

Eine andere Variante, die auch für die doppeltwirkende Schubzentrifuge einsetzbar ist, wird von H. MELDAU (Pat.Nr. DE 19 81 03 23 A1, 1998) vorgeschlagen und ist ebenfalls auf das Funktionieren des Kalibrierringes (Kap. 4.9.1) angewiesen. Die Suspension wird radial noch weiter zurückgestaut; die Flüssigkeit verlässt nach dem Aussedimentieren des Feststoffs das rotierende System über einen Kreisringpalt (Abb. 4.8-19).

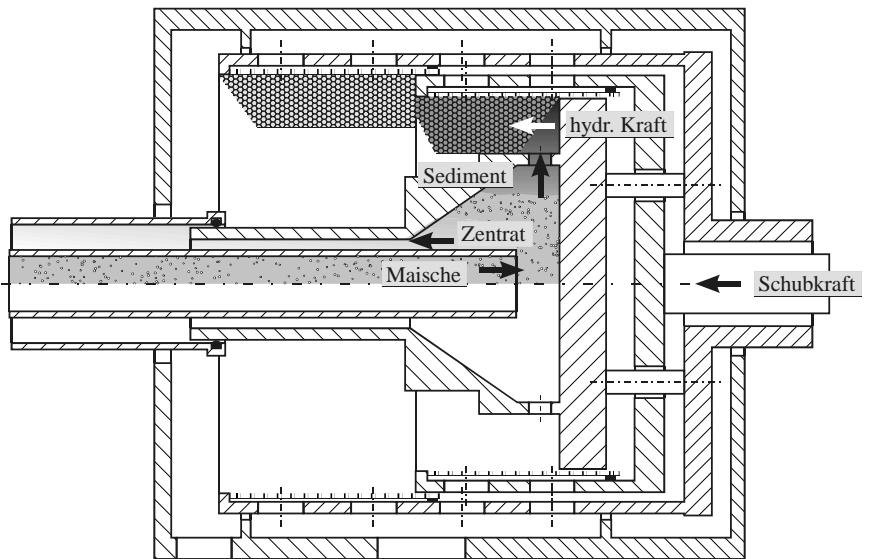


Abb. 4.8-19: Zweistufige Schubzentrifuge mit gefülltem Zulauf [Patent H. MELDAU]

4.8.3 Pulsierendes Speisen

Es soll hier noch eine Entwicklung beschrieben werden, welche in Zusammenarbeit zwischen dem Autor und der Fa. FERRUM (vorm. SULZER ESCHER WYSS) durchgeführt wurde (Pat.-Nr. DE 40 10 748 C2, 1991).

Wie in obigen Betrachtungen klar wurde, ist im Schubzyklus nur der Moment der vorderen Totpunktstellung des Schubbodens bestimmend für die Flüssigkeitsdrainagekapazität. In allen anderen Positionen des Schubzyklus wäre Drainagekapazität noch im Überfluss vorhanden. Lösen wir uns also von der Vorstellung, dass der Zulauf unbedingt vollkontinuierlich erfolgen müsse, so wird klar, dass besonders in der Rückholphase des Schubbodens, in der die Suspension einerseits auf das fast blanke Sieb trifft und andererseits der Feststoffkuchen die Suspension als Wall nach vorne hin begrenzt, sehr viel mehr Flüssigkeit abdrainiert werden könnte, wenn sie nur kurzzeitig in der ausreichend großen Menge aufgegeben werden könnte. Als Nebenbedingung müsste nur gelten, dass die einlaufende Suspension nicht über den Wall des bereits gebildeten Kuchens hinweg schwappt.

Man kann den Gedanken weiterspielen und kommt dann konsequenterweise zu einem „optimalen Zulaufprofil“ der Suspension über einem Schubzyklus, bei dem der momentane Zulaufstrom gerade eben dem momentanen Widerstand aus Sieb und gebildetem Kuchen angepasst wäre. Wenn es im weiteren eventuell nicht nur darum geht, den Effekt des Flutens zu vermeiden, so könnte dieses „Zulaufprofil“ auch so verändert werden, dass ebenso die Kuchendicke beeinflusst wird.

Nehmen wir an, dass es tatsächlich möglich wäre, während des Rückhubes oder vielleicht sogar während nur eines Teils des Rückhubes den Kuchen bereits sehr hoch aufzubauen, so würde das Aufstauchen des Feststoffes beim Vorhub eventuell ganz entfallen. Die Kuchenhöhe würde nicht mehr als ein Ergebnis aus einem komplizierten Zusammenspiel verschiedener Vorgänge entstehen, sondern würde sich in jedem Moment aus der Kontinuitätsgleichung ergeben.

Sehen wir einmal von der schwer praktikablen, mehr akademischen Idee ab, ein Zulaufprofil der Suspension fahren zu wollen, so kommen wir zu der einfacher erfüllbaren Forderung, eine Auf-Zu-Steuerung zu realisieren, bei der sowohl der Öffnungs- als auch der Schließmoment voneinander unabhängig eingestellt werden kann, und beide Schaltvorgänge präzise mit der Hubbewegung des Kolbens synchronisiert sein müssen.

