der Verschleißplatten das Volumen, welches der Müll beim Entladen mit dem Kran einnimmt, bestimmt werden. Mit der Masse von der Kranwaage kann so die Dichte im oberen Teil des Mülltrichters errechnet werden. Untersuchungen zeigten, dass sich die durchschnittliche Dichte im oberen Segment des Mülltrichters auf 275 kg/m³ beläuft. Der verwendete Müllgreifer im Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt fasst ein Volumen von 7 m³. Nimmt man nun generell an, dass der Greifer beim Beschicken der

Kessel immer vollgefüllt ist und nahezu kein Müll überhängt, kommt man auf eine mittlere Mülldichte im Greifer von 671 kg/m^3 .

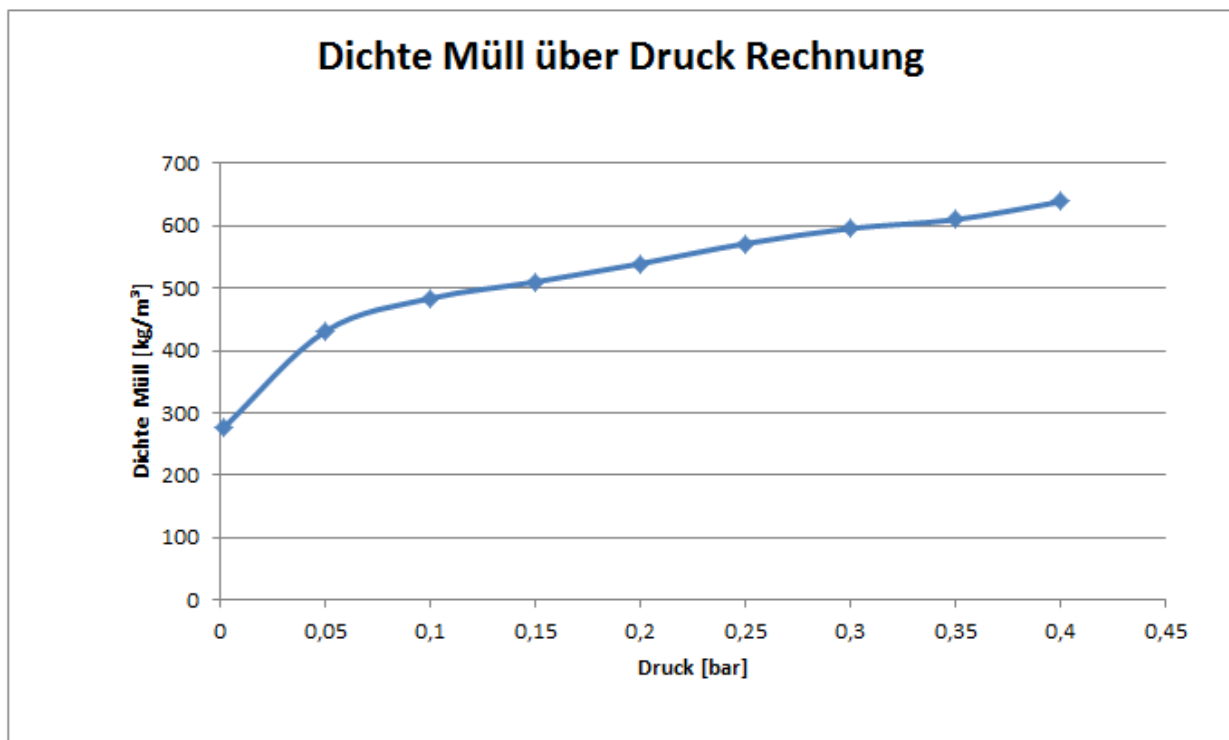


Aus der Dichte im Aufgabebetrachter von 275 kg/m^3 und den Verdichtungsfaktor von 1,674 kann von einer Rohdichte im Aufgabebereich, d.h. örtlich vor dem Aufgabeschieber, bevor dieser jedoch einen Druck auf die Schüttung ausübt von ca. 460 kg/m^3 ausgegangen werden.

4.5 Zusammenfassung der Versuche zur Ermittlung der Brennstoffdichten

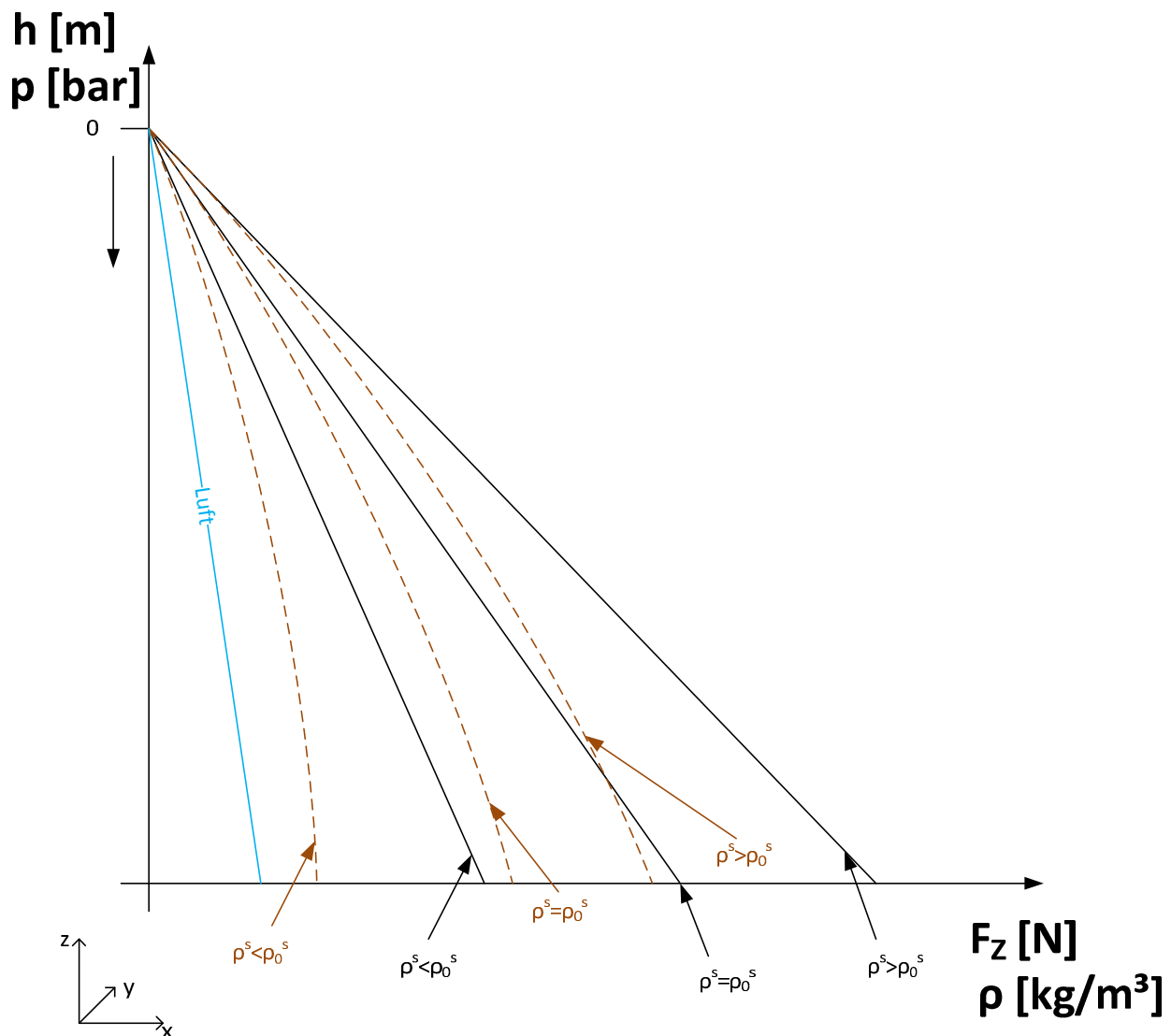
Vergleicht man nun die ermittelten Dichten der Schubboden-LKWs für Hausmüll 268 kg/m^3 und der Dichte im oberen Teil des Mülltrichters 275 kg/m^3 , stimmen diese ziemlich genau überein. Mit Sicherheit wird in Schweinfurt Müll angeliefert der wesentlich leichter ist als 275 kg/m^3 . Aber es werden auch, wie die Untersuchungen an den Schubboden-LKWs zeigten, Chargen angeliefert die eine wesentlich höhere Dichte aufweisen. Im Müllbunker wird der angelieferte Müll durch die Kranführer gut vermischt und nach einiger Zeit in den Trichter gegeben. Also wird eine mittlere aufgegebene Mülldichte in Schweinfurt von 275 kg/m^3 festgelegt.

Rechnet man nun eine Verdichtungskurve mit dem Polynom aus dem Portalpressenversuch und einer Dichte von 275 kg/m^3 nach erhält man folgendes Diagramm:



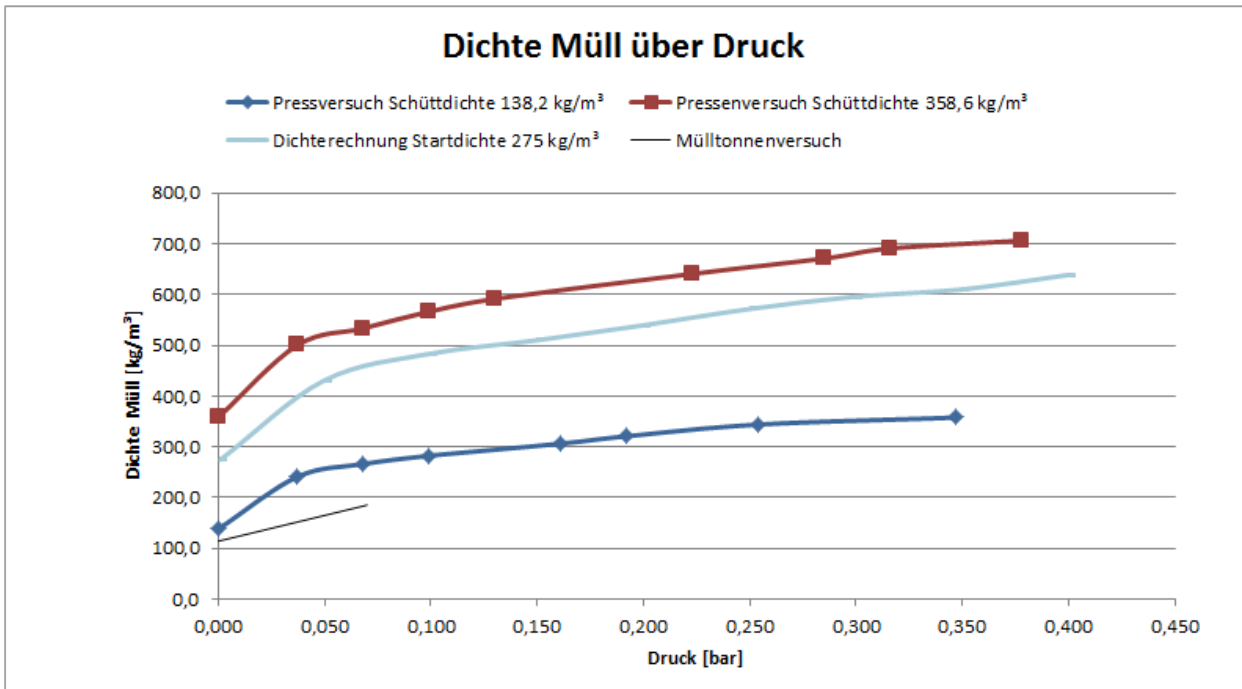
Vergleicht man nun die ermittelte Dichte im Aufgabebereich von 460 kg/m^3 mit der Verdichtungskurve des Mülls mit 275 kg/m^3 Startdichte, würde das bedeuten, dass im Aufgabebereich ein Druck von ca. 71 mbar herrscht.

Der Druck ist wesentlich geringer als der zu Erwartende, wenn mit der Trichter-, Schachtgeometrie, Füllstand und der mittleren Dichte im Aufgabeschacht von $367,5 \text{ kg/m}^3$ gerechnet wird. Der geringere Druck und die Differenz der beiden Werte lassen sich mit der Abstützung an den Trichterwänden und der Wandreibung eines Schachtes oder Silos erklären. Aus [24] ist bekannt, dass mit zunehmender Trichterhöhe sich ein immer größerer werdender Teil der Gewichtskraft vom Schüttgut an den Seitenwänden abstützt.

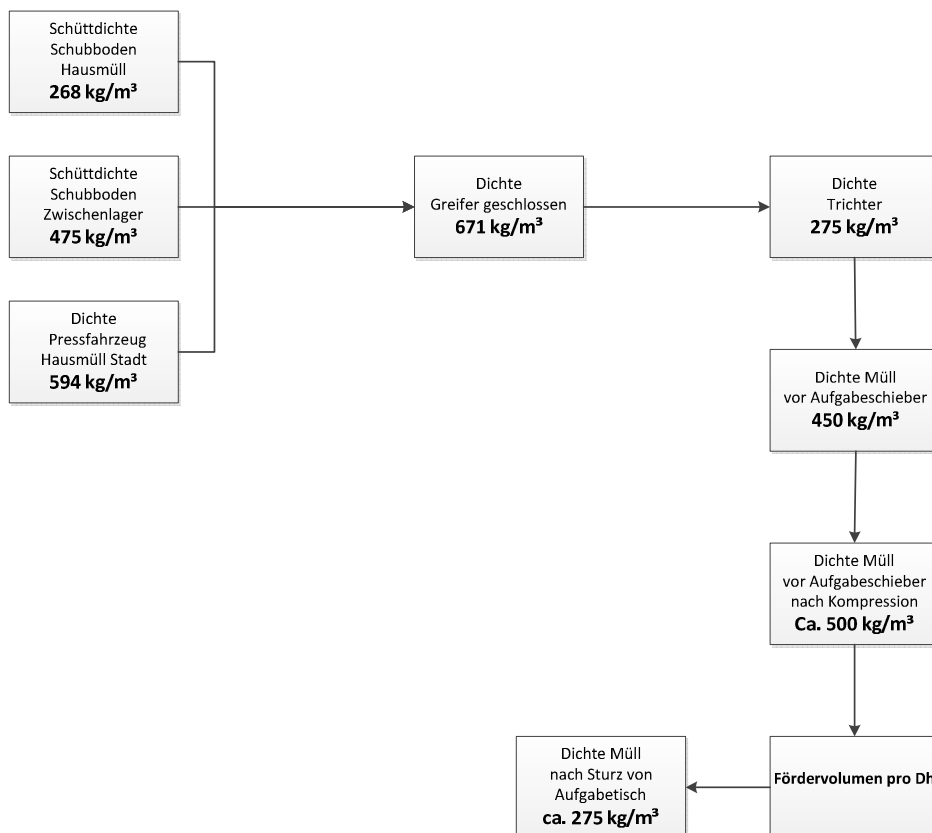


Obige Abbildung zeigt eine qualitative Darstellung der Höhe/Druck über der Kraft/Dichte bei Schüttgütern im Idealfall (schwarz) und Realfall (braun) ab. Im Idealfall stützen sich keine Kräfte an der Seitenwand ab. Die Gewichtskraft entspricht der in z-Richtung wirkende Kraft F_z . Die Dichte nimmt direkt proportional zur steigenden Höhe zu. Im Realfall tritt das Phänomen auf, dass ein Teil der Gewichtskraft sich an den Seitenwänden „abstützt“. Somit ist auch die resultierende Kraft F_z kleiner. Demnach nimmt die Verdichtung über der Höhe ebenfalls nicht so stark zu wie im Idealfall.

In der nachfolgenden Abbildung sind die Pressenversuche und die Berechnung von Müll mit einer Startdichte von 275 kg/m^3 zusammengeführt. Das bei dem Mülltonnenpressversuch nicht die gleichen Dichten als bei dem Versuch mit der Portalpresse erreicht wurden ist vermutlich einer erhöhten Wandreibung in einer Mülltonne geschuldet sowie einem - im Vergleich zur Portalpresse - suboptimal konstruierten Kompressionsstößel.



Führt man nun alle Erkenntnisse der Dichteuntersuchungen an den verschiedenen Anlagenteilen zusammen, kann man wie folgt zusammenfassen:

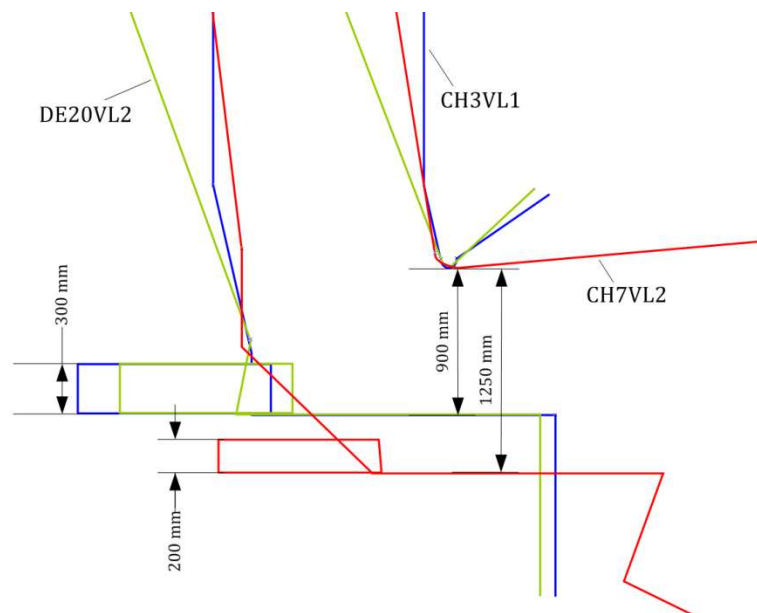


5 Versuche zur Brennstoffbeschickung

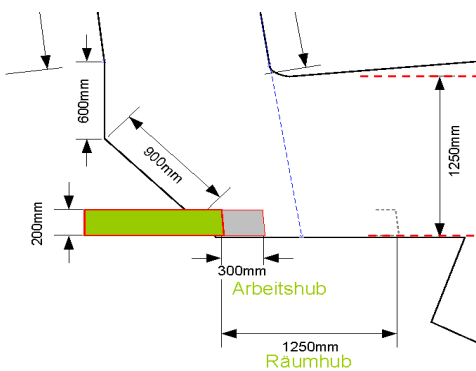
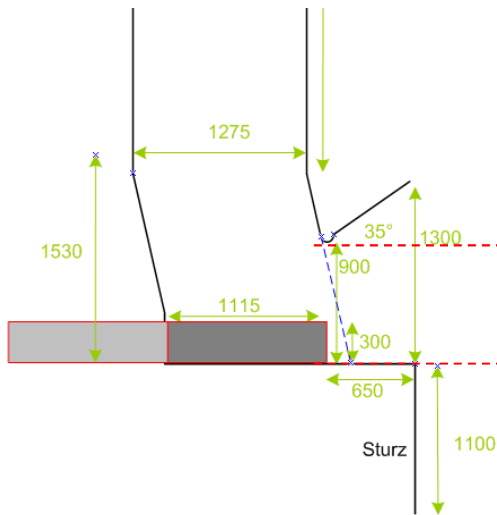
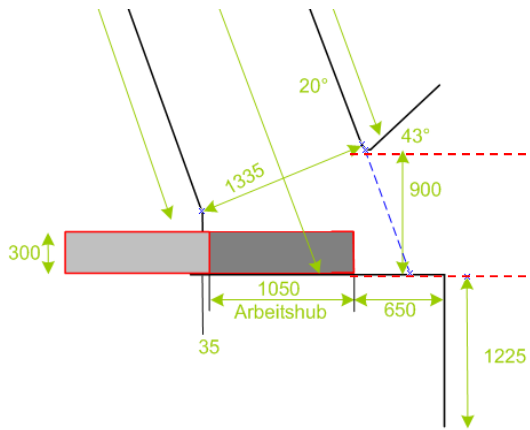
Aus der Charakterisierung des Brennstoffs Müll und den Versuchen zur Dichtebestimmung steht fest, dass der Brennstoff Müll - vermutlich bis zu einem gewissen Maximum - kompressibel ist. Wie der Versuch mit der Portalpresse (vgl. Abschnitt 4.3.3) gezeigt hat, kann der Müll unter Druck stark verdichtet werden. Ausgehend vom Aufgabeschieber wird auf die Müllschüttung im Aufgabebereich während des Vorhubs ebenso eine Kraft wirken. Somit ist davon auszugehen, dass auch an dieser Stelle eine Komprimierung des Mülls stattfindet. Erst wenn dieser Kompressionsvorgang (während dem Vorhub des Aufgabeschiebers) abgeschlossen ist, kann ein effektiver Transport von Material erfolgen. Nun scheint es interessant zu sein, diesen Kompressionsweg bestimmen zu können. Denn dieser Kompressionsweg verursacht eine Volumenreduktion und damit verbunden eine Dichteerhöhung der Brennstoffschüttung vor dem Aufgabeschieber. Um den Kompressionsweg eines Aufgabeschiebers zu ermitteln, wurden an verschiedenen Anlagen Versuche durchgeführt.

5.1 Videobildbasierte Beobachtungen

Der Beschickvorgang ist an einer Anlage im laufenden Betrieb in der Regel visuell nicht einsehbar, da die Flammenfront den Blick auf das Aufgabemaul versperrt und Schauluken meist nur an der Ofenrückwand angebracht sind. An den Anlagen CH7VL2, CH3VL1 und DE20VL2 konnten dennoch weiterführende Beobachtungen an der Brennstoffaufgabe mittels Videoaufnahmen durchgeführt werden. Während die Anlagen DE20VL2 und CH3VL1 eine annähernd identische Geometrie der Brennstoffaufgabe aufweisen, unterscheidet sich die Anlage CH7VL2 von den anderen beiden grundlegend. Betrachtet man die unter 3.4 benannten Kenngrößen, so wird deutlich, dass z.B. DE20VL2 und CH3VL1 ein Verhältnis von Höhe Aufgabemaul zu Höhe Aufgabeschieber von $\frac{h_{AM}}{h_{AS}} = 3$ aufweisen, während bei CH7VL2 gilt: $\frac{h_{AM}}{h_{AS}} = 6,25$. Das bedeutet, dass bei DE20VL2 und CH3VL1 die Höhe des Aufgabemauls (900 mm) im Verhältnis zur Höhe des Aufgabeschiebers (300 mm) relativ klein ist, während bei CH7VL2 die Höhe des Aufgabemauls (1250 mm) im Verhältnis zur Höhe des Aufgabeschiebers (200 mm) sehr groß ist. Es ist zu vermuten, dass sich dieser große Unterschied im Verhältnis $\frac{h_{AM}}{h_{AS}}$ auch am Beschickvorgang bemerkbar macht. Überlagert man die 3 Geometrien, so wird der Unterschied deutlich:

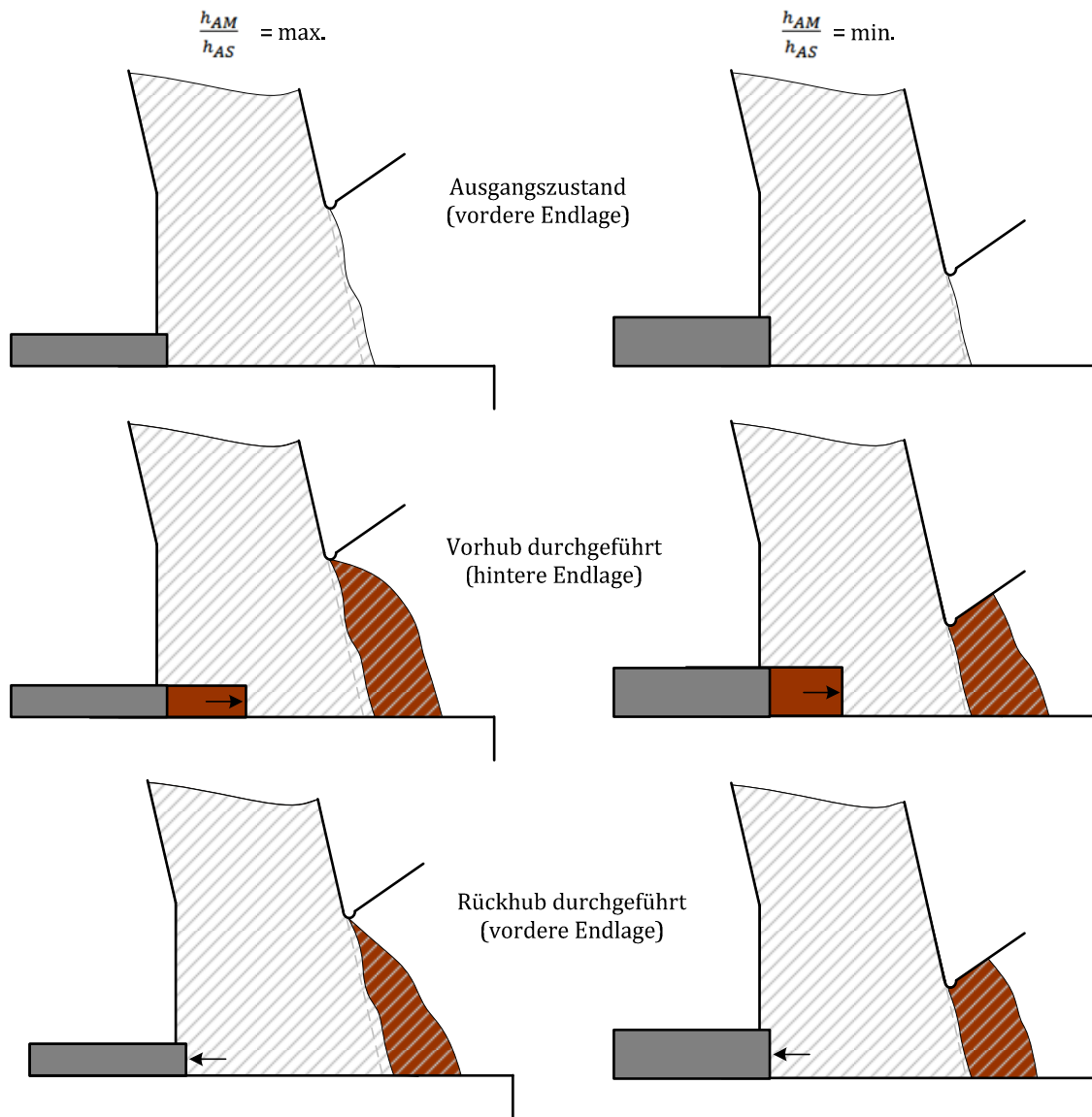


Ausschnitte aus dem Bildmaterial der Versuchsfahrten sind in nachstehender Abbildung dargestellt, mit der Reihenfolge: DE20VL2, CH3VL1, CH7VL2.



Die Videobildbasierte Beobachtungen zur Fördereffektivität des Beschickstößels haben die Erkenntnis gebracht, dass der Brennstoff, der sich direkt vor dem Beschickstößel befindet, am optimalsten gefördert wird. Bei den Anlagen mit kleinem $\frac{h_{AM}}{h_{AS}}$ wird der gesamte Brennstoffpropfen vor dem Aufgabeschieber bis zur Höhe des Aufgabemauls durchgepresst.

