

Hart bleiben

Verschleißschutztechnik in schüttguttechnischen Anlagen

Verschleiß ist neben der Produktionsleistung und dem Energieverbrauch von entscheidender wirtschaftlicher Bedeutung beim Betrieb einer schüttguttechnischen Anlage. Er bestimmt ihre Lebensdauer. Die Minimierung von Verschleiß in schüttguttechnischen Anlagen erfolgt hauptsächlich durch verfahrenstechnische und konstruktive Maßnahmen sowie durch den Einsatz entsprechender Werkstoffe. Bei Planung solcher Maßnahmen müssen immer ihre Auswirkungen auf die Leistung der Anlage berücksichtigt werden.

Dr. Ulrich Muschelknautz, Geschäftsführer MK Engineering

Unter Verschleiß versteht man den Werkstoffabtrag an der Oberfläche eines Maschinenteils unter überwiegend mechanischer Einwirkung, d.h. unter Einwirkung von Kräften und Relativbewegungen. Die Tribologie vermittelt Kenntnisse über das Entstehen von Reibung und Verschleiß und zeigt Korrelationen zu Werkstoffeigenschaften und Beanspruchungsparametern auf. Sie liefert damit Hinweise für Optimierung, Zustandsbeschreibung – im Sinne der Schadensfrüherkennung – und Lebensdauerabschätzung sowie Schadensanalyse von Systemen.

Eine tribologische Beanspruchung ergibt sich immer aus den kinematischen Verhältnissen und der Wechselwirkung mehrerer Stoffe, sei es anlässlich einer Werkstoffpaarung oder beim Kontakt eines Bauteils mit einem Abrasivstoff. Verschleiß ist aus diesem Grund nicht nur durch die beteiligten Stoffe (Grundkörper, Gegenkörper, Zwischenstoff), sondern auch durch die Art der Beanspruchung (Normalkraft, Relativgeschwindigkeit, Temperatur, Beanspruchungsdauer) bestimmt.

Die Verschleißarten werden nach den beteiligten Stoffen unterteilt in

- Maschinenelementpaarungen (Grundkörper/Gegenkörper) ungeschmiert und geschmiert
- durch Abrasivstoffe beanspruchte Kom-

ponenten (Grundkörper/Gegenstoff bzw. Grundkörper/Gegenkörper/Zwischenstoff)

und diese beiden Gruppen nochmals gegliedert nach den kinematischen Gegebenheiten Gleiten, Rollen oder Wälzen, Stoßen sowie Strömen.

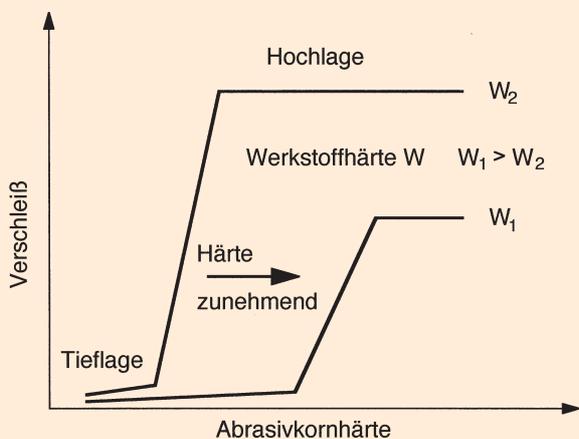
Die Energieumsetzung und der Werkstoffabtrag erfolgen nach den sogenannten Verschleißmechanismen:

- Adhäsion: Ausbildung von Grenzflächen;
- Abrasion: Materialabtrag durch ritzende Beanspruchung;
- tribochemische Reaktion: Entstehung von Reaktionsprodukten durch tribologische Beanspruchung bei chemischer Reaktion;
- Oberflächenzerrüttung: Ermüdung und Rissbildung im Oberflächenbereich durch tribologische Wechselbeanspruchungen.

