

## Der Trockenstrahlmahlung wird Dampf gemacht



### Wenn 's um die effiziente Erzeugung adiabater Energie geht...

Sie wissen schon: „Adiabate Energie – das ist jene Energie, die in dem Moment waltet, wenn das Mahlgut zwischen die Energieströme gerät und in Partikel zertrümmert wird... Der Bonstetter Ingenieur hatte so seine Zweifel, ob ein zweistufiges Hochdruckverfahren nahezu immer die ideale Lösung zur Erzeugung adiabater Energie sein kann...

Nehmen wir zum Beispiel an, wir wollten ölfreie Druckluft mit 9 bar produzieren und entscheiden uns dabei für das zweistufige Hochdruckverfahren. Das heißt konkret: In einem ersten Schritt verdichten wir zunächst die Luft (bei einer Temperatur von 180 Grad Celsius) auf 3 bar.

Um jedoch die angestrebten 9 Bar zu erreichen, muß eine weitere Verdichtung in einer zweiten Stufe erfolgen. Weil deren mechanische Umgebung jedoch einer Beanspruchung durch 180 Grad Celsius nicht standhalten kann, muß die Temperatur zunächst in einem eigenen Kühler auf 40 Grad heruntergefahren werden. Auch mit der Folge, dass die hierbei entnommene Wärme unwiederbringlich verloren geht.

Diese Abwärme aber ist nicht nur ein Verlust an erzeugter Energie; schlägt sie sich doch auch in den Betriebskosten für den Energie-Erzeuger (sprich: Kompressor) nieder. Und gilt tatsächlich die Devise, dass letztlich „entscheidend ist, was hinten rauskommt“ – mit nachstehender Formel lässt sich schwarz auf weiß die ganze Schiefelage des Kosten-/Nutzenverhältnisses deutlich machen:

$$E_{\text{ad}} = \frac{k}{k-1} \cdot m \cdot R \cdot T_0 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_e}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

Im vorliegenden Beispiel „erntet“ der Anwender gerade 'mal 55% seiner ursprünglich (in den Kompressor) investierten Energie...

### Die Alternative?

Von der Erzeugung adiabater Energie bis zum Durchbruch in den Nanobereich.

Durch eine Gemeinschaftsentwicklung der Netzsch-Condux Mahltechnik GmbH und der Dr. Nied Consulting entstanden zwei völlig neue Mahlverfahren. Das e-Jet-System™ („e“ wie energy-efficiency, economy, ecology), die Weiterentwicklung des s-Jet-System™ („s“ wie steam, superfine) sowie ein neues Verfahren zur feinsten Windsichtung sind mittlerweile bereits mit Erfolg im industriellen Einsatz.

MIT DER MINIATURISIERUNG von Mahlgut ist das bekanntlich so eine Sache: Gibt man sich mit Teilchengrößen um die 2 (zwei) Micrometer zufrieden, wird man auf das trockene Mahlverfahren setzen. Sind allerdings Partikelgrößen im Nanobereich gefordert, bleibt bisher nur der nasse Weg – mit dem Nachteil, dass für viele Anwendungen dem pulverisierten Produkt wiederum die Nässe entzogen werden muss. Und das kann kosten...

Bleibt also die Frage: Wie kann im trockenen Verfahren – vor allem auch unter ökonomischen Aspekten – die Miniaturisierung des Mahlgutes vorangetrieben werden?

Die Antwort liegt vor: Mit einer Gemeinschaftsentwicklung der Netzsch-Condux Mahltechnik GmbH in Hanau (ein mittelständisches Unternehmen, dem nach eigenem Bekunden sowieso „nichts fein genug sein kann“) und der Dr. Nied Consulting in Bonstetten bei Augsburg.