4.8.3.1 Versuchsvorrichtung und Versuchsprodukt

Unter den verschiedenen Möglichkeiten, dies technisch zu realisieren, wurde im Pilotmaßstab eine mechanisch angetriebene Schubzentrifuge gewählt, die mit einem pneumatisch gepulsten Kugelventil arbeitet. Abb. 4.8-20 zeigt schematisch den Aufbau des Versuchsstandes.

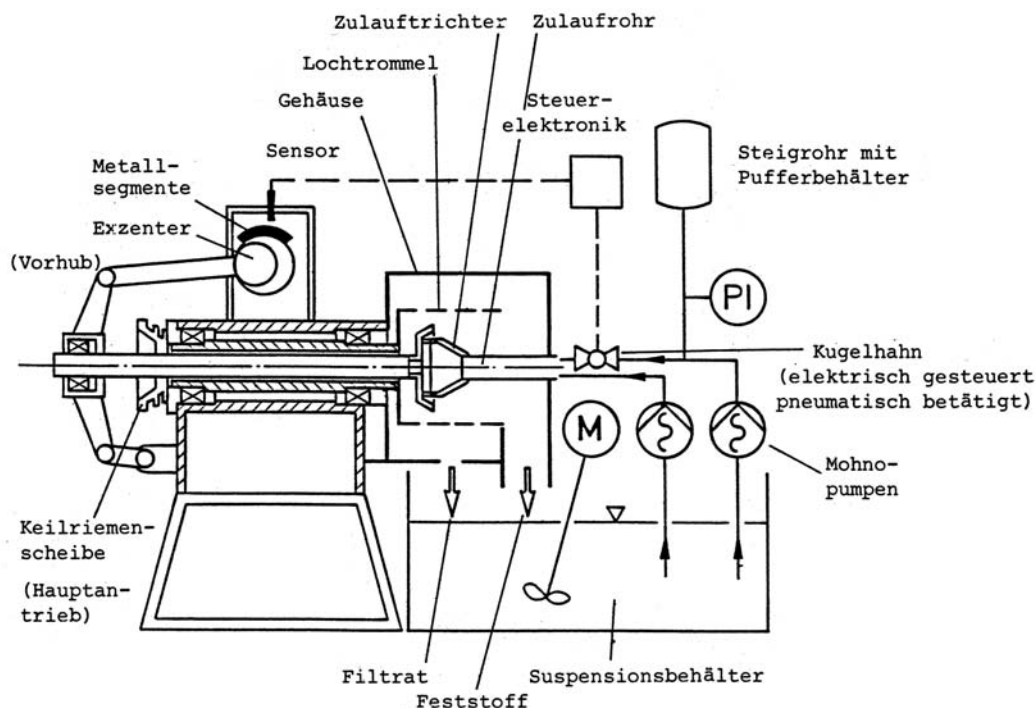


Abb. 4.8-20: Aufbau des Versuchsaufbaus zur pulsierenden Speisung einer Schubzentrifuge [MVM]

Zur Suspensionsförderung dienen hier zwei Exzenter-schneckenpumpen, so dass auch eine Kombination aus kontinuierlichem und diskontinuierlichem Zulauf gefahren werden kann. Mit der einen Pumpe kann kontinuierlich Suspension durch das äußere Einlaufrohr in die Maschine gefördert werden. Die andere Pumpe ist an das innere Einlaufrohr angeschlossen und übernimmt die pulsierende Speisung. Vor dem Ventil ist noch ein Steigrohr angeschlossen, welches in einen Behälter mit Überdruckventil mündet. Bei geschlossenem Ventil steigt die Suspension im Steigrohr hinauf und komprimiert die Luft im Behälter. Bei Öffnung des Ventils unterstützt der Druck in diesem Behälter die schlagartige Förderung der Suspension in die Zentrifuge. Der Druck vor dem Ventil ist durch ein Manometer kontrollierbar.

Das Signal zum Öffnen und Schließen des gepulsten Ventils wird vom mechanischen Kurbeltrieb des Schubbodens abgenommen, auf dessen Exzenter-scheibe variable Metallsegmente angebracht sind. Ein berührungsloser Näherungsschalter wurde als Messgeber installiert, so dass die Signale „Öffnen“ bzw. „Schließen“ in Abhängigkeit der Position der rotierenden Metallsegmente zum stillstehenden Näherungsschalter ausgelöst werden. Durch die Anzahl und die Stellung der Segmente sind die Öffnungs- und Schließzeiten angegeben als Öffnungs- und Schließwinkel. Damit ist die Länge des Aufgabestoßes einstellbar. Da ein gesamter Schubzyklus nur etwa eine Sekunde dauert, müssen auch die Schaltzeiten für das Ventil und die Beschleunigungszeit für die Suspension in Betracht gezogen werden, was sich in einer entsprechenden Vorverlegung der Schaltwinkel (entsprechend der „Vorzündung“ beim Verbrennungsmotor) ausdrückt.