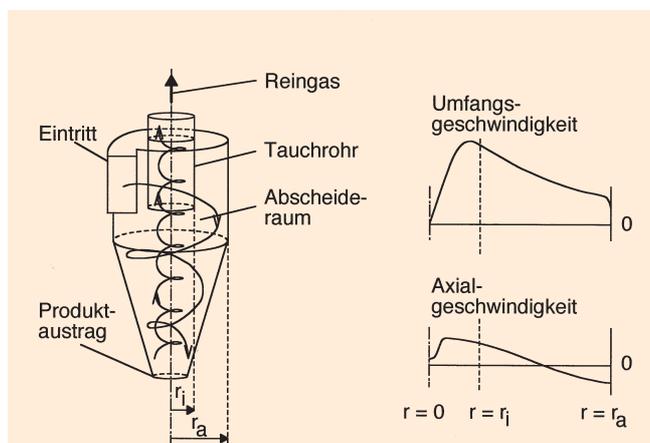
Einflussgrößen auf den Verschleiß

In schüttguttechnischen Anlagen wird Verschleiß überwiegend durch die Einwirkung von Abrasivstoffen hervorgerufen. Die wichtigsten Einflussgrößen auf den Verschleiß in schüttguttechnischen Anlagen sind

- Härten des abrasiven Schüttgutes sowie des durch Abrasion beanspruchten Werkstoffes der Apparatewände (Bild 1);
- Relativgeschwindigkeit zwischen Werkstoff und Abrasivstoff;



1: Abhängigkeit des Verschleißes von der Abrasivkornhärte und von der Werkstoffhärte



2: Strömung und Geschwindigkeitsprofil in einem Zyklon mit tangentialen Einlauf

- Korngröße und -form des Abrasivstoffes;
- Anpresskraft, mit welcher der Abrasivstoff auf den Werkstoff gedrückt wird;
- Dauer der Beanspruchung;
- Gasatmosphäre und Temperatur;
- Anstrahlwinkel bei Überströmung eines Werkstoffes durch einen mit Feststoff beladenen Gas- oder Flüssigkeitsstrom;
- Konzentration des Abrasivstoffes im Gas-/ Flüssigkeitsstrom.

Zur Bestimmung der Härte eines Werkstoffes wird der Widerstand der Werkstoffoberfläche gegen plastische Verformung durch einen genormten Eindringkörper dadurch ermittelt, dass der bleibende Eindruck vermessen wird. Je nach Prüfverfahren wird als Eindringkörper eine Kugel aus Sinterhartmetall (Brinell), eine Diamantpyramide (Vickers, Knoop) oder ein Diamantkegel (Rockwell) verwendet. Der Eindringwiderstand wird als Verhältnis der Prüfkraft zur Oberfläche des Eindrucks (Brinellhärte HB, Vickershärte HV, Knoophärte) oder als bleibende Eindringtiefe des Eindringkörpers bestimmt (Rockwellhärte HR).

In der Regel gilt: Je härter der Abrasivstoff im Vergleich zu dem durch Abrasion beanspruchten Werkstoff ist, desto größer ist der Verschleiß. Verschleiß tritt jedoch nicht nur in der Hochlage (Abrasivstoff härter als Werkstoff,) sondern auch in der Tieflage (Werkstoff härter als Abrasivstoff) auf (Bild 1). Bei Strahlverschleiß wächst der Verschleiß überproportional mit der Relativgeschwindigkeit v , üblicherweise mit der 2. bis 3. Potenz von v . Der Verschleiß wächst mit der Anpresskraft, ebenso mit der Dauer der Beanspruchung. Nützliche Hinweise zur

Abschätzung der spezifischen Erosion ϵ , d.h. des Massenabtrags pro Masse der Abrasivpartikel, sowie der Lebensdauer t für Apparate mit gekrümmten Gas-Feststoff-Strömungen wie Krümmer oder Zyklone geben Versuche mit Krümmern von Mills & Mason.

Die Lebensdauer t ist dabei die Dauer bis zur Entstehung eines Loches, das bedeutet also bis zum Eintritt der Funktionsuntüchtigkeit. Es werden Beziehungen für die Abhängigkeiten von der Geschwindigkeit, der Beladung und der Korngröße der Abrasivpartikel angegeben:

- Einfluss der Gasgeschwindigkeit v :
 $\epsilon \propto (v^2 \dots v^3)$, $t \propto v^{-3,5}$
- Einfluss der Staubbeladung μ (kg Feststoff je kg Gas): $\epsilon \propto \mu^{-0,16}$, $t \propto \mu^{-1,58}$
- Einfluss der Korngröße d :
 ϵ wächst mit d für $d < 50 \mu\text{m}$,
 $\epsilon \approx \text{const.}$, $t \propto d^{0,45}$ für $d > 50 \mu\text{m}$.