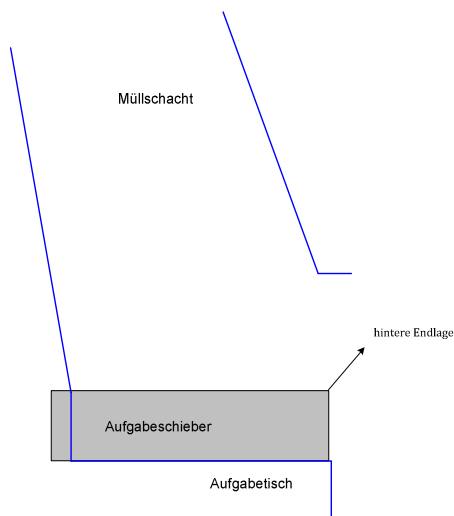
Bei der Anlagen mit großen $\frac{h_{AM}}{h_{AS}}$ ist hingegen deutlich zu erkennen, dass die Fördereffektivität nach oben hin zur Kante des Aufgabemauls signifikant abnimmt. Über Verhakungseffekte zwischen den Brennstoffpartikeln wird zwar der gesamte Brennstoffpropfen beim Vorhub des Stößels ausgelenkt, jedoch wird dieser an der oberen Aufgabemaulkante nur komprimiert bzw. verpresst und nicht kontrolliert auf den Rost dosiert. Beim Rückhub des Beschickstößels rutscht ein Teil dieser verpresste Menge nach unten auf den Aufgabertisch um beim Vorhub auf den Rost dosiert zu werden. Ein anderer Teil fällt regelrecht wieder zurück in Richtung der Kante des Aufgabemauls und bildet somit eine Art Schüttkegel aus. Dennoch bleibt ein signifikanter Anteil (ca. 2/3 Höhe Aufgabemaul) an Brennstoff der oberhalb des Aufgabeschiebers „mitgenommen“ wird. Die unterschiedlichen Beobachtungen sind auf nachstehender Abbildung dargestellt.



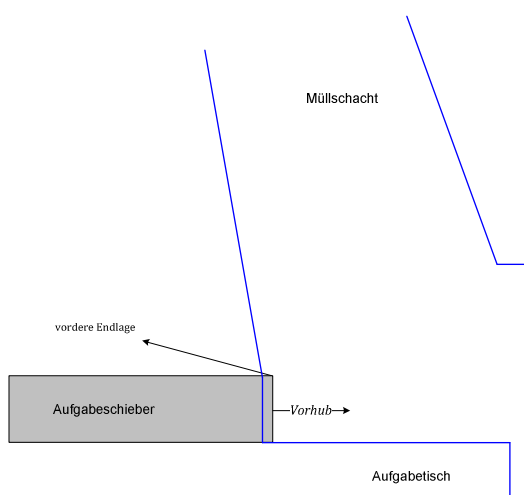
5.2 Ermittlung der Kompressibilität

5.2.1 Versuche beim Anfahren

Das Ziel des Versuchs ist es, den Kompressionsanteil eines Vollhubes bei einer Müllverbrennungslinie quantitativ zu bestimmen. Gleichzeitig wird, wie im Kapitel 4.4 beschrieben, nochmals die Dichte im Aufgabeschacht bestimmt. Der Versuch wurde an den Anlagen DE20VL1 und CH3VL1 durchgeführt. Die Versuchsdurchführung war an beiden Anlagen identisch: Falls der Mülltrichter der ausgewählten Mülllinie nicht leer ist, muss dieser nun leer gefahren werden. Anschließend wird die Absperrklappe des Müllschachtes geschlossen, um Falschlufteintritt in den Kessel zu verhindern. Der Kessel fährt sobald die Rauchgastemperatur sinkt in Stützbrennerbetrieb. Nachdem sich kein Müll mehr im Schacht befindet, wird der Aufgabestößel in die hintere Stellung gefahren und verweilt dort. Damit wird ein Durchrutschen des Mülls während des Aufgebens unterbunden.



Anschließend wird die benötigte Anzahl an Greifer mit Müll in den Schacht, bzw. auf die Absperrklappe fließend aufgegeben, um ein Verstopfen des Müllschachtes zu vermeiden. Während dessen wird die Absperrklappe langsam geöffnet, der aufgegeben Müll rutsch den Schacht bis auf den Aufgabestößel herunter. Der normale Füllstand des Trichter sollte nun möglichst schnell durch aufgeben weiterer Greifer Müll erreicht werden. Dabei ist darauf zu achten, dass sich der Müll auf dem Aufgabestisch noch nicht entzündet, sonst versperren Flammen die Sicht auf die Müllschüttung. Anschließend wird der Aufgabestößel in seine vordere Endlage gefahren:



Der Füllstand des Trichters wird notiert, um anschließend das Volumen im Trichter bestimmen zu können. Zeitgleich mit dem Starten des Vorhubes werden die Videokamera, welche die Aufgabe durch die Schauluken an der Kesselrückwand filmt und die Stoppuhr gestartet. Der Aufgabeschieber wird mit erhöhter Doppelhubzahl von Hand gefahren, umso möglichst viele Doppelhübe fahren zu können, bis sich der Müll im Feuerraum entzündet. Die Position des Aufgabeschiebers wird in 5%-Schritten fernmündlich durchgegeben. Sobald die erste Bewegung der Müllschüttung vor dem Aufgabestößel erkennbar ist, wird die Zeit und Stellung des Schiebers notiert. Anschließend wird der Vorhub bis zur hinteren Endlage durchgeführt. Der Rückhub wird mit erhöhter Geschwindigkeit gefahren, sodass der Aufgabestößel sich möglichst schnell in der vorderen Endlage befindet.

An DE20VL1 konnten insgesamt vier Doppelhübe betrachtet werden, bis Flammen die Sicht auf den Aufgabestisch versperren. Der erste Hub hatte einen 244 mm langen Kompressionsweg. Bei Hub zwei bis vier waren die Kompressionslängen 535 mm, 505 mm und 565 mm. Ähnliche Werte ergaben sich bei weiteren Untersuchungen an CH3VL1. An dieser Anlage erfolgte das Anfahren aus einem kalten Zustand - wie nachfolgende Abbildung verdeutlicht.

Beschickstößel in CH3VL1 bei ca. 400 mm Vorhubstrecke - noch kein Materialtransport:



Beschickstößel in CH3VL1 bei ca. 600 mm Vorhubstrecke - erster Materialtransport erkennbar:



Das bringt den Vorteil mit sich, dass es keine Zeitnot gibt, bis der Müll sich entzündet. Es wurden also an CH3VL1 je 2 Hübe mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten gefahren (6,17 mm/s und 4,62 mm/s). Das Ergebnis war bei beiden Geschwindigkeiten annähernd identisch. Der Brennstofftransport begann erst bei ca. 600 mm Vorhubstrecke.

Die Dichteberechnung im Trichter/Schacht erfolgte nach dem Prinzip aus Kapitel 4.4. Das maximale Volumen der Aufgabekonstruktion wurde ermittelt. Der Füllstand wurde von einer Videokamera in der Schaltwarte festgehalten und anschließend mit Hilfe der gut sichtbaren Verschleißplatten an den Trichterwänden bestimmt. Über die am Kran angebrachte Waage kann die Masse, welche in den Trichter geworfen wurde gemessen werden.

Es ergaben sich an DE20VL1 eine mittlere Rohdichte von Müll im Aufgabeschacht beim Anfahren von 250 kg/m^3 und an CH3VL1 eine Dichte von 262 kg/m^3 .

In [20] wurde ebenfalls ein solcher Versuch durchgeführt, allerdings wurde nicht die Kompression bestimmt. Nach einem vollen Vorhub bildete sich zwischen Sturz und Rost ein Schüttkegel aus. Dieser wurde vermessen, und daraus wurden Schüttwinkel und Volumen bestimmt. Es ergab sich weiter eine Dichte der - annähernd - losen Schüttung auf dem Rost im Bereich 300 bis 350 kg/m^3 .

Die Dichten aus den oben beschriebenen Versuchsfahrten sind deutlich geringer als die gemessene Dichte im laufenden Betrieb. Das kann einerseits daran liegen, dass beim Anfahren eines Kessels möglichst leichter Müll genommen wird - dieser entzündet sich leichter. Visuell konnte dies jedoch nicht festgestellt werden und auch die Müllkranführer verneinten dies.

Somit besteht auch die Möglichkeit, dass sich über der Trichterhöhe erst nach einer gewissen Zeit des Betriebs eine Art Grundverdichtung der gesamten Müllsäule einstellt. Da der Dichteunterschied im Trichter zwischen den Versuchen beim Anfahren und im laufenden Betrieb signifikant war, wird nun auch vermutet, dass sich der oben ermittelte Kompressionshub im laufenden Betrieb anders darstellen könnte als beim Anfahren. Um nun die Ergebnisse aus diesem Versuch vertiefen zu können, wurden weitere Versuche zur Ermittlung des Kompressionshubs im laufenden Betrieb durchgeführt.

5.2.2 Versuche im laufenden Betrieb

Zur Bestimmung des Kompressionshubs wurde wiederum der Trichter herangezogen. Aufgrund der Tatsache, dass im laufenden Betrieb sowohl im Vorhub als auch im Rückhub eine kontinuierliche Bewegung des Mülls zu sehen ist, wurde beobachtet, an welcher Hubposition im Vorhub im Trichter die erste Bewegung sichtbar ist.

Sobald der Aufgabestößel in die vordere Endlage gefahren ist und den Vorhub startet, ist der Mülltrichter mit einem Bildschirm aus der Schaltwarte zu beobachten. Mit Hilfe eines ausgesuchten Fixpunkts in der Müllschüttung kann eine Bewegung beobachtet werden. Sobald eine Bewegung des Fixpunktes zu verzeichnen ist, wird die Aufgabeposition des Aufgabeschiebers notiert. Diese erhält man aus der Feuerleistungsregelung (FLR). Während des Versuchs ist aufgefallen, dass tendenziell eine mögliche Bewegung des Mülls im Trichter während des Vorhubs bei einem niedrigen Trichterfüllstand besser auszumachen ist.

Aus den Beobachtungen konnte ein durchschnittlicher Kompressionshub von 124 mm mit einer Standardabweichung von 41 mm errechnet werden. Auf den Vollhub bezogen würde $11,86\% \pm 3,94\%$ komprimiert werden.

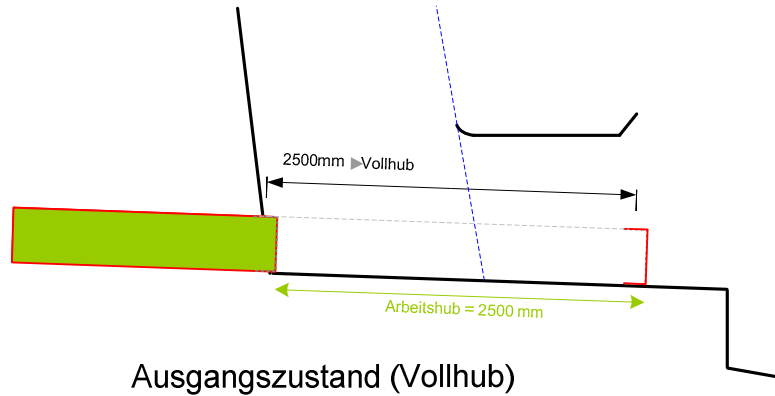
Mit dem das beide Versuche zur Ermittlung des Kompressionsanteils vom Vollhub sehr unterschiedliche Ergebnisse hervorbrachten, sollten diese Erkenntnisse durch weitere Untersuchungen untermauert werden.

5.3 Variation des Beschickungshubs

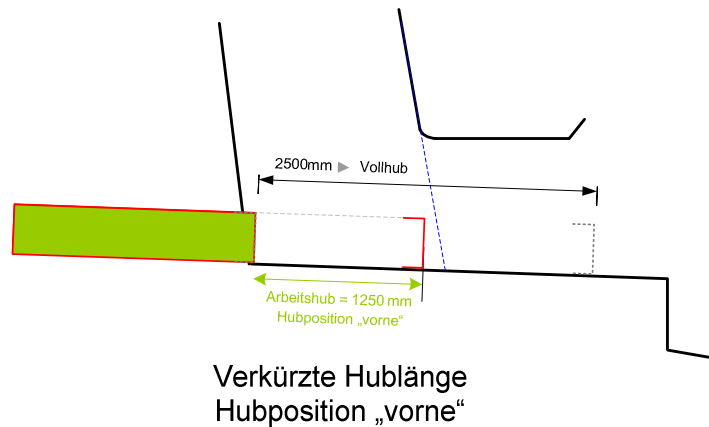
Würde man die Hublänge soweit verkürzen, dass kein Feststofftransport an der Aufgabe realisiert werden kann, würde der Stößel innerhalb des Kompressionshubs fahren. Den fehlenden Feststofftransport kann man an der negativen Abweichung der Dampflast vom Sollwert sehen. Zum einen wurden verschiedene Hublängen an der Aufgabe gefahren und zum anderen wurde auch die Hubposition verändert.

5.3.1 Einstellparameter für Hublänge und Festlegung der Hubposition

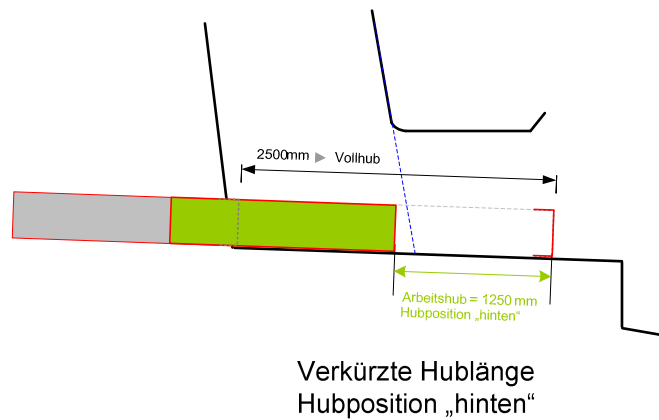
Die Versuche mit veränderter Hublänge und Hubposition wurden an den Anlagen DE20VL1 und UK2VL1 durchgeführt, daher sind einige Parameter und Randbedingungen festgelegt worden. Nachstehende Abbildung zeigt ein Schema, welches den Normalbetrieb (Vollhub) von UK2VL1 zeigt:



Die Variation der Hubpositionen wurde auf vorne, mittig und hinten festgelegt. Bei der vorderen Hubposition startet der Aufgabeschieber aus der unveränderten vorderen Endlage. Die hintere Endlage ist mit den eingegebenen Werten in der FLR etwas nach vorne gelegt worden:



Bei der hinteren Hubposition, fährt der Aufgabestößel bis zu seiner hinteren unveränderten Endlage. Die Verkürzung des Hubes wird nur im vorderen Teil vorgenommen:



Äquivalent dazu ist die Verkürzung des Vorhubs bei der mittleren Hubposition im vorderen und hinteren Teil vorgenommen worden.

Außerdem wurde festgelegt, dass jeweils zu den drei Hubpositionen die Versuche mit 50% und 70% des Vollhubes gefahren werden. Eine Hubposition und Hublänge gilt als fahrbar, sobald der Versuch mind. 2,5h ohne Einbruch der Dampflast durchgeführt werden konnte. Die Versuche wurden aus dem Vollhub (Ausgangszustand) heraus gestartet. Falls schon ein Versuch vorher gefahren wurde, wurde eine Beruhigungszeit zwischen den beiden Verkürzungsversuchen von mind. 1,5 h mit einer Hublänge = Ausgangszustand eingehalten. Innerhalb dieses Zeitfensters stabilisiert sich der Kessel und es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Versuche nicht gegenseitig beeinflussen.

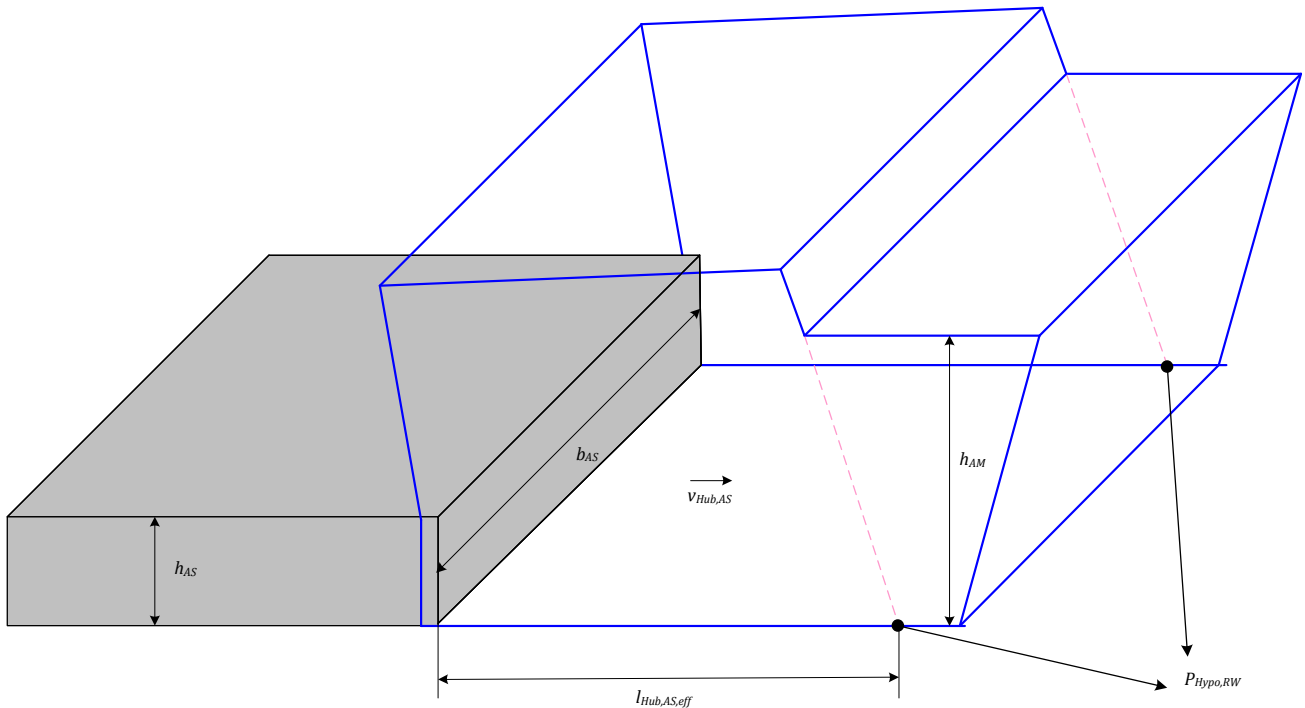
Um zu einem späteren Zeitpunkt die Versuche untereinander unterscheiden zu können, wurde die folgende Nomenklatur festgelegt:

<i>Hubposition</i>		<i>Hublänge</i>	<i>Anzahl der Versuche</i>
<i>1. Zahl</i>	<i>2. Zahl</i>	<i>3. Zahl</i>	<i>4. Zahl</i>
0=Aufgabe	1=vorne (Bunkerseite)	[mm]	
1=Rost 1	2=mittig	[mm]	
2=Rost 2	3=hinten (Entschlackerseite)	[mm]	

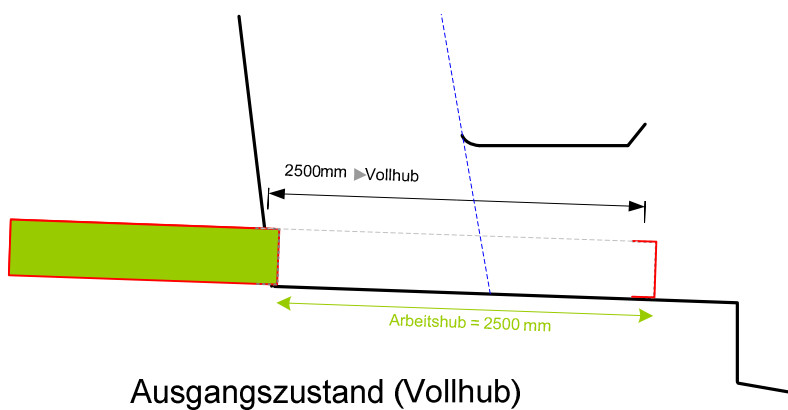
Die einzelnen Zahlen in der Benennung der Versuche werden mit einem „Punkt“ getrennt. Die erste Zahl gibt an, welcher Teil der Anlage in der FLR verstellt wurde. Bei der Verstellung der Aufgabe wird die „0“ angesetzt. Die einzelnen Roste werden mit „1“ „2“ usw. durchnummeriert. Die zweite Zahl gibt die Hubposition wieder, für die vordere Hubposition wird die „1“ festgesetzt. Aus der dritten Zahl kann man die gefahrene Hublänge erkennen. Diese wird einfach in mm geschrieben. Mit der vierten und letzten Zahl wird die Versuchsnummer wiedergegeben. Beispielsweise wurde ein Versuch mit der Aufgabe auf der mittleren Position und einer Hublänge von 713mm zum zweiten Mal durchgeführt, bekommt der Versuch die Nummer „0.2.713.2“.

5.3.2 Versuche und Ergebnisse

Wie oben beschrieben wurden die Versuche an den Anlagen DE20VL1 und UK2VL1 durchgeführt. Die Anlagen unterscheiden sich von der Hublänge bezogen auf die verlängerte Linie der Schachtrückwand zu dem Punkt $P_{Hypo,RW}$:



Der Aufgabestößel an der Anlage den Anlagen DE20VL1 fährt nicht über die gedachte rot-gestrichelte Linie hinaus, wohingegen der Aufgabestößel von UK2VL1 fast immer über die gestrichelte Linie und somit den Wirksamkeitsgrenzpunkt hinausfährt:

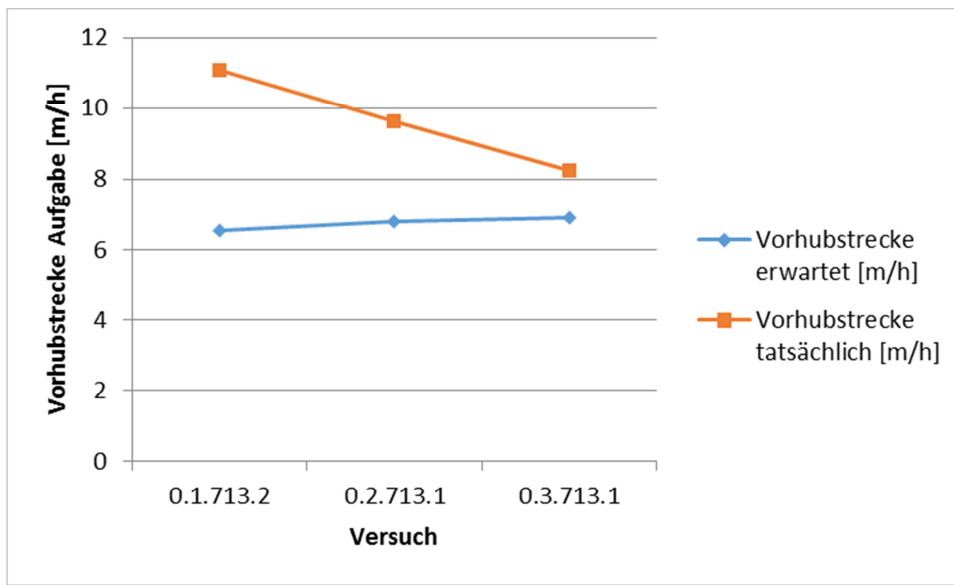


Ausgangszustand (Vollhub)

Als Auswertungsgrundlage wird die wie folgt definierte benötigte Vorhubstrecke herangezogen. Die tatsächliche Vorhubstrecke ist das Produkt aus gefahrener/benötigter Doppelhubzahl und die Länge des eingestellten Arbeitshubes. Falls es im Aufgabebereich keine Kompression oder ähnliche Phänomene gibt, muss die tatsächliche Vorhubstrecke der erwarteten Vorhubstrecke entsprechen. Die erwartete Vorhubstrecke wird folgendermaßen berechnet: Bei einer Verkürzung des Hubs um 50% müsste (ohne Kompression) die benötigte Doppelhubzahl um 50% steigen.

An DE20VL1 waren die 50%-Versuche auf der vorderen Position nur schwer fahrbar. Nicht alle Versuche auf dieser Position konnten über einen Zeitraum von 2,5 h gefahren werden. Die anderen Positionen mit dieser Hublänge waren problemlos fahrbar. Allerdings wurde hier eine starke Abweichung der tatsächlichen Vorhubstrecke zur Erwarteten ermittelt. Wobei die Abweichung mit verschieben der Hubposition Richtung der Hinteren kleiner wurde.

Die 70 %-Versuche waren auf allen drei Positionen an DE20VL1 problemlos fahrbar. Aber auch gilt, die Abweichung der tatsächlichen Vorhubstrecke zur erwarteten Vorhubstreckung auf der vorderen Position am größten ist:



Für DE20VL1 kann also geschlussfolgert werden, dass die Versuche auf der hinteren Position besser zu fahren sind als auf der Vorderen oder Mittleren. Auf der hinteren Hubposition werden am wenigsten Doppelhübe benötigt. Daraus kann wiederum postuliert werden, dass die Kompression sich mit der Hubposition ändert und somit abhängig von der Startposition des Aufgabeschiebers ist.

An UK2VL1 besteht der Sonderfall, dass der Stößel, im Normalbetrieb über die gestrichelte Linie (Wirksamkeitslinie) hinaus fährt. Bei dem 70%-Versuch auf der vorderen Position fährt der Aufgabestößel auch darüber hinaus. Die benötigte Doppelhubzahl des 70%-Versuchs (4,66 Dh/h) ist nahezu identisch mit der benötigten Doppelhubzahl des Vollhubes (4,3 Dh/h). Daraus kann resümiert werden, dass die Position der Wirksamkeitslinie bzw. die Fahrweise des Aufgabestößels Einfluss auf den Feststofftransport an der Aufgabe hat. Somit wird nachgewiesen, dass der Anteil des Vorhubs *nach* der Wirksamkeitslinie auf den Feststofftransport wenig Einfluss hat. Der darüber hinaus fahrende Anteil des Vorhubes wird Überstandshub genannt.

Erst bei dem 50%-Versuch auf der vorderen Position konnte der gleiche Effekt wie an DE20VL1 bemerkt werden. Der 50%-Versuch endete vor der Wirksamkeitslinie und hatte somit eine Abweichung zwischen der erwarteten und tatsächlichen Vorhubstrecke.

5.4 Ermittlung des Mitnahmefaktors

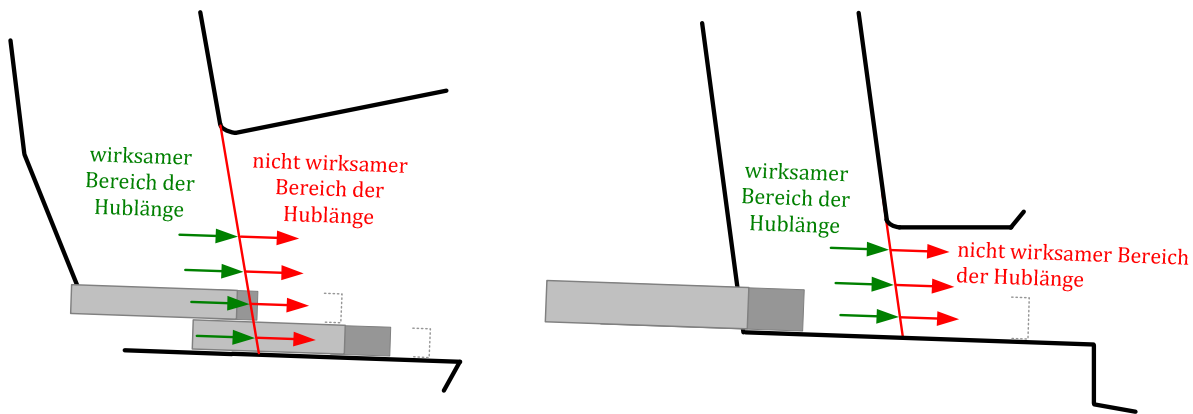
Aufgrund der Neigung des Mülls zu verhaken, liegt die Überlegung nahe, dass während des Vorhubes ein gewisser Teil von dem Volumen zwischen Aufgabeschieber und Aufgabemaul auch mit in den Feuerraum gefördert wird. Aus einer primitiven Überlegung geht hervor, falls nur das Volumen direkt vor dem Aufgabeschieber bewegt wird, muss die Dichte des Mülls sehr hoch sein. Bei einem Müllmassenstrom von 1350

kg/Dh und einer Höhe des Aufgabeschiebers von 0,3 m, einer Breite von 3,13 m, einer Hublänge von 1,05 m muss die Dichte des Mülls bei ca. 1370 kg/m³ liegen. Das kann laut dem Pressenversuch nicht sein. Denn der Aufgabeschieber kann in Bezug auf die Schieberhöhe maximal einen Druck von ca. 400 mbar auf die Müllschüttung aufbringen. Das führt bestenfalls zu einer Dichte, laut Pressenversuch um die 700 kg/m³. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass ein größerer Teil des Volumens zwischen Schieber und Aufgabemaul bei einem Vorhub in den Brennraum gezogen wird.