Um den Effekt der pulsierenden Speisung gegenüber ungepulster Fahrweise deutlich zu zeigen, wurde ein möglichst feinkörniges, schwer filtrierbares Produkt gewählt, so dass der sich aus Spaltsieb und Kuchen zusammensetzende Widerstand gegen die Flüssigkeit hauptsächlich im Kuchen auftritt. Ein weiteres wichtiges Kriterium für ein Versuchsprodukt ist die Stabilität gegen Kornzerstörung, da das Produkt für längere Zeiten im Kreislauf gefahren wird. Demzufolge wurde PVC gewählt und zwar in einer Mischung aus zwei Sorten mit jeweils einem Mittelkorn von $87\ \mu\text{m}$ und $30\ \mu\text{m}$. Im Verhältnis 1:1 gemischt, ergab sich eine sehr breite Kornverteilung mit einer Porosität von nur 35 % und einem aus dem Experiment ermittelten Kuchenwiderstand von $r_c = 1,12 \cdot 10^{11}\ \text{m}^{-2}$, was einem mittleren hydraulischen Durchmesser der Poren von $d_h = 28\ \mu\text{m}$ entsprach. Dieses Versuchsprodukt liegt in der Korngröße weit unterhalb der üblichen Schubzentrifugenprodukte von $x_{50,3} > 80\ \mu\text{m}$.

4.8.3.2 Messergebnisse

Da durch die induktive Steuerung sowohl der Öffnungs- als auch der Schließwinkel getrennt eingestellt werden kann, ist die Zahl der möglichen Kombinationen von geöffnetem zu geschlossenem Speiseventil entsprechend groß. Aus den vielen Ergebnissen sollen in Abb. 4.8-21 beispielhaft ausgewählte Einstellungen gezeigt werden, die verfahrenstechnisch interessante Aufschlüsse ermöglichen.

Aufgetragen als Ordinate ist jeweils das Verhältnis der Durchsätze gepulst zum Zustand ungepulst bei verschiedenen Öffnungs- und Schließwinkeln. Der C-Wert war auf 550 und die Konzentration der Suspension auf $c_v = 50\%$ eingestellt. Unter der großen Vielfalt der Kombinationen von Öffnungs- und Schließwinkel wurden jeweils die Zulaufsteigerung gegenüber dem Flutpunkt bei konstanter Aufgabe, ebenso die dazugehörigen Werte des Feststoffgehalts im Zentrat in Abb. 4.8-22, der Kuchendicke in Abb. 4.8-23 sowie des Vor Schubgrads in Abb. 4.8-24 gemessen. Eine solche Serie mit konstant gehaltenem Schließwinkel $SW = 270^\circ$, d.h. Schließen bei halbem Vorwärtshub des Schubbodens, ist dargestellt, wobei die Öffnungswinkel variiert wurden. Es ergeben sich zwei Maxima des Durchsatzes, bei 30° (nach vorderem Totpunkt) und 180° (am hinteren Totpunkt) mit jeweils denselben Spitzenwerten des 2,8-fachen Durchsatzes gegenüber dem konstanten Zulauf.

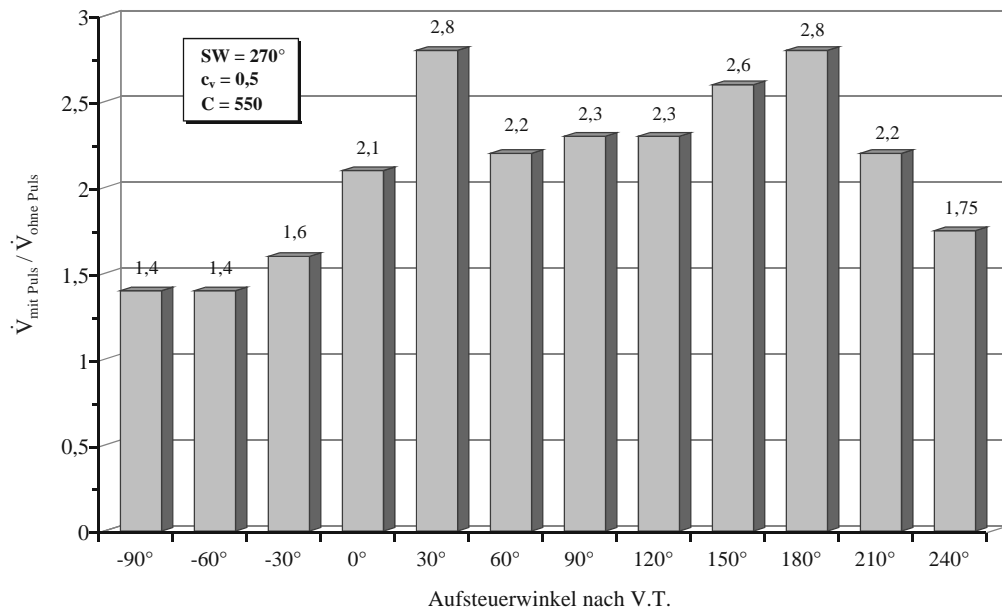


Abb. 4.8-21: Vergleich der Suspensionsvolumenströme mit und ohne pulsierende Speisung für einen Schließwinkel $SW = 270^\circ$ und verschiedene Öffnungswinkel [MVM]