## Da horchen (nicht nur) Kompressoren-Hersteller auf!

Dr. Ing. Roland Nied plädiert für das einstufige Niederdruckverfahren! Hier wird die Luft - in nur einer Kompressorstufe und bei einer Temperatur von bis zu 225 Grad Celsius - auf max. 4,5 bar verdichtet. „Indem wir auf den Kühlungsprozess verzichten, verlieren wir keine Energie sondern können diese vielmehr in vollem Umfang nutzen“ betont der Consultant. Und Sie werden zustimmen: Das Ergebnis – der Erzeuger-Wirkungsgrad – kann sich sehen lassen: 78%! (Rechnen Sie ruhig nach...) Als entscheidendes Kriterium bleibt jedenfalls festzuhalten:

### 30% Energieersparnis

Der gestiegene Kompressor-Wirkungsgrad beim einstufigen Niederdruckverfahren hat gegenüber dem zweistufigen Hochdruckverfahren ca. 30 Prozent Energieeinsparung zum Ergebnis! - Was nicht heißt, dass einstufige Niederdruckverfahren ab jetzt immer und überall zweistufige Hochdruckverfahren ablösen könnten! Dr. Ing. Roland Nied gibt vielmehr zu bedenken, dass auch Niederdruckverfahren an bestimmte Voraussetzungen gebunden sind. So muss bei den - in den Mahlprozess eingebrachten - Stoffen gewährleistet sein, dass sich ihre Eigenschaften auch unter dem Einfluß hoher Temperaturen (bis zu 225 Grad Celsius) nicht verändern (fast alle anorganischen Stoffe). Zudem muss geklärt werden, dass der spezifische adiabate Energieverbrauch beim Niederdruckverfahren nicht höher als der des Hochdruckverfahrens ausfällt – auch das ist bei vielen anorganischen Stoffen der Fall.

### Trocken in den Nanobereich

Erinnern wir uns: Die Miniaturisierung von Mahlgut erfolgt, indem dieses zwischen (mindestens) zwei Energieströme gerät und bei deren Aufeinandertreffen in viele kleine und kleinste Partikel zertrümmert wird. Die Geschwindigkeiten, unter denen dies alles geschieht, spielen dabei eine entscheidende Rolle. Sie sind es, von denen letztlich abhängt, bis zu welcher Teilchengröße das Mahlgut pulverisiert werden kann... Logische

Folgerung daraus: Wir müssen dem einzelnen Energiestrahle mehr Stoßkraft (Stoßenergie) verleihen. (Apropos: *Stoßenergie! – Stoßenergie ist letztlich nichts anderes als kinetische Energie oder - in der Sprache des Physikers: das Produkt aus der halben Masse der Partikel, multipliziert mit ihrer Geschwindigkeit zum Quadrat...*)

### Die Erhöhung der Stoßenergie ...

ist abhängig von der Steigerung auch der Strahleintrittsgeschwindigkeit. Und diese wiederum löst eine strömungsmechanische Ansaugfähigkeit aus, was heißt: Die Partikel werden vom Energiestrahle regelrecht „angesaugt“, „treten“ in den Strahl „ein“ und werden von diesem beschleunigt – bis zu seiner eigenen, der Energiestrahle-Geschwindigkeit. Das bedeutet aber auch: Die Geschwindigkeit des Partikels ist abhängig von der Geschwindigkeit des Energiestrahls; kann also auch niemals schneller als dieser werden (in Luft etwa max. 550 m/sec).