5.5 Ergebnis der Versuche

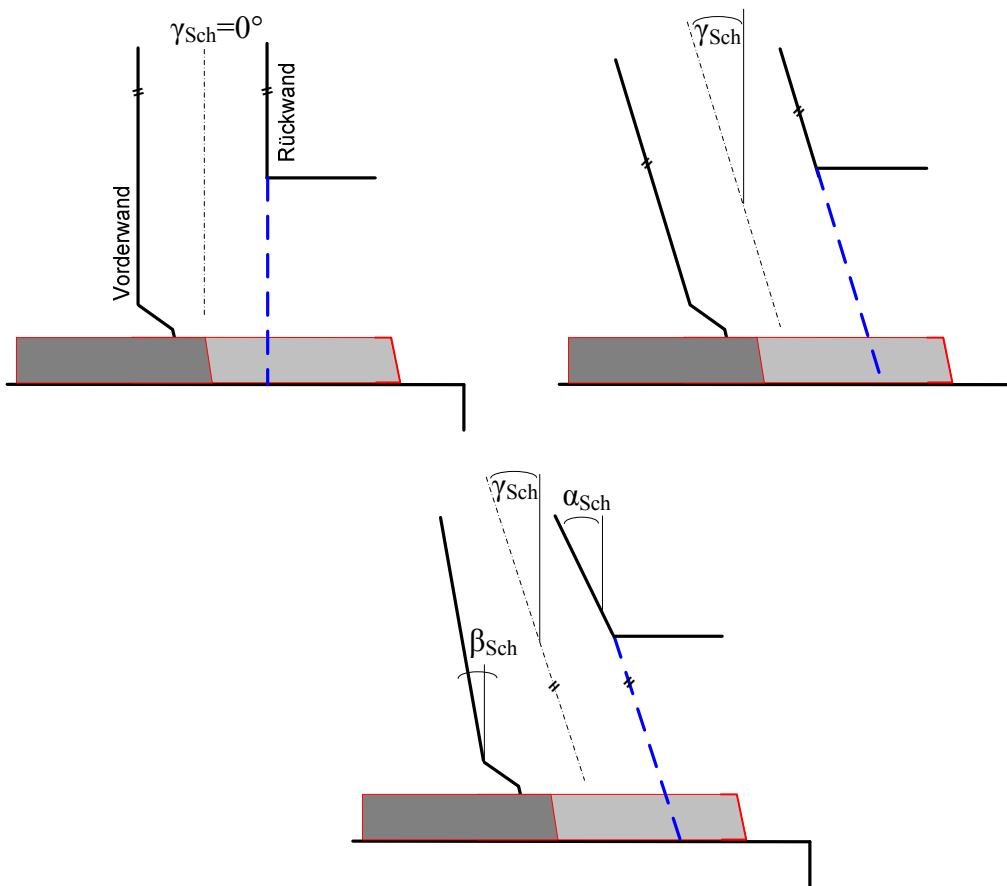
Aus den durchgeführten Versuchen zur Bestimmung des Förderverhaltens, der Dichte und des Kompressionshubes geht u. a. hervor, dass ein gewisser Weganteil des Vorhubes ausschließlich eine Kompression des Brennstoffpropfens vor dem Aufgabeschieber nach sich zieht und somit nicht zum Feststofftransport beiträgt.

Wie in den Versuchen zur Hubposition (vgl. Abschnitt 5.3.2) empirisch ermittelt wurde, spielt die Wirksamkeitsgrenzlinie, welche in erster Näherung als die Verlängerung der Schachtrückwand betrachtet wird, beim Beschickvorgang eine wesentliche Rolle. Nachfolgende Abbildung verdeutlicht den nicht-wirksamen Bereich am Beispiel einer Doppelkolben- und einer Einzelkolbenbeschickung:



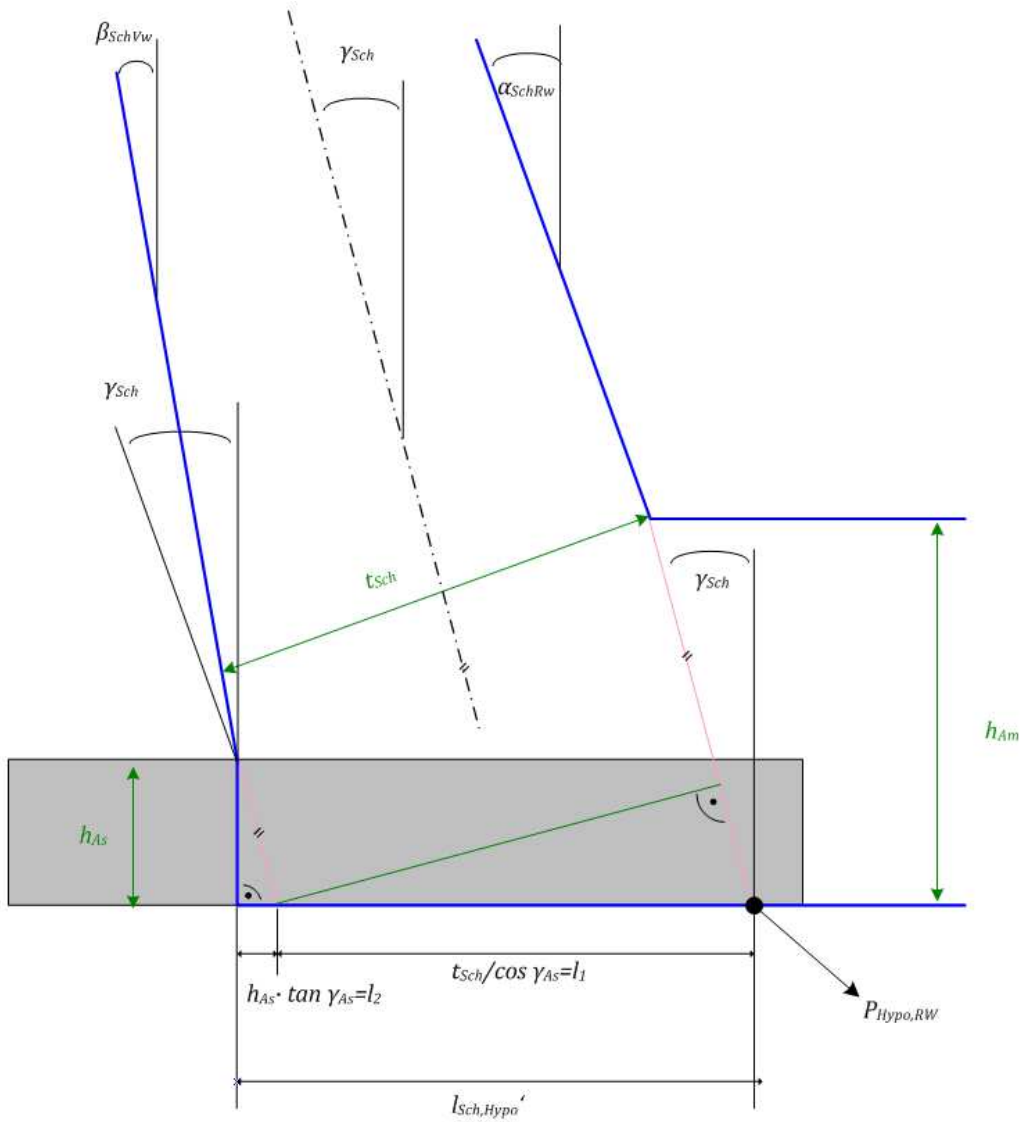
Die Hublänge des Beschickstößels ist dann in seiner Wirksamkeit eingeschränkt, sobald der Stößel in seinem Arbeitsvorhub den Wirksamkeitsgrenzpunkt überschreitet. Neben den Versuchsfahrten im Abschnitt 5.2.2 konnte dies auch in den visuell getätigten Beobachtungen im Abschnitt 5.1 - und dabei insbesondere an der Anlage CH7VL2 - festgestellt werden. An den Anlagen CH3VL1 und DE20VL2 konnte der nicht wirksame der Bereich der Hublänge nicht identifiziert werden, da es bei diesen Anlagen konstruktiv nicht möglich ist, den Wirksamkeitsgrenzpunkt zu überfahren.

Der Wirksamkeitsgrenzpunkt kann als Abstand ausgehend von der Vorderwand des Brennstoffaufgabeschachtes definiert werden. Er befindet sich konstruktionsabhängig entweder an der engsten Stelle der Aufgabekonstruktion (dem sog. Aufgabemaul) im Falle eines senkrecht stehenden Aufgabeschachtes ($\gamma_{Sch} = 0^\circ$) bzw. in einer verlängerten Linie der Aufgabeschacht-Rückwand welche parallel zur Schachtneigung γ_{Sch} verläuft. Dies gilt in den Fällen, in denen die Schachtvorder- und Schachtrückwand einen identischen Neigungswinkel γ_{Sch} aufweisen. Für die Fälle, in denen die Schachtvorder- und Schachtrückwand unterschiedliche Neigungswinkel (α_{Sch} = Neigungswinkel Schachtrückwand, β_{Sch} = Neigungswinkel Schachtvorderwand) aufweisen, gilt für $\gamma_{Sch} = \frac{\alpha_{Sch} + \beta_{Sch}}{2}$. Durch eine geringfügige Aufweitung des Brennstoffschachtes im unteren Bereich wird oftmals versucht, Verstopfungen im Schacht durch konstruktive Maßnahmen vorzubeugen. Es gilt daher immer: $\alpha_{Sch} \geq \beta_{Sch}$. Untenstehende Abbildung skizziert diese 3 wesentlichen Konstruktionen.



Die verlängerte Linie der Aufgabeschacht-Rückwand mit dem Neigungswinkel γ_s zeigt näherungsweise den Verlauf der Brennstoffschüttung mit befülltem Schacht. Dieser Zustand markiert den Ausgangszustand für alle weiteren Betrachtungen.

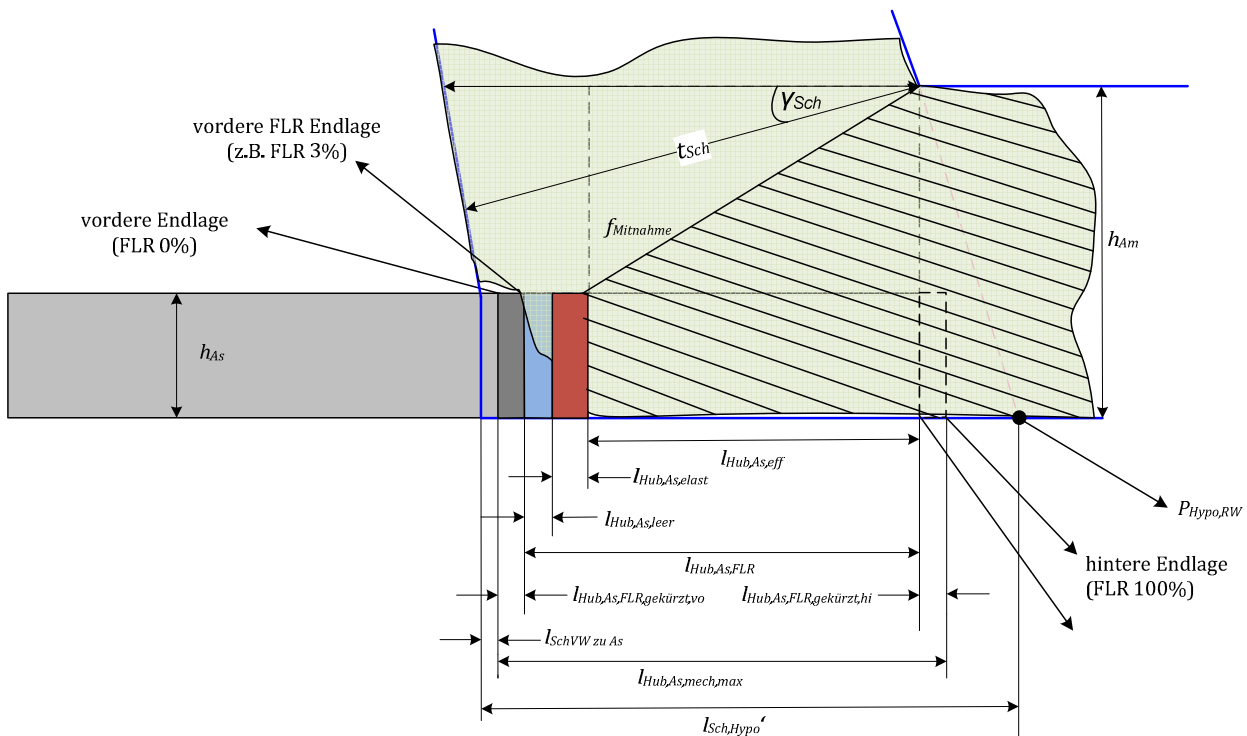
Da von allen gegenständlichen Verbrennungslinien die Geometrien bekannt sind, kann der Wirksamkeitsgrenzpunkt durch die Addition von l_1 und l_2 wie folgt berechnet werden:



$$l_1 + l_2 = l_{Sch,Hypo}' = \frac{t_{Sch}}{\cos \gamma_{Sch}} + h_{AS} * \tan \gamma_{Sch}$$

Aus dieser Erkenntnis heraus gibt es für die Hublängenbetrachtung zwei Fälle. Der erste Fall tritt ein, wenn der Hub vor dem Wirksamkeitspunkt $P_{Hypo,RW}$ endet.

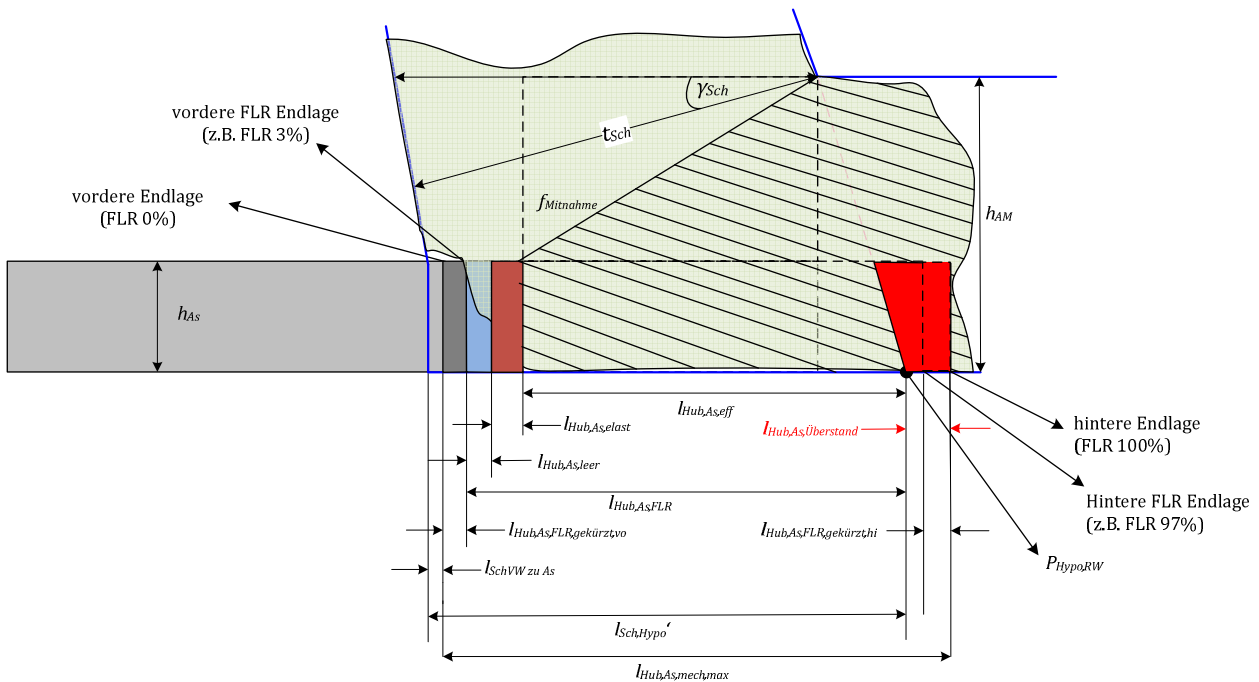
Fall 1: Endlage As, diesseits von $P_{Hypo,RW}$



Der Hub kann an sich in folgende Bestandteile aufgeteilt werden. Die Strecke von der Schachtvorderwand bis zur Wirksamkeitsgrenze $P_{Hypo,RW}$ wird $l_{Sch,Hypo}'$ genannt. Die maximale Hublänge, die der Aufgabestößel konstruktionsbedingt fahren kann, wird mit $l_{Hub,As,mech,max}$ abgekürzt. Bei Strecke zwischen der Schachtvorderwand und der vorderen Endlage des maximalen Hubes (FLR 0%) spricht man von $l_{SchVW zu As}$. Diese Länge ist anlagenspezifisch und nicht bei jeder MVA zu finden. Oft befindet sich die vordere Endlage des mechanisch maximalen Hubes (FLR 0%) direkt an der Schachtvorderwand. Die vordere und hinter Einkürzung, welche durch die FLR gegeben ist, wird mit $l_{Hub,As,FLR,gekürzt,vo}$ und $l_{Hub,As,FLR,gekürzt,hi}$ beschrieben. Bei diesem tatsächlichen Start und Endpunkt des Hubes spricht man von der vorderen und hinteren Endlage. Wurde vom mechanisch maximalen Hub $l_{Hub,As,mech,max}$ die Einkürzung der FLR $l_{Hub,As,FLR,gekürzt,vo}$ und $l_{Hub,As,FLR,gekürzt,hi}$ subtrahiert ist dies die eingestellte Hublänge der FLR $l_{Hub,As,FLR}$. Diese tatsächliche Hublänge $l_{Hub,As,FLR}$ ist wiederum unterteilbar. Wie oben beschrieben ist es leicht vorstellbar, dass es ein Kompressionsanteil beim Vorhub gibt. Dieser Kompressionsanteil ist in den Leerhub $l_{Hub,As,leer}$ und dem Elastizitätsanteil $l_{Hub,As,elast}$ aufgeteilt. Der Rest des Vorhubs wird zur Feststoffförderung verwendet und wird als effektive Hublänge $l_{Hub,As,eff}$ beschrieben.

Der zweite Fall ist durch das Herausfahren des Aufgabeschiebers über den Wirksamkeitspunkt $P_{Hypo,RW}$ definiert.

Fall 2: Endlage As, jenseits von $P_{Hypo,RW}$



Der Anteil des Hubes, der über den Wirksamkeitspunkt $P_{Hypo,RW}$ wird als Überstandshub $l_{Hub,As,Überstand}$ gekennzeichnet. Dieser Anteil ist für die Feststoffförderung aus dem Mülltrichter unwirksam.

Durch die unter 5.1 durchgeführten Videoanalysen an den Anlagen CH7VL2, CH3VL1 und DE20VL2 kann postuliert werden, dass die Fördereffektivität auch von konstruktiven Parametern entscheidend beeinflusst wird.

Bei einem kleinen Verhältnis $\frac{h_{AM}}{h_{AS}}$ erfolgt „maximaler“ Materialeintrag durch ein starkes Verpressen des Brennstoffs an der Oberkante des Aufgabemauls. Man meint dabei sogar punktuell erkennen zu können, dass - wie bereits unter 5.4 vermutet - ein gewisser Anteil von oberhalb aus dem Schacht durch das Aufgabemaul durchgedrückt werden kann und zu einer Fördervolumenerhöhung führt. Dieser stark verpresste Materialanteil fällt kurz vor Erreichen der hinteren Endlage des Beschickstößels bzw. spätestens mit Beginn des Rückhubs auf den Rost und führt somit zu einer Erhöhung von $\dot{V}_{dH,eff}$.

Bei einem großen Verhältnis $\frac{h_{AM}}{h_{AS}}$ erfolgt jedoch ein verminderter Materialeintrag. Da die Öffnung des Aufgabemauls im Verhältnis zum Aufgabeschieber groß ist, kann sich innerhalb der Brennstoffaufgabe eine Art Schüttkegel ausbilden, der vom Aufgabeschieber nicht vollumfänglich transportiert werden kann. Das heißt, die Bewegung des Aufgabeschiebers hat keinen durchgehenden Materialtransport bis zur Oberfläche dieses Schüttkegels zur Folge. Es ergibt sich also eine Verringerung von $\dot{V}_{dH,eff}$ durch effektiv nicht transportierten Brennstoff im oberen Bereich. Wiederholt durchgeführte videobildbasierte Analysen des Beschickvorganges an Anlagen mit großem (CH7VL2) bzw. kleinem (CH3VL1 und DE20VL2) $\frac{h_{AM}}{h_{AS}}$ bestätigen diese Überlegung.

Abschließend sei noch zu erwähnen, dass die konstruktiven Unterschiede keine Beeinflussung der Qualität der Feuerung nach sich ziehen müssen.

6 Numerische Ermittlung von Brennstoffmassenstrom und -dichte im Aufgabebereich

6.1 Evidenzbasierter bzw. datengestützter Ansatz

Die hier vorgestellte Methodik basiert ausschließlich auf Daten aus den im Abschnitt 2.1 bzw. im Abschnitt 10.1 beschriebenen Verbrennungslinien. Die Datenbasis stellen die unter 10.2 aufgeführten Betriebsdaten sowie die Anlagengeometrien dar. Für alle 44 Verbrennungslinien wurden die Betriebsdaten analysiert und die konstruktiven Abmessungen der Brennstoffaufgabe aufgenommen und in eine Diskretisierung überführt.

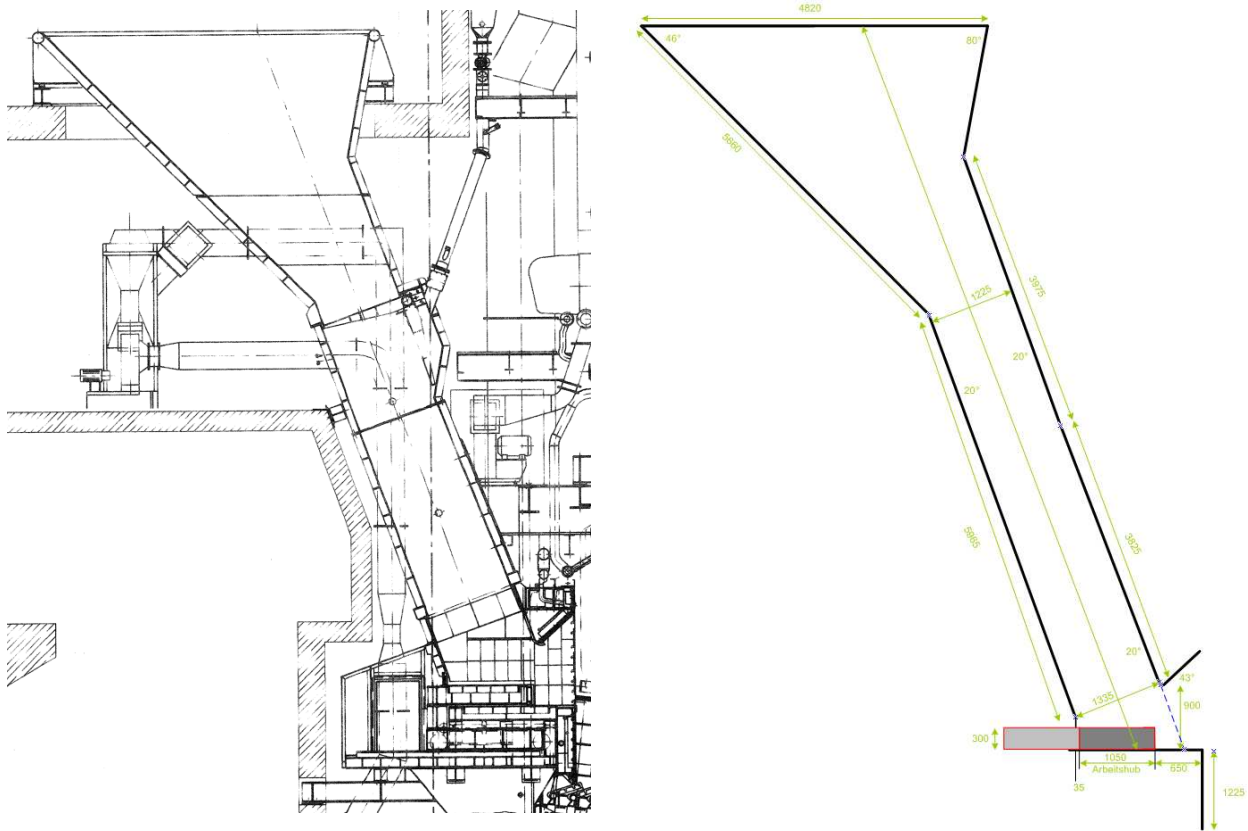


Abbildung: Beispiel für eine Diskretisierung des Aufgabebereichs an der Anlage DE20VL1

Um geometrische Abmessungen sowie eine parametrisierte Fahrweise des Aufgabestößels in Zusammenhang bringen zu können, werden nachfolgende Kennzahlen entwickelt. Zuerst soll bestimmt werden, wie viel Masse an Brennstoff mit einem Beschick(doppel)Hub auf den Rost gefördert wird. Die Masse des zur Verbrennung gelangenden Brennstoffs wird nur an 2 Punkten in einer Anlage gemessen:

- im Anlieferbereich an der Brückenwaage der LKWs durch Differenzwägung und
- im Müllbunker über das Gewicht des Greifers, bevor der Brennstoff in den Aufgabetrichter aufgegeben wird.