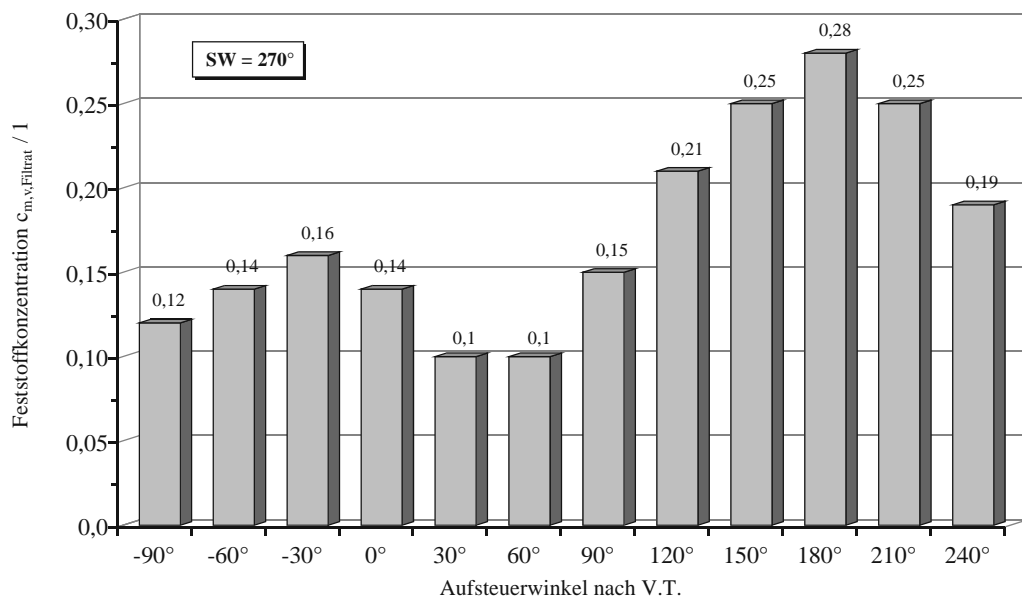


Abb. 4.8-22: Feststoffgehalte im Zentrat für einen Schließwinkel $SW = 270^\circ$ und verschiedene Öffnungswinkel [MVM]

Trotzdem sind beide Peaks nicht verfahrenstechnisch gleichwertig. Der Peak im hinteren Totpunkt, bei dem die Suspension auf ein blankes Sieb der vollen Hublänge trifft, ist verbunden mit einem sehr hohen Feststoffdurchschlag im Zentrat und deshalb unbrauchbar. Mehr als die Hälfte des zugeflossenen Feststoffes bricht durch das Sieb. Beim vorderen Peak ist nicht nur der Feststoffdurchschlag sehr gering, sondern die Kuchendicke stellt sich auch sehr niedrig ein. Hoher Durchsatz und niedrige Kuchendicke ergeben einen fast perfek-

ten Vorschubgrad von $\zeta_{\text{psh}} = 0,98$ (Abb. 4.8-24). Eine Stauchung des Kuchens findet also nach dem hinteren Totpunkt nicht mehr statt.

Offensichtlich kommt es bei einer Suspensionsbeschickung am vorderen Totpunkt, die größer ist als die Flutgrenze bei konventionellem Betrieb, nicht zwangsläufig zum Fluten. Das kann damit erklärt werden, dass der Kuchen nahe der Aufgabezone vor dem Aufsteuern schon teilentfeuchtet ist und ein gewisses Speichervolumen hat. Eine beginnende Suspensionsbeschickung am vorderen Totpunkt kann also weggepuffert werden. In Abb. 4.8-25 ist der Feststoffdurchschlag vom Zulaufmassenstrom abgezogen, so dass dies das Betriebsverhalten realistischer widerspiegelt.

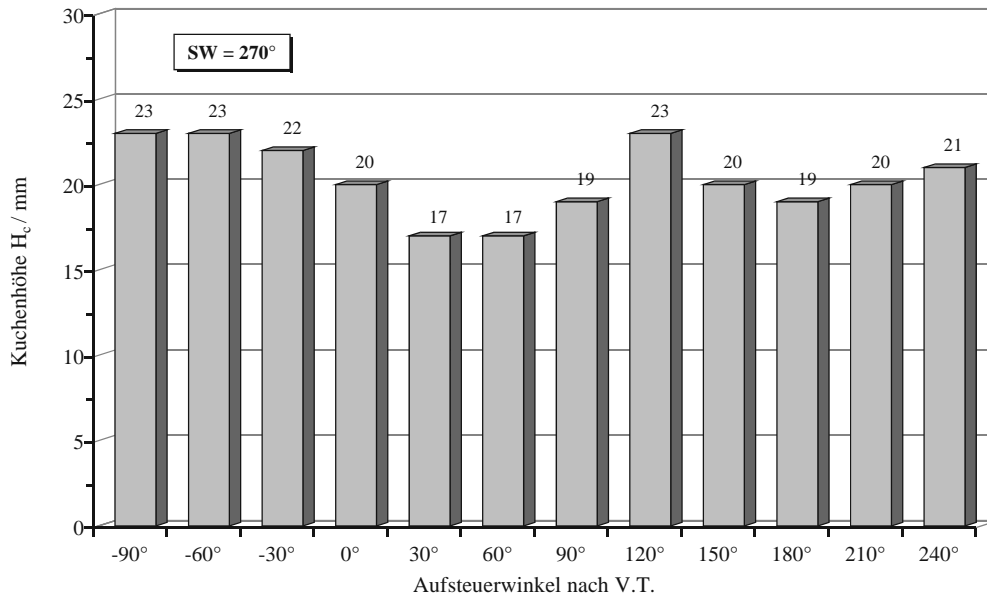


Abb. 4.8-23: Kuchenhöhe bei einem Schließwinkel $SW = 270^\circ$ und verschiedenen Öffnungswinkeln [MVM]

