

Forschungsthema: “Optimierung der Setzmachinenteknik“

Einleitung

Das nassmechanische Sortieren von Stoffen nach ihren spezifischen Dichten mit Setzmaschinen, auch Nasssetzen genannt, ist ein seit Jahrhunderten bekanntes Aufbereitungsverfahren. Eingesetzt wird es in vielen Bereichen, vorzugsweise aber in der Kohle-, Erz- und Kiesaufbereitung.

Gerade in den letzten Jahren gewinnt dieses Verfahren zunehmend an Bedeutung. Als Gründe dafür sind vor allem die Verknappung und Verteuerung der Rohstoffe sowie immer strenger werdende Gesetze im Bereich des Umweltschutzes zu nennen, wodurch die Rückgewinnung von Wertstoffen durch Trennung von Hausmüll, Schrott, Schutt usw., interessant und profitabel wird. Dadurch erweitert sich die Palette neuer Anwendungsgebiete für das nassmechanische Dichtesortieren ständig. Sie reicht mittlerweile von der Aufbereitung kontaminierter Böden über das Bauschuttrecycling bis zur Abtrennung von Polystyrol aus geschredderten Haushaltsgeräten und der Aufbereitung von Bleiakuschrott [1-3].

Steigende Ansprüche an die Sortierergebnisse führten in jüngerer Vergangenheit dazu, dass die Setzmaschinen technisch kontinuierlich verbessert wurden. Die Entwicklung der Methoden zur verfahrenstechnischen Auslegung dieser Maschinen stagniert allerdings. Zwar versuchen Hochschulen und Forschungsinstitute bereits seit Jahrzehnten den Nasssetzprozess mathematisch zu beschreiben, jedoch ist dies, trotz vielversprechender Ansätze, bis heute nicht in der Weise gelungen, dass aus den gewonnenen Erkenntnissen ein Konzept zur Auslegung von Setzmaschinen abgeleitet werden kann.

Die Hersteller von Setzmaschinen sind aber mit dem Problem konfrontiert, dass sie für ihr Produkt die maschinen- und verfahrenstechnische Gewährleistung übernehmen müssen. Sie benötigen eine Basis, die verfahrenstechnische Auslegungen für definierte Aufgabenstellungen ermöglicht. Hierzu dienen i.d.R. Erfahrungen aus der Praxis und Untersuchungsberichte, in denen z.B. dokumentiert ist, welchen Einfluss verschiedene Parameter wie Partikelgröße, Partikelform, Dichte usw., auf das verfahrenstechnische Ergebnis haben. Häufig sind die Aussagen in solchen Unterlagen jedoch nur unzureichend quantifiziert, manchmal sogar nur qualitativ. Erfahrung und fundierte Kenntnisse über die Hintergründe der verfahrenstechnischen Prozesse ermöglichen es dem Fachmann aber trotzdem, eine mehr oder weniger genaue quantitative Aussage über die Größe und Konfiguration der auszulegenden Maschine zu machen. Fehlt allerdings ein gültiges mathematisches Modell, dann besteht die Gefahr, dass unterschiedliche Fachleute, trotz gleicher, aber interpretierbarer Informationen, zu unterschiedlichen Ergebnissen gelangen. Ohne Modell sind neu hinzugewonnene Erkenntnisse nur schwer zu integrieren. Das hat u.a. zur Folge, dass die Möglichkeiten vorhandener Setzmaschinen nicht optimal genutzt und Weiter- bzw. Neuentwicklungen nicht so gezielt betrieben werden, wie dies auf Basis einer brauchbaren mathematischen Beschreibung möglich wäre.

Zielstellung des Projektes

Der unzureichende Wissensstand über das nassmechanische Dichtesortieren und die zunehmende Bedeutung dieses Verfahrens sind für das its Institut für Technische Dokumentation, Schulung und Beratung GmbH, die Bauhaus-Universität Weimar und das iff Institut für Fertigteiletechnik und Fertigungsbau Weimar e.V. Anlass zu einer vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Rahmen des Förderprogramms „Innovationskompetenz“ geförderten Forschungsarbeit mit folgenden Entwicklungszielen:

- Entwicklung eines mathematischen Modells zur Auslegung von Nasssetzmaschinen

Damit eine optimale Abstimmung von Setzmaschinen auf die jeweilige Aufgabenstellung und eine gezielte Weiterentwicklung ermöglicht werden, soll ein mathematisches Modell zur Beschreibung des Nasssetzprozesses auf Basis theoretischer Betrachtungen und empirischer Untersuchungen entwickelt werden.

- Codierung des mathematischen Modells in einer Computersprache

Um die Arbeit mit dem mathematischen Modell zu erleichtern, soll es in Form eines Computerprogramms aufbereitet werden.

- Entwicklung einer optimierten Nasssetzmaschine

Auf Basis der im Projektverlauf gewonnenen Erkenntnisse soll eine optimierte Setzmaschine zur nassmechanischen Sortierung von Stoffen nach ihren spezifischen Dichten entwickelt werden. Ziele sind Verbesserung der Trennergebnisse sowie Senkung der Investitions- und Betriebskosten.

Grundsätzlicher Aufbau und Funktionsweise von Nasssetzmaschinen

Nasssetzmaschinen bestehen aus einem Setzfaß mit einem geneigten Setzgutträger (in der Regel ein Siebboden aus Kunststoff), einer Einrichtung zur Flüssigkeitspulsation (mechanischer Hub, Luftpulsation) und einem Austrag (Schieber, Schwenkbett, Wehr, Zellenradschleuse). In Abb. 1 ist beispielhaft eine Nasssetzmaschine dargestellt, deren Flüssigkeitspulsation durch Auf- und Abbewegung eines beweglichen, mit Wasser gefüllten Unterkastens, der gegen das statische Setzfaß mit Membranen abgedichtet ist, realisiert wird.