Die Summe der eingebrachten Müllmasse wird mit der Anzahl der durchgeführten Doppelhübe in Verbindung gebracht, um so die Masse pro Doppelhub zu ermitteln.

$$m_{dH,Aufgabe} = \frac{\sum m_{ges.Müll}}{\sum n_{dH,Aufgabe}}$$

mit:

$\sum m_{ges.Müll}$	angelieferte Müllmasse $m_{ges.Müll}$ pro Zeiteinheit [t/x]
$\sum n_{dH,Aufgabe}$	Summe n_{dH} der durchgeführten Doppelhübe in der Zeiteinheit [Dh/x]
x	Zeiteinheit [h], [d], [a]

Voraussetzung zur Anwendung dieser Berechnungsmethode ist, dass die Revisionszeiträume sowie geplante und ungeplante Stillstände der Anlage inkl. der An- und Abfahrvorgänge innerhalb der gewählten Zeiteinheit x zeitlich genau bekannt sein müssen, damit diese Zeiträume aus dem Betrachtungszeitraum ausgeblendet werden können. Nur der Regelbetrieb soll zur Auswertung herangezogen werden - siehe dazu auch Abschnitt 2.1. Eine zusätzliche Komplexität bei dieser Berechnungsmethode stellt der Müllbunker dar, da nicht zwangsläufig die angelieferte Müllmasse auch der tatsächlich verbrannten Müllmasse entspricht - der Müllbunker dient in seiner Funktion hauptsächlich als Brennstoffzwischenpeicher. Die Differenz aus angeliefertem Müll und dem tatsächlich verbranntem Müll zu einem bestimmten Zeitpunkt lässt sich nur schwer abschätzen. Durchgesetzt hat sich das Procedere, dass am Jahresende die kumulierte angelieferte Müllmenge abzüglich eines optisch ermittelten Bunkerfüllstands die tatsächlich verbrannte Müllmenge ergibt. Aus diesem Grund wird die Zeiteinheit x als 1 Jahr gewählt.

Eine weitere Option zur Berechnung der Masse pro Beschick(doppel)hub ist, über einen geeigneten Zeitraum des Regelbetriebs das arithmetische Mittel über die Anzahl der durchgeführten Doppelhübe zu bilden und dieses in Verbindung zu bringen mit der tatsächlich verbrannten Müllmenge, welche über die gemessenen Müllgreifergewichte relativ genau bestimmt werden kann. Im Gegensatz zu [23] kann heutzutage von einer ausreichenden Genauigkeit dieser Messmethode ausgegangen werden, da die Müllgreiferwaagen in regelmäßigen Abständen mit Referenzgewichten kalibriert werden.

$$\begin{aligned} \varnothing m_{Kran(x)} &= \frac{\sum_k^x m_{Kran(k)}}{k} \\ \varnothing n_{dH(x)} &= \frac{\sum_l^x n_{dH,Aufgabe(l)}}{l} \end{aligned}$$

mit:

\dot{m}_{Kran}	Gewicht eines befüllten Greifers [t] bzw. kumuliertes Greifergewicht in [t/h]
$\varnothing \dot{m}_{Kran(x)}$	arithmetisches Mittel aller Greifergewichte [t/h] innerhalb des Zeitraums x
$n_{dH,Aufgabe}$	Doppelhübe pro Stunde [dH/h]
$\varnothing n_{dH,Aufgabe(x)}$	arithmetisches Mittel aller Doppelhübe pro Stunde [dH/h] innerhalb des Zeitraums x

Somit ergibt sich für die Müllmasse m_{dH} pro Beschick(doppel)hub [t/Dh]:

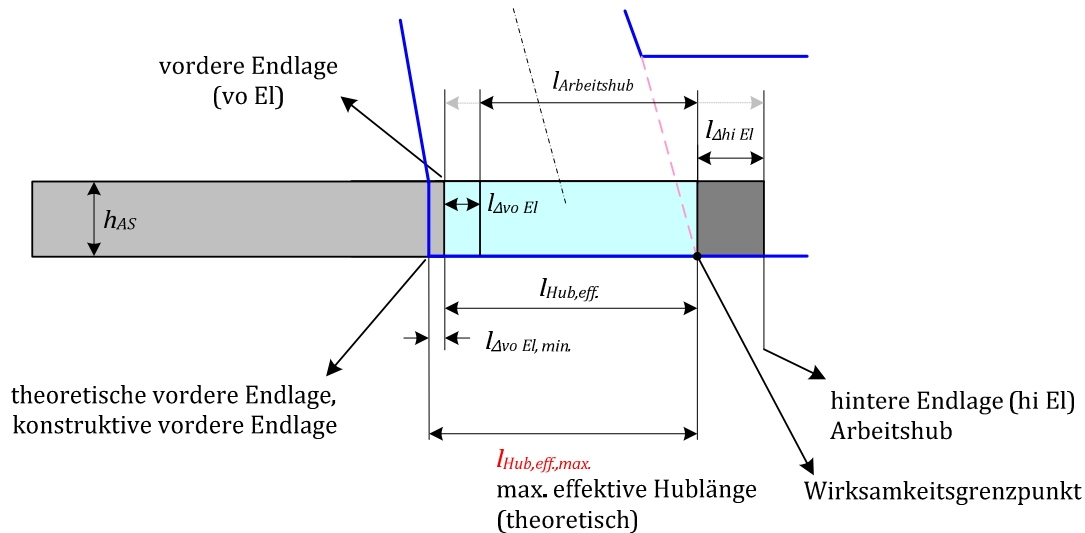
$$m_{dH,Aufgabe} = \frac{\varnothing \dot{m}_{Kran(x)}}{\varnothing n_{dH,Aufgabe(x)}}$$

Um die Dichte des Brennstoffs im Aufgabebereich berechnen und vergleichen zu können, ist es notwendig, das pro Beschick(doppel)Hub geförderte Volumen zu kennen. Dieses Volumen ist nicht bekannt und kann auch nicht ohne weiteres bestimmt werden. In erster Näherung wird angenommen, dass dieses effektiv geförderte Volumen $V_{Dh,eff.}$ zwischen einem maximal möglichen Hubvolumen $V_{Dh,max.}$ und einem minimalen Hubvolumen $V_{Dh,min.} = V_{dH,AS}$, welches dem verdrängten Volumen des Aufgabeschiebers entspricht, liegen sollte.

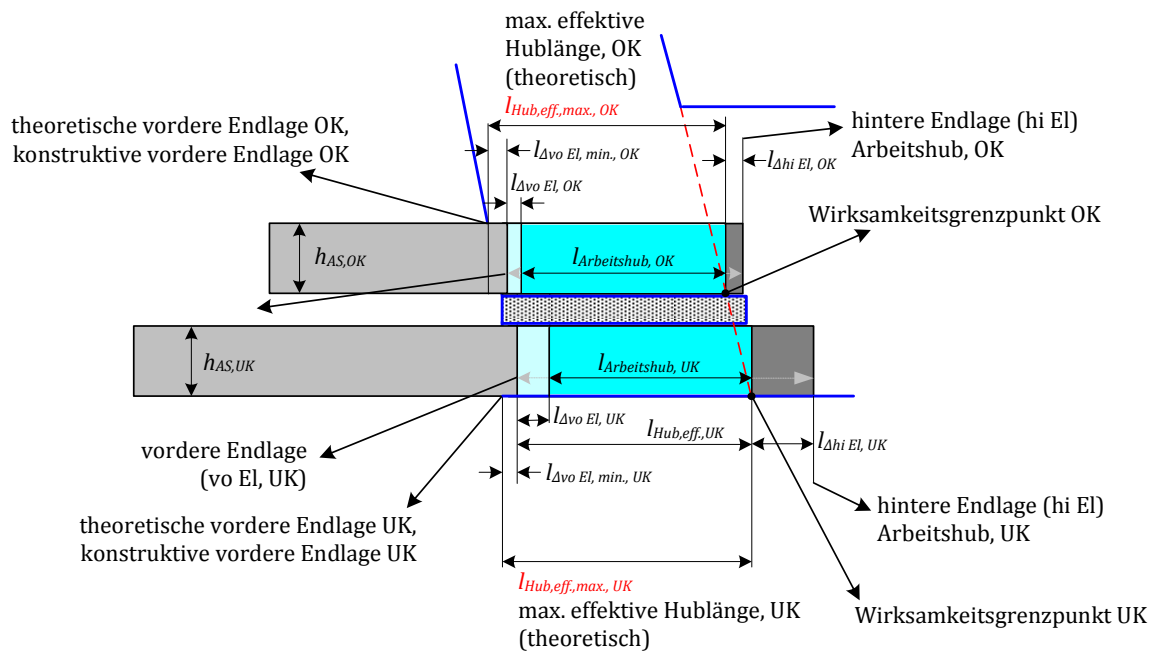
$$\text{Es gilt: } \dot{V}_{Dh,AS} < \dot{V}_{Dh,eff.} \leq \dot{V}_{Dh,max.}$$

Wie bereits erwähnt, soll der datengestützte Ansatz ausschließlich auf vorhandenen Betriebsdaten und Anlagengeometrien beruhen. Aus diesem Grund wurde auch in Abgrenzung zum Abschnitt 5.5 eine separate Nomenklatur für die Festlegung der Hublängen des Aufgabeschiebers gewählt. Die an dieser Stelle verwendete Nomenklatur ist darauf ausgerichtet, welche Daten zur Verfügung stehen und wie sie möglichst praxisgerecht angewendet werden können.

Werden die gefahrenen Hublängen des Aufgabeschiebers mit der Berechnung des Wirksamkeitsgrenzpunktes l_1+l_2 in Zusammenhang gebracht, so ergibt sich folgende Darstellung:



Analog gilt für die Doppelkolbenbeschickung:



Die Hublänge, die der Aufgabeschieber in seiner Vorwärtsbewegung bis zum Wirksamkeitsgrenzpunkt zurücklegt, wird als maximale effektive Hublänge $l_{Hub,eff,max} = l_1 + l_2$ definiert. Diese Hublänge ist ein theoretischer Wert, der in der Praxis nie erreicht werden kann. Konstruktionsbedingt wird sich der Aufgabeschieber nie bündig bis zur Vorderwand des Brennstoffschachts in rückwärtiger Richtung bewegen lassen. Die effektive Hublänge, die dem Aufgabeschieber tatsächlich maximal zur Verfügung steht, beträgt also $l_{Hub,eff} = l_{Hub,eff,max} - l_{\Delta vo El,min}$. Die Praxis zeigt, dass der minimale Überstand $l_{\Delta vo El,min}$ von der Schachtvorderwand bis zur vorderen Endlage als vernachlässigbar klein angesetzt werden kann - bei bis zum mechanischen Anschlag ein- bzw. ausgefahrenen Hydraulikzylinder.

Diese Hublänge wird jedoch nicht zwingend durch den Arbeitshub ausgeschöpft bzw. kann der parametrisierte Arbeitshub auch deutlich länger sein. Je nach Parametrierung des Aufgabeschiebers bzw. je nach gewählter Fahrweise kann auch gelten: $l_{\Delta vo El} \gg l_{\Delta vo El,min}$.

Wie bereits erwähnt muss die Länge des parametrisierten Arbeitshubes $l_{Arbeitshub}$ in die Berechnung von $l_{Hub,eff,tats}$ miteinbezogen werden. Der Hubweg, der sich ausserhalb des Wirksamkeitsgrenzpunktes befindetet wird als $l_{\Delta hi El,min}$ definiert.

Da es in der Praxis vorkommen kann, dass $l_{Arbeitshub} \geq l_{Hub,eff}$ oder $l_{Arbeitshub} \leq l_{Hub,eff}$ müssen für die Berechnung von $l_{Hub,eff,tats}$ folgende Fälle unterschieden werden:

$$l_{Hub,eff} - l_{Arbeitshub} \geq 0 \rightarrow l_{Hub,eff,tats} = l_{Arbeitshub}$$

$$l_{Hub,eff} - l_{Arbeitshub} < 0 \rightarrow l_{Hub,eff,tats} = l_{Arbeitshub} - l_{\Delta hi El,min}$$

Demnach kann gelten $l_{Hub,eff,tats} \geq l_{Hub,eff}$ oder $l_{Hub,eff,tats} \leq l_{Hub,eff}$.

Eine Analyse von $l_{Arbeitshub}$ über alle Verbrennungslinien ist im Anhang unter 10.4 aufgelistet.

An den 33 analysierten Verbrennungslinien wird an 5 Verbrennungslinien (DE16VL1, DE16VL2, DE16VL3, DE13VL1, DE13VL2) ein Arbeitshub gefahren, der größer als die wirksame Hublänge ist ($l_{Hub,aktiv} > l_{Hub,eff.}$).

Das Verhältnis des wirksamen Bereichs der Hublänge ($l_{Hub,eff.,tats.}$) zur gesamten Hublänge des Arbeitshubes ($l_{Arbeitshub}$) wird definiert zum Wirkungsgrad des Beschickstößels: $\eta_{Stößel} = \frac{l_{Hub,eff.,tats.}}{l_{Arbeitshub}}$

bzw. gilt für die Doppelkolbenbeschickung:

$$\eta_{Stößel,OK} = \frac{l_{Hub,eff.,OK,tats.}}{l_{Arbeitshub,OK}} \text{ für den Oberkolben und } \eta_{Stößel,UK} = \frac{l_{Hub,eff.,UK,tats.}}{l_{Arbeitshub,UK}} \text{ für den Unterkolben.}$$

Mit den definierten Hublängen können nun die beiden Volumina (Hubvolumen Aufgabestößel und maximales Hubvolumen) wie folgt berechnet werden. Für das Hubvolumen Aufgabeschieber gilt:

$$\dot{V}_{dH,AS} = \phi n_{dH(x)} \cdot b_{AS} \cdot h_{AS} \cdot l_{Hub,eff.,tats.}$$

mit:

b_{AS}	Breite Aufgabeschieber (AS) [mm]
h_{AS}	Höhe Aufgabeschieber [mm]
$l_{Hub,eff.,tats.}$	tatsächliche effektive Hublänge [mm]
$\phi n_{dH(x)}$	arithmetisches Mittel aller Doppelhübe pro Stunde [dH/h] innerhalb des Zeitraums x

Für das maximale Hubvolumen gilt:

$$\dot{V}_{dH,max.} = \phi n_{dH(x)} \cdot b_{AS} \cdot h_{AM} \cdot l_{Hub AS,eff.,tats.}$$

mit:

b_{AS}	Breite Aufgabeschieber [mm]
h_{AM}	Höhe Aufgabemaul [mm]
$l_{Hub AS,eff.,tats.}$	tatsächliche effektive Hublänge Aufgabeschieber [mm]
$\phi n_{dH(x)}$	arithmetisches Mittel aller Doppelhübe pro Stunde [dH/h] innerhalb des Zeitraums x

Analog zur Einzelkolbenbeschickung berechnen sich die Volumina an der Doppelkolbenbeschickung wie folgt:
Hubvolumen Aufgabeschieber (Oberkolben):

$$\dot{V}_{dH,OK} = \phi n_{dH(x)} \cdot b_{AS} \cdot h_{OK} \cdot l_{Hub AS,eff.,OK,tats.}$$

mit:

b_{AS}	Breite Aufgabeschieber [mm]
h_{OK}	Höhe Aufgabeschieber Oberkolben [mm]
$l_{Hub AS,eff.,OK,tats.}$	tats. wirksame (effektive) Hublänge Aufgabeschieber Oberkolben [mm]

Maximales Hubvolumen (Oberkolben):

$$\dot{V}_{dH,max.,OK} = \phi n_{dH(x)} \cdot b_{AS} \cdot h_{AM,OK} \cdot l_{Hub\ AS,eff.,UK,tats.}$$

mit:

b_{AS}	Breite Aufgabeschieber [mm]
$h_{AM,OK}$	Höhe Aufgabemaul Oberkolben [mm]
$l_{Hub,eff.,OK}$	wirksame (effektive) Hublänge Oberkolben [mm]

Hubvolumen Aufgabeschieber (Unterkolben):

$$\dot{V}_{dH,UK} = \phi n_{dH(x)} \cdot b_{AS} \cdot h_{UK} \cdot l_{Hub\ AS,eff.,UK,tats.}$$

mit:

b_{AS}	Breite Aufgabeschieber [mm]
h_{UK}	Höhe Aufgabeschieber Unterkolben [mm]
$l_{Hub,eff.,OK}$	tats. wirksame (effektive) Hublänge Aufgabeschieber Oberkolben [mm]

Maximales Hubvolumen (Unterkolben):

$$\dot{V}_{dH,max.,UK} = \phi n_{dH(x)} \cdot b_{AS} \cdot h_{AM,UK} \cdot l_{Hub\ AS,eff.,OK,tats.}$$

mit:

b_{AS}	Breite Aufgabeschieber [mm]
$h_{AM,UK}$	Höhe Aufgabemaul Unterkolben [mm]
$l_{Hub,eff.,UK}$	tats. wirksame (effektive) Hublänge Aufgabeschieber Unterkolben [mm]

Es gilt: $h_{AM,UK} = h_{AM,OK} + h_{OK} + h_K$

Somit können die Dichten, welche aus dem minimalen Fördervolumen sowie aus dem maximalen Fördervolumen resultieren, wie folgt berechnet werden:

$$\rho_{max.} = \frac{\phi \dot{m}_{Kran}}{\dot{V}_{dH,UK} + \dot{V}_{dH,OK}}$$

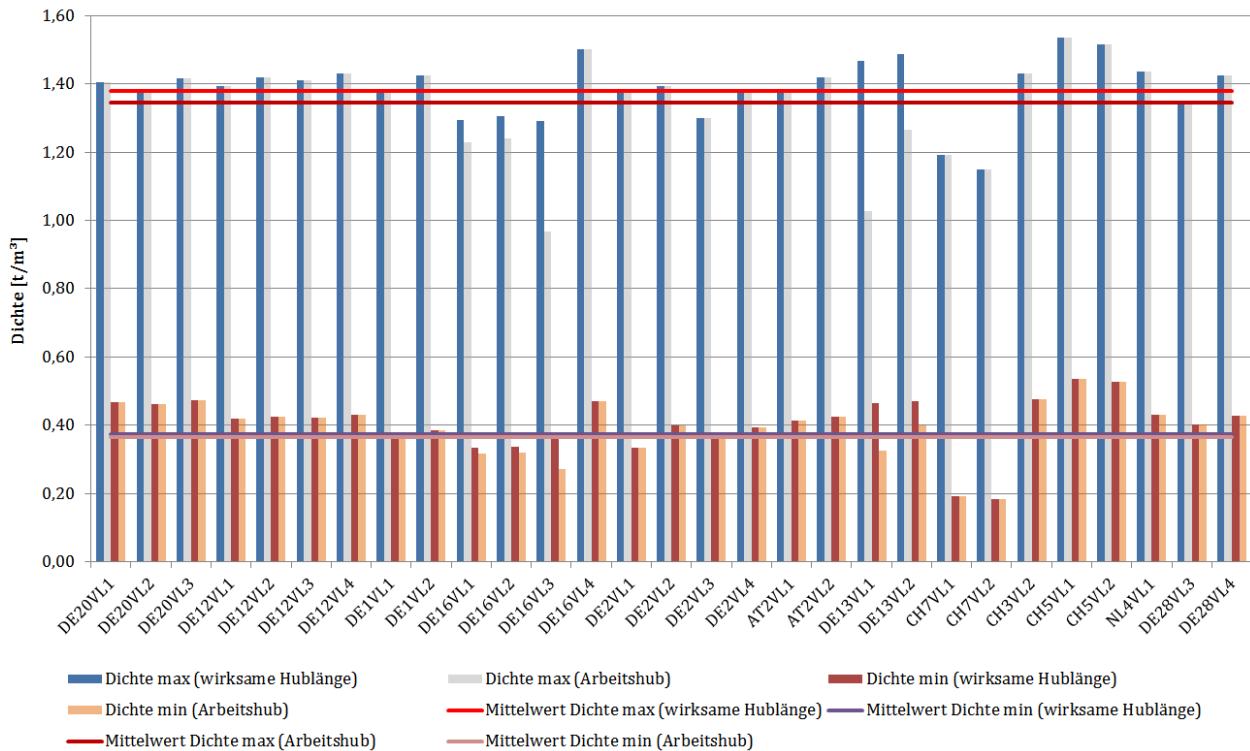
$$\rho_{min.} = \frac{\phi \dot{m}_{Kran}}{\dot{V}_{dH,max.,UK} + \dot{V}_{dH,max.,OK}}$$

Für die Beschickvorrichtung mit nur einem Stößel gilt:

$$\rho_{max.} = \frac{\phi \dot{m}_{Kran}}{\dot{V}_{dH,AS}}$$

$$\rho_{min.} = \frac{\dot{m}_{Kran}}{\dot{V}_{dH,max.}}$$

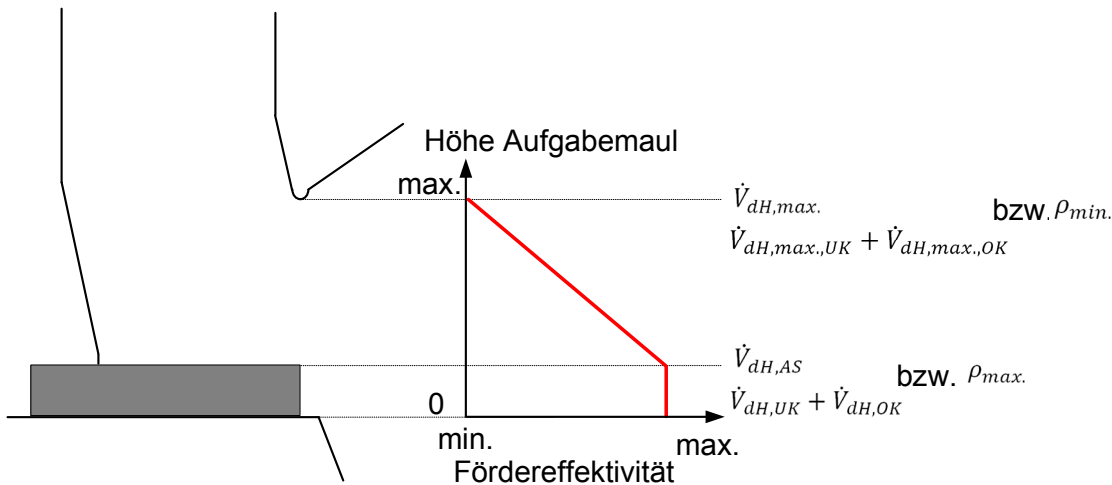
Zusammenfassend dargestellt ergeben sich folgende minimalen bzw. maximalen Dichten im Aufgabebereich für alle betrachteten Verbrennungslinien:



Der arithmetische Mittelwert der minimalen Dichte $\rho_{min.}$ befindet sich bei $374 \frac{kg}{m^3}$ und der Mittelwert der max. Dichte $\rho_{max.}$ bei $1379 \frac{kg}{m^3}$. Vergleicht man an diese berechneten Dichten mit den Angaben in der Literatur [2], [16], [23], so ist zu vermuten, dass sich das effektiv geförderte Volumen $\dot{V}_{Dh,eff.}$ tendenziell näher bei $\dot{V}_{Dh,max.}$ befinden wird, als bei $\dot{V}_{Dh,AS}$. Zumal aus dem Abschnitt 5.4 bekannt ist, dass an den Linien DE20VL1, DE20VL2 und DE20VL3 ein Druck von ca. 400 mbar durch den Aufgabeschieber während des Vorhubs auf die Schüttung ausgeübt wird. Aus dem Abschnitt 4.3.3 ist weiter bekannt, dass ein Druck von 400 mbar - wie er auch vom Aufgabeschieber ausgeübt werden kann - auf die Müllschüttung einer resultierenden Dichte von ca. $700 \frac{kg}{m^3}$ entspricht.

Da für die Anlagen in der Praxis weder die minimale Dichte $\rho_{min.}$ noch die maximale Dichte $\rho_{max.}$ bzw. das maximale Fördervolumen ($\dot{V}_{dH,max.}, \dot{V}_{dH,max.,UK} + \dot{V}_{dH,max.,OK}$) oder das minimale Fördervolumen ($\dot{V}_{dH,AS}, \dot{V}_{dH,UK} + \dot{V}_{dH,OK}$) anzusetzen ist, muss das effektive Fördervolumen $\dot{V}_{dH,eff.}$ bzw. die reelle, effektive Dichte ($\rho_{eff.}$) zwischen diesen beiden Werten liegen.

Um eine möglichst allgemeingültige und einfache Formel für das effektiv geförderte Volumen $\dot{V}_{dH,eff.}$ zu erhalten, wird von nachfolgender Vorstellung der Fördereffektivität ausgegangen:



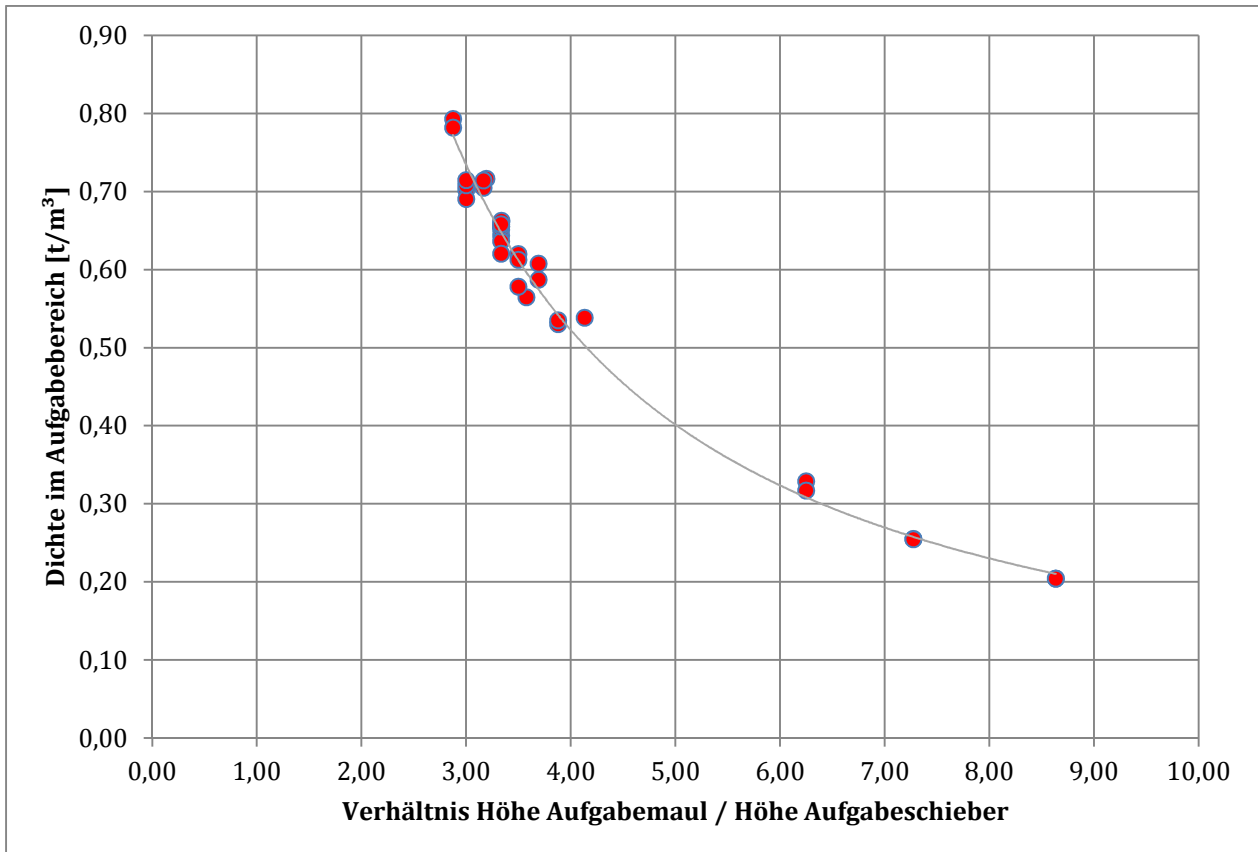
Zur Berechnung von $\dot{V}_{dH,eff.}$ ergibt sich gemäß der Vorstellung zur Fördereffektivität:

$$\dot{V}_{dH,eff.} = (\phi n_{dH(x)} \cdot b_{AS} \cdot h_{AS} \cdot \dots) + \left(\phi n_{dH(x)} \cdot b_{AS} \cdot \frac{h_{AM} - h_{AS}}{2} \cdot l_{Hub\ AS,eff.,tats.} \right) =$$

$$\dot{V}_{dH,eff.} = \phi n_{dH(x)} \cdot b_{AS} \cdot l_{Hub\ A,eff.,tats.} \cdot \left(h_{AS} + \frac{h_{AM} - h_{AS}}{2} \right)$$

Die Dichte $\rho_{eff.}$ ergibt sich aus: $\frac{\phi \dot{m}_{Kran}}{\dot{V}_{dH,eff.}}$

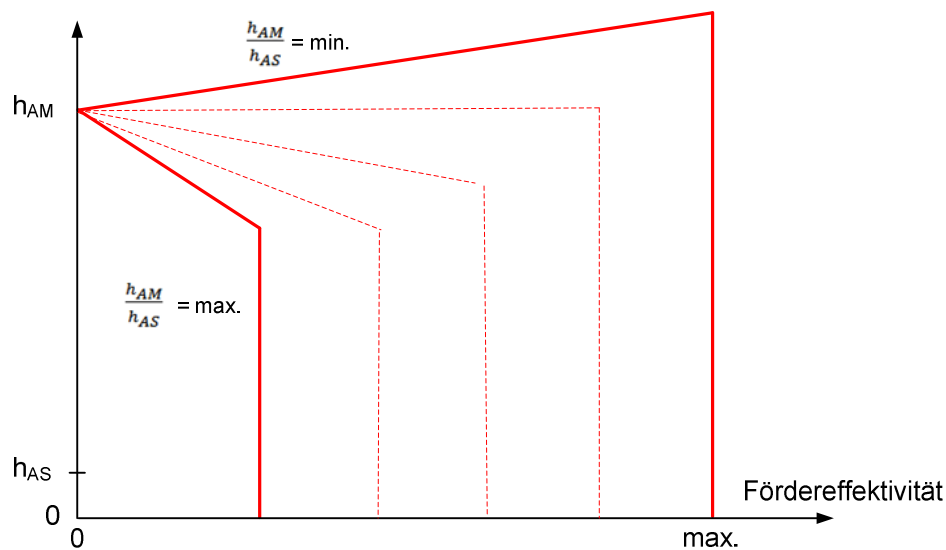
Die auf diesem Wege berechneten Dichten liegen in einem Bereich von $198 \frac{kg}{m^3}$ bis hin zu $578 \frac{kg}{m^3}$ mit einer Standardabweichung von $\sigma = 0,12 \frac{kg}{m^3}$. Auf nachstehender Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass die Dichte im Aufgabebereich bei kleiner werdendem $\frac{h_{AM}}{h_{AS}}$ ansteigt und bei größer werdendem $\frac{h_{AM}}{h_{AS}}$ abnimmt. Dies deckt sich auch mit den visuellen Eindrücken der Versuche aus Abschnitt 5.1.