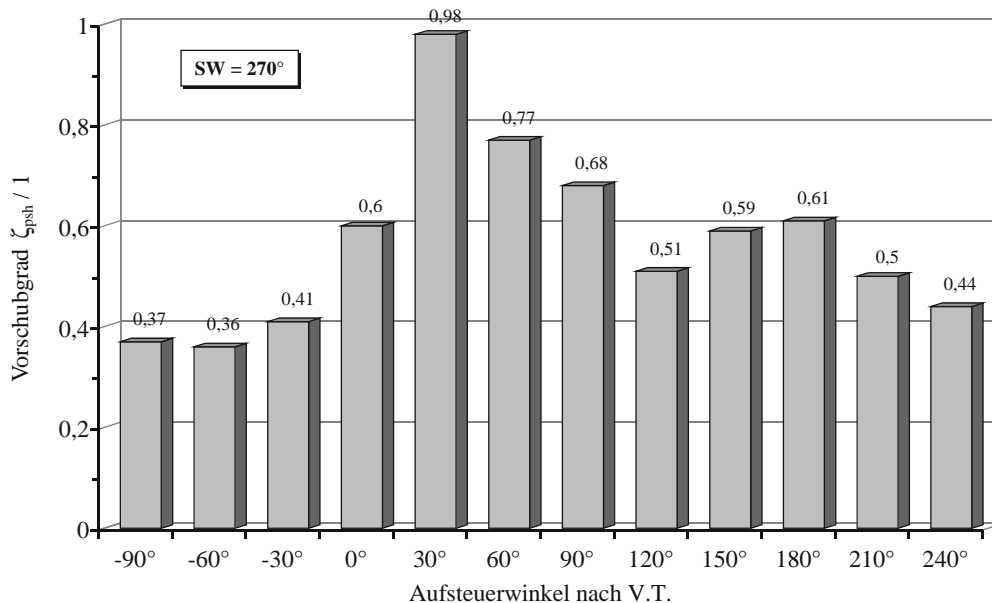


Abb. 4.8-24: Vorschubgrad bei einem Schließwinkel $SW = 270^\circ$ und verschiedenen Öffnungswinkeln [MVM]

Im linken Maximum ist $c_{\text{m,v.Filtrat}} = 0,1$ und liegt damit sogar günstiger als bei kontinuierlichem Betrieb ($c_{\text{m,v.Filtrat}} = 0,12$). Ein größerer Feststoffdurchschlag im linken Maximum wird dadurch verhindert, dass die am vorderen Totpunkt zulaufende Suspension etwas von dem schon vorher gebildeten Kuchen in den Ringraum zwischen Kuchen und Schubboden zurückspült. Dadurch hat die Suspension eine scheinbar höhere Konzentration, die Kuchenbildung wird beschleunigt und der Feststoffdurchschlag verringert.

Zur Beurteilung der pulsierenden Fahrweise sollen auch noch die Ergebnisse der Restfeuchte bzw. Sättigung herangezogen werden. Die Kuchensättigung beträgt im rechten Durchsatzmaximum $S = 0,63$, während der Feststoff durch Betrieb im linken Durchsatzmaximum bis auf $S = 0,51$ entfeuchtet wird (zum Vergleich: die

Gleichgewichtssättigung beträgt $S_{eq} = 0,31$).

Die Kuchenfeuchte im rechten Durchsatzmaximum von Abb. 4.8-21 ist höher, weil bei dieser Betriebs-einstellung (Speisen während des Vorhubs) der Schubboden etwas Suspension über den schon gebildeten Kuchen schiebt, was zu einer Rückbefeuchtung führt. Dennoch kommt es erst bei noch höheren Durchsätzen zur Bildung einer Erosionsrinne. Generell zeigt sich der Kuchen bei der pulsierenden Speisung unanfälliger gegen Canyon-Bildung. Die filtrationstechnische Grenze der Maschine offenbart sich eher durch ein Überschwemmen des Kuchens mit Suspension (und dadurch Erhöhung der Restfeuchte) über dem gesamten Umfang. Das rechte Durchsatzmaximum ist also auch wegen der höheren Restfeuchte keine akzeptable Betriebsweise.

4.8.3.3 Betriebsverhalten bei gepulster Speisung

Ein weiterer Vorteil der gepulsten Speisung zeigt sich darin, dass bei einer solchen Betriebsweise die Maschine sehr viel schneller angefahren werden kann. Während der Durchsatz bei Maschinen konventioneller Betriebsweise langsam auf den Endwert gesteigert werden muss, kann man bei dieser Speisungsart den Zulauf nach 5-10 Hüben voll aufdrehen. Das ist ein weiterer Hinweis auf die gut ausgenützte momentane Schluckfähigkeit im Ringspalt. Falls im Betrieb bei sehr hohen Durchsätzen tatsächlich noch Fluten einsetzt, so fängt sich die Maschine nach wenigen Hüben wieder, falls der Durchsatz geringfügig zurückgenommen wird. Das übliche Abstellen des Zulaufes und das sehr vorsichtige Wiederaufgeben der Suspension ist damit nicht mehr nötig.