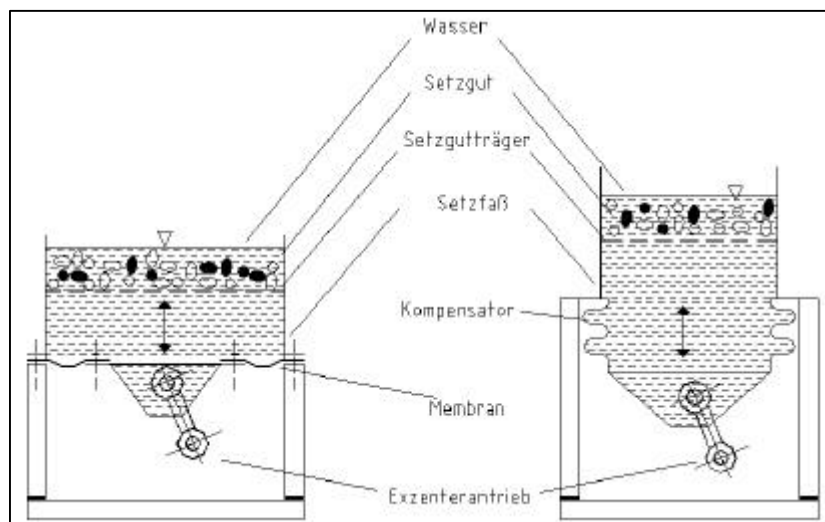


Abb. 1: Prinzip einer Nasssetzmaschine [4]

Es ist bekannt, dass eine Partikelschicht unter der Wirkung eines aufströmenden Fluids aufgelockert wird. Es ist auch bekannt, dass eine aufgelockerte Schicht, bei der die gegenseitige Partikelbeeinflussung weitgehend aufgehoben ist, einem stabilen Zustand zustrebt. Bei gleicher Partikelgröße bedeutet das, dass eine Schichtung nach der Partikeldichte erfolgt. Beim Schwimm-Sink-Scheiden wird dieser Effekt genutzt. Beim Setzprozess arbeitet man mit einer pulsierenden Strömung bzw. einem pulsierenden Aufstrom des Trägermediums in der Partikelschicht. Das hat sich für die Dichtentrennung auch am günstigsten erwiesen. Das zu sortierende Gut wird auf einen Setzgutträger aufgegeben, der aus einem Rost oder Siebelag besteht. Beim Setzprozess strömt das Fluid periodisch auf und ab, wodurch die Gutschicht bzw. das Setzbett infolge der pulsierenden Fluidströmung jeweils kurzzeitig aufgelockert wird. In dieser Auflockerungsphase können sich die Teilchen relativ zueinander verschieben, wobei sich die Partikel mit geringeren Dichten über denen mit der höheren Dichte einordnen. Die sich so ausgebildete Schichtenfolge kann dann mit Hilfe von Austragsvorrichtungen oberhalb des Setzgutträgers ausgetragen werden [5].

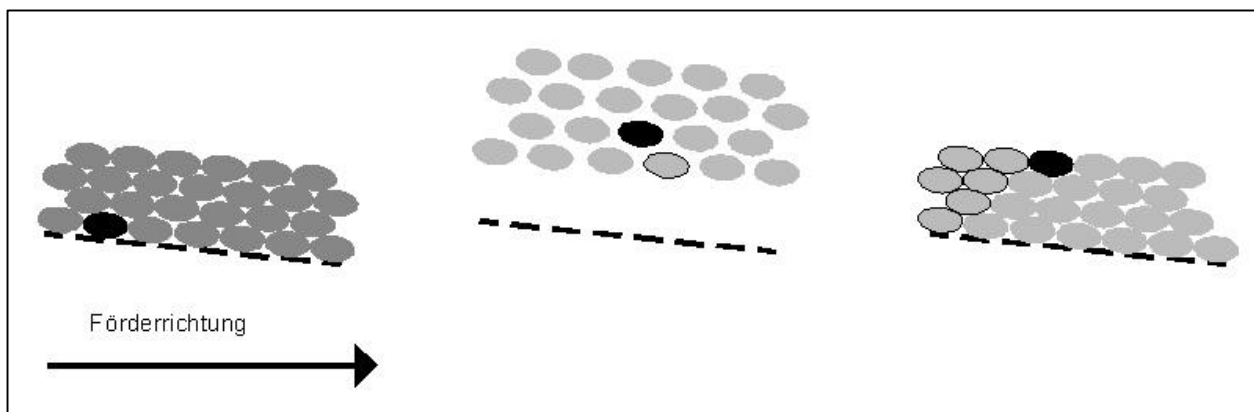


Abb. 2: Der Nasssetzprozess [4]

Durch Neigung des Setzgutträgers, Hubarbeit und Wasserströmung in Richtung Austrag der Nasssetzmaschine bewegt sich das Setzgut während des Sortiervorganges in Förderrichtung. Sortiertes Leicht- und Schwergut werden anschließend getrennt ausgetragen.

Das Nasssetzverfahren lässt sich somit in folgende Einzelprozesse unterteilen [6]:

- Auflockern des Setzbettes
- Sortieren der Partikel nach der Dichte während der Sedimentationsphase
- Transport
- Austrag

Der Vorgang des Sortierens nach der Dichte hat eine bemerkenswerte Folge [7]:

Die potentielle Energie des unsortierten Aufgabegutes ist größer als die potentielle Energie des sortierten Gutes. Somit liegt der Schwerpunkt des unsortierten Aufgabegutes über dem Schwerpunkt des sortierten Gutes.