### ... durch Wasserdampf!

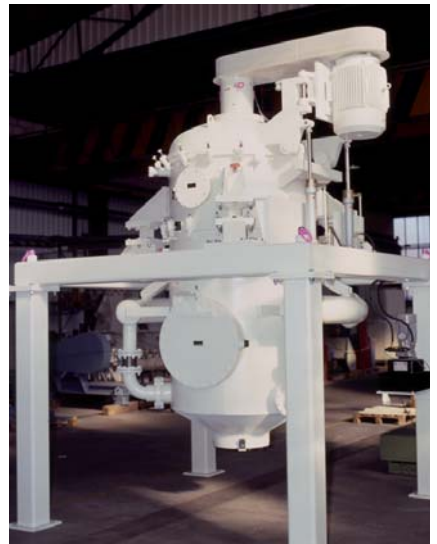
Wie aber kommen wir zu neuen, höheren Geschwindigkeiten des Energiestrahls? – „Wir wechseln die Gasart, setzen ganz bewusst auf Wasserdampf“ sagt Dr. Roland Nied. „In Wasserdampf lassen sich schließlich Strahlgeschwindigkeiten bis zu 1.200m/sec erzielen. Vor allem jedoch: Die kinetische Stoßenergie der Partikel steigt um das Vierfache!“

Sehen wir uns doch einmal die Druckerzeugung in einem gasförmigen Medium an: Ein Kompressor saugt das Gas an und verdichtet es mit dem Ergebnis, dass sich das Gas-Volumen reduziert und dessen Druck steigt. Gleichzeitig entsteht Abwärme, die zwar genutzt werden kann, aber nur bis zu einem bestimmten Grad (sprich: Grenzwert)! Weil – wie wir wissen – bei Beanspruchung einer zweiten Kompressorstufe zwischengekühlt werden muß und so der thermische Energie-Anteil gleich Null ist. Womit deutlich wird, warum die ökonomische Druckerzeugung von Gasen auf einen einstufigen Kompressor (und damit logischerweise auf mögliche Geschwindigkeiten von bis zu 550 m/sec) beschränkt bleiben muß.

## Patentierter H-Düsen von NETZSCH-CONDUX



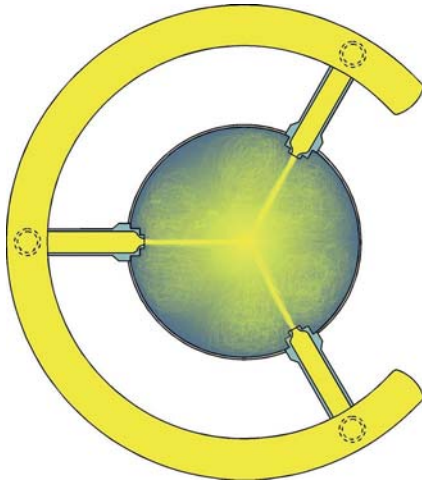
### Fließbettstrahlmühle Typ CGS 100



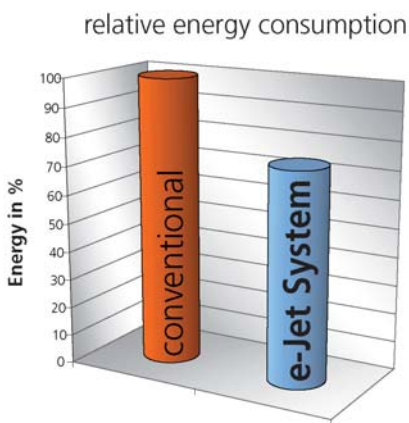
### Fließbettstrahlmühle Typ CGS 71



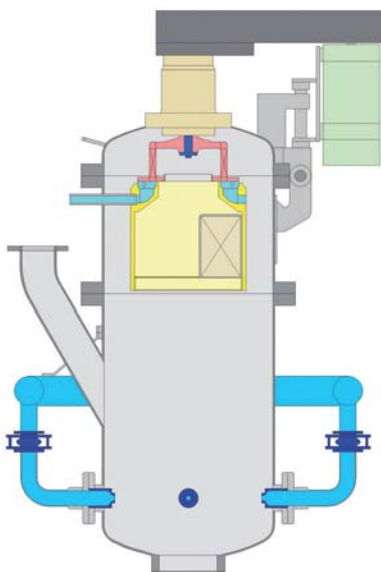
**Typische Düsenanordnung**



**Energieeinsparungen mit dem neuen e-Jet System von NETZSCH-CONDUX**



**Schnittbild der Fließbettstrahlmühle CGS**



Ganz anders die Druckerzeugung mit Hilfe von Wasserdampf: Ein Boiler mit Wasser wird erhitzt... es entsteht Wasserdampf und – mit Hilfe der sog. Speisepumpe – wird im Boiler Überdruck erzielt. Während nun dem Boiler Dampf entnommen wird, ist es wiederum jene Pumpe, die den Flüssigkeitsbehälter mit neuem Wasser „speist“ (und zwar in jener Menge, wie sie als Dampf gerade abgegeben wird).