Damit sich in der Combate-Modellvorstellung der korrekt eingetragene Brennstoffmassenstrom ausschließlich auf Basis einer gegebenen Geometrie ergibt, müssen die Rohdichten aus obiger Abbildung eindeutiger beschreibbar sein. Eine Normierung auf Basis einer weiteren geometrischen Größe scheint unumgänglich.

Aus den Versuchen in Abschnitt 5.1 wurde ersichtlich dass, die Fördereffektivität oberhalb des Aufgabeschleiers und somit das effektive Fördervolumen $\dot{V}_{dH,eff.}$ von dem konstruktiven Parameter $\frac{h_{AM}}{h_{AS}}$ abhängig ist. Analysiert man die unterschiedlichen Aufgabegeometrien so fällt als Differenzierungsmerkmal das Verhältnis von der Höhe des Aufgabemauls h_{AM} zur Höhe des Aufgabestößels h_{AS} am deutlichsten auf. Das Verhältnis $\frac{h_{AM}}{h_{AS}}$ liegt bei den betrachteten Anlagen zwischen 2,12 und 8,64. Es kann davon ausgegangen werden, dass die analysierten Verbrennungslinien einen repräsentativen Querschnitt aller verbauten Verhältnisse von $\frac{h_{AM}}{h_{AS}}$ darstellen, die jeweiligen Extremwerte eingeschlossen.

Folgende Vorstellung zur Fördereffektivität berücksichtigt diesen konstruktiven Parameter:



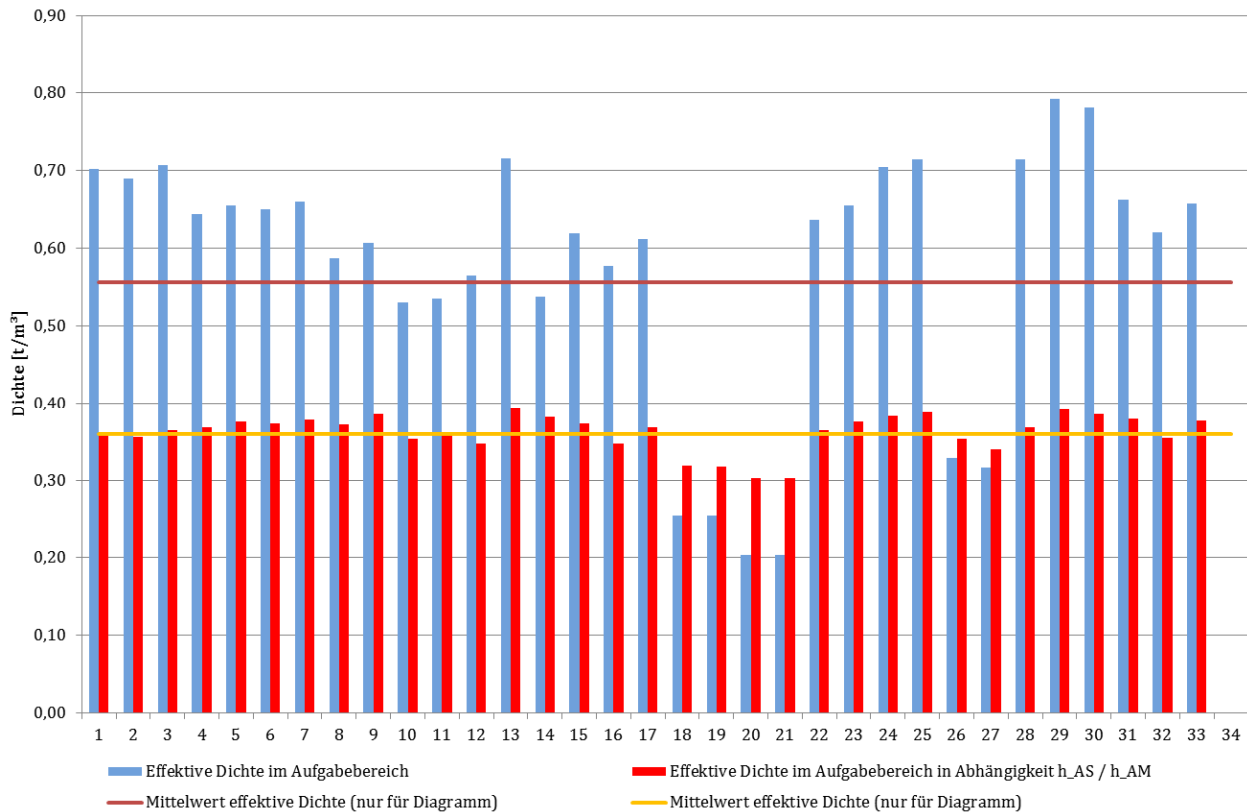
Die Berechnung von $\dot{V}_{dH,eff}$ in Abhängigkeit von $\frac{h_{AM}}{h_{AS}}$ ergibt sich somit zu:

$$\dot{V}_{dH,eff} \cdot \frac{h_{AM}}{h_{AS}} = \frac{h_{AM}}{h_{AS}} \cdot \left[\varnothing n_{dH(x)} \cdot b_{AS} \cdot l_{Hub\ AS,eff,tats} \cdot \left(h_{AS} + \frac{h_{AM} - h_{AS}}{2} \right) \right]$$

Mit dem nun bekannten effektiv geförderten Volumenstrom $\dot{V}_{dH,eff} \cdot \frac{h_{AM}}{h_{AS}}$ kann wiederum die Dichte $\rho_{eff} \cdot \frac{h_{AM}}{h_{AS}}$ berechnet werden.

Zur Berechnung eines aufgegebenen Brennstoffmassenstromes kann somit folgende Formel angegeben werden:

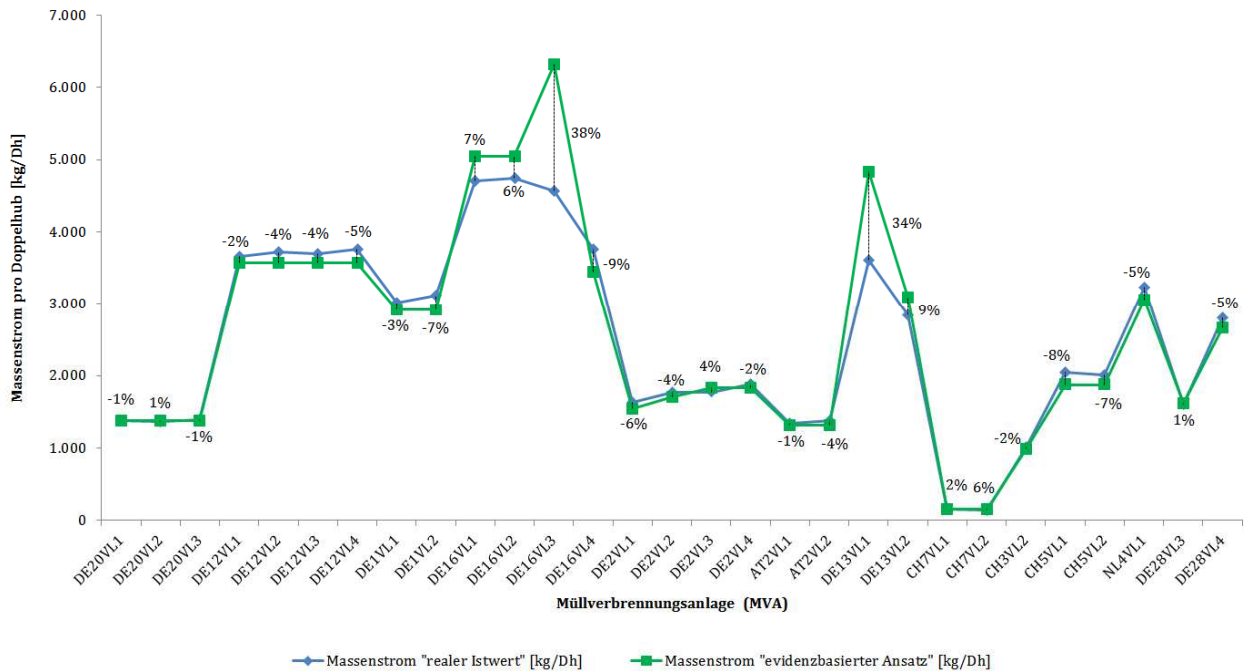
$$\varnothing \dot{m}_{Kran(x)} = \rho_{eff} \cdot \frac{h_{AM}}{h_{AS}} \cdot \left[\varnothing n_{dH(x)} \cdot b_{AS} \cdot l_{Hub\ AS,eff,tats} \cdot \left(h_{AS} + \frac{h_{AM} - h_{AS}}{2} \right) \right]$$



Auf obiger Abbildung sind die berechneten Dichten $\rho_{eff.}$ und $\rho_{eff., \frac{h_{AM}}{h_{AS}}}$ sowie deren arithmetisches Mittel dargestellt. Die auf diesem Wege berechneten (=normierten) Dichten liegen nunmehr nur noch in einem Bereich von $303 \frac{kg}{m^3}$ bis $393 \frac{kg}{m^3}$. Die Standardabweichung beträgt nunmehr nur noch $\sigma = 0,024 \frac{kg}{m^3}$. Der arithmetische Mittelwert der Dichte aus den einzelnen Berechnungen beträgt für $\rho_{eff., \frac{h_{AM}}{h_{AS}}} = 360 \frac{kg}{m^3}$.

Berechnet man aus obiger Gleichung für den Brennstoffmassenstrom die Masse die pro Beschickdoppelhub gefördert wird und vergleicht diese mit den realen Betriebsdaten, so ergibt sich die folgende Darstellung:

Abweichung evidenzbasierter Ansatz zu Betriebsdaten



Es zeigt sich, dass die mit einer einfachen Formel berechneten Werte (bis auf zwei Ausreisser) sehr gut mit einem Fehler von < 10 % mit den tatsächlich gemessenen und bestimmten Werten übereinstimmen.

6.2 Geometrisch-physikalischer Ansatz

Der geometrische-physikalische Ansatz basiert auf den physikalischen Gegebenheiten einer Müllverbrennungsanlage. In die Berechnung des Massenstroms an der Aufgabe geht neben der Geometrie der Anlage auch verschiedene Kräfte, Drücke, Reibung usw. ein.

Für den Massenstrom an der Aufgabe kann vereinfacht von dem geförderten Volumen und der spezifischen Dichte des Mülls im Aufgabebereich ausgegangen werden:

$$\dot{m}_{Dh,As,eff} = \rho_{Müll,komp \text{ vor } As,As-position} \cdot \dot{V}_{Dh,As,eff}$$

Der geförderte Volumenstrom pro Doppelhub des Aufgabeschiebers $\dot{V}_{Dh,As,eff}$ ist durch weitere Parametern bestimmt. Dies sind im Wesentlichen die Doppelhubzahl der Aufgabe $\dot{n}_{Dh,As}$, die Breite b_{As} und Höhe des Aufgabestößels h_{As} , die Höhe des Aufgabemauls h_{Am} . Die entsprechenden Daten findet man in Betriebsdaten ($\dot{n}_{Dh,As}$) und Konstruktionsunterlagen (b_{As} , h_{As} , h_{Am}). Der effektiv wirksame Förderweg des Aufgabestößels $l_{As,Hub,eff}$ wurde durch zusätzliche Versuche bestimmt und in Relation zum tatsächlichen Hub des Aufgabestößels gesetzt. Insgesamt gehen die genannten Faktoren folgendermaßen in der Massenstromformel der Aufgabe $\dot{m}_{Dh,As,eff}$ ein.

$$\dot{m}_{Dh,As,eff} = \rho_{Müll,komp \text{ vor } As,As-position} \cdot [\dot{n}_{Dh,As,i} \cdot b_{As} \cdot h_{Am} \cdot l_{Hub,eff}]$$

Die Dichte des Brennstoffs $\rho_{Müll,komp \text{ vor } As,As-position}$ ist im Aufgabebereich (vor dem Aufgabeschieber) größer als die eines Haufwerks $\rho_{Müll,Schütt}$. Grund hierfür ist die Kompression, welche der Müll durch das Gewicht der darüber liegenden Müllsäule und die Kraft vom Aufgabeschieber während des Beschickungsvorgangs F_{Vh}

erfährt. Aus Versuchen mit Aufnahme des hydraulischen Drucks der Zylinder für den Aufgabestößel p_{Vh} kann eine Kraft ausgerechnet werden, die während des Vorhubs auf die davor liegende Müllschüttung wirkt und diese verdichtet.

Die Dichte, welche bei einem Vorhub mit einem gemessenen Druck im Aufgabezylinder, vor dem Aufgabestößel entsteht, kann durch folgende Gleichung berechnet werden.

$$\rho_{Müll,komp\ vor\ As} = 503784 \cdot p_{Müll,Vh}^5 - 574030 \cdot p_{Müll,Vh}^4 + 244120 \cdot p_{Müll,Vh}^3 - 48263 \cdot p_{Müll,Vh}^2 + 4996,6 \cdot p_{Müll,Vh} + \rho_{Müll,Schütt}$$

Für verschiedene Dichten an unterschiedlichen Anlagensektionen ist im Kapitel... folgende Werte festgesetzt worden.

Für die Schüttdichte als Haufwerk des Mülls:

$$\rho_{Müll,Schütt} = 275 \text{ kg/m}^3$$

Für die Dichte im Aufgabebereich des Mülls bevor die Kraft des Aufgabestößels im Vorhub darauf wirkt:

$$\rho_{Müll,Aufgabe} = 460 \text{ kg/m}^3$$

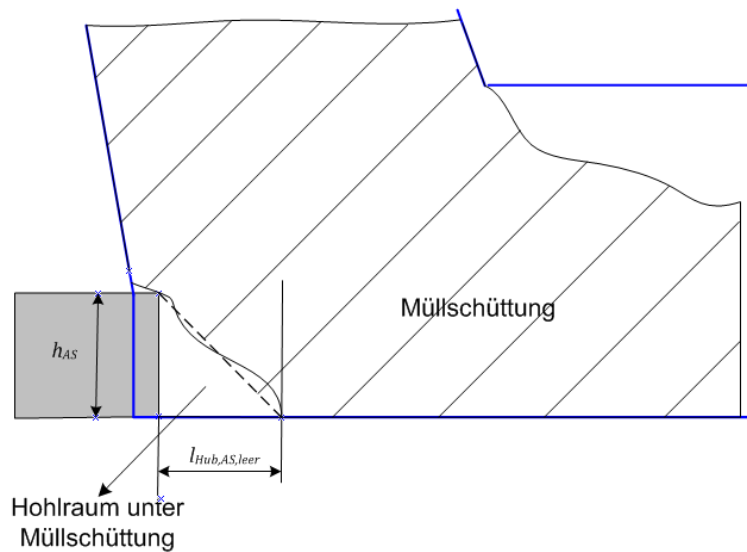
Bei den Versuchen an DE20VL1 zeigte sich, dass die entwickelte Gleichung nicht bei allen Bewegungskombinationen des Aufgabeschiebers zu exakten Vorhersagen des Massenstromes führte. Insbesondere sind die Förderleistungen bei kurzen Hüben sowie bei der Positionsverlagerung der Hübe teilweise stark abweichend. Die Betrachtungen von physikalischen Detaileinflüssen ließen auf Behinderungen in der Förderleistung schließen. Es stellte sich heraus, dass am Anfang eines Hubes zunächst eine Art „Grundverdichtung“ herbeigeführt wird. Diese setzt sich zusammen aus einem sogenannten „Leerhub“ $l_{Hub,As,leer}$ und einem „Elastizitätshub“ $l_{Hub,As,elast}$, die Summe aus beiden ist der „Kompressionshub“ $l_{Hub,As,Kompression}$. Ferner wird auch der Bereich oberhalb des Aufgabeschiebers bewegt. Diese drei Effekte wurden untersucht und in die Transportgleichung eingebaut. Die zugehörigen Zusammenhänge werden nachfolgend beschrieben.

$$l_{Hub,As,eff} = (l_{Hub,As,FLR} - l_{Hub,As,Kompression}) \cdot (h_{As} + (h_{Am} - h_{As}) \cdot f_{Mitnahme})$$

Die Gleichung für den „Kompressionshub“ $l_{Hub,As,Kompression}$ lautet folgendermaßen:

$$l_{Hub,As,Kompression} = l_{Hub,As,FLR} - l_{Hub,As,leer} - l_{Hub,As,elast}$$

Es ist leicht vorstellbar, dass sich vor dem Aufgabeschieber eine Brückenbildung des Brennstoffes einstellen kann. Beim Vorfahren des Aufgabeschiebers wird dieser Bereich verdichtet und dieser Teil des Vorhubes nimmt nicht am Mülltransport teil. Der spezifische Leerhub $l_{Hub,As,leer}$ kann mit dem Schüttwinkel des Hohlraums zusammen hängen. Da sich dieser jedoch nicht bestimmen lässt, wird als weitere Einflussgröße die Höhe des Aufgabeschiebers eingeführt.



Es wurde in der Berechnung ein Leerhubfaktor f_{leer} eingeführt. Dieser wird mit der Höhe des Aufgabestößels multipliziert.

$$l_{Hub,As,leer} = h_{As} \cdot f_{leer}$$

Der Leerhub entspricht für die weiterführenden Berechnungen immer 5 % der Höhe des Aufgabestößels.

Zusätzlich zum Leerhub findet durch den Vorhub des Aufgabestößels eine Verdichtung des Mülls statt. Diese ist der Elastizität des Mülls geschuldet. Sie ergibt sich aus der Dichteänderung des Mülls durch Aufprägen der Kraft des Aufgabestößels. Der Elastizitätsweg des Aufgabestößels in die davorliegende Müllschüttung $l_{Hub,As,elast}$ wird maßgebend durch ein Verhältnis zwischen der Mülldichte eines Haufwerks $\rho_{Müll,Schütt}$ und der errechneten komprimierten Dichte der Müllschüttung vor dem Aufgabestößel $\rho_{Müll,kompr,Aufgb}$ beschrieben.

Dieses Prinzip beruht auf dem Massenerhalt bei Kompression eines konstanten Volumens. Die Masse des verdichteten Volumens entspricht der des Ausgangsvolumens. Werden diese Massen gleichgesetzt, erhält man das Verhältnis der Dichten, das umgekehrt proportional zu dem Längenverhältnis der Hubwege ist. Hier wird die Länge des Mülls $l_{Hub,Hypo,elast}$, die vor dem Aufgabestößel liegt mit der prozentualen Änderung der Dichte multipliziert. Somit ergibt sich für den Elastizitätsanteil $l_{Hub,As,elast}$ folgenden Zusammenhang.

$$l_{Hub,As,elast} = l_{Hub,Hypo,elast} \cdot \frac{\rho_{Müll,kompr,Aufgb} - \rho_{Müll,Aufgabe}}{\rho_{Müll,Aufgabe}}$$

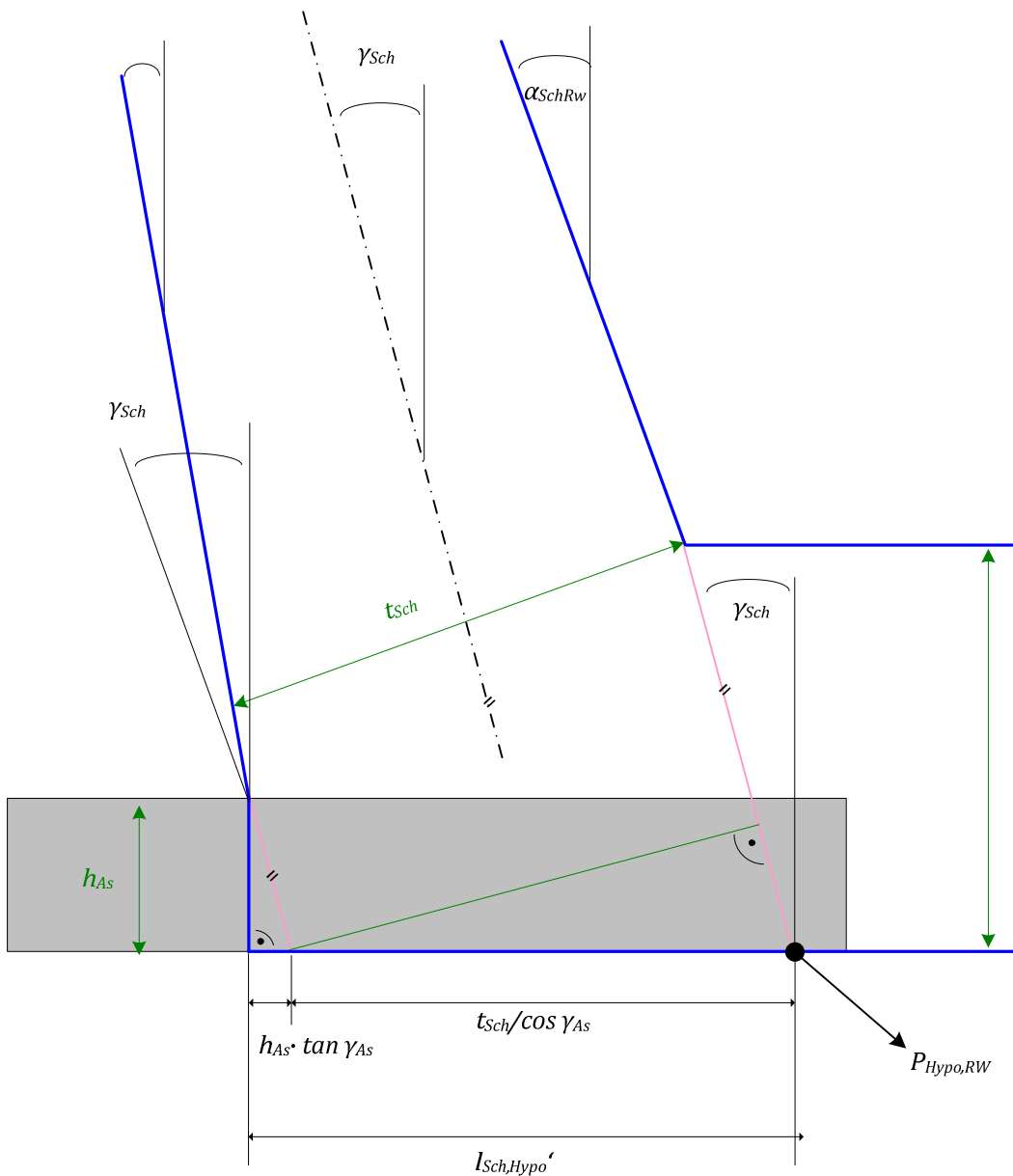
Bei der Strecke $l_{Hub,Hypo,elast}$ spielt die Länge $l_{Sch,Hypo}'$ eine entscheidende Rolle. Diese Länge beschreibt den Abstand zwischen der Schachtvorderwand und der Hypotenuse der der Schachtrückwand. Zur Berechnung der $l_{Sch,Hypo}'$ wird unter anderem die mittlere Schachtneigung γ_{Sch} und die Tiefe des Aufgabeschachts t_{Sch} benötigt. Mit der Höhe des Aufgabestößels kann nun die Länge $l_{Sch,Hypo}'$ berechnet werden.

$$l_{Sch,Hypo}' = \frac{t_{Sch}}{\cos \gamma_{Sch}} + h_{As} \cdot \tan \gamma_{Sch}$$

Die mittlere Schachtneigung ist der Mittelwert der Neigung der vorderen und hinteren Schachtwand.