Stauchsetzmaschine

Das Prinzip der Stauchsetzmaschine ist zurückzuführen auf das Handsetzverfahren, welches schon von *Agricola* beschrieben wurde [5]. In einem mit Wasser gefüllten Behälter wird ein Siebkasten, der mit zwei Handgriffen versehen ist und das zu setzende Gut aufnimmt, so viele Male in Wasser gestaucht, bis die Schichtung vollendet ist. Die Stauchsetzmaschine ist die mechanisierte Nachahmung dieses Prinzips (siehe Abb. 3). Bei den zunächst entwickelten Bauarten ist das Heben und Senken des Siebkastens im Setztrog mit Hilfe eines Hebelsystems bewirkt worden, wobei der Kasten schneller eintaucht, als er angehoben wird. Es wird also ein asymmetrisches Setzhubdiagramm verwirklicht. Stauchsetzmaschinen hatten im vergangenen Jahrhundert für die Aufbereitung von Erzen eine größere Verbreitung. Seitdem haben sie nur noch lokale Bedeutung. [8]

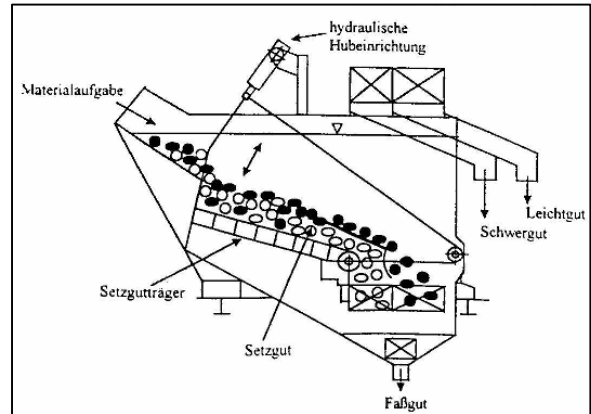


Abb. 3: Stauchsetzmaschine

Membran-Schwingsetzmaschine

Für die Abtrennung von Verunreinigungen (Kohle, Holz, Wurzeln, z.T. Lehm) aus Rohkiesen bzw. -sanden 0 bis 30 mm, die Sortierung von Bimsstein eignet sich die Schwingsetzmaschine (Abb. 4). Unter dem Setzkasten mit dem flach geneigten Setzgutträger aus Kunststoff-Spaltsieben befindet sich ein Schwingkasten, der mit dem erstgenannten über Gummimembranen elastisch verbunden ist. Dieser Schwingkasten wird über Pleuelstangen durch einen darunter angeordneten Exzenterantrieb zu Schwingungen angeregt. Vor dem Ende des Setzkastens gelangt das Leichtgut über den höhenverstellbaren Austrag in eine quer liegende Rinne. Das grobe Sinkgut wird über das mittels Schwimmer höhengesteuerte Wehr abgezogen. Feines Schwergut, das durch das Setzbett und den Setzgutträger in den Schwingkasten gelangt, wird von dort mit einem Teil des Unterwassers in seitlich angeordnete Rinnen ausgetragen. [2]

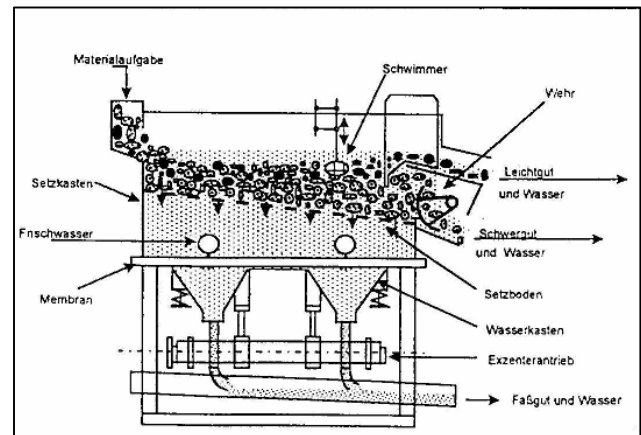


Abb. 4: Membran-Schwingsetzmaschine

Luftgepulste Schwingsetzmaschine

Die Druckluftpulsung findet seit den 30er Jahren bevorzugt bei Steinkohlensetzmaschinen Anwendung. Hierbei wird die Wasserbewegung durch Druckluftimpulse hervorgerufen, wie das in Abb. 5 schematisch für die früher vorherrschenden seitengepulsten Maschinen angedeutet ist. Der an luftgepulsten Maschinen auftretende Verschleiß ist gering, und sie sind auch leicht steuerbar. Nachteilig ist der etwas höhere Energieverbrauch [2].

Mayer [7] sah auf Grundlage seiner Vorstellungen das in Abb. 7c dargestellte Geschwindigkeitsdiagramm als optimal an. Durch einen kräftigen Aufstrom soll das Bett im ganzen angehoben werden. Das Absinken soll sich im ruhigen Fluid vollziehen und schließlich der Hub bei geringem Abstrom ausklingen.

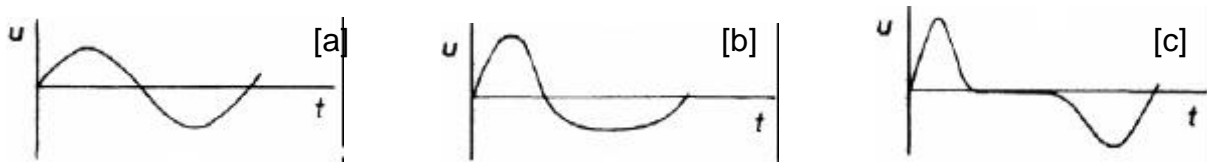


Abb. 7: Setzhub-Diagramme [8]

Versuchsstand

Der Versuchsstand wurde vom IFF Weimar e.V. konstruiert. Als Erregersystem kommt der TIRAVib-Shaker zum Einsatz, welcher sich im Technikum des IFF Weimar e.V. befindet. Dieser wurde speziell für die Setzversuche mit einer Wanne und einem Setzgutträger ausgerüstet.