In Abb. 4.8-25 ist über der Konzentration der Sedimentfeststoffanteil multipliziert mit dem Suspensionsvolumenstrom im Zulauf aufgetragen. Diese Größe ist also proportional zum Feststoffmassenstrom im Zulauf. Das Diagramm zeigt zwei vorteilhafte Ergebnisse:

1. Verschieben der Flutgrenze

Man erkennt, dass der Steigerungsfaktor für die Durchsatzleistung gepulst/ungepulst im Bereich höherer Konzentration bei etwa 2,8 liegt.

2. Betrieb bei niedrigen Konzentrationen

Bei konventionellem Betrieb liegt die untere Betriebsgrenze bei $c_{m,v} = 0,38$. Bei geringeren Konzentrationen ist kein Kuchenaufbau zu erzielen, da die dünne Suspension durch das Sieb schlägt. Bei pulsierender Speisung hingegen ist ein Betrieb der Zentrifuge bis $c_{m,v} = 0,25$ möglich. Diese erzielten Verbesserungen haben zwei Gründe. Zum einen erleichtert die höhere Filtrationsgeschwindigkeit der pulsierenden Speisung den Kuchenaufbau. Weiterhin wird durch das „Einschießen“ der Suspension ein größerer Anteil des schon gebildeten Kuchens in den Ringraum zurückgespült als bei konventioneller Speisung. Dadurch hat die anfiltrierende Suspension eine höhere Konzentration, was die Kuchenbildung ermöglicht. Der zu vermeidende, weil den Filtrationsvorgang belastende Effekt der Kuchenrückspülung in den Ringraum kann also bei verdünnten Suspensionen durchaus positive Folgen haben.

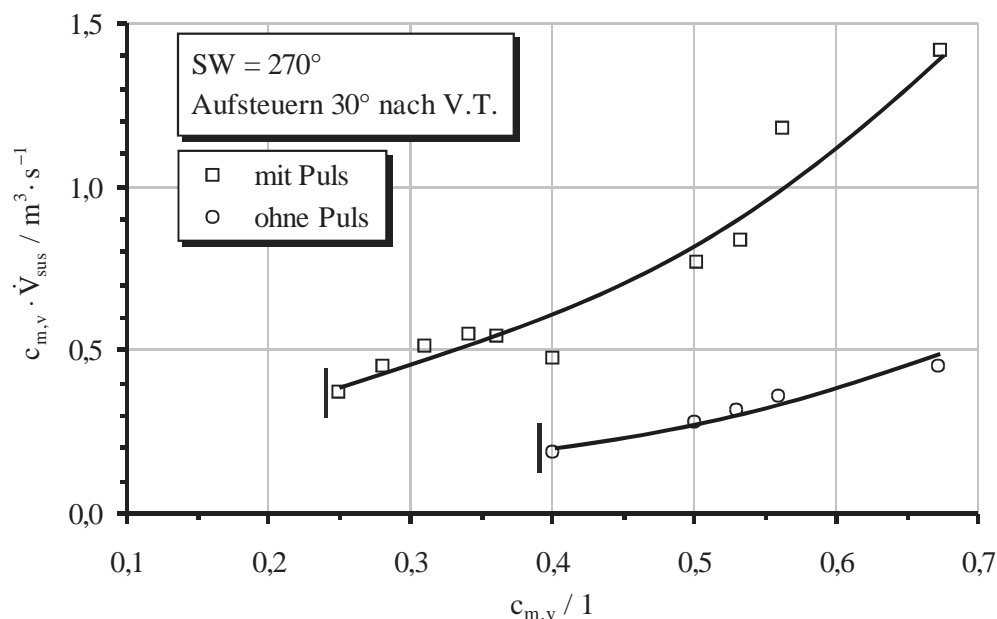


Abb. 4.8-25: Flutgrenze als Funktion der Zulaufkonzentration [MVM]

4.8.3.4 Durchsatz bei kombinierter Speisung

Der Druckstoß in der Suspensionszulaufleitung nimmt mit kleiner werdenden geöffneten Abschnitten und steigendem Volumenstrom zu. Bereits im Hinblick auf die gepulste Fahrweise von Großmaschinen wäre es wünschenswert, diesen Druckstoß in Grenzen zu halten. Eine Möglichkeit dazu wäre dann gegeben, wenn das Ziel großer Durchsatzsteigerungen auch dann erreicht werden könnte, wenn nur ein Teil der Suspension gepulst, der andere Teil kontinuierlich zulaufen könnte. Versuchsergebnisse zeigen, dass das rechte Maximum (aus Abb. 4.8-21) bei dieser Betriebsweise nicht auftaucht. Das ist auch verständlich, da der kontinuierlich zugegebene Suspensionsanteil für eine Bedeckung des Siebes mit Kuchen sorgt, so dass der pulsartig aufgegebene Suspensionsanteil nicht auf ein blankes Sieb trifft. Ein großer Filtratdurchschlag ist also nicht zu erwarten. Die Messungen ergaben, diese Überlegung bestätigend, den Wert $c_{m,v,\text{Filtrat}} = 0,1$. Die Steigerungsraten im linken Durchsatzpeak liegen hier deutlich unter denen der vollgepulsten Fahrweise. Abb. 4.8-26 zeigt den kontinuierlichen Übergang vom Wert 1 bis zum Spitzenwert 2,8.