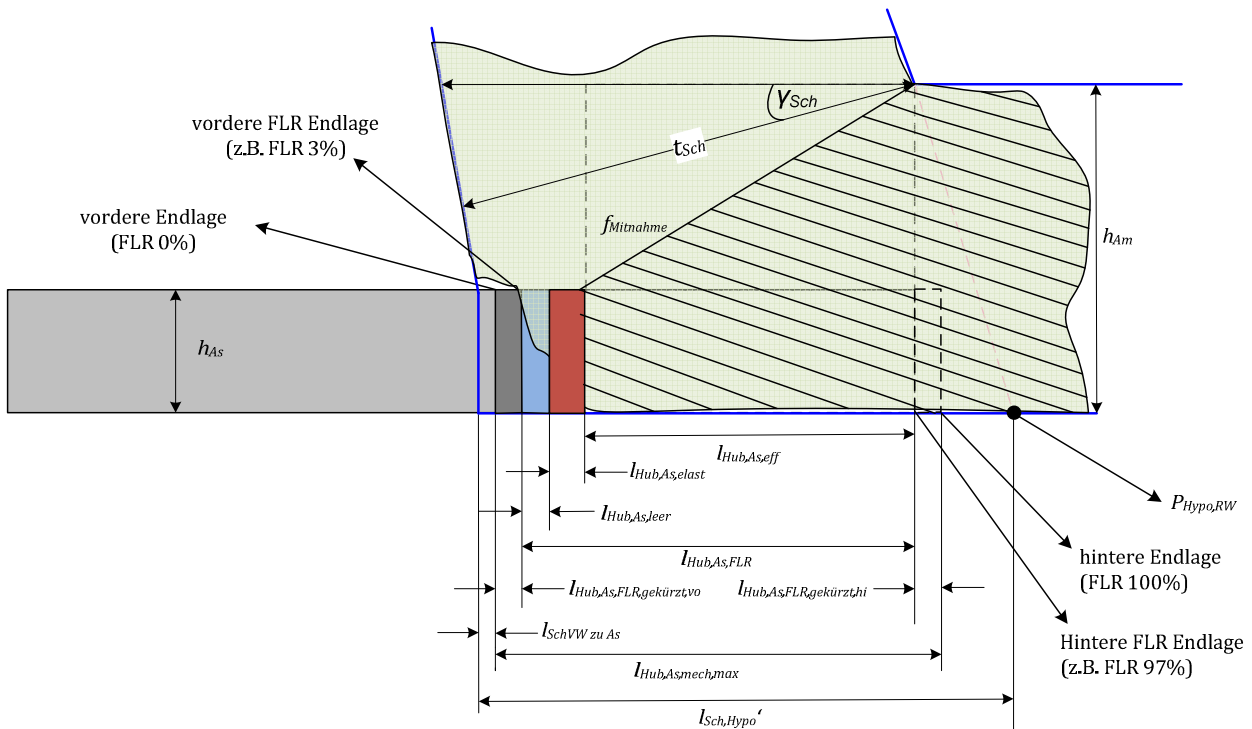
$$\gamma_{Sch} = \frac{\alpha_{SchRW} + \beta_{SchVW}}{2}$$

Einen Überblick der geometrischen Bedingungen im Aufgabebereich findet man in nachfolgender Abbildung:



Um nun die Länge $l_{Hub,Hypo,elast}$ zu erhalten, muss die Startposition des Aufgabestößels beschrieben werden. Die nachfolgende Abbildung stellt die benötigten Subtrahenden grafisch dar:

Fall 1: Endlage As, diesseits von $P_{Hypo,RW}$



Von der Länge $l_{Sch,Hypo}'$ wird die Länge der Schachtvorderwand bis zur ungekürzten Startposition des Aufgabeschiebers $l_{SchVW\ zu\ As}$, der Leerhub $l_{Hub,As,leer}$ und die eingekürzte Länge des Vorhubs von der FLR $l_{Hub,As,FLR,gekürzt,vo}$ abgezogen

$$l_{Hub,Hypo,elast} = l_{Sch,Hypo}' - l_{SchVW\ zu\ As} - l_{Hub,As,leer} - l_{Hub,As,FLR,gekürzt,vo}$$

Um abschließend die Gleichung des Elastizitätsanteil $l_{Hub,As,elast}$ vollständig lösen zu können, muss schlussendlich noch die Dichte $\rho_{Müll,kompr,Aufgb}$ berechnet werden. Um mit der Dichteberechnungsformel auf die komprimierte Dichte $\rho_{Müll,kompr,Aufgb}$ zu kommen, müssen die Druckverhältnisse im Aufgabemaß bekannt sein. Das Ziel ist es wie oben beschrieben, eine universelle Gleichung zu erstellen, sodass der Massenstrom pro Doppelhub oder in der Stunde einer beliebigen Anlage berechnet werden kann. Aufgrund anderer Geometrieverhältnisse ist ein Übertragen der berechneten Dichte aus Schweinfurt nicht möglich. Deshalb ist aus Versuchen in Schweinfurt ein Weg entwickelt worden, um auch bei anderen Müllverbrennungsanlagen die sich einstellende Dichte im Aufgabebereich während des Vorhubes errechnen zu können.

Bei den Versuchsfahrten an DE20VL1 wurde der Druck an den Hydraulikzylindern der Aufgabe beobachtet. Die aufgebrachte Kraft der Aufgabezylinder lässt sich durch die Anzahl der Zylinder n_{Asz} , ihre geometrischen Abmessungen $A_{Kolben,Vh,Asz}$ und den aufgezeichneten hydraulischen Druck p_{Vh} errechnen:

$$F_{Vh} = n_{Asz} \cdot p_{Vh} \cdot A_{Kolben,Vh,Asz}$$

Um nun auch die Reibkräfte im Aufgabebereich zu berechnen, muss der benötigte Druck während des Rückhubes bekannt sein. Die zu überwindende Reibkraft $F_{R,Rh,As}$ im Rückhub kann durch die Formel $F_{R,Rh,As}$ berechnet werden:

$$F_{R,Rh,As} = n_{Asz} \cdot p_{Rh} \cdot A_{Kolben,Rh,Asz}$$

Dazu wird bei einem Rückhub des Aufgabestößels der anliegende Druck aufgenommen, wobei dieser Druck so groß ist, dass der Aufgabestößel die Reibung zwischen sich und der darüber liegenden Müllsäule überwinden kann. Daraus kann die Gleitreibungszahl $\mu_{Gleit, \frac{Müll}{Stahl}}$ zwischen Müll und Stahl berechnet werden:

$$\mu_{Gleit, \frac{Müll}{Stahl}} = \frac{F_{R,Rh,As}}{p_{Müll,Aufgabebereich} \cdot l_{Hub,As,FLR} \cdot b_{As}}$$

Bei einem Rückhub muss ein gewisser Öldruck an den Hydraulikzylinder anliegen. Diese Kraft muss größer als die Summe der Reibkräfte zwischen dem Aufgabestößel & Müll und zwischen Aufgabestößel & Aufgabebereich sein. Die Reibkraft zwischen Aufgabestößel und Aufgabebereich ist zu vernachlässigen, weil der Aufgabestößel auf Stahlrollen und Stahlschienen rollt (Messungen während einer Revision haben hier einen vernachlässigbaren Hydraulikdruck ergeben; laut zugänglichen Quellen ist die Rollreibungszahl zwischen Stahl und Stahl = 0,002).

Somit wurde ein Gleitreibungskoeffizient zwischen Stahl und Müll $\mu_{Gleit, \frac{Müll}{Stahl}}$ errechnet:

$$\mu_{Gleit, \frac{Müll}{Stahl}} = 0,47$$

Mit dem berechneten Gleitreibungskoeffizienten kann nun die Reibkräfte an den Trichterwänden $F_{R,ges,Seitenwände}$ (je eine Trichterwand links und rechts) bestimmt werden

$$F_{R,ges,Seitenwände} = 2 \cdot \mu_{Gleit, \frac{Müll}{Stahl}} \cdot F_{N,Seitenwand \text{ durch Müllsäule}}$$

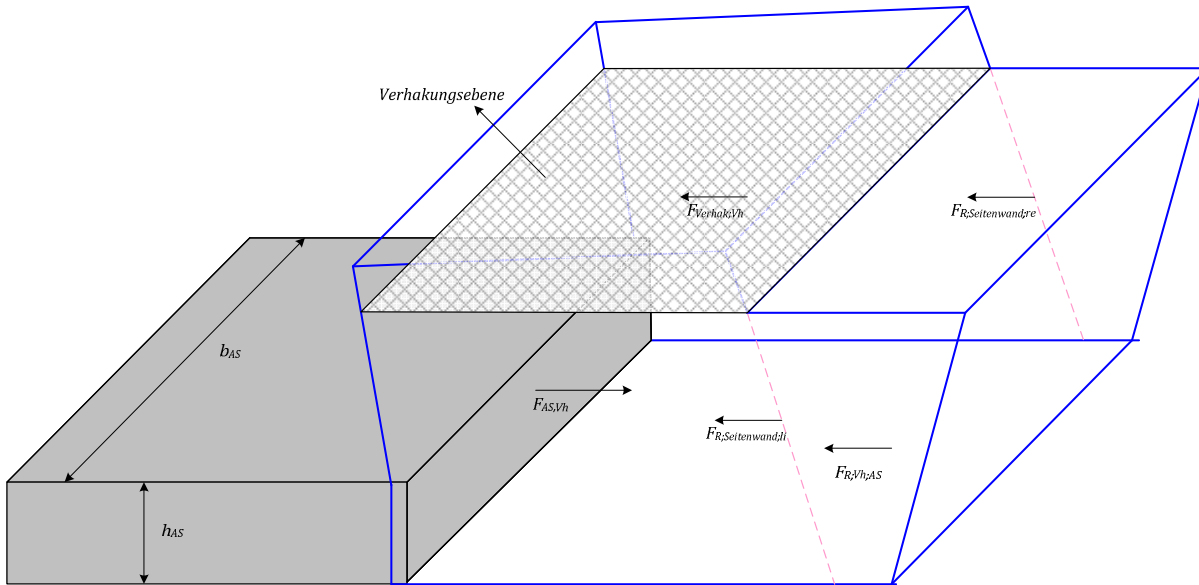
Die auf die Seitenwände wirkende Normalkraft $F_{N,Seitenwand \text{ durch Müllsäule}}$ ergibt sich aus dem Druck der Müllsäule und der beaufschlagten Fläche:

$$F_{N,Seitenwand \text{ durch Müllsäule}} = p_{Müll,Aufgabebereich} \cdot l_{Hub,Hypo,elast} \cdot h_{Am}$$

Parallel kann die Widerstandskraft $F_{R,Vh,As}$, welche durch Reibung während des Vorhubes entsteht, auch berechnet werden.

$$F_{R,Vh,As} = p_{Müll,Aufgabebereich} \cdot l_{Hub,Hypo,elast} \cdot b_{As}$$

Um nun die Kräftebilanz vollständig abschließen zu können, muss noch die Verhakungskraft auf Höhe der Verhakungsebene bekannt sein. Die Verhakungsebene und die anderen auftretenden Kräfte im Aufgabebereich stellen sich wie folgt dar:



Die Verhakungskraft kann aus der Vorhubkraft F_{Vh} abzüglich der seitlichen $F_{R,ges,Seitenwände}$ und unteren Reibkräfte $F_{R,Vh,AS}$ ermittelt werden:

$$F_{Verhak,Vh} = F_{Vh} - F_{R,Vh,AS} - F_{R,ges,Seitenwände}$$

Auf Grund der Tatsache, dass bei der Auslegung einer Müllverbrennungsanlage nach dem Brennstoffmassenstrom nur die Konstruktionsdaten vorhanden sind, kann bei der Auslegung/Nachrechnung nicht auf Betriebsparameter wie beispielsweise der Druck an den Aufgabezylinder zurückgegriffen werden. Aus diesen Umständen heraus würde hierfür die wirkende Verhakungskraft auf einem Quadratmeter normiert.

$$F_{Verhakung \text{ pro } m^2} = \frac{F_{Verhak,Vh}}{\frac{t_{Sch}}{\cos \gamma_{Sch}} - l_{SchVW \text{ zu } AS} - l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,vo}}$$

Mit dem das verschiedenste Anlagen sich in der Trichterhöhe weniger stark unterscheiden als in der Breite, wird für weitere Berechnungen der errechnete Wert für $F_{Verhakung \text{ pro } m^2}$ festgesetzt:

$$F_{Verhakung \text{ pro } m^2} = 4600 \frac{N}{m^2}$$

Um jetzt abschließend den Wert für den Elastizitätsanteil bestimmen zu können, wird letztendlich der Wert für die komprimierte Dichte im Aufgabebereich $\rho_{Müll,kompr,Aufgb}$ berechnet.

Hierzu wird mit den Geometriedaten von der zu berechnenden Anlagen die Kräftebilanz aufgestellt. Somit kann der Druck im Aufgabebereich, der durch den Aufgabestößel während des Vorhubes wirkt und zu der Verdichtung führt, berechnet werden.

$$p_{Müll,Vh} = \frac{F_{Verhakung \text{ pro } m^2} \cdot \left(\frac{t_{Sch}}{\cos \gamma_{Sch}} - l_{SchVW \text{ zu } AS} - l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,vo} \right) + F_{R,Vh,AS} + F_{R,ges,Seitenwände}}{b_{AS} \cdot h_{Am}}$$

Anschließend wird mit der oben genannten Formel ... der Wert der Dichte $\rho_{Müll,kompr,Aufgb}$ bestimmt.

Nun kann der Elastizitätsanteil eines Vorhubs bei einer beliebigen Anlage berechnet werden.

$$l_{Hub,AS,elast} = l_{Hub,Hypo,elast} \cdot \frac{\rho_{Müll,kompr,Aufgb} - \rho_{Müll,Aufgabe}}{\rho_{Müll,Aufgabe}}$$

Die Hublänge des Aufgabestößels $l_{Hub,AS,FLR}$, welche die FLR vorgibt, berücksichtigt den Einfluss der Start- (vorn) und Endlage (hinten) des Aufgabestößels. Dabei wird vom maximalen, mechanischen Hub des Aufgabestößels $l_{Hub,AS,mech,max}$ die vordere und hintere Verkürzung subtrahiert.

$$l_{Hub,AS,FLR} = l_{Hub,AS,mech,max} - l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,vo} - l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,hi}$$

Dabei sind $l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,vo}$ die gekürzte vordere Startposition und $l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,hi}$ die gekürzte hintere Endposition, die durch die Feuerungsleistungsregelung (FLR) bestimmt sind.

Im Normalbetrieb beträgt im GKS die standardmäßig eingestellte Hublänge des Aufgabeschiebers $l_{Hub,AS,FLR} = 1050 \text{ mm}$.

Die Länge $l_{Hub,AS,FLR}$ ist anlagenabhängig und nicht standardmäßig vorgegeben. Deshalb muss für die Betrachtung der Strecke $l_{Hub,AS,FLR}$ in zwei Fälle unterschieden werden.

Dies geschieht über eine Fallabfrage. Der erste Fall tritt ein (siehe nachstehende Abbildung „Fall 1“), falls der Hub des Aufgabestößels vor dem Punkt $P_{Hypo,RW}$ endet. Der Punkt $P_{Hypo,RW}$ beschreibt eine Wirkgrenze. Aus den Versuchen in 5.3 kann davon ausgegangen werden, dass bis zum Punkt, welcher durch die Schachtrückwand definiert wird, der Vorhub des Aufgabestößels wirksam und effektiv ist. Danach ist der gefahrene Teil des Vorhubes unwirksam und wird Überstandshub $l_{Hub,AS,Überstand}$ genannt. In diesem Fall gilt:

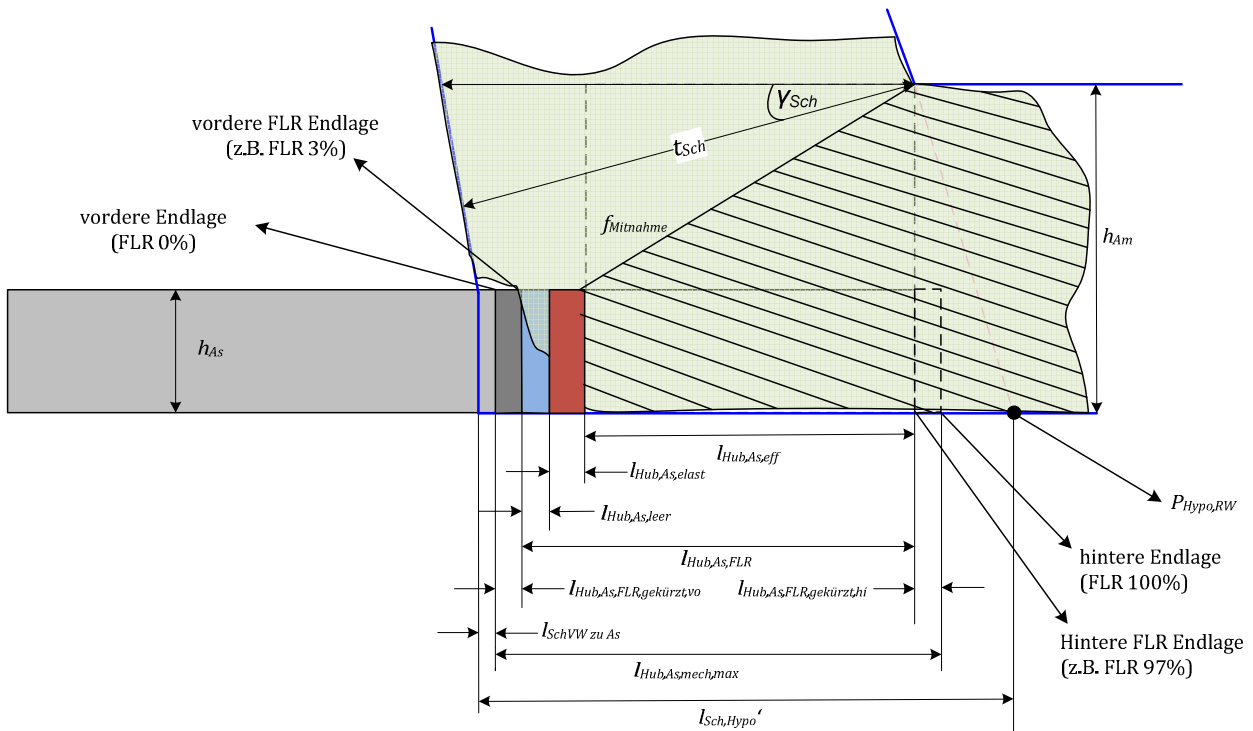
$$l_{Sch,Hypo}' \geq l_{Hub,AS,mech,max} + l_{AS \text{ zu } SchVW} - l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,hi}$$

und

$$l_{Hub,AS,FLR} = l_{Hub,AS,mech,max} - l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,vo} - l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,hi}$$

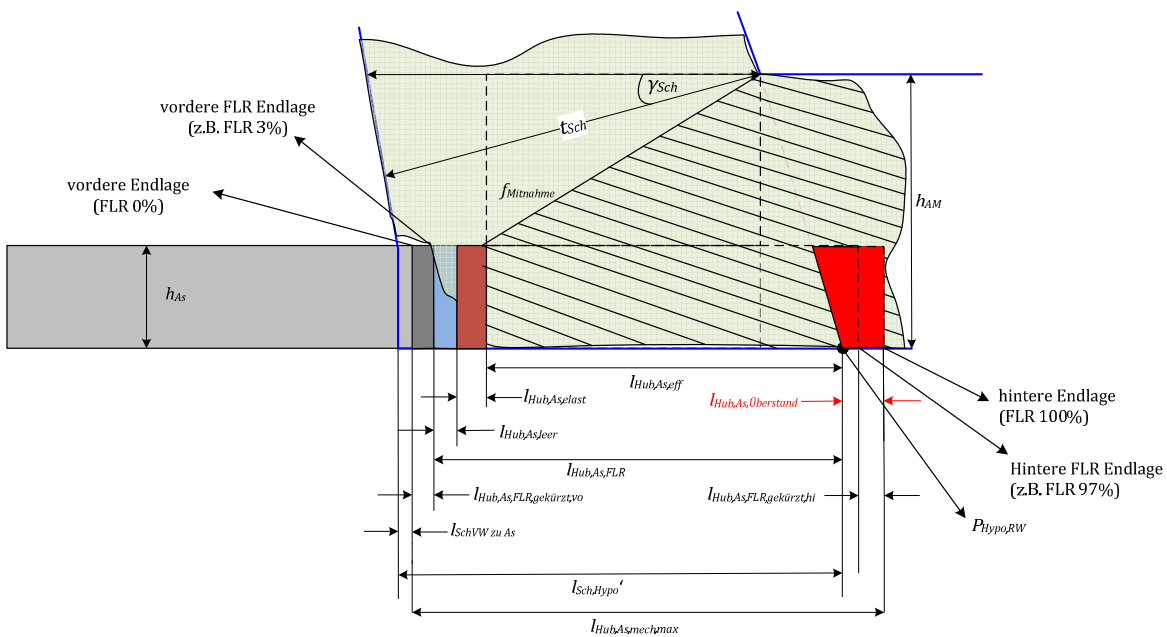
Mit $l_{Hub,AS,mech,max}$ ist die maximal mögliche mechanische Hublänge des Aufgabeschiebers definiert. An der untersuchten Verbrennungslinie DE20VL1 kann diese Länge maximal 1117 mm betragen, wenn laut FLR 100% Hub gefahren werden. Unter Länge $l_{AS \text{ zu } SchVW}$ versteht man den Abstand der Schachtvorderwand zur vorderen Endlage des Aufgabeschiebers (FLR=0%). Diese Länge kann anlagen/konstruktionbedingt größer 0 mm sein. Der Wert $l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,vo}$ beschreibt den Abstand von der vorderen Endlage des Aufgabestößels zur definierten Startposition des Aufgabeschiebers. An DE20VL1 beträgt diese Länge üblicherweise 3% vom maximal möglichen mechanischen Hub $l_{Hub,AS,mech,max}$ und wird nur zu Versuchszwecken geändert. Äquivalent hierzu beschreibt $l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,hi}$ die eingekürzte Hublänge an der hinteren Position. Diese Länge wird ebenfalls von der FLR vorgegeben und beträgt an DE20VL1 auch 3% von $l_{Hub,AS,mech,max}$.

Fall 1: Endlage As, diesseits von $P_{Hypo,RW}$



Der zweite Fall gilt, wenn die Endlage des Aufgabeschleibers jenseits des Punktes $P_{Hypo,RW}$ ist:

Fall 2: Endlage As, jenseits von $P_{Hypo,RW}$



Bei dieser Konstellation muss Länge $l_{Sch,Hypo}'$ kürzer als der eingestellte Hub sein:

$$l_{Sch,Hypo}' \leq l_{Hub,AS,mech,max} + l_{As\ zu\ SchVW} - l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,hi}$$

Für $l_{Hub,AS,FLR}$ muss in der Formel folgendes eingesetzt werden:

$$l_{Hub,AS,FLR} = l_{Sch,Hypo}' - l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,vo} - l_{As\ zu\ SchVW}$$

Der Bereich nach dem Punkt $P_{Hypo,RW}$, in der Abb... rot dargestellt, trägt zum Feststofftransport nicht bei. Die Überstandshublänge $l_{Hub,AS,Überstand}$ kann folgendermaßen berechnet werden und existiert nur im zweiten Fall:

$$l_{Hub,AS,Überstand} = l_{Hub,AS,mSch,max} - l_{Sch,Hypo}' - l_{As\ zu\ SchVW}$$

Um die Gleichung für $l_{Hub,AS,eff}$ zu bestimmen, wird noch der Mitnahmefaktor $f_{Mitnahme}$ benötigt. Der Mitnahmefaktor beruht auf der Idee, dass nicht nur das Volumen unmittelbar vor dem Aufgabestößel in den Feuerraum gefördert wird. Ein gewisser Teil des Mülls, welcher sich zwischen Aufgabestößel und Aufgabemaul befindet, muss auch in den Brennraum gefördert werden. Würde nur das Volumen vor dem Aufgabestößel gefördert werden, müssten wesentlich mehr Doppelhübe vom Aufgabestößel gefahren werden (sofern kein „Durchrutschen“ stattfindet). Zur Bestimmung des Verhakungsfaktors in Schweinfurt, wurde im laufenden Betrieb der Trichter beobachtet. Bei diesen Beobachtungen wurde u.a. eine Massenbilanz aufgestellt und daraus ist auf den Mitnahmefaktor geschlossen worden.

In Schweinfurt bewegt sich der Faktor $f_{Mitnahme}$ um die 1,1. Damit wird das vollständige Volumen an Müll, welches sich im Aufgabebereich befindet, und 10% mehr in den Feuerraum gefördert. Betrachtet man die Stückigkeit des Brennstoffs Müll und rechnet man die 10% zusätzlicher Förderung außerhalb des Aufgabemaules in eine Strecke um, kommt man zu dem Ergebnis, dass die 10% eine Länge von 60 mm entsprechen. Bei einer Gegenüberstellung der Länge zu einigen Agglomerate (Müllsäcke o.ä.), die sich im angelieferten Müll befinden, sind 60 mm sehr klein und können leicht mit in den Brennraum gefördert werden.