Abb. 8: TIRAVib-Shaker

Versuchsparameter

Am Versuchsstand können folgende Parameter variiert werden:

- Setzbetthöhe
- Frequenz
- Kurvenform
- Zeit
- Hub
- Wasserhöhe in der Wanne
- Materialgemisch mit einer oberen Korngröße $d_0 = 4 \text{ mm}$
(verwendete Materialgemische: siehe unten Tabelle 2)

Da eine Variation aller Parameter aus Zeitgründen nicht realisierbar war, wurden nur die entscheidenden Einflussgrößen, wie Frequenz, Kurvenform, Materialgemisch, Hub und die Zeit verändert.

Eine Setzbetthöhe von $10 - 20 d_0$, wie sie *Schubert* vorschlägt [8], konnte nicht realisiert werden, da der Siebrand nur 70 mm hoch ist und das Material beim Setzvorgang über den Siebrand befördert würde. Experimentell erwies sich eine Setzbetthöhe von 45 mm als ideal.

Schwerpunkt der Versuche war es, den Einfluss der Schwingungsform auf das Setzergebnis zu untersuchen. Insgesamt konnten 13 Kurvenformen in 52 Testreihen und 140 Versuchen untersucht werden.

Ergebniserfassung

Die Ergebniserfassung erfolgte durch die Bilddokumentation, die Probenahme und durch den Sensor an der Wanne. Der Sensor registriert mit Hilfe eines Lasers die Bewegungen der Wanne in Abhängigkeit von der Zeit. Damit ist es möglich, das Weg-Zeit-Diagramm jedes Versuches aufzuzeichnen und später auszuwerten. Ebenso gibt es Aufschluss über den aktuellen Hub.

Für die visuellen Erfassung der Schichtung wurde das Material bis zur Hälfte des Setzbetträgers entfernt. Anschließend wurde die Schichtung von schräg oben (siehe Abb. 9) fotografiert. Die Position der Kamera wurde während der gesamten Versuchsreihe nicht verändert.

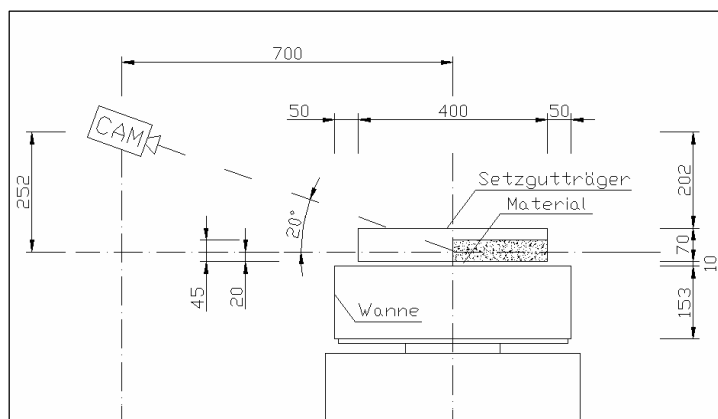


Abb. 9: Bilderfassung des Setzergebnisses

Um das Setzergebnis beurteilen zu können, gibt es zwei Methoden. Die eine ist die augenscheinliche Begutachtung der Schichtung, wobei das Setzergebnis in einzelne Ergebnisklassen eingestuft wird. Die zweite Methode ist die Bildauswertung am Computer. Hierbei wird anhand der Farbunterschiede erkannt, welcher Anteil an Leichtgut sich im unteren Schwergutbereich befindet.

Bei der Computerauswertung wird das Bild in zwei Bereiche geteilt, den oberen Teil, welcher die Leichtgutschicht darstellt und den unteren Teil mit der Schwergutschicht. Für die Auswertung ermittelt nun der Computer den Anteil an schwarzer Farbe im unteren Teil. Je geringer dieser prozentuale Wert ist, desto besser ist die Schichtung gelungen.

Der Wert für den prozentualen Anteil der schwarzen Farbe im Schwergutbereich wird nachfolgend immer mit p_s bezeichnet.

Zusätzlich erfolgt am Ende einer Versuchsreihe eine Probenahme. Hierbei wird schichtweise das Leichtgut und das Schwergut entnommen. Anhand einer späteren Dichtebestimmung können Aussagen über den Erfolg des Setzvorganges getroffen werden.

Erkenntnisse aus den Versuchen

Hub

Der Hub ist in erster Linie nach den Erfordernissen der Auflockerung festzulegen und hängt folglich von der Setzbetthöhe bzw. der oberen Aufgabekorngröße d_0 ab. Für den optimalen Hub wird folgender empirisch ermittelter Zusammenhang angegeben [8]:

$$h = 8,1 \cdot d_0^{0,6}$$

h in mm
 d_0 in mm

Nach diesem Zusammenhang würde sich bei einer oberen Korngröße von 4 mm ein Hub von rund 19 mm ergeben. Da sich ein größerer Hub positiv auf das Setzergebnis auswirkt, sollte für alle Versuche ein Hub von 20 mm eingestellt werden. Während der Versuche zeigte sich allerdings, dass der maximale Hub abhängig von der

Kurvenform ist und die 20 mm nicht immer erreicht werden konnten. Aus diesem Grund wurde entschieden, teilweise mit einem Hub von 14 mm zu arbeiten, um dennoch die verschiedenen Kurvenformen miteinander vergleichen zu können.