Im Pilotversuch wurde die Einengung der Speisebedingung noch weiter getrieben. Es stellte sich ein maximales Durchsatzverhältnis ein, wenn folgende Bedingungen für die Speisung eingehalten werden:

- Beginn etwa 30° nach dem vorderen Totpunkt, um nicht zu früh auf die noch voll ausgebildete Kuchenhöhe zu spülen.
- Ende der Speisung früh genug vor dem hinteren Totpunkt.

In einer Versuchsreihe wurden unter einem Öffnungswinkel von nur 90° (Öffnung 30° nach dem vorderen Totpunkt, Schließung 60° vor dem hinteren Totpunkt) die besten Ergebnisse erhalten.

In dieser kurzen Zeit von ca. 0,25 s fließt ein mehr als vierfach größerer Volumenstrom in die Maschine. Es ist vorstellbar, dass die Steigerungen bei noch kürzeren Öffnungszeiten noch weiter getrieben werden könnten.

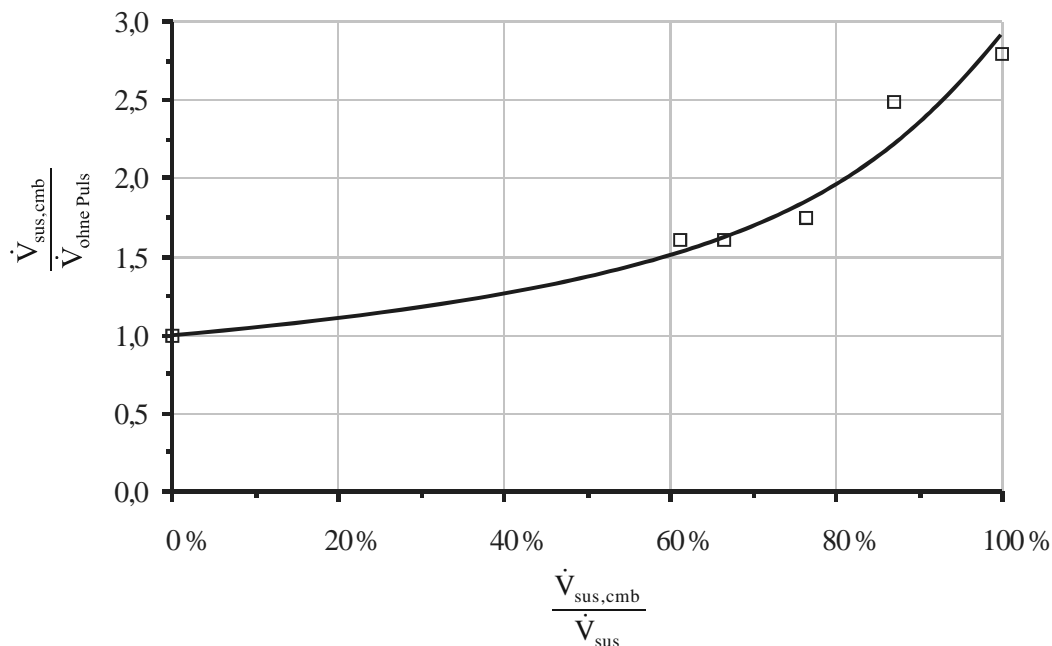


Abb. 4.8-26: Relativer Suspensionsvolumenstrom bei kombinierter Speisung für verschiedene Verhältnisse von gepulstem zu gesamtem Strom [MVM]

4.8.3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Konsequenzen für die maschinelle Umsetzung auf Produktionsmaschinen

Die Verkürzung des Einlaufstoßes auf etwa $1/4$ des ganzen Hubzyklus bringt Durchsatzsteigerungen bis zum 3-fachen. Der Vorschubgrad geht praktisch bis an den Wert 1 heran, d.h. der Kuchen wird, nachdem er noch während des weiteren Rückgangs des Schubbodens Zeit zur Verfestigung gefunden hat, als gesamter Block vom hinteren Totpunkt an geschoben und fast nicht mehr gestaucht. Der Feststoffgehalt im Filtrat ist nicht höher als im klassischen Betrieb.

Die Trockenverweilzeit für die Entfeuchtung des Kuchens ist bei dieser Fahrweise „um die Länge des Hubes zur Trommel“ vergrößert, da während des ganzen Vorhubes keine Flüssigkeit mehr auf den Kuchen aufgegeben wird.