Mit dem, dass der Mitnahmefaktor $f_{Mitnahme}$ ein anlagenspezifischer Faktor ist, wird ausgehen von Schweinfurt in Abhängigkeit des Trichterfüllstandes $h_{Müllsäule\ ü\ As}$, der mittleren Trichterneigung γ_{Sch} und dem Verhältnis Höhe Aufgabeschieber h_{As} zu Höhe Aufgabemaul h_{Am} der Mitnahmefaktor einer anderen Anlage berechnet. Die einzelnen Einflussfaktoren werden folgendermaßen ins Verhältnis gesetzt:

$$f_{Mitnahme,i} = f_{Mitnahme,SW} - f_{Mitnahme,SW} \cdot \frac{\frac{h_{Am,i}}{h_{As,i}} - \frac{h_{Am,SW}}{h_{As,SW}}}{\frac{h_{Am,SW}}{h_{As,SW}}} - \sin(\gamma_{Sch,SW} - \gamma_{Sch,i}) \cdot \frac{h_{As,i}}{h_{Am,i}}$$

Um nun letztendlich optional eine Variation und Verkürzung der Hubposition bzw. des Hubes zu beschreiben, wird die oben errechnete Dichte $\rho_{Müll,komp\ vor\ As,As-position}$ in das Verhältnis mit der Einkürzung des Vorhubes gesetzt. Dabei ist unter anderem die vordere $l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,vo,normal}$ und hintere Einkürzung $l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,hi,normal}$ des Hubes im Normalbetrieb wichtig. Subtrahiert von der mechanisch maximalen Hublänge $l_{Hub,AS,mech,max}$ ergibt sich folgender Zusammenhang

$$l_{Hub,AS,FLR} = l_{Hub,AS,mech,max} - l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,vo,normal} - l_{Hub,AS,FLR,gekürzt,hi,normal}$$

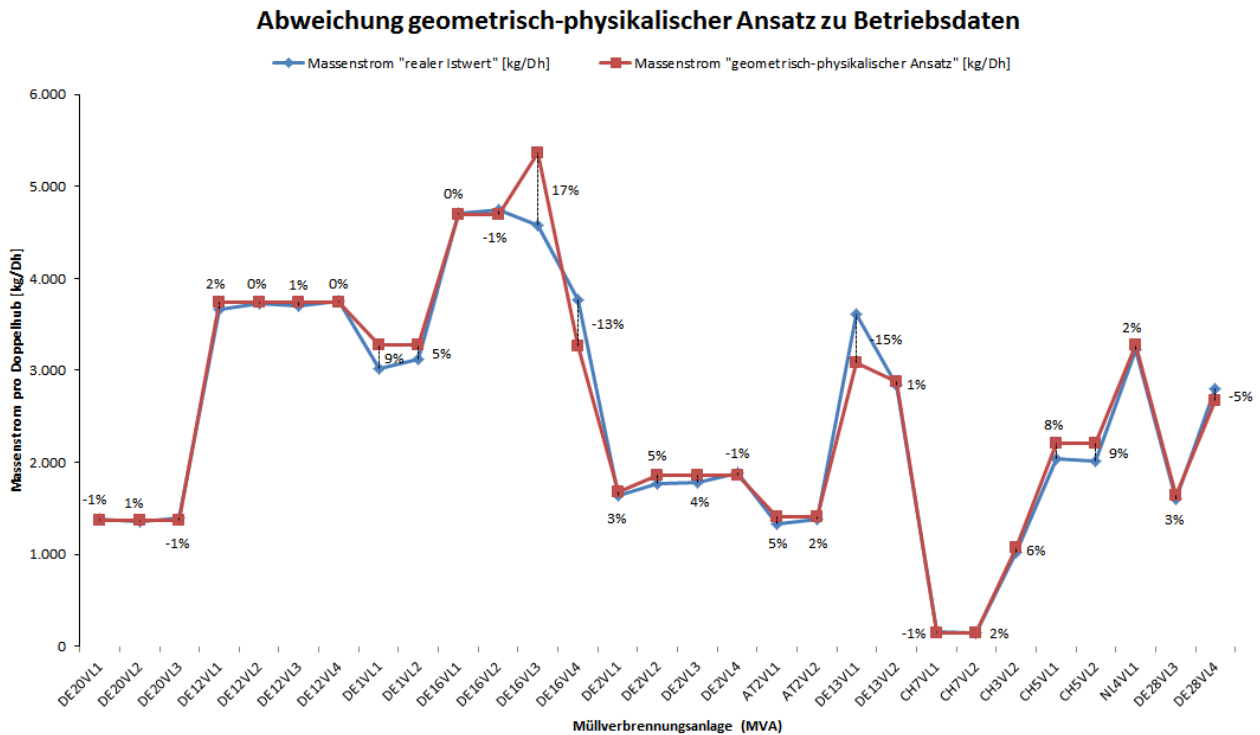
Um auf die Dichte $\rho_{Müll,komp\ vor\ As,As-position}$ zu kommen, muss folgende Gleichung gelöst werden.

$$\rho_{Müll,komp \text{ vor } As, As\text{-position}} = \rho_{Müll,komp \text{ vor } As} + (\rho_{Müll,komp \text{ vor } As} - \rho_{Müll,Aufgabe}) \cdot \frac{l_{Hub,As,FLR} - l_{Hub,As,FLR,normal}}{l_{Hub,As,FLR,normal}}$$

Damit ergibt die finale Massenstromberechnungsformel einer Müllverbrennungsanlage mit Einzelkolbenbeschickung:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{Dh,As,eff} = & \rho_{Müll,komp \text{ vor } As, As\text{-position}} \\ & \cdot [\dot{n}_{Dh,As,i} \cdot b_{As} \cdot h_{Am} \cdot (l_{Hub,As,FLR} - l_{Hub,As,Kompression}) \cdot (h_{As} + (h_{Am} - h_{As}) \cdot f_{Mitnahme}) \\ & \cdot (h_{As} + (h_{Am} - h_{As}) \cdot f_{Mitnahme})] \end{aligned}$$

In Analogie zum Abschnitt 6.1 wird wieder aus obiger Gleichung für den Brennstoffmassenstrom die Masse die pro Beschickdoppelhub gefördert wird berechnet und mit den realen Betriebsdaten verglichen, so dass sich die folgende Darstellung ergibt:

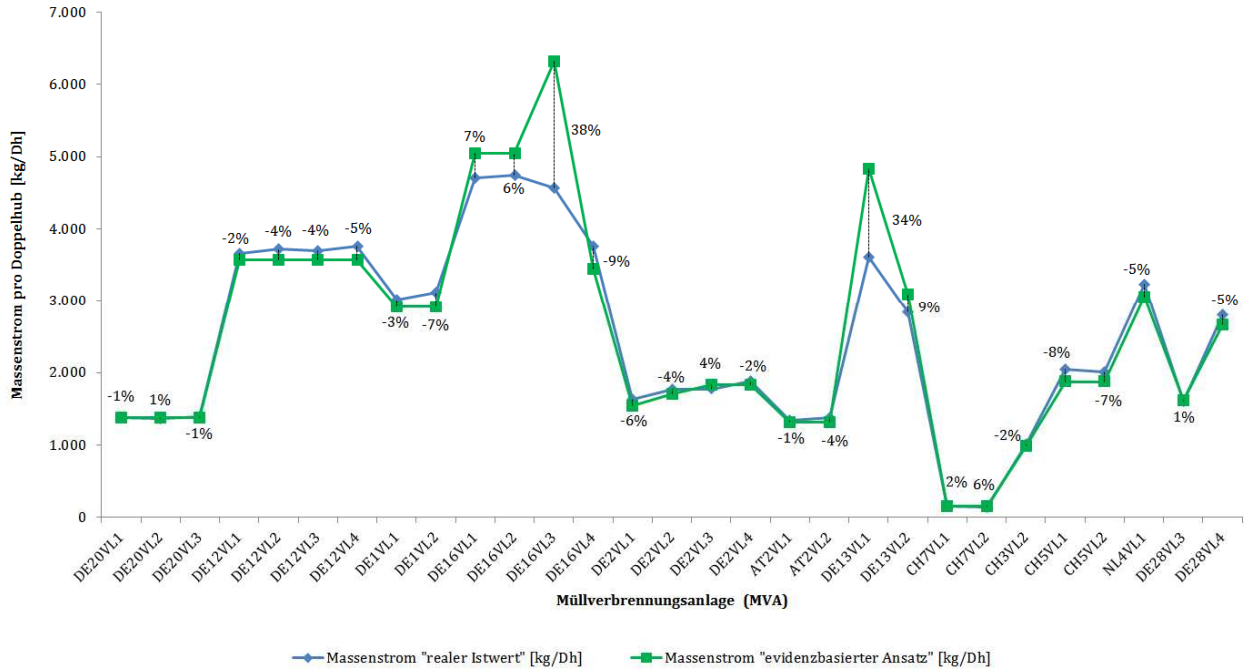


Es zeigt sich, dass die mit einer einfachen Formel berechneten Werte (bis auf drei Ausreisser) sehr gut mit einem Fehler von < 10 % mit den tatsächlich gemessenen und bestimmten Werten übereinstimmen.

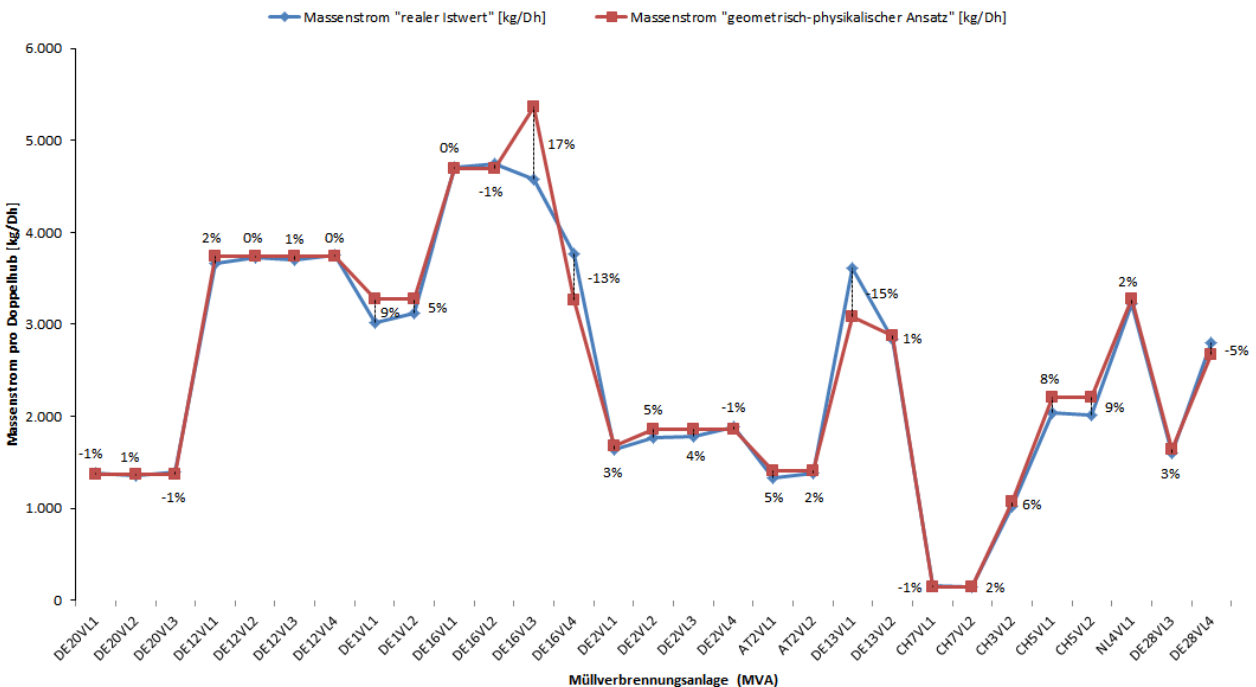
6.3 Vergleich der beiden Lösungsmöglichkeiten

Relevant ist der Vergleich dieser beiden abschließenden Diagramme:

Abweichung evidenzbasierter Ansatz zu Betriebsdaten



Abweichung geometrisch-physikalischer Ansatz zu Betriebsdaten



Es zeigt sich, dass sowohl der unter 6.1 beschriebene evidenzbasierte Ansatz und der unter 6.2 entwickelte geometrisch-physikalische Ansatz in Bezug auf einen Vergleich mit den betrieblichen Daten sehr gute

Ergebnisse liefern. Die Abweichung zwischen den berechneten Werten und der Realität liegt in der Regel bei < 10 %.

Bei beiden Verfahren gibt es innerhalb der Messreihe 2 Ausreisser mit Abweichungen von +38 % und +34 % bzw. +17 % und -15 %. Interessanterweise betrifft dies bei beiden Berechnungsverfahren - die ja voneinander völlig unabhängig agieren - die *gleichen* Anlagen bzw. Verbrennungslinien (DE16VL3, DE13VL1). Da alle anderen Ergebnisse gut zusammenpassen, ist hier eher von einer Inkonsistenz in der der Berechnung zugrundeliegenden Datenlage auszugehen, als von einem systematischen Fehler in den Berechnungsalgorithmen.

Anmerkung: Bei den bis dato analysierten Verbrennungslinien handelt es sich ausschließlich um Anlagen mit einer Einzelkolbenbeschickung. Demnach sind dies Verbrennungslinien auch in den oben dargestellten, vergleichenden Diagrammen noch nicht enthalten.

Der Berechnungsalgorithmus muss noch auf Anlagen mit Doppelkolbenbeschickung erweitert werden.

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen der Zielsetzung wurde schnell offensichtlich, dass die detaillierte Kenntnis über die Dichte des Abfalls *der* entscheidende Faktor zur Zielerreichung (= Berechnung eines Brennstoffmassenstroms) sein würde.

Durch umfangreiche empirische Versuche zur Ermittlung der Dichte des Mülls konnten belastbare, transparente und nachvollziehbare Ergebnisse präsentiert werden. Die Versuchsreihen zur Kompressibilität des Hausmülls lieferten grundlegende Informationen über das Verhalten des Mülls unter Druck. Beginnend mit den manuellen Pressversuchen der Hausmülltonne bis zum Einsatz einer industriellen Portalpresse. Es besteht nun die Möglichkeit einen Dichteverlauf für Hausmüll in Abhängigkeit des Drucks bis 400 mbar zu erstellen.

Damit konnte erstmalig der Dichteverlauf des Brennstoffs Müll detailliert vom Verursacher, über den Transportweg bis hin zur großtechnischen MVA und deren verfahrenstechnischen Anlagenteilen qualitativ und nachvollziehbar beschrieben werden.

Anschließend galt es das erlangte grundlegende Wissen über Müll auf die Realität einer MVA zu übertragen. Die Schwierigkeit bestand hier geeignete Anlagen und aussagekräftige Versuche zu finden. Mit den praxisnahen Versuchsdurchführungen in Kombination auch mit videobildbasierten Analysen an 3 Verbrennungslinien, sind erste Ergebnisse zum Verhalten des Brennstoff Mülls im Aufgabebereich einer MVA gewonnen worden. Insbesondere mit den an 2 Anlagen durchgeführten - und in Summe deutlich über 500 Mannstunden dauernden - Versuchen der Variation der Hubposition und der Variation der Hublänge konnten viele Erkenntnisse erlangt werden, die in die Aufstellung der Beschickungstheorie unmittelbar eingeflossen sind. Insbesondere das Wissen über das Reagieren der Anlage bei Veränderung der Hublänge oder Hubposition ist wertvoll und auch auf andere Anlagen übertragbar.

Um während den Versuchsreihen das gesammelte und erlernte Gedankengut in eine Simulation bzw. Auslegung einer Müllverbrennungsanlage zu vereinen, wurde zuerst ein evidenzbasierender Ansatz gewählt. Dieser Ansatz kann mit einer normierten Dichte eine MVA gut beschreiben. Anschließend konnte durch die Erkenntnisse der Hublängen- und Kompressionsversuche an der Brennstoffaufgabe im laufenden Betrieb der Vorhub in einzelne Sektionen aufgeteilt werden. Der daraus entstandene geometrisch-physikalische Ansatz ist in der Lage eine Müllverbrennungsanlage bzw. den aufgegeben Brennstoffmassenstrom ausschließlich anhand der Geometrie und den betrieblichen Parametern auszulegen. Zusätzlich kann über die Positionierung des Hubes eine optimale Fahrweise für diese Anlage angegeben werden.

Abschließend konnte durch den Vergleich der beiden Ansätze deren grundsätzliche Korrektheit demonstriert werden. Der evidenzbasierte Ansatz konnte bereits nachweislich dazu verwendet werden, um die notwendige Aufgabegeschwindigkeit vorherzusagen, um einen definierten Brennstoffmassenstrom aufzugeben. Der Algorithmus aus dem geometrischen-physikalischen Ansatz wird im nächsten Schritt in CombAte eingepflegt werden.

8 Ausblick und weitere Vorgehensweise

Alle bisherigen Betrachtungen haben sich ausschließlich auf den Vorgang bei der Beschickung mit Brennstoff bezogen. Im Sinne einer vollumfänglichen Betrachtung - vom Brennstoff zur Schlacke - muss künftig auch noch der Brennstoffmassenstrom auf dem Rost bestimmt werden. Dies wird dadurch erschwert, da der Brennstoff - anders als beim Beschickvorgang - den üblichen Prozessschritten bei der Verbrennung ausgesetzt ist. Auf diese Prozessschritte wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen, sie können u.a. in [xx] und [xx] nachgelesen werden.

Bei den Betrachtungen an der Brennstoffaufgabe waren es noch mechanisch-physikalische Faktoren (Kompression, Elastizität und Verhakung) die zu einer Volumen- bzw. Dichteänderung bei gleichbleibendem Brennstoffmassenstrom führen. Sobald sich der Brennstoff auf dem Rost befindet, treten erfolgt die Änderung (=Abnahme) des Brennstoffmassenstrom und die damit verbundenen Änderungen von Dichte und Volumenstrom hauptsächlich durch thermo-chemische Vorgänge die in der Feuerung ablaufen (Brennstoffumsatz).

8.1 Feuerleistungsregelung

Gegenwärtig liegt ein Entwicklungsschwerpunkt bei der Entwicklung und Optimierung der Prozessführung in der Feuerung - den so genannten Primärmaßnahmen, mit den Zielen:

- Schadstoffe und Emissionen nicht nur durch Sekundärmaßnahmen, sondern bereits im Vorfeld durch Primärmaßnahmen zu minimieren,
- die Abgasmassenströme und damit die Schadstofffrachten und damit die Rauchgasreinigungsanlagen zu verkleinern,
- die Energienutzung und somit die Effizienz zu verbessern,
- die Reststoffeigenschaften positiv zu beeinflussen.

Zu den verfahrenstechnischen Primärmaßnahmen zählen:

- Feuerraumgeometrie bezüglich Rauchgasführung und Durchmischung
- Verbrennungsroste für gleichmäßiges Müllbett mit beeinflussbarer Transport- und Schürwirkung sowie detailliert regelbarer Beschickung Primärluft-, Unterwindmenge sowie deren Verteilung und Temperatur
- Lagen, Mengen, Verteilungen der sonstigen Verbrennungsluft wie Sekundärluft, Tertiär- oder Seitenwandluft
- Feuerungsabhängige Regelbarkeit aller vorhandenen Stellgrößen durch Feuerungsleistungsregelung und grundsätzlicher Automatisierung der Feuerung

Die hohen technischen Forderungen an die thermische Abfallbehandlung sowie die strengen Auflagen bezüglich Emissionen aus Abfallverbrennungsanlagen sowie die heute praktizierbare Datenerfassung und Auswertung mittels moderner Informationstechnologie ermöglichen bzw. bedingen die Automatisierung der thermischen Abfallbehandlung [7]. Ein wesentlicher und zentraler Bestandteil in der Automatisierung einer Müllfeuerung ist somit die Feuerungsleistungsregelung (FLR), die u.a. in der Lage sein muss:

- Eine gleichmäßige und kontrollierte Wärmeentbindung - unter Einhaltung aller gesetzlichen Emissionswerte - sicherzustellen, denn diese Art der Wärmeentbindung ist Voraussetzung für eine effiziente und emissionsarme Verbrennung.

- Die Feuerungsleistung konstant an der oberen Grenze bzw. am gewünschten Wert zu halten, denn der Mülldurchsatz - als aktivster Posten zur Kostendeckung - sowie die elektrische und thermische Ausbeute, d.h. die Effizienz der Anlage - sind bei einem konstanten Betrieb am höchsten.

Ganz wesentlich ist die Tatsache, dass die FLR die einzige Primärmaßnahme ist, die nach baulicher Fertigstellung der Anlagentechnik übrig bleibt, um dynamisch entscheidenden Einfluss auf die Feuerführung nehmen zu können.

Die grundsätzliche Problematik beim Parametrieren und Optimieren von Feuerungen, insbesondere bei Feuerungen mit inhomogenen und unbekanntem Brennstoffen wie Restabfall ist, dass die einzustellenden Absolutwerte für die Stellglieder vor der Inbetriebnahme der Anlage oder nach einem Umbau nicht bekannt sind. Maximal liegen Erfahrungswerte aus vergleichbaren, baugleichen Anlagen vor bzw. können Richtwerte von Verbrennungsluftmengen grob berechnet werden. Die genaue Anzahl ist abhängig von der Komplexität der Anlage, der Komplexität und dem Komfort der Feuerungsregelung, in welchen Leistungsbereichen sich die Feuerung bewegen soll, der „Schwierigkeit“ des Brennstoffs, speziellen Sonderzuständen (Klärschlamm etc.) u.v.m. Die Anzahl der einzustellenden Parameter liegt deutlich über 100 und erfolgt ausschließlich aufgrund Erfahrungswerten und empirisch ermittelten Zusammenhängen.

Die dem vorliegenden Bericht zugrundeliegende Idee soll sein, dass die Parameter einer Feuerungsregelung durch entsprechende Modellierung, bereits vor baulicher Fertigstellung einer Anlage vorbelegt werden können. Diese Werte sollen nicht nur vorbelegt werden können, sondern die Reglerparameter sollen auch voreingestellt und vor allem bereits grob optimiert werden. Ziel soll sein, mit einem bereits grundsätzlich funktionierenden Parametersatz für die Feuerung und die Feuerungsregelung in die Inbetriebnahme zu starten. Es sollen die Zeiträume des „Ausprobierens“ so kurz wie möglich gehalten werden und das Risiko von falschen Einstellungen so gering wie möglich. Erste Ansätze zu einer Vorab-Parametrierung der FLR durch die Kopplung zu CombAte wurden bereits in [25] und [26] beschrieben.

In weiterer Folge sollen dadurch die Inbetriebnahme- und Optimierungszeiten verkürzt werden. Auch in Bezug auf die Qualität der Parameter soll sich das Vorhaben positiv auswirken, weil in gewisser Weise mit sensiblen Parametern (Proportional-, Integral- und Differential-Anteilen von Regler) „experimentiert“ werden kann - was bei laufender Anlage nicht oder nur in sehr engen Grenzen möglich ist. Jede falsch gewählte Reglereinstellung kann unter Umständen zu ungünstigen und gefährlichen Betriebszuständen wie z.B. Überschüttung des Rostes, Emissionswertüberschreitungen, Einsatz von Stützbrennstoffen usw. führen. Aus diesem Grund kann bei der Regleroptimierung an laufender Anlage nur Schritt für Schritt u. v. a. sehr konservativ vorgegangen werden - was den hohen Zeitaufwand erklärt. Ob ein neuer bzw. geänderter Parameter eines Reglers der auf Rost oder Beschickung wirkt, tatsächlich den gewünschten Effekt erwirkt, zeigt sich in der Praxis oft erst nach Tagen.

Ein erster Schritt ist die im Abschnitt 6.1 ermittelte Gleichung zur Bestimmung von $\rho_{eff, \frac{h_{AM}}{h_{AS}}}$. Mittels dieser Gleichung kann auch eine voraussichtlich benötigte Doppelhubzahl der Brennstoffbeschickung berechnet werden. Durch Umstellen der Gleichung nach $\phi n_{dH(x)}$ kann die notwendige Doppelhubzahl der Brennstoffaufgabe berechnet werden:

$$\phi n_{dH(x)} = \dot{V}_{dH, eff, \frac{h_{AM}}{h_{AS}}} \left[b_{AS} \cdot l_{Hub AS, eff, tats.} \cdot \left(\frac{h_{AM}^2 - h_{AM} \cdot h_{AS}}{2 \cdot h_{AS}} \right) \right]^{-1}$$

Zur Validierung der berechneten Dichte $\rho_{eff, \frac{h_{AM}}{h_{AS}}}$ wird an 5 Verbrennungslinien (UK2VL1, DE32VL1, DE32VL2, PL1VL1, PL1VL2) welche sich zum Zeitpunkt der Berechnung im Bau bzw. Umbau befanden, eine einzustellende Doppelhubzahl der Brennstoffaufgabe berechnet. Von diesen Verbrennungslinien existierten noch keine Betriebsdaten, jedoch die zur Berechnung notwendigen, konstruktiven Merkmale und die

verfahrenstechnischen Auslegungsparameter. Nach der Inbetriebnahme der jeweiligen Verbrennungslinie wird der im Vorfeld berechnete Wert mit dem gemessenen verglichen.

Der durchzusetzende Brennstoffmassenstrom wird aus dem Feuerleistungsdiagramm entnommen. Als Randbedingung gilt, dass sich der Brennstoffmassenstrom mit dem Heizwert ändert, wenn die Brennstoffwärmeleistung konstant bleibt. Zur Validierung wird über eine Heizwertberechnung sichergestellt, dass der aus dem FLD entnommene Brennstoffmassenstrom auch zu dem real an der Anlage durchgesetzten Brennstoffmassenstrom passt. Die Brennstoffmassenströme sind nur bei identischer Brennstoffwärmeleistung vergleichbar, das heißt, die eingestellte Soll-Dampfleistung muss für den Zeitraum der Analyse mit den aus dem FLD herangezogenen Daten übereinstimmen.

Mit $\dot{V}_{dH, eff, \frac{h_{AM}}{h_{AS}}} = \phi \dot{m}_{Kran(x)} \cdot \rho_{eff, \frac{h_{AM}}{h_{AS}}}$ ergibt sich für die Berechnung der notwendigen Doppelhubanzahl:

$$\phi n_{dH(x)} = \phi \dot{m}_{Kran(x)} \cdot \rho_{eff, \frac{h_{AM}}{h_{AS}}} \left[b_{AS} \cdot l_{Hub AS, eff., tats.} \cdot \left(\frac{h_{AM}^2 - h_{AM} \cdot h_{AS}}{2 \cdot h_{AS}} \right) \right]^{-1}$$

Es ergeben sich folgende Ergebnisse für die Verbrennungslinien:

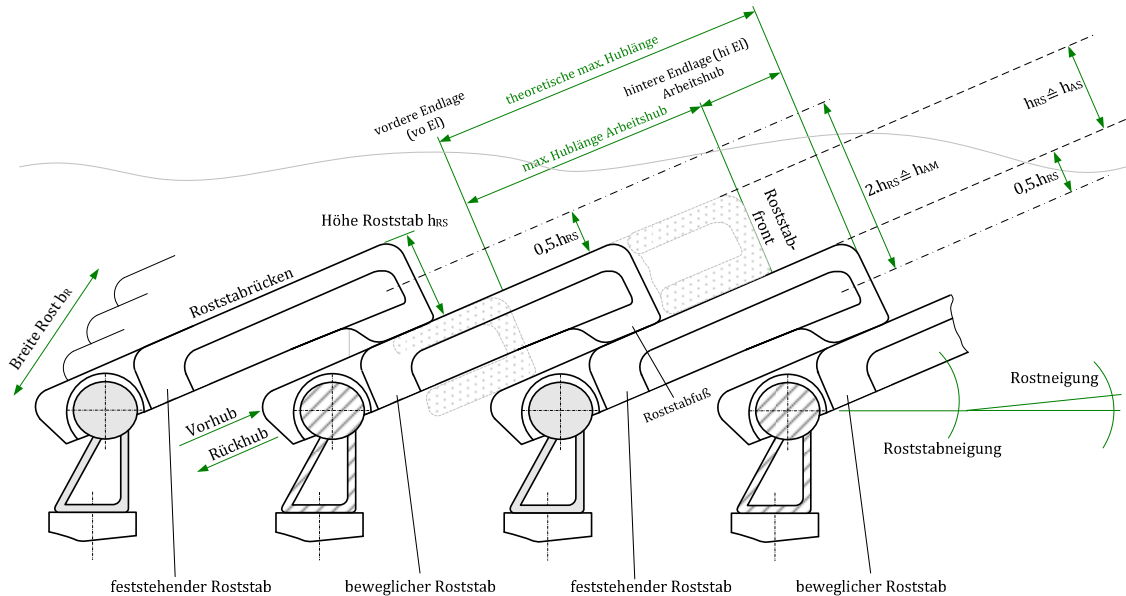
	Verbrennungslinie				
	UK2VL1	DE32VL1	DE32VL2	PL1VL1	PL1VL1
theoretischer Brennstoffdurchsatz in [t/h] beim Auslegungsheizwert	31,10	15,01	15,01	12,70	12,70
Auslegungsheizwert beim Brennstoffdurchsatz [MJ/kg]	9,50	10,56	10,56	8,50	8,50
tatsächlicher Brennstoffdurchsatz in [t/h]	31,45	15,55	15,75	14,59	14,68
tatsächlicher Heizwert [MJ/kg]	9,35	10,39	10,26	7,06	7,01
berechnete Doppelhubanzahl [Dh/h]	7,0	7,1	7,1	10,0	10,1
tatsächlich gefahrene Doppelhubanzahl [Dh/h]	7,1	7,3	7,1	10,8	11,1
Fehler [%]	-2,1%	-2,9%	0,3%	-7,0%	-9,0%

Es zeigt sich, dass die berechneten Doppelhubanzahlen mit den tatsächlich gefahrenen Doppelhubanzahlen gut übereinstimmen.

Somit konnte nachgewiesen werden, dass auch das berechnete Volumen $\dot{V}_{dH, eff, \frac{h_{AM}}{h_{AS}}}$, insbesondere jedoch die berechnete Dichte $\rho_{eff, \frac{h_{AM}}{h_{AS}}}$ mit den realen Verhältnissen übereinstimmt.

8.2 Ausblick: Rost - Geometrie & Kennzahlen

Für die Beschreibung des Transportes auf dem Rost sollen soweit möglich Analogien zu den Parametern der Aufgabevorrichtung gesucht werden, da auch der Brennstofftransport auf dem Rost grundsätzlich den identischen physikalischen Rahmenbedingungen unterliegt.



Die zum Aufgabebereich äquivalenten Parameter sind in obiger Skizze dargestellt. Die Höhe des Roststabes h_{RS} entspricht der Höhe des Aufgabeschiebers h_{AS} . Da sich feststehende und bewegliche Roststabsreihen abwechseln, muss davon ausgegangen werden, dass grundsätzlich der gesamte Brennstoffmassenstrom über den Rost – also auch über die feststehenden Roststabsreihen – transportiert wird. Deshalb muss jeweils die Hälfte der Roststabhöhe des einem beweglichen Roststabs vor- oder nachgelagertem feststehenden Roststabs dem Äquivalent zur Höhe des Aufgabemaßes h_{AM} entsprechen, d.h. es gilt: $2 \cdot h_{RS} = h_{AM}$.