Die Abb. 10 veranschaulichen deutlich, dass ein größerer Hub zu einem besseren Setzergebnis führt. Die Setzdauer bei den zwei Versuchen betrug 20 Sekunden. Bei einem Hub von 14 mm konnte keinerlei Schichtung festgestellt werden, dagegen erfolgte bei einem Hub größer 19 mm eine schon fast perfekte Trennung.

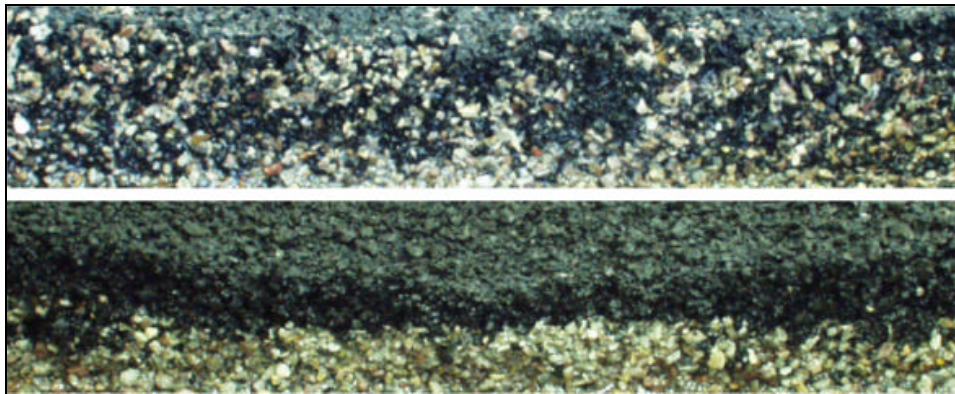


Abb. 10: oben - $h_{Hub}=14,08$ mm, unten - $h_{Hub}=19,07$ mm

Dichteunterschiede der einzelnen Materialgemische

In der Tabelle 1 sind die Dichten der einzelnen Materialien aufgeführt.

Tabelle 1: Rohdichte der einzelnen Materialien

Material	Korngröße in [mm]	ρ_a in [g/cm ³]	ρ_{rd} in [g/cm ³]	ρ_{ssd} [in g/cm ³]
Steinkohle	1 – 4	1,10	0,90	1,08
Altbeton	1 – 4	2,60	2,20	2,36
Ziegel	1 – 4	2,57	1,67	2,02
Gipskarton	1 – 4	Wert aus Literatur $\rho=1,2$ g/cm ³		

ρ_a - scheinbare Rohdichte
 ρ_{rd} - Rohdichte auf ofentrockener Basis
 ρ_{ssd} - Rohdichte auf wassergesättigter oder ofentrockener Basis [ssd: saturated surface dry]

Aus diesen Werten ergeben sich folgende Rohdichteunterschiede in den Gemischen:

Tabelle 2: Dichteunterschiede in den Gemischen

Materialgemisch	Dichteunterschied ρ_{ssd} in [g/cm ³]	Sortierbarkeit q
Ziegel / Altbeton	0,34	1,33
Steinkohle / Altbeton	1,28	17,0
Steinkohle / Ziegel	0,94	12,75
Gipskarton / Altbeton	1,16	6,8

Die Sortierbarkeit q wurde nach folgender Formel berechnet:

$$q = \frac{\rho_s - \rho_F}{\rho_L - \rho_F}$$

- q Sortierbarkeit
- ρ_s Dichte der spezifisch schweren Komponente
- ρ_L Dichte der spezifisch leichten Komponente
- ρ_F Dichte des Fluids

Nach SCHUBERT [8] haben die Werte für q folgende Bedeutung:

$q > 2,5$	Trennung bis zu Korngrößen von etwa 100 μm herab möglich
$q > 1,75$	Trennung bis 200 μm herab möglich
$q > 1,5$	Trennung bis zu 1,5 mm abwärts möglich, aber schwierig
$q > 1,25$	Trennung bei noch größerem Gut mit mäßigem Erfolg möglich
$q < 1,25$	durch Setzen keine Trennung möglich.

In Tabelle 3 sind die Versuche mit zwei verschiedenen Kurvenformen und allen Materialgemischen aufgeführt.

Tabelle 3: Materialgemische und ihre Setzbarkeit

Versuch	Kurvenform	Setz- dauer in [s]	sonstige Pa- rameter	augenschein- liche Beurtei- lung
Ziegel / Altbeton	K7	120	$h_{\text{Hub}}=19 \text{ mm}$	---
Ziegel / Altbeton	K5P	60	$h_{\text{Hub}}=19 \text{ mm}$	---
Steinkohle / Altbeton	K7	60	$h_{\text{Hub}}=14 \text{ mm}$	+
Steinkohle / Altbeton	K5P	60	$h_{\text{Hub}}=14 \text{ mm}$	++
Steinkohle / Ziegel	K7	30	$h_{\text{Hub}}=14 \text{ mm}$	++
Steinkohle / Ziegel	K5P	60	$h_{\text{Hub}}=14 \text{ mm}$	++
Gipskarton / Altbeton	K7	30	$h_{\text{Hub}}=14 \text{ mm}$	+++
Gipskarton / Altbeton	K5P	60	$h_{\text{Hub}}=14 \text{ mm}$	+

K7 - asymmetrische Schwingung ähnlich wie Abb. 7b	
K5P - asymmetrische Schwingung ähnlich wie Abb. 7c mit Impuls	
++++ perfekte durchgehende Schichtung	- leichte Schichtung
+++ perfekte Schichtung in der Mitte / Rand leicht vermischt	-- dünne Leichtgutschicht auf dem Setzbett
++ perfekte Schichtung in der Mitte / Rand stark vermischt	--- keine Veränderung
+ gute Schichtung in der Mitte / Rand stark vermischt	

Die Einstufung der Sortierbarkeit q kann mit den aufgeführten Versuchen bestätigt werden. Für das Gemisch Ziegel / Altbeton wurde eine Sortierbarkeit von 1,33 berechnet, wobei nach SCHUBERT eine Trennung nur bei größerem Gut mit mäßigem Erfolg möglich ist. Obwohl für dieses Gemisch optimale Versuchsparameter gewählt wurden, war keine Trennung möglich.