Bei der Anwendung der angegebenen Korrelationen auf ein praktisches Problem sind immer die Bedingungen des Gesamtsystems zu sehen, die im Versuch meist nur unvollständig abgebildet werden können. Beispielsweise gilt entsprechend dem Versuch, dass ein weicherer Korn einen Werkstoff weniger stark verschleißt als ein härteres Korn. Es zerfällt aber infolge von Abrasion auch schneller in kleinere Fragmente als das härtere Korn. Das entstehende Feinkorn kann im Bereich von Wirbeln zu größerem Verschleiß führen als das ursprüngliche, nicht fragmentierte Korn. Aus den allgemeinen Gesetzmäßigkeiten für Erosion in schüttguttechnischen Anlagen lassen sich nützliche Erkenntnisse für die Auslegung und Fertigung von Zyklonen gewinnen.

KOMPAKT

Verschleißschutz in schüttguttechnischen Anlagen

Tribologische Gesetzmäßigkeiten für den Verschleiß von Werkstoffen durch Schüttgüter liefern für die Auslegung und Berechnung von schüttguttechnischen Anlagen ein nützliches Hilfsmittel zur Minimierung von deren Verschleiß. Die Lebensdauer wird immer durch den vom Verschleiß am stärksten betroffenen Bereich bestimmt. Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer müssen daher gezielt den Verschleiß an den am stärksten betroffenen Stellen minimieren. Am Beispiel von Zyklonen wurden verfahrenstechnische Maßnahmen zur Verschleißminimierung aufgezeigt: Minimierung der Geschwindigkeiten an den Verschleißstellen; Vermeidung von Ecken und Kanten oder aus der Apparatewand herausstehenden „Leisten“; Vermeidung oder Reduzierung von lokal großen Staubkonzentrationen. Konstruktiv kann Verschleiß durch den Einsatz von austauschbaren Verschleißschutzblechen bzw. Verschleißschutzhemden sowie durch die Realisierung großer Krümmungsradien minimiert werden. Fertigungstechnisch ist neben der Wahl von Werkstoffen mit möglichst hoher Verschleißresistenz von Bedeutung, dass die durch Erosion betroffenen Werkstoffe auch eine möglichst gleichmäßige Verschleißresistenz haben, insbesondere an Stellen mit abrupten Richtungsänderungen der Strömung.

Bild 2 veranschaulicht Aufbau und Wirkungsweise eines Zyklons mit tangentialen Einlauf für den zu trennenden Gas-Feststoff-Strom. Im zylindrischen und weiter unten im konischen Teil des Zyklons wird der Feststoff durch Fliehkraftwirkung vom Gasstrom separiert und der unten liegenden Produktausgangsöffnung zugeführt. Der von Feststoff weitestgehend gereinigte Gasstrom verlässt den Zyklon schließlich durch das im Zyklondeckel installierte Tauchrohr.

Den Verschleiß in Zyklonen minimieren

Zyklone kommen in den unterschiedlichsten Bauformen und Baugrößen mit Durchmesser zwischen wenigen Millimetern und rund 8 m sowie in einem weiten Betriebsbereich mit Temperaturen bis 1300 °C und Drücken bis über 60 bar zum Einsatz. Sie werden zur Abscheidung von Stäuben mit Medianwerten $d_{50} \geq 2 \mu\text{m}$ eingesetzt.

Einen guten Einblick in das Verhalten der Gas-Feststoff-Strömung in einem Zyklon bei unterschiedlichen Eintrittsstaubbelastungen μ gibt **Bild 3** am Beispiel eines Zyklons mit 800 mm Durchmesser: Mit steigender Staubbelastung wird ein zunehmender Anteil der Staubfracht unmittelbar nach Eintritt in den Zyklon an der Wand abgeschieden. Dies wird damit erklärt, dass die Zyklonwirbelströmung nur eine begrenzte Menge an Staub tragen kann (analog zur Gasströmung beim pneumatischen Transport). Der überzählige Staubanteil fällt sofort aus. Bei höheren Belastungen $\mu > 0,5$ überwiegt dieser Abscheidemechanismus die Abscheidung im

inneren Wirbel des Zyklons bei weitem. Daraus resultiert eine hohe abrasive Beanspruchung des Zyklonwandabschnitts, der der Eintrittsöffnung gegenüberliegt, insbesondere bei mittleren und hohen Beladungen.