Es ist bekannt, dass die Dichte des gegenständlichen Brennstoffs (siehe Abschnitt 2.2) über die Rostlänge zunimmt während er „durch“ die Phasen Trocknung, Entgasung, Verbrennung transportiert wird. In [19] wurde die Dichte der (trockenen) Schlacke bestimmt. Sie liegt bei $\rho_{Schlacke, tr.} = 550 \frac{kg}{m^3}$. Das bedeutet, die Dichte erhöht sich von der Dichte im Aufgabebereich $\rho_{eff} \cdot \frac{h_{AM}}{h_{AS}}$ über die Rostlänge hin bis zu $\rho_{Schlacke, tr.}$ kurz vor dem Schlackeabwurf. Für die weiteren Betrachtungen – insbesondere zur Berechnung der Transportvorgänge auf dem Rost – scheint es daher notwendig, den Dichteverlauf über die Rostlänge bestimmen zu können. Hierfür wurden exemplarisch an DE20VL1 die vorherrschenden Dichten an definierten Positionen rechnerisch bestimmt. Voraussetzung hierfür ist das Vorliegen von Messwerten zur Schichthöhe des Brennbetts an den definierten Positionen. Dies ist an Verbrennungslinie DE20VL1 gegeben.

Als Ausblick soll an dieser Stelle erwähnt sein, dass es noch folgende Themenkomplexe abzuarbeiten gilt, bevor eine durchgängige Kenntnis „vom Brennstoff zur Schlacke“ tatsächlich gegeben ist:

- Schichthöhenmessungen des Brennbetts im laufenden Anlagenbetrieb
- Versuche mit Variation Hublänge und Hubposition der Rostzonen an mindestens 2 Anlagen analog zum Abschnitt 5.3.

- Integration Verbrennungsrechnung um den Brennstoffumsatz zu bestimmen und um mit dieser Erkenntnis dann den Massenstrom auf dem Rost an jeder beliebigen Stelle berechnen zu können.
- Temperaturverläufe im Brennbett messen im laufenden Betrieb.
- Fehlerbetrachtung, Fehlerfortpflanzungsanalyse.

8.3 Combate

Das in [9] vorgestellte Simulationsprogramm CombAte weist in Bezug auf den Feststofftransport noch Defizite auf. Ein praxistgerechter Ansatz zur Modellierung der Brennstoffbeschickung für eine Implementierung in CombAte konnte in den vorangegangenen Kapiteln erarbeitet werden. Für den Rost steht dies noch aus.

Auch muss erst noch der entwickelte Algorithmus in CombAte implementiert werden und anschließend durch eine Variation an Konfigurationen validiert werden.

Die in [25] und [26] begonnene Kopplung zwischen CombAte und der Feuerungsleistungsregelung muss noch ausgebaut und optimiert werden.

Erst wenn der neu entwickelte Algorithmus im CombAte implementiert ist und die Kopplung zu realen Feuerungsleistungsregelungen aufgebaut ist, kann mit seriösen Validierungen begonnen werden.

9 Literatur

- [1] Stadtwerke Düsseldorf AG, Vereinigte Kesselwerke AG, Ferdinand Lentjes Dampfkessel- und Maschinenbau: Maßnahmen zur Minderung feuerraumseitiger Korrosion; Im Rahmen des „Zukunfts-Investitions-Programms, Dezember 1980 (Förderkennzeichen Bundesministerium für Forschung und Technologie 14 000 27/I); Hauptbericht Phase I und II, Band 1
- [2] Stadtwerke Düsseldorf AG, Vereinigte Kesselwerke AG, Ferdinand Lentjes Dampfkessel- und Maschinenbau: Maßnahmen zur Minderung feuerraumseitiger Korrosion; Im Rahmen des „Zukunfts-Investitions-Programms, Dezember 1980 (Förderkennzeichen Bundesministerium für Forschung und Technologie 14 000 27/I); Hauptbericht Phase I und II, Band 2
- [3] Stadtwerke Düsseldorf AG, Vereinigte Kesselwerke AG, Ferdinand Lentjes Dampfkessel- und Maschinenbau: Maßnahmen zur Minderung feuerraumseitiger Korrosion; Im Rahmen des „Zukunfts-Investitions-Programms, Dezember 1980 (Förderkennzeichen Bundesministerium für Forschung und Technologie 14 000 27/I); Hauptbericht Phase I und II, Band 3
- [4] Stadtwerke Düsseldorf AG, Deutsche Babcock Anlagen AG: Maßnahmen zur Minderung feuerraumseitiger Korrosion; Im Rahmen des „Zukunfts-Investitions-Programms, Dezember 1982 (Förderkennzeichen Bundesministerium für Forschung und Technologie 14 000 27/I); Hauptbericht Phase III, Band 3
- [8] Reimann, D. O.: Rostfeuerungs-systeme und Möglichkeiten der Emissionsminderungen durch Feuerleistungsregelungen. In: Müllverbrennung und Umwelt 5 (ISBN 3-924511-56-X), K. J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.), EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik, Berlin, 1991, S.40 - 44
- [9] Warnecke R., Wirtz S., Marzi Th., Weghaus M.: Brennstoff- und Rostmodell zur Beschreibung der Vorgänge im Feuerraum - GKS-Feuerungsmodell. VDI Wissensforum: Seminar „Beläge und Korrosion, Verfahrenstechnik und Korrosion in Großfeuerungsanlagen, Frankfurt am Main, 2007
- [10] Weghaus M., Warnecke R.: Beschreibung der Verbrennungsprozesse auf dem Rost. Internes Papier der GKS Schweinfurt GmbH, www.gks-sw.de, Zugriff am 17.5.2011
- [5] Reimann, D.O.: Zeitgemäße Restabfallverbrennung – Stand der Technik – Möglichkeiten – Grenzen; Bamberg, 1993, Schriftenreihe Umweltschutz.
- [6] Warnecke, R., Nordsieck, H.: Schlussbericht EU 14 „Array“ – Korrosion in Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung – Entwicklung eines Online-Sensor-Arrays zur Erfassung von Zuständen erhöhter Korrosion, Oktober 2008 (erstellt für Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz).
- [7] Internet-Seite, Zugriff am 31.05.2016: http://www.lfu.bayern.de/abfall/definition_siedlungs_produk-tionsabfaelle/index.htm
- [8] Wolf, Ch.: Erstellung eines Modells der Verbrennung von Abfall auf Rostsystemen unter besonderer Berücksichtigung der Vermischung - ein Beitrag zur Simulation von Abfallverbrennungsanlagen. Dissertation an der Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Maschinenwesen, Campus Essen, 2005.
- [11] Thomanetz, E.: Das Märchen von der repräsentativen Abfallprobe. In: Müll und Abfall Nr. 3, 2002.
- [12] Rotter, S. et. al.: Abfallanalysen - Anwendung, Probleme und neue Wege für die Praxis. In: Müll und Abfall Nr. 9, 2003.
- [13] Seeger, H., Urban A.: Charakterisierung des Abbrandverhaltens fester Brennstoffe. In: Urban, A., Bilitewski, B., Faulstich, M. [Hrsg.]: Thermische Abfallbehandlung 9, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik der Universität Kassel, Kassel, 2004.

- [14] Seeger, H. et. al.: Weiterentwicklung der Online-Heizwertbestimmung in kommunalen Müllverbrennungsanlagen. N.N.
- [15] Aleßio, H. P.: Feuerungsauslegung. In: VDI-Wissensforum Seminar „Rostfeuerung und Naturumlaufkessel“, 10.09. - 11.09.2013, Mannheim.
- [16] Krüll, F.: Verfahren zur numerischen Simulation von Müllrostfeuerungen, Dissertation an der Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Maschinenbau, Bochum, 2001
- [17] Barghoorn, M. et. al.: Berliner Hausmüll Analyse 1977/78, Umweltforschungsplan des BMI, Abfallwirtschaft, Forschungsbericht 103 05 008/02 im Auftrag des Umweltbundesamtes, 1979.
- [18] Rückert, F. U.: Simulation von Festbettreaktoren zur technischen Verbrennung mit der Euler/Euler-Methode, Dissertation an der Universität Stuttgart, Fakultät Maschinenbau, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Stuttgart, 2005
- [19] Häring, D.: Feststofftransport und Auswirkung auf den Stoffumsatz bei Rostfeuerungen - Feststofftransport bei Rostfeuerungen. Diplomarbeit an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt, Abteilung Schweinfurt, Fakultät Maschinenbau, SS 2012.
- [20]: Vertrauliche Informationen zur Auslegung von Anlagen eines namhaften Anlagenbauers, per E-Mail, 21.08.2014.
- [21] Berthold, E., Hoeß, P.: Untersuchung des Restabfalls aus Haushalten in der Stadt Schweinfurt (Ziel-2-Gebiet). FABION GbR, Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Josef-Vogl-Technikum, Augsburg, 2007.
- [22] Reimann, D. O.; Hämmerli-Wirth, H.: Verbrennungstechniken Bedarf - Entwicklung - Berechnung - Optimierung. Teil I: AbfallwirtschaftsJournal 4(1992)8. Teil II: AbfallwirtschaftsJournal 4(1992)12
- [23] Reimann, D. O.: Zeitgemäße Abfallverbrennung. Stand der Technik - Möglichkeiten - Grenzen. Schriftenreihe: Umweltschutz. Bamberg. 1993
- [24] Schulze, D.: Pulver und Schüttgüter - Fließeigenschaften und Handhabung, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014, ISBN 978-3-542-53884-1
- [25] Zwiellehner M. H., Warnecke, R., Weghaus, M., Müller, V.: Vorkonfektionierung und Optimierung der Feuerungsregelung durch bidirektionale Kopplung an ein Feuerungsmodell. In: 10. VDI-Fachkonferenz: Feuerung und Kessel - Beläger und Korrosion - in Großfeuerungsanlagen, Kassel, 07.06. - 08.06.2011.
- [26] Zwiellehner M. H., Warnecke, R., Weghaus, M., Müller, V.: Kopplung einer modernen Feuerungsregelung mit einem modellbasierten System. In: VDI-Wissensforum: Seminar „Beläge und Korrosion, Verfahrenstechnik und Konstruktion in Großfeuerungsanlagen“, Oberhausen, 12.06. - 13.06.2008
- [27] Internet-Seite, Zugriff am 31.05.2016: <http://www.matressource.de/projekte/vokos/>

10 Anhang

10.1 Standortauswahl

Standort	Standort lfd. Nr.	Land	Anz. VL	Typ Feuerung	Kriterium Nr.							
					1	2	7	5	3	4	6	8
DE1	1	DE	2	W	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
CH1	2	CH	1	R	NEIN	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA
CH1		CH	1	R	NEIN	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA
CH1		CH	1	R	NEIN	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
CH1		CH	1	R	JA	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA
DE2	3	DE	4	W	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
DE2		DE	1	V	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE3	4	DE	3	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE4	5	DE	2	V	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
CH2	6	CH	1	V	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
CH2		CH	1	V	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
CH2		CH	1	V	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
PL1	7	PL	2	V	NEIN	NEIN	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN
NL1	8	NL	2	V	JA	NEIN	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
NL2	9	NL	1	V	JA	NEIN	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
NL2		NL	1	H	JA	NEIN	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE5	10	DE	4	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN
CH3	11	CH	1	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
DE6	12	DE	1	W	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
SE1	13	SE	2	V	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN
SE1		SE	2	R	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE7	14	DE	2	V	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
SE2	15	SE	2	R	JA	NEIN	NEIN	NEIN	JA	JA	JA	NEIN
DE8	16	DE	1	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE8		DE	1	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE8		DE	1	W	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE9	17	DE	2	V	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	JA
DE10	18	DE	2	R	JA	JA	JA	JA	NEIN	NEIN	JA	JA
DE10		DE	1	H	JA	JA	JA	JA	NEIN	NEIN	JA	JA
UK1	19	UK	1	V	JA	JA	NEIN	JA	NEIN	NEIN	JA	JA

DE11	20	DE	1	R	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN	JA	NEIN
DE11		DE	1	V	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN	JA	NEIN
DE12	21	DE	4	W	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
DE13	22	DE	1	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
DE13		DE	1	V	JA	JA	NEIN	NEIN	JA	JA	JA	JA
LU1	23	LU	1	V	JA	NEIN	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
CH4	24	CH	2	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
CH5	25	CH	2	V	NEIN	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	JA
CH4		CH	1	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
DE14	26	DE	2	V	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	JA
DE14		DE	1	V	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	JA
SE3	27	SE	2	R	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE15	28	DE	2	R	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE15		DE	2	R	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN
CH6	29	CH	1	R	JA	NEIN	JA	JA	NEIN	NEIN	JA	NEIN
CH6		CH	1	R	JA	NEIN	JA	JA	NEIN	NEIN	JA	NEIN
DE16	30	DE	2	W	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	JA
DE16		DE	1	W	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
DE16		DE	1	W	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
FI1	31	FI	1	V	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE17	32	DE	2	V	JA	JA	JA	JA	NEIN	NEIN	JA	NEIN
UK2	33	UK	1	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
NL3	34	NL	3	W	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
NL3		NL	3	W	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE18	35	DE	2	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
DE19	36	DE	1	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
DE20	37	DE	3	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
DE21	38	DE	1	V	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE21		DE	1	V	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
CH7	39	CH	2	R	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
DE22	40	DE	2	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
DE23	41	DE	2	R	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
DE24	42	DE	2	V	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE24		DE	1	W	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
AT1	43	AT	1	V	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN

AT1		AT	1	R	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN
AT2	44	AT	2	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
AT3	45	AT	2	V	NEIN	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE25	46	DE	2	K	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN	JA	NEIN
DE26		DE	1	V	JA	JA	NEIN	JA	JA	NEIN	JA	NEIN
DE27	47	DE	3	H	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE27		DE	1	H	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
NL4	48	NL	1	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
NL4		NL	1	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
DE28	49	DE	1	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
DE28		DE	1	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
DE29	50	DE	2	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
DE30	51	DE	2	V	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE30		DE	1	V	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE31	52	DE	2	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
LT1	53	LT	1	V	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	JA
DE32	54	DE	2	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
NL5	55	NL	2	R	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
NL5		NL	1	R	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE32	56	DE	2	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN
CZ1	57	CZ	4	W	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN
IT1	58	IT	2	V	JA	NEIN	JA	JA	NEIN	NEIN	JA	NEIN
IT1		IT	1	V	NEIN	NEIN	JA	JA	NEIN	NEIN	JA	NEIN
DE33	59	DE	3	V	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE34	60	DE	2	R	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA	JA	NEIN
DE35	61	DE	2	W	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN
NL6	62	NL	3	V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN
NL7	63	NL	4	H	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN
NL7		NL	2	H	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN
ES1	64	ES	2	R	JA	JA	JA	JA	NEIN	NEIN	JA	JA

Legende:

V = Vorschubrost

W = Walzenrost

R = Rückschubrost

H = Horizontal-Gegenlauf-Überschubrost

K = Kombi-Rost aus V und R

In der Spalte „Anz. VL“ sind die Anzahl der *baugleichen* Verbrennungslinien am Standort eingetragen. Wird auf eine bestimmte Verbrennungslinie Bezug genommen, so wird diese mit *StandortVLx*, also z.B. *DE20VL3* bezeichnet.

Die Standorte, die alle Kriterien erfüllen, sind farblich markiert. Es sind dies 44 Verbrennungslinien, von denen 26 konstruktiv unterschiedlich sind, die sich wie folgt zusammensetzen:

	Länder:	DE	AT	CH	PL	UK	NL
Typ Feuerung	W	14	-	-	-	-	-
	V	18	2	1	2	1	2
	R	2	-	2	-	-	-
	H	1	-	-	-	-	-
	K	-	-	-	-	-	-

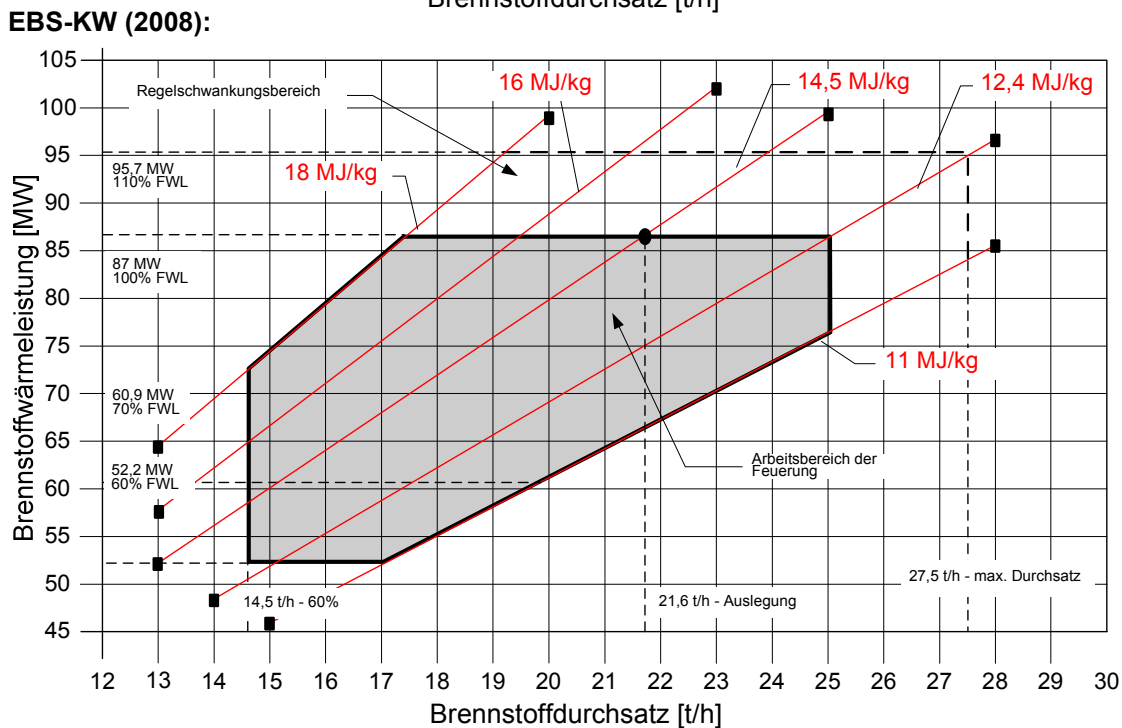
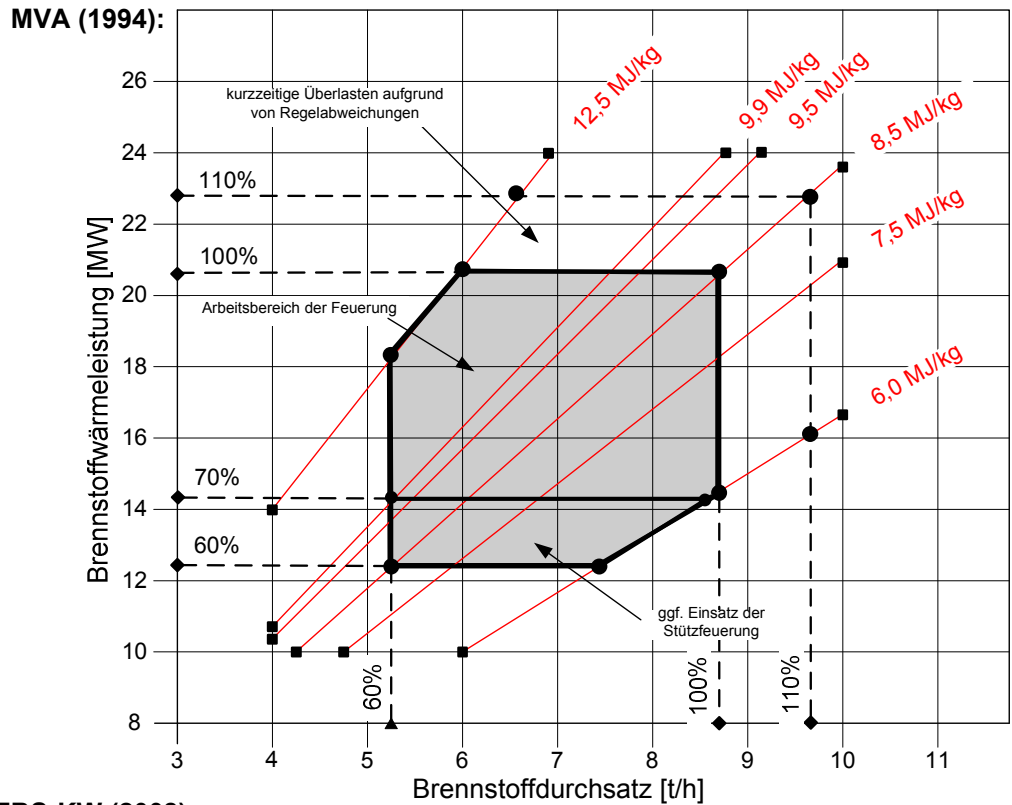
10.2 Betriebsdaten und allgemeine Angaben zur Verbrennungslinie

Bereich	Bereich-Nr.	Datum-Nr.	Klartext	Einheit
Kessel	1	1.1	Frischdampfmenge Istwert (Kessel-Austritt)	[t/h], [Mg/h]
		1.2	Frischdampfmenge Sollwert	[t/h], [Mg/h]
		1.3	Frischdampf Druck (Kessel-Austritt)	[bar]
		1.4	Frischdampf Temperatur (Kessel-Austritt)	[°C]
		1.5	Einspritzmenge(n) 1-n	[t/h], [Mg/h]
		1.6	Stützbrennereinsatz	[l/h], [m ³ /h], [%]
Brennstoff + Transport	2	2.1	Müllaufgabe Weg bzw. Position	[mm], [%]
		2.2	Müllaufgabe Geschwindigkeit	[Hübe / h], [mm/s]
		2.3	Roste Weg bzw. Position, Walzenrost = Drehzahlen	[mm], [%]
		2.4	Roste Geschwindigkeit, Walzenrost = Drehzahlen	[Hübe / h], [mm/s]
		2.5	Müllmenge Stundenwert	[t/h], [Mg/h]
		2.6	Heizwert	[kJ/kg], [MJ/kg]
Verbrennungsluft	3	3.1	Primärluft Mengen 1-n	[Nm ³ /h]
		3.2	Primärluft Druck nach LuVo bzw. vor Rost	[mbar]
		3.3	Primärluft Temperatur nach LuVo bzw. Rost	[°C]
		3.4	Sekundärluft Mengen 1-n	[Nm ³ /h]

		3.5	Temperatur Sekundärluft (vor Eindüsung)	[°C]
		3.6	Tertiärluft Mengen 1-n	[Nm ³ /h]
		3.7	Temperatur Tertiärluft (vor Eindüsung)	[°C]
		3.8	ReziGas Mengen 1-n	[Nm ³ /h]
		3.9	Temperatur ReziGas (vor Eindüsung)	[°C]
		3.10	Primärluft Druck unter Zone 1	[mbar]
Rauchgasweg	4	4.1	RG-Temperatur Feuerraum Kesseleintritt	[°C]
		4.2	RG-Temperatur Kesseldecke (BlmSchV-Messstelle)	[°C]
		4.3	RG-Temperatur vor End-Überhitzer-Paket	[°C]
		4.4	RG-Temperatur Kessel-Ende bzw. Kessel-Austritt	[°C]
		4.5	O ₂ -Gehalt am Kessel-Austritt; trocken oder feucht	[Vol.-%]
		4.6	CO-Gehalt am Kessel-Austritt	[mg/Nm ³]
		4.7	RG-Volumenstrom vor/hinter "x"	[Nm ³ /h]
		4.8	RG-Volumenstrom vor Kamin	[Nm ³ /h]
		4.9	RG-Feuchte Kessel-Austritt	[%]
		4.10	Unterdruck Feuerraum 1. Zug	[mbar]

	Klartext	Einheit
Linie ...	Abzehrrate an den Verdampferwänden?	[mm/1000*h]
	Abzehrrate an den Endüberhitzern?	[mm/1000*h]
	Jahresdurchsatz pro Verbrennungslinie	[t], [Mg]
	Jahresheizwert	[kJ/kg], [MJ/kg]
	Jahresbetriebsstunden	[h]
	Jahresdampfmenge	[t], [Mg]
	Jahresmenge an Schlacke (ggf. Angabe wie viel Metalle extrahiert wurden)	[t], [Mg]
	Jahresmenge an Flugasche (aus Kessel und Vorentstaubung)	[t], [Mg]

10.3 Feuerungsleistungsdiagramme



10.4 Prüfung wirksame Hublänge Aufgabestößel

VL	aktive Hublänge Arbeits-hub [mm] $l_{Arbeitshub}$ $l_{Arbeitshub,UK}$	aktive Hublänge Arbeits-hub [mm] $l_{Arbeitshub,OK}$	effektiv wirksame Hublänge [mm] $l_{Hub,eff.}$ $l_{Hub,eff.,UK}$	effektiv wirksame Hublänge [mm] $l_{Hub,eff.,OK}$	effektiv wirksame Hublänge tatsächlich [mm] $l_{Hub,eff.,tats.}$ $l_{Hub,eff.,UK,tats.}$	effektiv wirksame Hublänge tatsächlich [mm] $l_{Hub,eff.,OK,tats.}$	Wirkungs- grad Aufgabe- stößel [%] $\eta_{Stößel}$ $\eta_{Stößel,UK}$	Wirkungs- grad Aufgabe- stößel, OK [%] $\eta_{Stößel,OK}$
DE20VL1	1050	-			1050	-	100	-
DE20VL2	1050	-			1050	-	100	-
DE20VL3	1050	-			1050	-	100	-
DE12VL1	1650	-			1650	-	100	-
DE12VL2	1650	-			1650	-	100	-
DE12VL3	1650	-			1650	-	100	-
DE12VL4	1650	-			1650	-	100	-
DE1VL1	1560	-			1560	-	100	-
DE1VL2	1560	-			1560	-	100	-
DE16VL1	2150	-			2043	-	95	-
DE16VL2	2150	-			2043	-	95	-
DE16VL3	2120	-			1590	-	75	-
DE16VL4	1620	-			1620	-	100	-
DE2VL1	1170	-			1170	-	100	-
DE2VL2	1250	-			1250	-	100	-
DE2VL3	1350	-			1350	-	100	-
DE2VL4	1350	-			1350	-	100	-
DE23VL1	300	450			300	450	100	100
DE23VL2	300	450			300	450	100	100

DE18VL1	460	760			460	760	100	100
DE18VL2	460	760			460	760	100	100
AT2VL1	575	-			575	-	100	-
AT2VL2	575	-			575	-	100	-
DE13VL1	1250	-			875	-	70	-
DE13VL2	800	-			680	-	85	-
CH7VL1	300	-			300	-	100	-
CH7VL2	300	-			300	-	100	-
CH3VL2	950	-			950	-	100	-
CH5VL1	800	-			800	-	100	-
CH5VL2	800	-			800	-	100	-
NL4VL1	730	-			730	-	100	-
DE28VL3	885	-			885	-	100	-
DE28VL4	1100	-			1100	-	100	-

Anmerkung: Zur Vereinfachung wurde eine effektiv wirksame Hublänge $l_{Hub,eff.}$ nicht angegeben, sondern ausschließlich die für die weitere Berechnung relevante tatsächliche, effektiv wirksame Hublänge $l_{Hub,eff.,tats.}$ bzw. $l_{Hub,eff.,UK,tats.}$ und $l_{Hub,eff.,OK,tats.}$ ·