Die drei anderen Gemische hingegen haben einen q -Wert größer 2,5 und es zeigte sich, dass bei relativ geringer Setzzeit und kleinem Hub eine gute Trennung erreicht werden kann.

Auswertung der Schwingungsform

In Tabelle 4 sind die in bezug auf die Schwingungsform interessantesten Versuchsreihen aufgeführt. Bei diesen Versuchen wurde darauf geachtet, dass Parameter wie Frequenz ($f=1 \text{ Hz}$), Korngröße (1 – 4 mm) und Setzbetthöhe ($h_{\text{Setzbett}}=45 \text{ mm}$) konstant gehalten werden.

Günstige Setzergebnisse wurden mit den Schwingungskurven K3P, K5P, K7 und K8 erreicht. Um den Versuchsaufwand zu minimieren, wurden die Versuchsreihen mit den Gemischen Ziegel/Altbeton, Steinkohle/Ziegel und Gipskarton/Altbeton nur mit den erfolgreichsten Kurvenformen durchgeführt.

Tabelle 4: Versuche für die Kurvenauswertung

Nr.	Gemisch	Kurvenform	Zeit in [s]	h_{Hub} in [mm]	p_s in [%]	augenscheinliche Beurteilung
1	Steinkohle / Altbeton	K7	30	22	34,1	++++
2	Steinkohle / Altbeton	K3	120	19	-	---
3	Steinkohle / Altbeton	K3P	50	19	44,6	++
4	Steinkohle / Altbeton	K5P	30	19	25,6	++++~
5	Steinkohle / Altbeton	K8	60	14	41,8	++
6	Steinkohle / Altbeton	K5P	60	14	37,5	++~
7	Steinkohle / Altbeton	K5P	120	14	35,1	+++
8	Steinkohle / Altbeton	K7	60	14	40,8	+
9	Steinkohle / Ziegel	K8	60	14	15,8	+++
10	Steinkohle / Ziegel	K7	30	14	14,6	++
11	Steinkohle / Ziegel	K5P	60	14	14,4	++
12	Gipskarton / Altbeton	K8	60	14	nicht möglich	+
13	Gipskarton / Altbeton	K7	30	14	nicht möglich	+++
14	Gipskarton / Altbeton	K5P	60	14	nicht möglich	+

K3 - harmonische Schwingung wie Abb. 7a

K3P - harmonische Schwingung wie Abb. 7a mit Impuls

K7 - asymmetrische Schwingung ähnlich wie Abb. 7b

++++ perfekte durchgehende Schichtung

+++ perfekte Schichtung in der Mitte / Rand leicht vermischt

++ perfekte Schichtung in der Mitte / Rand stark vermischt

+ gute Schichtung in der Mitte / Rand stark vermischt

p_s - Anteil schwarzer Pixel im unteren Schwergutbereich (Bildauswertung)