Eine eventuelle Kuchenwaschung kann also auch früher einsetzen. Die Kuchendicke nimmt ab. Dadurch wird der Schubkraftbedarf gesenkt bzw. die Zentrifuge kann bei gleich hoch belasteter Hydraulik im C-Wert hochgenommen werden. Höherer C-Wert und niedrigere Kuchendicke erlauben aber wiederum eine weitergehende Entwässerung, wie wir auch aus der Gleichung für den Ablauf der Kinetik glatter Körner wissen:

$$S(t) = S_{eq} + \frac{4}{3} \cdot \sqrt{\frac{\eta_L \cdot H_c}{\rho_L \cdot g \cdot d_h^2 \cdot C \cdot t}} \quad (4.8-1)$$

Man kann die Möglichkeiten der gepulsten Speisung aber auch anders interpretieren. Da die Schwachstelle der Schubzentrifuge - das Fluten - weithin verschoben ist, kann man in der Anwendung auch in die feineren Kornbereiche vorstoßen, was mit der Wahl des besonders ungünstig gewählten Versuchsproduktes bereits gezeigt wurde. Wie bei anderen konkurrierenden Maschinen auch - der Siebschneckenzentrifuge oder dem Siebdekanter - würde dann erst eine, mit dem Durchsatz ansteigende, nicht mehr akzeptable Restfeuchte den Einsatz zu feineren Produkten hin beenden.

4.8.4 Filtrationstechnisch günstige Varianten der Schubbodenbewegung

Die in Abb. 4.4-1 dargestellte, symmetrische Schubbodenbewegung führt zu den bereits beschriebenen Stauungserscheinungen des Filterkuchens. Vom rein verfahrenstechnischen Standpunkt wünschenswert wäre jedoch eher ein langsames Zurückholen des Schubbodens innerhalb ca. 90 % der Zykluszeit, so dass am hinteren Umkehrpunkt bereits ein dicker, nicht mehr stauchender Kuchen vorläge. Der Vorschubvorgang sollte dann so schnell geschehen, wie das Produkt es verträgt, ohne im inneren Reibwert abzufallen. Die Breite der Filtrationsrinne wäre entsprechend $\zeta_{psh} \rightarrow 1$ dann ein Maximum und gleich dem Hub.

In Verbindung mit der Überlegung, dass am vorderen Totpunkt die Filtrationsbedingung überschritten wäre, würde der vorletzte Ring, der bereits vorentwässert war, in der sehr kurzen Zeit des vorderen Umsteuerns die überlaufende Flüssigkeit wieder aufnehmen. Dadurch würde zwar Fluten verhindert, aber die Kuchenentfeuchtung würde um eine Kuchenringbreite später beginnen. Diese Fahrweise ist jedoch von Seiten der Hydraulik schwer zu realisieren.

Lösungen führen entweder zu periodisch geänderten Pumpendrehzahlen, oder zu zwei getrennten Hydraulikpumpen, von denen die eine ständig läuft und die andere nur intermittierend für den schnellen Vorwärtshub eingeschaltet wird. Dabei würden sich allerdings auch scharfe Beschleunigungen für die axial bewegten Massen des Schubbodens und des Kuchens ergeben. In der Praxis ist diese Lösung deshalb bisher noch nicht aufgetaucht.

4.8.5 Die Drallbox - ein selbstregelnder Suspensionszulauf

Wegen der großen Empfindlichkeit der Schubzentrifuge hinsichtlich Schwankungen im Zulaufstrom wäre für den Dauerbetrieb eine selbsttätige, möglichst einfache Regelung des zufließenden Suspensionsstromes wünschenswert. Diese Regelung ist auf zwei Arten realisierbar. Entweder wird die Feststoffkonzentration des Zulaufs ständig gemessen, und der Zulaufstrom wird mit Hilfe eines elektrischen Regelkreises entsprechend über ein Ventil geregelt. Oder es wird eine Möglichkeit gesucht, durch geschickte Anwendung strömungstechnischer Kenntnisse den Volumenstrom aus der Änderung der Partikelkonzentration heraus selbsttätig so einstellen zu lassen, dass der unerwünschte Betriebszustand des Flutens vermieden wird. Ein Lösungsansatz für diese Problematik soll an dieser Stelle in aller Kürze vorgestellt werden, der auf der zuletzt genannten Idee basiert und in Zusammenarbeit des Autors mit der Fa. FERRUM bereits im Labor und Technikumsmaßstab untersucht wurde. Sie basiert auf dem Prinzip der Dralldrossel.

Aus der Strömungsmechanik ist bekannt, dass der Druckverlust von Drallströmungen mit steigender Partikelkonzentration sinkt. Dieser Effekt wird bei Separatoren mit Düsenaustrag bereits genutzt und ist dort beschrieben (siehe Kap. „Düsenseparator“). In der Anwendung auf die Speisung einer Schubzentrifuge ist der Gedanke jedoch neu.

Wird eine Drallkammer in die Fallleitung aus einer statischen Vorlage geschaltet, ergibt sich ein mit steigender Feststoffkonzentration ansteigender Durchsatz. Schubzentrifugen werden in den meisten Fällen aus einem statischen Eindicker gespeist. Die Drallkammer bietet daher durch ihre Widerstandsänderung mit der Feststoffkonzentration die Möglichkeit, die Schubzentrifuge im idealen Abstand von der Flutgrenze zu betreiben, wenn man die Drallkammer als selbsttätiges Regelventil in die Zulaufleitung schaltet. Die Drallkammer verfügt nicht über bewegliche Teile, sie hat deshalb eine hohe Lebensdauer und benötigt nur geringe Unterhaltskosten. Die Alternative einer Regelung über eine Elektromechanik ist demgegenüber weit weniger wirtschaft-