Jene Energie, die in Form von Wärme dem Wasser-Behälter zugeführt wird; die dafür verantwortlich ist, dass aus dem flüssigen Medium Dampf wird und auch Dampf bleibt – jene Energie (auch Verdunstungsenthalpie genannt) ist zwar für jegliches weitere Procedere verloren. Aber:

**Der Vorteil des flüssigen Mediums**

Flüssigkeiten sind von Natur inkompressibel! Sie behalten ihr Volumen bei, so sehr sie auch Druck ausgesetzt sind. Mit anderen Worten: In einer Flüssigkeit lässt sich viel größerer Druck erzeugen als in einem gasförmigen Medium.

Unsere Speisepumpe erzeugt im Wasserbehälter der Mühle Druck! Nachdem nun aber auf jeden Fall – Stichwort: Verdunstungsenthalpie - Energie-Verlust in Kauf genommen werden muß, wird die Speisepumpe auch mit höchstmöglichem Druck arbeiten...

Bei Gasen liegt der optimale Druck um etwa 3,5 bar Überdruck; bei Dampf um die 150 bar oder größer. Wobei man im Wirkungsgrad bei der Erzeugung von Dampf bereits ab etwa 40 bar in etwa gleichauf liegt mit der Erzeugung von Druckgasen. „Alles was ich hinzufüge, steigert den Gesamtwirkungsgrad meines Systems Dampf“ betont Dr. Nied.

Um jedoch wieder auf die Praxis zurückzukommen: Nachdem also die Energieströme mit erhöhter Stoßkraft aufeinander geprallt sind und die Partikel zwischen sich nanoskalig zerrieben haben, will die Energie nach oben entweichen – um dort das Mahlwerk durch den Windsichter zu verlassen. Dabei „schleppt“ sie Partikel jeglicher Größe, „huckepack“ mit sich.

**Im Konkurrenzkampf: Widerstands- und Fliehkraft**

Während dieser „Reise nach oben“ sind die Partikel der sog. ‚Widerstandskraft‘ ausgesetzt Jener Kraft, die verantwortlich dafür ist, dass die Teilchen in den Windsichter, letztlich zur Austrittsöffnung unterhalb desselben geschaufelt werden. Daß dabei auch die größeren Partikel den Apparat verlassen – das gilt es allerdings zu verhindern! Die Frage ist nur: Wie?

Vergegenwärtigen wir uns: Der Windsichter (ein radial mit Schaufeln besetzter Rotor) dreht sich. Seine Umlaufgeschwindigkeit (bis zu 140 m/sec) wirkt dabei als Fliehkraft auf die Partikel ein. Während diese nun durch die Widerstandskraft (und mit dem Tempo der Umfangsgeschwindigkeit wohlgemerkt) spiralförmig nach innen (im sog. Potenzialwirbel) zur Austrittsöffnung des Rotors geschleppt werden, wirkt die Fliehkraft dem entgegen und versucht die Teilchen nach außen (in den Raum um den Rotor herum) zu transportieren. Den Weg in die Austrittsöffnung und damit zum entsprechenden Filter, schaffen letztlich daher nur Teilchen bis zu einer bestimmten Größe; die – wie anfangs bereits erwähnt – derzeit bei bestenfalls 2 Micrometern liegt.