K8 - asymmetrische Schwingung ähnlich wie Abb. 7c

K5P - asymmetrische Schwingung ähnlich wie Abb. 7c mit Impuls

- leichte Schichtung

-- dünne Leichtgutschicht auf dem Setzbett

--- keine Veränderung

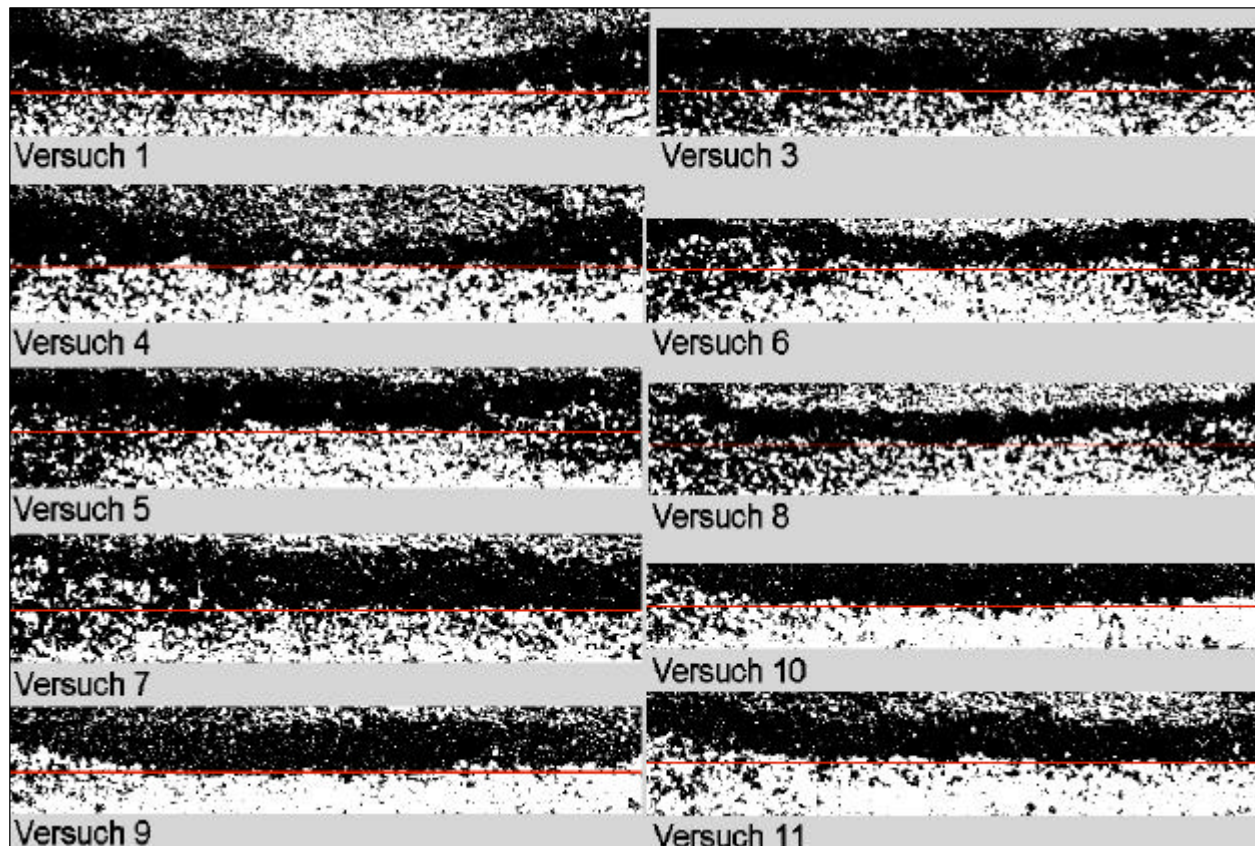


Abb. 11: Bildanalysen für die Auswertung der Kurvenformen

Auf den ersten Blick ist gut zu erkennen, dass mit der harmonischen Schwingung K3 nur ein sehr schlechtes Trennergebnis erreicht wurde, obwohl mit optimalen Versuchsparametern gearbeitet wurde.

Die asymmetrische Schwingung K7 zeigt in Versuch 1 nach 30 Sekunden ein ausgezeichnetes Setzergebnis. Dies ist zum einen auf den großen Hub zurückzuführen, und zum anderen auf eine günstige Kurvenform. Bei einer Verringerung des Hubes auf 14 mm zeigte sich, dass mit der Kurve K7 und dem Gemisch Altbeton/Steinkohle nur noch mittelmäßige Setzerfolge erzielt wurden. Die besten Ergebnisse erbrachte die Kurve bei den Versuchen mit den Gemischen Steinkohle/Ziegel und Gipskarton/Altbeton.

Ebenso wie bei der Kurvenform K7 stellte sich mit der K5P schon nach 30 Sekunden eine perfekte Schichtung ein. Dennoch ist anhand der p_s -Werte aus Tabelle 4 zu erkennen, dass die Kurve K5P ein besseres Setzergebnis hervorbringt als die Kurve K7. Im Versuch 6 und 7 wurde auch bei der Kurvenform K5P der Hub auf 14 mm begrenzt, um die Ergebnisse mit den anderen Kurven vergleichen zu können. Wie den Werten zu entnehmen ist, erreichte auch hier die Kurve K5P bei 60 Sekunden Setzdauer bessere Ergebnisse als die K7. Bei weiterer Erhöhung der Setzdauer auf 120 Sekunden konnte allerdings nur eine leichte Verbesserung der Ergebnisse erreicht werden. Bei den Versuchen Steinkohle/Ziegel und Gipskarton/Altbeton zeigte die Kurve K5P im Vergleich mit den anderen Kurven nur mittelmäßige Trennergebnisse. Nach Erhöhung der Setzdauer konnten aber auch hier gute Ergebnisse erreicht werden.

Bei den Versuchen mit der Kurvenform K8 war aufgrund der Versuchseinrichtung kein größerer Hub als 14 mm zu erreichen. Bei dieser Kurvenform liegt eine schnelle Anhubphase vor, gefolgt von einer Pause und einer langsamen Setzphase. Bei Versuch 5 konnte bereits nach 60 Sekunden ein gutes Setzergebnis nachgewiesen werden. Aufgrund der Tatsache, dass die K8 keinen Impuls benötigt und im Gegensatz zur K7 dennoch bei einem geringen Hub ein gutes Setzergebnis hervorbringt, kann für das Gemisch Altbeton/Steinkohle gesagt werden, dass diese Kurvenform die besten Eigenschaften für den Setzvorgang besitzt.

Beim Gemisch Steinkohle/Ziegel und Gipskarton/Altbeton konnte sie jedoch nicht überzeugen. Sie zeigte dort ähnliche Ergebnisse wie die Kurve K5P. Es ist aber anzumerken, dass die K8 weniger energieintensiv und aus diesem Grund der K5P vorzuziehen ist.

Impulswirkung

Der Impuls erzeugt die positive Reaktion, dass nach der Anhubphase das Materialbett erschüttert wird und ein Auflockerungseffekt entsteht. Nachteil eines solchen Impulses ist, dass ein hoher Energieaufwand und ein aufwendiges Erregersystem notwendig sind, welches diese Impulse erzeugen kann.

Bei der Kurvenform K5P zeigte sich, dass sich der Impuls positiv auf das Setzergebnis auswirken kann. Bei anderen Versuchen erwies sich ein Impuls als störend.

Generell konnte festgestellt werden, dass bei Versuchen mit einfachen Schwingungsverläufen positive Erfahrungen durch einen zusätzlichen Impuls gemacht wurden und bei komplizierten Schwingungen sich der Impuls als negativ erwiesen hat.

Bei komplizierten Kurven sollte versucht werden, den Impuls ohne Veränderung der Grundschwingung zu integrieren. Nur dann ist eine Verbesserung des Setzergebnisses zu erwarten.