Versuche mit unterschiedlichen Zyklon-geometrien und Zyklongrößen verdeutlichen die typischen Verschleißzonen in einem Zyklon. Neben dem durch die Theorie vorhergesagten verstärkten Verschleiß im Eintrittsbereich tritt ein weiteres Verschleißmaximum im unteren Konus auf. Es ist eine Folge der hohen Umfangsgeschwindigkeiten im Zyklonfuß: Entsprechend **Bild 2** nimmt die Umfangsgeschwindigkeit längs des Zyklonradius von außen nach innen zu, bis sie etwa beim Tauchrohrradius r_1 ihr Maximum erreicht. Bei noch kleineren Radien fällt sie stark ab und wird im Zentrum des Wirbels Null. Das Profil der Umfangsgeschwindigkeit ist praktisch unabhängig von der axialen Position unterhalb der Tauchrohröffnung. Daher wird die äußere Umfangsgeschwindigkeit an der Zyklonwand u_w mit abnehmender Höhe im Zyklonkonus größer und im Bereich der Wirbelumkehr im Zyklonfuß maximal. Auf die dort rotierenden Teilchen wirkt daher eine große Zentrifugalkraft. Der Verschleiß ist an dieser Stelle somit maximal.

Versuche verdeutlichen auch die starke Abhängigkeit des Verschleißes von der Härte, von der Partikeldichte und von der Partikelgröße des Abrasivkorns sowie von den im Zyklon herrschenden Geschwindigkeiten.

Bild 4 zeigt Verschleißschäden im unteren Konus eines Zyklons zur Abscheidung von Kokspartikeln aus einem Luft-Dampf-Gemisch. Auch im Zyklonfuß eingesetzte Wir-



4: Verschleiß im Konus eines Entkokungs-Gaszyklons. Leck im Konus (oben), erodierte Wirbelbrecher (unten)

belbrecher, die die hohe Umfangsgeschwindigkeit an dieser Stelle reduzieren sollten, wurden durch Erosion rasch unwirksam gemacht.

Abhilfe schaffen Verschleißschutzbleche

Zum Schutz der Zyklonwand im Eintrittsbereich werden in kleinen und mittelgroßen Zyklonen – Durchmesser bis etwa 3 m – austauschbare Verschleißschutzbleche eingesetzt. Oft wird auch der gesamte zylindrische Teil des Zyklons mit einem austauschbaren Verschleißschutzhemd ausgerüstet.

Bei ungeeigneter Auslegung kann es im Zyklonkonus zu einem Rotieren der Feststoffströmen auf konstanter Höhe kommen. Dadurch können schwere Verschleißschäden entstehen, selbst wenn ein für den Normalbetrieb, d.h. den Betrieb mit spiralförmigem Austrag der Feststoffströmen (Bild 3) ausreichender Verschleißschutz eingesetzt wird. Starke Verschleißschäden treten dann nur im mittleren oder im oberen Konusbereich auf. Der Verschleiß im unteren Konus und im zylindrischen Bereich ist dagegen nur gering.

Dieser Fall tritt ein, wenn die an einem Partikel angreifenden Kraftkomponenten parallel zur Konuswand auf einer bestimmten Höhe im Konus im Gleichgewicht sind. Die beteiligten Kraftkomponenten sind dabei die nach oben gerichtete Komponente der Zentrifugalkraft und die Summe der nach unten gerichteten Komponenten der Driftkraft und der Schwerkraft. Abhilfe kann hier durch eine Optimierung der Konusgeometrie geschaffen werden.

3: Staubströmen in einem Zyklon ($r/r_1 = 400/143$) mit Waschpulver ($d_{50} = 500 \mu\text{m}$) bei verschiedenen Eintrittsbelastungen μ : a) $\mu = 0,01$; b) $\mu = 0,1$; c) $\mu = 1$; d) $\mu = 10$