Nimmt man die Partikel und die auf sie einwirkenden Kräfte genauer unter die Lupe, lässt sich feststellen:

**Widerstandskraft**

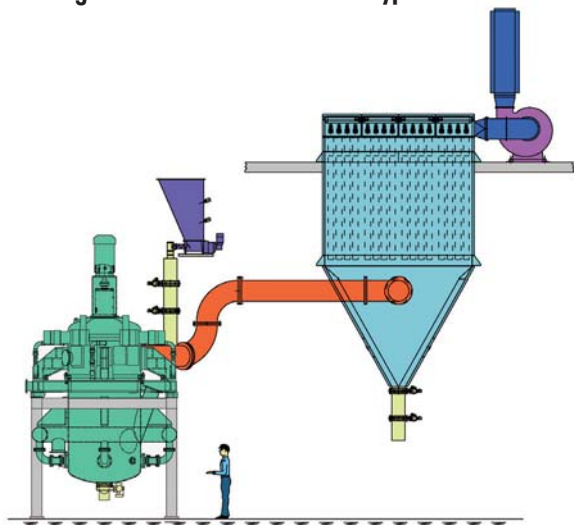
- ist in ihrer Funktion das Ergebnis von
- der Querschnittsfläche des einzelnen Partikels: seinem Durchmesser, seiner Größe
  - der Relativgeschwindigkeit (jene Geschwindigkeit, mit der das Gas am einzelnen Teilchen vorbeiströmt)
  - dem Widerstandsbeiwert (Strömungswiderstand)

Diese zusammenspielenden Faktoren versuchen nun – wie erwähnt - die Teilchen in den Sichter zu schleppen...”

**Fliehkraft**

- ist in ihrer Funktion das Ergebnis von
- der Masse (sprich: dem Gewicht) der Partikel
  - der Umfangsbeschleunigung

## Mahlanlage mit Fließbettstrahlmühle Typ CGS



Das heißt: Je größer die Umlaufgeschwindigkeit und je größer die Masse des Teilchens - desto größer auch die Fliehkraft! Oder anders herum: Je größer die Fliehkraft, desto geringer auch die Möglichkeit – dass die Partikel von der Widerstandskraft nach innen gezogen werden können.

Teilchen über der kritischen Größe verbleiben demnach in der Mühle und können so einem weiteren Mahlprozess unterworfen werden.

### Geschwindigkeiten rücken in den Focus

Auch das ständige Drehen an der Temperschraube, das bislang praktizierte Rezept zur Miniaturisierung des Sichtgutes, es verfängt nicht mehr. Die initiale Umfangsgeschwindigkeit etwa (und damit letztlich die Fliehkraft) lässt sich nicht mehr erhöhen; weil die mechanischen Teile des Sichters dies nicht aushalten würden.

Die Geschwindigkeit des Potenzialwirbels, die spiralförmige Strömung zwischen dem beschauften Rand und der Austrittsöffnung des Windsichters also, sie wäre zwar beliebig steuerbar (indem man den Durchmesser der Austrittsöffnung verengt) nach der Formel: Umfangsgeschwindigkeit mal Radius = eine Konstante. (In das aktuelle Beispiel übersetzt, hieße dies: Wird der Radius kleiner, vergrößert sich die Umfangsgeschwindigkeit = das Produkt in seinem Gesamtwert bleibt konstant.)

Die Vorstellung muß dennoch Theorie bleiben. Weil: Gase (und Luft ist nun 'mal ein Gasgemisch) lassen sich nicht

ohne weiteres über Schallgeschwindigkeit beschleunigen. Hier setzt uns also schon die Natur eine Grenze...

Abgesehen davon: Alle Gase sind kompressible Medien. Und enorm viel Druck wäre vonnöten, um die gewünschten hohen Geschwindigkeiten erzeugen zu können. Druckerzeugung aber kostet Energie und will bezahlt sein. Auch dies ist übrigens mit ein Grund dafür, warum in der Praxis bei der Erzeugung von Fliehkraft mit Geschwindigkeiten von maximal 200m/sec gearbeitet wird.