Zusammenfassung

Das seit Jahrhunderten bekannte und vor allem im Bergbau und in der Kiesindustrie eingesetzte Verfahren des Dichtesortierens durch Nasssetzen erhält vor allem durch das in den letzten Jahren immer mehr forcierte Recyceln von Wertstoffen neue Impulse. Diesem Verfahren eröffnen sich dadurch ständig weitere Anwendungsgebiete; es gewinnt an Bedeutung. Um Nasssetzmaschinen optimal einsetzen zu können, werden quantifizierbare Kenntnisse deshalb immer wichtiger.

Damit eine optimale Abstimmung von Setzmaschinen auf die jeweilige Aufgabenstellung und eine gezielte Weiterentwicklung ermöglicht werden, soll ein Modell zur Beschreibung des Nasssetzprozesses auf Basis theoretischer Betrachtungen und empirischer Untersuchungen entwickelt werden.

Anhand der bereits durchgeführten Untersuchungen, konnten wichtige Daten für eine Modellierung gesammelt werden. Im Vordergrund dieser Untersuchungen stand die Kurvenform, allerdings war es ebenfalls erforderlich, Parameter wie die Zeit, den Hub oder die Frequenz zu variieren. Insgesamt konnten 13 Kurvenformen in 52 Testreihen und 140 Versuchen untersucht werden.

Während der Versuche stellte sich heraus, dass ein größerer Hub den Setzvorgang erheblich verbessert. Eine größere Setzdauer hat ganz klar einen positiven Einfluss. Jedoch konnte bei Problemgemischen mit geringeren Dichteunterschieden festgestellt werden, dass auch bei sehr langen Setzvorgängen keine Verbesserungen zu beobachten sind. Ebenso verhält es sich mit der Setzbethöhe. Je geringer sie ist, desto besser ist das Setzergebnis.

Bei den untersuchten Materialgemischen Steinkohle/Altbeton, Steinkohle/Ziegel und Altbeton/Gipskarton konnten gute Trennergebnisse erreicht werden. Jedoch konnte bei dem Materialgemisch Altbeton/Ziegel auch bei Verwendung optimaler Versuchsparameter kein Ansatz zu einer Schichtbildung erreicht werden. Die von *Schubert* angegebene Formel für die Setzbarkeit in Setzmaschinen wurde mit den Versuchen bestätigt.

Bei den Schwingungsformen stellte sich klar heraus, welche Kurvenform bei den vorhandenen Parametern ungeeignet für den Setzvorgang ist. Positive Trennerfolge konnten mit den asymmetrischen Schwingungen erreicht werden. Zum Einsatz des Impulses ist zu sagen, dass dieser einen positiven Effekt haben kann, er aber auch die eigentliche Schwingung zerstören kann. Bei den durchgeführten Versuchen konnte die Aussage aus der Fachliteratur verifiziert werden, dass eine schnelle Anhubphase und eine darauf folgende lange Setzphase eine positive Wirkung auf den Setzvorgang haben.

Auf Basis der in den Vorversuchen gewonnenen Erkenntnisse, wird nun begonnen, eine optimierte Setzmaschine zur nassmechanischen Sortierung von Stoffen nach ihren spezifischen Gewichten entwickeln zu können.

Quellenverzeichnis

- [1] *Buntenbach, S.; Petit, E.; Hoberg, H.*: Nassmechanische Aufbereitung von Bauschutt. *Aufbereitungs-Technik* 38 (1997) Nr.3, S.130-138
- [2] *Moskala, R.; Schneider-Kühn, U.*: Schwingsetzmaschinen für Recyclingaufgaben. *Freiberger Forschungsheft A 850* (1999), S.86-98
- [3] *Quindt, J.; Müller, H.; Tolke, A.*: Einführung der Setztechnik in der Bleiakku-schrott-Aufbereitung. *Freiberger Forschungsheft A 850* (1999), S.76-85
- [4] *Marx, G.; Moskala, R.; Schneider-Kühn, U.*: Dichtesortieren auf Nasssetzmaschinen. *Aufbereitungs-Technik* 40 (1999) Nr.5, S.215-224
- [5] *Hemming, W.*: Verfahrenstechnik. Vogel Buchverlag, Würzburg 1993
- [6] *Magin, S.*: Verfahrenstechnische Auslegung von Schwingsetzmaschinen, Diplomarbeit Fachhochschule Düsseldorf, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, April 1997
- [7] *Mayer, F.W.*: Eine neue Erklärung des Setzvorganges und ihre Folge für die zweckmäßige Gestaltung des Setzhubdiagramms. *Glückauf* 87 (1951) Nr.33/34, S.776-783
- [8] *Schubert, H.*: Aufbereitung Fester Stoffe. Band II: Sortierprozesse. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart 1996. S. 41-71.
- [9] *Kellerwessel, H.*: Setzmaschinen, besonders für Recyclingaufgaben – Möglichkeiten, Grenzen, Bauarten. *Aufbereitungs-Technik* 34 (1993), Nr. 10, S.521-530.

Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller; Dipl.-Ing. L. Wienke
Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung
Bauhaus-Universität Weimar
Coudraystraße 7, 99423 Weimar
e-mail: anette-m.mueller@bauing.uni-weimar.de oder
lars.wienke@bauing.uni-weimar.de
Tel.: 03643/5846-06 oder 53

Dipl.-Ing. Edouard Mbemba
Institut für Technische Dokumentation, Schulung und Beratung GmbH, kurz i.t.s.-GmbH
Bismarckstr. 142, 47057 Duisburg
e-mail: i-t-s.gmbh@web.de
Tel.: 0203 / 306-1000

Doz. Dr.-Ing. habil. Helmut Kuch
Institut für Fertigteiletechnik und Fertigbau Weimar e.V.
Cranachstraße 46, 99423 Weimar
e-mail: kontakt@iff-weimar.de
Tel.: 03643 / 8684-0