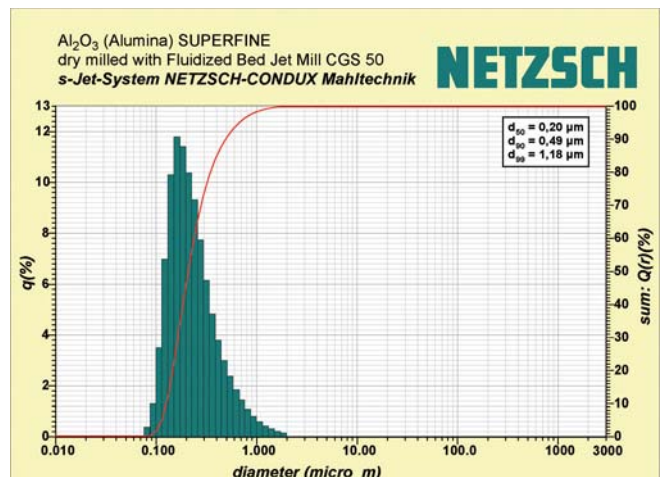
### Was also tun?

#### „Die Antwort ist einfach“

-sagt Dr. Nied. „Wir verwenden Gase, die eine höhere Schallgeschwindigkeit als Luft aufweisen. Oder Dämpfe, die ja die gleichen fühlbaren Eigenschaften wie ein Gas besitzen. Die Schallgeschwindigkeit im Wasserdampf beispielsweise beträgt etwa 500m/sec (Anmerkung: Luft 330m/sec). Bei Wasserstoff oder Helium liegen die Schallgeschwindigkeiten noch höher.“

Dank der so möglich werdenden wesentlich höheren Umfangsgeschwindigkeit der Gasströmung steigert sich logischerweise natürlich auch die Beschleunigung der Partikel. Wenn beispielsweise die Umfangsgeschwindigkeit von 200 auf 300 m/sec steigt, so bedeutet das immerhin – umgerechnet - eine Steigerung um den Faktor (zum Quadrat) von 2,25. Das heißt: Allein durch die Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit erhöht sich auch die wirksame Fliehbeschleunigung um das 2,25fache.

## Mögliche superfeine Pulver durch Trockenmahlung mit dem neuen e-Jet System von NETZSCH-CONDUX



### Der entscheidende Schritt

Fliehkraft wiederum ist Masse x Beschleunigung - was bedeutet: Die Fliehkraft lässt sich um denselben Wert steigern. Damit aber ist der entscheidende Schritt getan, der es nun ermöglicht, die Grenze zum Nanometerbereich zu überwinden.

### Letztlich, nebenbei gesagt...

Mit Ihren jüngsten Arbeiten zum aktuellen Thema sensibilisiert die Dr. Nied Consulting im übrigen nicht nur Techniker, sondern zunehmend auch die ökonomisch Verantwortlichen unter den Anwendern. Denn erstaunlich ist schon, dass sich die Praxis in der Vergangenheit nur verhalten für – beispielsweise – Alternativen zum zweistufigen Hochdruckverfahren interessierte. Eine Vernachlässigung betriebswirtschaftlicher Fakten zu rechtfertigen dürfte jetzt noch schwerer fallen, nachdem die Unternehmensberatung ihrer Klientel jetzt eine Formel in die Hand gibt, mit der sich – nicht nur physikalischer - Gewinn oder Verlust, sondern gerade auch das daraus resultierende monetäre Plus oder Minus exakt kalkulieren lassen... Zumal die Energieeinsparung im Niederdruckverfahren wie auch die Erzeugung nanoskaliger Teilchen im Wasserdampfbetrieb ihre Feuerprobe bereits bestanden haben. In betriebsproben Anlagen bei Kunden der Netzsch-Condux Mahltechnik GmbH.

Joachim Gerstenberg  
im Dialog mit Dr. Roland Nied